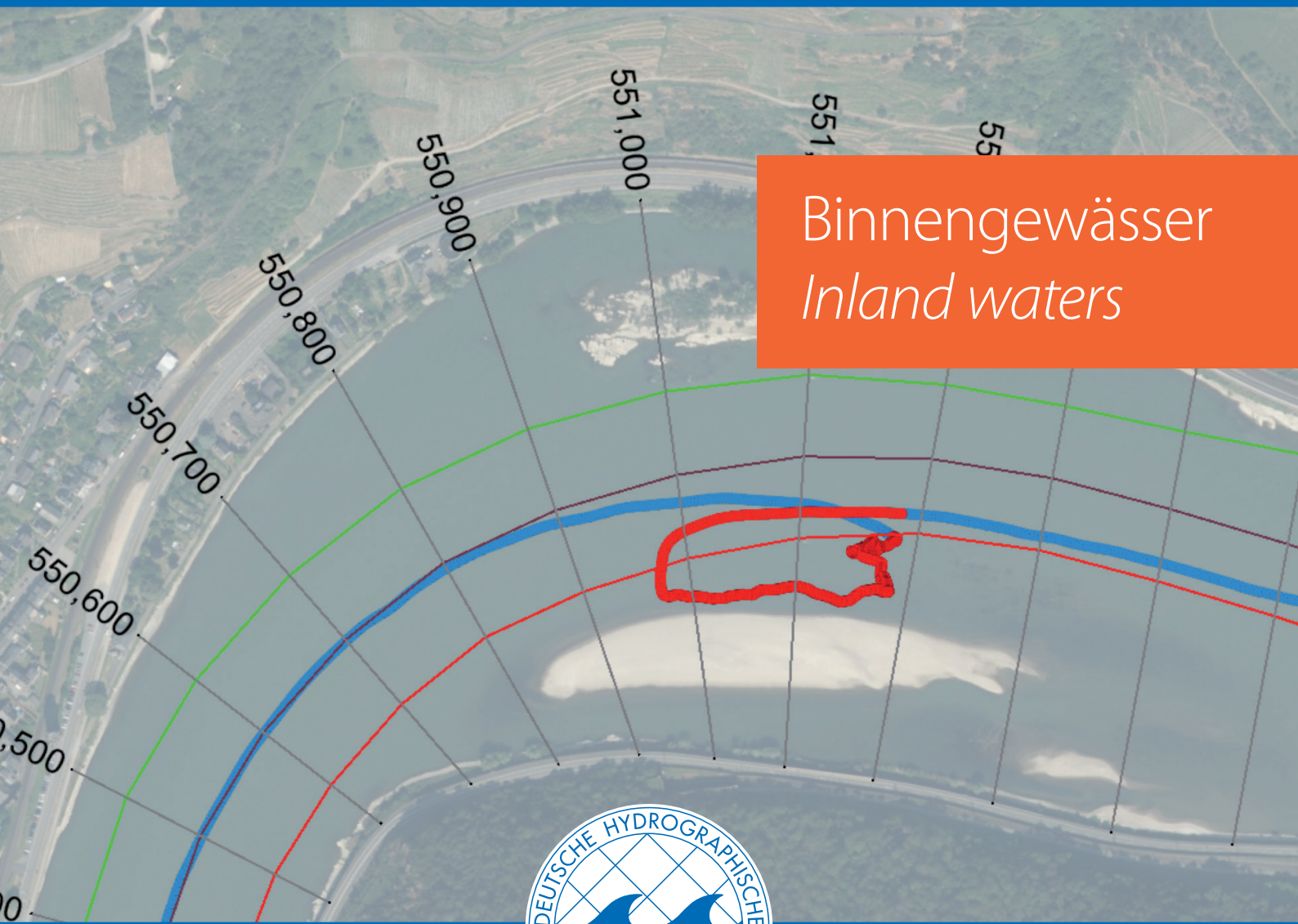


Journal of Applied Hydrography

HYDROGRAPHISCHE NACHRICHTEN

03/2025

HN 130



Binnengewässer
Inland waters



Mit Laserbathymetrie zur präzisen Topografie der Binnengewässer

Ein Beitrag von DAVID MONETTI

Die Laserbathymetrie ist eine etablierte Technologie zur präzisen Vermessung und Überwachung von Binnengewässern. Sie ermöglicht eine flächenhafte Erfassung des Gewässergrundes einschließlich des Umlandes. Angestrebt wird ein lückenloses topografisches Abbild für weitreichende Anwendungen. Besonders geeignet ist der Einsatz in flachen Gewässern wie Fließgewässern, Teichen, Seen und Küstenregionen. Entscheidend ist der Zeitpunkt der Aufnahme. Wasserstand, Wassertrübung, aber auch die Vegetationsentwicklung können das Ergebnis beeinflussen. Drohnensysteme werden in naher Zukunft helfen, das volle Potenzial der Laserbathymetrie auszuschöpfen, und sie werden die detaillierte Informationsgewinnung für kritische Einsatzszenarien wie die Hochwassergefahren- und Hochwasserrisikomanagementplanung beschleunigen. Die Firma Skyability GmbH setzt seit 2019 das Laserbathymetriesystem VQ-840-G der Firma RIEGL ein und verfügt über einen großen Erfahrungsschatz aus verschiedensten Anwendungen.

Laserbathymetrie | Wellenform | Punktwolkenklassifikation | erreichbare Wassertiefe | DGM | DOM
laser bathymetry | waveform | point cloud classification | reachable water depth | DTM | DOM

Laser bathymetry is an established technology for the precise surveying and monitoring of inland waters. It enables a comprehensive survey of the water bed including the surrounding area. The aim is to obtain a complete topographical image for wide-ranging applications. It is particularly suitable for use in shallow waters such as rivers, ponds, lakes and coastal regions. The decisive factor is the time of recording. Water level, water turbidity, but also the development of vegetation can influence the result. In the near future, drone systems will help to utilise the full potential of laser bathymetry and accelerate the acquisition of detailed information for critical application scenarios such as flood hazard and flood risk management planning. Skyability GmbH has been using the VQ-840-G laser bathymetry system from RIEGL since 2019 and has a wealth of experience from a wide range of applications.

Einleitung

Skyability wurde 2015 mit einer klaren Vision gegründet: Drohnenservices in den Bereichen Geodatenerfassung und Geoinformatik zu definieren und nachhaltig zu etablieren. Seitdem hat sich das Unternehmen mit Sitz in Siegendorf im Burgenland als führender Anbieter für innovative Fernerkundungslösungen etabliert. Charakteristisch für Skyability ist der kontinuierliche Vorstoß in neue, bislang unerschlossene Anwendungsfelder der Drohnentechnologie, um effizientere und präzisere Methoden für die Geodatenerfassung zu entwickeln.

Bereits 2016 setzte das Unternehmen als einer der ersten Anbieter auf den Einsatz von LiDAR im nahinfraroten Spektralbereich mittels unbemannter Luftfahrzeuge. Diese Technologie revolutionierte die kosteneffiziente Erfassung kleinräumiger Projektgebiete und definierte die räumliche Auflösung von Punktwolken neu. Drei Jahre später erweiterte Skyability sein Sensorsystem-Portfolio um die Laserbathymetrie – eine LiDAR-Technologie im

grünen Wellenlängenbereich. Diese Methode erlaubt detaillierte Einblicke in Gewässer und deren Untergrund und wird sowohl mit UAVs als auch mit Hubschraubern und Flugzeugen eingesetzt.

Die Laserbathymetrie gilt heute als eine der effizientesten Methoden zur präzisen Vermessung von Flachwassergebieten. Häufig in Kombination mit terrestrischer und hydrographischer Vermessung können sowohl Wasserflächen als auch angrenzende Landflächen detailliert kartiert werden. Insbesondere in schwer zugänglichen oder topografisch anspruchsvollen Gebieten bietet diese Technik enorme Vorteile. Darüber hinaus stellt sie oft eine wertvolle Ergänzung zu bestehenden Messverfahren wie dem Airborne Laser Scanning und der hydroakustischen Vermessung dar.

Skyability konzentriert sich in erster Linie auf den deutschsprachigen Raum Europas und leistet dort einen bedeutenden Beitrag zur hochpräzisen Geodatenerfassung. Die Projekte des Unternehmens reichen von der Kartierung natürlicher Gewässer über den Hochwasserschutz bis

Autor

David Monetti ist Geschäftsführer der Skyability GmbH in Siegendorf in Österreich.

david.monetti@skyability.com

Hersteller	Sensortyp	Gewicht	Einsatz mit ...
Leica Geosystems	Chiroptera-5	48 kg	Flugzeug
	HawkEye-5	53 kg	Flugzeug
RIEGL	VQ-840-G	12 kg	Drohne, Heli
	VQ-860-G	15 kg	Heli, Flugzeug
	VQ-880-G	62 kg	Flugzeug
Teledyne Optech	CZMIL	287 kg	Flugzeug
YellowScan	Navigator	3,7 (4,2) kg	Drohne
Fraunhofer IPM	Airborne Bathymetric Laser Scanner	k. A.	Drohne, Forschungssystem

Tabelle 1: Die am Markt verfügbaren laserbathymetrischen Systeme

hin zur Überwachung von Infrastrukturprojekten. Der vorliegende Beitrag beleuchtet die aktuellen Einsatzmöglichkeiten der Laserbathymetrie, zeigt bewährte Anwendungsfälle und diskutiert die weiteren Entwicklungspotenziale dieser zukunftsweisenden Technologie – insbesondere im Hinblick auf Effizienzsteigerung, optimierte Datenauswertung und verbesserte Messmethoden.

Sensor, Erfassung und Auswertung

Sowohl Hochwasserereignisse als auch lang anhaltende Trockenperioden haben das Thema Wasser in den Mittelpunkt des gesellschaftlichen Interesses gerückt. Der steigende Bedarf an präzisen und effizienten Vermessungsmethoden hat auch bei LiDAR-Herstellern zu einem Innovationsschub bei laserbathymetrischen Systemen geführt. Besonders die Miniaturisierung und Gewichtsreduktion neuer Sensoren ermöglichen nun den Einsatz auch auf UAV-Systemen, wodurch kleinräumige Erfassungen deutlich kosteneffizienter durchgeführt werden können. Die derzeit am Markt verfügbaren Systeme sind in Tabelle 1 aufgeführt. Die optimale Arbeitshöhe variiert je nach Hersteller und Sensortyp. Entscheidend sind die Pulsenergie und die Pulsdauer. Mit zunehmender Flughöhe wird eine größere Streifenbreite erreicht – typischerweise haben Sensoren einen Öffnungswinkel von $\pm 20^\circ$.

Der vergrößerte Abstand zwischen Sensor und Ziel führt zu einer Verringerung der erreichbaren Auflösung, da der Abtastfleck größer wird und die Punktdichte abnimmt.

Ein wesentlicher Parameter ist die einstellbare Strahldivergenz des Systems, die maßgeblich die erreichbare Ortsauflösung und damit die Präzision der erfassten Daten beeinflusst. Moderne Systeme bieten zunehmend variable Einstellungen, die eine optimale Anpassung an unterschiedliche Einsatzszenarien ermöglichen. Kurze Pulslängen sind ein weiterer entscheidender Faktor, da sie eine präzise Unterscheidung zwischen Wasseroberfläche und Gewässerboden auch in geringen Wassertiefen erlauben.

Der erreichbaren Tiefenleistung sind physikalische Grenzen gesetzt, insbesondere die Gefährdung des menschlichen Auges durch den »grünen Laserstrahl«. Eine Erhöhung der Laserleistung zur Verbesserung ist nicht beliebig möglich. Um eine maximale Eindringtiefe zu erreichen, muss der Sensor in möglichst exakter Höhe über der Wasseroberfläche geführt werden. Diese exakte Führung gewährleistet eine gleichbleibend hohe Messqualität und stellt sicher, dass die distanzabhängigen Augensicherheitsanforderungen eingehalten werden. Besondere Aufmerksamkeit erfordert daher die topografische Planung des Flugpfads. Eine sorgfältige Vorbereitung minimiert Messfehler und sorgt für eine gleichmäßige Datenqualität über das gesamte Untersuchungsgebiet. Faktoren wie Geländeneigung, Vegetationsdichte und infrastrukturelle Gegebenheiten sollten frühzeitig in die Flugplanung einbezogen werden, um eine effiziente und präzise Erfassung zu gewährleisten.

Um die maximale Eindringtiefe des Laserstrahls in das Wasser zu nutzen, kann unter anderem das rückgestreute Signal als digitalisierte Wellenform aufgezeichnet werden. Dadurch wird eine Auswertung für auch sehr schwache Signale, die im Sensorrauschen sonst kaum erkennbar wären, ermöglicht. Aktuelle Extraktionsalgorithmen sind zeit- und rechenintensiv, was eine »Echtzeit«-Auswertung bzw. Online-Verarbeitung erschwert und derzeit ausschließt. Zusätzlich berücksichtigen einige Ansätze auch die rückgestreuten Signale der Nachbarschaftspulse, beispielsweise durch »Full-Waveform-Stacking«, um die Ergebnisse zu verbessern. Dies erfordert zunächst eine präzise räumliche Bestimmung der Wellenform anhand der aufgezeichneten Flugtrajektorie. Das bedeutet, dass oft mehrere Tage in die Nachbearbeitung der Full-Waveform-Daten investiert werden müssen, um das eigentliche Endergebnis sichtbar zu machen (Abb. 1).

Die erreichbare Eindringtiefe des Laserpulses und die maximal extrahierbaren Wassertiefen hängen von einer Vielzahl von Faktoren ab, die

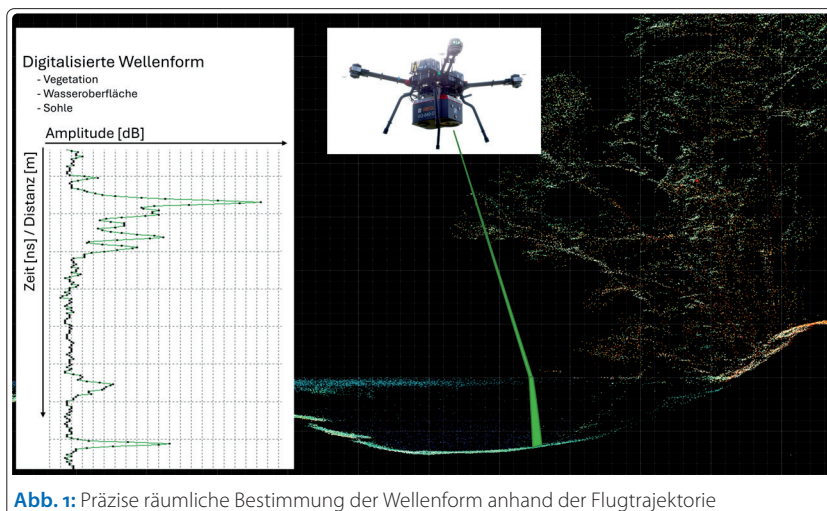


Abb. 1: Präzise räumliche Bestimmung der Wellenform anhand der Flugtrajektorie

sowohl die Aufnahmequalität als auch die spätere Auswertbarkeit der Daten beeinflussen. Zu diesen Faktoren zählen unter anderem die Parametrierung des Sensorsystems, der Abstand des Sensors zur Wasseroberfläche – kurz: die Flughöhe –, die atmosphärischen Bedingungen wie Luftfeuchte und Temperatur sowie das Hintergrundlicht. Weitere entscheidende Einflüsse sind die Beschaffenheit der Wasseroberfläche, ihre Sauberkeit und die Trübung der Wassersäule, die durch Schwebstoffe oder Verschmutzungen hervorgerufen werden kann. Die Beschaffenheit des Gewässergrundes spielt eine zentrale Rolle, da sie bestimmt, wie gut der Laserpuls zurück zum Sensor reflektiert wird. Besonders geeignet sind klare Gewässer mit festem, kiesigem Grund. Trübe Gewässer, die durch Schwebstoffe oder Organismen verunreinigt sind, sowie Gewässer mit lehmigem Grund sind dagegen schwieriger zu messen. Diese Faktoren beeinflussen die Signalqualität und verringern die Messgenauigkeit.

Tabelle 2 gibt einen Überblick über die tatsächlich erreichten Wassertiefen mit dem RIEGL VQ-840-G-Sensor und zeigt die praktischen Grenzen der Eindringtiefe unter verschiedenen Bedingungen.

In der Laserbathymetrie werden analog wie im Airborne Laser Scanning die erhaltenen Echos in Form von Punkten durch die synchron aufgezeichnete Flugtrajektorie im Raum referenziert. Die erreichbare Gesamtgenauigkeit ergibt sich aus den Einzelgenauigkeiten der verschiedenen Systemkomponenten. So können Laserscanner im Grünlichtbereich eine Distanzgenauigkeit von bis zu 0,015 m erreichen, während hochwertige Navigationseinheiten (IMU) eine Positionsgenauigkeit von 0,02 m horizontal bzw. 0,03 m vertikal sowie einen Orientierungsfehler von Roll und Nick von 0,025° bzw. 0,03° im Heading erwarten lassen. Die exakte räumliche Bestimmung von Unterwasserechos wird durch den Einfluss der Refraktion erschwert, die aufgrund des Phasenwechsels auftritt. An der Grenzschicht zwischen Luft und Wasser ändert sich nicht nur der Strahlengang, sondern es reduziert sich die Lichtgeschwindigkeit für den Wasserkörper deutlich. Zur Durchführung dieser Korrektur wird ein Wasseroberflächenmodell erstellt, das aus den Wasseroberflächenechos abgeleitet wird. Da der Wasseroberflächenhorizont aus der Nachbarschaft der Echos bestimmt wird, bleibt eine gewisse Unsicherheit. Insbesondere bei dynamischen Wasseroberflächen ist hier besondere Vorsicht geboten. Der traditionelle streifenweise Ausgleich erfordert besonderes Augenmerk, um möglichst eine hohe relative Gesamtgenauigkeit zu erzielen. Mandlbürger et al. (2022) konnten nachweisen, dass die erzielten Genauigkeiten dem Exclusive Order Standard der IHO entsprechen. Neben der Vollabdeckung wird eine Gesamthöhenunsicher-

Gewässer / Projektort	Typ	WT	Zusatzinfo
Rhein / DE-Koblenz Niederwerth	Fluss	4,5 m	Nebenarm, lückenlose Testmessung (BfG)
Rhein / DE-Bingen	Fluss	4,3 m	Flachwassererfassung, Ergänzungsmessung
Thun / CH-Thun	See, Fluss	3,2 m	Einlauf Kraftwerk, lückenlos
Aare / CH-Rapperswill	Fluss	1,8 m	lückenlos
Grüntensee / DE-Nesselwang	See	3,1 m	lückenlos
Krems / AT-Kremsmünster	Fluss	2,4 m	lückenlos
Lahn / DE-Nassau	Fluss	3,4 m	Ergänzungsmessung
Vierwaldstättersee / CH-Luzern	See	12 m	Ergänzungsmessung Flachwasserbereich
Ostsee / DE-Dierhagen	Meer	5,4 m	Flachwasserbereich, lückenlos
Ager / AT-StadlPaura	Fluss	9,2 m	lückenlos
Traunsee-Traun / AT-Gmunden	Fluss	11,1 m	lückenlos
Bünzaue / DE-Neumünster	Fluss	0,7 m	lückenlos
Broye Kanal / CH-Ins	Fluss	7 m	Ergänzungsmessung, lückenlos
Inn / AT-Schalkl	Fluss	2,8 m	lückenlos
Kegelesee / AT-Heiligendblut	See	9,7 m	Flachwasserbereich, lückenlos
Kallnach / CH-Kallnach	Fluss	2,5 m	lückenlos

Tabelle 2: Im Projektgebiet maximal mit Laserbathymetrie erzielte Wassertiefe (WT) mit dem RIEGL VQ-840-G-Sensor

heit von 15 cm für 95 % aller Messungen vorgeschrieben.

Die Punktwolkenklassifikation dient dazu, die extrahierten Echos bestimmten Klassen zuzuordnen (Abb. 2). Insbesondere stehen nun Echos für die Klassen »Boden-Nass«, »Wasseroberfläche« bzw. »Wassersäule« oder auch vermehrt Fehlechos zur Verfügung. Eine exakte automatische Klassifikation wird erschwert, wenn eine hohe Anzahl von Fehlechos bei der Extraktion in Kauf genommen werden muss oder auch die topografisch beschreibende Punktwolke durch Abschattung dichter Vegetation oder auch tiefer Wasserstellen nur noch mit geringer Dichte vorliegt. In vielen Fällen ist eine manuelle Nachbearbeitung erforderlich, um die Qualität der Klassifikation zu verbessern. Diese Nachbearbeitung ermöglicht es, die fehlerhaften Punkte zu korrigieren und die Genauig-

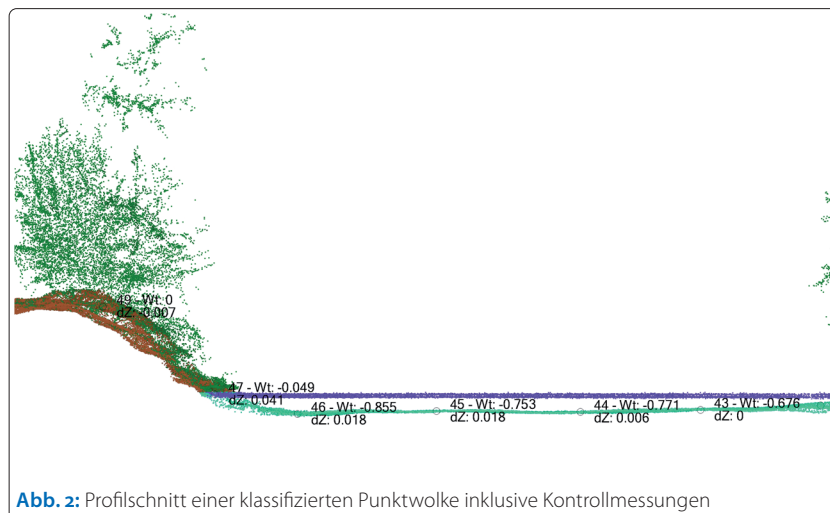


Abb. 2: Profilschnitt einer klassifizierten Punktwolke inklusive Kontrollmessungen

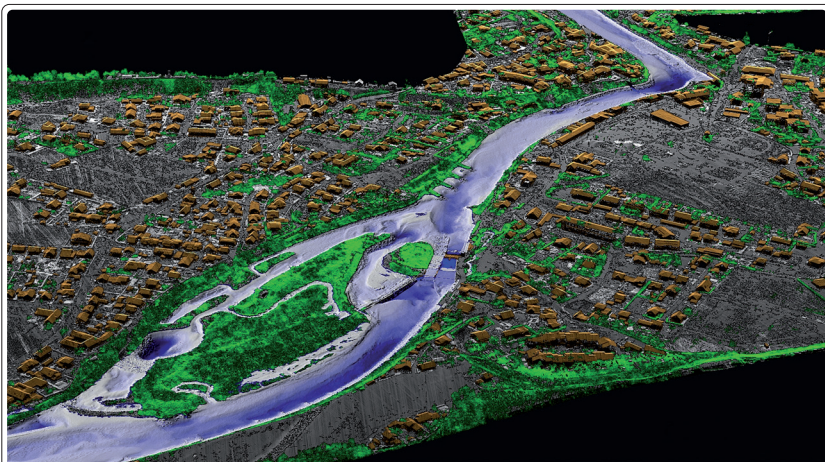


Abb. 3: Klassifizierte Punktwolke einer flächenhaften laserbathymetrischen Erfassung

keit der Daten für nachfolgende Modellierungen, wie etwa die Berechnung von Wassertiefen oder die Erstellung von Geländemodellen, zu steigern (Abb. 3). Eine sorgfältige und präzise Nachbearbeitung ist daher von zentraler Bedeutung, um die Qualität der gewonnenen Daten zu optimieren.

Neben den hauptsächlich nachgefragten Produkten wie DGM-W, DGM und DOM-Rastermodellen (Abb. 4) gibt es eine Vielzahl weiterer wertvoller Informationen, die aus der Vermessung mit der Laserbathymetrie gewonnen werden können. So ermöglicht die Technologie z. B. die Segmentierung des Gewässerbodens nach seiner Beschaffenheit. Unterschiedliche Bodentypen wie Kies oder Lehm lassen sich genau abgrenzen, was für geotechnische Analysen oder die Kartierung von Lebensräumen wichtig ist. In der Unterwasserkartografie können nicht nur Gewässerstrukturen wie Bauwerke oder Uferlinien lokalisiert, sondern auch Objekte wie Treibgut identifiziert werden. Diese Fähigkeit, Objekte im Wasser zu erkennen, eröffnet neue Anwendungsfelder, z. B. im Umweltmonitoring oder in der Schifffahrt.

Für die Analyse von Oberflächengewässern können unterstützend Strukturlinien abgeleitet wer-

den, die wertvolle Informationen über die Form und Dynamik des Gewässers liefern. Dies kann insbesondere für hydrologische Untersuchungen oder die Modellierung von Hochwasserereignissen von Bedeutung sein.

Ein weiterer Trend in der Entwicklung der Laserbathymetrie ist die Berechnung von Modellen mit einer besonders feinen Gitterauflösung von weniger als 1 m. Eine Zellengröße von 0,25 m ist mittlerweile üblich und ermöglicht eine sehr genaue Darstellung der Gewässerstruktur und des Gewässerbodens. Diese hohe Auflösung wird vor allem für Anwendungen benötigt, die eine detaillierte Analyse der Gewässer und ihrer Umgebung erfordern, wie z. B. die Modellierung von Flussläufen oder die Planung von Hochwasserschutzmaßnahmen.

Lücken in den Punktwolkendaten, die durch fehlende Eindringung, Abschattungen wie Bauwerke, Brücken, Stege, überschirmende Vegetation, Schifffahrt etc. entstehen, müssen in geeigneter Weise geschlossen werden. Häufig ist eine Datenfusion mit flächendeckenden Laserscanbefliegungen oder Modellen aus hydroakustischen Messungen erforderlich. Gerade bei Fließgewässern ist hier eine hohe Dynamik der Unterwassertopografie erkennbar. Dies macht eine möglichst zeitgleiche Erfassung wünschenswert.

Projektgestaltung

Besteht Bedarf an einer Gewässererfassung und ist die Laserbathymetrie für den betreffenden Gewässertyp geeignet, sollten mehrere wesentliche Punkte berücksichtigt werden, um eine präzise und qualitativ hochwertige Datenerfassung zu gewährleisten.

Die Projektkoordination und -abwicklung sollte so geplant werden, dass die Erfassungsbedingungen optimal berücksichtigt werden. Der gewählte Erfassungszeitpunkt ist entscheidend für die Datenqualität. Neben der Einbindung in übergeordnete Projekte sind auch die Genehmigungen für die Befliegungen und die Koordination im Luftraum wesentliche Faktoren.

Die zeitliche Abstimmung aller eingesetzten Aufnahmemethoden – ALB, ALS, Sonar und terrestrische Vermessung – spielt eine zentrale Rolle. Die Veränderungen der Gewässersohle innerhalb kurzer Zeiträume können erheblich sein. Gewässer verhalten sich wie »lebende Organismen«. Um auch die Qualität der Laserbathymetrie zu sichern, sollte eine terrestrische Vermessung eingeplant werden. Insbesondere die Durchführung von Pass- und Kontrollflächenmessungen ist entscheidend, um die Messgenauigkeit zu überprüfen und mögliche Fehler zu identifizieren. Ungünstige äußere Einflüsse wie wechselhaftes Wetter, Schifffahrt, Staub, Schmutz, die Entleerung von Stauanlagen, Schneeschmelze oder Vegetationsänderungen

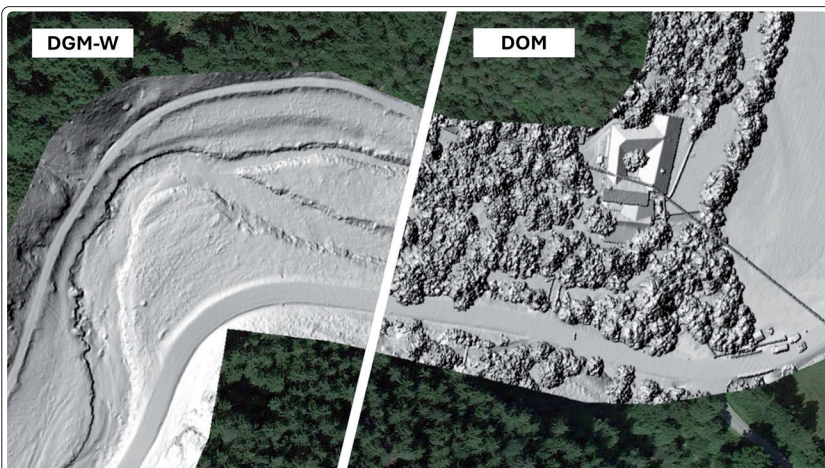


Abb. 4: Rastermodelle: DGM-W versus DOM

können die Qualität der Vermessung erheblich beeinträchtigen.

Auch saisonale Faktoren wie Algenwachstum im Sommer oder Temperaturschwankungen zwischen Sommer und Winter sollten nicht außer Acht gelassen werden, da sie die optischen und akustischen Eigenschaften des Gewässers verändern.

Für mittlere Fließgewässer liegt die Streckenrate der Erfassung je nach Trägersystem bei bis zu 15 km pro Tag mit einem UAV (VLOS) und bis zu 80 km pro Tag mit einem Hubschrauber (Abb. 5). Bei mehrtägigen Erfassungen ist es besonders wichtig, stabile Bedingungen anzustreben, um eine konsistente Datenqualität über das gesamte Projektgebiet sicherzustellen.

Zusammenfassung und Ausblick

Etablierte Anwendungsgebiete der Laserbathymetrie sind die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung, die Energiewirtschaft, die Bauwirtschaft sowie Projekte der öffentlichen Hand, wie z. B. die Gefahrenzonenplanung. Auch die Gewässerökologie und die Unterwasserarchäologie profitieren. Die Laserbathymetrie eignet sich besonders für den Flachwasserbereich von Fließgewässern wie Bächen, Flüssen und großen Strömen. Auch Stauräume und ausgedehnte Seeflächen im Uferbereich können effizient erfasst werden. Gerade dort, wo Bewuchs den Zugang oder die terrestrische Erfassung erschwert, kann von einer kostengünstigen Lösung ausgegangen werden.

Als Trägerplattformen für laserbathymetrische Sensoren werden derzeit vor allem Hubschrauber und Flugzeuge eingesetzt, in naher Zukunft werden Drohnen ihre Vorteile ausspielen (Abb. 5). Automatisierte Drohnenflüge ermöglichen eine präzise Nachführung des Sensors über der Wasseroberfläche und tragen somit zu einer konstanten Datenqualität bei. Eine Herausforderung stellt jedoch das hohe Systemgewicht derzeit verfügbarer Sensoren dar, sodass häufig Drohnen mit einem Abfluggewicht von ≥ 25 kg erforderlich sind. Deren Zulassung und Betrieb ist mit erheblichen regulatorischen und organisatorischen Hürden verbunden. Zudem fehlen häufig die notwendigen Genehmigungen für eine großflächige Projektdurchführung. Großflächige Erfassungen mit Drohnen sind derzeit aufgrund logistischer Restriktionen sowie hoher Durchlaufzeiten nur schwer realisierbar.

Anwender wünschen sich von den Sensorherstellern eine höhere Eindringtiefe der Sensoren



Abb. 5: Sensorintegration Hubschrauber und UAV

– ohne dabei die Augensicherheit zu gefährden. Zudem soll der Messfleck möglichst klein sein, um eine hohe »Schärfe« der Daten zu erreichen. Gleichzeitig gilt es, die erfassten Aufnahmen in kompakte Speicherkapazitäten zu packen. Ein weiteres zentrales Anliegen ist die Gewichtsreduktion der Sensoren, um die Flugzeit bei Drohneneinsätzen zu verlängern. Darüber hinaus sollen innovative Auswertemechanismen die Dauer der Informationsverarbeitung deutlich verkürzen.

In den letzten fünf Jahren hat Skyability erfolgreich eine Vielzahl unterschiedlicher Projekte mit dem RIEGL VQ-840-G-Sensor umgesetzt – auf Drohnen, Helikoptern und Flugzeugen. Die Nachfrage nach Informationen aus der Laserbathymetrie wächst spürbar, und ein Wandel bei den Datenanwendern ist klar erkennbar: Statt einzelner Profile, Linien oder Punktdaten bevorzugen sie zunehmend flächenhafte Datensätze. Diese Entwicklung spiegelt sich auch in der Softwarebranche wider, die mit gezielten Weiterentwicklungen darauf reagiert. Moderne Anwendungen ermöglichen heute eine nahtlose Verarbeitung sowohl von Punktwolkendaten als auch hochauflösenden Rasterdatensätzen. //

Literatur

Mandlbürger, Gottfried; David Monetti; Christian Greifender (2022): Fließgewässervermessung mittels UAV-basierter Laserbathymetrie im Produktiveinsatz. Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation (VGI), <http://hdl.handle.net/20500.12708/135790>