

Fließgewässervermessung mittels UAV-basierter Laserbathymetrie im Produktiveinsatz



Large-scale river survey using UAV-based laser bathymetry in production use

Gottfried Mandlburger, Wien, David Monetti, Siegendorf und Christian Greifeneder, Linz

Kurzfassung

Durch die Entwicklung von kompakten und leichten topo-bathymetrischen Laserscannern, die auch auf unbemannte Flugplattformen integriert werden können, hat sich das Anwendungsfeld der Airborne Laserbathymetrie (ALB) wesentlich erweitert. Mit aktuellen Sensoren lassen sich hohe Punktdichten von mehr als 100 Punkten/m² und vergleichsweise große Eindringtiefen von mehr als der 2-fachen Secchi-Tiefe erzielen. In diesem Beitrag berichten wir vom Einsatz von UAV-ALB an drei oberösterreichischen Flüssen (Waldaist, Ager und Traun), durchgeführt durch die Skyability GmbH im Auftrag des Landes Oberösterreich. Wir stellen den Sensor und den Workflow zur Datenverarbeitung vor. Es hat sich gezeigt, dass das Gewässerbett mit einem Vollständigkeitsgrad von 99 % erfasst wurde. Gegenüber terrestrisch gemessenen Referenzprofilen konnte eine absolute Höhengenaugigkeit von besser als 15 cm für 95 % aller Kontrollpunkte nachgewiesen werden, womit auch der strenge Exclusive Order Standard der IHO erfüllt ist. UAV-ALB stellt damit eine effiziente und präzise Methode zur Erfassung von Fließgewässern mittlerer Größe dar mit zahlreichen Anwendungen in der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung, Elektrizitätswirtschaft, Gefahrenzonenplanung, Gewässerökologie und Unterwasserarchäologie.

Schlüsselwörter: Laser Bathymetrie, UAV-LiDAR, Flussvermessung, Gewässernetz, Wasserlauf-DGM

Abstract

The development of compact and lightweight topo-bathymetric laser scanners, which can also be integrated on unmanned aerial platforms, has significantly expanded the application field of airborne laser bathymetry (ALB). With current sensors, high point densities of more than 100 points/m² and comparatively large penetration depths of more than twice the Secchi depth can be achieved. In this paper we report on the deployment of UAV-ALB on three Upper Austrian rivers (Waldaist, Ager and Traun) conducted by Skyability GmbH on behalf of the province of Upper Austria. We present the sensor concept and the workflow for data processing. Data analysis revealed that the riverbed was recorded with a completeness level of 99 %. Compared to terrestrially measured reference profiles, an absolute height accuracy of better than 15 cm could be demonstrated for 95 % of all control points, thus also fulfilling the strict Exclusive Order Standard of the IHO. UAV-ALB thus represents an efficient and precise method for the detection of medium sized streams with numerous applications in water and navigation management, electricity industry, hazard zone planning, hydro-ecology and under water archaeology.

Keywords: Laser bathymetry, UAV-LiDAR, river survey, watercourse network, watercourse DTM

1. Einleitung

Vor dem Hintergrund des Klimawandels und dessen Auswirkungen wie die Häufung von Hochwasserereignissen einerseits und zunehmende Wasserknappheit andererseits kommt der präzisen Erfassung und Modellierung der Unterwassertopographie von Binnengewässern im Allgemeinen und Fließgewässern im Speziellen eine steigende Bedeutung zu. Genaue Sohlformen werden als Basis für Hochwassersimulationen, aber auch als Grundlage für ökologische Fragestellungen wie Flussrenaturierung und Habitatmodellierung sowie zum Monitoring fluvialer Änderungsprozesse benötigt [14, 2, 3, 9]. Während hydroakustische Methoden für die Vermessung tiefer und trüber

Gewässer (Seen, große Flüsse wie z.B. Traunsee, Neusiedler See, Donau, Inn) prädestiniert sind [10, 11], hat sich in den vergangenen 10–15 Jahren flugzeuggetragene Laserbathymetrie (engl. Airborne Laser Bathymetry, ALB) immer mehr als Alternative für die hochauflösende Erfassung von flachen und relativ klaren Gewässern empfohlen [15, 14, 2, 3, 21, 22, 30]. Bei tiefen Gewässern mit großflächigem Uferbereich kommen auch kombinierte Ansätze zum Einsatz, bei welchen der flache Uferbereich mit ALB und die tieferen Abschnitte mit Echolot erfasst werden. Ein aktuelles Beispiel dafür ist die Neuvermessung des Bodensees im Rahmen des Projekts „Tiefenschärfe“ [32].

Während topographisches Airborne Laserscanning (ALS) als Stand der Technik für die landesweite Geländedatenerfassung angesehen werden kann [29] und einige Länder in Europa bzw. Bundesländer innerhalb von Österreich ALS Daten auch bereits in regelmäßigen Zyklen erfassen [1, 5], gilt das für die Laserbathymetrie nicht im selben Maße. Die Gründe dafür sind vielfältig: Einerseits ist die Datenauswertung komplexer, da für eine präzise 3D-Punktbestimmung die Strahlbrechung an der Luft-Wasser-Grenzschicht berücksichtigt werden muss, was einen zusätzlichen Aufwand für die Detektion und Modellierung der Wasseroberfläche mit sich bringt. Andererseits kann die in der Laserbathymetrie verwendete Laserstrahlung im sichtbaren, grünen Bereich des elektro-magnetischen Spektrums aufgrund der Augensicherheit nicht so stark gebündelt werden wie die infrarote Strahlung beim topographischen Laserscanning [23, 26]. Unter den daraus resultierenden größeren Laserfootprints von typischerweise 50–60 cm Durchmesser leidet die räumliche Auflösung und damit der Detailreichtum der Flächenbeschreibung bzw. des Digitalen Geländemodells (DGM) bzw. Oberflächenmodells (DOM). Und schließlich werden wegen der notwendigen Klarheit der erfassten Gewässer erhöhte Anforderungen an die Umweltbedingungen während der Befliegung gestellt. Erfolgt die Erfassung bei suboptimaler Gewässertrübung, zieht dies eine geringere Eindringtiefe mit sich, was dazu führen kann, dass tiefe Sohlbereiche nicht erfasst werden können und Datenlücken entstehen.

All diese Gründe haben zu Vorbehalten bei den Nutzern bzw. Anwendern geführt, was wiederum zur Folge hat, dass Laserbathymetrie in unseren Breiten mit wenigen Ausnahmen [4] bis dato eher punktuell und nicht systematisch eingesetzt wird. Während bis vor einigen Jahren bathymetrische Laserscanner ausschließlich von bemannten Plattformen (Flugzeug, Helikopter, Gyrocopter) betrieben werden konnten [11, 15], sind heute auch kompakte Laserscanner verfügbar, die sowohl auf bemannten als auch auf unbemannten Plattformen integriert werden können [21]. Vor allem beim Einsatz auf unbemannten Flugsystemen (engl., Unmanned Aerial Vehicle, UAV) ergibt sich durch die typischerweise geringe Flughöhe von etwa 50–120 m über Grund ein deutlich kleinerer Laserabtafleck und damit potenziell eine höhere räumliche Auflösung. Aufgrund der geringeren Messdistanz ist aber auch die Signaldämpfung in der Atmosphäre deutlich geringer und es steht

effektiv mehr Signalstärke für die Durchdringung des Wasserkörpers zur Verfügung. Das maximale Eindringvermögen von bathymetrischen Laserscannern wird dabei in Vielfachen der Secchi-Tiefe¹ [6] angegeben und liegt für topo-bathymetrische Flugzeuglaserscanner in etwa bei der 1.5-fachen Secchi-Tiefe. Dem gegenüber weisen moderne UAV-basierte Laserbathymetriesensoren ein Eindringvermögen im Bereich der 2–3-fachen Secchi-Tiefe auf [20].

Auf Basis dieser technologischen Neuerungen ist daher die Frage nach den Möglichkeiten und Grenzen des Einsatzes von Laserbathymetrie im großflächigen Produktiveinsatz neu zu stellen und neu zu bewerten. Die Abteilung Geoinformation und Liegenschaft (GeoL) beim Amt der Oö. Landesregierung verfolgt die Einsatzmöglichkeiten und Entwicklung von Laserbathymetrie bereits seit Jahren. Im Jahre 2011 erfolgte erstmalig eine Erfassung von zwei oberösterreichischen Gewässern mittels ALB. Die Befliegung erfolgte dabei mit dem topo-bathymetrischen Flugzeuglaserscanner *RIEGL VQ-820-G* [24] und einer deutlich geringeren Punktdichte als dies heute möglich ist.

Vor allem in einer lückenlosen und flächigen Erfassung der morphologisch relevanten Strukturen von Fließgewässern zeigt sich enormes Potential von ALB z.B. für Hochwassersimulationen. Bisher musste die Gewässerbettmodellierung bei Fließgewässern meist ohne flächenhafte Sohlaufnahmen auskommen. In der Regel erfolgte die Erfassung der Gewässersohle mittels terrestrischer Querprofilmessungen in einem Längsabstand von rund 50–150 m. Während für die Vorländer flächenhafte Geländedaten aus topographischem Airborne Laserscanning herangezogen werden konnten, musste die Flusssohle zwischen den Querprofilaufnahmen interpoliert werden. Morphologisch kleinräumige Strukturen wurden somit oftmals nicht erfasst.

Wesentlich für einen erfolgreichen Einsatz von ALB ist des Weiteren, dass neben den wasserbenetzten Bereichen im gesamten Uferbord eine gute Vegetationsdurchdringung gewährleistet wird, d.h. dass wesentliche Geländestrukturen wie Geländekanten ebenso entsprechend abgebildet werden. Gerade bei diesem Aspekt waren die ALB-Ergebnisse aufgrund des relativ großen

1) Die Secchi-Tiefe (Sichttiefe) ist ein empirisches Maß für die Gewässertrübung und wird gemessen, indem eine 20 cm große Scheibe mit jeweils zwei weißen und schwarzen Quadranten vom Boot aus an einem Seil ins Wasser gesenkt wird, bis die Scheibe nicht mehr sichtbar ist.



Abb. 1: Topo-bathymetrisches Laserscanningsystem VQ-840-G integriert auf Oktokopter UAV Plattform

Laserfootprints von 50–60 cm in der Vergangenheit nicht immer zufriedenstellend, wobei gerade die Erfassung des gesamten Uferbords mit nur einer Messmethodik einen großen Vorteil in Bezug auf Qualität und Kosteneffizienz bedeuten würde. Gewässer mit einer Breite von rund 100 m und einer Tiefe von einigen Metern wie beispielsweise die Traun oder die Salzach mussten zumeist mittels hybrider Messverfahren (Echolotung und Stangenpeilung an den Rändern) erfasst werden. Während die Stangenpeilung bei Niedrigwasser durchgeführt wird, hat die Echolotung bei mittlerer Wasserführung zu erfolgen, um Überlappungsbereiche zur Qualitätskontrolle zu erhalten. Darüber hinaus sollten sich schwer zugängliche Bereiche wie Täler oder Schluchten unter anderem wegen der GNSS-Abschattungsproblematik mittels ALB effizienter erfassen lassen. Unabhängig von der Messmethodik ist jedenfalls eine Lage- und Höhen Genauigkeit von < 5 cm zu erreichen.

Vor diesem Hintergrund leiten sich die Forschungsfragen ab, ob (i) moderne UAV-basierte topo-bathymetrischen Laserscanner für die oben genannten Anwendungsfälle bei Flüssen mit moderater Tiefe und relativ klarem Wasser eine vollständige Erfassung des Gewässerbetts und des Uferbereichs erlauben und ob (ii) die Genauigkeit den gestellten Anforderungen entsprechen. Der Rest des Artikels ist wie folgt gegliedert: In Abschnitt 2 wird das eingesetzte topo-bathymetrische UAV-Laserscanningsystem (RIEGL VQ-840-G) beschrieben. Mit diesem System erfasste die Skyability GmbH im Frühjahr 2021 und 2022

im Auftrag des Landes Oberösterreich drei Flüsse bzw. Flussabschnitte (Waldaist, Ager, Traun). Die Untersuchungsgebiete und Datensätze sind in Abschnitt 3 beschrieben. Abschnitt 4 beschreibt den gesamten Arbeitsablauf einer bathymetrischen UAV-Laserscanningkampagne. Die an den drei Flüssen erzielten Ergebnisse werden im Abschnitt 5 präsentiert und anschließend im Abschnitt 6 diskutiert und bewertet. Der Artikel endet mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick in Abschnitt 7.

2. Sensor

Zurzeit gibt es erst relativ wenige kompakte und leichte bathymetrische Laserscanner. Für die in diesem Artikel analysierten Befliegungen stand ein System der Firma RIEGL Laser Measurement System (VQ-840-G) zur Verfügung. Für eine detaillierte Beschreibung des Systems sei auf [20] verwiesen. Die grundsätzliche Funktionsweise und die wesentlichen Parameter sind im Folgenden kurz zusammengefasst.

Der RIEGL VQ-840-G [27] ist ein integriertes, kompaktes topo-bathymetrisches Laserscanningsystem mit einer werkseitig kalibrierten IMU/GNSS-Einheit und einer Kamera, wodurch ein komplettes luftgestütztes Laserscanningsystem realisiert wird (vgl. Abbildung 1). Der Sensor wiegt 12 kg und kann daher auf verschiedenen Plattformen einschließlich UAVs installiert werden. Der Laserscanner besteht aus einem frequenzverdoppelten Infrarot-Laser, der sehr kurze Laserpulse (Pulsdauer: ca. 1.5 ns) mit einer Wellenlänge

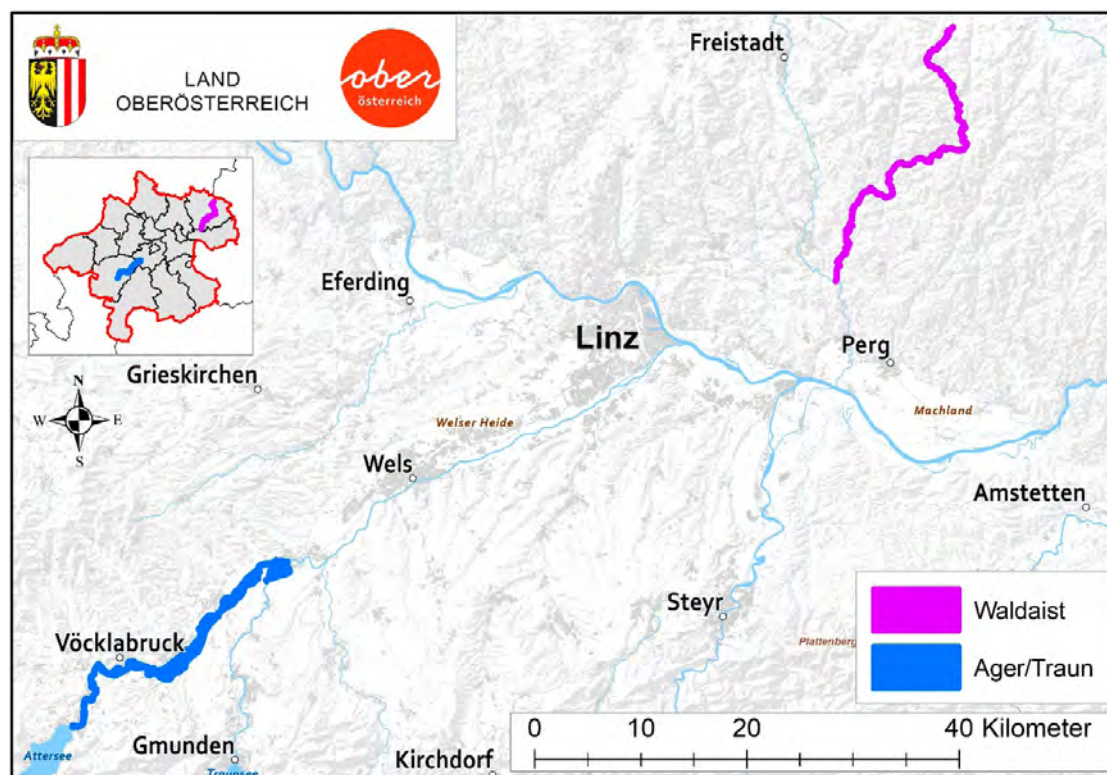


Abb. 2: ALB Untersuchungsgebiete in Oberösterreich

von 532 nm und einer Pulswiederholrate (PRR) von 50–200 kHz aussendet. Auf der Empfängerseite werden die eingehenden optischen Echosignale in ein elektrisches Signal umgewandelt, das mit 2 Gigasamples pro Sekunde digitalisiert wird. Die Aufweitung des Laserstrahls (beam divergence) kann zwischen 1–6 mrad gewählt werden, um eine konstante Energiedichte am Boden für verschiedene Flughöhen zu ermöglichen und so einen Ausgleich zwischen augensicherem Betrieb und räumlicher Auflösung zu schaffen. Das Gesichtsfeld (iFOV, instantaneous Field-Of-View) des Empfängers kann zwischen 3–18 mrad gewählt werden. Dies ermöglicht ein ausgewogenes Verhältnis zwischen räumlicher Auflösung und maximaler Tiefenerfassung. Die Strahlablenkung erfolgt mit einem Palmer-Scanner, der ein nahezu elliptisches Scanmuster auf dem Boden erzeugt. Der Scanbereich beträgt 20° quer und 14° entlang der Flugrichtung, so dass die Variation der auf die Wasseroberfläche auftreffenden Einfallswinkel gering ist. Die Messung der Signallaufzeit basiert an Bord auf einer Online-Wellenformverarbeitung des digitalisierten Echosignals. Darüber hinaus können die digitalisierten Wellenformen für eine

Offline-Wellenformanalyse auf Festplatte gespeichert werden. Für jeden Laserschuss werden Echowellenformblöcke mit einer Länge von bis zu 75 m gespeichert, ohne dass eine vorherige Zielerfassung erforderlich ist. Dies eröffnet Möglichkeiten in der Nachverarbeitung wie das Stapeln von Wellenformen sowie die Verwendung unterschiedlicher Detektionsparameter oder -algorithmen zur Wellenformanalyse. Die Tiefenmessperformance des Instruments liegt im Bereich der 2-fachen Secchi-Tiefe für Einzelmessungen, d.h. ohne Wellenformstapelung.

3. Untersuchungsgebiet und Datensätze

In den Jahren 2021 und 2022 erfolgte die Erfassung der Waldaist sowie der Ager und eines Abschnittes der Traun mittels UAV-ALB. Dabei fungierten der Gewässerbezirk Gmunden sowie der Gewässerbezirk Linz als interner Auftraggeber der Oö. Landesverwaltung. Die Untersuchungsgebiete sind in der Übersichtskarte der Abbildung 2 dargestellt. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die wichtigsten Kenngrößen der erfassten Fließgewässer.

Gewässer	Länge [km]	Gefälle [%]	MQ [m³/s]	Mündung in	Erfassung	Wasserbedingungen	Im Erfassungsgebiet		
							max. Breite [m]	mittl. Breite [m]	dH [m]
Ager	34	0.36	33.5	Traun	gesamte Ager	klares Wasser	80	40–50	125
Traun	153	0.45	135	Donau	ca. 4 Fkm	trübes Wasser	120	70	7
Waldaist	58	0.63		Aist	ca. 47 Fkm	leichte Braunfärbung	25	10–15	528

Tab. 1: Parameter der Untersuchungsgebiete

Die Waldaist ist ein 58 km langer und im Mittel 10–15 m breiter Fluss im oberösterreichischen Mühlviertel, der nach Süden fließend in die Aist und dann weiter in die Donau mündet. Charakteristisch ist die leichte Braunfärbung des Flusses, hervorgerufen durch den moorigen Charakter der Quellflüsse, sowie die üppige Ufervegetation, die stellenweise die gesamte Flussbreite überschirmt. Während eine Vermessung mit terrestrischen Methoden oder Echolot in diesem Fall äußerst schwierig ist, ist eine Erfassung mit Laserbathymetrie bei günstiger Wahl des Flugzeitpunkts (Laubfreiheit, möglichst klare Wasserbedingungen) zwar herausfordernd aber prinzipiell möglich.

Das zweite Untersuchungsgebiet ist der Ager-Traun Abschnitt beginnend in Seewalchen am Attersee (Ager) bis Lambach (Traun). Die Ager entspringt aus dem Attersee und mündet nach einer Länge von 34 km und einem Höhenunterschied von 125 m bei Stadl-Paura in die Traun. Gegenüber der Waldaist weist die Ager eine wesentlich größere mittlere Breite von 40-50 m auf, sodass auch im Falle von Ufervegetation die Flussmitte in

der Regel vegetationsfrei ist. Vor allem im Frühjahr herrschen sehr klare Wasserbedingungen, wodurch mittels Laserbathymetrie eine Eindringtiefe von mehreren Metern erwartet werden kann. Neben der gesamten Ager wurde auch anschließend ein Traunabschnitt von Stadl-Paura flussaufwärts Richtung Kemating erfasst. In diesem Bereich ist die Traun trüber als die Ager mit den entsprechenden Implikationen für die erzielbare Eindringtiefe. Im Untersuchungsgebiet weist die Traun eine mittlere Breite von 70 m auf mit maximalen Aufweitungen bis zu 120 m. Das Ager-Traun Flusssystem entwässert bei Linz in die Donau.

In Tabelle 2 sind die wesentlichen Parameter der Datenerfassung zusammengefasst. Die drei Flüsse bzw. Flussabschnitte (Waldaist, Traun, Ager) wurden in vier Kampagnen jeweils im Frühjahr 2021 und 2022 erfasst. Insgesamt wurde in 11 Flugtagen und in etwas mehr als 29 Stunden Flugzeit eine Flusslänge von 107 km und eine Fläche von knapp 20 km² vermessen. Die angegebenen Flusslängen beziehen sich dabei auf die effektiven Flugtrajektorien. Durch Über-

Parameter	Einheit	Ager 2022	Traun 2022	Ager - Puchheim 2021	Waldaist 2021	Gesamt	
Flusslänge	km	39.3	4.7	15.3	47.2	107	
Fläche [ha]	ha	887	203	496	374	1960	
VUX-1 (topo)	Flüge	#	21	4	13	38	
	Flugstreifen	#	175	36	67	278	
	Flugzeit	hh:mm	07:21	01:25	03:54	00:00	12:40
VQ-840-G (bathy)	Flüge	#	22	3	1	38	26
	Flugstreifen	hh:mm	280	44	38	390	362
	Flugzeit	hh:mm	05:08	00:42	02:00	08:52	16:42
Flugtage	#	4	1	2	4	11	
Flugzeit gesamt	hh:mm	12:29	02:07	05:54	08:52	29:22	

Tab. 2: Parameter der Datenerfassung

lappungen im Anschluss der jeweils geradlinigen Trajektoriensegmente ergibt sich gegenüber den offiziellen Flusskilometern (Fkm) eine etwas größere Gesamtlänge. Die Datenakquisition erfolgte dabei zum überwiegenden Teil drohnenbasiert. Lediglich die Aufnahme von Ager-Puchheim 2021 (1 Flug, 38 Flugstreifen) erfolgte von einem Helikopter aus. Bei den Kampagnen im Jahr 2022 kam neben dem topo-bathymetrischen Laser-scanner VQ-840-G auch der topographische UAV Laserscanner RIEGL VUX1-UAV [19, 28] zur Erfassung des Flussumlandes zum Einsatz. Dieser Scanner weist bei gleicher Flughöhe (i) eine größere Flächenleistung, (ii) eine homogenere Punktdichte-Verteilung sowie (iii) eine höhere räumliche Auflösung für Ziele im trockenen Bereich auf. Bei der Befliegung der Waldaist 2021 hingegen wurde auch die Topographie mit dem topo-bathymetrischen VQ-840-G Sensor erfasst. Dieser Scanner ist zwar prinzipiell für die Kartierung von Flachwassertopographie konzipiert, erlaubt aber auch die simultane Aufnahme des trockenen Ufer- und Flussumlandbereichs.

Pro Flug betrug die mittlere Flugzeit für die Erfassung der Bathymetrie (VQ-840-G) konstant 14 Minuten und der Topographie (VUX-1UAV) 20–30 Minuten. Die Unterschiede in der Flugdauer (engl.: flight endurance) ergeben sich im Wesentlichen aufgrund des unterschiedlichen Gewichts der eingesetzten Sensoren (Topographie/VUX-SYS-1UAV: 5.2 kg; Bathymetrie/VQ-840-G: 12 kg). Die beiden Sensoren unterscheiden sich darüber hinaus in der Laserwellenlänge (Topo: 1550 nm; Bathy: 532 nm), der Pulsrepetitionsrate

(Topo: 550 kHz; Bathy: 50–200 kHz), der Strahldivergenz (Topo: 0.5 mrad; Bathy: 1–6 mrad) und im Scanmuster (Topo: parallele Linien orthogonal zur Flugrichtung; Bathy: elliptisches Scanmuster). Für eine detailliertere Beschreibung der Sensoren sei auf [19] sowie [20] verwiesen. Die für die Erfassung der einzelnen Untersuchungsgebiete verwendeten Scannereinstellungen sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Aus Tabelle 3 ist ersichtlich, dass bei der UAV-basierten Befliegung aus einer Flughöhe von 120 m über Grund der Durchmesser des Laserabtastflecks bei der Topographie kleiner ist als bei der Bathymetrie (Topo: 6,7 cm, Bathy: 12 cm). Die nominelle Punktdichte ist bei gleicher Fluggeschwindigkeit und -höhe trotz der geringeren Pulsrepetitionsrate von 200 kHz bei der Bathymetrieerfassung höher. Der Grund dafür liegt im verwendeten Scanmechanismus. Während beim VQ-840-G (Bathymetrie) ein elliptisches Scanmuster mit einem maximalen Auslenkwinkel quer bzw. längs zur Flugrichtung von 20° bzw. 14° verwendet wird (Palmer Scanner), und damit einerseits alle ausgesendeten Laserpulse auch tatsächlich das Gelände bzw. Gewässer unterhalb des Sensors erreichen und andererseits durch Vor- und Rückblick eine doppelte Erfassung vorliegt, weist der VUX-1UAV Scanner parallele Scanzeilen orthogonal zur Flugrichtung auf, die nicht nur nach unten sondern auch über den Horizont hinaus nach oben gerichtet sind (FOV: ca. 270°). Die sehr hohe nominelle Punktdichte von ca. 70 Punkten/m² für die Topographie- und mehr als 200 Punkten/m² für die Bathymetrieerfassung

Parameter		Einheit	Ager	Traun	Ager - Puchheim 2021	Waldaist 2021
VUX-1UAV (Topo)	Flughöhe ü. Grund	m	120	120	135	----
	Pulsrepetitionsrate	kHz	550	550	550	----
	Streifenüberlappung	%	50	50	50	----
	Fluggeschwindigkeit	m/s	8	8	8	----
	Punktdichte	Pkt/m ²	71.6	71.6	63.6	----
	Laserfootprint	cm	6.7	6.7	7,6	----
VQ-840-G (Bathy)	Flughöhe ü. Grund	m	120	120	300	135
	Pulsrepetitionsrate	kHz	200	200	100	50
	Fluggeschwindigkeit	m/s	8	8	12	7
	Punktdichte	Pkt/m ²	286	286	38.4	72.7
	Laserfootprint	cm	12	12	21	14

Tab. 3: Scannereinstellungen

wurde vor allem mit Hinblick auf die dichte Ufervegetation gewählt, um eine ausreichende Bodenpunktdichte sicherzustellen. Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die Punktdichte als Laserpulsdichte zu verstehen ist, ohne eventuelle Mehrfachechos zu zählen (d.h. last pulse).

4. Methoden

Der gesamte Ablauf eines topo-bathymetrischen UAV-Projektes ist schematisch in Abbildung 3 dargestellt. Die einzelnen Schritte sind im Folgenden im Detail beschrieben:



Abb. 3: Workflow einer topo-bathymetrischen UAV- Laserscanning Messkampagne

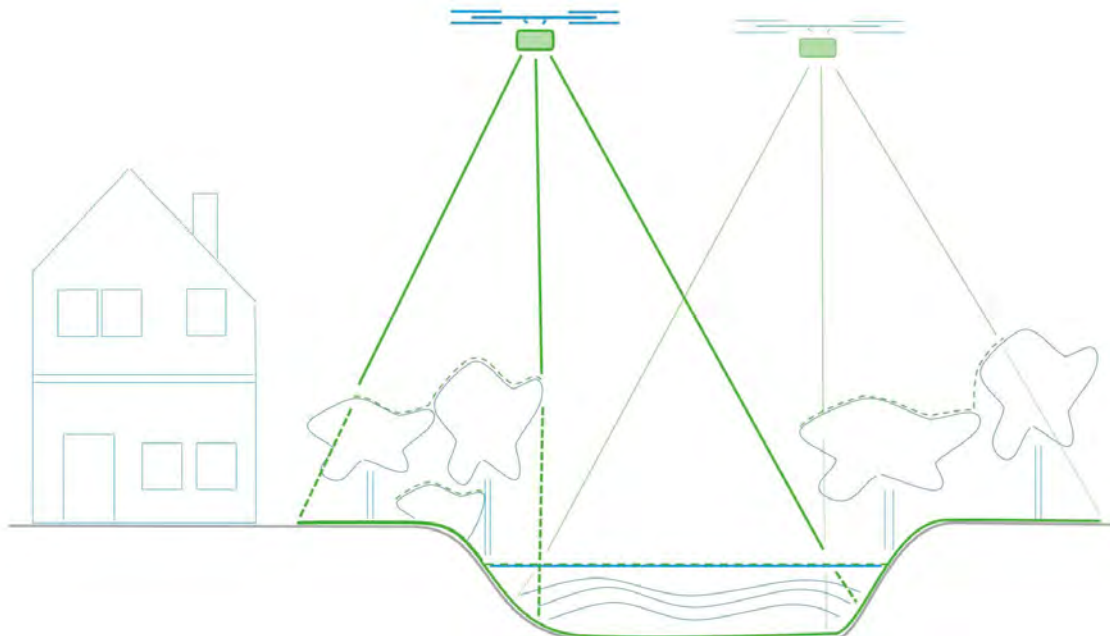


Abb. 4: Prinzipskizze für UAV-basierte Erfassung von Fließgewässern bei ausgeprägter Ufervegetation



Abb. 5: Flugpfade der Bathymetriebefliegung und damit abgedeckte Fläche (Ager)

Vorbereitung:

Die Flugplanung stellt einen essenziellen Teil der Vorbereitungen für ein erfolgreiches UAV-Bathymetrieprojekt dar. Basierend auf dem Umriss des Interessensgebiets erfolgt unter Verwendung vorhandener Höhendaten (DGM/DOM) und digitaler Orthophotos (DOP) der Oö. Landesverwaltung [16] eine Prüfung geeigneter Start- und Landeplätze, wobei mit einem UAV-Start ca. eine Flusslänge von 1 km erfasst werden kann. Unter Berücksichtigung der Anforderungen des Auftraggebers hinsichtlich Messpunktdichte und Größe des Laserabtastrflecks sowie der lokalen Gegebenheiten (z.B. Ufervegetation, Uferneigung, Flussbreite, etc.) erfolgt die Festlegung der Flugtrajektorien, wobei die Flussachse in der Regel in geradlinige Teilstücke unterteilt wird und für jeden dieser Abschnitte jeweils zwei Fluglinien im Bereich des rechten und linken Ufers vorgesehen werden. Das Setup mit Parallellinien hat zwei Gründe: (i) die Versteifung des Flugblockes durch die Überlappung der beiden Fluglinien und zusätzliche Überlappungen der einzelnen Abschnitte und (ii) die Blickwinkel auf das Gewässer so, dass bei etwaigem Vorhandensein von Ufervegetation einmal von rechts an der Vegetation vorbei die linke Flussseite einsehbar ist und entsprechend umgekehrt bei der linken Fluglinie. In Abbildung 4 ist dies als Prinzipskizze in einer Profilansicht dargestellt. Abbildung 5 zeigt die Grundrissansicht einer konkreten Durchführung dieses Befliegungskonzepts an einem verzweigten Gewässerabschnitt der Ager.

Datenerhebung:

Nach der etwaigen Einholung der erforderlichen Fluggenehmigungen und Abstimmung mit lokalen Luftraumbenutzern beginnt die Flugdurchführung mit der Programmierung des Drohnensystems (Hochladen des Flugpfades, Festlegung der Fluggeschwindigkeit, etc.) und dem Parametrisieren des Scanners. Der VQ-840-G Sensor ermöglicht u.a. die benutzerdefinierte Einstellung der Pulsrepetitionsrate (PRR: 50–200 kHz), der Strahldivergenz des Lasers (beam divergence: 1–6 mrad) und des Scannergesichtsfeldes (iFOV, 3–18 mrad). Über die Pulsrepetitionsrate wird einerseits die Punktdichte gesteuert, andererseits bedingen höhere Taktraten auch eine geringere Eindringtiefe wegen der geringeren Laserleistung bei höherer Messfrequenz. Zu den Flugvorbereitungen zählt darüber hinaus auch die Installation und ggf. Einmessung einer GNSS Basisstation,

die als Referenz zur Berechnung der präzisen Flugtrajektorie im Postprocessing dient.

Die eigentliche UAV-Befliegung besteht dann routinemäßig aus (i) dem manuellen Starten des UAV, (ii) den ebenfalls manuell gesteuerten Flugmanövern zur Initialisierung (Alignment) des Trägheitsnavigationssystems (Inertial Measurement Unit, IMU), (iii) der anschließenden Übergabe des UAVs an die automatische Flugsteuerung und dem Abfliegen der Wegpunkte, (iv) der Rückübergabe der Drohne an den Fernpiloten nach Abfliegen aller Wegpunkte sowie (v) dem manuellen Landen des Systems. Nach der Landung erfolgt eine Überprüfung der Scanner-Logdaten und damit eine erste Überprüfung der Datenerfassung.

Zu den Arbeiten im Feld zählt darüber hinaus auch die terrestrische Einmessung von Passpunkten bzw. -flächen für die Georeferenzierung des Flugblocks und etwaiger Kontrollpunkte (Querprofile, Uferlinienpunkte, etc.). Passpunkte werden dabei lediglich dann benötigt, wenn neben dem Laserscan auch eine photogrammetrische Erfassung durchgeführt wird, wobei die Bilder entweder mit dem optionalen Kamerasystem am VQ-840-G simultan mit den Laserdaten oder in einem getrennten UAV-Luftbildflug erfasst werden können.

Datenauswertung:

Die Auswertung der erfassten Messdaten startet mit der Berechnung der Trajektorie. Hierbei werden nach dem Download der präzisen Satellitenbahnephemeriden, die GNSS-Messungen der Referenzstation und die Navigationsmessdaten des UAV (GNSS und IMU) im Rahmen einer Kalman-Filterung (Referenz) zu einer sogenannten SBET (Smoothed Best Estimate of Trajectory) kombiniert. Das Ergebnis sind Positionen (X, Y, Z im WGS84) und Raumstellungen (Roll, Pitch, Heading), die den Flugpfad in Abhängigkeit der Zeit (t) mit einer Frequenz von ca. 200 Hz beschreiben. Sofern eine ausreichend genaue Kalibrierung (Hebelarme, Boresight Winkel, etc.) des Messsystems vorliegt, können die aus dem rohen Datenstrom extrahierten Scannermessungen durch direkte Georeferenzierung [23] in 3D Objektkoordinaten im WGS84 bzw. ETRS89 umgerechnet werden. Durch Streifenausgleichung werden im Anschluss Feinanpassungen der Systemkalibrierung und der Georeferenzierung vorgenommen [8]. In diesem Schritt gehen auch die terrestrisch eingemessenen Passflächen als Referenz ein. Die anschließende Qualitätskontrolle der 3D-Punktwolke beinhaltet

(i) die Überprüfung der vollständigen Gebietsabdeckung, (ii) den Nachweis der Punktdichte sowie (iii) die Überprüfung der relativen Genauigkeit der Flugstreifen zueinander und (iv) der absoluten Abweichungen zu den Pass- und etwaigen zusätzlichen Kontrollflächen [20].

Die Bathymetrie-spezifischen Arbeitsschritte umfassen (i) die Klassifizierung der Wasseroberflächenechos, (ii) die Berechnung eines lückenlosen digitalen Wasseroberflächenmodells (DWM; Dreiecksnetz oder regelmäßiges Gitter) und (iii) die Durchführung der Laufzeit- und Refraktionskorrektur. Letzteres ist notwendig, da der Laserstrahl beim Übergang von Luft in Wasser eine Winkelablenkung erfährt und sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Laserpulses verringert. Die physikalische Grundlage dafür ist das Snellius'sche Brechungsgesetz [23]. Für hinlänglich glatte Wasseroberflächen empfiehlt sich die Berechnung des DWM aus der Summe der Reflexionen von allen Scanstreifen. Bei dynamischen Wasseroberflächen (Wellen) ist für jeden Scanstreifen ein separates DWM zu berechnen. In diesem Fall kann, wie im Ablaufdiagramm der Abbildung 3 angeführt, die Refraktionskorrektur vor dem Streifenausgleich erfolgen, was den Vorteil hat, dass auch die bereits refraktionskorrigierten Gewässerbodenpunkte im Streifenausgleich als Korrespondenzen herangezogen werden können.

Nach dem Streifenausgleich und der Refraktionskorrektur liegt eine geometrisch konsistente 3D-Punktwolke als Basisprodukt für alle nachfolgenden Arbeitsschritte vor. Zunächst erfolgt dabei die Klassifizierung der Punktwolke in trockenen Boden, Gewässerboden, Streupunkte im oder unterhalb des Wasserkörpers, Vegetation, Gebäude und ggf. in weitere Klassen, die von Interesse sind. Auf Basis der klassifizierten Punktwolke können dann Folgeprodukte wie DOM und Wasserlauf-DGM (DGM-W) und weitere Derivate wie z.B. Wassertiefenkarten und Gewässerquerschnitte abgeleitet werden. Qualitätskontrollen sind an mehreren Stellen im Arbeitsablauf vorzusehen. Neben der Eingangsprüfung, der Vollständigkeitsprüfung sowie der Überprüfung der geometrischen Konsistenz und der Klassifizierung der Punktwolke, sind abschließend speziell auch die ausgewiesenen Wassertiefen durch Vergleich mit Referenzdaten zu validieren.

5. Ergebnisse

In diesem Abschnitt sind die Ergebnisse der Datenauswertungen aller im Abschnitt 3 angeführten Kampagnen zusammengefasst. Obwohl die Be-

auftragung auch die Erfassung des Flussumlandes enthielt, richten wir bei der Präsentation der Ergebnisse das Hauptaugenmerk auf die Bathymetrie.

Die Visualisierung der klassifizierten Laserpunktwolke erlaubt eine erste qualitative Beurteilung der erzielten Ergebnisse. In Abbildung 6 sind dazu verschiedene Ansichten der topo-bathymetrischen Punktwolke dargestellt. Abbildung 6a und 6d zeigen jeweils längere Abschnitte an der Traun (a) bzw. der Waldaist (d). Aus Abbildung 6 ist bereits zu erkennen, dass eine praktisch vollständige Erfassung des gesamten Gewässerbettes vorliegt. Die Gewässerbettunkte sind dabei in blau dargestellt, wobei die Farbsättigung von der Tiefe abhängt, mit einer maximalen Tiefe von 9 m in einem Becken im Bereich der Flussverzweigung. Aus diesem Bereich zeigt Abbildung 6b einen Detailausschnitt der Punktwolke, wobei Vegetation in grün, Gewässerpunkte in cyan und Bodenpunkte in braun dargestellt sind. Vor allem im Flussbereich ist das elliptische Scanpattern des verwendeten Scanners zu erkennen. Das tiefe Becken ist zusätzlich als Profilschnitt in Abbildung 6c geplottet, als repräsentatives Beispiel für die Tiefenmessperformance des eingesetzten Systems sowie dessen Fähigkeit, die Gewässerbettgeometrie unterhalb der überhängenden Ufervegetation zu erfassen (siehe dazu auch Abbildung 4).

Die wichtigsten Kenngrößen bei der Beurteilung der Qualität einer bathymetrischen Datenerhebung sind einerseits die Vollständigkeit der Sohlfassung und andererseits die absolute Genauigkeit der erfassten Sohlgeometrie. Die Vollständigkeit der Erfassung kann grafisch in Form von Punktdichte- bzw. Abdeckungskarten und numerisch in Form von statistischen Kenngrößen dokumentiert werden. Abbildung 7 zeigt den Ausschnitt des tiefen Beckens (Traun) in Form der Wassertiefenkarte (a) und der Punktdichtekarte (b), jeweils halbtransparent über der Schummerung des DOM dargestellt. In die farbkodierte Wassertiefenkarte sind auch die Tiefenlinien eingezeichnet. Die Sohlgeometrie ist vor allem im westlichen Bereich durch größere Blöcke gekennzeichnet und wird mit zunehmender Tiefe glatter. Dies spiegelt sich auch im Verlauf der Tiefenlinien wieder. Die Bodenpunktdichte im trockenen und benetzten Bereich (Abbildung 7b) ist in diesem Ausschnitt sowohl im Gewässerbett als auch im Flussvorland sehr hoch, was am vorherrschenden blauen Farbton zu erkennen ist, der eine Punktdichte von mehr als 64 Punkten/m² anzeigt. Eine geringere Punktdichte ist im am westlichen Flussufer und im

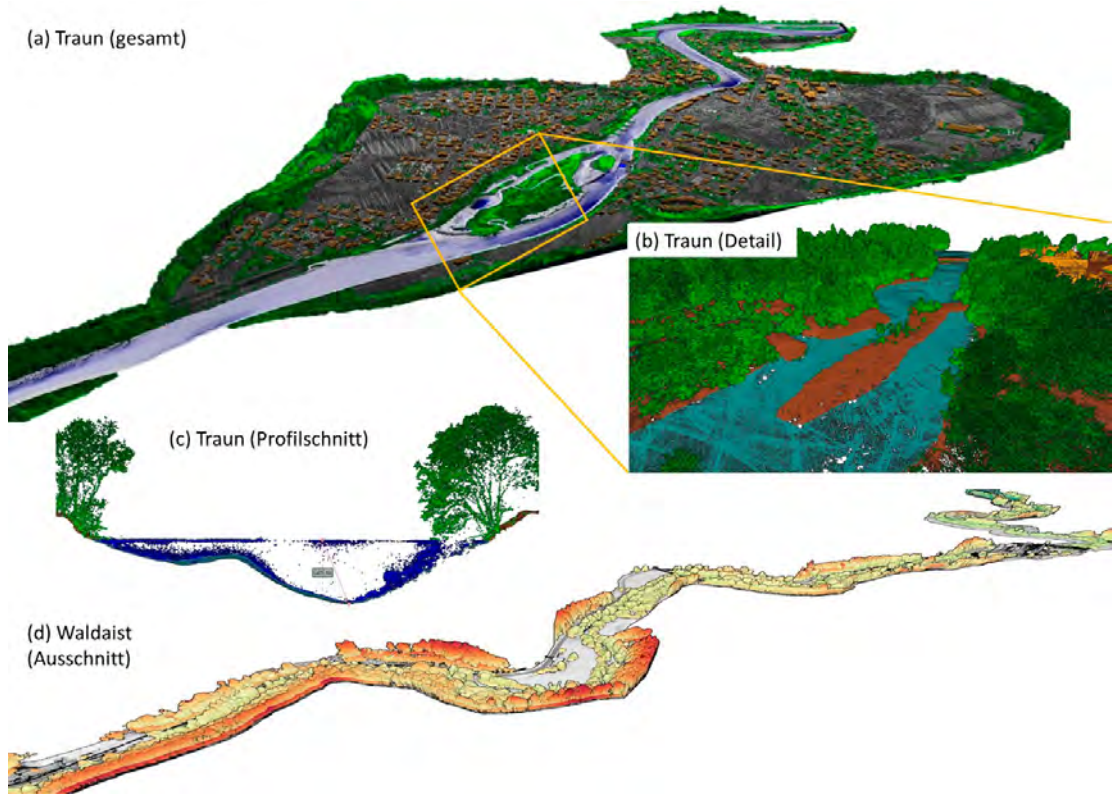


Abb. 6: Klassifizierte 3D-Punktwolke der topo-bathymetrischen Erfassung; (a) Perspektivansicht eines Traun-Abschnitts; (b) Detail bei Flussverzweigung; (c) Profilschnitt eines strukturierten und tiefen Querschnitts (max. Tiefe: 9 m); (d) Perspektivansicht eines Waldaist-Abschnitts

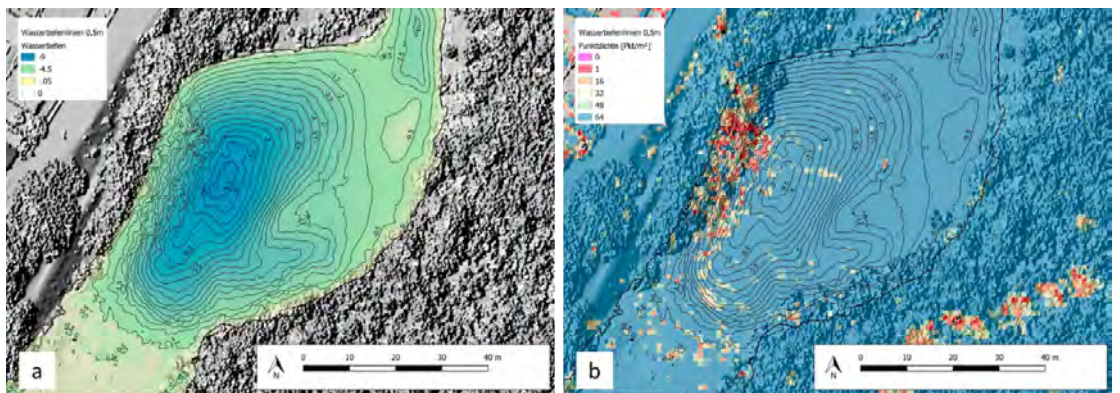


Abb. 7: Ergebnisse der topo-bathymetrischen UAV-Laserscanning Datenerfassung an der Traun; (a) Farbkodierte Wassertiefenkarte mit Tiefenlinien, Bildhintergrund: DOM-Schummerung; (b) Farbkodierte Punktdichtekarte (trockener Boden und Gewässersohle)

süd-östlichen Vorlandbereich zu beobachten, wo dichte Vegetation die Durchdringung erschwert.

Tabelle 4 erlaubt gesamtheitliche Aussagen über die erzielten Durchdringungsraten im Gewässerbett. Die Tabelle dokumentiert für alle drei Flüsse

(Traun, Ager, Waldaist) einerseits die mittels UAV-Laserbathymetrie erfassten Gewässersflächen sowie die maximalen und mittleren Flusstiefen und darüber hinaus auch die Durchdringungsraten für unterschiedliche Punktdichteschwellwerte. Bei

der Traun, die im Erfassungsgebiet eine mittlere Tiefe von 2.11 m und eine maximale Tiefe von 9.4 m aufweist, beträgt die Durchdringungsrate 100 %, wenn man einen Schwellwert von mindestens 4 Punkten/m² ansetzt. Setzt man als Akzeptanzschwelle mindestens 16 Punkte/m², dann beträgt die Durchdringungsrate 99 %. Die Auswertung erfolgte dabei basierend auf Analyseeinheiten von jeweils 1 x 1 m². Bei der Ager (mittlere/maximale Tiefe: 0.97/4.89 m) sind die Durchdringungsraten etwas niedriger, mit 99 % für mindestens 4 Punkte/m² und 90 % für mehr als 16 Punkte/m². Ein ähnliches Bild ergibt sich für die Waldaist (94 % bei >16 Punkten/m², 99 % bei mindestens 4 Punkten/m²). Während für die präsentierten Ergebnisse der Ager und Traun jeweils der gesamte Datensatz herangezogen wurde, sind die Zahlen für die Waldaist aus ca. einem Drittel der Gesamtfläche (südlicher Befliegungsbereich) ermittelt worden. Tabelle 4 bestätigt jedenfalls, dass die Bathymetrieerfassung, abgesehen von vereinzelt Zellen, vollständig ist.

Projekt		Traun	Ager	Waldaist
Benetzte Fläche [ha]		26.43	96.83	21.62
Wassertiefe [m]	mittel	2.11	0.97	0.43
	max	9.40	4.89	1.85
Flächenanteil mit Punktdichte ...	>16	99 %	90 %	94 %
	>8	99 %	97 %	97 %
	>4	100 %	98 %	98 %
	>0	100 %	99 %	99 %

Tab. 4: Übersicht - Durchdringungsraten Bathymetrie

Eine durchgreifende Kontrolle der absoluten Höhengenaugigkeit ist durch den Vergleich der Höhen von unabhängig gemessenen Querprofilpunkten mit den Laserpunkthöhen in der unmittelbaren Umgebung der Profilverpunkte gegeben. Entsprechende Referenzquerprofile liegen für alle Messkampagnen in zweifacher Form vor, einerseits da der Auftragnehmer (Skyability) verpflichtet war, pro Flugtag zumindest zwei Querprofile terrestrisch zu vermessen und andererseits weil auch der Auftraggeber (Land Oberösterreich) unabhängig davon im Bereich von Brückenbauwerken Kontrollvermessungen durchgeführt hat.

In Abbildung 8 sind die klassifizierten Laserpunkte (Boden trocken, Gewässerboden, Wasseroberfläche, Vegetation) und die terrestrisch

eingemessenen Referenzpunkte für drei repräsentative Querschnitte dargestellt. Für jeden Referenzpunkt sind die Wassertiefe (Wt) und die Höhenabweichung zu den umliegenden Gewässerbodenpunkten (dZ) geplottet. Die visuelle Gegenüberstellung zeigt eine generell sehr gute Übereinstimmung zwischen Referenz- und Laserpunkten. Die Abweichungen liegen oft im Bereich von 2–3 cm. Größere Abweichungen treten vor allem in schwierig zugänglichen Vegetationsbereichen (Abbildung 8a: 9.1 cm, rechts) oder im Böschungsbereich mit Ufervegetation (Abbildung 8c: 7.9 cm, rechte Uferböschung) auf. Besonders hervorzuheben ist die gute Übereinstimmung in großer Wassertiefe (Abbildung 8c: dZ=1.8 cm bei Wt=3.03 m), während der benachbarte Punkt im selben Profil mit dZ=16 cm eine relativ große Höhenabweichung aufweist. An dieser Stelle sei an die Schwierigkeit der tachymetrischen Vermessung in Fließgewässern erinnert, vor allem wenn bei einer Wassertiefe von mehr als 1.5 m der Reflektorstock von einem (seilgesicherten) Boot aus gehalten werden muss. Des Weiteren sei angemerkt, dass für die Darstellung jeweils die Laserpunkte in einem Bereich von 5–10 m entlang der Flussachse extrahiert wurden. Daher kommt es in den Profilschnitten gelegentlich zu einer größeren Streuung der Laserpunkte bei gekrümmtem Flächenverlauf, was nicht als Messrauschen gesehen werden darf bzw. mit Messrauschen gleichzusetzen ist.

Die zusammenfassende Genauigkeitsstatistik für eine repräsentative Auswahl terrestrisch vermessener Querprofile ist in Tabelle 5 angegeben. Im Mittel betragen die Abweichungen an allen drei Flüssen zwischen 0–3 cm (Traun: 0 cm, Waldaist: 1 cm, Ager: 3 cm). Die mittlere Standardabweichung liegt im Bereich von 5 cm (Ager, Waldaist) und bei 7 cm (Traun). Während für den relativ kurzen Traun-Abschnitt lediglich zwei Referenzquerprofile vorliegen, wurden für Waldaist und Ager zehn repräsentative Profile ausgewählt. Für jedes Profil sind in Tabelle 5 die Punktzahl, die mittlere und maximale Höhenabweichung und die Standardabweichung der Diskrepanzen angegeben. Während bei den maximalen Abweichungen gelegentlich Ausreißer mit Werten >10 cm auftreten (z.B. Traun: max. 35 cm, Ager: max. 47 cm, Waldaist: max. 28 cm) liegen auch die meisten Maximalabweichungen im Sub-Dezimeterbereich. Die mittleren Abweichungen liegen allesamt unter 5 cm mit einer Ausnahme (Ager, QP-7: 7 cm).

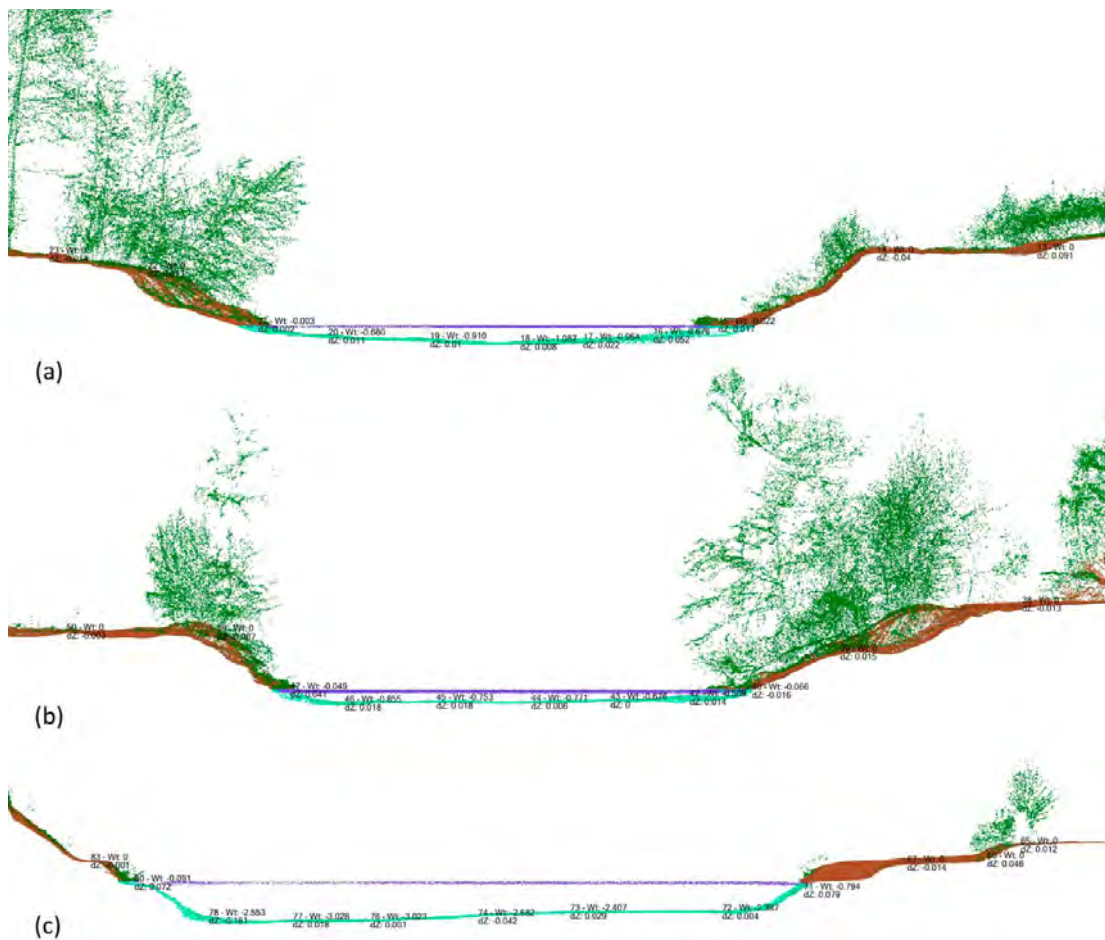


Abb. 8: Ausgewählte Profilschnitte mit klassifizierten Laserpunkten (Boden/braun, Gewässerboden/cyan, Wasseroberfläche/blau, Vegetation/grün) und Referenzmesspunkten inkl. Wassertiefe (Wt) und Höhenabweichung (dZ); Profiltiefe ca. 5-10 m

	Pkt	Mittel	Max.	σ	Pkt	Mittel	Max.	σ	Pkt	Mittel	Max.	σ
	#	[m]	[m]	[m]	#	[m]	[m]	[m]	#	[m]	[m]	[m]
QP-01	19	-0.01	0.35	0.10	17	0.02	0.09	0.04	13	0.00	0.10	0.05
QP-02	21	0.02	0.13	0.04	16	0.03	0.09	0.03	12	-0.03	0.15	0.05
QP-03					14	0.03	0.07	0.02	14	0.05	0.06	0.03
QP-04					17	0.04	0.19	0.05	12	0.04	0.09	0.03
QP-05					16	0.04	0.09	0.03	13	-0.02	0.25	0.08
QP-06					14	0.03	0.16	0.05	16	-0.03	0.28	0.08
QP-07					23	0.07	0.47	0.14	18	-0.01	0.10	0.03
QP-08					14	0.01	0.06	0.03	16	0.04	0.09	0.04
QP-09					13	0.01	0.04	0.02	12	0.04	0.14	0.06
QP-10					19	0.01	0.16	0.06	11	0.05	0.14	0.08
Mittel	20	0.00	0.24	0.07	16	0.03	0.14	0.05	14	0.01	0.14	0.05

Tab. 5: Genauigkeitsanalyse; Soll-Ist-Vergleich zwischen Referenz- und Lasermesspunkthöhen

6. Diskussion

In diesem Abschnitt erfolgt eine Bewertung der erzielten Ergebnisse im Hinblick auf den derzeitigen Stand der Technik für die Erfassung von Bathymetrie aus der Luft, dem flugzeuggetragenen topo-bathymetrischen Laserscanning. Wir besprechen dabei die im vorigen Abschnitt präsentierten Ergebnisse, gehen darüber hinaus aber auch auf Herausforderungen, die sich in der Projektabwicklung ergeben haben und auf Fragestellungen und Ideen für künftige Weiterentwicklungen ein.

Bei der Erfassung von Fließgewässern aus der Luft steht meist der erzielte Grad an Vollabdeckung des benetzten Bereichs im Vordergrund. Die oft gestellte Standardfrage lautet: „Wie tief konnte gemessen werden?“. Diese Frage ist berechtigt, da die Rentabilität einer luftgestützten Erfassung wesentlich davon abhängt, wie viel mit konventionellen Methoden (terrestrische Vermessung, Echolot) ergänzend gemessen werden muss. Von ebenso großer Bedeutung ist auch die Frage nach der Bodenpunktdichte im trockenen Bereich, vor allem deswegen, weil Fließgewässer oft von einer dichten Ufervegetation gesäumt sind.

Die an den oberösterreichischen Fließgewässern durchgeführten UAV-Laserbathymetriekampagnen weisen in dieser Hinsicht sehr positive Ergebnisse auf. Die erzielte Gewässerbodenabdeckung von 99% bei einem Schwellwert von 1–4 Punkten/m² kann man als Vollabdeckung des gesamten Gebietes bezeichnen. In vorangegangenen Flugzeuglaserbathymetrieprojekten wurden kaum jemals solch hohe Vollabdeckungsraten erzielt [17]. Ein Grund für die bessere Performance der UAV-Bathymetriescanner liegt in der Sensorik. Der eingesetzte UAV-Scanner weist laut Datenblatt eine maximale Eindringtiefe von 2.5 Secchi-Tiefen auf [27], gegenüber der 1.5-fachen Secchi-Tiefe des Flugzeugscanners desselben Herstellers. Ein weiterer Grund liegt im flexibleren Einsatzbereich des UAV-Scanners. Der Operateur kann einerseits die Flughöhe flexibel anpassen und bei geringer Flughöhe Signalverluste in der Atmosphäre vermeiden und andererseits über die Scannerparameter (Strahldivergenz und Empfängergesichtsfeld) maximale Eindringtiefe und räumliches Auflösungsvermögen balancieren [25]. Im konkreten Fall resultierte das darin, dass Ergänzungsmessungen im Wesentlichen im Bereich von überbauten Gewässerabschnitten (Brücken) erforderlich waren. Ergänzende terrestrische Messungen waren darüber hinaus auf einer Flusslänge von ca. 500 m im

nördlichen Teilabschnitt der Waldaist notwendig. Dieser Abschnitt konnte nicht, wie für die gesamte Waldaist geplant, zur laubfreien Zeit im März 2021 sondern erst im Juni 2021 befliegen werden. Der volle Belaubungszustand der Vegetation, die zu dieser Jahreszeit größere Trübung und die dunklere Sohle verhinderten hier eine Vollerfassung der Gewässerbettgeometrie. Einmal mehr sei an dieser Stelle auf die Wichtigkeit günstiger Umweltbedingungen während der Datenerfassung hingewiesen.

Bathymetriescanner sind prinzipiell auf maximale Empfindlichkeit eingestellt, um auch sehr schwache Reflexionen vom Gewässerbett zu erfassen. Die hohe Empfindlichkeit reduziert dabei die erzielbare räumliche Auflösung und scharfe Kanten werden abgerundet bzw. lineare Strukturen wie Hochspannungsleitungen erscheinen als Punktband [20]. Außerdem weist die bei bathymetrischen Laserscannern verwendete Wellenlänge im sichtbaren Bereich ($\lambda = 532$ nm) einen ungünstigeren Reflexionsgrad für die meisten topographischen Ziele (Vegetation, Boden, Asphalt, etc.) auf [7]. Topographische Laserscanner, die im nahen Infrarot ($\lambda = 1550$ nm) betrieben werden, weisen hingegen sowohl einen besseren Reflexionsgrad bei Zielen an Land und darüber hinaus auch meist eine geringere Strahldivergenz und damit einen kleineren Laserfootprint auf. Zudem haben topographische Sensoren in der Regel einen größeren Scanbereich und eine höhere Pulsrepetitionsrate und damit in der Folge eine höhere Flächenleistung. Die bessere Effizienz war der Grund warum bei der Erfassung von Ager und Traun ein topographischer UAV-Laserscanner [28] für das Vorland eingesetzt wurde. Es sei an dieser Stelle aber auch darauf hingewiesen, dass mit dem für die Erfassung des Gewässerbetts eingesetzten topo-bathymetrischen UAV-Laserscanner eine höhere Bodenpunktdichte erzielt werden kann, als dies für Flugzeug-ALS Systeme der Fall ist. Für einen Abschnitt der Ager ist die resultierende Bodenpunktdichtekarte zusammen mit den Flugpfaden exemplarisch in Abbildung 9 dargestellt.

Deutlich zu erkennen ist der Punktdichteunterschied zwischen trockenem und benetztem Bereich. Im Umland überwiegen die Blautöne (Dichte > 64 Punkte/m²) und im Flussbett die Orangetöne (16 Punkte/m²). Eine noch geringere Punktdichte ist gelegentlich im Uferbereich zu beobachten (rot). Durch die Flugplanung für die Bathymetrieerfassung mit Fluglinien auf beiden Uferseiten (grüne Linien) wird dennoch eine lückenlose Erfassung

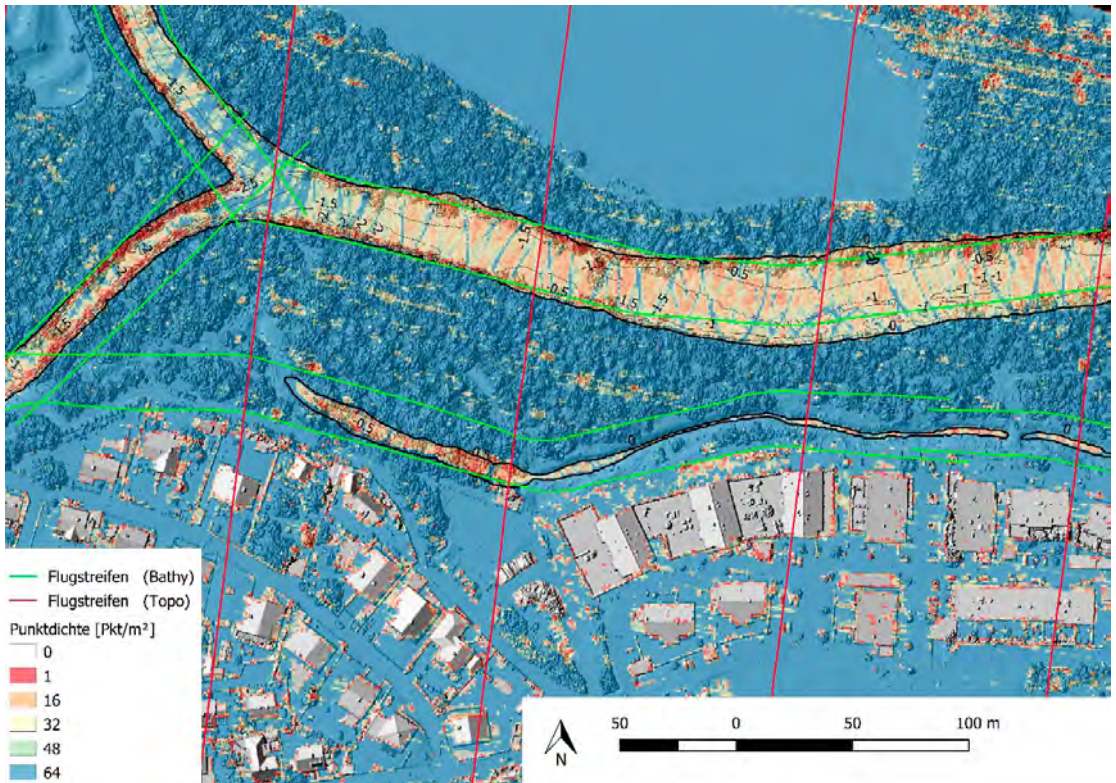


Abb. 9: Flugstreifen der topo-bathymetrischen (grün) und topographischen (rot) Befliegung und resultierende Punktdichte (Ausschnitt Ager); Bildhintergrund: DOM Schummerung

auch des überschirmten Uferbereichs – wenn auch mit verminderter Punktdichte – erreicht. Es sei an dieser Stelle erwähnt, dass eine terrestrische Erhebung von Gewässerbettdaten (GNSS, Tachymetrie, Echlot) in diesen unzugänglichen Bereichen schwierig ist und Echlot-Vermessungen mit kleinen Booten nur mit sehr hohem Aufwand zu bewerkstelligen sind.

Neben der Punktdichte ist die absolute Messgenauigkeit ein wesentlicher Qualitätsparameter. Für hydrographische Datenerfassung gibt es dazu von der International Hydrographic Organization (IHO) eine entsprechende Standardisierung [12]. Der Standard mit den höchsten Genauigkeitsansprüchen wird als *Exclusive Order* bezeichnet und schreibt neben der Vollabdeckung die Einhaltung einer vertikalen Unsicherheit (Total Vertical Uncertainty, TVU) von 15 cm + 0.75 cm pro Meter Wassertiefe für 95% aller Messwerte vor. Tabelle 6 fasst dazu für das Flusssystem Ager/Traun und die Waldaist die Abweichungen zwischen Laserpunkthöhen und Referenzmessungen für alle Gewässerbettpunkte zusammen.

In der Tabelle sind die Höhenabweichungen vorzeichenbehaftet angegeben. Daher sind für die Bewertung der Erfüllung des 95% Kriteriums das 2.5%- und das 97.5%-Quantil heranzuziehen. In der Gesamtbetrachtung sind die Abweichungen alle betragsmäßig kleiner als 15 cm (+14 cm/–12 cm). Auch das 97.5%-Quantil beim Ager/Traun Flusssystem mit 16 cm erfüllt bei einer mittleren Wassertiefe von 1 m noch das *Exclusive Order* TVU-Kriterium. Unter der Voraussetzung einer gewissenhaften Planung und Durchführung der Befliegung und einer dem Stand der Technik entsprechenden Datenauswertung stellt UAV-Laserbathymetrie also eine präzise Messtechnik dar, die zwar nur schwer cm- aber definitiv sub-dm Genauigkeit liefern kann. Hinsichtlich der gelegentlich auftretenden größeren Abweichungen (siehe Spalte *Max.* in Tabelle 5) ist anzumerken, dass auch die Referenzmesspunkte nicht als fehlerfrei zu betrachten sind. Dies gilt vor allem für schwer zugängliche Bereiche (Unterholz, Ufervegetation, steile Uferböschungen, etc.). Hier sind die Definitionsunsicherheit der Punkte zu nennen sowie Schwierigkeiten, die sich durch die terrestrische

Einmessung ergeben (Satellitenabschattung bei GNSS Messung, Visurhindernisse bei tachymetrischer Messung, Schrägstellung des Lotstocks bei Messung in starker Strömung).

		Ager/ Traun	Waldaist	Gesamt
Stichprobengröße		155	190	345
Quantil	5 %	-0.05	-0.10	-0.09
	95 %	0.11	0.12	0.12
	2.5 %	-0.06	-0.13	-0.12
	97.5 %	0.16	0.13	0.14

Tab. 6: Quantil-Statistik der Höhenabweichungen [m] zwischen Laser- und Referenzmessungen für alle Unterwasserpunkte

Aus Sicht der Durchführung bathymetrischer Datenerfassungen solchen Umfangs (~100 km Flusslänge) ist die Leistungsfähigkeit von Flugplattformen für eine effiziente Erfassung innerhalb kurzer Aufnahmezeiten stark gefordert. Zeitgemäße Multikopter UAV-Plattformen erlauben für ein Beladungsgewicht (Payload) < 5 kg, wie sie für topographische Scannersysteme typisch ist, eine Flugzeit von ca. 30 Minuten. Bei den schwereren topo-bathymetrischen Scannern mit einer Sensor-Payload von 12 kg verringert sich die nutzbare Netto-Flugzeit auf ca. 15 min. Eine Alternative zur Steigerung stellt derzeit die Integration des Scannersystems auf einem Helikopter dar. Dies wurde für die Ager-Puchheim 2021 Befliegung in dieser Art durchgeführt. Damit sind zwar einerseits lange Flugzeiten realisierbar, allerdings können Helikopter schon allein wegen der Lärmbelastung nicht aus den für UAV-Betrieb typischen Flughöhen von ca. 120 m betrieben werden. Beträgt die Flughöhe beim Helikopterbetrieb z.B. 200 m, gelangt aufgrund der mit der Entfernung quadratischen Abnahme der Empfangsenergie [31] nur mehr ein Drittel der Signalstärke zum Empfänger, mit entsprechenden Einbußen hinsichtlich der Eindringtiefe. Bei größerer Flughöhe erhöht sich auch die Größe des Laserabtafleckes. Bei der minimalen Strahldivergenz des eingesetzten VQ-840-G Sensors von 1 mrad beträgt der Durchmesser für das obige Beispiel einer Erfassung aus 200 m über Grund 20 cm, was einem typischen Durchmesser für flugzeuggetragenes ALS entspricht. Beim Einsatz von Helikoptern sind folglich Überlegungen hinsichtlich Effizienz der Datenerfassung, Eindringtiefe und räumliches Auflösungsvermögen gegeneinander abzuwiegen.

Aus Sicht der Betreiber von UAV-Laserscanningssystemen wäre daher eine Verlängerung der Flugdauer (flight endurance) wünschenswert. Während UAV-Systeme mit weit längerer Flugdauer am Markt verfügbar sind, sind die rechtlichen Rahmenbedingungen für einen Einsatz im kommerziellen, zivilen Betrieb noch zu schaffen und Aufstiegs genehmigungen daher schwierig zu erlangen. In diesem Kontext ist vor allem auch der Betrieb jenseits der direkten Sichtverbindung zum Fluggerät (Beyond Visual Line Of Sight, BVLOS) zu nennen. In diesem Fall könnte auch an einen Betrieb in der Nacht gedacht werden, was vor allem für bathymetrische Laserscanner vorteilhaft wäre, weil Sonnenlicht ein Maximum im grünen Bereich des Spektrums aufweist [13] und durch den Wegfall von Streulicht die erzielbare Eindringtiefe weiter erhöht werden könnte.

Hinsichtlich der Umgebungsbedingungen stellt ALB sehr hohe Anforderungen, einerseits an die atmosphärischen Bedingungen (klare, trockene Luft) und andererseits an die hydrologischen Bedingungen (wenig Trübung, geringer Abfluss) und an den phänologischen Zustand der Vegetation (Laubfreiheit) und des Bodens (Schneefreiheit). Erfahrungsgemäß ist in unseren Breiten der ausgehende Winter (Februar bis Anfang April) die optimale Zeit für die Durchführung topo-bathymetrischer Datenerfassungen. Alternativ stellt auch der Spätherbst (November, Dezember) ein mögliches Aufnahmezeitfenster dar, sofern nach dem ersten Frost die Ablaubung schon weitgehend abgeschlossen ist und Schnee- und Nebelfreiheit gegeben sind. Eine der wesentlichen Stärken von Airborne Laserscanning ist die Fähigkeit, halbtransparente Vegetation zu durchdringen. Für Laserbathymetrie bedeutet das, dass das Gewässerbett unterhalb von überhängender Vegetation erfasst werden kann. Im belaubten Zustand nimmt die Vegetationsdurchdringung aber stark ab. Laubfreiheit ist daher eine Grundvoraussetzung für luftgestützte Erfassung von Fließgewässern mit stark ausgeprägter Ufervegetation.

Aus Sicht der Auftraggeber zeigt sich UAV-ALB als attraktive Methodik zur flächenhaften Erfassung des Gewässerbettes und des Uferbereichs in einem Guss. Resultierende Probleme aufgrund unterschiedlicher Messepochen (Stangenpeilung bei Niedrigwasser sowie Echolotung bei mittlerer Wasserführung) lassen sich somit künftig vermeiden. Bei Gewässern, für welche aufgrund variierender Gewässertiefen nur abschnittsweise eine flächenhafte Erfassung mittels Echolotung

möglich war, musste bisher teilweise aus Effizienzgründen einer gesamten Stangenpeilung der Vorzug gegeben werden. Genau für solche Anforderungen eignet sich UAV-ALB besonders, weil dadurch Abflussberechnungen auf Grundlage flächenhafter Sohlmessungen nun auch für Gewässer mittlerer Größe bzw. kleinere Gewässer ermöglicht werden. Eine aufwändige Modellierung des Gewässerbettes mittels lage- und höhenmäßiger Interpolation zwischen den terrestrischen Querprofilen entfällt und sollte sich positiv hinsichtlich Qualität und Kosteneffizienz bei der Erstellung von Abflussuntersuchungen auswirken. Entscheidend ist letztlich auch, mit welcher maximalen Punkt- bzw. Zellenanzahl einzelne Softwaretools für hydrodynamisch-numerische Modellierung umgehen können und ob ggf. eine Ausdünnung mittels intelligenter Verfahren erforderlich sein wird [18].

Die erfassten Punktwolken zeigen, dass Messungen aus UAV-ALB auch teilweise bei Weißwasser (z.B. bei Sohlstufen) bis zur Gewässersohle durchdringen. Inwiefern die Gewässersohle samt Kolk und Absturzhöhe bei solchen Querbauwerken hinreichend erfasst wird, wäre von weiterem Interesse. Bei den oben genannten Projekten wurden abflussrelevante Querbauwerke sowie Brücken (Bestimmung des Lichtraumes) ebenso terrestrisch vermessen.

7. Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag haben wir die Erfassung von drei Flüssen bzw. Flussabschnitten (Waldaist, Ager, Traun) mittels UAV-basierter Laserbathymetrie vorgestellt. Die Befliegung wurde von der Skyability GmbH im Auftrag der Oberösterreichischen Landesregierung durchgeführt. Zum Einsatz kam das topo-bathymetrische Laserscanningsystem *RIEGL VQ-840-G*, welches gleichermaßen für die Erfassung des Gewässerbettes und der Flussvorlandtopographie geeignet ist. Der Scanner weist eine Pulsrepetitionrate von bis zu 200 kHz und eine Strahldivergenz von minimal 1 mrad auf, was bei einem Betrieb aus einer Flughöhe von 120 m über Grund eine Punktdichte von >60 Punkten/m² und einen Durchmesser des Laserabtafleckes von 12 cm ergibt. Darüber hinaus kann der Scanner Wassertiefen bis zur 2-fachen Secchi-Tiefe erfassen.

An den drei im Frühjahr 2021 bzw. 2022 erfassten Flüssen wurde dabei untersucht, ob sich diese theoretischen Kennzahlen auch bei der großflächigen Anwendung bei einer Fließlänge von ca. 100 km in der Praxis bestätigen lassen. Im

Besonderen wurde einerseits der Grad der Vollerfassung des Gewässerbettes und andererseits die Genauigkeit der Topographieerfassung ober und unter Wasser untersucht. Dazu wurde zunächst der gesamte Ablauf einer UAV-Laserbathymetrie-Kampagne beginnend bei den Flugvorbereitungen, über die Durchführung der Datenerfassung bis zur Auswertung der Daten und die Erstellung der finalen Produkte beschrieben. Ein wesentlicher Aspekt bei der Flugplanung ist die Berücksichtigung der oftmals überhängenden Ufervegetation. Um möglichst freie Sicht auf alle Teile des Flussbettes zu haben, wurden dabei parallele Fluglinien am rechten und linken Ufer vorgesehen, was auch zu einer zusätzlichen Versteifung des Flugblocks beitrug. Wegen der größeren Flächenleistung kam für die Erfassung des Umlandes ein topographischer UAV-Laserscanner (*VUX-1UAV*) zum Einsatz. Während die generelle Verarbeitung der Scannermessdaten dem standardmäßigen Ablauf in der Laserbathymetrie folgte, hat sich vor allem die gute Abbildung der Wasseroberfläche in den Scandaten hinsichtlich Automation als besonders nützlich erwiesen. Ein kontinuierliches Modell der Wasseroberfläche wiederum ist die Grundvoraussetzung für die Korrektur der Stahlbrechung und der Signallaufzeit in Folge der Refraktion beim Übertritt von Luft in Wasser.

Die Ergebnisse haben eine 99–100 %-ige Abdeckung des Gewässerbettes mit einer Punktdichte von mindestens 1 Gewässerbodenpunkt/m² und eine 90–95 %-ige Abdeckung mit mehr als 16 Punkten/m² ergeben. Die maximal erreichte Tiefe betrug mehr als 9 m bei einem tiefen Becken an der Traun. Geringere Bodenpunktdichten traten vor allem im Bereich mit dichter Ufervegetation durch Abschattung auf. Die Flugplanung mit parallelen Doppellinien ermöglichte aber dennoch eine vollständige Abdeckung des benetzten Gebiets. Lediglich für kleinere Abschnitte an der Waldaist, die im Juni 2022 bei vollem Laubaustrieb erfasst wurden, musste der Datensatz durch terrestrische Messungen ergänzt werden. Bei der Flugdurchführung ist daher jedenfalls auf Laubfreiheit zu achten. Flugdurchführungen im Sommer sind auch insofern zu vermeiden, weil die Gewässertrübung durch Sedimenteintrag nach Niederschlagsereignissen tendenziell höher ist als in der niederschlagsarmen und kalten Jahreszeit.

Zur Evaluierung der Genauigkeit der Lasermessungen des Gewässerbettes und Vorlandes wurden unabhängige Querprofile terrestrisch eingemessen. Der Soll-ist-Höhenvergleich hat ergeben,

dass die erzielten Genauigkeiten dem Exclusive Order Standard der IHO entsprechen, der neben Vollabdeckung eine Gesamthöhenunsicherheit von 15 cm für 95 % aller Messungen vorschreibt. Größere Abweichungen ergaben sich gelegentlich dort, wo das Flussbett durch dichte Ufervegetation überschirmt war sowie im Flussvorland bei Vorhandensein von ausgeprägtem Unterholz.

Mit Ausnahme des Teilgebiets Ager-Puchheim, deren Gewässerbett vom Helikopter aus vermessen wurde, erfolgte die gesamte Datenerfassung von der Drohne (43 Starts, 11 Flugtage) und die Netto-Flugzeit betrug knapp 29 h. Die Projekte haben gezeigt, dass UAV-Laserbathymetrie produktiv und erfolgreich für die Erfassung großer Fließstrecken von relativ seichten Flüssen mit moderater Trübung in hoher räumlicher Auflösung und mit Subdezimeter-Höhengenaugigkeit eingesetzt werden kann. Damit liegt eine sehr gute geometrische Datengrundlage für unterschiedliche Anwendungen vor. In der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung kann damit der Flachwasserbereich (z.B. Bühnenfeld) flächenhaft und präzise kartiert werden, und etwaige Schäden an Wasserbauwerken (Buhnen, Parallelwerke) können zielgerichtet behoben werden. Für die Elektrizitätswirtschaft ergibt sich die Möglichkeit bei klaren Wasserbedingungen Staubereiche bis zu einer Tiefe von mehr als 10 m zu erfassen und darüber hinaus auch morphologische Veränderungen in Folge von Sunk und Schwall zu dokumentieren. Für naturnahe Flussläufe lassen sich Auswirkungen von Hochwasserwellen auf die Geometrie der Flusssohle kartieren. Bei besonders exponierten Gewässerabschnitten stellt die UAV-basierte Technik wegen der relativ geringen Mobilisierungskosten auch ein effizientes Werkzeug für langfristiges Monitoring dar. Wegen des hohen Detaillierungsgrades eignet sich die Technik auch besonders gut für ökologische Fragestellungen wie z.B. für die Habitatmodellierung. Und schließlich sei auch die Unterwasser-Archäologie als ein potenzielles Anwendungsgebiet für die Erfassung kleinräumiger Unterwasserstrukturen (z.B. Pfahlbauten) genannt.

Während die erzielten Ergebnisse an Ager, Traun und Waldaist durchwegs positiv bewertet werden können, ist vor allem eine weitere Steigerung der Effizienz wünschenswert. Dies kann einerseits durch Sensorminiaturisierung und die damit einhergehende Erhöhung der Nettoflugzeit geschehen und andererseits durch Weiterentwicklungen auf Seiten der UAV-Plattformen. Besonderes

Interesse kommt hier dem Betrieb von Drohnen ohne Blickverbindung zum Fernpiloten (Beyond Visual Line Of Sight) zu, wofür auch die rechtlichen Rahmenbedingungen zu schaffen sind. Die vorliegende Studie hat jedenfalls gezeigt, dass sich UAV-Laserbathymetrie im Produktiveinsatz bewährt hat. Gegenüber bestehenden optischen Erfassungsmethoden stellt sie sowohl für die Landesvermessung als auch die Wasserwirtschaft einen echten Mehrwert dar. Die erfassten oberösterreichischen Gewässer können als typisch für eine Vielzahl von Fließgewässern in Österreich angesehen werden. Ein vermehrter Einsatz dieser innovativen Technologie würde deren Weiterentwicklung positiv stimulieren, so wie dies rund um die Jahrtausendwende durch Etablierung von ALS für die landesweite Geländehöhenerfassung der Fall war.

Referenzen

- [1] ANH (2022): Webseite des Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN). <https://www.ahn.nl/> (Letzter Zugriff: 17.08.2022).
- [2] Baumgartner, K., Klar, R., Aufleger, M. (2018): High-Resolution LiDAR Bathymetry Data for Alpine Rivers - Case Study on the River Mareit/Mareta, Italy. In: Proceedings of the 13th International Conference on Hydroinformatics (HIC 2018), Manchester, 199-206. <https://easychair.org/publications/paper/nj1H>
- [3] Baumgartner, K., Klar, R., Aufleger, M. (2019): Evaluierung der Airborne LiDAR Bathymetrie in der Fließgewässer-Modellierung. In: Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V., Band 28, 537-547.
- [4] Christiansen, L. (2021): Laser Bathymetry for Coastal Protection in Schleswig-Holstein. Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science, 89, 183-189. <https://doi.org/10.1007/s41064-021-00149-w>
- [5] DORIS interMAP (2022): Orthofotos und Topographie. Airborne Laserscanning Befliegungen in Oberösterreich. <http://doris.at/themen/basiskarten/orthofotos.aspx>. (letzter Zugriff: 17.08.2022)
- [6] Effler S.W. (1988): Secchi disc transparency and turbidity. Journal of Environmental Engineering, 114(6), 1436-1447. [https://ascelibrary.org/doi/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(1988\)114:6\(1436\)](https://ascelibrary.org/doi/10.1061/(ASCE)0733-9372(1988)114:6(1436))
- [7] Fernandez-Diaz, J.C., Carter, W.E., Glennie, C., Shrestha, R.L., Pan, Z., Ekhtari, N., Singhanian, A., Hauser, D., Sartori, M. (2016): Capability Assessment and Performance Metrics for the Titan Multispectral Mapping Lidar. Remote Sensing 8, 936. <https://doi.org/10.3390/rs8110936>
- [8] Glira, Ph., Pfeifer, N., Mandlbürger, G. (2016): Rigorous Strip Adjustment of UAV-based Laserscanning Data Including Time-Dependent Correction of Trajectory Errors. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 82 (12), 945 - 954.

- [9] Hauer, C, Schober, B, Habersack, H (2013): Impact analysis of river morphology and roughness variability on hydropeaking based on numerical modelling. *hydrological Processes*, 27(15), 2209-2224. <https://doi.org/10.1002/hyp.9519>
- [10] Heine, E., Weidinger, J. T., Götz, J. (2016): Geologisch-geomorphologische Untersuchungen des subaquatischen Bereichs von Erdströmen in den Traunsee (ÖÖ) unter Anwendung von Fächerecholot und parametrischem Sedimentecholot. *Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation (VGI)*, Heft 1, S. 25–37.
- [11] Heine, E., Briese, Ch., Csaplovics, E., Eberhöfer, Ch., Loiskandl, W. (2016): Hydrographische Vermessung des Neusiedler Sees. *Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation (VGI)*, Heft 1, S. 9–24.
- [12] IHO (2020): IHO Standards for Hydrographic Surveys. https://iho.int/uploads/user/pubs/standards/s-44/S-44_Edition_6.0.0_EN.pdf (letzter Zugriff: 12.08.2022)
- [13] Iqbal, M. (1983): *An Introduction To Solar Radiation*. Elsevier, ISBN 978-0-323-15181-8.
- [14] Jocham, S., Dobler, W. Baran, R., Aufleger, M., Steinbacher, F. (2014): Einsatz hochauflösender Bathymetriedaten aus luftgestützter Vermessung in der Abfluss- und Habitatmodellierung. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft* 66/5-6, 206-213.
- [15] Kinzel, P.J., Legleiter, C.J., Nelson, J.M. (2013): Mapping River Bathymetry With a Small Footprint Green LiDAR: Applications and Challenges. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 49: 183-204. <https://doi.org/10.1111/jawr.12008>
- [16] Land Oberösterreich (2022): Open Data. Digitales Geländemodell. Digitales Oberflächenmodell. Orthofotos. <https://www.land-oberoesterreich.gv.at/119788.htm>. (letzter Zugriff: 17.08.2022)
- [17] Mader, D., Richter, K., Westfeld, P., Weiß, R., Maas, H.-G. (2019): Detektion und Extraktion von Gewässersohlenpunkten aus ALB-Daten mittels Full-Waveform Stacking. In: *Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V.*, Band 28, 407-417.
- [18] Mandlbürger, G., Hauer, C., Höfle, B., Habersack, H., Pfeifer, N. (2009): Optimisation of LiDAR derived terrain models for river flow modelling. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13, 1453 - 1466.
- [19] Mandlbürger, G., Pfennigbauer, M., Riegl, U., Haring, Al., Wieser, M. Glira, Ph., Winiwarter, L. (2015): Complementing airborne laser bathymetry with UAV-based lidar for capturing alluvial landscapes. in: *SPIE Remote Sensing 2015*.
- [20] Mandlbürger, G., Pfennigbauer, M., Schwarz, R., Mikolka-Flöry, S., Nussbaumer, L. (2020): Concept and Performance Evaluation of a Novel UAV-Borne Topo-Bathymetric LiDAR Sensor. *Remote Sensing*, 12 (2020), 6; 986-1 – 986-28, <http://dx.doi.org/10.3390/rs12060986>.
- [21] Mandlbürger, G. (2020): A review of airborne laser bathymetry for mapping of inland and coastal waters. *Hydrographische Nachrichten*, 116; 6-15, <http://dx.doi.org/10.23784/HN116-01>.
- [22] Nakamura, K., Yamamoto, K. (2018): River survey using Airborne Laser Bathymetry (ALB) and its applications. *Proceedings of the 12th International Symposium on Ecohydraulics*, Tokyo.
- [23] Pfeifer, N., Mandlbürger, G., Glira, P. (2016): Laser-scanning. in: *Handbuch der Geodäsie: 5 Bände, Photogrammetrie und Fernerkundung*; W. Freeden, R. Rummel (Hrg.); Springer, Berlin Heidelberg, 2016, ISBN: 978-3-662-46900-2, S. 1 – 51.
- [24] Pfennigbauer, M., Ullrich, A., Steinbacher, F., Aufleger, M. (2011): High-resolution hydrographic airborne laser scanner for surveying inland waters and shallow coastal zones. *Proceedings SPIE*, DOI: 10.1117/12.883910.
- [25] Pfennigbauer, M., Rieger, P., Schwarz, R., Ullrich, A. (2022): Impact of beam parameters on the performance of a topo-bathymetric lidar sensor. *Proc. SPIE 12110, Laser Radar Technology and Applications XXVII*, 121100C. <https://doi.org/10.1117/12.2618794>
- [26] Philpot, W. (2019): *Airborne Laser Hydrography II*. Coernell, DOI: 10.7298/jxm9-g971
- [27] Riegl (2022a): Datenblatt des topo-bathymetrischen UAV-Laserscanners VQ-840-G. http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/RIEGL_VQ-840-G_Datasheet_2022-03-15.pdf (letzter Zugriff: 17.08.2022)
- [28] Riegl (2022b): Datenblatt des topographischen UAV-Laserscanners VUX-1UAV. http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/RIEGL_VUX-1UAV-22_Preliminary-Datasheet_2021-09-07.pdf (letzter Zugriff: 17.08.2022)
- [29] Shan, J., Toth, C. (ed.) (2018): *Topographic Laser Ranging and Scanning - Principles and Processing*. 2. Auflage, CRC Press, Boca Raton, 2018, ISBN: 9781498772273.
- [30] Tonina, D., McKean, J. A., Benjankar, R. M., Wright, C. W., Goode, J. R., Chen, Q., Reeder, W. J., Carmichael, R. A., Edmondson, M. R., 2019: Mapping river bathymetries: Evaluating topobathymetric LiDAR survey. *Earth Surf. Process. Landforms*, 44: 507– 520. <https://doi.org/10.1002/esp.4513>
- [31] Wagner, W., Ullrich, Al, Ducic, V., Melzer, T., Studnicka, N. (2006): Gaussian decomposition and calibration of a novel small-footprint full-waveform digitising airborne laser scanner, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 60 (2), 100-112, <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2005.12.001>.
- [32] Wessels, M., Brückner, N., Gaide, S., Wintersteller, P. (2017): Tiefenschärfe — die hochauflösende Vermessung des Bodensees. *Wasserwirtschaft*, (4/2017). <https://doi.org/10.1007/s35147-017-0028-1>

Anschrift der Autoren

Dipl.-Ing. Dr.techn. Gottfried Mandlbürger, TU Wien, Department für Geodäsie und Geoinformation, Wiedner Hauptstr. 8-10, 1040 Wien.

E-Mail: gottfried.mandlbuerger@geo.tuwien.ac.at

Dipl.-Ing. David Monetti, BSc, Skyability GmbH, GZO -Dienstleistungszentrum 5, 7011 Siegendorf.

E-Mail: david.monetti@skyability.com

Christian Greifeneder, MSc, Amt der Oö. Landesregierung, Direktion Straßenbau und Verkehr, Abteilung Geoinformation und Liegenschaft, Bahnhofplatz 1, 4021 Linz.

E-Mail: christian.greifeneder@ooe.gv.at