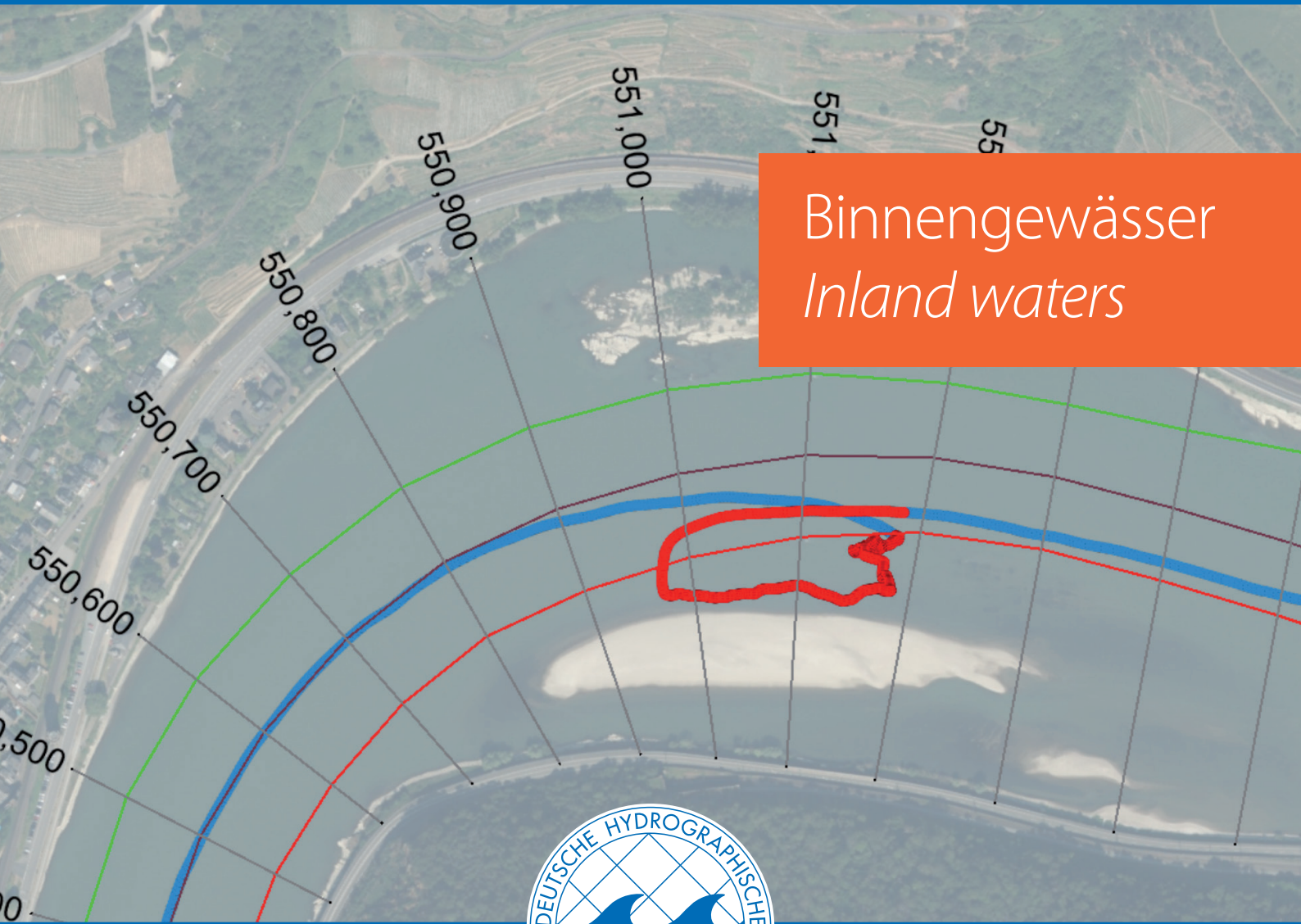


# Journal of Applied Hydrography

HYDROGRAPHISCHE NACHRICHTEN

03/2025

HN 130



Binnengewässer  
*Inland waters*



# AquapHOx Loggers & Transmitters

for optical oxygen sensors

O<sub>2</sub>

T



## Compact Underwater Solution for:

- ultra-high speed & ultra-trace O<sub>2</sub>
- long-term logging & monitoring
- fast water column O<sub>2</sub> profiling
- Aquatic Eddy Covariance measurements

# Liebe Leserinnen und Leser,

immer mal wieder höre ich, die DHyG mache zu wenig für den Bereich der Binnengewässer. Andererseits sei das auch kein Wunder, da die meisten Mitglieder nun mal aus dem Norden kämen, wo das Meer sei.

Richtig ist sicherlich, dass die überwiegende Zahl der Beiträge in dieser Zeitschrift sich eher mit der Vermessung der Meere beschäftigt. Doch regelmäßig werden Projekte im Binnenland vorgestellt. Ich erinnere mich an Berichte von der Vermessung des Bodensees, des Rheins, des Neckars, oder an Artikel, in denen die Vermessung von Bauwerken in Häfen beschrieben wurde. Doch es kommt in der Tat nur ganz selten vor, dass in einem Heft gleich mehrere Beiträge zur Binnengewässervermessung veröffentlicht werden. Das ist in dieser Ausgabe anders! Ganze neun Beiträge beschäftigen sich mit Seen oder mit Fließgewässern.

Die Reise beginnt im Norden, bei der Vermessung des Schweriner Außensees (Seite 5) – dieser Beitrag zeigt zugleich sehr anschaulich, was angrenzende Disziplinen wie die Limnologie oder die Geografie aus hydrographischen Daten herauslesen können. Dann springen wir nach Süden, um zu erfahren, wie Hobbysegler mit Crowdsourcing den Ammersee vermessen haben (Seite 14).

Im Anschluss geht es um Binnenwasserstraßen, zunächst allgemein (Seite 24), dann konkret um den Rhein, wobei unterschiedliche Verfahren zum

Einsatz kommen: zum einen ein Fächerecholot (Seite 30), zum anderen ein luftgestütztes Laserscanningsystem (Seite 36).

Laserbathymetrie spielt auch in den darauffolgenden zwei Beiträgen eine Rolle, deren Hauptautoren beide aus Österreich kommen. Vorge stellt wird ein Datensatz von der Vermessung der Pielach, eines voralpinen Flusses (Seite 42). Dann geht es ganz allgemein um die Möglichkeiten der Laserbathymetrie zur Erfassung der Topografie in flachen Binnengewässern (Seite 55).

Die Geometrie der Wasseroberfläche von Flüssen ist das Thema eines Artikels zur Wasserspiegel fixierung (Seite 60). Zum Abschluss kommt dann im Interview Eric Oehlmann zu Wort (Seite 68); er leitet die GDWS und ist damit zuständig für einige Tausend Kilometer Wasserstraßen in Deutschland.

Passend zum Schwerpunkt Binnengewässer möchte ich Sie nun noch auf den nächsten Hydrographentag hinweisen. Wir bleiben auf dem Festland, genauer gesagt: Es geht in die Bauhausstadt an die Elbe, nach Dessau-Roßlau, und zwar am 17. und 18. Juni.

Zumindest gedanklich möchte ich Sie aber doch noch ans Meer entführen. Ich lade Sie ein auf eine Reise nach Gran Canaria. Wie das? Das erfahren Sie im letzten Beitrag (Seite 74). Sie benötigen allerdings, so viel sei verraten, einiges Geschick, um das Modell der Insel zu basteln.



Lars Schiller

## Impressum

**Journal of Applied Hydrography**  
HN 130 – March 2025

**HYDROGRAPHISCHE NACHRICHTEN**

Offizielles Organ der Deutschen Hydrographischen  
Gesellschaft – DHyG

**Herausgeber:**

Deutsche Hydrographische Gesellschaft e.V.  
c/o Innomar Technologie GmbH  
Schutower Ringstraße 4  
18069 Rostock

ISSN: 1866-9204

**Chefredakteur:** Lars Schiller  
E-Mail: lars.schiller@dhyg.de

**Redaktion:**

Dipl.-Ing. Peter Dugge; Dipl.-Met. Horst Hecht;  
Ellen Heffner, M.Sc.; Dipl.-Phys. Holger Klindt;  
Friederike Köpke, M.Sc.; Dr. Jens Schneider von Deimling;  
Dipl.-Ing. Stefan Steinmetz; Dr.-Ing. Patrick Westfeld

**Hinweise für Autoren und Inserenten:**

www.dhyg.de > Hydrographische Nachrichten >  
Mediadaten und Hinweise



© 2025

## Ausblick

**Ausbildung mit hydrographischen Inhalten –**  
**Education with hydrographic content**  
HN 131 (June 2025)

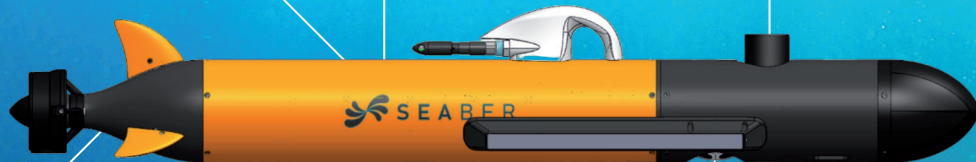
**Küstenzone – Coastal zone**  
HN 132 (October 2025)

**Archäologie – Archaeology**  
HN 133 (March 2026)

Accurate INX navigation

10 min deployment

USBL



High speed and manoeuvrability

DVL

Side Scan Sonar

200 / 680 kHz

swappable transducers

## MARVEL-SCAN

MARVEL-SCAN is the most compact AUV with side scan sonar and acoustic positioning.

Your new way to use AUVs.



### FEATURES

- » INX Navigation system
- » DVL
- » SEAPLAN Software
- » Embedded rechargeable batteries
- » SEACOMM
- » Field case and accessories
- » Acoustic positioning and communication module
- » Autonomous buoy with USBL unit and dual antenna GNSS-RTK module

### FURTHER INFORMATION



# Binnengewässer

## Vermessung des Schweriner Sees

- 6 **Pilotstudie im Schweriner Außensee zur hydroakustischen Seenvermessung mittels USV**  
 Ein Beitrag von SEBASTIAN LORENZ, OVOKE IVWIGHRE, AGATA FELDENS, EZEKIEL DAVID,  
 JORGE IBACETA, WIEBKE KÜLPER und TORSTEN HABERZETTL

## Vermessung des Ammersees

- 14 **Bathymetry measurements using recreational shipping equipment providing a huge dataset from lake Ammersee in southern Germany**  
 An article by ANDREAS G. NIEDERMEIER and MANFRED MATHEIS

## Vermessung von Binnenwasserstraßen

- 24 **Gewässervermessung an den Binnenwasserstraßen des Bundes**  
 Ein Beitrag von REINER KASTENHOLZ und THOMAS ARTZ

## Vermessung des Rheins I

- 30 **Detection of quartzite blocks in the River Rhine**  
 Development of semi-automatic and automatic approaches for the detection of boulders  
 An article by MARKUS KRAFT, NILS HOLLMAN, KELLY TORRES, ERIC IDUN, ELLEN HEFFNER,  
 ANNIKA L. WALTER and HARALD STERNBERG

## Vermessung des Rheins II

- 36 **Luftgestützte hochaufgelöste Vermessung flacher Gewässer am Beispiel des Rheins**  
 Ein Beitrag von JANNIS GANGELHOFF, CHRISTOPH S. WERNER und ALEXANDER REITERER

## Vermessung eines voralpinen Flusses

- 42 **Mapping shallow inland running waters with UAV-borne photo and laser bathymetry**  
 The Pielach River showcase  
 An article by GOTTFRIED MANDLBURGER, JAN RHOMBERG-KAUERT, LAURE-ANNE GUEGUEN,  
 CHRISTIAN MULSOW, MARKUS BREZOVSKY, LUCAS DAMMERT, JOE HAINES, SILVIA GLAS, FREDERIK SCHULTE,  
 PHILIPP AMON, LUKAS WINIWARTER, BORIS JUTZI AND HANS-GERD MAAS

## Vermessung von Binnengewässern

- 55 **Mit Laserbathymetrie zur präzisen Topografie der Binnengewässer**  
 Ein Beitrag von DAVID MONETTI

## Wasserspiegel eines Flusses

- 60 **Wasserspiegelfixierung zur Bestimmung der Wasseroberflächengeometrie**  
 Ein Beitrag von THOMAS BRÜGGEMANN, FELIX LORENZ, ALISA YAKHONTOVA,  
 BENJAMIN EBERHARDT, ROBERT WEISS und THOMAS ARTZ

## Wissenschaftsgespräch

- 68 **»Im Gegensatz zur Autostraße sind Wasserstraßen Erholungsraum für Mensch und Tier«**  
 Ein Interview mit ERIC OEHLMANN

## Papiermodell

- 74 **Die Entstehung des Bastelbogens »Gran Canaria«**  
 Ein Beitrag von PETER DUGGE

# Pilotstudie im Schweriner Außensee zur hydroakustischen Seenvermessung mittels USV

Ein Beitrag von SEBASTIAN LORENZ, OVOKE IVWIGHRE, AGATA FELDENS, EZEKIEL DAVID, JORGE IBACETA, MATTHIAS HINZ und TORSTEN HABERZETTL

Im März 2024 wurde ein 2,36 km<sup>2</sup> großer Teilbereich des Schweriner Außensees (Mecklenburg-Vorpommern) mit Hilfe eines Uncrewed Surface Vehicle (USV) von der Subsea Europe Services GmbH unter Verwendung des interferometrischen Sonars GeoSwath 4R und des Fächerecholots R2Sonic 2026 V+ neu vermessen. Die gemessenen Wassertiefen reichten von weniger als einem Meter bis zu 51 Metern. Die Kombination beider Messverfahren lieferte Rasterdaten zur Morphologie, zur Sedimentbeschaffenheit des Seebodens sowie zu dessen topografischen Besonderheiten in bislang unbekannter Genauigkeit. Mit einer Bodenauflösung von 0,25 bis 0,50 m konnten detaillierte bathymetrische Daten und das subaquatische Mikrorelief mit Objekten (z. B. Steine) und Depressionen in Größe und räumlicher Verbreitung erfasst werden. Die erfolgreiche Anwendung einer Kombination aus zwei Fächerecholoten für das breite Wassertiefenspektrum in einem Binnensee wird hier beschrieben. Die Datenqualität und die Effizienz des Verfahrens empfehlen die Seenvermessung mittels USV und Fächerecholoten auch für andere Binnengewässer.

Schweriner See | Bathymetrie | USV | Fächerecholot | Sonar | subaquatisches Mikrorelief | Objekterkennung  
Lake Schwerin | bathymetry | USV | multibeam echo sounder | sonar | subaquatic micro-relief | object detection

In March 2024, a 2.36 km<sup>2</sup> section of the Schwerin Outer Lake (Mecklenburg-Western Pomerania) was re-surveyed by Subsea Europe Services GmbH with the help of an uncrewed surface vehicle (USV) using the GeoSwath 4R interferometric sonar and the R2Sonic 2026 V+ multibeam echo sounder. The measured water depths ranged from less than one metre to 51 metres. The combination of both measurement methods provided raster data on the morphology, sediment composition and topographical features of the lake bed with unprecedented accuracy. With a bottom resolution of 0.25 to 0.50 metres, detailed bathymetric data and the subaquatic micro-relief with objects (e.g. stones) and depressions could be recorded in terms of size and spatial distribution. The successful application of a combination of two multibeam echo sounders for the broad water depth spectrum in an inland lake is described here. The data quality and efficiency of the method recommend lake surveying using USV and multibeam echo sounders for other inland waters as well.

## Autoren

Dr. Sebastian Lorenz und Prof. Dr. Torsten Habertzettl arbeiten an der Universität Greifswald. Ovoke Ivwighre, Agata Feldens, Ezekiel David, Jorge Ibaceta und Matthias Hinz arbeiten bei Subsea Europe Services in Halstenbek und Rostock.

sebastian.lorenz@uni-greifswald.de

## 1 Einleitung

Im Bundesland Mecklenburg-Vorpommern sind 2033 Seen mit mehr als einem Hektar Wasserfläche gelegen (gesamt ca. 73 800 ha). Für 202 davon ist das Land über die EU-Wasserrahmenrichtlinie berichtspflichtig (LALLF 2025; WRRRL-MV 2025). Diese Seen unterliegen unter Federführung des Umweltministeriums zum Teil seit Jahrzehnten einer hydrochemischen und limnologischen Beobachtung durch Beprobungen und Feldmessungen. Grundlage für diese Untersuchungen bilden auch Tiefenkarten, die für diese Seen mit Isobathen in 1-m-Abständen zur Verfügung stehen. Diese Daten entstammen bootsgestützten Tiefenvermessungen, die seit Beginn der 1990er-Jahre durch das

Land Mecklenburg-Vorpommern beauftragt wurden. Nur für wenige Seen liegen aktuelle Vermessungen vor, für zahlreiche Seen bietet sich nach mehr als zwei Jahrzehnten eine Neuvermessung an. Begründet im technischen Fortschritt, liefern hydroakustische Vermessungen mittlerweile eine Vielzahl an Parametern in hoher Auflösung, die über die reine bathymetrische Information hinausgehen. Dazu zählen beispielsweise morphologische Detailinformationen mit der Detektion von Objekten am Gewässergrund, Sedimentbeschaffenheit oder je nach Befahrungszeitpunkt auch die Verbreitung submerser Vegetation. Vor diesem Hintergrund wurde zum Zweck der Methodenerprobung im April 2024 ein Teil des Schweriner Au-

ßensees durch das Unternehmen Subsea Europe Services GmbH (Hamburg, Rostock) mit einem unbemannten Wasserfahrzeug (USV, uncrewed surface vehicle) hochauflösend vermessen. Die Pilotstudie wurde im Rahmen eines umweltgeschichtlichen Forschungsprojektes zum Schweriner See in Kooperation mit dem Seenprogramm des Ministeriums für Klimaschutz, Landwirtschaft, ländliche Räume und Umwelt Mecklenburg-Vorpommern durchgeführt. Ein methodischer Überblick und erste Interpretationsansätze der Beckenmorphologie werden hier vorgestellt.

Der Schweriner See ist mit 61,53 km<sup>2</sup> Seefläche der viertgrößte See Deutschlands und liegt in nur 20 km Entfernung von der Ostseeküste im Westen von Mecklenburg-Vorpommern (Abb. 1). Durch den Paulsdamm, eine im Jahr 1842 fertiggestellte Straßenquerung zwischen dem Dorf Rampe im Osten und der Halbinsel Schelfwerder im Westen, ist der See morphologisch zweigeteilt. Der Schweriner Innensee (26,36 km<sup>2</sup>) stellt den südlichen Seeteil dar, wobei die Landeshauptstadt Schwerin an große Teile seines West- und Südufers grenzt. Der größere Schweriner Außensee (35,17 km<sup>2</sup>) liegt nördlich des Paulsdamms. Beide Seeteile sind nur durch einen schmalen Kanal verbunden, der den Wasseraustausch zwischen beiden Seebecken stark einschränkt. In naher Umgebung des Schweriner Sees und vor allem im Stadtgebiet Schwerins sind zahlreiche weitere, jedoch deutlich kleinere Seen gelegen, die den Begriff der Schweriner Seenlandschaft geprägt haben (südlich und westlich: unter anderem Ziegelsee, Medeweger See, Fauler See, Ostorfer See, Lankower See, Neumühler See, Rugensee; östlich und nördlich: unter anderem Pinnower See, Cambser See, Döpe, Lostener See). Die längliche Form der meisten zuvor genannten Seen und ihre Lage in morphologisch deutlich erkennbaren Rinnen legt eine eiszeitliche Entstehung der Seebecken in Zusammenhang mit nach Süden abfließenden Schmelzwässern nahe, welche sich subglazial oder im Gletschervorfeld in Rinnen einschneiden. Die nacheiszeitlichen Sedimentations- und Umlagerungsvorgänge infolge von Bioproduktivität, Karbonatfällung sowie wellen- und strömungsbedingter Erosion haben zu einer erheblichen Verfüllung der Seebecken mit Mudden geführt. Die Mudden haben als stark wassergesättigte Sedimente häufig zu einer Glättung und Vereinfachung des subaquatischen Reliefs geführt. Ihre Zusammensetzung und Lagerungsdicke sind Abbild seeinterner Prozesse. Trotz der nacheiszeitlichen, mehr als 10 000 Jahre umfassenden Sedimentakkumulation weisen die Seen lokal noch immer große Wassertiefen auf. Die Maximaltiefen des Schweriner Sees (38,10 m NHN) betragen 44,60 m im Innensee und 52,40 m im Außensee (WRRL-MV 2025).

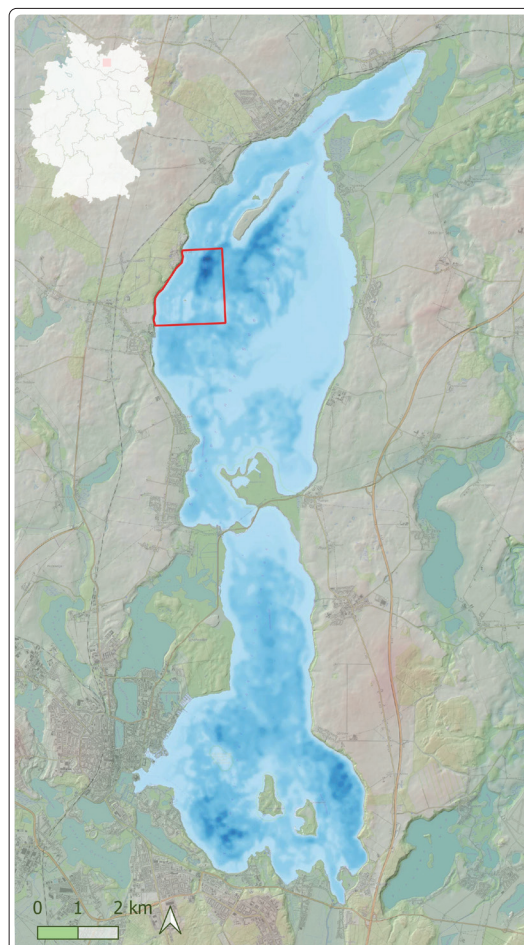
## 2 Methoden

### 2.1 Auswahl des Untersuchungsgebietes

Im Schweriner Außensee wurde anhand der vorliegenden Tiefenkarte und anhand der Kenntnis zur Verbreitung unterschiedlicher Seesedimente (umweltgeschichtliche Seebohrungen im Vorfeld) ein Untersuchungsgebiet zur Vermessung ausgewählt, welches ein größtmögliches Spektrum an Wassertiefen ( $T_{\max} = 52$  m), subaquatischer Reliefgestaltung und damit auch an Seesedimenteigenschaften beinhaltet. Es umfasst steil einfallende Hänge im Bereich des Westufers, plateauartige Verebnungen in unterschiedlichen Wassertiefen, tiefe wannenartige Becken, ausgedehnte Untiefen rund um die Insel Rethberg sowie flach einfallende Hänge (Abb. 1). Das Untersuchungsgebiet ist damit nicht nur für den Schweriner See repräsentativ, sondern für eine Vielzahl der Seebecken im Seengürtel des Jungmoränengebietes zwischen Schleswig-Holstein und Brandenburg.

### 2.2 Vermessungsstrategie und technische Ausrüstung

Um die akustischen Bedingungen für eine Erfassung der Sedimentoberkanten zu optimieren und



**Abb. 1:** Der Schweriner See mit Übersicht seiner Wassertiefen und der rot umrandeten Lage des Untersuchungsgebietes (Datengrundlage Geobasis M-V)

Foto: Subsea Europe Services



Abb. 2: X-Class USV

X-Class USV	
Länge	3,60 m
Breite	0,90 m
Höhe	0,36 m
Tiefgang	0,18 m (ohne Zuladung)
Gewicht in Vollausrüstung	210 kg
Maximale Zuladung	64 kg
Höchstgeschwindigkeit	bis zu 30 Knoten (je nach Zuladung)
Arbeitsgeschwindigkeit	2 bis 12 Knoten
Transitgeschwindigkeit	bis zu 12 Knoten (je nach Zuladung)
Antrieb	2-Propeller-Elektroantrieb
Seetauglichkeitsklasse	SS4 (1,25 bis 2,5 m)
Standfähigkeitsklasse	SS5 (2,5 bis 4,0 m)
Arbeitsbereich	SS2 (0,1 bis 0,5 m)

Tabelle 1: Technische Kenndaten zum X-Class USV in der Ausstattung von Subsea Europe Services

Störungen durch Submersvegetation zu vermeiden, wurde die Vermessung im März 2024 durchgeführt. Zugleich wurde für diesen Zeitraum ein ausgeglichener vertikaler Temperaturverlauf im Epi- und Hypolimnion (undeutliche Thermokline) erwartet, was die Validierung der Schalllaufzeit vereinfacht. Um die Gerätesicherheit während der Mission zu gewährleisten, wurden die USV-

Vermessungsmissionen nur bei Tageslicht durchgeführt. Die Erhebungen erfolgten bei geringen Windgeschwindigkeiten und Wellenhöhen unter 0,5 m, um eine hohe Datenqualität zu gewährleisten und die Stabilität des USV sicherzustellen.

Die Sonarsysteme wurden in Verbindung mit einem 3,6 m langen unbemannt arbeitenden Wasserfahrzeug mit Elektroantrieb vom Typ X-Class USV eingesetzt (Abb. 2, Kenndaten siehe Tabelle 1). Dieses wurde, ausgerichtet auf die Vermessung im Schweriner Außensee, durch Subsea Europe Services mit dem Integrated Hydroacoustic Survey System (iHSS) nach IHO-S-44-Standard ausgerüstet. Dazu gehören zwei Fächerecholote (multibeam echo sounders), die in Abhängigkeit zweier Wassertiefenbereiche eingesetzt wurden. Im Flachwasser (1 bis 12 m Wassertiefe) fand der GeoSwath 4R 500 kHz Verwendung (Abb. 3, Tabelle 2). Dabei handelt es sich um ein interferometrisches Sonar, welches zeitgleich fächerartig die Wassertiefen bestimmt und eine Seitensichtsonar-Kartierung in einem 240°-Sichtfeld durchführt. Der breite Arbeitswinkel mit großer Flächenabdeckung prädestiniert es für litorale Gewässerabschnitte. Im Tiefenwasser (12 bis 52 m Wassertiefe) wurde das R2Sonic 2026 V+ eingesetzt (Abb. 3, Tabelle 2). Hierbei handelt es sich um ein hochauflösendes Fächerecholot mit Wank- und Neigungskorrektur, für welches in Echtzeit die Fächerbreite anpassbar ist, sodass die detaillierte Erfassung auch tiefer Beckenbereiche gewährleistet ist.

Fotos: Links: Geo Acoustic Ltd (2024), rechts: R2Sonic (2025)



Abb. 3: Der Schallgeber des GeoSwath4 500 kHz in der Aufsicht (links). Der Schallgeber des R2Sonic 2026 V+ von der Unterseite aus betrachtet (rechts)

	Interferometrisches Sonar GeoSwath 4R 500 kHz	Fächerecholot R2Sonic 2026 V+
Betriebsfrequenz/ wählbarer Frequenzbereich	500 kHz	170 bis 450 kHz
Maximale Fächerbreite/ wählbarer Fächerwinkel	190 m	10° bis 160°
Maximale Abdeckung	bis zum 12-Fachen der Wassertiefe	abhängig von Wassertiefe und Fächerwinkel

Tabelle 2: Technische Spezifikationen des im Flachwasser verwendeten interferometrischen Sonars GeoSwath 4R 500 kHz und des im tiefen Wasser verwendeten Fächerecholots R2Sonic 2026 V+

### 2.3 Durchführung der Vermessung

Der zu vermessende Bereich wurde an der 12-m-Isobathe in flache uferwärtige (0,82 km<sup>2</sup>) und tiefe seewärtige Zonen (1,54 km<sup>2</sup>) unterteilt. Dabei wurden die Fahrspuren des USV so geplant, dass



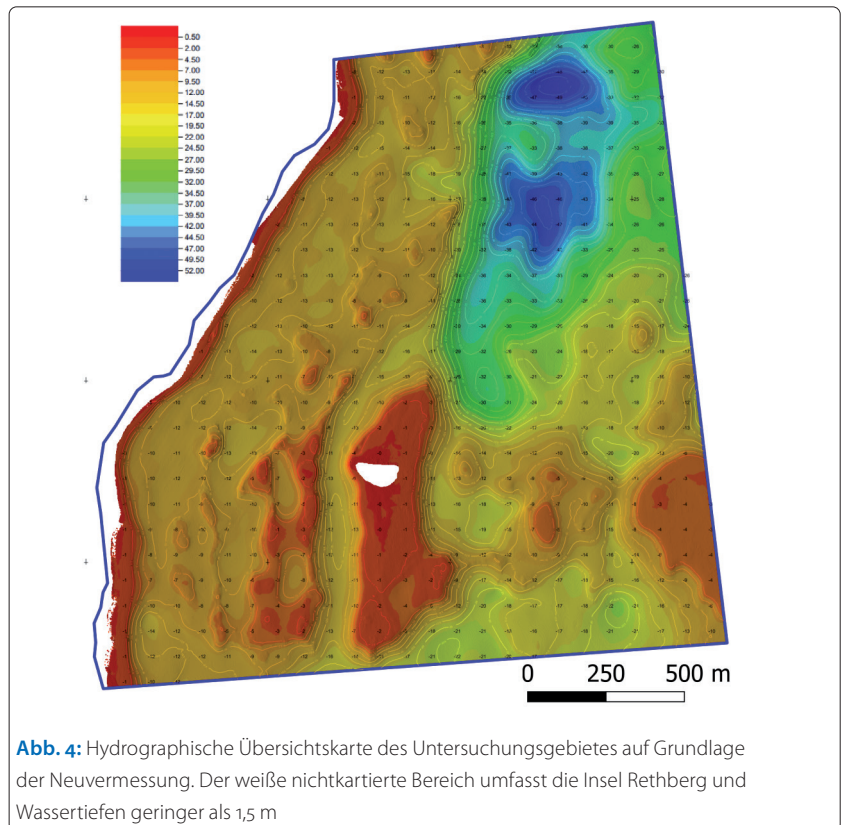
eine vollständige Überlappung der Daten und eine zweihundertprozentige Abdeckung gewährleistet ist. Die Spurbstände wurden aufgrund des Einflusses von Wellen und Strömungen täglich neu geplant und die Navigation des USV zwecks Echtzeitanpassungen vom Ufer aus fernüberwacht. Während der Vermessung wurden Daten zur Bathymetrie und zur Rückstreuung erfasst. Die bathymetrischen Informationen wurden im Koordinatensystem ETRS89/UTM 32N für die horizontale Referenzierung sowie im Höhennetz DHHN2016 für die vertikale Referenzierung erfasst. Die Rückstreuung diente über ihre akustischen Intensitäten der Sedimentklassifizierung. Im Nachgang erfolgten dazu Nachbearbeitungen zur Standardisierung der relativen Intensitätswerte. Zusätzlich wurden während der Feldarbeiten täglich vor Beginn und am Ende der Vermessung Schallgeschwindigkeitsprofile (SVP) gemessen, um die Strahlformung der Sonare zu optimieren und die Refraktion zu korrigieren (insgesamt 21). Zusätzliche Profile wurden immer dann erstellt, wenn die Echolotstrahlen an den Rändern gekrümmt erschienen, was auf eine Änderung des Wassergeschwindigkeitsprofils hinweist.

## 2.4 Nachbearbeitung

Die Nachbearbeitung der Messdaten umfasste drei Arbeitsschritte. Die Daten (ca. 1,5 Mrd. XYZ-Datenpunkte) wurden zuerst mit der Software Beamworx Autoclean auf die mittlere Wassertiefe des Schweriner Außensees von 37,8 m angepasst, bevor die Rauschunterdrückung mittels Filtern angewendet wurde. Nach der Datenbereinigung wurden in einem zweiten Schritt erst digitale Höhenmodelle mit einer Auflösung von 0,25 bis 0,50 m zur Darstellung der Bathymetrie generiert und dann Karten der Rückstreuintensitäten erstellt. Zur Erkennung von Objekten in den bathymetrischen Daten wurden in QGIS Hangneigungskarten sowie Reliefschattierungen zur manuellen Kontrolle erzeugt (Kokalj und Somrak 2019). Die sichtbaren Objekte wurden manuell erfasst und teilweise auf einer Hangneigungskarte auf Basis von faltungsneuronalen Netzwerken (convolutional neural networks, CNN) erkannt (Hinz et al. 2024). Verwendet wurde der YOLOv4-Algorithmus, welcher Bilder in einem einzigen Durchgang verarbeitet und dabei ein CNN zur effizienten Identifizierung und Klassifizierung von Objekten nutzt. Das gewählte Modell wurde an Steinen in einem Hangneigungsraster mit einer Auflösung von 0,25 m aus der Kadetrinne (Ostsee) trainiert (Hinz et al. 2024).

## 3 Ergebnisse und erste Interpretation

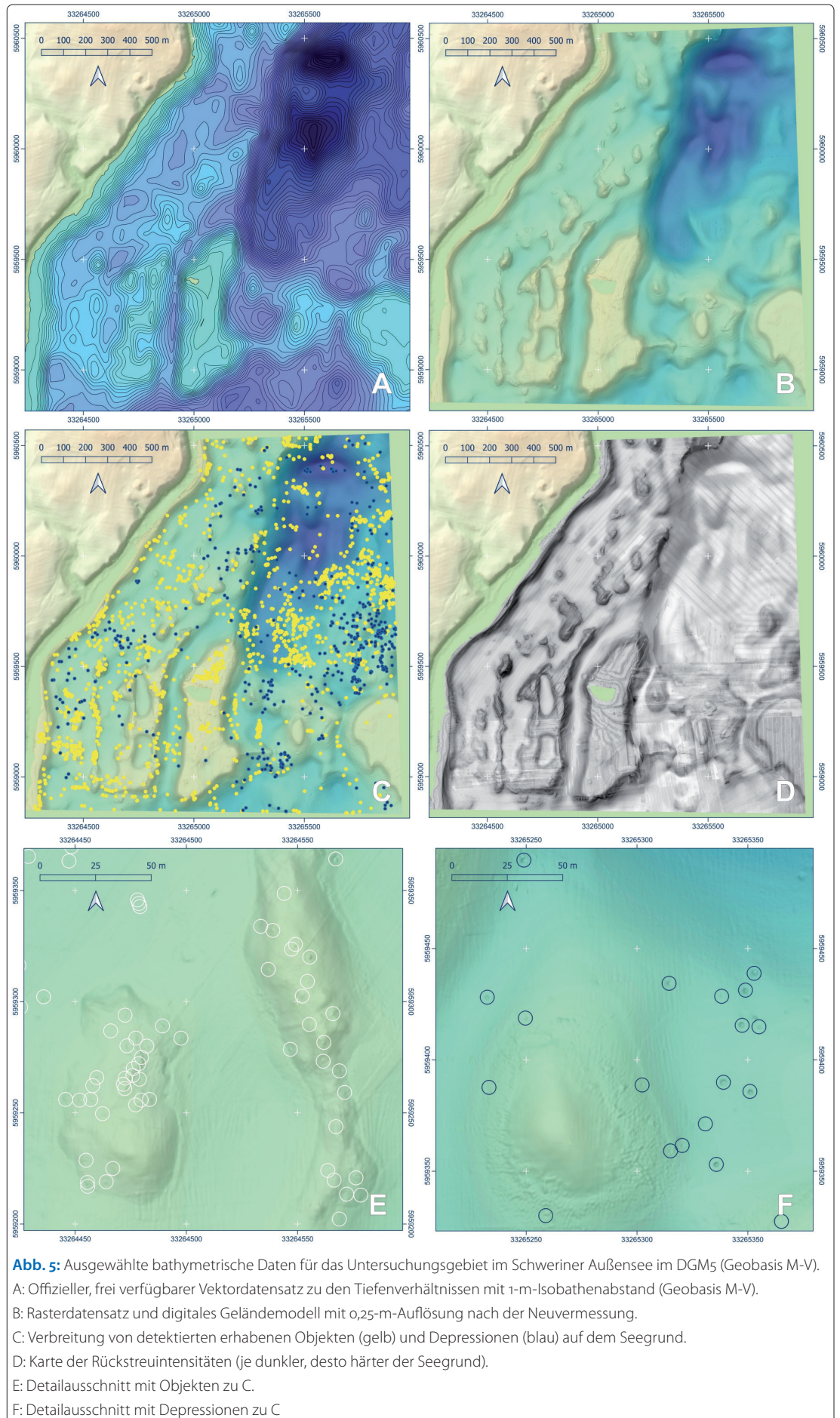
Das neu gewonnene digitale Geländemodell für den untersuchten Teil im Westen des Schweriner Außensees deckt 2,36 km<sup>2</sup> ab und wurde in einer Auflösung von mindestens 0,50 m und in großen



**Abb. 4:** Hydrographische Übersichtskarte des Untersuchungsgebietes auf Grundlage der Neuvermessung. Der weiße nichtkartierte Bereich umfasst die Insel Rethberg und Wassertiefen geringer als 1,5 m

Teilen sogar 0,25 m für erste Interpretationen berechnet (Abb. 4). Im Gegensatz zu den bislang vorhandenen, auf Vektordaten beruhenden Tiefenkarte mit einem Isobathenabstand von 1 m (Abb. 5A, Seenprogramm des Umweltministeriums M-V) liegen nun hochauflösende Rasterdaten vor. Diese erlauben die morphologische Interpretation des Seebeckens in einer Genauigkeit, wie sie bislang nur für terrestrische Geländemodelle möglich ist (Abb. 5B).

Das Seebecken des Schweriner Sees ist kräftig reliefiert und durch Untiefen und Inseln gegliedert (Abb. 1, Abb. 5B). Im Schweriner Außensee wird der Ostteil des Sees durch ausgedehnte Flachwasserzonen mit Wassertiefen unter 10 m geprägt. Der Westteil des Außensees – und damit auch das Untersuchungsgebiet – wird hingegen von NO bis SW streichenden Rinnen durchzogen, die für abrupt abnehmende Wassertiefen aufgrund steiler Hänge, aber auch subaquatische Verebnungen und vor allem das wannenartige Beckentiefste sorgen (Abb. 5B). Unterbrochen werden die rinnenartigen Strukturen von Höhenrücken. Diese treten als Einzelkuppen aufgelöst oder als plateauartige Verebnungen auf (Abb. 5B). Die Einzelkuppen oder Rücken (Abb. 5E) ragen mit steilen Flanken als stärker strukturierte Oberflächen aus einem morphologisch deutlich abgrenzbaren, gleichförmigen Seegrund. Wahrscheinlich sind unterschiedliche Muddemächtigkeiten dafür ursächlich – geringe Seesedimentmächtigkeiten bestehen auf den Kuppen, wodurch sich möglicherweise die Be-



ckenbasis durchpaust. Dem entgegen herrschen in den schwach strukturierten Beckenabschnitten wahrscheinlich hohe Muddemächtigkeiten, die aufgrund ihrer starken Wassersättigung für ein eher weiches bzw. gleichförmiges Erscheinungsbild sorgen. Die [Abb. 5D](#) bestätigt für die nicht verebneten Kuppen eine stärkere (dunklere) und die Senken eine schwächere (hellere) Rückstreuintensität und damit unterschiedliche Sedimenthärten. Den subaquatischen Verebnungen sind unter anderem Terrassenleisten, wallartige Säume und erhabene Objekte als morphologische Details gemein. Sie können auf niedrigere Wasserstände und damit ehemalige Uferkanten hinweisen. Auch die Verebnungen, vor allem zwischen 2 und 4 m unter dem heutigen Seespiegel, fallen mit steilen Flanken zu tieferen Beckenbereichen ab, wobei sie allgemein schwächere Rückstreuintensitäten (helle Färbung) aufweisen. Die auffallend scharfen Abgrenzungen der beckeninternen Senken deuten auf den Einfluss begrabenem Toteises bei der Beckenentstehung hin, welches mit Verzögerung im Spätglazial austaute und überlagernde Sedimente als Hohlformen einsinken ließ. Sehr markant fällt die um mehr als 10 m tief eingeschnittene Rinnenstruktur im Zentrum der unteren Bildhälfte von [Abb. 5B](#) auf, die vom Teilbecken des Beckentiefsten in Richtung Süden vermittelt.

Die hohe Auflösung des Rasterdatensatzes ermöglicht Aussagen zum Mikrorelief, das heißt zu Objekten und Strukturen im Submeterbereich, die sich als erhabene positive oder eingesenkte negative Formen klassifizieren lassen. Über den YOLOv4-Algorithmus wurden Hunderte dieser Formen identifiziert ([Abb. 5C](#)). Die erhabenen Objekte ([Abb. 5C](#), gelbe Punkte) zeigen eine regelhafte, zum Teil gereichte Anordnung und lassen sich in Vergesellschaftung mit den subaquatischen Rücken und Kuppen als mögliche Geschiebe und Blockpackungen deuten. Geschiebe (Dezimeter- bis Meterdimension) sind typischer Bestandteil der glazialen Sedimente und lassen sich sowohl den moränenen Ablagerungen (Grundmoräne) wie auch den Schmelzwassersedimenten zuordnen. Ihr massenhaftes Auftreten ist in der berühmten Kulturlandschaft des Jungmoränengebietes nicht mehr zu beobachten, hier unter Wasser aber möglicherweise noch erhalten. Im Sohlen- und Flankenbereich der tiefen Becken ist von großen Seesedimentmächtigkeiten bei zugleich hohen Sedimentationsraten auszugehen, sodass nicht alle Positivformen mit einer Bestreuung durch Geschiebe erklärbar sind ([Abb. 5E](#)). Mögliche andere Deutungen sind z. B. sedimentäre Aufhöhungen im Bereich von Grundwasser- oder auch Gasaustritten. Eine eindeutige Zuordnung der Positivformen muss im Weiteren durch Bildaufnahmen bestätigt werden. Die Negativformen (Depressionen, [Abb. 5C](#), blaue Punkte) treten ebenfalls zahl-

reich auf und weisen Dimension von wenigen Dezimetern bis zu 3 m auf. Sie erinnern stark an Depressionen, die im marinen Formenschatz der Tiefsee als pockmarks bezeichnet und vor allem mit dem Austreten von Gasen und Gashydraten im Bereich der Kontinentalabhänge in Verbindung gebracht werden ([Abb. 5F](#)) (Hovland et al. 2002). Die hohen Organikgehalte der Seesedimente im Beckentiefsten (Adolph et al. 2024, S. 2150) lassen auch im Schweriner See Gasaustritte als ursächlich dafür erscheinen. Begleitend zu den Bohrkernentnahmen im Beckentiefsten im September 2019 wurden kräftige Gasaustritte beobachtet. Für die ufernahen Beckenbereiche mit Wassertiefen bis 10 m sind kleinere Depressionsbildungen z. B. auch durch ankernde Angelboote denkbar.

Der morphologische Detailreichtum des Gewässergrundes eines Sees im Jungmoränengebiet Nordostdeutschlands ist in dieser Qualität bislang unbekannt. Mit der Deutung und Validierung der nun erkennbaren Strukturen eröffnen sich neue Untersuchungsmöglichkeiten, beispielsweise über das Monitoring von bislang nicht lokalisierbaren Gas- und Grundwasseraustritten, das Erkennen alter ertrunkener Uferlinien oder das Ableiten von Unterwasserhabitaten im Bereich von starker Geschiebebestreuung.

#### 4 Methodische Schlussfolgerungen und Potenziale

Der Einsatz eines USV erwies sich am Schweriner Außensee als äußerst effektiv und wird aus mehreren Gründen auch für andere, kleinere Seen als ideales Vermessungsfahrzeug erachtet. Der Wechsel von sehr flachen zu deutlich tieferen Bereichen erforderte den Einsatz von zwei Messsystemen. Beide Systeme waren notwendig, da die erhobenen Daten für die zwei Tiefenabschnitte (0 bis 12 m und 12 bis 51 m) in der Qualität variierten. Während das Fächerecholot R2Sonic 2026 V+ den Seeboden sowohl in flachen als auch in tiefen Bereichen abbilden konnte, verringerte sich seine Reichweite in sehr flachen Bereichen mit Wassertiefen von kleiner 5 m erheblich. Dadurch hätten die Fahrspuren enger gesetzt werden müssen, um die gewünschte Abdeckung zu erreichen, verbunden mit einer deutlich längeren Messzeit. Aus diesem Grund wurde entschieden, das interferometrische Sonar GeoSwath 4R 500 kHz, welches auch in sehr geringen Wassertiefen eine größere Reichweite und eine geringere Installationshöhe als das R2Sonic aufweist, einzusetzen (Vermeidung von Grundkontakt im zum Teil steinbestreuten Flachwasser).

Das Fächerecholot GeoSwath 4R 500 kHz erwies sich in den Bereichen mit sehr geringer bis geringer Tiefe (0 bis 15 m) dank seiner großen Flächenabdeckung als sehr sinnvoll. Mit ihm kann eine Fächerbreite bis zum 12-Fachen der Wassertiefe abgedeckt werden, sodass es sich für die litora-

len Bereiche mit weniger als 12 m Wassertiefe als effizient herausstellte. Ein pauschaler Spurlinienabstand kann für das Fächerecholot GeoSwath 4R 500 kHz im Flachwasser nicht benannt werden. Er richtet sich nach der Einstellung des Winkels und der gewünschten Auflösung. Selbiges Sonar war beim Einsatz in Gewässertiefen über 20 m stark verrauscht.

Das Fächerecholot R2Sonic 2026 V+ hat zwar eine geringere Flächenabdeckung, jedoch eine höhere Punktdichte und -genauigkeit in tieferen Gewässern. Es konnte optimal in den Wassertiefen ab 12 m eingesetzt werden. Der Spurlinienabstand variierte in dieser Studie mit einer angestrebten Mindestauflösung von 0,50 m zwischen 10 und 30 m in Abhängigkeit von der Wassertiefe.

Die gesamte Fläche von 2,36 km<sup>2</sup> konnte in wenigen Tagen vermessen werden. Die Kombination aus beiden hier beschriebenen Geräten ermöglicht eine Erfassungsgenauigkeit der Bathymetrie in der Fläche von 0,50 m (in den meisten Tiefen sogar bis 0,25 m). Dadurch werden Strukturen in bislang unbekannter Detailliertheit dargestellt und Objekte ab einer Größe von ca. 0,50 m sicher erfasst. Ein höherer Messabstand in den sehr flachen Bereichen hätte zu Informationsverlusten geführt, da Lücken entstanden und somit Daten in einer geringeren Auflösung produziert worden wären.

Die Pilotstudie verdeutlicht, dass USVs die Möglichkeit bieten, die hydrographische Vermessung in Seen und Binnengewässern zu revolutionieren. Die hochauflösenden bathymetrischen Rasterdatensätze und Rückstreudaten liefern präzise Einblicke in die Seebeckenmorphologie, die Sedimentbeschaffenheit und das Mikorelief des Schweriner

Außensees. Letzteres erlaubt das (automatisierte) Identifizieren von Objekten (Geschiebe, Baumstämme, Wracks etc.) bei sehr hoher Lagegenauigkeit.

Die kompakte Bauweise und der geringe Tiefgang ermöglichen das Wassern des Fahrzeugs an jedem kleineren Seezugang. Die geringe Fahrzeuggröße, seine Lagestabilität sowie der elektrische und sehr leise Antrieb ermöglichen den Einsatz auch in kleinen flachen Gewässern und auch in naturschutzfachlich sensiblen Bereichen. Die Störwirkung auf Wasservögel wurde als geringfügig beobachtet. Im Vergleich zum Einsatz von Booten benötigt das USV weniger Infrastruktur, da kleine Badestellen für das An- und Ablegen genutzt werden können. So können schwer zugängliche Gewässer (kleine Seen, Wasserstraßen) leichter vermessen werden. Durch die Integration verschiedener Sensoren kann das USV schnell an lokale Anforderungen angepasst, zugleich kann durch die Echtzeitdatenübertragung umgehend auf die bis dahin unbekannt Gegebenheiten reagiert werden, so wie es in dieser Pilotstudie gezeigt werden konnte. Die Datenerfassung geht weit über die reine Tiefeninformation zu einem Gewässer hinaus und bietet Interpretations- und Nutzungsmöglichkeiten durch Fachleute (Limnologen, Geologen, Biologen, Ökologen und Archäologen), Fachverwaltungen (Gewässeraufsicht) sowie Gewässernutzern (Schifffahrt, Fischerei). Zukünftige Erhebungen könnten von der Integration zusätzlicher Sensoren, wie z. B. eines parametrischen Sedimentecholots (sub-bottom profiler), profitieren, um bei engmaschigen Befahrungen die Vollständigkeit der Daten zu optimieren. //

**Literatur** ::

Adolph, Marie-Luise; Sambor Czerwiński; Mirko Dreßler; Paul Strobel; Marcel Bliedtner; Sebastian Lorenz; Maxime Debret; Torsten Haberzettl (2024): North Atlantic Oscillation polarity during the past 3000 years derived from sediments of a large lowland lake, Schweriner See, in NE Germany. *Climate of the Past*, DOI: 10.5194/cp-20-2143-2024

Geo Acoustic Ltd (2024): GeoSwath USV Module user guide. Geo Acoustic Ltd, United Kingdom

Hinz, Matthias; Patrick Westfeld; Peter Feldens; Agata Feldens; Sören Themann; Svenja Papenmeier (2024): AI-based boulder detection in sonar data – Bridging the gap from experimentation to application. *International Hydrographic Review*, DOI: 10.58440/ihr-30-1-a08

Hovland, Martin; James V. Gardner; Alan G. Judd (2002): The significance of pockmarks to understanding fluid flow processes and geohazards. *Geofluids*, DOI: 10.1046/j.1468-8123.2002.00028.x

Kokalj, Žiga; Maja Somrak (2019): Why Not a Single Image? Combining Visualizations to Facilitate Fieldwork and On-Screen Mapping. *Remote Sensing*, DOI: 10.3390/rs11070747

LALLF (2025): Gewässer – Das Land Mecklenburg-Vorpommern gilt als das gewässerreichste Bundesland. [www.lallf.de/fischerei/statistik/gewaesser](http://www.lallf.de/fischerei/statistik/gewaesser)

R2Sonic (2025): Sonic™ 2026-V. <https://r2sonic.com/products/sonic-2026>

WRRRL-MV (2025): Wasserrahmenrichtlinie in Mecklenburg-Vorpommern. [www.wrrl-mv.de/service/WRRRL-in-Zahlen](http://www.wrrl-mv.de/service/WRRRL-in-Zahlen)

# Ocean Power & Monitoring

Transform into the cost-efficient and sustainable future



OceanPack™  
Underway



Racing

SOCAT  
ready



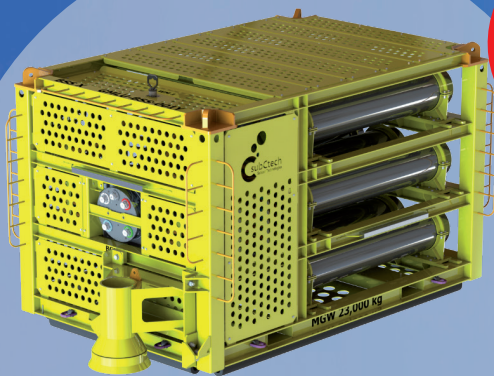
pCO<sub>2</sub> optical Analyzer

## GHG Monitoring

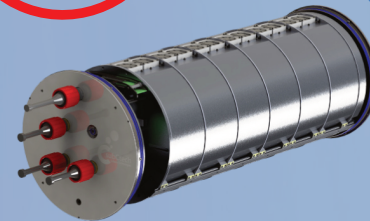
Modular, easy to use and reliable  
monitoring incl. pCO<sub>2</sub> and Microplastic

## Subsea Li-Ion Batteries

Highly reliable, efficient and safe underwater  
power solutions for DC + AC



Energy Storage &  
UPS Systems



Vehicles

API17F  
Offshore  
certified



Standard Batteries

# Bathymetry measurements using recreational shipping equipment providing a huge dataset from lake Ammersee in southern Germany

An article by ANDREAS G. NIEDERMEIER and MANFRED MATHEIS

Large amounts of measurement data are essential for bathymetric documentation and analysis of water bodies around the globe. Even crowdsourced and amateur measurements can be helpful. Within this study we present a huge dataset collected at a German lake with a 25 ft/7.5 m sailing yacht and discuss various topics of methodology and data quality. Data visualisations are given on global and local scale. A second high-resolution dataset collected in a small region with a 3.6 ft/1.1 m software- and remote-controlled drone boat is used as reference.

bathymetry | crowdsourcing | pleasure craft | drone boat (USV) | Lake Ammer | OpenSeaMap  
Bathymetrie | Crowdsourcing | Sportboot | Drohnenboot (USV) | Ammersee | OpenSeaMap

Große Mengen an Messdaten sind entscheidend für die bathymetrische Dokumentation und Analyse von Gewässern rund um den Globus. Selbst Crowdsourcing und Messungen von Amateuren können hilfreich sein. In dieser Studie stellen wir einen großen Datensatz vor, der an einem deutschen See mit einer 7,5-Meter-Segeljacht gesammelt wurde, und diskutieren verschiedene Themen der Methodik und Datenqualität. Gezeigt werden Datenvisualisierungen auf globaler und lokaler Ebene. Ein zweiter hochauflösender Datensatz, der in einer kleinen Region mit einem software- und ferngesteuerten Drohnenboot (USV, 1,1 m) erfasst wurde, dient als Referenz.

## Authors

Dr. Andreas Niedermeier works at the DLR Earth Observation Center, The Remote Sensing Technology Institute, in Oberpfaffenhofen. He is a member of a sailing club on Lake Ammer (SCIA). Manfred Matheis is a graduate computer scientist, technology enthusiast and member of a sailing club on Lake Ammer (ASViM).

Andreas.Niedermeier@dlr.de

## 1 Motivation

Sailing sport is a nice recreational activity, independent on the size or type of the boat. As co-owner of a medium size sailing yacht equipped with several sensors and digital network one also plays with various settings and readings, especially if scientific interest is given. The idea of collecting the data thus is obvious, further analysis easily follows, especially between seasons. Former activities in bathymetry studies (Niedermeier et al. 2000; Niedermeier 2002) give additional background to seriously deal with the data.

Concerning visualisation, given that the B&G chart plotter supports the nautical chart of [openseamap.org](https://www.openseamap.org), it was straight forward to establish contacts with the developers there to further analyse the data collections and determine reasons for missing data. This contact yielded in various developer meetings and measure campaigns together with heads of [openseamap.org](https://www.openseamap.org) for enhancing algorithms, bathymetric datasets and data logger functionalities. A preliminary version of the main dataset (see Section 4) was also used as test data for the re-implementation

of their bathymetry algorithm (Bärlocher and Over 2023).

Even professional services are in need of accurate maps and rely on both official measurements and crowd sourced input data (Jonas 2023; Lammers 2023).

## 2 Study region

The data used in this study was collected to examine Ammersee, a 16.2 km long and 5 km wide lake in southern Germany, located about 35 km west of Munich at roughly 11.12° eastern longitude and 48° northern latitude (BAYregio 2024; Wikipedia 2023b). Mean water level is around 533 m above sea level (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2024b), maximum depth is around 81 m (Wasserwirtschaftsamt Weilheim 1979), lake surface is 46.6 km<sup>2</sup> (Wikipedia 2023b). Its origin are ice age glaciers.

Since mid 19th century it is a recreational region of the city of Munich with actually four tourist steamboats running between mid April and mid October. A few thousand sailing boats are used on the lake each season between April 1st and October 31st. They are based on land, buoy and berth

locations. Motor vessels are strongly restricted on the lake, mainly on working licenses (e.g. lifeguard services of German Red Cross, small scale fishery by tiny family businesses, training and (sailing) boat racing support boats of sailing clubs). Only very few small recreational private motor vessels are licensed with licenses limited to a time span of just a few years. Water skiing is only allowed in a small region in the southern part of the lake during a short daily time window.

There is restricted navigation in several regions due to nature protection. A large nature reserve at the southern end of the lake and some more on land including the shore at some places, where entry is prohibited both from lakeside and landside (especially close to the southern end of the lake navigation could be also risky due to parts of trees lying or floating in the shallow water, as inside the protected area nature is left as is). There is also an agreement between sailing clubs and nature protection NGOs to abstain from water sports during winter (November till March), as the lake is a wintering ground for many migrating birds.

The water level varies on rain falls or melting snow in the 993 km<sup>2</sup> (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2024a) drainage basin (which reaches to some of the summits of the nearby Alps), hydrologic discharge via river Amper at the northern end, and evaporation during hot summer time-spans. There is a low-head dam at the northern end of the lake to regulate the amount of water exiting via Amper. Regular flooding occurring several times per decade can reach levels of 1 m above mean water level or even more in rare situations – the historic height record was 1.94 m in May 1999 (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2024c). Water level in rare cases can drop down to 0.6 m below mean water level due to evaporation which is more than 0.3 m below the minimum water level fixed by the dam.

A gauge providing data in 15 minute intervals is located close to the point, where Amper is leaving the lake. Data is available since November 1963 on a daily basis (minimal/mean/maximal value).

An official bathymetry chart is available from the Wasserwirtschaftsamt Weilheim published in 1979 based on data from 1968 to 1977 (Wasserwirtschaftsamt Weilheim 1979). It only contains depth lines every 5 m starting with a water depth of roughly 3 m. A nautical chart based on this dataset was available for some time as well as a historical chart from 1809. Therefore, any additional and more recent measurements can assist navigation on the lake. Several persons doing regular recreational or business activities at certain shore locations were glad to get interpolated shallow water bathymetric information from our dataset in surroundings of their locations.

## 3 Methodology

### 3.1 Data collection using a sailing boat

The majority of input data was collected using a sailing vessel of type Archambault Surprise (Good 2017; Wikipedia 2023a) built in 1986, partially owned by one of the authors. The boats of this class are 25 feet/7.65 m long keel-boats with 1.25 t weight and 16.5 m<sup>2</sup> main sail. Top speed at usual wind conditions is around 6 knots (3 m/s). The boat used in our case (built as number 472) is a keel-centreboard variant, which allows reducing draft from 1.6 to roughly 0.7 m and thus passing shallow water areas downwind or in moderate wind conditions by pulling up the centreboard.

The ship has a history of trips on Lake Como and Adriatic Sea by former owners and is now based on Ammersee on a buoy location provided by a sailing club on the eastern shore close to the northern end of the lake since ten years. It is equipped with following technical devices:

- an echo sounder/log/water temperature sensor type Airmar DST 8000 close to the lower end of the mast;
- a wind/air temperature and GPS receiver Airmar 150WX at upper end of the mast;
- a chart plotter with built in GPS receiver type B&G model Zeus1 Touch 7 close to the cabin door. Additional B&G data displays in cockpit;
- NMEA 2000 network connecting the sensors and displays;
- electric support engine Torqeedo Cruise 2.0 FP (6 PS equivalent, built 2017) with 24 V/104 Ah Lithium battery. Due to restrictions of motor boating on the lake, this may only be used in certain cases. The motor electronics including an additional GPS receiver is not yet connected to the NMEA network;
- two solar panels to charge the battery;
- full set of navigational and support lights (basic position, motor, anchor/top, deck/working, cabin);
- registered UKW transmitter and receiver with maritime mobile service identification (MSSI) number for emergency cases;
- several tools for supporting rescue of persons in cooperation with the Freiwilliger Seenot-Dienst e.V. (FSD).

This allows a continuous and automatic data collection during all trips as long as the electronics is switched on.

### 3.2 Data collection using remote- and software-controlled drone boat

At the area of dangerous shallow waters, known as »Rieder Eck« a quite dense set of measurement data was collected using a small drone model boat, called »roboboat«. It was originally built simply for the sake of building an autonomous vehi-

cle. Measuring capabilities using an echo sounder were added to provide some meaning to its autonomous movements. The »Rieder Eck« was chosen, as the exact knowledge of the shallows there is of special interest for sailors. Features of the model-boat are:

- hull: model of the fire-fighting boat *Weser* by »Graupner« (the choice was by accident, not special intention), length 110 cm, beam 23 cm, weight around 2.8 kg;
- two DC electric motors 12 V, maximum speed: 1.6 m/s, working speed: 1.0 m/s;
- RC: Open TX, sender: FrSky Taranis X9D Plus SE 2019 2.4GHz 24CH, receiver: RX;
- echo sounder: Lowrance HST-WSBL (Navico Group 2025) mounted 12 cm below water level, Actisense DST-2 200 kHz digitiser, 1 sample per second;
- Pixhawk Open Hardware PX4 PIX 2.4.8 32 bit flight controller;
- Ardupilot – Open Software for autonomous driving – SURFACE BOAT.

Building the boat with all technology, configuring and calibrating it properly roughly took one year. Collecting all measurements for the Rieder Eck also took about one year as well. Measurements could only be made during summer season weekends and only during calm winds as the model boat is quite sensitive to waves. Due to limitations in time and battery capacity the area was split into fifteen separate sections to be measured autonomously, which were covered in nine distinct days of measurement spread across one year's time. Mission Planner software on a Windows 10 Notebook was used for creating the sections. The model boat had covered each section in lanes in a distance of around 5 m from each other.

In total, 76,594 measurements have been taken. Challenges were not only waves, but also heat. At one of the summer days the boats electronics completely failed due to air temperatures above 30 °C, more in direct sunshine, thus the mission had to be aborted. All measurements were normalised to mean water level by considering gauge »Stegen« and the depth of the echo sounder of 12 cm. With the Open Software geographic information system QGIS a bathymetric map of the Rieder Eck was created and overlaid onto Google maps, so that the data can be used in real life sailing trips.

### 3.3 Data interpolation and visualisation

Data was interpolated to a regular grid using nearest neighbour and other interpolation techniques. When interpolating the whole lake we use a  $1.4 \cdot 10^{-4} \times 10^{-4}$  degree grid in longitude/latitude which is roughly 11 m in both directions at 48 degrees northern latitude and close to the expected GPS location accuracy. For small sub-regions of

special interest interpolation to higher resolutions was also used, e.g.  $7 \cdot 10^{-6} \times 5 \cdot 10^{-6}$  degrees or about 0.6 m which is close to the source data quantification of the B&G Zeus device.

As additional support data a coarse polygon with some hundred coordinates was manually digitised from free charts and geocoded aerial photography in internet (e.g. Wikimapia, Google Maps/Earth, OpenStreetMap ...). This polygon limits the interpolation area. The polygon points were included to the dataset with sea surface water-level (depth 0.0 m) thus allowing interpolation of shallow regions up to the shoreline.

As a more sophisticated interpolation technique we selected for each grid point 16 data points, the closest in each 22.5° sector, if one exists there. As depth value  $w$  for the grid point a weighted average of the selected data points  $w_j$  was calculated as

$$w = \frac{\sum_j \frac{w_j}{d_j + \varepsilon_0}}{\sum_j \frac{1}{d_j + \varepsilon_0}}$$

where  $d_j$  is the distance of the data point  $w_j$  from grid point and  $\varepsilon_0$  is a small numerical quantity in the order of  $10^{-20}$ . This gives kind of a two dimensional version of a linear interpolation avoiding the majority influence of one sampling line with lots of data points from a single boat passage of the grid point (and avoiding a division by zero). We therefore call it sector-linear interpolation.

Experiments with a Gaussian interpolation distance weight did not yield promising results.

All interpolation and correction was done using small C programs and CSV files (white spaces as field separator, constant column with to enhance human readability). Data was visualised using Gnu-Plot software.

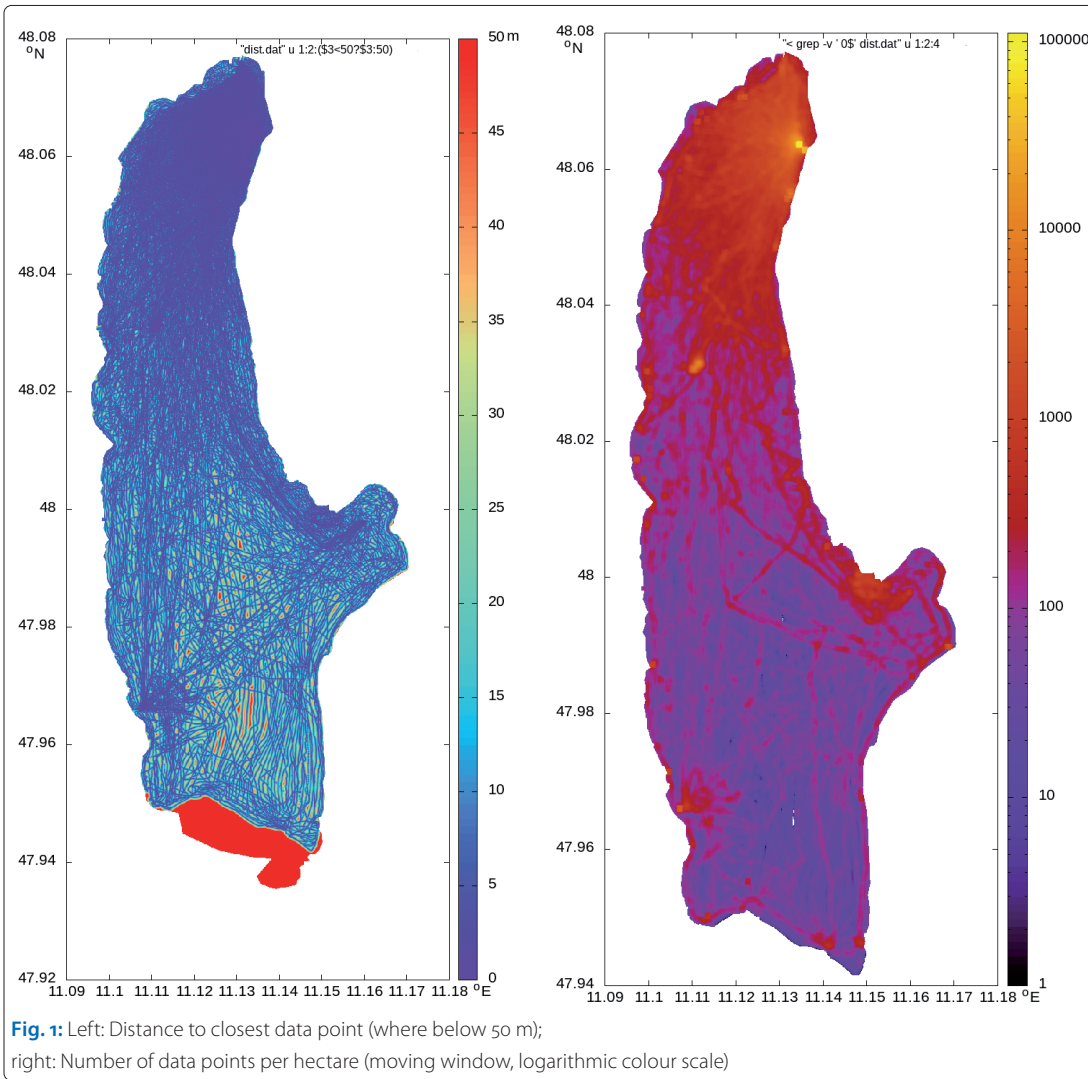
Reference data was interpolated separately using the same techniques in the selected sub-region, where reference measurements were carried out. In addition reference data was converted to a bathymetric map via QGIS Software, results can be found at Matheis (2024).

## 4 Dataset

The data of the main dataset was collected during most sailing trips using the boat mentioned in Section 3.1 starting with some early datasets in 2017 and more and more regular since 2018. This includes recreational trips, boat races and special trips for measuring certain areas of the lake of special interest. During the flooding in May 2019 several shallow areas could be visited, where navigation is not possible at regular water levels.

To avoid running out of memory on the B&G Zeus usually one data point is stored every 10 seconds on ordinary trips (recreational or boat races), this is reduced down to one point per second when examining special interest regions.





Special interest regions are shallow water areas nearby the buoy and sailing club and well known dangerous/shallow water areas like the Rieder Eck west of Herrsching and the estuary of the river Rott at the southern shore of the lake.

Till end of 2024 season more than 1.2 million data points have been collected or in the order of 250 points per hectare in average. Naturally the density of points increases closer to the home buoy of the boat/in the northern part of the lake while still some gaps exist in the southern part of the lake (Fig. 1).

Reference high-resolution data was collected by the remote- and software-controlled tiny drone boat close to the dangerous shallow waters at Rieder Eck. Reference data consists of 76,594 data points roughly spaced one measurement per metre along track with 5 m track distance on a 950 × 500 m (longitude × latitude) area covering some 0.31 km<sup>2</sup>. It was collected in 2023 season within nine full day campaigns, details about data collection are given in Section 3.2. The geographic distribution of the reference dataset from the drone boat is shown in Fig. 2 in comparison to

the distribution of the main dataset from the sailing boat trips in this region.



## 5 Accuracy and technical limitations

Within this Section we present a collection of various points influencing both the data quality and availability. Some solutions are not straight forward and were only found by lucky incidence or after longer examinations. To support other users interested in providing crowdsourcing echo sounder data we discuss these points in detail hoping to keep them from giving up. Furthermore the limitations should be kept in mind by the organisations collecting and processing the data for final use.

Nevertheless, as shown in Salaudeen (2023) the quality of crowdsourced data is astonishingly high and in lack of other data quite useful even for professional applications or official data collection (Jonas 2023).

### 5.1 GPS position accuracy

According to GPS specifications (Department of Defense 2020) from 2020 actually the location performance has a root mean square (RMS) error of 3.6 m, which means, that 95 % of the GPS measurements are within a 7.0 m circle around the correct location. On the other hand, positions off 10 or more metres are quite common in a huge dataset, especially when the number of visible satellites is reduced. Even when following the actual ship location on the chart plotter from time

to time a large offset can be observed without clear cause. After some time, regularly up to 1 or 2 minutes, sometimes just after a few seconds, the position shifts (back) to a seemingly more correct one which means a change of the ship position at a speed far beyond the one physically possible by its construction. Reasons could be systematic (change in number of visible satellites) or software issues in the position derivation of the GPS receiver. Within the data-take both jumps in time and location were found when looking for extreme boat speed, in some cases just as the first values after switching on the devices.

This has to be kept in mind when evaluating the data quality of echo sounder data.

### 5.2 GPS jamming and spoofing issues

Due to the weak power of the GPS signal it is easy to prevent reasonable navigation by sending a signal on the same frequencies as the GPS satellites by purpose or accident. Therefore, the number of visible satellites is reduced or all are blocked for a longer time span over large regions on earth surface or even up to lower earth orbit satellites carrying own GPS receivers. Especially in warfare regions this is quite common, e.g. in Ukraine occasionally since 2014 and almost permanently since 2022.

This on the other hand means strong limitations in navigation due to heavy offsets in the resulting positions and – when retrieving echo sounder data – strong disturbances in data quality. Heavy position offsets have been reported by sailors and aircraft pilots e.g. in eastern Baltic Sea in recent months (Goward 2024; Shevchenko 2024).

A huge offset, possibly by GPS jamming was found in our echo sounder dataset within the data recorded in July 2023 during the yearly 24-hour sailing race. For a longer time period the position runs several kilometres off track even far beyond the shoreline and over some hills east of the lake. At roughly 4 a.m. the dataset stops for 25 minutes, most likely due to a freeze and reboot of the plotter. After this the position has an offset of about 1.5 km towards northerly directions relative to the correct position for around 37 minutes until jumping back within 5 seconds (selected data sampling rate). Compare Fig. 3, where the incorrect locations are marked in purple, the manually created coastline polygon in blue.

Such data has to be sorted out manually or by plausibility checks.

### 5.3 Water level correction

Due to the seasonal flooding the data has to be corrected according to the water level. As in almost all cases the water level is only changing a few centimetres per day or even less, considering other influences it is sufficient to carry out the corrections

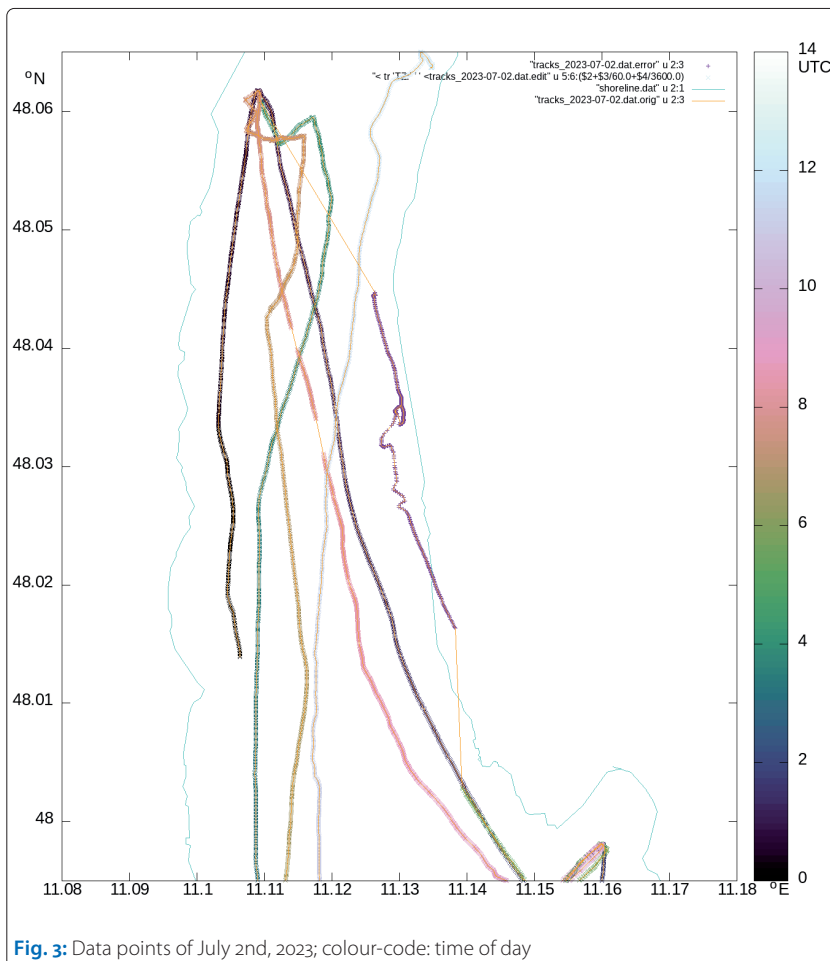


Fig. 3: Data points of July 2nd, 2023; colour-code: time of day

using the daily mean value of the gauge at the northern end of the lake as reference in order to reach the accuracy possible with sports-craft sensors. A noteworthy difference between minimal and maximal water level occurs only on very few days inside the gauge dataset, when there is ongoing heavy rainfall and therefore huge amounts of water running in from the whole drainage basin. At these conditions recreational vessel navigation is very improbable.

Furthermore, the vertical sensor location has to be calibrated relative to the water surface in order to get the correct absolute depth values. This was done the following way: In calm weather conditions the boat was brought from its buoy to the berth of the sailing club and fixed there in along-side direction with bow facing the shore of the lake. On both sides of the boat the water depth was measured by a metre stick, close to the alongside position of the echo sounder. The water depths at these points were around 1 m at this time. These measurements can reach an accuracy of roughly 5 to 10 cm, as there are lots of stones up to fist-size distributed all over the ground of the shallow water regions. Comparing the displayed water depth (0.7 m below sensor) at the same time yielded a sensor position of about 0.3 m below water level.

## 5.4 Disturbances in water body

### Surface waves

Given a sound speed of 1.4 to 1.6 km/s in water (depending on temperature and salt content) and a maximal measuring depth of 100 m (Airmar Technology Corporation 2010, 2024) of the sensor, close to ten soundings per second are theoretically possible. Data sampling by the echo sounder is one value per second according to Airmar Technology Corporation (2010, 2024), track-point sampling rate of the chart plotter can be selected at values between 1 and 10 seconds. There is no documentation on averaging of several soundings or network values. According to the size of the lake low frequency/longer waves (swell) are very unlikely. Most waves are from direct wind fetch (up to 10 km at full lake length, up to 5 km at usual wind directions) or from bypassing motor boats. These are usually at wave frequencies of 0.2 to 2 Hz so within the order of the sampling window. Common wave heights are in the order of 0.1 to 0.2 m, only in rare cases above 0.5 m (stormy situations). So there might be a noticeable influence on the data in some cases depending on the averaging strategy of the devices.

In one occasion early 2024 season the boat was fixed perpendicular to the berth of the sailing club at around 1 m water depth in very calm sea state while one of the steamboats was passing. Slight periodic variations in depth measurements by sev-

eral centimetres in a frequency of 0.3 to 0.5 Hz in a 1 second sampling could be caused by the waves from the steamboat yielding a strong roll movement of the sailboat with only slight possibility of position change (less than 0.5 m). This suggests that there is no averaging inside the devices at all.

To check this, an experiment using the sailing ship at a constant position and some close, controlled motorboat passages is planned.

### Reflections inside water body

It is a well known issue, that large fish swarms can be seen in echo sounder data. Therefore, special high-resolution/multibeam sonar devices are sold for fishing boats, also smaller versions for hobby angling. The B&G Zeus chart plotter has a separate input port for such devices. On the other hand this means, if a fish swarm is located directly under the sensor, some of the echo will return early and the sampled depth value might be much lower than in reality. Some dataset spikes of 40 to 50 m in a surrounding of 70 to 80 m deep water might be caused by this (see Fig. 4).

In warm and sunny seasons water plants can grow up to almost lake surface in shallow to moderate water depth (2 to 5 m). This also affects the data sampling. Depth values below 1 m or even errors due to low depth were occasionally seen on the B&G displays while navigating close to the northern tip of the lake in September or October in some years. The leaves of the water plants moving around could be clearly seen in these circumstances.

When aiming at a high-quality dataset a manual or software-based removal of such effects from inside the water body should be taken into account.

## 5.5 Electronics, sensor and software issues

### Mast tilt/GPS location on mast top

In moderate to strong wind conditions sailing boats tend to be tilted strongly along the roll axis away from the wind, so called heeling. A GPS receiver fixed to the top of the mast therefore can be shifted several metres across the movement track of the boat. This could be seen also in the location of the early data points in our dataset. Therefore we switched the input GPS receiver to the one inside the chart plotter which is located midships about 2.4 m behind the echo sounder (constant offset, usually in direction of motion). So far we did not apply any corrections on this due to the fact that the influence of both effects is in the order of the proposed GPS accuracy (RMS).

### Echo sounder footprint

Although no detailed documentation from the supplier is available, one has to keep in mind, that the footprint size of the echo sounder should grow

more or less linearly with the water depth. Thus especially in deeper water the structure of the lake bed is assumed to be blurred. A value found in the echo sounder brochure (Airmar Technology Corporation 2010) is a  $-3$  dB beam width of  $10^\circ \times 44^\circ$  which would mean a footprint, where the power is half as strong on sea floor outside a  $12\text{ m} \times 68\text{ m}$  window at a water depth of  $70\text{ m}$ . Another value given in the sensor web page (Airmar Technology Corporation 2024) is a maximal dead-rise angle of  $22^\circ$ , yielding a footprint of up to some  $28\text{ m}$  at  $70\text{ m}$  depth.

Indeed the small sailing boat *Rosebud*, which sunk in a severe storm on July 7th, 2001 and lies in an upright position roughly  $70\text{ m}$  below the water could not yet be localised with our equipment, although many measurements in this area were carried out. No significant variation in the water depth, e.g. from the mast, etc. could be recognised. On commercial side-scan equipment of a professional diving service it was visible, a diving robot with camera could identify and localise the boat providing live video footage.

### GPS epoch looping

The GPS timestamp is transmitted in a  $10+19$  bit format with  $1.5$  second accuracy and repeats every  $2^{10} = 1024$  weeks ( $\approx 19.6$  years) (NOAA 2021; Wikipedia 2024). To derive the absolute GPS epoch, additional information is needed to derive the absolute date. Some GPS receivers are not able to cope with this, thus the internal GPS of the B&G Zeus chart plotter reset its date in the timestamp as after April 6th, 2019 the date started over with August 22nd, 1999 again.

To avoid this, it is possible within the B&G Zeus to select a different GPS receiver – namely the one in the mast top in our case, which provides the correct epoch – as source for just the date information. Some data incorrectly stored with 1999 timestamp in the dataset was manually corrected to 7,168 days later in order to select the proper day in the gauge level dataset.

### Input sensor versus output format

The B&G Zeus chart plotter is able to display the water depth provided by the echo sounder via NMEA 2000 network. When exporting echo sounder data to SL2 data format – the format suggested by OpenSeaMap web page – it is not possible to select the network input but only an input port directly at the chart plotter, where a special multibeam echo sounder for fishing applications can be connected. Examining the SL2 output data in binary format using a format documentation reverse engineered by OpenSeaMap showed that in almost  $99\%$  of the cases a depth of  $0.0\text{ m}$  additionally flagged as invalid data is present in the files. In rare cases there are fancy depth values pre-

sent (depth of several hundred metres, not possible within the study region with maximal water depths of  $81\text{ m}$ ).

This issue can be resolved using the GPX export of track data recorded by the plotter. These contain both reasonable position and depth information. Another advantage of GPX, being based on XML, is the easy human readable format which even allows corrections like the GPS epoch shift mentioned in the Section before using a simple text editor. This also allows easy data extraction using shell scripts or small C programs. Sadly, this is only possible with the first generation of B&G Zeus models, as starting with Zeus2 the depth annotation in GPX file format output (and input) was disabled according to the manuals (only water temperature is still present). Lowrance USR data file (version 6) can be used instead which is much more difficult to analyse being a binary format.

GPX output data contains a numerical accuracy of  $10^{-8}$  degrees in both latitude and longitude while the values themselves are granulated on a  $9 \cdot 10^{-6} \times 6 \cdot 10^{-6}$  degrees grid in longitude  $\times$  latitude ( $\approx 0.7\text{ m}$  in both directions). Thus the internal accuracy of the GPS receiver or the chart plotter itself might be around this value, the same granulation is also present in binary USR data file from Zeus2 model. Furthermore, one has to keep in mind, that the number of data points per track is limited to about  $24,000$ , so one has to start new tracks regularly to avoid block-wise deletion of older data at the beginning of the track.

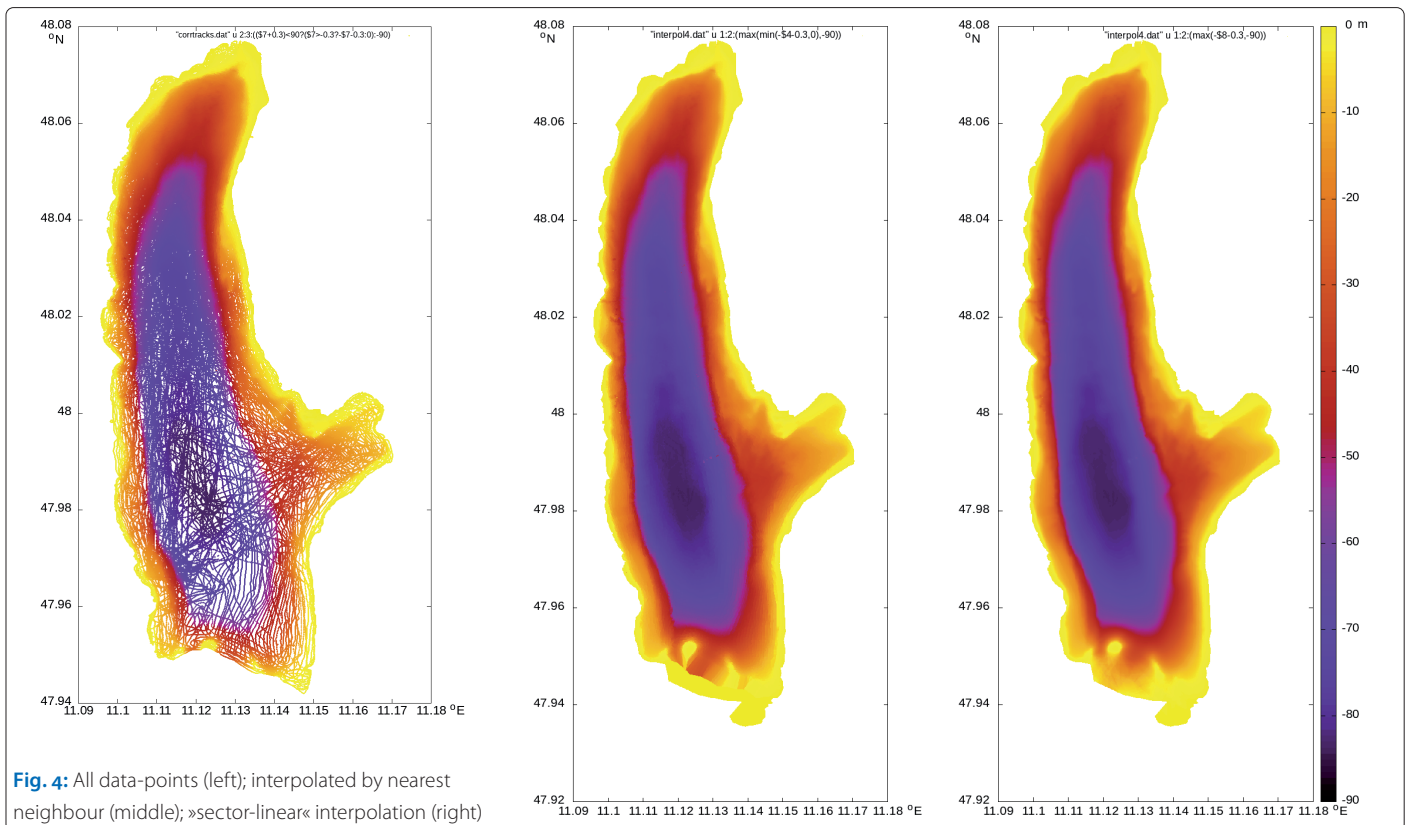
### 5.6 Estimation of error budgets

For a rough data quality estimation some typical error value contributions are discussed here. Table 1 gives an overview of the values. When calculation the depth error contribution from a location error the average slope of the lake's bathymetry was assumed to be  $4.5\%$  which was derived as mean value based on the »sector-linear« interpolated bathymetry (Fig. 4).

The mean difference between maximal and minimal daily gauge value within the whole dataset (November 1963 till December 2024) is

Type	Location error	Depth error contribution
GPS position	3.6 m	0.16 m
GPS jamming/spoofing	up to some km	large
Water level change	–	0.005 m
Surface waves	–	0.1 m
Reflections	–	large
Sensor offsets	2.4 m	0.11 m
Echo footprint	40 % of depth	1.8 %

**Table 1:** Data quality estimation: Typical error contributions by error type



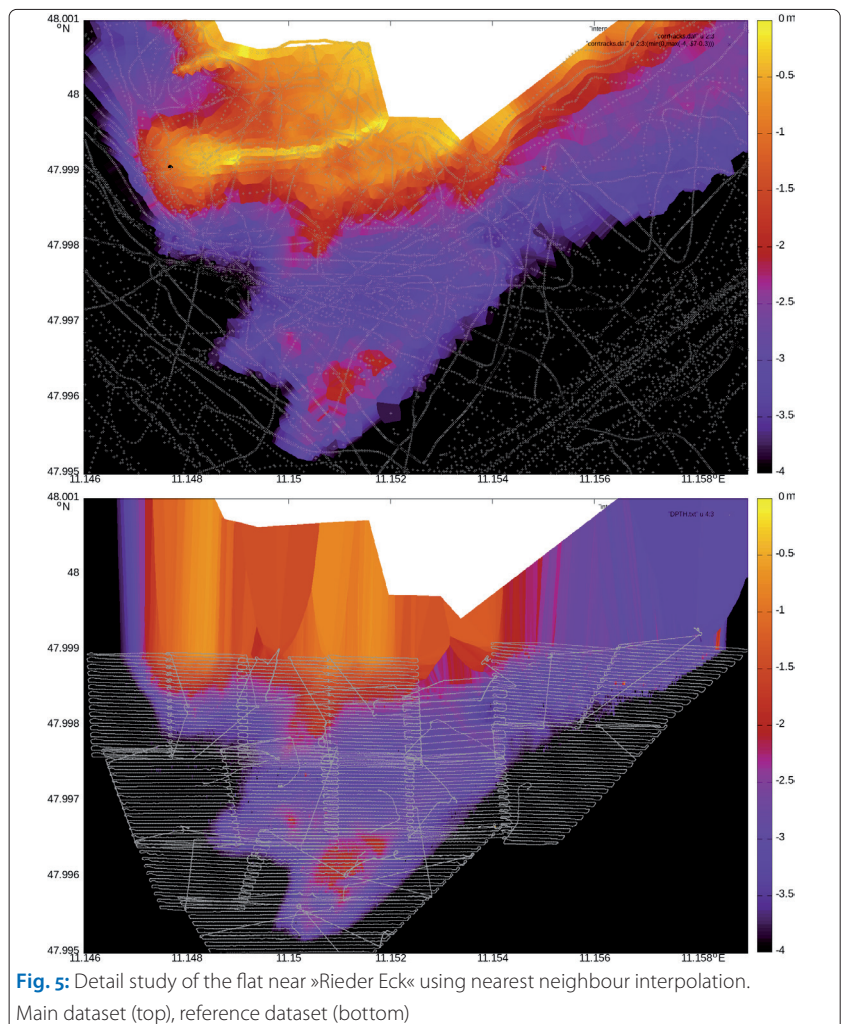
1.03 cm, therefore considering the mean daily water level gives a typical error contribution of 0.005 m.

All in all the typical errors might sum up to a few decimetres, which is a fairly good value considering safe navigation. As mentioned in Section 5.3 the constant systematic offset of the whole dataset by calibrating the echo sounder vertical position relative to the water surface is also around 5 to 10 cm.

## 6 Results

After manually correcting and removing some of the critical data as mentioned in Section 5 the remaining 1,210,000 data points were interpolated and visualised (cf. Fig. 4). In addition to a nearest neighbour interpolation we also developed a »sector-linear« interpolation technique using a distance weighted averaging of selected data points, weighting method is given in the equation in Section 3.3.

As an exemplary detail study Fig. 5 shows the surroundings of the dangerous flat close to »Rieder Eck«, located near the northern edge of the bay of Herrsching, in the depth range up to 4 m. Reference dataset collection was carried out in this region. Both main and reference dataset are separately interpolated. Good agreement in the shape of the extracted bottom topography features can be seen when comparing local interpolations of main and reference data (Fig. 5), as far as the sampling point distance allows.



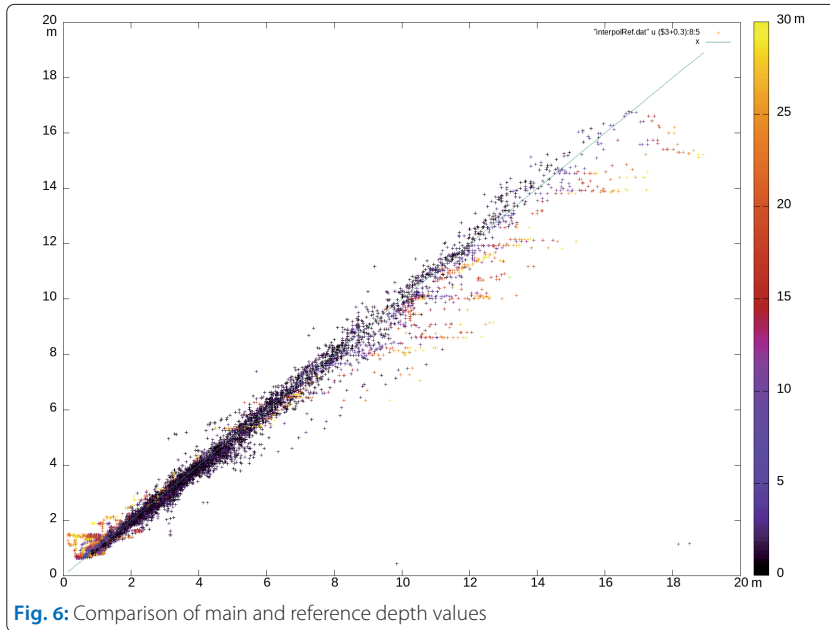


Fig. 6: Comparison of main and reference depth values

**Acknowledgments**

Data source of the gauge data is the »Bayerisches Landesamt für Umwelt« (www.lfu.bayern.de). The geocoded chart from 1979 was provided by Wasserwirtschaftsamt Weilheim.

The authors want to thank Christian Müller from tauchdienste.de for providing the shipwreck position of *Rosebud* and the »Bayerische Seenschifffahrt Ammersee« for giving a special permission for navigation inside one of the Stegen harbour basins for data collection in September 2024. Furthermore, we would like to thank the team of opensea-map.org for fruitful discussions and support, especially Markus Bärlocher for always pushing the project and Thomas Görner for providing an NMEA 2000 datalogger prototype. We are also thankful for all guests aboard our boat being patient when navigating in topographically interesting areas while more interesting wind and weather conditions would suggest other routes.

From the 75,054 main dataset points in the region, 15,432 have a reference point less than 30 m away. Comparing the main dataset depth values to the closest reference depth yields a Pearson correlation coefficient of 0.989. For 12,268 data points, reference points are less than 5 m away, their depth correlation coefficient is 0.995. Fig. 6 shows this comparison as a scatter plot with colour-coded reference point distance.

**References**

Airmar Technology Corporation (2024): DST800 retractable sensor SST thru-hull analog. [www.airmar.com/Product/DST800SS](http://www.airmar.com/Product/DST800SS)

Airmar Technology Corporation (2010): DST800. brochure; [https://media1.svb-media.de/media/snr/117356/pdf/brochure\\_2016-06-20\\_14-37-02\\_e72368cdbfc0642494d56a28d560070d.pdf](https://media1.svb-media.de/media/snr/117356/pdf/brochure_2016-06-20_14-37-02_e72368cdbfc0642494d56a28d560070d.pdf)

Bärlocher, Markus; Martin Over (2024): OpenSeaMap – Crowdsourcing, Open Source und Open Data als Basis für freies Wissen. Hydrographische Nachrichten; DOI: 10.23784/HN124-02

Bayerisches Landesamt für Umwelt (2024a): Gebietsdaten / Laufzeiten Stegen / Ammersee; [www.hnd.bayern.de/pegel/isar/stegen-16602008/gebiet](http://www.hnd.bayern.de/pegel/isar/stegen-16602008/gebiet)

Bayerisches Landesamt für Umwelt (2024b): Wasserstand Stegen / Ammersee. [www.hnd.bayern.de/pegel/isar/stegen-16602008?addr=hr\\_see](http://www.hnd.bayern.de/pegel/isar/stegen-16602008?addr=hr_see)

Bayerisches Landesamt für Umwelt (2024c): Wasserstand Stegen / Ammersee. [www.hnd.bayern.de/pegel/isar/stegen-16602008?addr=hr\\_s\\_hist](http://www.hnd.bayern.de/pegel/isar/stegen-16602008?addr=hr_s_hist)

BAYregio GmbH (2024): Lake Ammersee. [www.bayregio-ammersee.de/ammersee-english.php](http://www.bayregio-ammersee.de/ammersee-english.php)

Department of Defense (2020): Global positioning system standard positioning service performance standard,

Based on the »sector-linear« interpolation to a rectangular grid ( $10^{-4} \times 1.4 \cdot 10^{-4}$  degrees in latitude/longitude, which is roughly 11 m in both directions) we calculated vectorised depth polygons (isolines) for all depth values in 0.5-m steps (0.1-m steps for depths less than 3 m). When comparing the results to a geocoded version of the 1979 nautical chart with isolines every 5 m, provided by Wasserwirtschaftsamt Weilheim, typical structures of similar shape can be found, although their location is shifted by 50 to 100 m in some cases. Reasons might be the different measurement density, position accuracy – GPS became fully operational in 1993 (Department of Defense 2020) –, interpolation or post-processing steps (automatic versus manual vectorisation). Some additional features in our dataset might be caused e.g. by disturbances in the water body (Section 5.4.2) or GPS location issues (Section 5.1).

The comparison of the isolines from 1979 and 2024 is presented in Fig. 7. The depth lines from the official 1979 chart are given as elevation relative to sea level, lake surface at mean level is 533 m above sea level. The vectorised lines of the 2024 dataset are colour-coded, yellow for odd and green for even water depth, red for multiples of 5 m, black for multiples of 10 m. The background map was taken from opentopmap.org, for re-projection of the 1979 map from UTM to WGS84 we used QGIS, visualisation was done by Leaflet.

5 ed.; [www.gps.gov/technical/ps/2020-SPS-performance-standard.pdf](http://www.gps.gov/technical/ps/2020-SPS-performance-standard.pdf)

Good, Michael (2017): Überraschung: Die Surprise wird wieder gebaut. Yacht, Delius Klasing Verlag; [www.yacht.de/yachten/regattayachten/surprise-by-bg-race-ueberraschung-die-surprise-wird-wieder-gebaut/](http://www.yacht.de/yachten/regattayachten/surprise-by-bg-race-ueberraschung-die-surprise-wird-wieder-gebaut/)

Goward, Dana (2024): As Baltics see spike in GPS jamming, NATO must respond. Breaking Defense; <https://breakingdefense.com/2024/01/as-baltics-see-spike-in-gps-jamming-nato-must-respond/>

Jonas, Mathias (2023): Warum Crowdsourced Bathymetry für die IHO strategisch bedeutsam ist. Hydrographische Nachrichten; DOI: 10.23784/HN124-01

Lammers, Heiner (2023): Crowdsourcing for hydrography – Provision of water depth by pleasure boating. Hydrographische Nachrichten; DOI: 10.23784/HN124-04

Matheis, Manfred (2024): Rieder Eck. Bathymetry profile; [www.google.com/maps/d/viewer?mid=ijCzqfBkZWfbHOTY44mczvolBoC-tjn8&ll=47.997728201306636%2C11.152406070189151&z=17](https://www.google.com/maps/d/viewer?mid=ijCzqfBkZWfbHOTY44mczvolBoC-tjn8&ll=47.997728201306636%2C11.152406070189151&z=17)

Navico Group (2025): Lowrance HST-WSBL. [www.lowrance.com/lowrance/type/sonar-transducers/hst-wsbl/](http://www.lowrance.com/lowrance/type/sonar-transducers/hst-wsbl/)

## 7 Summary and outlook

When considering all critical points in Section 5, a large crowd-sourced dataset of echo sounder measurements like the one given in this study can certainly enhance knowledge about bathymetry for both ordinary and professional applications. The consistence of the data even allowed creating maps from the data itself. Nevertheless, there is much work to be done, like improvement of algorithms (e.g. speed/parallel execution), automatic outlier detection or analysis of surface wave influences (see Section 5.4.1) or just the continuation of the data collection, especially in regions only accessible in high water level conditions. Further developments are from time to time presented on our web page: [https://web.fs.tum.de/~niederma/segeln/tracks/Ammersee\\_Wassertiefenprojekt.html](https://web.fs.tum.de/~niederma/segeln/tracks/Ammersee_Wassertiefenprojekt.html).

Experience with echo sounder measuring in other regions using charter boats showed up various additional challenges, like different NMEA network cable types (need of several adapters), various plotter export formats or even sensors not being connected to a network at all (historic vessels). On charter trips besides that an equipment like the remote controlled measuring model boat presented in Section 3.2 could be used to bathymetrically map an extended region around the anchor ground automatically over night (parts of or whole inlet, especially the interesting shallow waters between 0 and 10 m depth). //

Niedermeier, Andreas (2019): Tiefenmessung am Ammersee in Zusammenarbeit mit OpenSeaMap. [https://web.fs.tum.de/~niederma/segeln/tracks/Ammersee\\_Wassertiefenprojekt.html](https://web.fs.tum.de/~niederma/segeln/tracks/Ammersee_Wassertiefenprojekt.html)

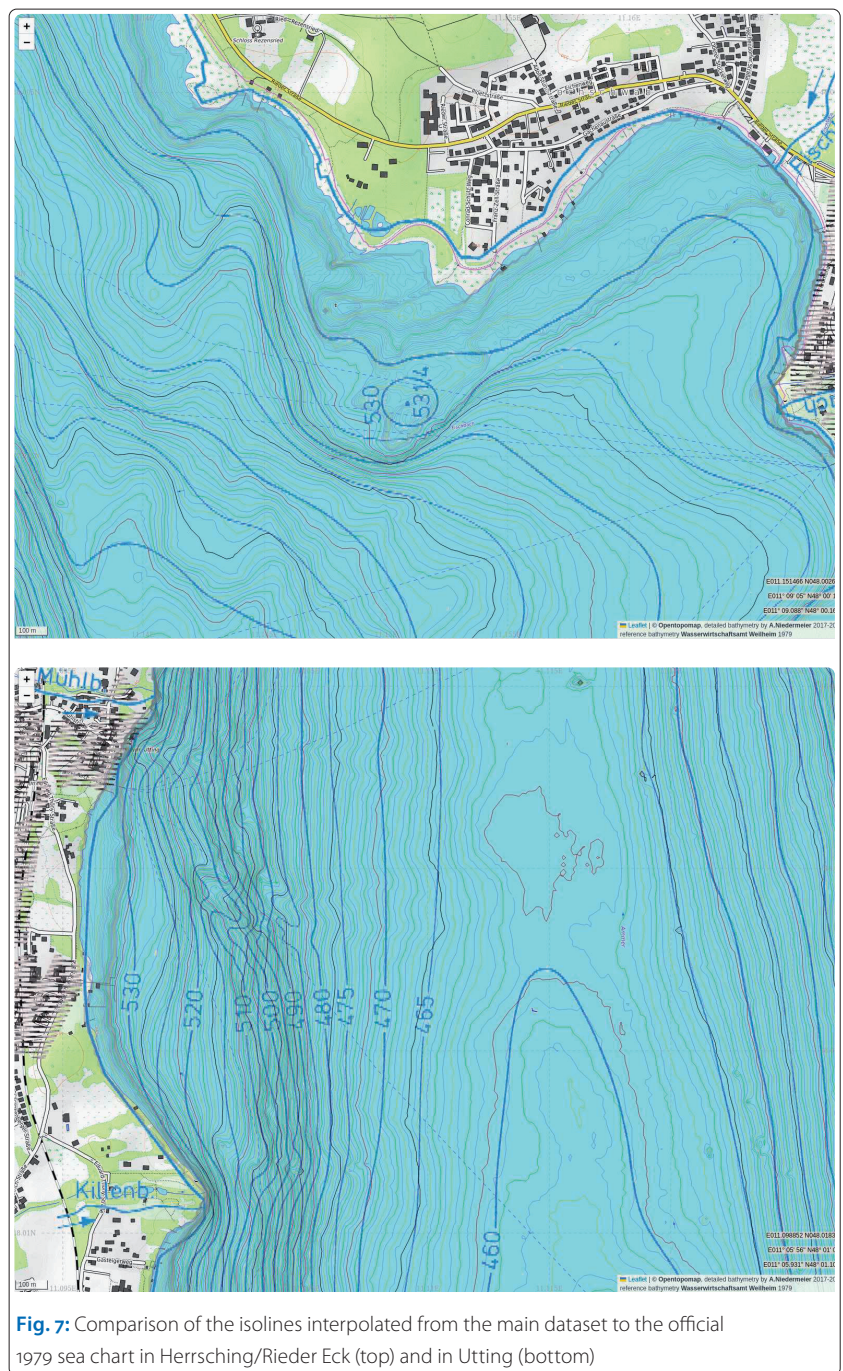
Niedermeier, Andreas; Edzard Romaneessen; Susanne Lehner (2000): Detection of coastlines in SAR images using wavelet methods. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, DOI: 10.1109/36.868884

Niedermeier, Andreas (2002): Wavelet-Methoden in der SAR-Bildverarbeitung – Ein Wavelet-basiertes Wasserstandslinienverfahren zur Topographiebestimmung im Wattenmeer. PhD thesis, Technische Universität München

NOAA (2021): GPS week number rollover, April 6, 2019. [www.gps.gov/support/user/rollover](http://www.gps.gov/support/user/rollover)

Salaudeen, Idris (2023): Assessing CSB data reliability – estimating vertical uncertainty of sample CSB data by comparing with reference multibeam data. Hydrographische Nachrichten; DOI: 10.23784/HN124-03

Shevchenko, Vitaly (2024): Russia blamed for GPS interference affecting flights in Europe. BBC; [www.bbc.com/news/articles/cne900k4wvjv](http://www.bbc.com/news/articles/cne900k4wvjv)



**Fig. 7:** Comparison of the isolines interpolated from the main dataset to the official 1979 sea chart in Herrsching/Rieder Eck (top) and in Utting (bottom)

Wasserwirtschaftsamt Weilheim (1979): Ammersee 1:25000. [www.wwa-wm.bayern.de/themen/fluesse\\_seen/gewaesserportraits/doc/tiefenkarte\\_ammersee.pdf](http://www.wwa-wm.bayern.de/themen/fluesse_seen/gewaesserportraits/doc/tiefenkarte_ammersee.pdf)

Wikipedia (2023a): Surprise (Bootsklasse). [https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Surprise\(Bootsklasse\)&oldid=237446710](https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Surprise(Bootsklasse)&oldid=237446710)

Wikipedia (2023b): Ammersee. <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Ammersee&oldid=1172010279>

Wikipedia (2024): GPS week number rollover. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=GPS\\_weeknumber\\_rollover&oldid=1199001757](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=GPS_weeknumber_rollover&oldid=1199001757)

# Gewässervermessung an den Binnenwasserstraßen des Bundes

Ein Beitrag von REINER KASTENHOLZ und THOMAS ARTZ

Die Bundesrepublik Deutschland ist für die Unterhaltung und den Ausbau von Bundeswasserstraßen verantwortlich. Diese Aufgaben sind der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung übertragen. Für die vielfältigen Aufgaben werden von der Gewässervermessung umfangreich raumbezogene Informationen zur Gewässertopografie und deren Dynamik erfasst, ebenso zur morphologischen Struktur des Gewässerbettes, zur Lage und Beschaffenheit von Objekten im Gewässer (z. B. Hindernissuche) sowie zur Topografie der Wasseroberfläche. Dieser Artikel beschäftigt sich schwerpunktmäßig mit der behördlichen Struktur, den Aufgaben und den Prozessen der Gewässervermessung an den Binnenwasserstraßen. Außerdem werden aktuelle Arbeiten zu drängenden Zukunftsthemen wie der Automatisierung der Mess- und Auswerteprozesse und der Bereitstellung aktueller Tiefeninformationen für die Schifffahrt beleuchtet.

Binnenwasserstraßen | Fahrwasser | Fahrrinne | Gewässervermessung | aQua | bIENC  
inland waterways | waterway | fairway | hydrographic surveying of waters | aQua | bIENC

In Germany, the Federal Waterway and Shipping Administration is responsible for inland river maintenance and development. In this context, there is a vast variety of tasks that require georeferenced data. Hydrography delivers extensive spatial data on the dynamic bathymetry and its morphological structure as well as the topography of the water surface. Furthermore, objects within the water are localised and their condition is observed. This article focuses on the administrative structure, tasks and processes of the hydrographic surveying on inland waterways. Additionally, it highlights ongoing efforts to address future challenges, such as the automation of survey and data analysis processes, as well as the provision of up-to-date depth information for river navigation.

## Autoren

Reiner Kastenholz arbeitet in Bonn bei der Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt (GDWS) im Dezernat U22 – Vermessung, Liegenschaften, Geodaten.

Dr. Thomas Artz leitet bei der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) in Koblenz das Referat M5.

[gdws@wsv.bund.de](mailto:gdws@wsv.bund.de)

## Einleitung

Die Bundesrepublik Deutschland ist laut Artikel 89 Grundgesetz Eigentümerin der Bundeswasserstraßen. Die Zuständigkeit des Bundes wird in weiteren Bundesgesetzen, unter anderem dem Bundeswasserstraßengesetz (WaStrG) und dem Gesetz über den wasserwirtschaftlichen Ausbau an Bundeswasserstraßen zur Erreichung der Bewirtschaftungsziele der Wasserrahmenrichtlinie, konkretisiert. Für den Bund hat die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) dafür Sorge zu tragen, dass niemandem durch die Teilnahme am Schiffsverkehr ein Schaden entsteht, der durch einen nicht ordnungsgemäßen Zustand der Bundeswasserstraße hervorgerufen wird (Verkehrssicherungspflicht). Darüber hinaus ist die WSV mit der verkehrlichen und wasserwirtschaftlichen Unterhaltung der Bundeswasserstraßen betraut.

Die Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt (GDWS) übt als Mittelbehörde der WSV die Fach-, Dienst- und Rechtsaufsicht über die ihr nachgeordneten 17 Wasserstraßen- und Schifffahrtsämter (WSÄ) und die acht Wasserstraßen-Neubauämter (WNÄ) in den Regionen des Bundesgebietes aus. Zudem sind amtsüber-

greifende Aufgaben im Bereich Vermessung und Geoinformationen in der »Fachstelle für Geodäsie und Geoinformatik der WSV« (FGGeo-WSV) gebündelt. Die konzeptionelle Umsetzung der politischen Zielsetzungen des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr (BMDV) sowie die zentrale Steuerung der Aufgabenwahrnehmung der WSV sind weitere Aufgaben der GDWS. Als fachtechnische Behörde steht der WSV unter anderem die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) zur Verfügung (§45 (3) WaStrG). Die BfG hat den Auftrag, die Bundesministerien und deren nachgeordnete Dienststellen in Grundsatz- und Einzelfragen zu beraten. Im Verbund Ressortforschung ist sie Teil der deutschen Forschungslandschaft.

Nach dem Wasserwegerecht wird zwischen Binnenwasserstraßen, die dem Verkehr mit Güter- und Fahrgastschiffen oder der Sport- und Freizeitschifffahrt mit Wasserfahrzeugen dienen (§1 WaStrG), und Seewasserstraßen (Küstengewässer) unterschieden. Das Netz der Bundeswasserstraßen ist in [Abb. 1](#) dargestellt. Es umfasst ca. 7300 km Binnenwasserstraßen und rund 23 000 km<sup>2</sup> Seewasserstraßen. Binnenwasserstraßen sind die binnenwärts, also im Bereich des Festlandes gelegenen Wasserstraßen.



Dieser Artikel beschäftigt sich schwerpunktmäßig mit den Aufgaben der Gewässervermessung an Binnenwasserstraßen. Hinsichtlich der Abflussregime unterscheiden sich die Binnenwasserstra-

ßen teilweise deutlich – freifließend mit oder ohne Tideeinfluss oder staugeregelt – und bedürfen daher eines ausgeprägten Expertenwissens für die Messdatengewinnung und Bearbeitung.



Quelle: Fachstelle für Geodäsie und Geoinformatik, zur Verfügung gestellt gemäß GeoNutzV Bundeswasserstraßen, die eine Länge von unter 5 km aufweisen, sind maßstabsbedingt teilweise nicht dargestellt. Stand: September 2024 Karte W 162 p

- Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt (GDWS)
- ◆ Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt (WSA)
- ▲ Wasserstraßen-Neubauamt
- Oberbehörde
- ▼ Amt für Binnen-Verkehrstechnik (ABVT)
- ⚓ Reedereizentrum der WSV (ReeZ)
- ▨ Seewasserstraßen des Bundes
- ▬ Binnenwasserstraßen des Bundes
- ▬ nicht klassifizierte BinWaStr
- ▬ WaStr-Klasse I - III nach UN ECE
- ▬ WaStr-Klasse IV - VI nach UN ECE

Abb. 1: Karte der Bundeswasserstraßen

## Gewässervermessung in der WSV

Für die Verkehrssicherung ist zwischen dem Fahrwasser und der Fahrrinne zu unterscheiden. Das Fahrwasser ist in den Binnenschiffahrtsstraßen der nach dem jeweiligen Wasserstand für die durchgehende Schifffahrt bestimmte Teil der Wasserstraße. Zum Fahrwasser gehören auch die vom örtlichen Schiffsverkehr zulässigerweise benutzten oder benutzbaren Wasserflächen. Die Fahrrinne ist der Teil des Fahrwassers, in dem für den durchgehenden Schiffsverkehr bestimmte Breiten und Tiefen vorhanden sind, deren Erhaltung von der WSV angestrebt wird.

Die WSV hält für die Bundeswasserstraßen im Rahmen ihres gesetzlichen Auftrages die Fahrrinne mit bekannt gegebener Fahrrinntiefe als Fahrrinnenkasten vor und leistet die erforderliche Verkehrssicherung. Die Gewässervermessung ist dafür eine zwingend notwendige fachliche Dienstleistung innerhalb der WSV. Insbesondere in der Fahrrinne unterliegt der morphologische Zustand der Gewässersohle dauernden Änderungen durch Einwirkung von natürlichen Einflüssen, wie z. B. Hochwasser und Strömung. Um die Verkehrssicherungspflicht zu erfüllen, müssen die Wassertiefen mit genügender Häufigkeit überprüft und bekannt gegeben werden. Bei der Feststellung von Untiefen ist die Schifffahrt zu warnen. Darüber hinaus werden durch die Gewässervermessung umfangreich raumbezogene Informationen zur Gewässertopografie und deren Dynamik erfasst, ebenso zur morphologischen Struktur des Gewässerbettes, zur Lage und Beschaffenheit von Objekten im Gewässer (z. B. Hindernissuche) sowie zur Topografie der Wasseroberfläche.

Auch für die Planung und Beurteilung von Ausbaumaßnahmen (Beweissicherung) von Bundeswasserstraßen sowie für die wasserwirtschaftliche Gestaltung der Unterhaltungsmaßnahmen sind hydrographische Vermessungen erforderlich. Da die Veränderungen der Wassertiefen innerhalb des Fahrwassers unter Umständen ganz wesentlich von den Veränderungen der sich anschließenden Randgebiete, den Flachwasserzonen und den Bühnenfeldern beeinflusst werden, kann es notwendig sein, für morphologische Untersuchungen weiträumige Gebiete zu erfassen.

Zur Erhaltung der für die Schifffahrt erforderlichen Wassertiefen sind Strombauwerke in Form von Leitdämmen und Bühnen errichtet worden. Diese Bauwerke liegen ebenso wie die Düker und Brücken ständig im Einfluss von Strömungen. Es ist daher laufend zu prüfen, welche Veränderungen an ihren Unterwasserteilen und in ihrer näheren Umgebung eintreten. Auch zur Errichtung von Bauwerken im Gewässer ist eine genaue Aufnahme der Gewässersohle erforderlich.

Die WSV führt die Aufgaben der Gewässervermessung mit eigenem Fachpersonal aus. Die Gewässervermessung in der WSV erfolgt auf zwei Ebenen: erstens überregionale Mehrzweckpeilung und zweitens regionale Verkehrssicherungspeilungen. Zur Peildatenerfassung auf den Wasserstraßen kommen spezialisierte Peilschiffe zum Einsatz, im Binnenbereich ergänzt durch Außenbezirksboote (ABz-Boote). Die Peilschiffe und Boote sind mit unterschiedlichen Messsystemen ausgestattet (siehe [Abb. 2](#)). Zur Gewährleistung der qualitätsgesicherten und standardisierten Neu- bzw. Ersatzbeschaffung von hydrographischen Messsystemen berät die BfG die WSV bei der messtechnischen Ausstattung.

Allgemein umfasst die Gewässervermessung:

- Vermessungen zur Verkehrssicherung,
- Vermessungen für die Baggerei, Bauwerkssicherung und Bauwerksplanung,
- Vermessungen für die Gewässerkunde,
- Vermessungen zur Objekt- und Hindernissuche.

Weitere Aufgaben ergeben sich durch wirtschaftliche und politische Anforderungen:

- Verlässliche Tiefeninformationen insbesondere in Niedrigwasserphasen,
- Vermessungen von Flachwasserbereichen für die Aufgaben im Rahmen des wasserwirtschaftlichen Ausbaus,
- Digitalisierung der Verkehrswege.

Die Gewinnung hochauflösender Sohlinformationen dient unter anderem auch der Erstellung von digitalen Geländemodellen des Gewässers (DGM-W) (z. B. Weiß und Mechernich 2022). Diese Modelle dienen auch als Grundlage für die Aufgaben der Bundesoberbehörden und sind z. B. wesentliche Eingangsinformation für die Fließgewässermodellierung (DWA 2019).

### Überregionale Mehrzweckpeilung

Die regelmäßige, flächenhafte Aufnahme der Gewässersohle wird mittels des Einsatzes überregionaler Flächenpeilschiffe mit Fächerecholot- und Mehrfachschwingersystemen (siehe [Abb. 3](#) und [Abb. 4](#)) nach dem Prinzip der Mehrzweckpeilung gewährleistet. Dazu sind revierspezifische Besonderheiten in den Peilkonzepten der WSV geregelt.

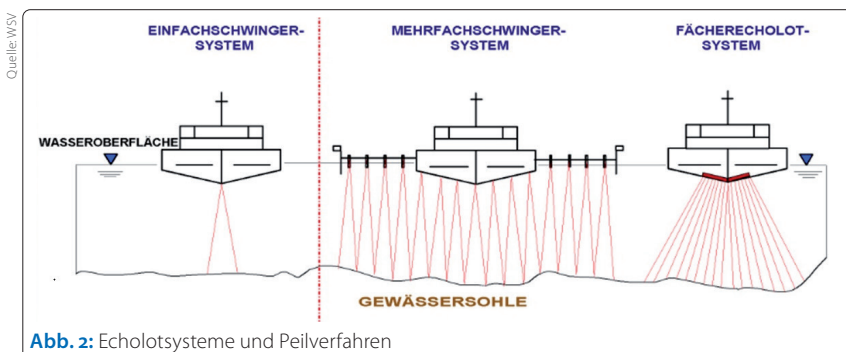


Abb. 2: Echolotsysteme und Peilverfahren

### Regionale Verkehrssicherungspeilungen

Die Außenbezirke sind mit regionalen Peilsystemen (Einfachschwingersystemen und in Einzelfällen Mehrfachschwingersystemen bzw. Elektroakustischen Peilrahmen) ausgestattet. Wesentliche Aufgabe ist hier die gemäß WSV-Richtlinien für die Verkehrssicherung durchzuführende Linienpeilung. Darüber hinaus kommen die regionalen Peilsysteme für die zusätzliche bedarfsgerechte Überprüfung des Gewässer- bzw. Bauwerkszustandes und für außerplanmäßige Peilaufgaben (unter anderem Havarie, Hochwasser, Hindernissuche, anlassbezogene Überprüfungen, zeitlich begrenzte, baubegleitende Messungen) zum Einsatz. Perspektivisch ist auch für die Aufgaben mit regionalem Fokus der Einsatz von Fächerecholoten angedacht, um dem vermehrten Daten- und Informationsbedarf nachkommen zu können.



Abb. 3: Peilschiff Hildegard von Bingen



Abb. 4: Peilschiff Mosel im Arbeitseinsatz

### Messdatenauswertung von Mehrzweckpeilungen

Die Aufbereitung, Verwaltung und Analyse der Peildaten sowie die Erstellung der Produkte (siehe Abb. 5) erfolgt in den Peilbüros der WSÄ. Unplausibilisierte Vorabzüge werden den Außenbezirken direkt nach der Messung zur Verfügung gestellt, um gegebenenfalls zeitnah Maßnahmen ergreifen zu können.

Für die Messdatenauswertung entwickelte die WSV die Peilauswertesoftware PAUSS, um auch weiterhin wirtschaftlich entsprechend dem Stand der Technik zukunftsorientiert Produkte des Peilwesens bereitstellen zu können. Das Gesamtsystem PAUSS wurde in einem bautechnischen und in einem hydrographischen Teil (PAUSS-B und PAUSS-H) realisiert. PAUSS-H steht der WSV seit Herbst 2024 zur Nutzung in der Gewässer- vermessung zur Verfügung. Damit können alle Prozesse der hydrographischen Auswertung (Plausibilisierung und Modellierung der Messdaten, Produkterstellung und Produktbereitstellung) in einem System bearbeitet werden.

Mit diesem Softwaresystem werden die Daten der Gewässervermessung nach der Aufnahme

in mehreren Schritten im Peilbüro plausibilisiert und geprüft. Dazu werden unter anderem flächenhafte Approximationsverfahren eingesetzt (Lorenz et al. 2021). Anschließend werden digitale Geländemodelle – sogenannte Mehrzweckmodelle – erstellt. Insbesondere für die Aufgaben im Binnenbereich sind vielfältige Analyseansätze notwendig, da sich die Reviere teilweise deutlich unterscheiden, wenn sandige, kiesige und in der Gebirgsstrecke auch felsige Bereiche zu erfassen sind und außerdem Herausforderungen durch Brücken entstehen. Da die hydrographische Auswertung immer noch von hohen manuellen Arbeiten geprägt ist, ist eine ausgeprägte Revierkenntnis der bearbeitenden Personen notwendig.

Die Produkte der Gewässervermessung werden im 3D-Datenarchiv der WSV gehalten. Dieses dient zur zentralen mittel- und langfristigen Archivierung und Bereitstellung von Topografiedaten der Bundeswasserstraßen. Qualitätsgesicherte Produkte und Dienstleistungen der Gewässervermessung werden so für WSV-interne und externe Kunden bereitgestellt (siehe Abb. 6).

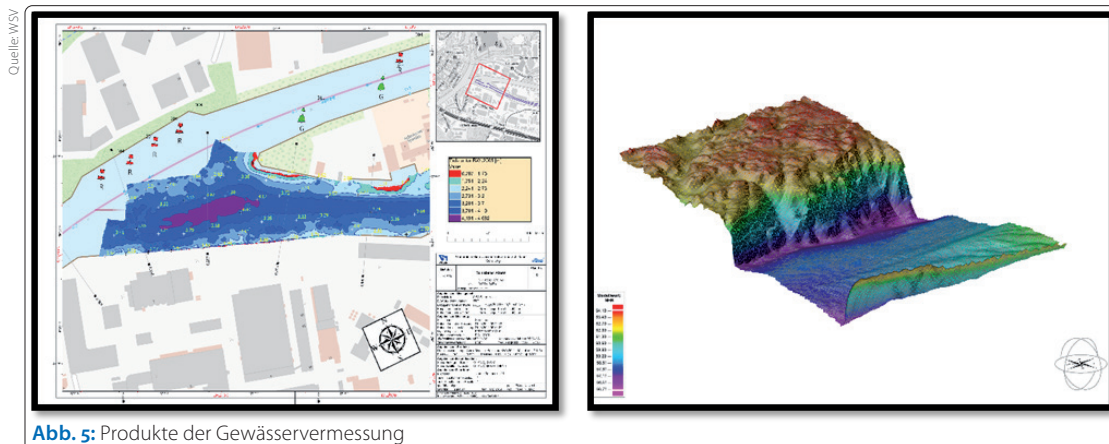


Abb. 5: Produkte der Gewässervermessung




Abb. 6: Datenfluss und Kunden der Gewässervermessung

### Qualitätsmanagement in der Gewässervermessung

Für den sicheren Schiffsverkehr sind zuverlässige Informationen aus der Gewässervermessung über die Wasserstraßen von entscheidender Bedeutung. Aufgrund der Verantwortung der WSV nach § 48 WaStrG (Sicherheit und Leichtigkeit für den Schiffsverkehr) ist es erforderlich, die Qualität der Ergebnisse eindeutig und umfassend beurteilen zu können. Auch bei Vergaben von Vermessungen an Ingenieurbüros muss sichergestellt werden, dass die Qualitätsanforderungen der WSV eingehalten werden. Die Qualität der Peildaten ist in Hinblick auf Gerichtsfestigkeit umfassend und eindeutig zu dokumentieren. Darüber hinaus werden zuverlässige Peildaten der WSV als Basis für eine Vielzahl wissenschaftlicher Untersuchungen benötigt, beispielsweise der Morphologie des Gewässergrundes, Monitoring sensibler Bereiche bis hin zu komplexen Flussmodellen. Für diese Nutzung muss ebenfalls eine hohe Qualität der Produkte sichergestellt sein.

Die WSV hat gemeinsam mit der BfG hierfür mit dem Angewandten Qualitätsmanagement in der Gewässervermessung (aQua) ein Qualitätsmanagementsystem in Anlehnung an die DIN EN ISO 9001:2015 aufgebaut und anschließend in Betrieb genommen. aQua hat den Charakter einer Vorschrift im Sinne der Verwaltungsvorschriften der



**Die Qualitätspolitik der Gewässervermessung der WSV**

1. Sicherstellen des gesetzlichen Auftrags und der damit verbundenen Forderungen an die Qualität der Prozesse, Produkte und Dienstleistungen in der Gewässervermessung
2. Einsatz eines Qualitätsregelkreises (in Anlehnung an DIN EN ISO 9001) zur Sicherstellung und Optimierung der Prozesse, Dienstleistungen, Produkte und Kundenbeziehungen
3. Sicherstellen der Rechtssicherheit durch Prozesstransparenz
4. Größtmögliche Kundenorientierung

WSV und ist bei allen Gewässervermessungen der WSV verbindlich anzuwenden.

### aQua – Stufe 1: Standards in der Gewässervermessung der WSV

In der Stufe 1 des aQua sind sämtliche Prozesse für die Peilschiffe und die hydrographische Auswertung inklusive Produkterstellung abgebildet und damit standardisiert. Dazu zählen unter anderem die Systemkalibrierung, die Durchführung einer Gewässervermessung, die Auswertung und Produkterstellung.

### aQua – Stufe 2: Qualitätsmanagement in der WSV

In der Stufe 2 des aQua ist das Qualitätsmanagementsystem (QMS) der Gewässervermessung der WSV abgebildet. Dazu zählt unter anderem der kontinuierliche Verbesserungsprozess. Dies ist ein systematischer Verbesserungskreislauf mit Kundenbefragungen, internen Audits durch Qualitätsmanagementbeauftragte der Geschäftsstelle aQua. Außerdem erfolgen interne Managementreviews der WSÄ mit dem jeweiligen Leitungsbereich der WSÄ und Selbstbewertungen der einzelnen Peilbüros. Qualitätsziele und Kennzahlen sind Teil des QMS in aQua.

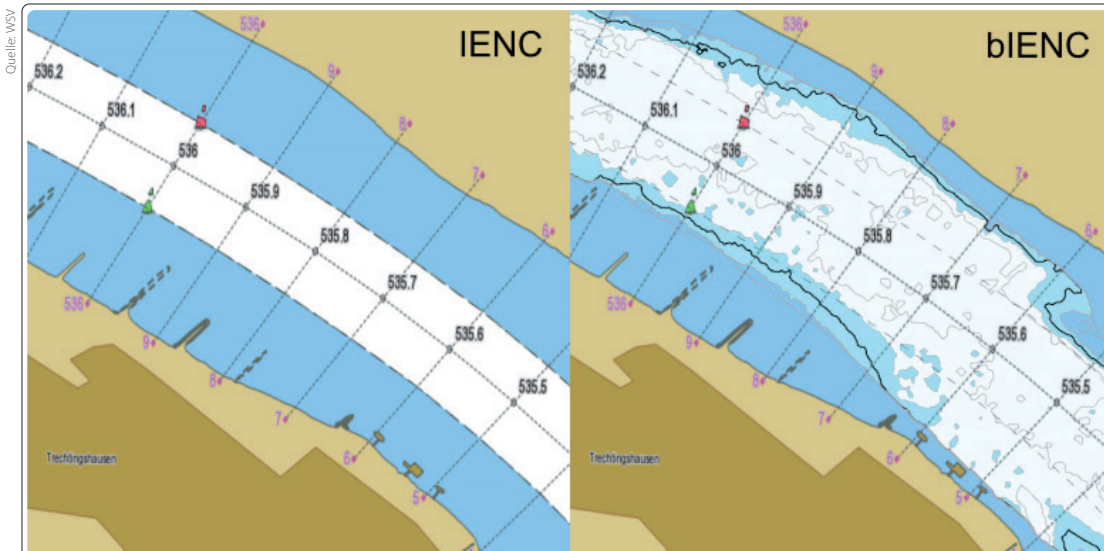
### Ausblick

#### biENC

Die aktuell von der WSV herausgegebenen Inland Electronic Navigational Charts (IENC) bieten bislang keine Information über die vorhandene Wassertiefe, sondern bilden nur die Begrenzung der freigegebenen Fahrhinne ab. Tiefeninformationen können aber dazu beitragen, dass die Schiffsführung, gerade in Niedrigwassersituationen, die vorhandenen Tiefenreserven innerhalb des Fahrinnenkastens für die Navigation besser nutzen kann. Daher wird die Bereitstellung von Tiefeninformationen für die Schiffsführung als ein Handlungsfeld im Aktionsplan »Niedrigwasser Rhein« gefordert (BMDV 2018).

Diese sogenannten bathymetrischen IENC (biENC) müssen den Vorgaben des ECDIS-Standards (UNECE 2020) für IENC entsprechen, um an Bord genutzt werden zu können. Sie stellen eine unverbindliche Information zu der Gewässerbodentopografie zum Zeitpunkt der letzten Mehrzweckpeilung dar (siehe Abb. 7). Derzeit wird die Erstellung von biENC durch die WSV mit Unterstützung der BfG konzipiert und getestet. Perspektivisch sollen der Schifffahrt Tiefeninformationen aus den aktuellsten Mehrzweckpeilungen durch die FGeo-WSV bereitgestellt werden.

Insbesondere für die biENC-Produktion, aber auch für die Verkehrssicherung, die Bauwerksinspektion und die Planung ist eine hohe Informationsdichte unabdingbar. Hierbei werden die Anforderungen an die Aktualität und Genauigkeit weiter



**Abb. 7:** Links: Beispielhafte Darstellung einer IENC (weiße Fläche markiert die Fahrrinne);  
rechts: biENC mit Tiefeninformationen (blaue und weiße Flächen entsprechen unterschiedlichen Tiefenschichten)

steigen. Um diese Bedarfe decken zu können, sind umfangreiche Automatisierungs- und Digitalisierungsmaßnahmen notwendig. Entsprechende Maßnahmen werden gemeinsam von GDWS und BfG initiiert (Artz et al. 2022).

### Einsatz von (teil-)autonomen Vermessungssystemen und Auswertestrategien

In Bezug auf die bedarfsgerechte Bereitstellung bathymetrischer Daten besteht eine deutliche Unterabtastrate, die insbesondere mit klassischen Peil- bzw. Messkapazitäten wirtschaftlich nicht angemessen behoben werden kann. Zur Deckung des abzusehenden erhöhten Bedarfes an Tiefeninformationen (unter anderem für die Bereitstellung von biENC) ist aber eine Erhöhung der bisherigen Peilkapazität erforderlich. Ziel ist es, zur Steigerung der vorhandenen Messkapazität zukünftig vermehrt Daten mit Unmanned Surface Vehicles (USV) in einem weitestgehend automatisierten Produktions- und Bereitstellungsprozess zu gewinnen (Artz et al. 2022).

Autonome Peilsysteme sollen bestehende Peilkapazitäten ergänzen. Dabei liegt der Vorteil in ihrer Größe. Mit geringerem Tiefgang sind z. B. Flachwasserbereiche peilbar, die aufgrund der Wassertiefe bzw. der schweren Zugänglichkeit bisher nicht gepeilt werden konnten. Hieraus ergeben sich direkte Einsatzperspektiven für die Aufgaben im Rahmen des wasserwirtschaftlichen Ausbaus. Weiterentwicklungen könnten zukünftig auch im Mischverkehr im Fahrwasser eingesetzt werden. So sind die Systeme insbesondere in überregionalen Verbänden revierübergreifend eine weitere Komponente, um bei Ausfall eines Flächenpeilschiffes punktuell und priorisiert binnen kurzer Zeit einsatzbereit zu sein.

Um aus den erhöhten Peilkapazitäten aktuelle

Bathymetrieinformationen bereitstellen zu können, müssen zusätzlich die Mess- und Auswerteprozesse weiter automatisiert werden (Artz et al. 2022). Nur durch die Eliminierung von Medienbrüchen und die Verbesserung der Algorithmik für die Messdatenbearbeitung kann ein Mehrwert für die Nutzenden entstehen. //

### Literatur

- Artz, Thomas; Herbert Brockmann, Sonja Hennecke, Dieter Willersinn (2022): Auf dem Weg zu einer digitalen Bundeswasserstraße: Maßnahmenplanung (Teil-) Autonomes Messen als Grundlage für den Masterplan Binnenschifffahrt. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, DOI: 10.567/BfG-2074
- BMDV (2018): Aktionsplan »Niedrigwasser Rhein« für zuverlässigen Transport. [www.bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/WS/gemeinsame-erklaerung-acht-punkte-plan-niedrigwasser-rhein.html](http://www.bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/WS/gemeinsame-erklaerung-acht-punkte-plan-niedrigwasser-rhein.html)
- DWA (2019): Geodaten in der Fließgewässermodellierung – Teil 2: Bedarfsgerechte Datenerfassung und -aufbereitung. DWA-Regelwerk, Merkblatt DWA-M 543-2
- Lorenz, Felix; Thomas Artz; Thomas Brüggemann; Julius Reich; Robert Weiß; Axel Winterscheid (2021): Simulation-based Evaluation of Hydrographic Data Analysis for Dune Tracking on the River Rhine. PFG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science, DOI: 10.1007/s41064-021-00145-0
- UNECE (2020): Recommendation on Electronic Chart Display and Information System for Inland Navigation (Inland ECDIS). Resolution No. 48, [https://unece.org/sites/default/files/2022-12/ECE-TRANS-SC3-156-Rev4e\\_1.pdf](https://unece.org/sites/default/files/2022-12/ECE-TRANS-SC3-156-Rev4e_1.pdf)
- Weiß, Robert; Silke Mechernich (2022): Beschreibung der geometrischen Qualität eines Digitalen Geländemodells des Wasserlaufs. Dreiländertagung der DGPF, der OVG und der SGPF, Publikationen der DGPF, Band 30, S. 267–279

# Detection of quartzite blocks in the River Rhine

## Development of semi-automatic and automatic approaches for the detection of boulders

An article by MARKUS KRAFT, NILS HOLLMAN, KELLY TORRES, ERIC IDUN, ELLEN HEFFNER, ANNIKA L. WALTER and HARALD STERNBERG

To detect quartzite blocks in the riverbed of the River Rhine near Düsseldorf, a high-resolution multibeam echo sounder (MBES) survey, delivering bathymetry as well as backscatter data, was carried out. The first visual analysis of the retrieved dataset revealed more than 8,600 potential quartzite blocks. To enhance and automate the manual detection process and to obtain additional information about the boulders, two approaches, being a GIS method as well as an AI-approach using a convolutional neural network, are presented.

boulder detection | inland water mapping | autonomous data processing | sonar | MBES backscatter data  
Quarzitblockerkennung | Binnengewässerkartierung | autonome Datenverarbeitung | Sonar |  
Fächerecholot-Rückstreudaten

Im Zuge einer Fächerecholot-Messkampagne zur Detektion von Quarzitblöcken im Niederrheinischen Flussbett bei Düsseldorf wurden sowohl topografische Daten als auch Rückstreudaten in hoher Auflösung erfasst. In einer ersten visuellen Analyse des Datensatzes wurden mehr als 8600 potenzielle Quarzitblöcke erfasst. Um die manuelle Detektion zu verbessern und zu automatisieren und um zusätzliche Informationen über die Blöcke zu generieren, werden zwei Ansätze vorgestellt: eine GIS-Methode und ein KI-Ansatz, der ein neuronales Faltungsnetzwerk verwendet.

### Authors

Markus Kraft, Ellen Heffner, Annika L. Walter and Prof. Harald Sternberg work at the HafenCity University Hamburg. Nils Hollman works at the WSA Rhein in Duisburg. Kelly Torres and Eric Idun are enrolled students in the Master programme Geodesy and Geoinformatics Specialisation in Hydrography at the HafenCity University Hamburg.

markus.kraft@hcu-hamburg.de

### 1 Motivation and background

The riverbed of the Cologne Bay commonly consists of quaternary sand and gravel. Despite of that, there is a region north of the city Düsseldorf where the topmost layer not only composes prevalent sand and gravel, but is interspersed with smaller and bigger quartzite blocks. The underlying tertiary silt layer reaches much closer to the surface than usual.

These anomalies date back to approximately 30 million years ago, when the location was part of the former Wadden Sea. Under pressure, the silt and the later vegetation were partially transformed into massive blocks, having a typical dimension of 1 m to 2 m. Since the diameter increases up to 8 m and extends up to 1 m above the riverbed, the blocks form nautical obstacles. Furthermore, the erosion of the riverbed and hydro-morphological processes further expose the quartzite blocks. It is estimated, that there are more than 400 quartzite blocks, which are concentrated in three to four larger areas.

In the past years, several of the blocks, as shown in the [Fig. 1](#), were permanently removed from the

riverbed and placed on the left-hand side of the riverbank. Since the Federal Ministry for Digital and Transport instructed the Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Rhein (WSA Rhein) to optimise and improve the shipping channel to increase the depth for shipping purposes (Bundesverkehrswegeplan BVWP 2030, W27 – »Abladeverbesserung und Sohlstabilisierung zwischen Duisburg und



**Fig. 1:** Riverbed and quartzite blocks taken inside the diving bell of TGS Carl Straat

Stürzelberg«), the number and the appearance of the quartzite blocks must be investigated more closely.

The W27 project area is located between Rhine kilometre 722.5 (Düsseldorf) and 769.5 (Krefeld) and split into four legs, prospective construction sites. The Leg TA3 – »Steinerne Bänke« is located in the northern part of Düsseldorf, spanning over a distance of roughly 10 km (Fig. 2). To determine the composition of the riverbed within Leg 3, data from multiple multibeam surveys, spanning over a time period of 20 years, were analysed. Therefore, anomalies in hillshade visuals were manually inspected. This method is not only time-consuming, but also limited to larger blocks that protrude more than 10 cm above the riverbed. Furthermore, it can be difficult to distinguish actual objects from scattered echo sounding measurements. To enable a more thorough detection of the quartzite blocks, additional data derived from a side-scan sonar, was investigated. Since this data only revealed larger blocks, the extraction of further information was limited. To validate the existing datasets and to detect smaller blocks as well as flat rocks laying on the riverbed, the usage of backscatter data was considered. Since quartzite has a different backscatter signature in comparison to gravel and sand, the data could be used for a more thorough detection of the blocks. In addition, the data could be used for an automated approach which would not only save human effort, but also time. As a consequence, the WSA Rhein instructed the HafenCity University Hamburg (HCU) to survey the test area with a high-resolution multibeam echo sounder, collecting bathymetry as well as backscatter intensity information, and to develop an automated approach for the detection of the boulders.

## 2 Conducted survey on the River Rhine near Düsseldorf

For the scope of the project, an area between Rhine kilometre 747.0 and 754.5, situated between Theodor-Heuss-Brücke and the Rhine ferry Langst-Kaiserswerth, was surveyed. The area is characterised by a long curve before passing under the highway bridge of A44. Depending on the discharge and the water level height of the River Rhine, the area indicates a water depth up to 8 m. To allow for a sufficient compromise between an adequate water level and not too strong river currents, the survey was conducted between 24th and 31st July 2024 during mean water. Fig. 2 provides an overview map of the survey area, including the measured bathymetry respective to gauge zero of the Düsseldorf Rhine-gauge.

For the data acquisition, the HCU owned survey vessel *DVocean*, which is illustrated in Fig. 3, was used. With a length of about 8 m and a draft of

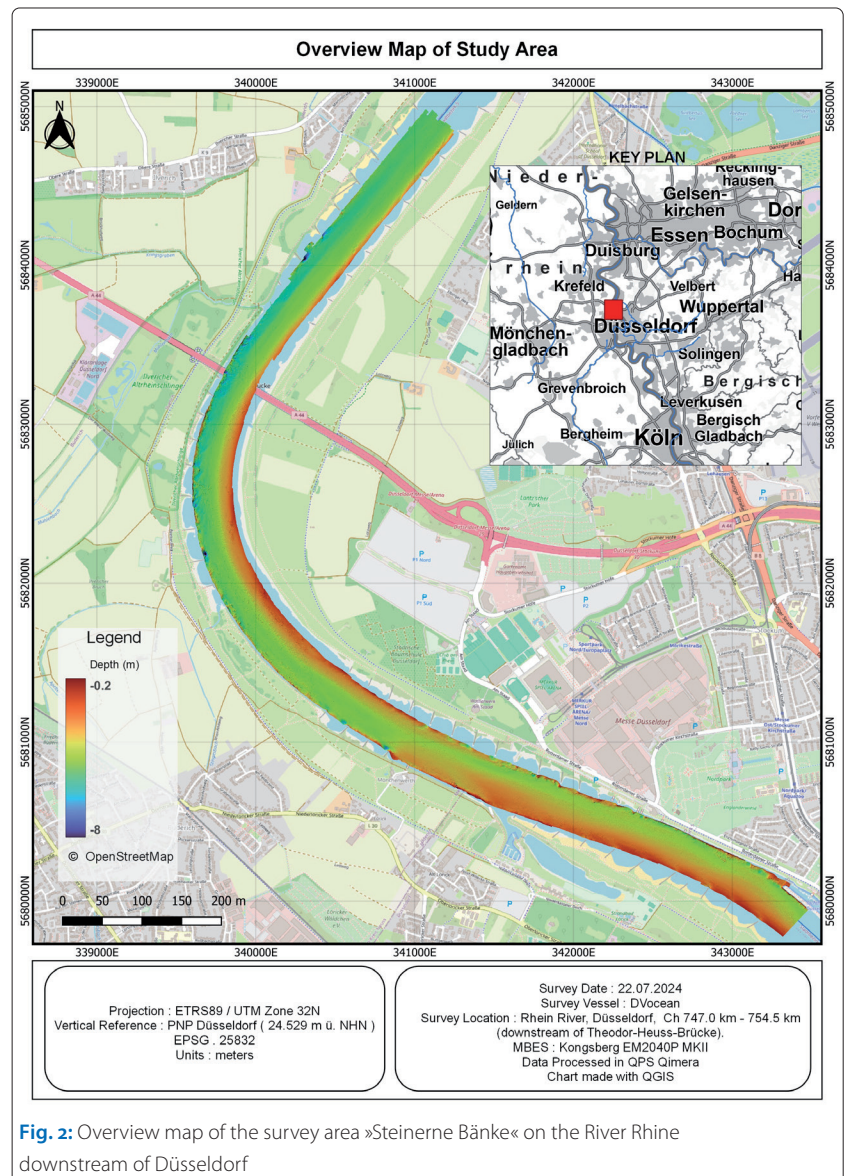


Fig. 2: Overview map of the survey area »Steinerne Bänke« on the River Rhine downstream of Düsseldorf

only 0.8 m, *DVocean* is explicitly designed for the operation in shallow waters. For the scope of the project, *DVocean* was trailered to the Rhine. To conduct the survey, a multibeam echo sounder from Kongsberg (EM2040P MKII), a sound veloc-



Fig. 3: HCU owned survey vessel *DVocean* in the harbour Lörick close to Düsseldorf

ity profiler from AML (AML-3 LGR with SV, CT and pressure sensor), an inertial navigation system from iXblue (Hydrins G4) and a Septentrio GNSS positioning system (AsteRx-U3) with two antennas and RTK correction data using SAPOS, was used.

After the equipment of *DVocean* was set up at the harbour Lörick, a patch-test calibration has been performed. The survey area itself was split into 15 survey sections, each having a length of about half a kilometre. The multibeam echo sounder was operated with a frequency of 300 kHz, simultaneously acquiring bathymetric and backscatter data. For quality control, at least one cross-profile within each section, hence every 500 m, was conducted. Sound velocity profiles were taken every 4 hours. To detect the quartzite blocks down to a size of some decimetres and ensure a sufficient point density, a survey speed of 3 knots for survey lines running against the currents, was maintained. Furthermore, lines along the stream direction were surveyed with a 100 % overlap. Therewith a point density of at least 160 points/m<sup>2</sup> (95 % confidence) was achieved and controlled during data acquisition. Due to the strong river current and high traffic volume of inland waterway vessels, manoeuvrability was limited. Additionally, several breakdowns of the inertial navigation system required extra alignments during the survey and delayed the survey routine. The entire survey area with a total length of 7.5 river kilometres was surveyed as close to the river banks as the manoeuvrability allowed.

### 3 Processing of the acquired data

Overall, more than 230 km of multibeam survey lines were surveyed during the project. To process the derived bathymetric multibeam data, the data was filtered, cleaned and validated using QPS Qimera. Due to the loss of GNSS underneath the

highway bridge and the increase of positioning uncertainty, the respective survey lines had to be vertically adjusted. Besides, small outages of the inertial measurement unit were covered by additional survey lines and interpolated. Vibrations of the MBES pole, caused by the strong currents, created small and irreversible ripples within the dataset. However, the cross-check revealed that all datasets met the standards of the special order set by the International Hydrographic Organization (IHO). The total uncertainty results did not exceed 15 cm in horizontal and 5 cm in vertical direction, which was the pre-defined minimum requirement for discovering the quartzite blocks. The backscatter data was used to create an intensity mosaic.

The bathymetry and the backscatter data were used for the manual detection of the quartzite boulders. Fig. 4 exemplarily shows how the manual detection took place in an area around Rhine kilometre 750. Here, numerous boulders were discovered. The corresponding bathymetry for the exact same area is shown next to it. By drawing polygons around the suspicious areas and evaluating the topography, the area size and height of the boulders above the riverbed could be estimated.

### 4 Preliminary results from manual detection

During the manual processing phase more than 8,000 possible quartzite blocks were identified. Given that different processors made individual decisions, some variation within the detection judgments is expected. The average area of the detected quartzite blocks is 1.90 m<sup>2</sup>, with a mean height above the riverbed of 0.28 m. Fig. 5 illustrates the relationship between the mean size and the number of detected quartzite blocks across

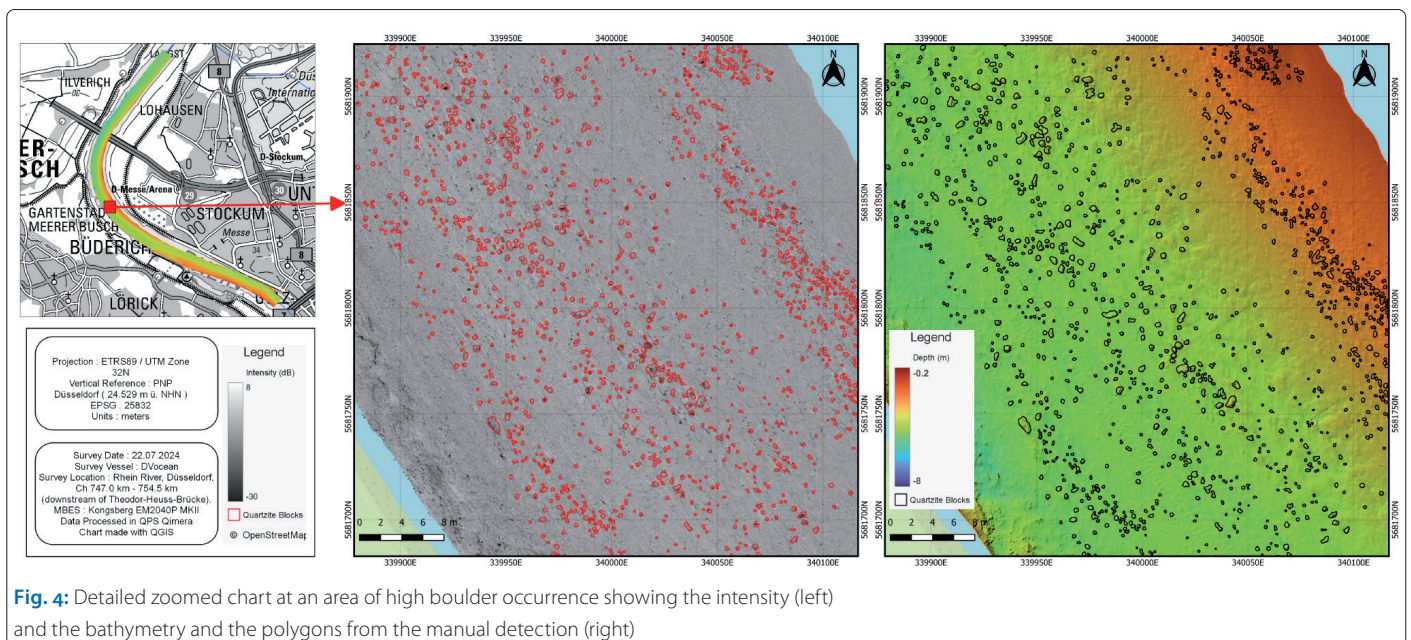


Fig. 4: Detailed zoomed chart at an area of high boulder occurrence showing the intensity (left) and the bathymetry and the polygons from the manual detection (right)



different sections of the survey area, providing insight into their horizontal distribution. While the mean size of the quartzite blocks detected within the first three kilometres of the survey area reaches a few decimetres, the size significantly increases to the metre scale from Rhine kilometre 750.0 onwards. This increase correlates with the beginning of the river bend, likely due to stronger currents on the outer bend, where sediment erodes more quickly exposing the quartzite blocks. Additionally, a significant rise in the number of detected quartzite blocks is observed between Rhine kilometre 750.5 and 751.5, marking the area at the start of the river bend.

### 5 Conceptualisation of automatic detection approaches

The manual detection process employed in such a project is labour-intensive, requiring considerable working-hours. As the project area expands, the workload substantially increases. To address these limitations, modern approaches integrate advanced techniques that combine multibeam bathymetry and backscatter data for riverbed characterisation. While bathymetry provides information about riverbed topography, backscatter data offers insights to the material composition of the substrate and its texture. The subsequent phase of this project involves the implementation of artificial intelligence to streamline and enhance the detection process. Two separate methods, one semi- and one fully automatic detection approach, will be developed, tested and evaluated.

#### 5.1 Semi-automatic approach with GIS methods

The objective of the semi-automatic detection approach is the classification of boulders by integrating terrain analysis derived from bathymetry with texture analysis from backscatter data.

A key challenge within this approach is to determine which features are most effective to distinguish boulders from other riverbed structures. Not all terrain or texture attributes contribute equally; some may have a stronger influence on classification accuracy than others. To address this, the research involves a thorough analysis of the relationships between the different features.

Image segmentation plays a crucial role in this process by isolating potential boulders from the surrounding sediment based on extracted terrain and texture attributes. Using segmentation techniques, the riverbed is divided into distinct regions where each pixel is classified according to its morphological and textural properties. This step refines the feature extraction process, reducing noise and enhancing the accuracy of boulder detection (Fakiris et al. 2019).

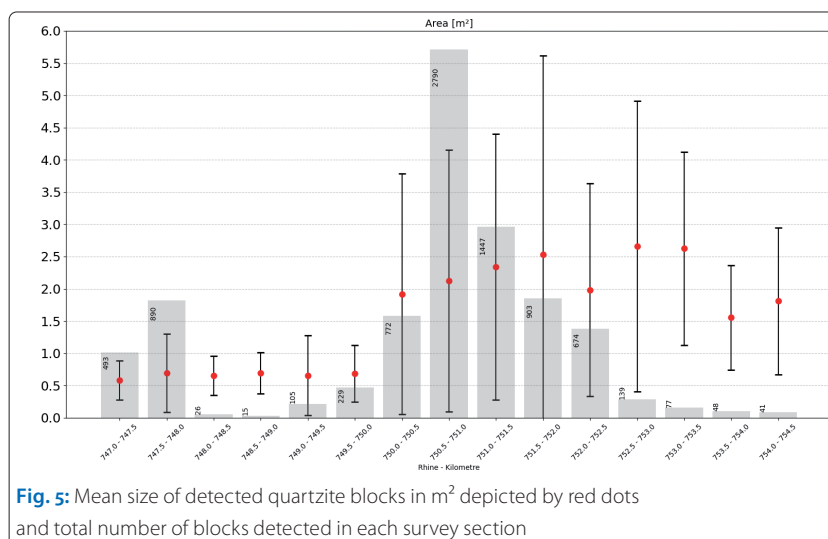


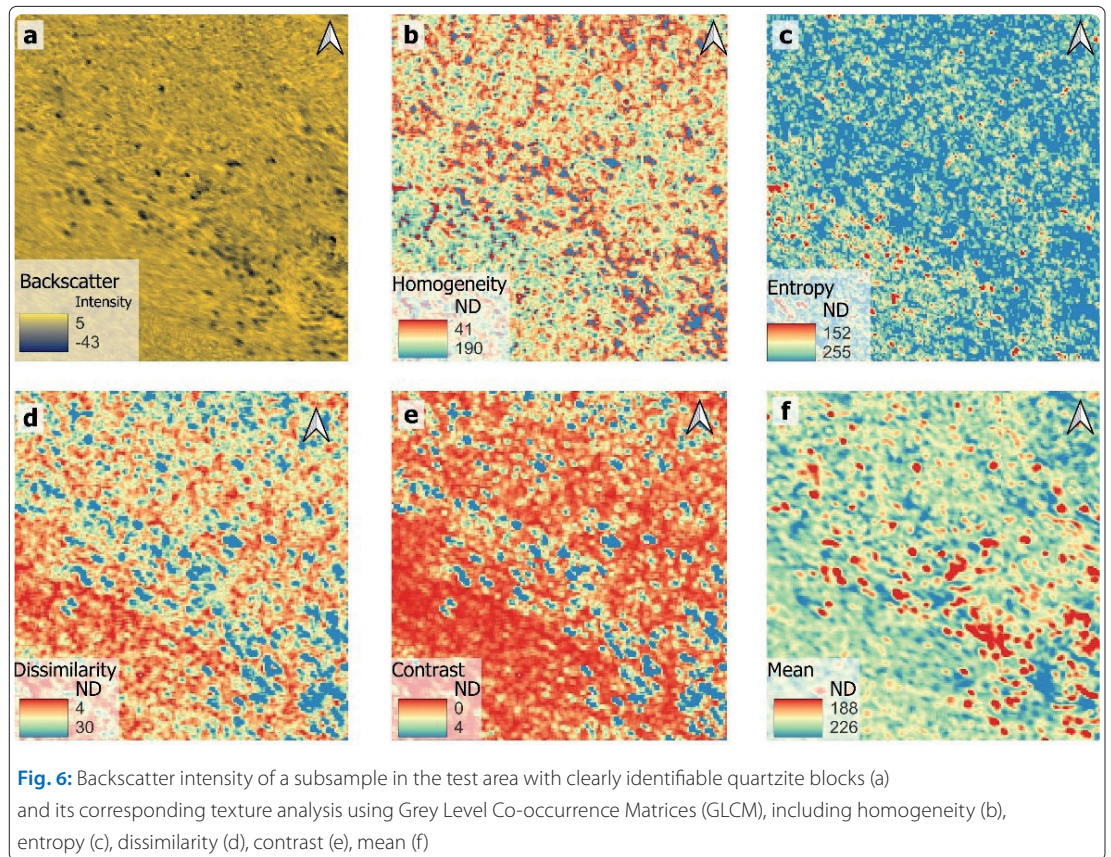
Fig. 5: Mean size of detected quartzite blocks in m<sup>2</sup> depicted by red dots and total number of blocks detected in each survey section

Additionally, statistical methods are applied to examine correlations, and machine learning algorithms are used to develop a classification model. The detected boulders from the segmentation and classification process are compared to a reference dataset created through the manual identification of boulders to ensure its reliability.

To extract the textural characteristics, the Grey Level Co-occurrence Matrix (GLCM) technique is employed. As shown in the Fig. 6, GLCM computes parameters such as homogeneity, dissimilarity, contrast, entropy and mean, which are particularly useful for the detection of regions with abrupt textural changes (Fakiris et al. 2019). Smooth sediment areas typically exhibit high homogeneity, whereas the irregular surfaces of boulders are marked by a higher contrast and dissimilarity values. Additionally, entropy captures the complexity and the randomness of textures, helping to distinguish heterogeneous surfaces from more uniform ones (Janowski et al. 2018).

Parallel, terrain analysis focuses on the quantification of the physical features of the riverbed. Hereby three primary derivatives, being roughness, slope and curvature, are calculated from the bathymetric data. Roughness provides an indication of how much the seafloor elevation varies over short distances, which can indicate the presence of boulders. While the slope or steepness, helps to identify abrupt changes in the underwater landscape, curvature reveals whether the bottom is convex (indicating a rise) or concave (indicating a depression) (Lerodiamonou et al. 2018; Janowski et al. 2021). Together, these metrics provide a comprehensive picture of the terrain, enhancing the overall ability to detect boulders.

The combined analysis of multibeam bathymetry and backscatter data represents a significant advancement in river- and seabed characterisation. The presented semi-automatic method, implemented through Python scripting and GIS soft-



ware, aims to provide a more efficient and precise approach for detecting boulders.

### 5.2 Automatic approach with AI methods

The fully automatic detection approach utilises a convolutional neural network (CNN) with a U-Net architecture to improve the detection of quartzite blocks through semantic segmentation, effectively replacing the manual detection method. The selection of the CNN U-Net architecture is based on its proven ability to capture complex pixel-wise patterns and provide detailed shape recognition (Ghosh et al. 2020; Kar et al. 2021). This capability is essential for differentiating objects, particularly in scenarios involving clusters, as opposed to traditional bounding box approaches using for instance the You Only Look Once (YOLO) algorithm.

Previous studies have shown the effectiveness of CNN U-Net architectures in hydrographic surveys. For example, Arosio et al. (2023) and Garone et al. (2023) successfully employed CNNs for the classification of seabed sediments into distinct classes using bathymetric as well as backscatter datasets.

The proposed model will be developed and evaluated using Python, specifically leveraging deep learning libraries such as Keras. For the detection of the quartzite blocks, a binary semantic classification, utilising labelled data from the manual detection process, will be applied. This

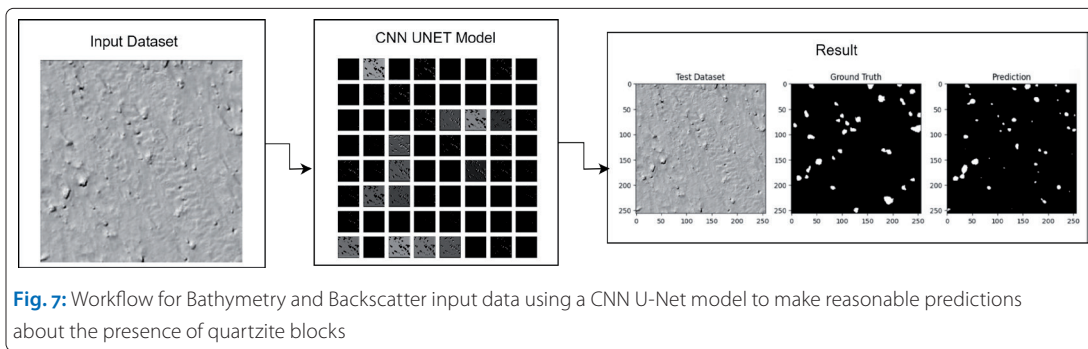
data will be split into training, validation and test datasets.

The performance of the model will be evaluated by using a range of metrics, including accuracy, precision and recall. Additionally, a confusion matrix analysis will be conducted, with particular emphasis on minimising false negatives, which are critical for the accurate identification of quartzite blocks.

To assess the optimal performance of the model, either the bathymetry dataset, the backscatter dataset or a combination of both will be utilised as input data. Additionally, statistical derivatives, such as slope, roundness and texture features derived from the Grey Level Co-occurrence Matrix (GLCM), will be computed from the datasets. A feature selection analysis will be conducted to eliminate redundancy and enhance the performance of the model.

Since the model will utilise a single setup that incorporates six distinct input datasets, six separate results for comparative analysis will be generated. The considered datasets and combinations are as follows:

- Bathymetry
- Backscatter
- Backscatter + derivatives
- Bathymetry + derivatives
- Bathymetry + Backscatter
- Backscatter + derivatives + Bathymetry + derivatives



This methodological approach aims to improve the efficiency and the accuracy of the block detection, facilitating a scalable analysis of the datasets. A schematic diagram, which illustrates the workflow, using the bathymetric dataset as the initial input and demonstrating the predictions of the model, is presented in the Fig. 7.

The predictions generated by the model will be compared to the ground truth data derived from the manual detection. An analysis of the location and the dimensions of the blocks will be conducted to identify areas for improving the model.

## 6 Conclusion

The study on the detection of quartzite blocks in the River Rhine highlights the challenges and progress in automating the identification of potentially hazardous objects in the riverbed. The high-resolution multibeam echo sounder data, including both bathymetric and backscatter information,

has identified over 8,600 potential boulder sites, which were detected through manual inspection. The distribution of blocks correlates to the current change in the river bend, indicated by the high exposure of blocks and bigger size of blocks in this area.

For the second phase of the project two automatic detection methods for the quartzite block detection will be developed. The semi-automatic approach integrates GIS tools and texture analysis derived from backscatter data alongside terrain features from bathymetry. Meanwhile, the fully automated approach uses a convolutional neural network (CNN) with U-Net architecture for a pixel-wise semantic segmentation, aiming to enhance detection accuracy, especially in areas with clustered blocks. Both methods will use the manual detected dataset as their ground-truth data and both approaches will be evaluated with regard to their detection performance. //

## Acknowledgments

We want to express our thanks to the students who helped collecting the data during the Rhine project (Tony Sebastian, Eric Idun, Kelly Torres), our captains on board (Hans-Georg Marek, Axel Güter, Cornelius Lohmann) and the students who helped in the manual cleaning and detection procedure (Eric Idun, Kelly Torres, Elmira Omidhezardeh, Julius Nebocat, Johannes Westphal).

## References

- Arosio, Riccardo; Brandon Hobley; Andrew J. Wheeler et al. (2023): Fully convolutional neural networks applied to large-scale marine morphology mapping. *Frontiers in Marine Science*, DOI: 10.3389/fmars.2023.1228867
- Fakiris, Elias; Philippe Blondel; George Papatheodorou et al. (2019): Multi-Frequency, Multi-Sonar Mapping of Shallow Habitats – Efficacy and Management Implications in the National Marine Park of Zakynthos, Greece. *Remote Sensing*, DOI: 10.3390/rs11040461
- Garone, Rosa Virginia; Tor Inge Birkenes Lønmo; Alexandre C. G. Schimel et al. (2023): Seabed classification of multibeam echosounder data into bedrock/non-bedrock using deep learning. *Frontiers in Earth Science*, DOI: 10.3389/feart.2023.1285368
- Ghosh, Swarnendu; Nibaran Das; Ishita Das; Ujjwal Maulik (2020): Understanding Deep Learning Techniques for Image Segmentation. *ACM Computing Surveys*, DOI: 10.1145/3329784
- Janowski, Łukasz; Jarosław Tęgowski; Jarosław Nowak (2018): Seafloor mapping based on multibeam echosounder bathymetry and backscatter data using Object-Based Image Analysis: a case study from the Rewal site, the Southern Baltic. *Oceanological and Hydrobiological Studies*, DOI: 10.1515/ohs-2018-0024
- Janowski, Łukasz; Radosław Wroblewski; Janusz Dworniczak et al. (2021): Offshore benthic habitat mapping based on object-based image analysis and geomorphometric approach. A case study from the Slupsk Bank, Southern Baltic Sea. *The Science of the Total Environment*, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.149712
- Kar, Mithun Kumar; Malaya Kumar Nath; Dabanga Raj Neog (2021): A Review on Progress in Semantic Image Segmentation and Its Application to Medical Images. *SN Computer Science*, DOI: 10.1007/s42979-021-00784-5
- Lerodiaconou, Daniel; Alexandre C. G. Schimel; David Kennedy et al. (2018): Combining pixel and object based image analysis of ultra-high resolution multibeam bathymetry and backscatter for habitat mapping in shallow marine waters. *Marine Geophysical Research*, DOI: 10.1007/s11001-017-9338-z

# Luftgestützte hochaufgelöste Vermessung flacher Gewässer am Beispiel des Rheins

Ein Beitrag von JANNIS GANGELHOFF, CHRISTOPH S. WERNER und ALEXANDER REITERER

Flache Gewässer sind essenzieller Teil vieler Ökosysteme und spielen in der Versorgung der Menschen eine wesentliche Rolle. Im Kontrast dazu steht die verfügbare Datenbasis. Dies liegt an der aufwendigen Vermessung, die vielfach manuell erfolgen muss und daher nur sehr geringe Abtastdichten erlaubt. Kompakte drohnengetragene Laserbathymetriesysteme versprechen effiziente Abhilfe. Am Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM wurde ein neues, kompaktes und leichtes luftgestütztes Laserscanningsystem aufgebaut und evaluiert. Bei der Entwicklung des Messsystems wurde besonders auf Leichtbau und eine hohe erzielbare Ortsauflösung abgezielt. Das System arbeitet simultan mit infrarotem und grünem Laserlicht, was zu einer besseren Identifikation des Wasserspiegels und der Vegetation beiträgt. Zur Evaluation wurde das System an einem Uferbereich am Rhein mit Buhnen und starkem Unterwasserbewuchs getestet. Die Ergebnisse demonstrieren die hohe erreichbare Auflösung und zeigen, dass sich das Gerät sowohl zum effizienten Erfassen von Topografie und Bathymetrie als auch zur Kartierung von Unterwasserbewuchs eignet.

LiDAR | Bathymetrie | Full-Waveform | Dual-Wavelength | flache Gewässer | Küstenmonitoring | Gewässermonitoring | UAV | Drohne  
LiDAR | bathymetry | full-waveform | dual-wavelength | shallow waters | coastal monitoring | water monitoring | UAV | drone

Shallow bodies of water are an essential part of many ecosystems and play a key role in providing for human needs. This contrasts with the available database. This is due to the time-consuming surveying process, which often has to be carried out manually and therefore only allows very low sampling densities. Compact drone-borne laser bathymetry systems promise an efficient remedy. A new, compact and lightweight airborne laser scanning system has been set up and evaluated at the Fraunhofer Institute for Physical Measurement Techniques IPM. During the development of the measuring system, particular emphasis was placed on lightweight construction and a high achievable spatial resolution. The system works simultaneously with infrared and green laser light, which contributes to better identification of the water level and vegetation. For evaluation purposes, the system was tested on a bank area on the Rhine with groynes and heavy underwater vegetation. The results demonstrate the high resolution that can be achieved and show that the device is suitable for efficiently recording topography and bathymetry as well as for mapping underwater vegetation.

## Autoren

Jannis Gangelhoff,  
Dr. Christoph S. Werner und  
Prof. Alexander Reiterer arbeiten am Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM in Freiburg. Prof. Reiterer lehrt zudem an der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.

[jannis.gangelhoff@ipm.fraunhofer.de](mailto:jannis.gangelhoff@ipm.fraunhofer.de)

## 1 Einführung

Gewässer stellen eine essenzielle Grundlage für das Überleben aller biologischen Organismen dar. Insbesondere Flachwassergebiete bieten mit Hebungen und Senkungen eine Nische für verschiedenste Arten. Die präzise und regelmäßige geometrische Erfassung solcher Flachwassergebiete bildet daher die essenzielle Datengrundlage für die Habitatcharakterisierung und das Verständnis der räumlichen Verteilung von Makrophyten, Fischen und anderer aquatischer Lebensräume. Gleichzeitig gehen von Gewässern jedoch auch Risiken für Mensch und Umwelt aus. Auch hier bil-

den bathymetrische Messungen die Grundlage für hydrologische Modelle, um z. B. Wasservolumina, Durchflussraten und Sedimenttransport zu bestimmen. All dies sind wesentliche Parameter für Hochwasserschutz, Ressourcenmanagement oder auch für Renaturierungsvorhaben. Insbesondere Fließgewässer profitieren dabei von zeitlich eng getakteter Vermessung, um die Morphodynamik zu erfassen.

Die Erfassung der kritischen Flachwasserbereiche ist mit aktueller Technik jedoch nur mit hohem Aufwand oder mit deutlichen Kompromissen möglich. Die Bathymetrie wird vielfach

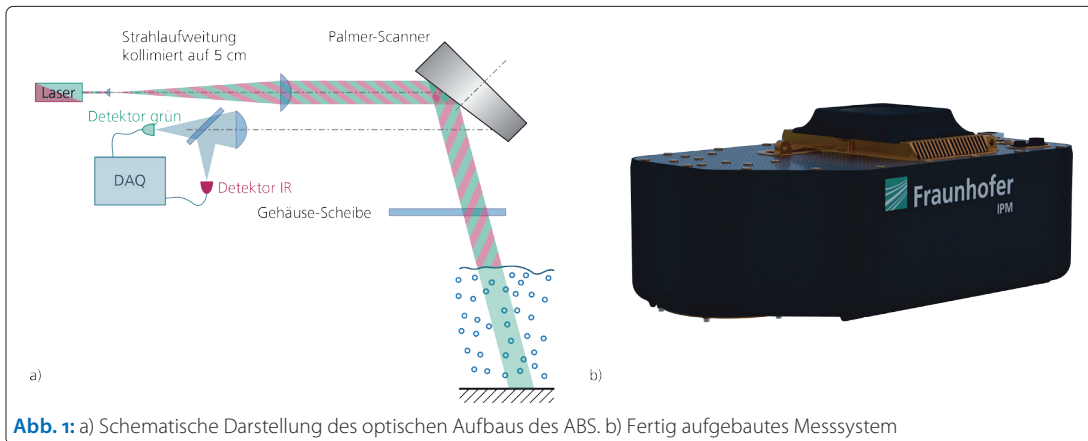


Abb. 1: a) Schematische Darstellung des optischen Aufbaus des ABS. b) Fertig aufgebautes Messsystem

mit Fächerecholoten aufgenommen. Bei flachen Gewässern ist dies aufgrund der geringen Streifenbreite ineffizient oder sogar unmöglich, wenn der Tiefgang des Schiffes den Zugang verhindert. Flugzeuggetragene Laserbathymetriesysteme sind aufwendig im Einsatz und bieten oft nicht die notwendige Punktdichte. Durch diese Schwierigkeiten sind derzeit von vielen flachen Gewässern nur händisch gemessene Profile alle 50 m vorhanden (Mandlbürger 2022).

Die Verfügbarkeit von leistungsfähigen Drohnensystemen hat es in den letzten Jahren ermöglicht, auch kompakte Laserbathymetriesysteme auf unbemannten Fluggeräten einzusetzen (Riegl 2025; Yellowscan 2025), wodurch auch die Vermessung kleinerer Gebiete effizient möglich ist. Am Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM haben wir ein besonders leichtes und kompaktes Messsystem entwickelt, das mit einem Laserstrahl von lediglich 5 cm Durchmesser eine bisher einmalige Ortsauflösung ermöglicht (Fraunhofer IPM 2025).

## 2 Das Messsystem

Die Abstandsmessung des ABS (Airborne Bathymetric Laser Scanner) basiert auf der gepulsten Pulslaufzeitmessung (engl. time-of-flight, TOF-Messung). Abb. 1a zeigt schematisch den optischen Aufbau des ABS. Emittiert werden kurze Laserimpulse mit einer Pulsdauer von etwa 1 ns. Als Lichtquelle kommt dabei ein frequenzverdoppelter Nd:YAG-Laser zum Einsatz. Dieser emittiert sowohl infrarotes Licht bei seiner fundamentalen Wellenlänge (1064 nm) als auch bei der harmonischen Wellenlänge (532 nm). Dadurch entstehen zwei Lichtpulse, die sowohl zeitlich als auch räumlich nahezu perfekt überlagert sind. Das grüne Licht dringt in das Wasser ein und ermöglicht die Vermessung des Gewässergrundes, zusätzlich wird auch umliegende Topografie über Wasser erfasst. Im Gegensatz dazu wird das Infrarotlicht vom Wasser stark absorbiert. Von Unterwasserstrukturen kommt aufgrund dieser Absorption kein Licht zurück. Dadurch ermöglicht der infrarote Laser

jedoch die einfachere Isolierung von Topografie, Wasseroberfläche, Uferlinie, schwimmenden Objekten und Vegetation. Eine Besonderheit an diesem System ist, dass die emittierten Laserstrahlen auf einen gleichbleibenden Durchmesser von ca. 5 cm kollimiert sind, was eine hervorragende räumliche Auflösung im Vergleich zu typischen laserbasierten Bathymetriesystemen mit divergentem Laserstrahl bietet (Mandlbürger 2020). Durch die Strahlaufweitung bereits im Gerät ist die Laserleistung schon beim Verlassen der Schutzscheibe so weit verteilt, dass der Scanner der Laserklasse 2M entspricht.

Die Laserstrahlen werden von einem nach unten gerichteten Palmer-Scanner unter einem Winkel von  $30^\circ (\pm 15^\circ)$  und mit einer Drehrate von 50 Hz abgelenkt. Abb. 2 zeigt das typische Scanmuster für eine Fluggeschwindigkeit von 5 m/s aus einer Flughöhe von 20 m. Auf dem Grund ergibt sich ein leicht elliptisches Scanmuster, das bei den angegebenen Flugparametern in beide Richtungen einen geringen Punktabstand von ca. 5 cm oder besser erzeugt, der in etwa auch dem Strahldurchmesser entspricht. In Kombination mit einer Punktmessrate von 35 kHz ist somit eine effiziente Befliegung mit hoher Auflösung möglich. Wird der ausgehende Laserstrahl an einem Objekt gestreut, wird das zurückkommende Licht über einen dichromatischen Spiegel nach Wellenlänge ge-

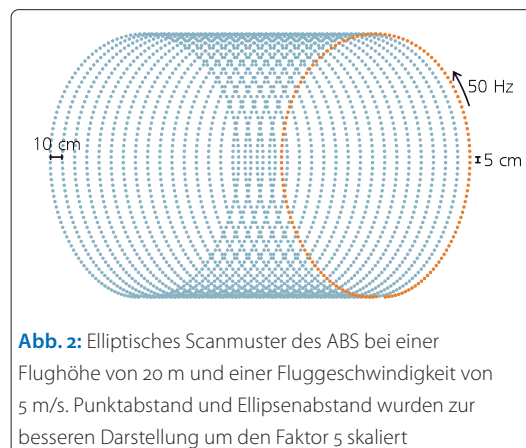


Abb. 2: Elliptisches Scanmuster des ABS bei einer Flughöhe von 20 m und einer Fluggeschwindigkeit von 5 m/s. Punktabstand und Ellipsenabstand wurden zur besseren Darstellung um den Faktor 5 skaliert

trennt und jeweils auf einen dedizierten Detektor für grünes bzw. infrarotes Licht gelenkt. Zur Unterdrückung von Fremdlicht sind die Detektoren mit schmalbandigen Interferenzfiltern ausgestattet. Als Detektoren dienen dabei eine Kombination aus PMT (Photomultiplier) und APD (Avalanche-Photodiode). Die Signale werden mit 5 Giga-Samples pro Sekunde voll digitalisiert. Das resultierende Intensität-über-Zeit-Signal (engl. full-waveform) wird aufgrund der hohen Datenrate noch auf dem System vorverarbeitet und anschließend zusammen mit einem Zeitstempel und der Position des Palmer-Scanners zur späteren Verarbeitung auf einer internen SSD abgespeichert.

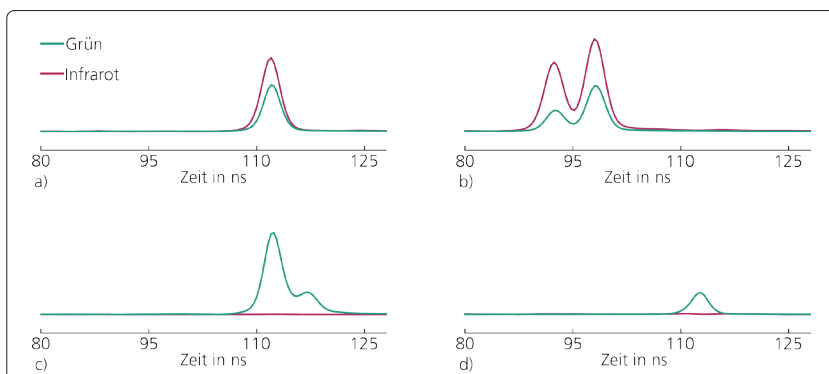
Des Weiteren ist im ABS eine INS-Lösung (satellitengestütztes Trägheitsnavigationssystem, engl. inertial navigation system) integriert, welche zum einen die genaue Zeit bereitstellt, zum anderen die für die Berechnung einer georeferenzierten Punktwolke benötigte Trajektorie misst und aufzeichnet. Alle Komponenten sind in einem wassergeschützten Gehäuse verbaut (Abb. 1b). Nach außen gibt es einen Anschluss für die Stromversorgung, womit das System direkt von dem UAV oder von einem zusätzlichen Akku versorgt werden kann. Für die Bedienung und Datenübertragung ist eine Gigabit-Ethernet- und eine WLAN-Schnittstelle vorhanden. Durch konsequenten Leichtbau konnte ein Scannergewicht von unter 3 kg realisiert werden. Somit ist der Einsatz auf einer Vielzahl an kommerziell erhältlichen UAVs möglich, wobei durch das geringe Gewicht Flugzeiten von mehr als 30 Minuten möglich sind (Acecore Technologies 2025).

### 3 Auswertung der Full-Waveform-Daten

Die Rohdaten werden zur Prozessierung nach dem Flug vom Messsystem heruntergeladen. Die

Auswertung erfolgt dabei mittels einer eigenen Softwarelösung, die aus den Wellenformen die Abstandswerte extrahiert. Da die Full-Waveform aufgezeichnet wird, lässt sich neben der reinen Abstandsinformation dabei auch z. B. das Verhältnis zwischen dem Infrarot- und Grünkanal auswerten. Abb. 2 zeigt beispielhaft verschiedene Signale (die empfangene Leistung über die Zeit) eines einzelnen Laserpulses für den grünen und den infraroten Messkanal. Zusätzlich wird eine interne Referenz – die Intensität des ausgehenden Laserstrahls – im System aufgezeichnet, um einen präzisen Startpunkt zu haben. Aus der Laufzeit von der Referenz bis zum Ankommen des zurückgestreuten Laserpulses am Detektor kann über die Lichtgeschwindigkeit ein Abstand ermittelt werden. Auch bei einer Digitalisierung der Intensitätswerte mit einer zeitlichen Auflösung von nur 200 ps propagiert das Licht in dieser Zeit ca. 60 mm in Luft bzw. 44 mm in Wasser. Um dennoch eine genaue Abstandsmessung zu erzielen, erfolgt eine spezifische Filterung und Interpolation, wodurch die Abstandsmessung signalabhängig deutlich verbessert werden kann. Hierdurch wird unter guten Bedingungen eine Auflösung bis in den Millimeterbereich möglich. Im einfachsten Fall kommt für einen ausgesendeten Laserpuls ein einzelner Puls zurück, wie z. B. vom trockenen Strand in Abb. 3a.

Trifft der Laserstrahl jedoch zeitgleich auf Objekte in verschiedenen Abständen, beispielsweise die Wasseroberfläche, die Wassersäule und den Grund oder einen Busch und den Boden darunter, werden auch an mehreren Objekten die Laserpulse zurückgestreut und damit ergeben sich komplexe Signalformen (Abb. 3b und Abb. 3c). Somit erhält man beispielsweise auch Informationen von der Wasseroberfläche und der Wassersäule selbst. Die beiden Lichtwellen ermöglichen auch eine gute Indikation, ob Vegetation getroffen wurde. Vegetation weist im infraroten Spektralbereich eine – verglichen mit dem sichtbaren Spektralbereich – sehr hohe Albedo auf, was sich direkt auf das Signalverhältnis auswirkt (vergleiche Abb. 3b mit Abb. 3a). Aus den Signalen lassen sich, insbesondere durch die beiden verschiedenen Wellenlängen, noch mehr Informationen als nur der Abstand ermitteln. Wasser absorbiert den infraroten Laser nach wenigen Zentimetern, weshalb bei Messungen im Wasser bei waagerechter Montage des Messsystems meist kein infrarotes Licht auf den Detektor fällt (Abb. 3c, Abb. 3d). Dies erklärt sich dadurch, dass die Wasseroberfläche wie ein Spiegel wirkt und das auftreffende Licht vom Messsystem weglenkt, da kein Lichtstrahl senkrecht auf die Wasseroberfläche trifft. Dies betrifft auch die grüne Lichtwelle. Was in den Signalen daher scheinbar als Wasseroberfläche interpretiert werden könnte, ist tatsächlich die Rückstreuung der Wassersäule bzw. der darin befindlichen Partikel selbst. Je nach Trüb-

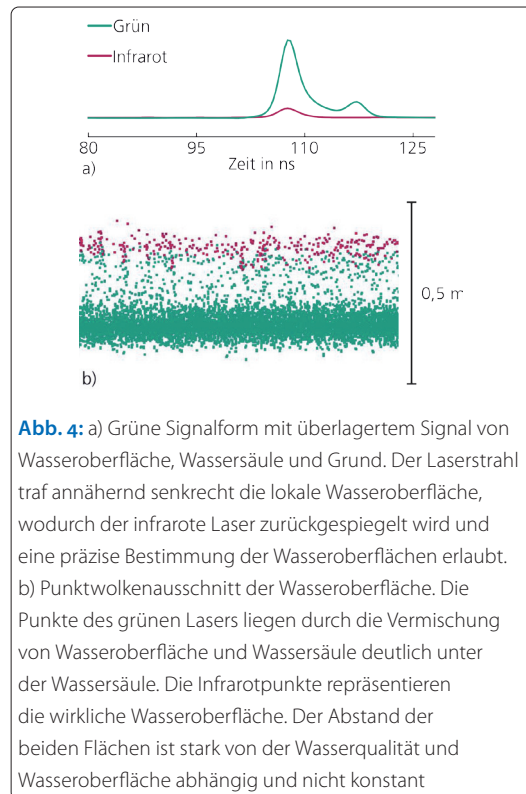


**Abb. 3:** Intensität-über-Zeit-Signale von verschiedenen Untergründen aus den Messungen am Rhein. Gezeigt sind die Signale von 80 bis 128 ns (bezogen auf eine interne Zeitreferenz), aufgrund unterschiedlicher optischer Auslegung und verschiedener Verstärkungen der Signale sind nur die Verhältnisse zueinander aussagekräftig. a) Einzelnes Echo vom Uferbereich (Land). b) Multiecho von einem Busch, der erste Peak ist auf einem grünen Blatt, welches im infraroten Spektralbereich eine hohe Albedo aufweist. c) Signal der Wasseroberfläche, Wassersäule und Flussbett. d) Peak auf sehr flachem Wasser (wenige Zentimeter), nur durch das fehlende Infrarotsignal vom Strand oberhalb der Wasseroberfläche zu unterscheiden

heit ergibt sich so ein Versatz von einigen Dezimetern. Eine Ausnahme bildet, beispielsweise durch Wellen, die Wasseroberfläche, die senkrecht zum Laserstrahl steht und somit den Laser zurückspiegelt (Abb. 4a). Dieser Puls ist aufgrund der Absorption von infrarotem Licht in Wasser nicht mit Signal aus der Wassersäule gemischt und ermöglicht die genaue Bestimmung der Wasseroberfläche. Dadurch ergibt sich typischerweise eine dünn besetzte Punktwolke im Infrarotkanal, die die genaue Bestimmung des Wasserspiegels und damit auch eine genauere Brechungskorrektur ermöglicht (Abb. 4b). Wenn gewünscht, lässt sich das Messsystem auch leicht verkippt montieren – dadurch trifft ein Teil der Scanellipse nahezu senkrecht auf die Wasseroberfläche, was ein zuverlässiges Signal erzeugt und zu einer dichteren Punktwolke führt. Dies kann je nach Anwendungsfall vorteilhaft sein. In den nachfolgenden Messungen wurde der Scanner waagrecht montiert. Dies ermöglicht dann, Objekte an der Wasseroberfläche (z. B. Wasserpflanzen) hervorzuheben.

Die Pulshöhe entspricht dem Intensitätswert bei der jeweiligen Wellenlänge. Durch unterschiedliche Albedos im Infraroten und Grünen, insbesondere bei Vegetation, kann beispielsweise ermittelt werden, ob bei Multiechopulsen der letzte Puls auf ein Blatt oder schon auf den Boden trifft. Abb. 3b zeigt eine typische Waveform durch einen Busch. Das erste Echo stammt von den Blättern, welche im Infraroten sehr hell sind. Bei dem zweiten Peak ist das Verhältnis von infrarotem zu grünem Licht deutlich kleiner, dieser stammt von der Erde unter dem Baum. Dabei darf nur das Verhältnis zwischen Infrarot und Grün und nicht die absolute Intensität betrachtet werden. Die absolute Intensität ist davon abhängig, wie viel von dem Laserstrahl beispielsweise auf das Blatt und welcher Teil auf den Boden trifft (Clark 1999).

In der weiteren Prozessierung werden die ermittelten Abstände und zusätzlichen Informationen mit Hilfe der Spiegelposition des Palmer-Scanners in eine Punktwolke im lokalen Scanner-Koordinatensystem umgerechnet. Im nächsten Schritt erfolgt die Verschiebung dieser Punktwolke in ein georeferenziertes Koordinatensystem, basierend auf der aufgezeichneten INS-Trajektorie. Anhand der infraroten Punktwolke wird ein vereinfachtes Modell der Wasseroberfläche erzeugt. Dieses Modell, die Trajektorie sowie das Modell des Laserscanners dienen als Grundlage für eine Raytracing-Simulation, die die Brechung des Laserstrahls an der Wasseroberfläche sowie die im Wasser um etwa 30 % niedrigere Lichtgeschwindigkeit korrigiert. Aufgrund der vereinfachten Annahme einer lokal ebenen Wasseroberfläche werden Brechungsänderungen durch Wellenbewegungen momentan nicht korrigiert. Je nach Wellen vergrößert der Winkelfehler, linear zur Wassertiefe, das

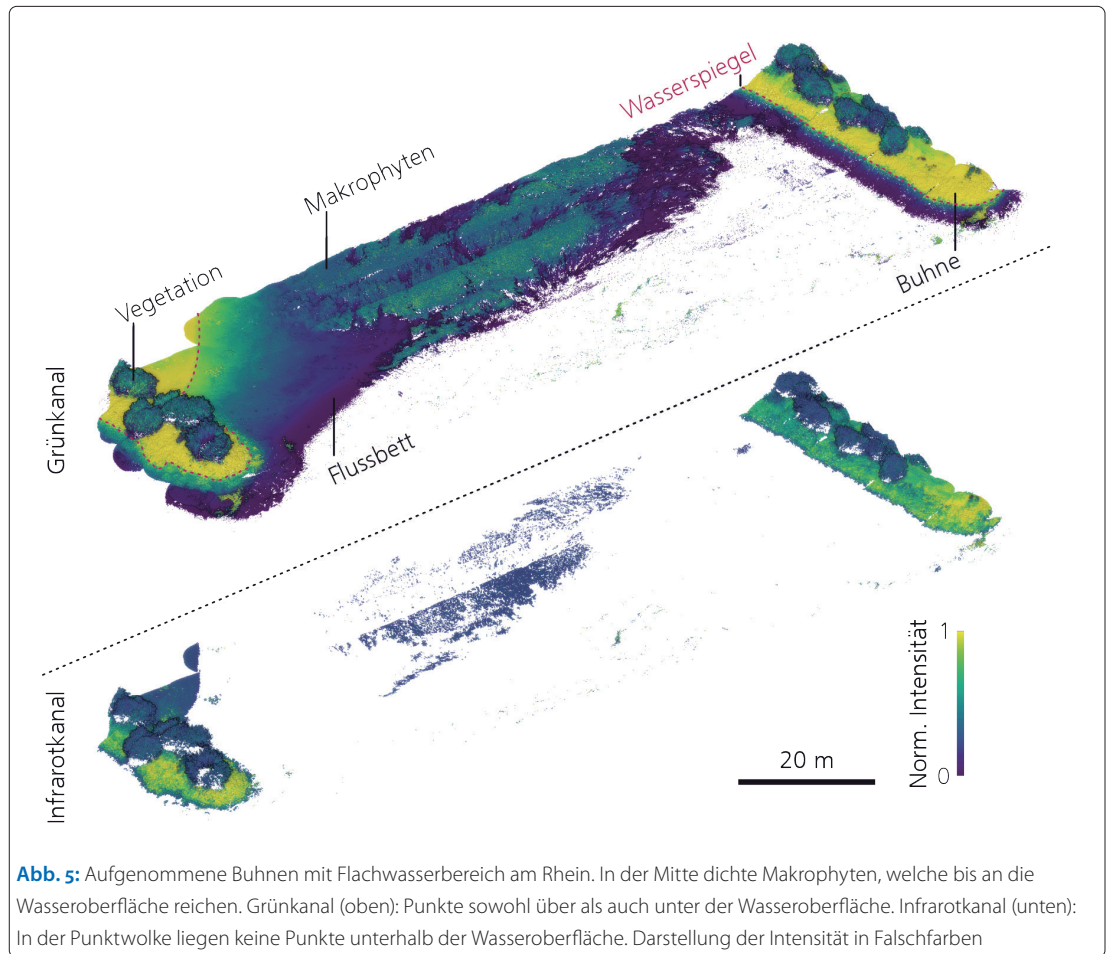


**Abb. 4:** a) Grüne Signalform mit überlagertem Signal von Wasseroberfläche, Wassersäule und Grund. Der Laserstrahl traf annähernd senkrecht die lokale Wasseroberfläche, wodurch der infrarote Laser zurückgespiegelt wird und eine präzise Bestimmung der Wasseroberflächen erlaubt. b) Punktwolkenausschnitt der Wasseroberfläche. Die Punkte des grünen Lasers liegen durch die Vermischung von Wasseroberfläche und Wassersäule deutlich unter der Wassersäule. Die Infrarotpunkte repräsentieren die wirkliche Wasseroberfläche. Der Abstand der beiden Flächen ist stark von der Wasserqualität und Wasseroberfläche abhängig und nicht konstant

Messrauschen von weniger als einem Zentimeter auf mehrere Dezimeter (Birkebak 2018).

#### 4 Messungen

Das System wurde auf einem DJI Matrice 600 Pro Hexacopter montiert. Es wurden mehrere Messflüge am Rhein in der Nähe von Frankfurt durchgeführt. Um eine lückenlose Punktwolke zu erhalten, wurde ein automatisiert gesteuertes mäanderförmiges Pattern mit 20 % Überlappung geflogen. Als Flughöhe wurden 20 m gewählt, ein Kompromiss zwischen Eindringtiefe ins Wasser und Flächenleistung. Beflogen wurde ein Gebiet zwischen zwei Bühnen, welche aufgrund der flachen Bereiche und der Unterwasservegetation nicht mit einem Fächerecholot vermessen werden konnten. Die Befliegung dauerte pro Buhne ca. 10 Minuten. Die Bühnen selbst bestehen aus großen, aufgeschütteten Steinen. Zwischen den Bühnen befindet sich ein sandiger Flachwasserbereich, welcher steil in das tiefe Fahrwasser abfällt. Besonders mittig zwischen den Bühnen wachsen viele Makrophyten, welche an der Wasseroberfläche dichte Teppiche bilden. Der Bewuchs ist stellenweise so dicht, dass der Laser den Boden nicht erreicht. Auf den Bühnen wachsen große Büsche. Abb. 5 (oben) zeigt die Punktwolke des Grünkanals. Die rote Strichpunktlinie zeigt den Übergang von Überwasser zu Unterwasserpunkten an. Gut zu erkennen ist der Flachwasserbereich an der linken Buhne, hier lagert sich durch die Strömung Sediment ab. Die rechte Buhne ist durch die Strömung freigespült. In der Mitte sind aufgrund des kleinen Spotdurch-



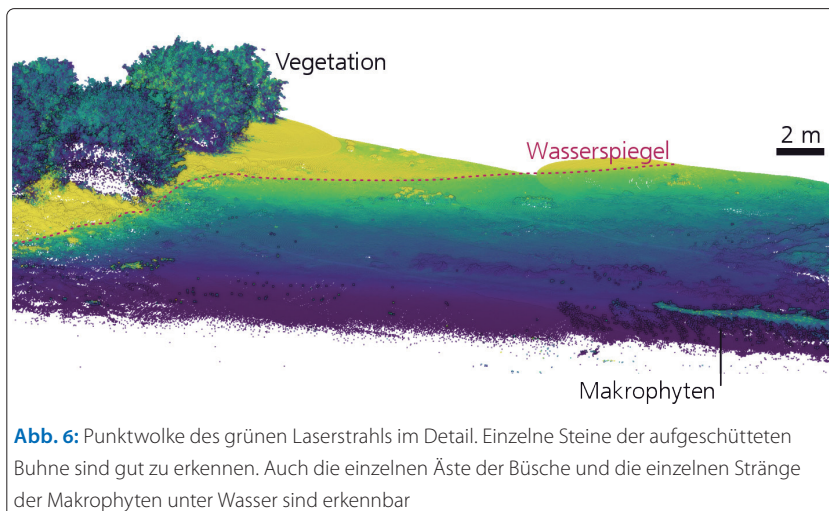
**Abb. 5:** Aufgenommene Buhnen mit Flachwasserbereich am Rhein. In der Mitte dichte Makrophyten, welche bis an die Wasseroberfläche reichen. Grünkanal (oben): Punkte sowohl über als auch unter der Wasseroberfläche. Infrarotkanal (unten): In der Punktwolke liegen keine Punkte unterhalb der Wasseroberfläche. Darstellung der Intensität in Falschfarben

messers teilweise die einzelnen Pflanzen erkennbar. Der Infrarotkanal endet mit der Wasseroberfläche (Abb. 5, unten). Da die Makrophyten teilweise bis an die Wasseroberfläche reichen und schwimmen, sind diese auch in dem Infrarotkanal gut als zusammenhängender Bereich zu erkennen. Durch die Strömung an der rechten Buhne entstehen Wellen, wodurch hier besonders viele Punkte auf der Wasseroberfläche gemessen werden. Abb. 6 zeigt einen Ausschnitt aus dem Flachwasserbereich in der grünen Punktwolke. Selbst einzelne

Steine mit einer Größe von unter 20 cm können sowohl über als auch unter Wasser aufgelöst werden. An den Büschen auf den Buhnen und auch an den Makrophyten unter der Wasseroberfläche können die einzelnen Äste erkannt werden.

### 5 Fazit und Ausblick

Das ABS-System zeigt, dass auch flache Gewässer effizient mit hoher räumlicher Auflösung und großer Punktdichte vermessen werden können. Besonders die Lücke zwischen dem Land und den tiefen – per Fächerecholot erreichbaren – Gebieten kann geschlossen werden. Das System eignet sich auch für die Vermessung kleiner Bäche, welche grundsätzlich nicht per Boot befahren werden können. Die Messungen am Rhein zeigen, dass dabei auch ein gewisses Maß an Trübheit toleriert wird. Zusätzlich zu den Wassergebieten kann aufgrund des kollimierten Strahls auch noch die umliegende Topografie und Infrastruktur mit feinen Details aufgenommen werden. Aufgrund der zweiten infraroten Wellenlänge wird die Punktwolke mit weiteren Informationen, wie zum Beispiel zum Wasserübergang oder zur Vegetation, angereichert. Zukünftig sollen auf künstlicher Intelligenz basierende Ansätze für weitere Auswertungen, zum Beispiel für das Habitatmonitoring, erfolgen, auch hier erweisen



**Abb. 6:** Punktwolke des grünen Laserstrahls im Detail. Einzelne Steine der aufgeschütteten Buhne sind gut zu erkennen. Auch die einzelnen Äste der Büsche und die einzelnen Stränge der Makrophyten unter Wasser sind erkennbar



sich die zusätzlichen Informationen als großer Vorteil. Dadurch kann auch bei der Auswertung die teure und zeitaufwendige manuelle Arbeit verringert werden.

Das gesamte System inklusive UAV kann dabei in einem normalen PKW zum Einsatzort gebracht

werden. Dank Laserklasse 2M sind auch die Sicherheitsanforderungen an die Befliegung gering. Durch das niedrige Gewicht von unter 3 kg können mit aktuellen UAVs Flugzeiten von über 30 Minuten erreicht werden und damit auch größere Bereiche effektiv vermessen werden. //

**Literatur**

Acecore Technologies (2025): Meet Noa – our heavy lift UAV. <https://acecoretechnologies.com/noa>

Birkebak, Matthew; Firat Eren; Shachak Pe'eri; Neil Weston (2018): The Effect of Surface Waves on Airborne Lidar Bathymetry (ALB) Measurement Uncertainties. Remote Sensing, DOI: 10.3390/rs10030453

Clark, Roger (1999): Spectroscopy of Rocks and Minerals, and Principles of Spectroscopy. In: Andrew Rencz (ed.): Remote Sensing for the Earth Sciences, Manual of Remote Sensing, Vol. 3

Fraunhofer IPM (2025): Gelände und Unterwasser-Topographie. [www.ipm.fraunhofer.de/de/gf/](http://www.ipm.fraunhofer.de/de/gf/)

objekterfassung-laserscanning/anw/unterwasser-laserscanning/unterwasser-topographie-bathymetrie.html

Mandlbürger, Gottfried (2020): A review of airborne laser bathymetry for mapping of inland and coastal waters. Hydrographische Nachrichten, DOI: 10.23784/HN116-01

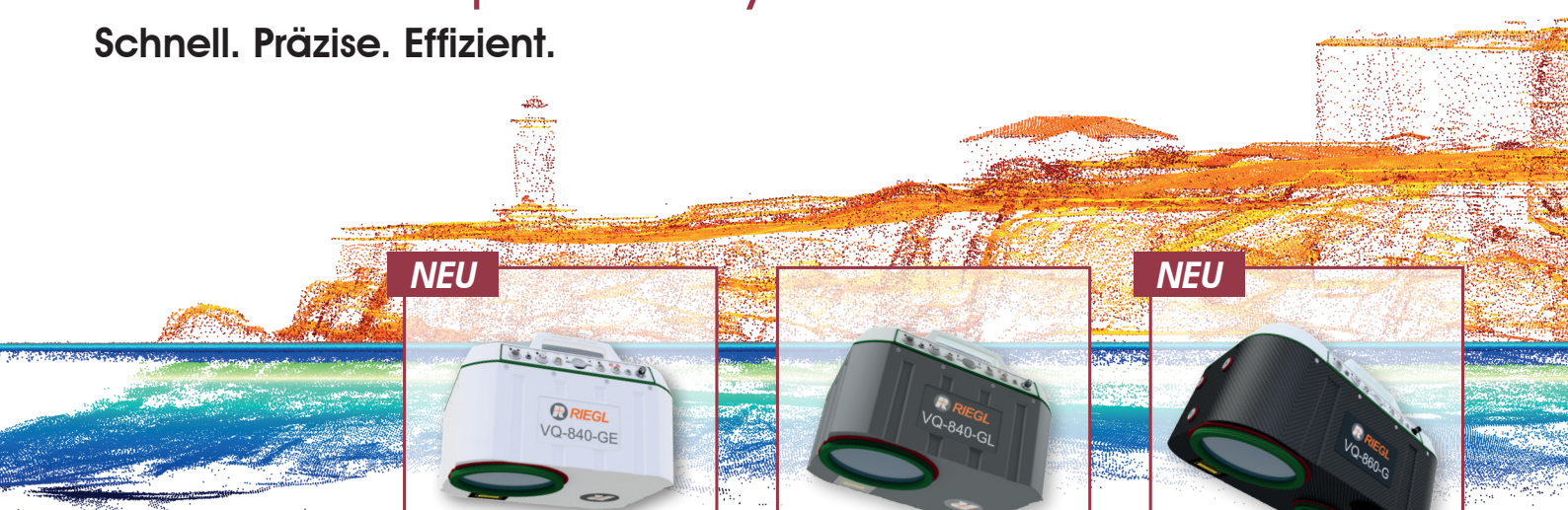
Mandlbürger, Gottfried (2022): A review of active and passive optical methods in hydrography. The International Hydrographic Review, DOI: 10.58440/ihr-28-a15

Riegl (2025): RIEGL VQ-840-GE. [www.riegl.com/nc/products/airborne-scanning/produktdetail/product/scanner/90](http://www.riegl.com/nc/products/airborne-scanning/produktdetail/product/scanner/90)

Yellowscan (2025): Yellowscan Navigator. [www.yellowscan.com/products/navigator-bathymetric-lidar](http://www.yellowscan.com/products/navigator-bathymetric-lidar)

# LiDAR für Topo-Bathymetrie

**Schnell. Präzise. Effizient.**



**NEU**



bis zu 100 kHz, 2 SD



bis zu 200 kHz, >2 SD

**NEU**



bis zu 100 kHz, 2,5 SD

RIEGL VQ-840-GE

RIEGL VQ-840-GL

RIEGL VQ-860-G

effiziente hochauflösende Flachwasser-Bathymetrie für Küstenkartierung und Flussvermessung



Weitere topo-bathymetrische Laserscanner und Systeme finden Sie auf [www.riegl.com](http://www.riegl.com)

**ocean BUSINESS**

Besuchen Sie uns  
8. - 10. April 2024  
Southampton | UK  
RIEGL Stand W38



# Mapping shallow inland running waters with UAV-borne photo and laser bathymetry

## The Pielach River showcase

An article by GOTTFRIED MANDLBURGER, JAN RHOMBERG-KAUERT, LAURE-ANNE GUEGUEN, CHRISTIAN MULSOW, MARKUS BREZOVSKY, LUCAS DAMMERT, JOE HAINES, SILVIA GLAS, THERESA HIMMELSBACH, FREDERIK SCHULTE, PHILIPP AMON, LUKAS WINIWARTER, BORIS JUTZI and HANS-GERD MAAS

Mapping and monitoring of inland water bodies is of high scientific, economic and ecological importance. Depending on the size, depth and turbidity of the river, either acoustic or optical methods are suited for the acquisition of dense and accurate 3D bathymetry data. For relatively small, clear and shallow alpine rivers, optical methods are the first choice. Either images or laser scans are taken from crewed or uncrewed platforms to map the river bottom. For more than a decade, a near natural reach of the pre-alpine Pielach River in eastern Austria has been repeatedly surveyed with laser and photo bathymetry. In this contribution, we present an open benchmark dataset (DOI: 10.48436/taz19-r6618), which was captured in October 2024 following a devastating flood event in September 2024 with multicopter drones. We present the measurement campaign including airborne and terrestrial surveys and the data processing steps. Next to standard processing, we introduce new and innovative image-based bathymetry techniques for rivers with dynamic, wavy water surfaces. We show that image sequences can be used to mitigate the water surface dynamics; synchronous oblique drone images can be used to reconstruct the undulating water surface; and Neural Radiance Fields are an alternative option to classical methods for mapping bathymetry.

multimedia photogrammetry | topo-bathymetric laser scanning | water surface mapping | Neural Radiance Fields | full-waveform analysis | benchmark data  
Multi-Medien-Photogrammetrie | topo-bathymetrisches Laserscanning | Wasseroberflächenkartierung | Neural Radiance Fields | Full-Waveform-Analyse | Benchmark-Daten

Die Kartierung und Überwachung von Binnengewässern ist von großer wissenschaftlicher, wirtschaftlicher und ökologischer Bedeutung. Je nach Größe, Tiefe und Trübung des Flusses eignen sich entweder akustische oder optische Methoden für die Erfassung dichter und genauer 3D-Bathymetriedaten. Für relativ kleine, klare und flache Alpenflüsse sind optische Methoden die erste Wahl. Von bemannten oder unbemannten Plattformen aus werden entweder Bilder oder Laserscans aufgenommen, um die Flusssohle zu kartieren. Seit mehr als einem Jahrzehnt wurde ein naturnaher Abschnitt der voralpinen Pielach in Ostösterreich wiederholt mit Laser- und Fotobathymetrie vermessen. In diesem Beitrag stellen wir einen offenen Benchmark-Datensatz vor (DOI: 10.48436/taz19-r6618), der im Oktober 2024 nach einem verheerenden Hochwasserereignis im September 2024 mit Multikopter-Drohnen aufgenommen wurde. Wir stellen die Messkampagne mit luftgestützten und terrestrischen Erhebungen sowie die Datenverarbeitungsschritte vor. Neben der Standardverarbeitung führen wir neue und innovative bildbasierte Bathymetrietechniken für Flüsse mit dynamischen, welligen Wasseroberflächen ein. Wir zeigen, dass Bildsequenzen verwendet werden können, um die Dynamik der Wasseroberfläche abzuschwächen; dass synchrone, schräge Drohnenbilder verwendet werden können, um die wellenförmige Wasseroberfläche zu rekonstruieren; und dass Neural Radiance Fields eine Alternative zu klassischen Methoden für die Kartierung der Bathymetrie darstellen.

### 1 Introduction

Precise 3D mapping of inland running water bodies is of high importance for flood risk modelling

(Tsakiris 2014), habitat mapping (Naura et al. 2016; Hauer et al. 2009), monitoring of fluvial erosion and sediment transport (Gkiatas et al. 2022; Kramer

Stajanko et al. 2023) and many other applications. This concerns both the shape of the underwater topography and submerged objects such as macrophytes (Rhombert-Kauert et al. 2024; Wagner et al. 2024) and deadwood (Zigann et al. 2023). Larger navigable rivers often show a substantial load of suspended sediment, making the water turbid. For those inland water bodies, Sound Navigation and Ranging (SONAR) based on single-beam or multibeam echo sounding is often the only option for acquiring 3D riverbed data (Lurton 2002). However, for moderately deep and clear alpine rivers, active and passive optical methods such as laser bathymetry (Philpot 2019; Guenther et al. 2000) and photo bathymetry (Mulsow et al. 2024; Maas 2015; Mandlbürger 2019) are often more applicable compared to SONAR-based data acquisition, because many small to medium-sized rivers are not continuously navigable for survey vessels and the application of small uncrewed surface vehicles is threaded by currents. However, the complex wavy water surface poses problems for both image- and laser-based surveys (Sardemann et al. 2024; Mulsow et al. 2024), especially when carried out by uncrewed aerial vehicles (UAV).

Although low flying altitudes enable high spatial resolution, with typical laser footprint diameters of less than a decimetre and image ground sampling distances even in the centimetre range, the higher resolution also comes with the downside of a higher sensitivity with respect to local water surface inclination. For photo bathymetry, this complicates the derivation of underwater tie points (Gueguen and Mandlbürger 2024), which are necessary for image orientation in the multi-media case (Mulsow 2010), and later also the derivation of dense underwater point clouds (Mandlbürger 2019). Laser bathymetry is less sensitive in this respect, as green laser pulses are also reflected to a certain extent from the water surface (Guenther et al. 2000) and, in the best case, provide both surface and bottom information for a single emitted laser pulse. But also for laser bathymetry, the higher resolution increases the chance that the collimated laser pulses entirely hit the side of a water wavefront facing away from the sensor, which results in water surface dropouts. Another problem for laser bathymetry is the very shallow zone, where the reflected echo pulse can no longer be separated into distinct returns from the surface and the bottom (Schwarz et al. 2019). Thus, water surface modelling is not straightforward, but requires expert intervention to some extent. Practical workflows for photo and laser bathymetry therefore often rely on simplified water surface models neglecting the dynamic, wavy water surface. This decreases precision and accuracy (Westfeld et al. 2017) and makes image-based derivation of bottom topography impossible, especially for deeper areas.

From the above, we can conclude that both laser and photo bathymetry would benefit from (i) better methods for coping with dynamic, wave-induced water surface and (ii) existence of trustworthy ground-truth reference data to validate new and innovative data processing strategies. The aim of this contribution is therefore to introduce a real-world benchmark reference dataset, openly accessible to the scientific community, and to introduce new ideas and concepts for deriving precise bathymetry based on aerial images and laser scans. As a basis, we organised a multi-purpose and multi-sensor measurement campaign at the pre-alpine Pielach River in October 2024 following a major flood event in September 2024 (Bloeschl 2024). In the contribution, we first describe the study area and the captured datasets in Section 2. In Section 3 we provide detailed information on how the acquired measurements were post-processed to ensure a reliable benchmark dataset. This includes detailed descriptions of the processing of the topo-bathymetric UAV-laser scanning mission, and the UAV-based acquisition of oblique and aerial images. In this Section, we also introduce innovative concepts for deriving bathymetry from (stereo) images, using conventional or deep learning-based approaches. We present the resulting benchmark dataset including representative error metrics in Section 4. In the same Section, we also briefly show the first results of the advanced photo bathymetry methods, and we briefly discuss the obtained results. The article is summarised by the concluding remarks in Section 5.

## 2 Materials

### 2.1 Study area

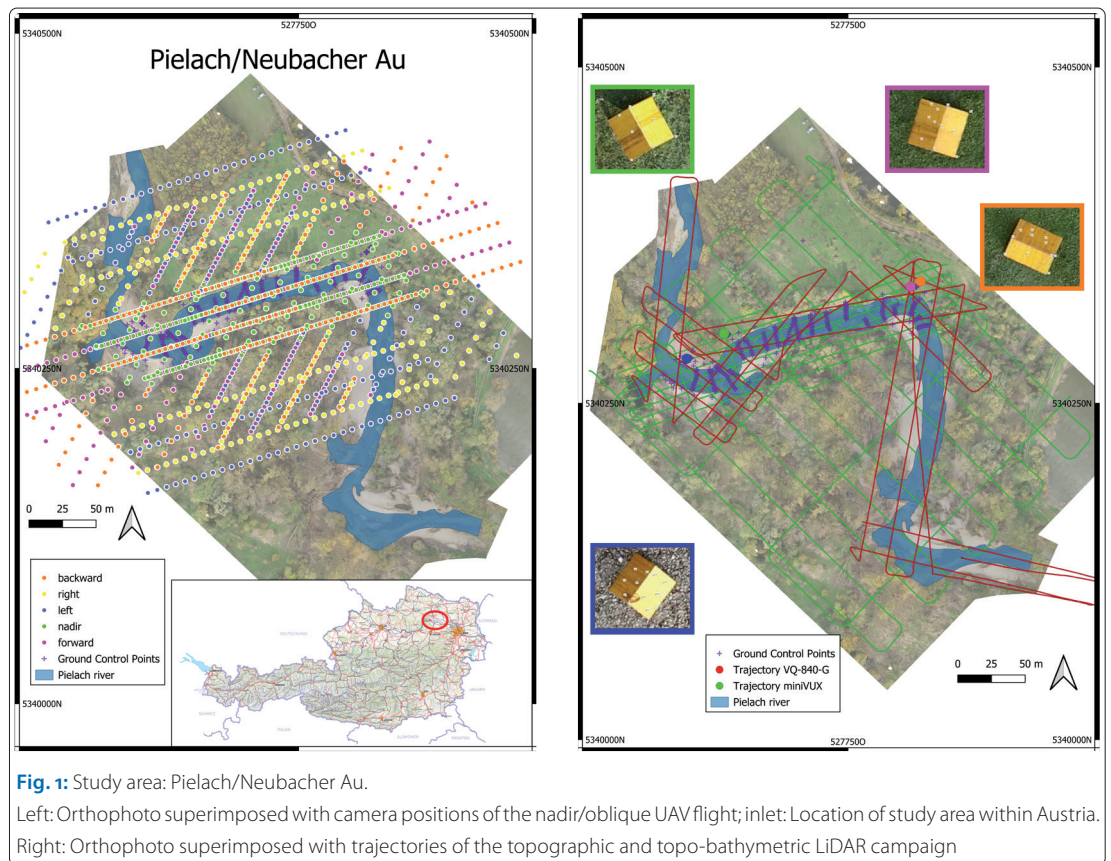
The study area Neubacher Au (N 48°12'50", E 15°22'30"; WGS 84) is located in eastern Austria in the tailwater of the pre-alpine Pielach River, a right-hand side tributary of the Danube (see Fig. 1). The study area is located within a natural conservation area of the European Union Natura2000 programme (area code: AT1219000). In the southern part of the study reach, a complete meander loop of the river encloses a riparian forest. North of the river, there is a pasture. The morphology is dominated by gravel banks, point bars and steep cliffs. The river is classified as a riffle-pool type (Melcher and Schmutz 2010), reaching a maximum depth of about 3 m. It is characterised by a pluvio-nival regime with typical discharge peaks during the winter/spring snow melt and heavy rainfall in the summer. However, the last flood event in September 2024 was caused by perpetual precipitation over a period of more than four days (Bloeschl 2024).

The mean annual discharge within the investigated area is about  $7 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , the sediment of the bed load is dominated by coarse gravel (2 cm to 6.3 cm), and the average gradient is about 0.4 %.

### Authors

Prof. Gottfried Mandlbürger, Jan Rhombert-Kauert, Laure-Anne Gueguen, Markus Brezovsky and Lucas Dammert work at TU Wien, Austria. Christian Mulsow and Prof. Hans-Gerd Maas work at TU Dresden, Germany. Joe Haines works at Newcastle University, UK. Silvia Glas, Theresa Himmelsbach, Frederik Schulte and Prof. Lukas Winiwarter work at the University of Innsbruck, Austria. Philipp Amon works at RIEGL Research Forschungsgesellschaft mbH in Horn, Austria. Prof. Boris Jutzi works at the Karlsruhe Institute of Technology, Germany.

*gottfried.mandlbuerger@geo.tuwien.ac.at*



The entire catchment area of the Pielach River measures 590 km<sup>2</sup> and the mean channel width is approximately 20 m. Although the longitudinal continuum of the Pielach River is disrupted by weirs built for hydropower use and engineering measures, the river has retained some of its natural self-forming morphological characteristics, such as periodically inundated sidearms, dynamic gravel bars, large woody debris, small oxbows, etc., within the study area (Zitek et al. 2008). A more detailed description of the study area and its surrounding can be found in Mandlbürger et al. (2015).

## 2.2 Datasets

To obtain data to tackle the research questions formulated in Section 1, a multi-purpose measurement campaign was conducted on October 24 and 25, 2024. The campaign was carried out one month after the severe flood event on September 20 and 21, 2024. By then, the river had regained a good level of transparency, which, in turn, enabled optimal conditions for optical hydrography.

As advancements in photo bathymetry are the main motivations of the entire initiative, we conducted multiple UAV image acquisitions. First, the straight east-west river section was captured with nadir and oblique images using a DJI Zenmuse P1 45 MPix RGB-camera mounted on a DJI M350 RTK multicopter UAV. With a flying altitude of 80 m above ground level (AGL), the resulting ground sampling distance (GSD) amounts to 1 cm for the

nadir images. The oblique images were taken with an angle of 45° using the smart oblique mode in the DJI Pilot 2 flight controller app, which means that the gimbal constantly swings forward, backward and sideward to mimic a classical penta camera with a Swiss-cross pattern. The left panel of Fig. 1 shows the positions and orientations of the cameras. This flight block specifically served for the comparison of classical Dense Image Matching (DIM) versus photo bathymetry based on Neural Radiance Fields (NeRF) (Mildenhall et al. 2021).

To test the possibility of improving photo bathymetry in the presence of waves with image sequences, we performed a second image acquisition, where the UAV stopped at predefined waypoints and hovered in the air for about 1 minute while images were taken with a frame rate of 0.7 Hz. This results in sequences of about the 100 images per waypoint before the UAV was flying to the next waypoint, where the same procedure was repeated. Adjacent image sequences had an overlap to enable 3D stereo reconstruction. In this experiment, we tested flying altitudes of 25 m, 50 m and 75 m, respectively, generating GSDs of 3 mm to 9 mm.

Finally, this measurement campaign was our first opportunity to obtain a field dataset to map the undulating water surface with oblique and synchronously captured stereo images, after working only with laboratory data (Gueguen and Mandlbürger 2024). The goal was to apply our processing

workflow to field data and understand their subsequent specificity. In order to highlight an optimal configuration, we acquired data from four different positions and imaging directions with respect to the river flow direction. For that, we used two DJI M350 drones, each equipped with a DJI Zenmuse P1 camera. The two drones were manually controlled so that pairs of oblique images were taken at each point. The UAVs hovered at these manually defined positions and took oblique images with a frame rate of 1 Hz. At this stage of the project, the synchronisation of the image capture was only done manually, with both drone pilots triggering image sequence capture at an acoustic signal. We also took care that as many ground control points (GCP) as possible are visible in both images to allow image orientation via spatial resection for each pair of images.

To provide proper reference for the aforementioned photo bathymetry experiments, we conducted UAV laser scanning flights with both topographic and topo-bathymetric UAV laser scanners. We first captured the entire study area including the alluvial forest with a RIEGL miniVUX-3UAV laser scanner operating a near-infrared (NIR) laser with a wavelength of 905 nm and a pulse repetition frequency of 300 kHz. The sensor is equipped with a RiLOC-E navigation unit, consisting of a helix GNSS antenna, a u-blox dual-band GNSS receiver and a MEMS IMU. For colourising the resulting 3D point cloud, the sensor is equipped with a Sony  $\alpha$ 6000 RGB camera. We flew the system 60 m AGL with a flight speed of 6 m s<sup>-1</sup>. These mission settings resulted in a point density of more than 500 points/m<sup>2</sup>. The flight trajectory is shown in Fig. 1. Data processing was carried out in the scanner manufacturer's software RiPROCESS using Online WaveForm Processing (OWP) (Pfennigbauer et al. 2014). From this dataset, we derived a digital terrain model (DTM) of the dry area and a digital water surface model (DWSM), which we later used for refraction correction.

To obtain continuous underwater data, we conducted a topo-bathymetric UAV survey with the RIEGL VQ-840-GL laser scanner. The sensor uses a green water penetrating laser operating at a wavelength of 532 nm. The scanner features an elliptical Palmer scan mechanism with a lateral Field of View (FoV) of  $\pm 20^\circ$  and a forward/backward FoV of  $\pm 14^\circ$ . We flew the sensor at a flying altitude of 60 m AGL with pairs of flight lines aligned to the river axis and additional cross-strips in the area of specific interest in the northwestern part of the study area as plotted in the right panel of Fig. 1. As with the NIR laser, RiPROCESS was also used to process the green laser data. Waveform analysis was carried out using the standard OWP approach and the water-specific Surface-Volume-Bottom (SVB) algorithm (Schwarz et al. 2019). Due to the good water

System	Flight altitude	Beam divergence	Pulse repetition rate
RIEGL VQ-840-GL	60 m $\pm$ 5 m	1 mrad	199 kHz
RIEGL miniVUX-3UAV	60 m $\pm$ 14 m	1,5 mrad	300 kHz

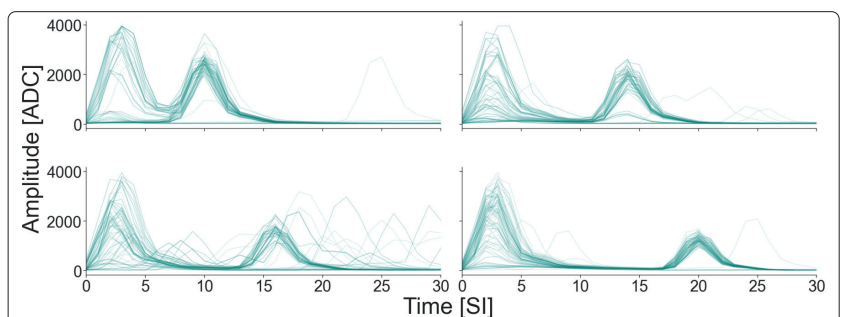
**Table 1:** The different settings and parameters of the LiDAR systems used in the survey

clarity, we were able to capture the entire riverbed, including the approximately 3 m deep pool areas (cf. Fig. 4). Table 1 summarises the parameters used for both LiDAR surveys.

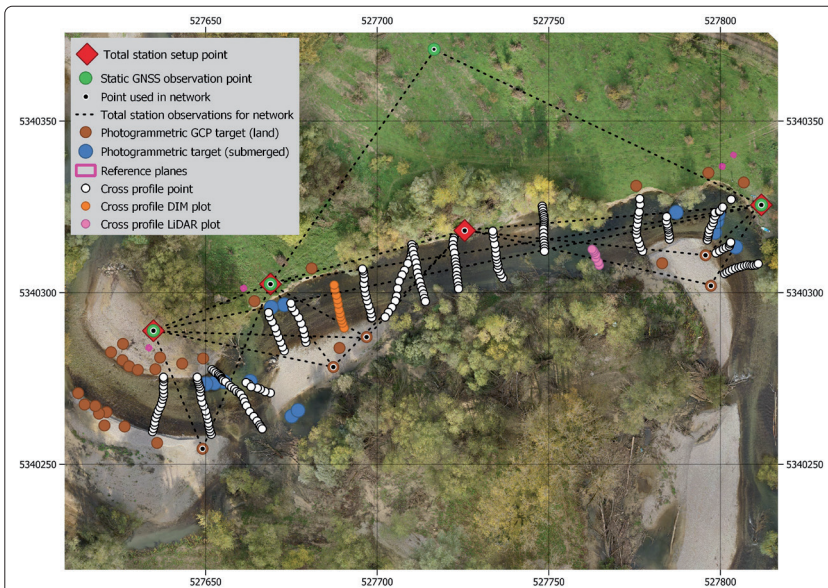
In addition to the LiDAR point clouds shown in Fig. 4, the RIEGL VQ-840-GL is able to capture full-waveform data (Fig. 2). This feature enables the processing using the SVB algorithm, as here a possible decomposition is fitted to the waveform data, requiring an extended record of the reflected laser pulse.

To allow accurate georeferencing and evaluation of the geometric quality of the acquired datasets, a geodetic reference network was established in the study area. Four static GNSS position observations constitute the basis of the network (Fig. 3). The points were observed between 1.5 and 5.5 hours. For post-processing of these long-term GNSS measurements, we used a local base station in the nearby village of Loosdorf, which led to baselines shorter than 2 km. These four points define the datum of the local realisation of ETRS89 (reference epoch: 2015.0, UTM 33N, EPSG: 25833).

The inner geometry of the network is defined by total station measurements from four positions, of which two are identical with the GNSS points. A Leica MS60 robotic total station was used and the local coordinate uncertainties of the fixed network points reach 2 mm in position and 3 mm in height after adjustment. Transformation into a global ETRS89/UTM 33 coordinate system yielded an uncertainty of less than 5 mm. Based on the total station network, we measured photogrammetric targets above and below the water surface, as well as bathymetric cross-sections (cf. Fig. 3). These measurements were not included in the network adjustment to allow maximum accuracy of the inner



**Fig. 2:** Full-waveform data of the cross-section shown in Fig. 4 for the green LiDAR system. Each panel displays 100 recorded waveforms for different depths of the cross-section, where one sample interval equals approximately 0,5 ns and the amplitude is given in units of the system's Analog-to-Digital Converter (ADC)



**Fig. 3:** Overview of the network of reference measurements. The geodetic datum (ETRS89/UTM 33) is defined by the four GNSS points (green). All photogrammetric ground control points (brown) and river cross-sections (white) were measured from total station network points (red diamond). The river cross-sections marked with blue and orange points are shown in Fig. 4 and Fig. 9C, respectively

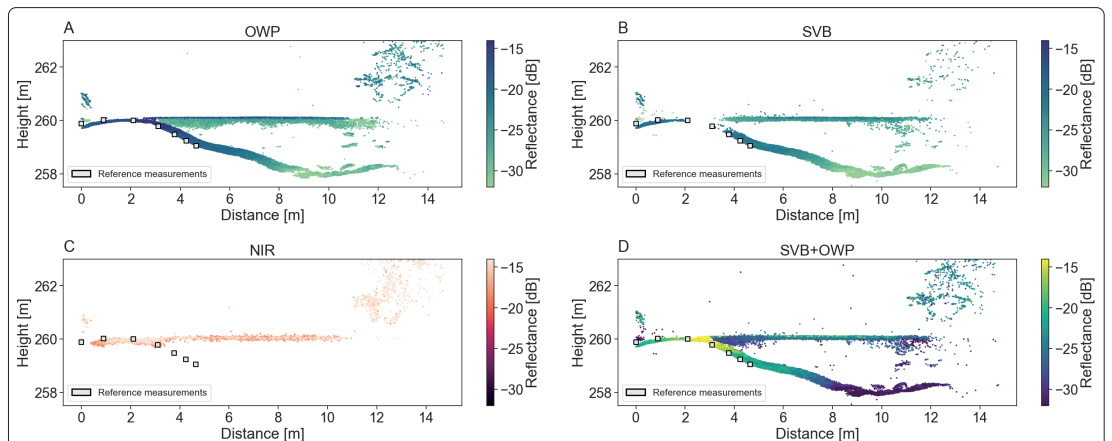
geometry of the measurements. While the above-water photogrammetric targets were measured using an accurate mini reflector, the profiles and below-water targets were measured with a pole and a 360° prism. In addition to the inherent deviations of 360° prisms (about 3 mm), the long pole 1.8 m introduces an additional uncertainty because pole levelling proved difficult in the strong currents of the Pielach River. To increase accuracy, we repeatedly measured the underwater targets and averaged the measurements. To counteract the effect of the submersion of the pole tip in the river sediment, a special pole adapter was used for bathymetric measurements. The adapter is a disk with a diameter of 6 cm instead of a classic tip at the bottom of the prism pole. However, the effect

of the pole tip submersion is presumably still larger than the uncertainty introduced by the slight inclination of the prism pole and the prism deviations. Our assessment of the uncertainty of the measurement shows that, e.g., the bathymetric profiles exhibit a global uncertainty of less than 18 mm for the data in ETRS89/UTM 33N and a local uncertainty of only 13 mm towards our local realisation of the geodetic network.

The georeferencing for the LiDAR data is established using eight sloped planes (saddle roofs) set up in the study area (Fig. 1 and Fig. 3). Similarly to the photogrammetric targets used for georeferencing the photogrammetric bundle block adjustment, the eight planes are used to transform the strip-adjusted LiDAR data into our local coordinate system realisation. Our investigation shows that a shift of  $(-2.2, 1.9, 3.6)^T$  cm was necessary for the miniVUX-3UAV data and of  $(-1.2, 1.4, -11.7)^T$  cm for the VQ-840-GL data to transform the data into the coordinate system defined by the terrestrial network. With the exception of the rather high vertical correction necessary for the VQ-840-GL dataset, these values lie exactly in the expected uncertainty range of the GNSS-RTK georeferenced airborne LiDAR datasets.

### 3 Methods

In this Section, we briefly describe the data processing methods employed. We first focus on a description of the general photogrammetric and LiDAR workflows used to convert the raw laser and image data to georeferenced and refraction-corrected 3D point clouds (Sections 3.1 and 3.2). Later, we also describe details of the three conducted experiments, namely deriving bathymetry from stereo image sequences (Section 3.3), mapping the water surface with oblique stereo images (Section 3.4), and reconstructing both topography and bathymetry with NeRFs (Section 3.5).



**Fig. 4:** Cross-section of a deeper section of the Pielach River. The different panels show the four types of point cloud data available in this study, near-infrared LiDAR (NIR) together with the green LiDAR processed using online waveform processing (OWP) and the surface-volume-bottom algorithm (SVB)

### 3.1 LiDAR workflow

The full waveforms of the topo-bathymetric LiDAR sensor introduced in Section 2.2 were processed by two different algorithms. While Online Waveform Processing (OWP) (Pfennigbauer et al. 2014) uses a reduced set of the recorded waveforms around signal peaks to extract points online during flight, the SVB algorithm (Schwarz et al. 2019) is applied in post-processing and aims to extract further data through the application of exponential decomposition (Schwarz et al. 2017) associated with the water column backscattering. This well-known physical foundation for the interaction of laser pulses with the water column improves the water surface detection and furthermore is able to capture deeper points than standard methods. The new points in this method can then furthermore be extended by the points produced during standard processing (OWP), enhancing the point cloud in turbid or deep waters. In contrast to that, only OWP was used to process the waveform data of the topographic data (miniVUX-3UAV).

Georeferencing and strip adjustment were performed using the method of Glira et al. (2016) implemented in the scientific laser scanning software OPALS (Pfeifer et al. 2014) for the topo-bathymetric LiDAR dataset and the holistic approach of Pöpll et al. (2024) integrated in RiPROCESS for the topographic LiDAR dataset. In both cases, the saddle roof reference surfaces (cf. Fig. 1) were used for precise georeferencing of the point cloud with respect to the ETRS89 system defined by the terrestrial reference network.

After full-waveform analysis and strip adjustment, refraction correction was performed for all underwater points of the resulting georeferenced 3D point cloud. The steps include (i) the derivation of a gridded water surface model, (ii) the calculation of beam vectors for each laser point (based on the trajectory) and (iii) the final run-time and refraction correction (Mandlbürger et al. 2015) implemented in the module Snellius of the OPALS software. The water surface model was obtained from the water surface reflections of the NIR laser data. Although the coverage with water surface points was not continuous, any gaps could be filled by interpolation.

### 3.2 Photogrammetric workflow

The block of nadir and oblique images shown in Fig. 1 was processed using a standard Structure-from-Motion (SfM) workflow. The procedure consists of finding image features in individual images, matching the features to obtain 3D tie points, and establishing the relative orientation for all overlapping image pairs. Georeferencing of the entire image block is done in a final step by first semi-automatically measuring the GCPs in the images and then performing the bundle block adjustment

(Förstner and Wrobel 2016; Kraus 2007) including on-the-job camera calibration based on all available data (tie points, GCPs). This provides the interior orientation of the employed DJI Zenmuse P1 camera (principal point, focal length, lens distortion parameters) and the exterior orientations of all captured images (XYZ coordinates of the projection centres, Omega/Phi/Kappa rotations angles). This is the basis for follow-up processing steps like creating a 3D point cloud via Dense Image Matching, as well as orthophoto and 3D mesh generation. The described procedure was carried out for both the nadir/oblique Zenmuse P1 images and also for the Sony  $\alpha 6000$  images of the miniVUX-3UAV LiDAR survey.

As long as underwater features are visible in the images, a dense reconstruction of the topography of the river bottom is possible by first applying standard DIM (Wenzel et al. 2013; Hirschmüller 2008). The raw 3D DIM point cloud is too shallow if ray bending at the water surface is not considered. Refraction correction is achieved by connecting the raw DIM points with the projection centre of the images, from which the point was originally matched. The connecting lines constitute the image rays, which can be intersected with the water surface model, yielding the 3D position where the image ray enters the water column. Based on Snell's law of refraction, the direction of the underwater ray can be calculated (Bryant 1958). This procedure is repeated for each image ray of a raw 3D point, and then forward intersection is performed for all underwater rays, producing the refraction-corrected 3D position (Mandlbürger 2019). The described correction procedure is implemented in the OPALS software (Pfeifer et al. 2014). A comparable approach is described in Mulsow (2018).

### 3.3 Bathymetry from image sequences

As described in Section 1, the aim of this experiment is to integrate multiple images of a sequence showing the same scene and to mitigate the effect of the dynamic, wavy water surface. During the campaign, several image sequences were acquired from the hovering UAV. In order to obtain the maximum resolution, the camera was operated in frame image mode rather than video mode. The DJI Zenmuse P1 camera used can capture image sequences in full resolution with a frame rate of 0.7 Hz. For each spot, around 100 images were taken with activated motion compensation via the gimbal. However, the images were slightly moving by up to 30 pixels in every direction within a sequence.

The first step in the processing pipeline is therefore aligning or co-registering all images to a single reference frame in the middle of the sequence based on stable features on the river banks. This is necessary because of the (minor) instability of

the hovering UAV during image sequence acquisition. For that, stable tie points along the river banks were defined in the reference image. In order to suppress perspective and projective effects on co-registration, only points close to the water level were chosen. The number of tie points ranges from 20 to 40 points while a minimum of four points is required. Tie points were tracked and measured via Least Squares Matching (LSM) in all images of the sequence with sub-pixel precision. All images of a sequence were then aligned with the reference image by applying the best-fitting projective transformation. In our case, the inner accuracy ranges from 0.05 to 0.2 pixel.

All co-registered images of a sequence were stacked and handed over for final processing. The variation of grey values in each pixel position of the sequence is statistically analysed to find the representative grey value, which is not affected by the water surface dynamics. So far, empirical evidence has shown that median filtering is the most effective method to achieve optimal contrast and robustness in the resulting image (Mulsow et al. 2024). Thus, the standard strategy is to apply a median filter to the stacked grey values of each pixel position of the sequence. Values of 255 (overexposure) are excluded from the median filtering. For pixels showing mainly overexposed values, the algorithm has to be adapted. In that case, for example, the Minstore value (smallest pixel value) can be taken for the corrected image. If only fully saturated values of 255 were captured for one pixel position, the corrected value was interpolated from neighbouring pixels. The procedure is then repeated for all images of all individual sequences. Pairs of integrated stereo-images can then be used as basis for 3D bathymetry reconstruction using standard multi-media photogrammetry pipelines.

### 3.4 Water surface from oblique stereo images

The main processing direction is a standard SfM workflow and is performed pairwise with Agisoft Metashape. The steps are: (i) feature detection on each image and feature matching between both images, (ii) alignment of the cameras, (iii) georeferencing using the GCPs and finally (iv) dense matching. Highly textured and sharp features are required for efficient feature detection and matching, and since (i) water does not fit these criteria (due to specular reflection at the water surface), and (ii) our previous studies with lab data have shown the difficulty of using such a method on water bodies, we are also using deep learning-based solutions. In particular, we are interested in feature detection and feature matching, for example using Superpoint (DeTone et al. 2018) and LightGlue (Lindenberger et al. 2023), which have been shown to provide much higher quantities of valid match-

es for various datasets with low texture such as indoor environments. For this, we use the Hierarchical Localization toolbox hloc (Sarlin et al. 2019), which implements both. A benefit of this toolbox is that it also provides formats that are compatible with Metashape via Colmap, which means that the tie points and the 3D model resulting from Colmap can be imported into Metashape. Further analysis and processing can then be performed, such as outlier removal, scaling or georeferencing of the model and camera alignment optimisation.

### 3.5 Topography and bathymetry from NeRFs

Neural Radiance Fields (NeRFs) were first introduced in March 2020 (Mildenhall et al. 2021). Since then, they gained widespread attention and adoption. NeRFs enable the synthesis of novel scene views by optimising a continuous volumetric scene function using a given set of images. A NeRF represents a scene through a fully connected deep neural network based on 5D coordinates (spatial location and a viewing direction) as input, and outputs the volume density and view-dependent emitted radiance at that point.

The original NeRF algorithm is agnostic with respect to media changes, but different extensions considering ray refraction have been proposed in the recent past. Our own concept of dealing with underwater ray refraction for NeRF-based processing based on UAV images (i.e., through-water close-range bathymetry) is to train separate NeRFs for above and below the water surface assuming a simple, planar water surface as a starting point. Concepts for further adaptations include the consideration of slope variations on top of the simple water surface to compensate for wave effects or even to consider continuous refraction or at least discrete media changes along the image ray.

For the Pielach image dataset, we generated the NeRF using the Nerfstudio framework, which provides a simple API to streamline the end-to-end process of creating, training and testing NeRFs. The camera orientations form the basis for the creation of the NeRF. In Nerfstudio, we used the Nerfacto model, specifically the Nerfacto-Huge variant. This method required approximately 24 GB of GPU VRAM, which was available on our NVIDIA A40 graphics card.

## 4 Results and discussions

In this Section, we present and briefly discuss the results of the data processing outlined in Section 3. We first present the topo-bathymetric LiDAR data (Section 4.1) that constitute the reference for the benchmark dataset. Thereafter, we present the results of the classical and advanced techniques for mapping bathymetry and water surfaces in Sections 4.2 to 4.5.



### 4.1 LiDAR data

Fig. 5A shows a hill shading of the final topo-bathymetric DTM superimposed with a colour-coded depth map for a subset in the northwestern region of the study area. The depth map confirms the river structure as riffle-pool type with predominantly shallow water depths of less than 1 m and occasional deeper pools of up to 2.5 m. This is also quantitatively demonstrated in the water depth histogram shown in Fig. 5B.

To evaluate the topographic and topo-bathymetric laser scanning data, each LiDAR point cloud is compared to the different types of terrestrially measured targets. Here both the absolute vertical distance to the nearest neighbour of the references was calculated, as well as a normal plane distance based on the ten closest neighbours of the reference. For the references acquired shown in Fig. 3, both types of LiDAR data can be compared to checkerboard GCP targets and saddle roofs. For the NIR point cloud, the deviations between the LiDAR points and the GCP are mainly smaller than 2 cm for the vertical and normal distances. The discrepancies for saddle roofs are comparable with occasionally larger offsets due to rounding effects on the ridge line of both planes (Fig. 6).

For the green LiDAR point cloud, we evaluated the above- and below-water targets (GCPs, saddle roofs, submerged checkerboard targets, and riverbed points) for the three different processing methods (OWP, SVB and a combination of OWP and SVB). The results are shown in Fig. 7. There, a slightly lower accuracy can be observed, which might result from the larger laser footprint size of the bathymetric sensor. Larger deviations are observed for the SVB on the land targets (GCPs and saddle roofs), because the algorithm is tailored for bathymetric waveforms. Therefore, SVB land points can be considered outliers and thus do not reflect the representative measurement accuracy of the topo-bathymetric system. For all underwater targets, the accuracy is around  $\pm 3$  cm as can be seen in Fig. 7C.

Lastly, we assessed the underwater accuracy in more detail by comparing the transects measured with the total station and the underwater LiDAR point cloud. For all three methods, a similar absolute vertical distance can be seen in Fig. 8A. For the normal plane distance, the combined OWP and SVB + OWP data show similar distributions, only SVB shows slightly wider distributions, translating to slightly higher uncertainties (Fig. 8B).

We can conclude that, with respect to the residual deviations between the underwater LiDAR points and the terrestrially measured riverbed ground truth, the bathymetric LiDAR dataset adheres to the Exclusive Order, the most rigorous standard issued by the International Hydrographic

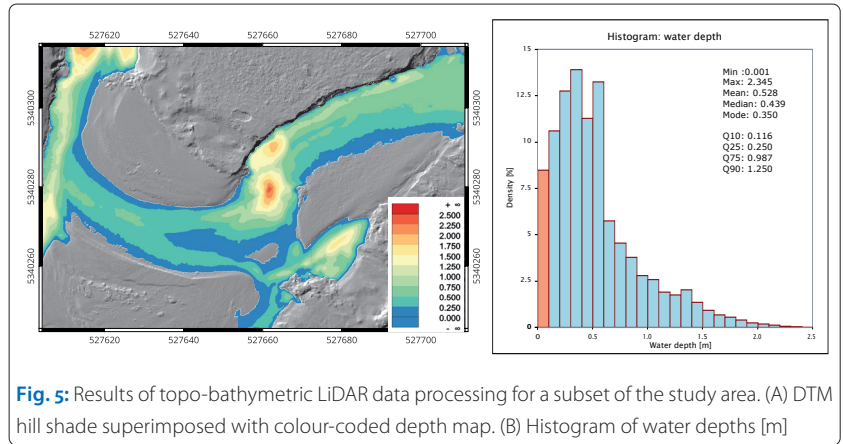


Fig. 5: Results of topo-bathymetric LiDAR data processing for a subset of the study area. (A) DTM hill shade superimposed with colour-coded depth map. (B) Histogram of water depths [m]

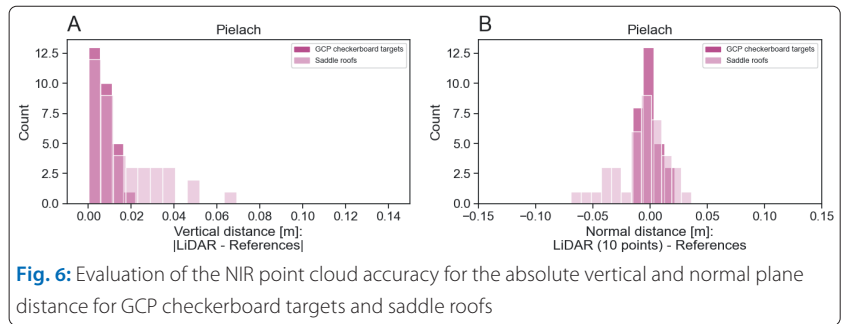


Fig. 6: Evaluation of the NIR point cloud accuracy for the absolute vertical and normal plane distance for GCP checkerboard targets and saddle roofs

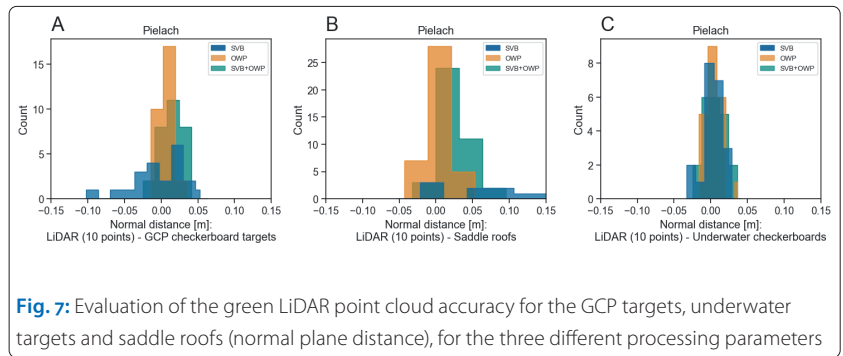


Fig. 7: Evaluation of the green LiDAR point cloud accuracy for the GCP targets, underwater targets and saddle roofs (normal plane distance), for the three different processing parameters

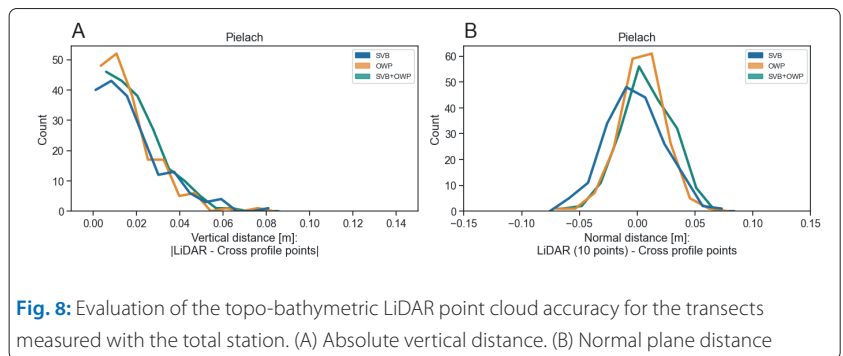
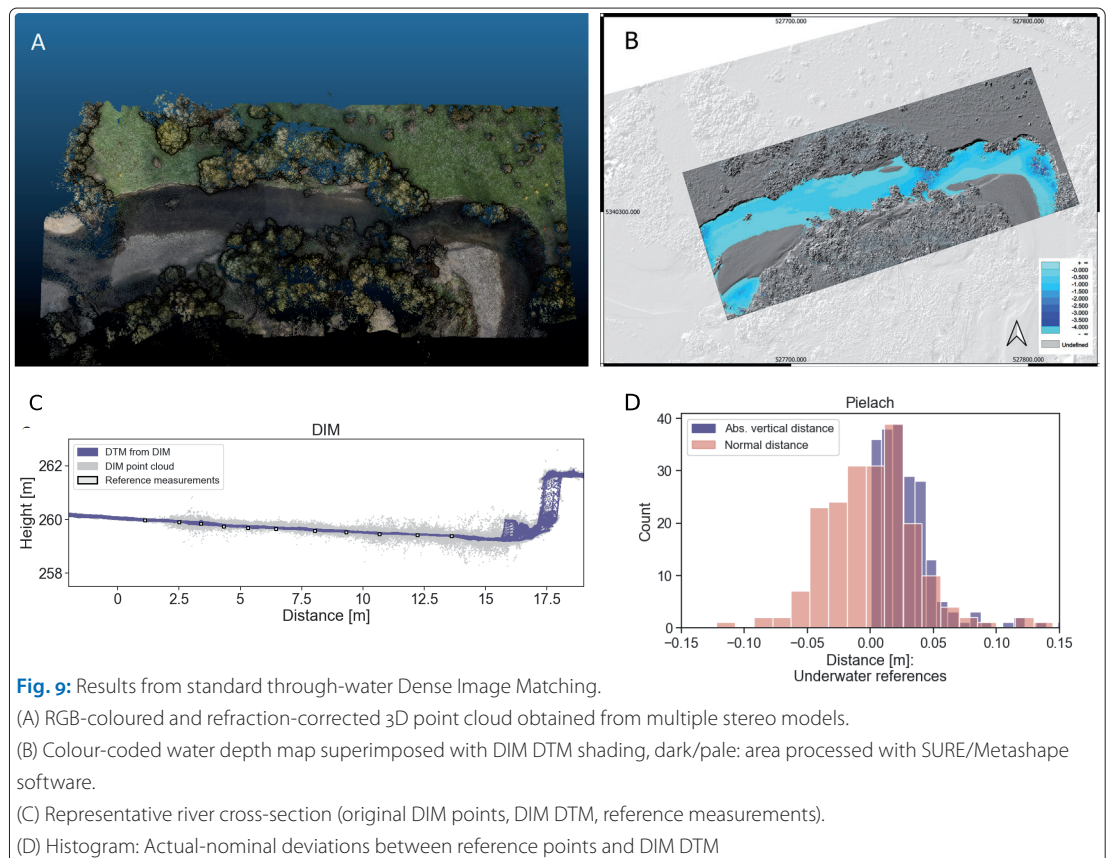


Fig. 8: Evaluation of the topo-bathymetric LiDAR point cloud accuracy for the transects measured with the total station. (A) Absolute vertical distance. (B) Normal plane distance

Organization (IHO 2008). The deviation between the riverbed reference points and the corresponding bathymetric LiDAR points is  $0.5 \text{ cm} \pm 2 \text{ cm}$ .

### 4.2 Bathymetry from standard through-water DIM

The results of the standard through-water photo bathymetry pipeline detailed in Section 3.2 are illustrated in Fig. 9. For a relatively shallow section



of the Pielach River, Fig. 9A and B show the 3D RGB point cloud corrected for refraction obtained from DIM and the hill shading of a DTM derived from DIM points by median filtering. Superimposed on the shading, Fig. 9B displays a colour-coded water depth map, which reveals depths of 0 m to 2 m. It can be clearly seen that the DIM-derived riverbed is smooth and consistent up to a water depth of up to 1.5 m, but becomes more noisy in deeper areas. The latter is visible in the deep pool in the north-west part of the scene. Here, image blurring and the associated loss of texture limit the achievable penetration depth of photo bathymetry.

For a representative transect, the DIM point cloud corrected for refraction, the final underwater DTM, and the terrestrially measured reference points are plotted in Fig. 9C. The point cloud (grey points) shows substantial spread underwater because of the shortcomings when not considering the dynamic, wavy water surface. However, for the shallow cross-section shown (max depth: approximately 1 m), the averaged DTM (violet) closely matches the underwater reference points (black/light grey) measured with the total station. The histogram shown in Fig. 9D confirms the good agreement between the underwater DTM derived from the UAV images and the reference points with vertical deviations mainly less than 5 cm. For all underwater reference points, the deviations (normal distances) with respect to the DIM-derived DTM measure  $0 \text{ cm} \pm 4 \text{ cm}$ . In other

words, the underwater DTM is unbiased with an RMSE of 4 cm.

### 4.3 Bathymetry from image sequences

For the Pielach dataset, the method described in Section 3.3 worked well, and the corrected image corresponds to an image that would have been taken through a calm flat water surface. Fig. 10 shows the results for the image sequence of a single spot. Fig. 10A displays the reference image, that is, the raw image taken from the middle of the entire sequence. All other images are co-registered to the reference image based on tie points in the dry or very shallow zone, which are tracked in all images of the sequence. The reference image and an arbitrary second image from the sequence are displayed in Fig. 10B together with the displacement vectors, which transform the moving image (cyan) to the reference image (red). After applying the transformation, the residual deviations in x/y are small with an RMSE of 0.11/0.10 pixel.

The final median filtered image of the sequence is plotted in Fig. 10C. Compared to the original (reference) image, the filtered image appears much smoother, clearer and sharper in the river area. The effectiveness of the procedure can best be judged from the small inlet images showing the submerged checkerboard targets. In the original (reference) image, the targets are blurred, and they regained their actual sharp black-white edges and sharp geometric features in the filtered image. In

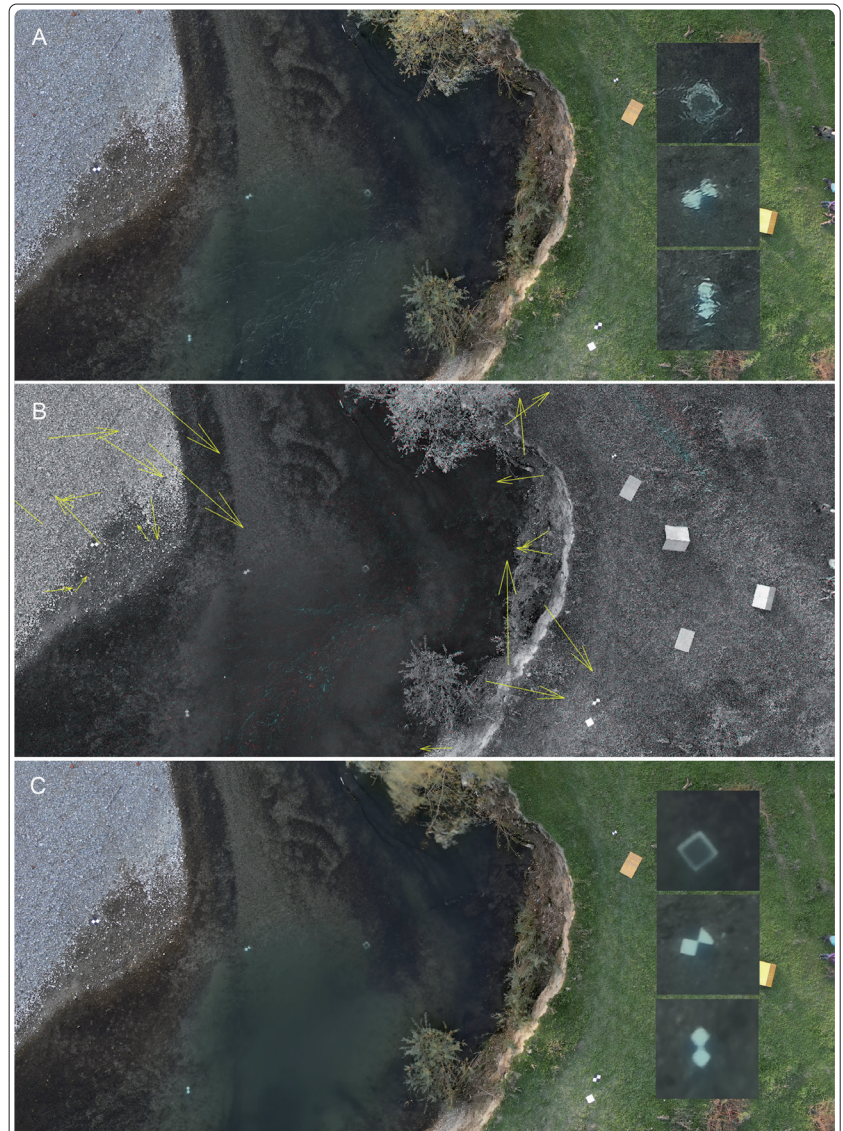
future work, we will use these images for improved underwater stereo matching.

#### 4.4 Water surface from oblique stereo images

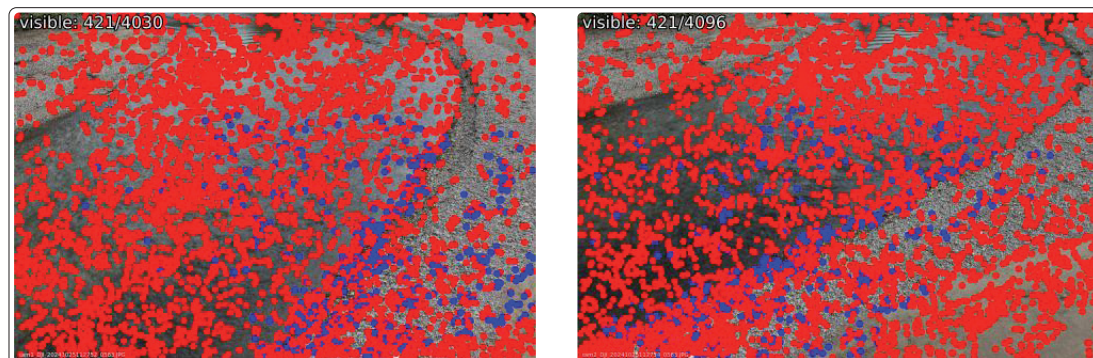
Of the 2,165 pairs of images taken from different viewpoints, only 973 could be aligned with Agisoft Metashape and 1,487 with hloc. In addition, no tie point was detected on the water surface with Agisoft Metashape while hloc had for most pairs around 80 tie points on the water surface, which already shows a clear difference of performance between these tools. As an example, Fig. 11 shows the results of the feature matching using hloc for pair 583. In this case, we can see 71 tie points that were found on the water surface. To assess the accuracy of the water surface tie points detected by deep learning, we used the digital water surface model as a reference. The following are the results presented for pair 583, but the same observations were made for other examples. Since the GCPs are non-coded targets, the comparison of the tie points with the DEM is not a step that is automatised in the processing workflow, hence we cannot provide global results.

After importing the tie point cloud from hloc in Agisoft Metashape and georeferencing it into our coordinate system, the orientation of the images is estimated via bundle block adjustment. In this case, the re-projection error was around three pixels. In order to obtain a better accuracy, we have selected three images in addition to our selected pair to add redundancy to the bundle block adjustment. Since Agisoft Metashape is not able to find many matches, it is critical to maximise the number of GCPs on all images. With this approach, we were able to obtain an orientation for our two images of interest with a re-projection error around 0.4 pixels.

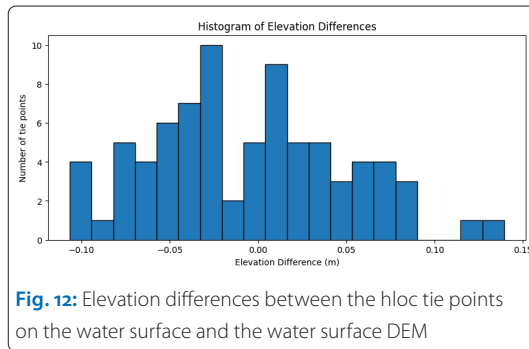
After applying the previously estimated camera orientation and georeferencing the model, the tie points are compared with the DEM of the water surface. The mean elevation difference is  $-6$  mm, the median is  $-8$  mm and the standard deviation is  $53$  mm. The histogram of these differences is



**Fig. 10:** Results obtained from image sequence processing. (A) Example image of a sequence (approximately 100 images) captured from one position. (B) Colour composite (overlay) of reference (red) and moving image (cyan). Arrows indicate residuals between reference and fitted tie points after co-registration (RMSE 0.11/0.10 pixel in x/y). (C) Corrected image with the geometry of an image which would have been taken through a calm flat water surface. Small image inlets illustrate the de-blurring effect at the checkerboard targets in detail



**Fig. 11:** Results from the feature detection and matching (by Superpoint and LightGlue). Each point is a detected feature and the blue points are the matches between both images



**Fig. 12:** Elevation differences between the hloc tie points on the water surface and the water surface DEM

**Acknowledgments**

The research presented was carried out within the transnational WEAVE projects PhotoBathyWave and BathyNeRF funded by the Austrian Science Fund (FWF) and the German Research Foundation (DFG). PhotobathyWave: I 5935-N (FWF), 496002628 (DFG); BathyNeRF: PIN1353223 (FWF), JU 2847/2-1(DFG).

presented in Fig. 12. Most tie points are within a distance of 10 cm from the water surface, below or above. They were estimated from images of a dynamic surface, which partly explains why the values are dispersed around the mean level of the water surface.

**4.5 Topography and bathymetry from NeRFs**

The results obtained from the Neural Radiance Field trained with the nadir and oblique images introduced in Section 2.2 are displayed in Fig. 13. The right side (B) shows a synthetic view of the Pielach dataset rendered from the NeRF inside the Nerfstudio viewer. The current implementation of the Nerfacto-Huge model assumes a straight image rays when training and rendering the NeRF. This means that beam refraction at the water-air interface is not considered so far, neither for training nor for view synthesis. This leads to a sub-optimal representation of the riverbed topography. This, in turn, affects the resulting 3D point cloud exported from Nerfstudio. The underwater points are sparse and noisy, and no clear river bottom can be mapped. In future work, we will first train the NeRF model considering simple and then more complex water surfaces as outlined in Section 3.5.

**5 Conclusions**

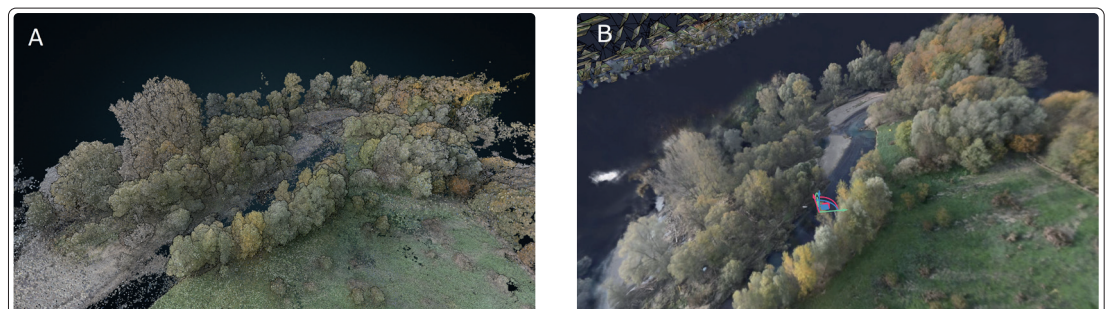
In this article, we introduced a benchmark dataset for mapping a riffle-pool-type pre-alpine gravel bed river with optical bathymetry. The Pielach River has been repeatedly captured for more than a decade with images and laser scans from crewed or uncrewed aerial platforms. Following a devas-

tating 300-year flood event in September 2024 (Bloeschl 2024), we surveyed a 750 m long section of the river with multicopter drones on October 24 to 25, 2024.

We first established a precise geodetic network based on GNSS and total station measurements, measured ground control points and saddle-roof shaped reference surfaces on land for precise georeferencing of the acquired airborne data. Our reference measurements also included a total station survey of 13 photogrammetric underwater targets and 19 river cross-sections.

The airborne survey consisted of a flight block with nadir and oblique images from a flying altitude of 80 m AGL. In addition, we also conducted experiments with a UAV hovering over certain waypoints taking sequences of 100 images before moving to the next position. In a separate experiment, we employed two UAVs and took synchronous oblique images of the water surface. The prior experiment was intended to mitigate the effects of the undulating water surface for precise bathymetry estimation with stereo images, and the latter experiment aimed to test the possibility of capturing the 3D shape of the instantaneous water surface as a prerequisite step for later integrated estimation of both water surface and bottom from synchronised UAV images. For all image acquisitions, we employed DJI M350 RTK multicopter UAVs equipped with DJI Zenmuse P1 RGB cameras. With this setup, we obtained a ground sampling distance of 1 cm at a flying altitude of 80 m.

The airborne data acquisition was complemented by topographic and topo-bathymetric flight missions. The prior served as a basis for capturing the river surroundings, including the alluvial forest enclosed by the mapped meander of the Pielach River, and for obtaining a precise model of the water surface needed for refraction correction. However, the main survey was the topo-bathymetric UAV flight with the RIEGL VQ-840-GL sensor. Due to the clear water, we were able to fully penetrate the entire river, including approximately 3 m deep pools. The final georeferenced and refraction-corrected 3D LiDAR point cloud provides a trustworthy areal reference for various photo bathymetry



**Fig. 13:** Results from NeRF processing. (A) RGB-coloured 3D point cloud exported from Nerfstudio. (B) Synthetic view rendered from the trained NeRF

applications. Compared to the ground truth obtained from the total station measurements, the residual vertical errors of the bathymetric point cloud are less than 2 cm.

Next to the standard data processing, we also introduced novel and innovative approaches for mapping bathymetry and undulating water sur-

faces in 3D. This was made possible by applying image sequences instead of single image frames and by synchronous acquisition of oblique stereo images. As further novelty, we introduced our first ideas for using Neural Radiance Fields for bathymetry estimation. In future work, we will extend the presented research directions. //

## Dataset

The dataset described in this article is available as open research data (DOI: 10.48436/taz19-r6618).

## References

- Bloeschl, Günter (2024): September 2024 flooding in Central Europe: The Austrian experience. EGU Blogs, GeoLog, <https://blogs.egu.eu/geolog/2024/09/26/september-2024-flooding-in-central-europe-the-austrian-experience>
- Bryant, F. (1958): Snell's law of refraction. *Physics Bulletin*, DOI: 10.1088/0031-9112/9/12/004
- DeTone, Daniel; Tomasz Malisiewicz; Andrew Rabinovich (2018): Superpoint: Self-supervised interest point detection and description. *Computer Vision and Pattern Recognition*, DOI: 10.48550/arXiv:1712.07629
- Förstner, Werner; Bernhard P. Wrobel (2016): *Photogrammetric Computer Vision: Statistics, Geometry, Orientation and Reconstruction*. Springer International Publishing, DOI: 10.1007/978-3-319-11550-4
- Gkiatas, Georgios T.; Panagiotis D. Koutalakis; Ioannis K. Kasapidis; Vasilis Iakovoglou; Georios N. Zaimis (2022): Monitoring and quantifying the fluvio-geomorphological changes in a torrent channel using images from unmanned aerial vehicles. *Hydrology*, DOI: 10.3390/hydrology9100184
- Gira, Philipp; Norbert Pfeifer; Gottfried Mandlbürger (2016): Rigorous Strip Adjustment of UAV-based Laserscanning Data Including Time-Dependent Correction of Trajectory Errors. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, DOI: 10.14358/PERS.82.12.945
- Gueguen, Laure-Anne; Gottfried Mandlbürger (2024): Lab experiment for photo bathymetry. *Hydrographische Nachrichten*, DOI: 10.23784/HN129-06
- Guenther, Gary C.; A. Grant Cunningham; Paul E. LaRoque; David J. Reid (2000): Meeting the accuracy challenge in airborne lidar bathymetry. *Proceedings of the 20th EARSeL Symposium: Workshop on Lidar Remote Sensing of Land and Sea*, Dresden
- Hauer, Christoph; Gottfried Mandlbürger; Helmut Habersack (2009): Hydraulically related hydro-morphological units: description based on a new conceptual mesohabitat evaluation model (mem) using lidar data as geometric input. *River Research and Applications*, DOI: 10.1002/rra.1083
- Hirschmüller, Heiko (2008): Stereo Processing by Semiglobal Matching and Mutual Information. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, DOI: 10.1109/TPAMI.2007.1166
- IHO (2008): S-44, Standards for Hydrographic Surveys. Standard 5th ed., International Hydrographic Organization, Monaco
- Kramer Stajnko, Janja; Renata Jecl; Matjaž Nekrep Perc (2023): Advances in monitoring and understanding the dynamics of suspended-sediment transport in the river drava, slovenia: An analysis more than a decade-long. *Applied Sciences*, DOI: 10.3390/app13159036
- Kraus, Karl (2007). *Photogrammetry – Geometry from Images and Laser Scans*. De Gruyter, DOI: 10.1515/9783110892871
- Lindenberger, Philipp; Paul-Edouard Sarlin; Marc Pollefeys (2023): Lightglue: Local feature matching at light speed. *Computer Vision and Pattern Recognition*, DOI: 10.48550/arXiv.2306.13643
- Lurton, Xavier (2002): *An Introduction to Underwater Acoustics: Principles and Applications*. Geophysical Sciences Series. Springer
- Maas, Hans-Gerd (2015): On the Accuracy Potential in Underwater/Multimedia Photogrammetry. *Sensors*, DOI: 10.3390/s150818140
- Mandlbürger, Gottfried (2019): Through-water dense image matching for shallow water bathymetry. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, DOI: 10.14358/pers.85.6.445
- Mandlbürger, Gottfried; Christoph Hauer; Martin Wieser; Norbert Pfeifer (2015): Topo-bathymetric LiDAR for monitoring river morphodynamics and instream habitats – A case study at the Pielach River. *Remote Sensing*, DOI: 10.3390/rs70506160
- Melcher, Andreas; Stefan Schmutz (2010): The importance of structural features for spawning habitat of nase *Chondrostoma nasus* (L.) and barbel *Barbus barbus* (L.) in a pre-alpine river. *River Systems*, DOI: 10.1127/1868-5749/2010/019-0033
- Mildenhall, Ben; Pratul P. Srinivasan; Matthew Tancik; Jonathan T. Barron; Ravi Ramamoorthi; Ren Ng (2021): NeRF: Representing scenes as neural radiance fields for view synthesis. *Computer Vision and Pattern Recognition*, DOI: 10.48550/arXiv.2003.08934
- Mulsow, Christian (2010): A flexible multi-media bundle approach. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*
- Mulsow, Christian (2018): Digital elevation models of underwater structures from UAV imagery. *Hydrographische Nachrichten*, DOI: 10.23784/HN110-02
- Mulsow, Christian; Hannes Sardemann; Laure-Anne Gueguen; Gottfried Mandlbürger; Hans-Gerd Maas (2024): Concepts for compensation of wave effects when measuring through water surfaces in photogrammetric applications. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, DOI: 10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-2024-289-2024

- Naura, Marc; Mike J. Clark; David A. Sear et al. (2016): Mapping habitat indices across river networks using spatial statistical modelling of river habitat survey data. *Ecological Indicators*, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.01.019>
- Pfeifer, Norbert; Gottfried Mandlbürger; Johannes Otepka; Wilfried Karel (2014): OPALS – A framework for Airborne Laser Scanning data analysis. *Computers, Environment and Urban Systems*, DOI: [10.1016/j.compenvurbsys.2013.11.002](https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2013.11.002)
- Pfennigbauer, Martin; Clifford Wolf; Josef Weinkopf; Andres Ullrich (2014): Online waveform processing for demanding target situations. *SPIE Digital Library, Online Proceedings*, DOI: [10.1117/12.2052994](https://doi.org/10.1117/12.2052994)
- Philpot, William (Ed.) (2019). *Airborne Laser Hydrography II*. Cornell University Library, <https://hdl.handle.net/1813/58722>
- Pöpl, Florian; Andreas Ullrich; Gottfried Mandlbürger; Norbert Pfeifer (2024): A flexible trajectory estimation methodology for kinematic laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, DOI: [10.1016/j.isprsjprs.2024.06.014](https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2024.06.014)
- Rhomberg-Kauert, Jan; Lucas Dammert; Michael Groemer; Martin Pfennigbauer; Gottfried Mandlbürger (2024): Macrophyte detection with bathymetric LiDAR – Applications of high-dimensional data analysis for submerged ecosystems. *The International Hydrographic Review*, DOI: [10.58440/ihr-30-2-a16](https://doi.org/10.58440/ihr-30-2-a16)
- Sardemann, Hannes; Christian Mulsow; Laure-Anne Gueguen; Gottfried Mandlbürger; Hans-Gerd Maas (2024): Multimedia photogrammetry with non-planar water surfaces – accuracy analysis on simulation basis. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, DOI: [10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-2024-363-2024](https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-2024-363-2024)
- Sarlin, Paul-Edouard; Cesar Cadena; Roland Siegwart; Marcin Dymczyk (2019): From coarse to fine: Robust hierarchical localization at large scale. *Computer Vision and Pattern Recognition*, DOI: [10.48550/arXiv.1812.03506](https://doi.org/10.48550/arXiv.1812.03506)
- Schwarz, Roland; Gottfried Mandlbürger; Martin Pfennigbauer; Norbert Pfeifer (2019): Design and evaluation of a full-wave surface and bottom-detection algorithm for LiDAR bathymetry of very shallow waters. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, DOI: [10.1016/j.isprsjprs.2019.02.002](https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.02.002)
- Schwarz, Roland; Norbert Pfeifer; Martin Pfennigbauer; Andreas Ullrich (2017): Exponential Decomposition with Implicit Deconvolution of Lidar Backscatter from the Water Column. *PFG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, DOI: [10.1007/s41064-017-0018-z](https://doi.org/10.1007/s41064-017-0018-z)
- Tsakiris, George (2014): Flood risk assessment: concepts, modelling, applications. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, DOI: [10.5194/nhess-14-1361-2014](https://doi.org/10.5194/nhess-14-1361-2014)
- Wagner, Nike; Gunnar Franke; Klaus Schmieder; Gottfried Mandlbürger (2024): Automatic classification of submerged macrophytes at Lake Constance using laser bathymetry point clouds. *Remote Sensing*, DOI: [10.3390/rs16132257](https://doi.org/10.3390/rs16132257)
- Wenzel, Konrad; Mathias Rothermel; Norbert Haala; Dieter Fritsch (2013): SURE – The ifp Software for Dense Image Matching. In: Dieter Fritsch (Editor): *Photogrammetric Week '13*, Wichmann/VDE Verlag, pages 59–70
- Westfeld, Patrick; Hans-Gerd Maas; Katja Richter; Robert Weiß (2017): Analysis and correction of ocean wave pattern induced systematic coordinate errors in airborne LiDAR bathymetry. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, DOI: [10.1016/j.isprsjprs.2017.04.008](https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.04.008)
- Zigann, Julia Marie; Richard M. Gersberg; Volker Lüderitz (2023): Effects of deadwood on macroinvertebrate assemblages in three sand-type lowland streams. *Ecologies*, DOI: [10.3390/ecologies4010008](https://doi.org/10.3390/ecologies4010008)
- Zitek, Andreas; Stefan Schmutz; Matthias Jungwirth (2008): Assessing the efficiency of connectivity measures with regard to the EU-Water Framework Directive in a Danube-tributary system. *Hydrobiologia*, DOI: [10.1007/s10750-008-9394-0](https://doi.org/10.1007/s10750-008-9394-0)

# 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](mailto: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  $\pm 20^\circ$ .

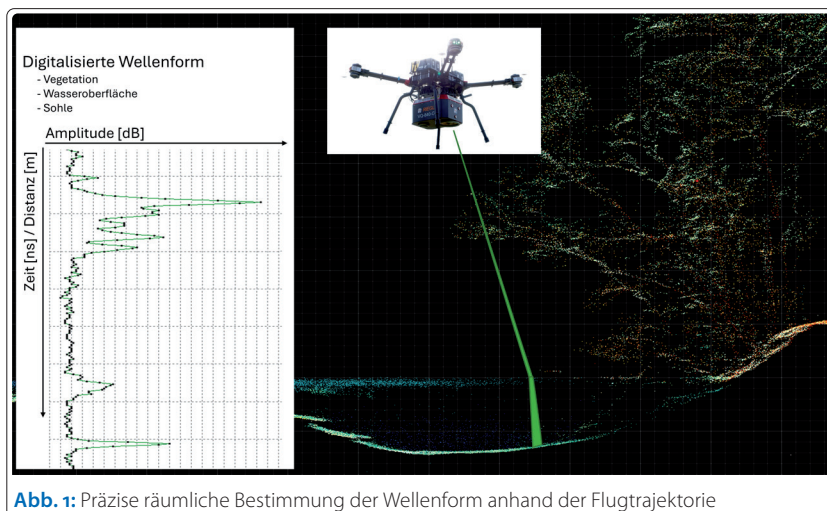
Der vergrößerte Abstand zwischen Sensor und Ziel führt zu einer Verringerung der erreichbaren Auflösung, da der Abtastfleck größer wird und die Punktdichte abnimmt.

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.

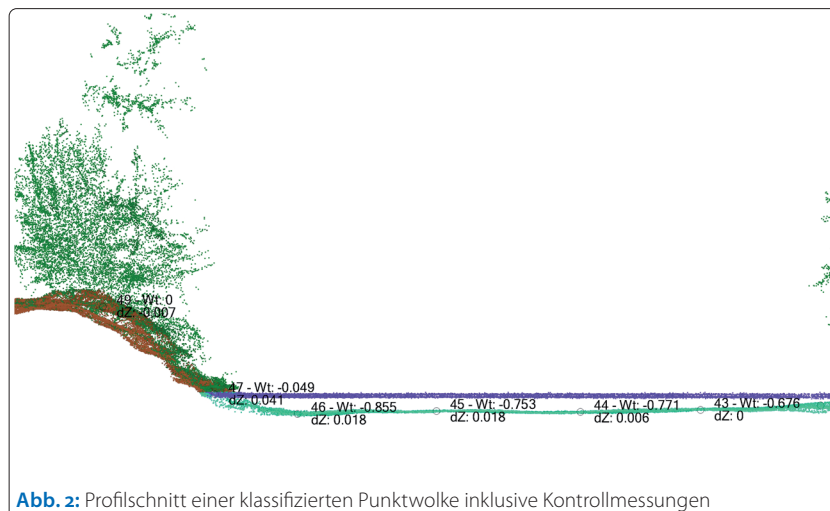
In der Laserbathymetrie werden analog wie im Airborne Laser Scanning die erhaltenen Echos in Form von Punkten durch die synchron aufgezeichnete Flugtrajektorie im Raum referenziert. Die erreichbare Gesamtgenauigkeit ergibt sich aus den Einzelgenauigkeiten der verschiedenen Systemkomponenten. So können 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-Rapperswil	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

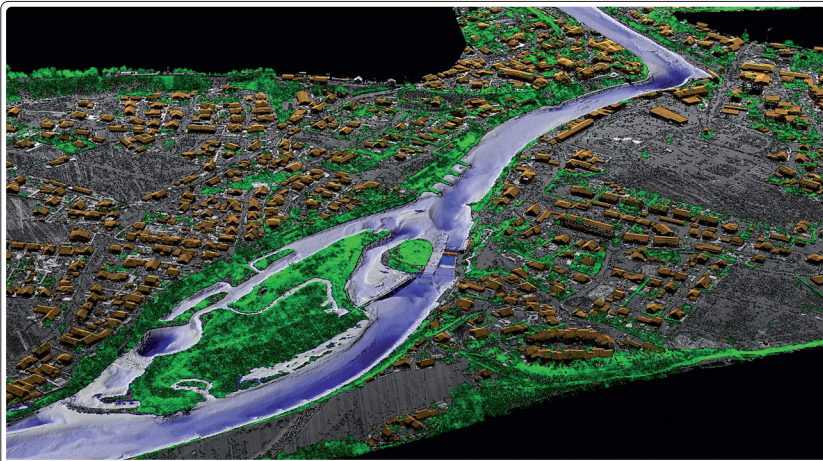


Abb. 3: Klassifizierte Punktwolke einer flächenhaften laserbathymetrischen Erfassung

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

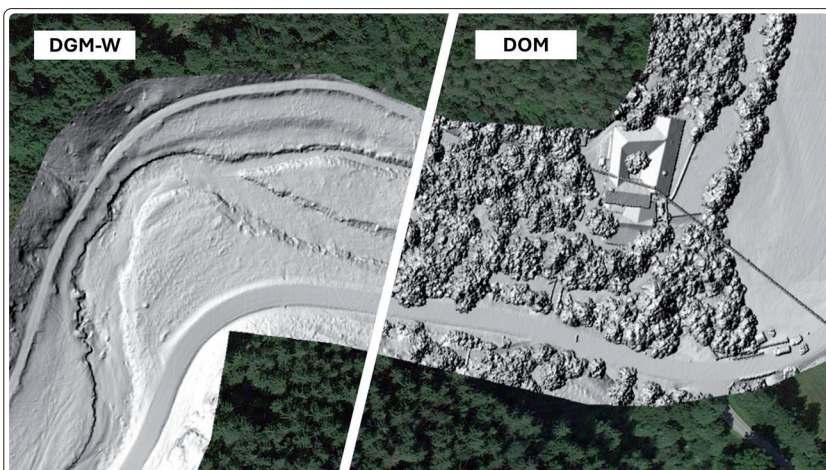


Abb. 4: Rastermodelle: DGM-W versus DOM

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  $\geq 25$  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>

# Wasserspiegelfixierung zur Bestimmung der Wasseroberflächengeometrie

Ein Beitrag von THOMAS BRÜGGEMANN, FELIX LORENZ, ALISA YAKHONTOVA, BENJAMIN EBERHARDT, ROBERT WEISS und THOMAS ARTZ

Um den nichtlinearen Verlauf des Wasserspiegels zwischen den zeitlich kontinuierlich aufgezeichneten Wasserständen an den Pegeln eines Gewässers zu bestimmen, wird eine Wasserspiegelfixierung (WSF) durchgeführt. Diese Publikation beleuchtet die Durchführung mittels präziser 3D-Satellitenortung (GNSS – Global Navigation Satellite System) durch Messschiffe sowie die hydrographische Auswertung der WSF. Der Einsatz von luftgestütztem Laserscanning bietet Ergänzungspotenzial zur klassischen schiffsbasierten WSF, um flächenhafte Messdaten des Wasserspiegels zu erfassen.

Wasserspiegel | Wasseroberfläche | Wasserspiegelfixierung (WSF) | Wasserspiegelhöhe | GNSS | NIR-ALS | bALS | Pegel | SAPOS  
water table | water surface | water surface fixing | water level | GNSS | NIR-ALS | bALS | gauge | SAPOS

A water surface fixing (WSF) is performed to measure the non-linearity of the water surface between continuously recorded water level at gauges of a water body. This publication highlights how the measurements are carried out using precise ship-based 3D satellite positioning (GNSS – Global Navigation Satellite System), and sets out the hydrographic analysis of the results. Airborne laser scanning may supplement traditional ship-based WSF in order to derive a surface model of the water body.

## Autoren

Thomas Brüggemann, Felix Lorenz, Alisa Yakhontova, Benjamin Eberhard, Dr. Robert Weiß und Dr. Thomas Artz arbeiten bei der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) in Koblenz.

[brueggemann@bafg.de](mailto:brueggemann@bafg.de)

## Einleitung und Motivation

Eine Wasserspiegelfixierung (WSF) ist ein Messverfahren, mit dem der nichtlineare Verlauf des Wasserspiegels zwischen den zeitlich kontinuierlich aufgezeichneten Wasserständen an den Pegeln eines Gewässers ermittelt wird. Die Durchführung von Wasserspiegelfixierungen an den Bundeswasserstraßen gehört im Binnenbereich zum Aufgabenportfolio der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV). Die Höhen der Wasseroberflächen bei verschiedenen Abflusssituationen sind für den Betrieb, die Unterhaltung und den Ausbau der Bundeswasserstraßen erforderlich. Zudem nutzen die Ressortforschungseinrichtungen wie die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) und die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) diese Daten, um spezielle und projektbezogene Fragestellungen im Auftrag der WSV zu untersuchen.

Bei einer WSF wird die Höhe der Wasseroberfläche möglichst bei stationären Abflusszuständen gemessen. Bis in die 1990er-Jahre wurde beispielsweise die WSF am Rhein mittels der Pflöckchenmethode durchgeführt. Hierbei wurde unter anderem nach einem Hochwasser die Geschwemmsellinie am Ufer mit Pflöckchen mar-

kiert und anschließend mit Hilfe mehrerer Messtrupps lage- und höhenmäßig eingemessen. Für den Rhein liegen die auf diese Weise erfassten Daten für den Zeitraum 1882 bis 1989 vor und wurden im Rahmen des Projekts »Abladeoptimierung Mittelrhein« teilweise digitalisiert und ausgewertet (Riedel et al. 2017; Vollmer und Schulz 2019). Seit der Mitte der 1990er-Jahre werden die Wasserspiegelfixierungen in der WSV mittels präziser 3D-Satellitenortung (GNSS – Global Navigation Satellite System) mit Messschiffen durchgeführt. Da während einer GNSS-gestützten WSF in der Regel ein instationärer Zustand vorliegt, muss dies bei der späteren hydrologischen Auswertung entsprechend berücksichtigt werden.

Die Ergebnisse der Wasserspiegelfixierungen werden für zahlreiche hydrologische Aufgaben verwendet. Unter anderem für die Festlegung der gewässerkundlichen Bezugswasserstände, wie beispielsweise dem Gleichwertigen Wasserstand (GIW), am Rhein oder an der Elbe dienen die Wasserspiegelfixierungen als wichtige Grundlage (Abel et al. 2014). Außerdem werden Wasserspiegelfixierungen für die Bewertung der Wirkung von Deichrückverlegungen oder zur Validierung von (Abfluss-)Modellen genutzt und um grund-

sätzliche Kenntnisse über die Wechselwirkung von Topografie, Strömung und Geschiebetransport zu sammeln (Faulhaber 2013). Durch den Ausbau des Oberrheins zwischen 1955 und 1977 haben sich die Hochwassersituation und die morphologischen Verhältnisse am frei fließenden Oberrhein unterhalb der Staustufe Iffezheim drastisch geändert, die auch Durchflussveränderungen mit sich ziehen. Im Rahmen der Arbeitsgruppe »Optimierung der hydraulisch-morphologischen Situation zwischen Iffezheim und Mainz« untersuchte die BfG zeitliche Änderungen von Wasserständen auf der Basis von Wasserspiegelfixierungen des Zeitraums 1978 bis 2008. Die Auswertung veranschaulicht den Zusammenhang zwischen Anlandungen an der Sohle und dem Wasserstandsanstieg sowie zwischen der Sohlerosionen und Wasserstandsabsenkungen (Larina 2009).

Eine WSF ist logistisch anspruchsvoll und bedarf einer sorgfältigen Planung der Ressourcen und einer intensiven Abstimmungen mit den Nutzenden. Der Artikel fokussiert primär auf die Vorbereitung des Messsystems, die Messung sowie deren hydrographische Auswertung. Zudem wird in einem Ausblick auf die flächenhafte Erfassung der Wasseroberfläche mittels flugzeuggestützter Messverfahren eingegangen.

## Messvorbereitung

Um das Genauigkeitspotenzial der eingesetzten schiffsgestützten Messtechnik tatsächlich nutzen zu können, müssen alle Sensoren in ein fahrzeugfestes Koordinatensystem (Schiffskoordinatensystem) qualitätsgesichert eingemessen werden (Brüggemann 2014; Brüggemann et al. 2018). Die Genauigkeit der Einmessung sollte so hoch sein, dass der Resteinfluss auf das Ergebnis der WSF nicht mehr als 1 cm beträgt.

Um die WSF mit Hilfe von GNSS durchführen zu können, muss der genaue Abstand der GNSS-Antenne zum tatsächlichen Wasserspiegel bekannt sein. Da sich die Eintauchtiefe des Schiffes aufgrund von unterschiedlichen Beladungszuständen, beispielsweise aufgrund der gebunkerten Treibstoffmenge, Brauch- und Schmutzwassermenge sowie der Personenanzahl an Bord, verändert, wird diese vor jeder WSF erfasst und berücksichtigt. Für die Erfassung werden entweder Eintauchmarken z.B. in Form einer E-Teilung am Rumpf des Schiffes (siehe Abb. 1) oder ein Schauglas (siehe Abb. 2), welches den aktuellen Wasserspiegel im Schiff in Ruhelage anzeigt, verwendet. Das Schauglas besteht aus einem Steigrohr und einer Skala und wird im Schiff in der Schiffsachse möglichst unterhalb der GNSS-Antenne in Höhe der Wasserlinie montiert. Beide Ableseeinrichtungen sollen bezogen auf das Schiffskoordinatensystem eingemessen werden, damit der exakte tatsächliche Abstand zwischen der GNSS-Antenne

und dem zu erfassenden Wasserspiegel in Ruhelage qualitätsgesichert bekannt ist.

Neben dem Beladungszustand ist der Squat – das fahrdynamische vertikale Einsinken eines fahrenden Schiffes aufgrund der relativen Geschwindigkeit durchs Wasser – von großer Bedeutung. Die Größe des Squats ist unter anderem abhängig von der Fahrgeschwindigkeit, der Unterkiehlfreiheit (Abstand zwischen Schiffsboden und Gewässersohle), der Rumpfform des Schiffes und dem Gewässerquerschnitt. Für jedes Messschiff, welches eine WSF durchführt, sollte das Squatverhalten in Abhängigkeit der Motordrehzahl bestimmt werden. Anhand der Motordrehzahl und der sich daraus ergebenden Geschwindigkeit des Schiffes kann ein funktionaler Zusammenhang zwischen der Messgeschwindigkeit und dem Squat abgeleitet werden.

Da die Wasserspiegelfixierungen mit möglichst geringer Motordrehzahl ausgeführt werden sollten, reicht es aus, das Einsinkverhalten im unteren Drehzahlbereich zu ermitteln. Das Squatverhalten kann aus Höhendifferenzen der mit GNSS aufgezeichneten Wasserspiegelhöhen bei einer bestimmten Motordrehzahl gegenüber der Wasserspiegelhöhe in Ruhelage abgeleitet werden. Diese Messungen können in stillen Gewässerbereichen, z. B. in einem Hafen, durchgeführt werden. Hierbei ist darauf zu achten, dass die Wasserspiegelhöhe während und zwischen den Messungen unverändert bleibt. Die Messungen sollten mehrfach wiederholt werden, um aus statistischer Sicht einen zuverlässigen Mittelwert zu erhalten.

## Ablauf der Messung

Die WSF dient der Erfassung der Höhenlage des Wasserspiegels eines Flussstreckenabschnitts zu einem bestimmten Zeitpunkt. Das Ergebnis einer WSF sollte die Wasserspiegellage bei möglichst stationären Abflusszuständen abbilden. Um den Squateinfluss so gering wie möglich zu halten,



Abb. 1: E-Teilung am Rumpf des Schiffes



Abb. 2: Schauglas mit einem Steigrohr und einer Skala (links) und die vergrößerte Darstellung der Skala (rechts)

sollte die Messung mit dem Messschiff mit der geringstmöglichen Geschwindigkeit durchs Wasser mit möglichst konstanter Motordrehzahl zu Tal entlang des mit den Nutzenden abgestimmten Sollmesswegs erfolgen.

Die Bestimmung der 3D-Koordinaten erfolgt mit geeigneten geodätischen RTK-GNSS-Empfängern. Indem ausschließlich der SAPOS-Korrekturdatendienst der deutschen Landesvermessung verwendet wird, ist sichergestellt, dass die Ergebnisse der WSF im aktuellen amtlichen Raumbezug vorliegen.

Da die Berufsschifffahrt nicht immer Rücksicht auf die Messungen nehmen kann und die Schiffsbegegnungen die WSF-Messungen negativ beeinflussen, müssen diese dokumentiert werden. Wenn zu erwarten ist, dass die entstehende Störung in den Messdaten 200 m übersteigt, wird die Messung unterbrochen und anschließend mit einer Überlappung von mindestens 200 m fortgesetzt.

Während der Messung wird ein Messprotokoll geführt, in dem alle mess- und auswerterelevanten Informationen und Ereignisse dokumentiert werden. Dies sind Informationen wie beispielsweise

Wetter, Windverhältnisse und starker Wellengang, die die Interpretation der Daten später erleichtern. Zur Kontrolle der WSF werden bei der Vorbeifahrt an einem Pegel die Pegelwasserstände erfasst und dokumentiert.

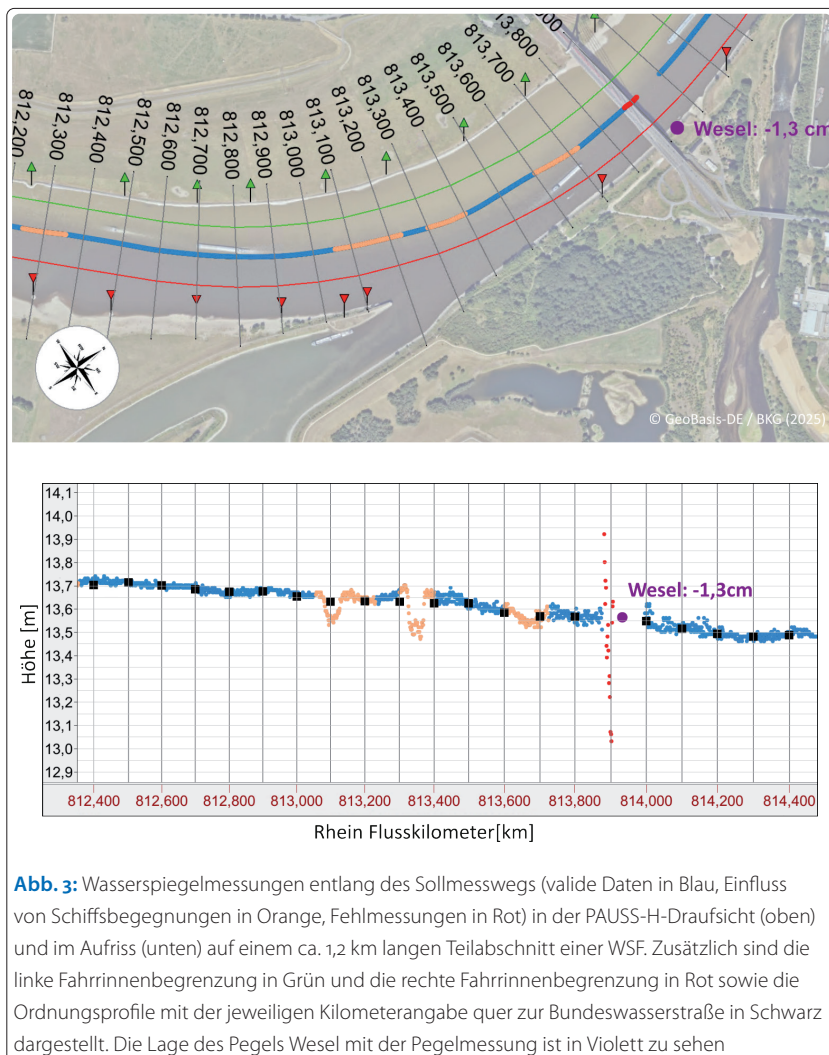
### Hydrographische Auswertung

Im Rahmen der hydrographischen Datenauswertung der WSF werden Fehlmessungen und sonstige unbrauchbare Daten, z. B. aufgrund von unzureichender Positionsgenauigkeit durch Abschattungen (z. B. Brücken), sowie Daten im Bereich von Schiffsbegegnungen eliminiert. Mit Hilfe einer Draufsicht und einem Aufriss (siehe Abb. 3) werden die Messdaten zunächst visualisiert. Die Plausibilisierung der Messdaten und die Berechnung der bedarfsorientierten Wasserspiegelhöhen erfolgen anschließend in einem weitestgehend automatisierten Verfahren. So wird der Einfluss der manuellen subjektiven Bearbeitung der Daten minimiert. Nur bei Bedarf können zusätzlich Messpunkte manuell eliminiert werden. Die hier vorgestellte hydrographische Auswertung ist in der WSV-eigenen PEILDATEN AUSWERTE SOFTWARE-HYDROGRAPHIE (PAUSS-H) implementiert. Die hydrographische Auswertung besteht aus mehreren aufeinander aufbauenden Prozessschritten.

Die Messdaten müssen mit dem GNSS-RTK-Status versehen sein. So können bereits beim Import der Messdaten die 3D-Messpunkte als unplausibel markiert werden, die keine ausreichende Qualität haben. Außerdem müssen die Messdaten für die weitere Bearbeitung mit einer ausreichend genauen Messzeit versehen sein. Beispielsweise muss bei einer Messrate von 10 Hz die Uhrzeit auf Zehntelsekunden angegeben werden.

Nach dem Import werden alle Messpunkte, die durch Berg- oder Talfahrer beeinflusst wurden, als unplausibel markiert. Dies kann dann automatisiert erfolgen, wenn die Messdaten bereits während der Messdatenerfassung ein entsprechendes Attribut erhalten. Sollten die Schiffsbegegnungen anderweitig dokumentiert werden, müssen die Daten entsprechend manuell bereinigt werden. Für den Fall, dass beim Unterbrechen der Messung das Schiff aufgedreht hat und die Messdatenaufzeichnung nicht unterbrochen wurde (siehe Abb. 4), müssen diese Bereiche als unplausibel markiert werden. In PAUSS-H erfolgt dies automatisiert. Hierbei wird jeder Messpunkt anhand der Ordnungsprofile stationiert und alle Messpunkte, die nicht der Hauptmessrichtung folgen, werden als unplausibel markiert.

Mit Hilfe einer mehrstufigen linienhaften Plausibilisierung können Fehlmessungen automatisiert als unplausibel markiert werden (siehe Abb. 4). In einer ersten Stufe werden zunächst über einen gleitenden Median grobe Fehlmessungen detektiert. Hierbei wird der Median der Messwerte, die in



**Abb. 3:** Wasserspiegelmessungen entlang des Sollmesswegs (valide Daten in Blau, Einfluss von Schiffsbegegnungen in Orange, Fehlmessungen in Rot) in der PAUSS-H-Draufsicht (oben) und im Aufriss (unten) auf einem ca. 1,2 km langen Teilabschnitt einer WSF. Zusätzlich sind die linke Fahrrinnenbegrenzung in Grün und die rechte Fahrrinnenbegrenzung in Rot sowie die Ordnungsprofile mit der jeweiligen Kilometerangabe quer zur Bundeswasserstraße in Schwarz dargestellt. Die Lage des Pegels Wesel mit der Pegelmessung ist in Violett zu sehen

einer definierten Fensterbreite liegen, abschnittsweise auf dem Profil berechnet. Die Messwerte, die eine maximal zulässige obere und untere Abweichung in Bezug auf den gleitenden Median überschreiten, werden als unplausibel markiert. Der Grenzwert ist eine durch die Nutzenden vorzugebende revierspezifische Größe.

In einer weiteren Stufe wird eine automatische linienhafte Plausibilisierung mit Hilfe von Polynomfunktionen durchgeführt. Dabei wird, analog zur Plausibilisierung mittels Medians, eine Polynomfunktion an die Messpunkte in einer definierten Fensterbreite approximiert. Wenn der getestete Messwert im statistischen Sinne eine Fehlmessung ist, wird dieser jedoch erst dann als unplausibel markiert, wenn er einen definierten Abstand überschreitet. Abstand, Fensterbreite und Polynomgrad sind wieder als revierspezifische Parameter vorab zu definieren.

Nach der Plausibilisierung der Messpunkte können Höhenkorrekturen, z. B. für die Eintauchtiefen, sowie Korrekturen für den Squat angebracht werden.

Im letzten Auswerteschritt werden für alle Ordnungsprofile die Wasserspiegelhöhen abgeleitet. Dazu erfolgt eine gleitende Polynomapproximation. Die Auswahl der jeweils zu berücksichtigenden gemessenen Wasserspiegelhöhen erfolgt durch eine vordefinierte Fensterbreite (siehe Abb. 5). Der Polynomgrad und die Fensterbreite können wiederum revierspezifisch festgelegt werden. Die Lage der berechneten Wasserspiegelhöhenpunkte wird aus dem Schnitt der Ordnungsprofile mit dem tatsächlichen Messweg berechnet.

Aufgrund von Lücken in den plausibilisierten Daten, z. B. in Bereichen mit Schiffsbegegnungen, können an einigen Ordnungsprofilen keine Wasserspiegelhöhenpunkte berechnet werden. Diese Lücken können anschließend rechentechnisch geschlossen werden. Dies erfolgt erneut durch eine Polynomapproximation der benachbarten Wasserspiegelhöhenpunkte. Hierbei können bei Bedarf die bisherigen Höhenwerte zusätzlich geglättet werden.

Die berechneten Wasserspiegelhöhen werden an den Pegeln geprüft. Hierbei werden die Differenzen der Wasserstandshöhen an den Pegeln und den Wasserspiegelhöhen berechnet. Die Differenzen können in PAUSS-H in einer Tabelle numerisch oder grafisch in den Ansichten (siehe Abb. 3) dargestellt werden.

### Genauigkeitsabschätzung

Die Wasserspiegelhöhen stellen nur eine bestmögliche Schätzung für die wahren Wasserstände an den Ordnungsprofilen dar. Daher ist es gemäß GUM (2008) erforderlich, eine (kombinierte) Unsicherheit für die Höhen zu bestimmen und anzugeben. Da für die Bestimmung der Wasser-

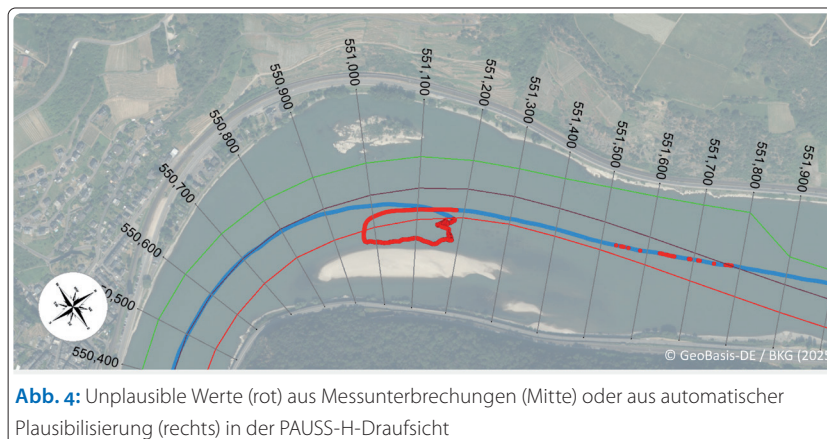


Abb. 4: Unplausible Werte (rot) aus Messunterbrechungen (Mitte) oder aus automatischer Plausibilisierung (rechts) in der PAUSS-H-Draufsicht

spiegelhöhen verschiedene Größen herangezogen werden, spricht man von einer »kombinierten Standardunsicherheit«. Um die kombinierte Standardunsicherheit einer WSF abschätzen zu können, werden die verschiedenen wesentlichen Einflussgrößen für die Berechnung der Wasserspiegelhöhen betrachtet und in einer Modellgleichung zusammengeführt.

Für jede durchgeführte WSF werden die Unsicherheiten der einzelnen Einflussgrößen individuell anhand des Funktionsmodells analysiert, um daraus die erweiterte kombinierte Standardunsicherheit abzuleiten. Eine beispielhafte Berechnung ist in Tabelle 1 dargestellt. Die kombinierte Standardunsicherheit nach GUM (2008) liegt dabei unter der Annahme der hier genannten Unsicherheiten der Einflussgrößen bei ca.  $U_{0,68} = 28$  mm. Die erweiterte kombinierte Standardunsicherheit ergibt sich für  $k=2$  (Vertrauensbereich 95 %) zu  $U_{0,95} = 55$  mm.

### Möglichkeit einer flächenhaften Wasserspiegelfixierung via Airborne-Laserscanning

Die bisher beschriebene Methode beschreibt eine lineare Abtastung der Wasseroberfläche durch ein darauf befindliches Messschiff, dessen Interaktionen (z. B. Eintauchtiefe, Rollwinkel) mit dem Wasser bekannt sind. Im Bereich der Fernerkundung ist es seit vielen Jahren möglich und üblich, die Topografie des Geländes via Airborne-Laserscanning

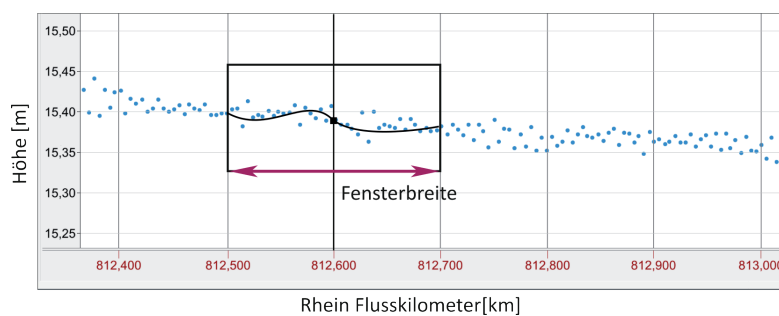


Abb. 5: Berechnete Wasserspiegelhöhenpunkte [m]

Einflussgröße	Verteilung	Ober-/ Untergrenze	Gewichtung	Berechnung	Standardmess- unsicherheit
u1 – zufällige Unsicherheiten der GNSS-Einzelmessungen	N		1		10 mm
u2 – SAPOS-Referenzhöhe	N		1		2 mm
u3 – SAPOS-Referenzkorrekturen	R	a <sub>o</sub> = +15 mm a <sub>u</sub> = -15 mm	1/√3	(a <sub>o</sub> – a <sub>u</sub> )/2 · 1/√3	9 mm
u4 – Geoid	R	a <sub>o</sub> = +10 mm a <sub>u</sub> = -10 mm	1/√3	(a <sub>o</sub> – a <sub>u</sub> )/2 · 1/√3	6 mm
u5 – Antennenabstand	N		1		5 mm
u6 – Roll-/Pitch-Einfluss	R	a <sub>o</sub> = +0 mm a <sub>u</sub> = -15 mm	1/√3	(a <sub>o</sub> – a <sub>u</sub> )/2 · 1/√3	4 mm
u7 – Eintauchtiefe	N		1		10 mm
u8 – Squat	N		1		20 mm
$U_{0,68} = \sqrt{\sum u_i^2}$					<b>27,6 mm</b>
$U_{0,95} = k \cdot U_{0,68}$ (k = 2)					<b>55,2 mm</b>

**Tabelle 1:** Beispielhafte Berechnung der kombinierten Unsicherheiten für die berechneten Wasserspiegelhöhen an den Ordnungsprofilen. Hierbei werden den einzelnen Unsicherheiten entweder die Normalverteilung (N) oder die unsymmetrische Rechteckverteilung (R) zugeordnet

(ALS) zu erfassen. Seit einigen Jahren werden auch mit Hilfe bathymetrischer ALS-Systeme (bALS) die Topografien von Flachwasserbereichen unterhalb der Wasseroberfläche erfasst. Möglich ist dies durch den Einsatz von grünem Laserlicht, welches im Gegensatz zu Laserlicht im nahen Infrarot (NIR) der konventionellen Laserscanner die Wasseroberfläche durchdringen und so auch Echos des Gewässerbodens erfassen kann. Beim Durchdringen der Wassersäule werden jeweils Anteile des Laserpulses an der Wasseroberfläche, an Streukörpern im Wasser und am Gewässerboden reflektiert. Im Gegensatz hierzu wird beim konventionellen (NIR-) ALS der komplette Laserimpuls an der Wasseroberfläche reflektiert. Somit ist es mit beiden Systemen möglich, die Wasseroberfläche zu erfassen.

Um die Potenziale von ALS-Systemen zu verdeutlichen, werden Messungen an der Elbe aus den Jahren 2018 (bALS) und 2022 (NIR-ALS) verwendet. Die erflagenen Daten wurden einer Strei-

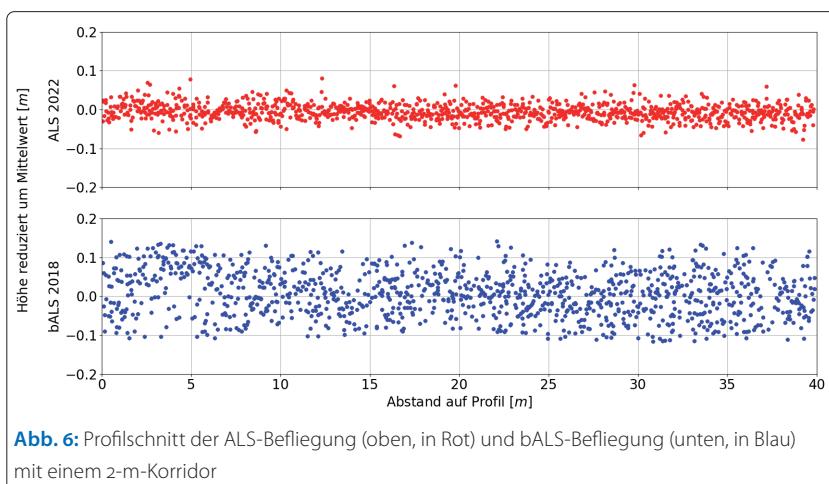
fenausgleichung unterzogen und die Geometrie über Pass- und Referenzflächen im Boden fixiert. Daraus ergeben sich, wie bei der schiffbasierten WSF, Koordinaten im amtlichen System (hier ETRS89/DREF91.R16 für die Lage sowie DHHN16 für die Höhe). Als Testgebiet für die folgenden Betrachtungen dient der Bereich um den Pegel Mühlberg. In diesem Bereich liegen sowohl ALS- als auch bALS-Daten überlappend und stromauf/ stromab um einen Pegel vor.

### Rauschverhalten

Zur Einschätzung der Laserbefliegung als potenzielle Ergänzung der herkömmlichen Methode zur Wasserspiegelfixierung wird im Folgenden das Rauschverhalten beleuchtet, um die zufälligen Abweichungen zu quantifizieren. Durch eine einfache Profilschnittbildung der Punktwolken aus der grünen (bALS) und roten (ALS) Laserbefliegung lässt sich ein erster Eindruck zu dem Rauschmaß gewinnen. In Abb. 6 ist ein Profilschnitt einer Profillinie mit einem Korridor von 2 m dargestellt.

Die oberen (roten) Messpunkte der ALS-Befliegung befinden sich in einem Band von etwa 0,1 m Höhe, die unteren (blauen) Messpunkte der bALS-Befliegung hingegen weisen ein Rauschband von etwa 0,2 m auf. Eine flächenhafte Information zu dem Rauschmaß ist in Abb. 7 zu erkennen.

Hierzu wurde aus jeder Befliegung jeweils ein vermittelndes 1-m-Modell nach der in Lorenz et al. (2021) beschriebenen Methode gerechnet, und die vertikalen Abstände zu den Einzelmesspunkten wurden berechnet. Diese Residuen werden in Abb. 7 farblich dargestellt. In der gesamten Fläche streuen die Messpunkte der bALS-Befliegung in einem deutlich höheren Ausmaß als die Messpunkte



**Abb. 6:** Profilschnitt der ALS-Befliegung (oben, in Rot) und bALS-Befliegung (unten, in Blau) mit einem 2-m-Korridor





**Abb. 7:** Draufsicht Residuen der Messpunkte zu vermittelndem Modell, links: ALS-Befliegung, rechts: bALS-Befliegung nahe des Pegels Mühlberg. Residuen  $\pm 0,04$  m in Weiß, größere positive Residuen in Rot (Messpunkt höher als Modell), größere negative Residuen in Blau

der ALS-Befliegung. Die Standardabweichung der Residuen beträgt für die ALS-Messung 0,22 m und 0,44 m für die bALS-Messung. Der bALS-Messung liegen also höhere zufällige Abweichungen inne.

### Vergleich von Wasserspiegellage und Pegelstand

Neben den zufälligen Abweichungen haben auch die systematischen Abweichungen eine besondere Relevanz. Die systematischen Abweichungen betreffen die Richtigkeit, mit der Zielgrößen bestimmt werden. Um die systematischen Abweichungen auf Messwertebene zu beleuchten, werden die Höhen der Grid-Stützpunkte der jeweiligen vermittelnden 1-m-Modelle mit dem jeweils zum Zeitpunkt des Flugstreifenmessbeginns gültigen Pegelstand verglichen.

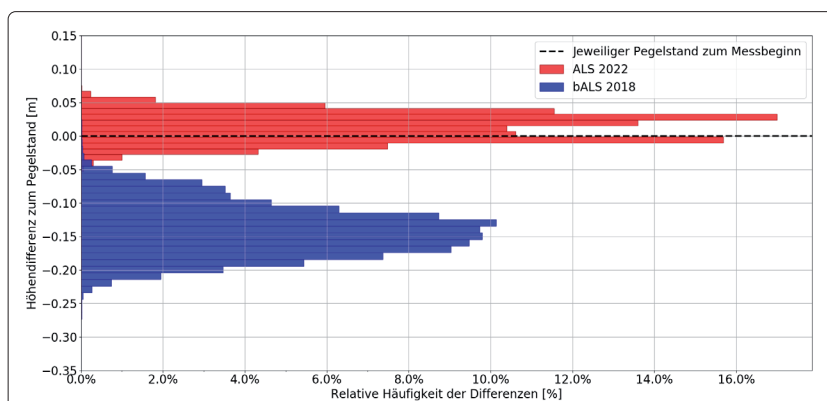
Für Aussagen zur Qualität der erfassten Wasserspiegellagen sind Referenzen in Form von Pegelbeobachtungen erforderlich. Für diese Vergleiche werden sowohl die Pegelstandorte als auch die ALS-/bALS-Daten beschickt, das heißt auf einen definierten Bezugswasserstand umgerechnet (hier GIW20 des WSA Elbe). Durch diese Differenzbildung erfolgt die Berücksichtigung des Gewässergefälles in Relation zu dem Pegelstandort. Die Vergleiche können damit genutzt werden, um die Verfahren bALS und NIR-ALS zu vergleichen. Es kann aber keine Genauigkeitsaussage in Relation zum Wasserstand getroffen werden, da die Messungen der Wasserspiegellage verwendet werden sollen, um Inhomogenitäten in Relation zu den diskreten Pegelstandorten zu erfassen. Zu erfassende Abweichungen zu den Pegelmessungen

enthalten also systematische Abweichungen der Messverfahren und Variationen der Wasseroberfläche.

Aus Abb. 8 geht hervor, dass die Höhe des ALS-Modells deutlich besser zum dazu gültigen Pegelstand passt als die Höhe des bALS-Modells. Die Wasseroberfläche wird vom grünen Laser penetriert, die zu erwartende Unterschätzung der Wasseroberfläche ist in dem Histogramm deutlich zu erkennen. Nahezu 85 % der bALS-Messpunkte liegen tiefer als 0,1 m unterhalb des Pegelstandes. Etwa 75 % der ALS-Modellhöhen liegen in einem Bereich von  $\pm 0,03$  m um den Pegelstand.

### Zusammenfassung und Perspektiven

Die Wasserspiegelfixierung liefert wichtige Messergebnisse für verschiedene hydrologische Aufgabenstellungen im Binnenbereich. Insbesondere



**Abb. 8:** Histogramm der Höhendifferenzen aus ALS- und bALS-Befliegung zum jeweiligen Pegelstand zum Zeitpunkt des Messbeginns





## Student Excellence Award

Bewerbungen noch  
bis zum 30. April einreichen

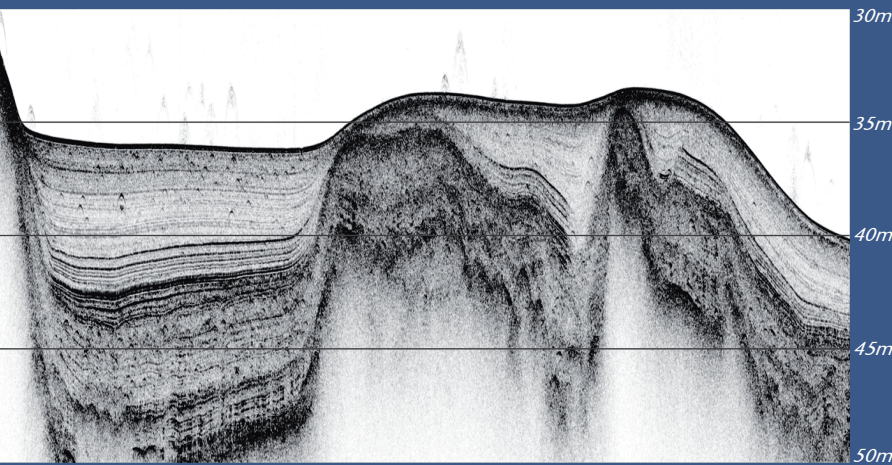


Alle Infos unter:

[www.dhyg.de/index.php/de/beruf/  
student-excellence-award](http://www.dhyg.de/index.php/de/beruf/student-excellence-award)



[www.innomar.com](http://www.innomar.com)



Data Example from a Norwegian Fjord (Innomar "standard" SBP, 10kHz)

## Innomar Parametric Sub-Bottom Profilers

- ▶ Discover sub-seafloor structures and buried objects
- ▶ Acquire unmatched hi-res sub-seabed data with excellent penetration
- ▶ Cover all depth ranges from less than one meter to full ocean depth
- ▶ Highly portable equipment for fast and easy mobilisation
- ▶ User-friendly data acquisition and post-processing software
- ▶ Used worldwide for various applications by industry, authorities, science

### ▶ Shallow-Water Solutions



### ▶ High-Power Solutions



### ▶ Remotely Operated Solutions



**Innomar**



# »Im Gegensatz zur Autostraße sind Wasserstraßen Erholungsraum für Mensch und Tier«

Ein Wissenschaftsgespräch mit ERIC OEHLMANN

Eric Oehlmann hat sich in seiner Karriere schon um den Verkehr zu Land und zu Luft gekümmert, seit Januar 2024 leitet er die Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt (GDWS) in Bonn. Dabei handelt es sich um die größte zivile Behörde Deutschlands mit 12 500 Beschäftigten. Im Interview erläutert der Jurist, wie er den Wasserstraßen eine noch größere Bedeutung verschaffen will. Ganz entscheidend dabei ist das Tempo der Digitalisierung.

GDWS | WSV | Wasserstraße | Schifffahrtsstraße | Rhein | FGeo-WSV | bathymetrische IENC | ELWIS  
GDWS | WSV | waterway | navigable waterway | Rhine | FGeo-WSV | bythymetric IENC | ELWIS

Eric Oehlmann has already spent his career looking after transport by land and air, and since January 2024 he has headed the Federal Waterways and Shipping Agency (GDWS) in Bonn. This is the largest civil authority in Germany with 12,500 employees. In this interview, the jurist explains how he wants to make the waterways even more important. The pace of digitalisation is crucial here.

## Interviewer

Lars Schiller führte das Interview mit Eric Oehlmann per E-Mail im Februar.

[eric.oehlmann@wsv.bund.de](mailto:eric.oehlmann@wsv.bund.de)

Herr Oehlmann, Sie leiten die GDWS, die Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt. Sie ist 2013 aus dem Zusammenschluss von sieben Wasser- und Schifffahrtsdirektionen entstanden. Erste Frage: Was ist eine Generaldirektion?

Die Generaldirektion ist die Zentrale der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV). Mit rund 1000 Beschäftigten steuern wir die Aufgaben und Projekte der gesamten WSV. Dazu zählen die Fach-, Dienst- und Rechtsaufsicht über die nachgeordneten Bereiche, die Ressourcensteuerung und die konzeptionelle Umsetzung der politischen Zielsetzungen des Bundesverkehrsministeriums. Neben diesen Aufgaben hat die GDWS weitere wichtige Arbeitsfelder, wie die Untersuchung beziehungsweise Prüfung und Zulassung von Binnenschiffen und Schiffsführern zum Verkehr, die Bereitstellung von Verkehrs- und Infrastrukturinformationen für die Schifffahrt oder die Bereitstellung von Infrastruktur für das Seelotswesen, um nur einige Beispiele zu nennen. Das bildet ein überaus breites Spektrum mit hoher Verantwortung ab.

Wie ist die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) organisiert?

Die WSV ist die größte zivile Behörde des Bundes und gehört zum nachgeordneten Bereich des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr. Die circa 12 500 Beschäftigten sorgen an den rund 7300 Kilometer Binnenwasserstraßen und auf einer Fläche von 23 000 Quadratkilometern Seewasserstraßen für einen reibungslos fließenden und

sicheren Schiffsverkehr. Wir sind unter anderem für über 300 Schleusen- und Wehranlagen, 1300 Straßen- und Bahnbrücken über Bundeswasserstraßen, 40 Kanalbrücken, vier Sturmflutsperrwehre, zwei Schiffshebwerke und zwei Talsperren verantwortlich. Zu unseren Aufgaben gehören die Unterhaltung und der Betrieb der Infrastruktur der Bundeswasserstraßen mit allen Schifffahrtsanlagen, einschließlich der Verkehrs- und Revierzentralen. Betonen möchte ich, dass auch die Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie inklusive der Wiederherstellung der ökologischen Durchgängigkeit für uns von hoher Relevanz ist.

Die Kolleginnen und Kollegen in den 17 Wasserstraßen- und Schifffahrtsämtern sind zudem für die Unterhaltung und den Betrieb der Bundeswasserstraßen zuständig. Zusätzlich sind unsere acht Wasserstraßen-Neubauämter für Ersatz- und Ausbauprojekte tätig. Unsere hohe Fachkompetenz und Erfahrung sind die Basis für die erfolgreiche Umsetzung der vielfältigen Aufgaben.

Wie definieren Sie eine Wasserstraße? Warum wird zwischen Wasserstraße und Schifffahrtsstraße differenziert?

»Wasserstraße« ist ein Oberbegriff für die schiffbaren Binnengewässer und das Küstenmeer, also alle Gewässer mit Verkehrsfunktion. Sie dienen dem Verkehr mit Güter- und Fahrgastschiffen und der Sport- und Freizeitschifffahrt.

Aber die Wasserstraßen sind auch – im Gegensatz zur Autostraße – Lebens- und Erholungsraum

für Menschen und Tiere. Sie nehmen eine ökologische Funktion wahr. Und sie sind auch Kulturgut wie zum Beispiel der Rhein über die Siegfriedsaga, und auch Ursprung für die Weinherstellung in Deutschland. Die Wasserstraßen verbinden seit Jahrhunderten den europäischen Kontinent.

Der Begriff »Schiffahrtsstraße« unterscheidet sich davon, denn er ist ein Rechtsbegriff, der auf die Regeln zum Befahren hinweist. So gibt es in Deutschland »Seeschiffahrtsstraßen«, zum Beispiel Nord- und Ostsee, der Nord-Ostsee-Kanal und die Seehafenzufahrten, auf denen die Seeschiffahrtsstraßenordnung gilt, und es gibt »Binnenschiffahrtsstraßen«, auf denen die Binnenschiffahrtsstraßenordnung gilt. Das sind sozusagen die Straßenverkehrsordnungen für die Wasserstraßen.

**Sie nannten die Zahl von 7300 Kilometern Binnenwasserstraßen in Deutschland. Auf wie vielen Kilometern verkehren Schiffe?**

Diese rund 7300 Kilometer Binnenwasserstraßen sind zugleich Bundeswasserstraßen. Für die Berufsschifffahrt eignen sich davon so etwa 6000 Kilometer. Kleine Sportboote, Ruder- und Paddelboote können auf den kleineren Wasserstraßen ebenfalls fahren.

**Wie gestaltet sich die Zusammenarbeit zwischen der GDWS und den regionalen Wasserstraßen- und Schifffahrtsämtern?**

Die Zusammenarbeit ist überaus konstruktiv und sehr engagiert. Die Ämter erledigen vor Ort an unseren Wasserstraßen die konkreten Arbeiten. Wie effizient und erfolgreich das passiert, hat das Beispiel der Schleuse Müden an der Mosel eindrucksvoll gezeigt. Wir haben sehr schnell dafür gesorgt, dass der Schiffsverkehr auf der Mosel wieder fließt. Das war eine großartige Leistung. Bei der GDWS wiederum liegen die koordinierenden, fachaufsichtlichen und strategischen Aufgaben. Hier sind Spezialistinnen und Spezialisten für alle Fragen rund um das Thema Wasser, Wasserbau und Ökologie tätig. In der Generaldirektion werden die Prioritäten zum Beispiel im Baubereich gesetzt. GDWS und Ämter sind in einem kontinuierlichen und umfassenden Austausch.

**Für die Häfen ist die GDWS nicht zuständig. Dennoch hört die Wasserstraße ja nicht vor dem Hafen auf. In Hamburg etwa fließt die Elbe mitten durch den Hafen. Wer ist dort für die Vermessung zuständig? Wie stimmen sich Ihre Kolleginnen und Kollegen mit den anderen Behörden ab?**

Das ist richtig. Am Beispiel Hamburg lässt sich die Zuständigkeit gut erklären. Der Bereich der Elbe, der das Hamburger Hafengebiet umschließt, ist die sogenannte »Delegationsstrecke«. Dort hat der Bund die Unterhaltung der Bundeswasserstraße Elbe und den Betrieb der bundeseigenen Schifffahrtsanlagen an die Freie und Hansestadt Hamburg übertragen. Hamburg ist hier durch die



Eric Oehlmann

Hamburg Port Authority (HPA) für die Peilungen und Vermessungen zuständig. Unsere Zusammenarbeit hat sich bewährt und läuft sehr gut.

**Welche Herausforderungen sehen Sie bei der Instandhaltung und Modernisierung der Bundeswasserstraßen?**

Die Herausforderungen sind in etwa vergleichbar mit denen des Straßenbaus. Modernisierung und Digitalisierung können als Schlagworte genannt

»Der Rhein ist das Herz der produzierenden Wirtschaft und des Warenverkehrs in Deutschland«

Eric Oehlmann

werden. Für uns ist die Geschwindigkeit entscheidend, und zwar sowohl bei den Planungen als auch bei den Bauprozessen. Daher stellen wir Planungs- und Bauprozesse auf digitale Verfahren um. Das macht die Arbeitsabläufe effizienter und intelligenter. So können

wir auch dezentral das gesamte Netzwerk der WSV mit immerhin 12 500 Mitarbeitern optimal nutzen. Wir bearbeiten über 1300 Projekte im ganzen Bundesgebiet. Damit wir einen guten Überblick behalten – und die Ressourcen zielgenau einsetzen –, verfügen wir über eine digitale Projektsteuerung, unser Multi-Projektmanagement.

**Der Rhein ist die wichtigste Bundeswasserstraße. Was tut die GDWS, um den Rhein als Bundeswasserstraße zukunftssicher und leistungsfähig zu halten?**

Der Rhein hat für uns höchste Priorität. Er ist das Herz der produzierenden Wirtschaft und des Warenverkehrs in Deutschland. Rund 80 Prozent des Güterverkehrs in der Binnenschifffahrt findet auf dieser internationalen Wasserstraße statt. Der Rhein ist Bindeglied zwischen den ARA-Häfen Antwerpen, Rotterdam und Amsterdam, die »Tore der Welt«, und den Metropolregionen bis nach Basel.

Auch ist der Rhein ein zentraler Standortfaktor und tausende Arbeitsplätze sind von ihm abhängig. Für die Zukunftsperspektiven von Unternehmen ist die Nähe zu leistungsfähigen Verkehrswegen ein entscheidendes Kriterium. Wir erhalten die Leistungsfähigkeit des Rheins sowohl durch aktuelle Maßnahmen als auch durch zukunftsorientierte Planungen.

Dies zeigt sich beispielsweise in dem freifließenden Gewässer unterhalb der Staustufe Iffezheim. Hier gibt es ständige Erosions- und Verlandungstendenzen. Mit Geschiebezugaben auf der einen und Baggerungen auf der anderen Seite wirken wir diesen entgegen. Das ermöglicht eine sichere und verlässliche Schifffahrt. Die beiden Rheinämter leisten hier hervorragende Arbeit.

Darüber hinaus stellt die WSV zusammen mit unseren französischen Partnern über den Betrieb der Schleusenketten am Oberrhein die Anbindung an Basel sicher.

Wir erhalten aber nicht nur den Status quo. Wir

kümmern uns – auch im Hinblick auf den Klimawandel – um die Zukunftssicherheit des Rheins. Der Mittelrhein zwischen Budenheim und St. Goar stellt einen abladerelevanten Engpass dar, was die Transportkapazitäten einschränkt. Um die Fahrrinntiefen an die Strecken ober- und unterhalb anzupassen, plant die WSV hier sechs lokal begrenzte Tiefenengstellen zu beseitigen. Ein hoch engagiertes Team realisiert dieses anspruchsvolle Projekt, das weit in die Zukunft reicht.

Zentral ist für mich auch folgender Aspekt. Der Rhein ist im internationalen Kontext ein sehr bedeutender Verkehrsweg. Daher werden alle Maßnahmen im Rahmen der Zentralkommission der Rheinschifffahrt mit unseren internationalen Partnern abgestimmt. Die länderübergreifende Zusammenarbeit garantiert die Rheinschifffahrt dauerhaft.

**In Hannover gibt es die Fachstelle für Geodäsie und Geoinformatik der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (FGeo-WSV). Was sind deren Aufgaben?**

Die Fachstelle für Geodäsie und Geoinformatik der WSV bearbeitet Aufgaben in den Bereichen Vermessung und Geoinformationen. Sie ist die zentrale Stelle der Wasserstraßen- und Schifffahrtsämter und der Wasserstraßen-Neubauämter im Bereich des internen und externen Geodatenmanagements und übernimmt unter anderem komplexe Aufgaben der bautechnischen sowie topografische und hydrographische Vermessungen, um zum Beispiel digitale Geländemodelle der Wasserläufe zu erstellen. Ebenso ist die Produktion von Karten für die sichere Navigation auf den Bundeswasserstraßen eine zentrale Aufgabe dieser Fachstelle. Zukünftig können hier der Schifffahrt auch Tiefeninformationen in sogenannten bathymetrischen IENC aus den aktuellsten Mehrzweckpeilungen bereitgestellt werden.

**Welche Bedeutung hat die Hydrographie für die Arbeit der WSV?**

Die Hydrographie ist für die WSV enorm wichtig. Damit werden die Beschaffenheit und Gestalt des Gewässerbodens, die Beziehung zum festen Land, der Zustand und die Dynamik der Gewässer beschrieben und es werden beispielsweise klimatisch bedingte Veränderungen schnell erkannt.

Die Ergebnisse der Gewässervermessung sind zudem wesentliche Grundlage der Verkehrssicherung, der Mengenberechnung für die Baggerungen, die Hindernissuche und die Bauwerksüberwachung. Durch die Kombination von Lasermessungen und klassischen Peildaten werden digitale Geländemodelle des Wasserlaufs erzeugt, mit denen hydraulische Modellierungen für weitere Anforderungen zur Verfügung stehen.

**Wie viele Peilschiffe hat die WSV?**

Wir müssen unterscheiden zwischen Binnen- und Küstenbereich. In den zwölf Binnenrevieren sind

derzeit zehn Peilschiffe im Einsatz, die revierübergreifend Vermessungsarbeiten erledigen. Diese Flächenpeilschiffe sorgen für die regelmäßige Aufnahme der Gewässersohle. Im Küstenbereich sind 14 Peilschiffe im Einsatz.

Darüber hinaus sind weitere Arbeitsboote mit Linienpeilsystemen ausgestattet. Deren Arbeit beschränkt sich auf die bedarfsgerechte, zusätzliche Überprüfung des Gewässer- beziehungsweise Bauwerkszustandes und auf außerplanmäßige Peilaufgaben unter anderem Havarie, Hochwasser und Hindernissuche. Auch werden damit anlassbezogene Überprüfungen beziehungsweise zeitlich begrenzte, baubegleitende Messungen durchgeführt.

**Müssten die Bundeswasserstraßen nicht häufiger vollflächig hydrographisch vermessen werden?**

Um die Wasserstraße in einem für die Schifffahrt sicheren Zustand zu erhalten, werden die hydrographischen Messungen nach einem räumlich und zeitlich abgestimmten Konzept kontinuierlich linien- beziehungsweise flächenhaft ausgeführt.

Angaben zu Gestalt und Beschaffenheit der Bundeswasserstraßen sind entscheidend dafür, wie und in welchem Umfang Schifffahrt dort möglich

ist. Insbesondere die Materialbeschaffenheit der Gewässersohle, die geometrischen Abmessungen der Wasserstraße in Tiefe und Breite und auch das Wasserdargebot sind prägende Faktoren für das Strömungsverhalten und das Volumen des Wasserkörpers.

**Wer führt die Peilungen eigentlich durch – nur die eigenen Leute, oder wird manchmal auch an Externe vergeben?**

Vor allem unsere Flächenpeilschiffe führen die Peilungen durch. Diese Aufgaben gewährleisten wir unabhängig von Dritten. Für zusätzliche Messungen zum Beispiel für investive/geplante Baumaßnahmen werden Leistungen an Dritte vergeben.

**Aufgabe der Hydrographie ist nicht nur die Vermessung der Gewässer, ihrer Ausbreitung und ihrer Tiefe, sondern anschließend auch die Darstellung der Gewässer in Karten oder in anderen Informationsmedien. Wie sieht es mit Wasserstraßenkarten aus, wie mit der IENC, in der ja auch bathymetrische Tiefeninformationen eingeblendet werden können?**

Die vorhin bereits erwähnte Fachstelle für Geodäsie und Geoinformatik der WSV (FGeo-WSV) stellt die Inland-ENC entsprechend dem europäischen ECDIS-Standard als elektronische Navigationskar-



## Obtain comprehensive hydrographic data in deep water and coastal regions

Our hydrographic survey services, including our lidar bathymetry, acoustic surveys, satellite imagery analysis, and subsurface mapping, are used by both government and private sector clients for various applications along the coastline and offshore to support nautical charting, cable route surveys and coastal zone management.

Hydrography also has significant applications in supporting the blue economy and underpins our climate and nature activities, providing essential data for sustainable development and environmental conservation.



Scan the QR code to find out more about our hydrographic surveys

te für die wichtigsten Binnenwasserstraßen des Bundes her. Die Inland-ENC enthält neben den wichtigen navigatorischen Lageinformationen auch punktuelle Tiefeninformationen. Die Bereitstellung von flächenhaften Tiefeninformationen erfolgt durch die bathymetrische Inland-ENC (bIENC). Flächenhafte Tiefeninformationen in ausreichender Messpunktdichte sind zwingende Voraussetzung für die Herstellung der bIENC. Nur so

»Die Wasserstraßen sind der Verkehrsträger der Zukunft: ökologisch, verfügbar und staufrei«

Eric Oehlmann

kann ein für die Schifffahrt aussagekräftiges Tiefenbild erzeugt werden.

Zusammen mit der BfG verfolgen wir das Projekt zur Produktion und Bereitstellung von bIENC. Beginnend für den Rhein wurden zunächst die Bedarfe der Binnenschifffahrt von der

GDWS mit den Stakeholdern ermittelt. Derzeit läuft die testweise Erst-Herstellung der bIENC und die Vorbereitung des pilothaften Einsatzes einschließlich Abstimmung mit den Stakeholdern der Binnenschifffahrt auf dem Rhein.

Die IENC wird über das Elektronische Wasserstraßen-Informationssystem ELWIS bereitgestellt. Wo durch zeichnet sich ELWIS aus?

Mit rund 40 Millionen Aufrufen pro Jahr ist ELWIS eine Erfolgsgeschichte. ELWIS steht für unseren webbasierten, interaktiven »Elektronischen Wasserstraßen-Informationen-Service«. Der Name ist Programm: Alle Schifffahrtsinteressierten finden hier zahlreiche kostenfreie Informationen, von Verkehrs- und Infrastrukturinformationen (zum Beispiel zum Schleusenbetrieb), über Wissenswertes zum Befähigungswesen und zur Fahrzeugzulassung, über Wasserstandsmeldungen und -vorhersagen bis zur Eislage im Winter. Auch Formulare zu Förderprogrammen und zu einschlägigen Rechtsquellen für die Schifffahrt werden auf dem Portal bereitgestellt.

ELWIS ist ein Beispiel für eine digitale Lösung. Wie steht es insgesamt um den Einzug der Digitalisierung in die Verwaltung? Sie sagten vorhin, für Sie sei Geschwindigkeit entscheidend.

Digitalisierung hat für uns einen absolut hohen Stellenwert. Deshalb ist es mein klares Ziel, digitale Technologien in unsere Verwaltung noch stärker zu integrieren.

Eine leistungsfähige IT-Infrastruktur ist für uns Voraussetzung für die sichere, effiziente und zeitgemäße Verarbeitung und Bereitstellung unserer digitalen Planungen. Sie ermöglicht effektive Arbeitsprozesse und den Abbau von bürokratischen Hürden, zum Beispiel durch eine kompatible Datennutzung, und garantiert Geschwindigkeit in den Prozessen. Wir sprechen gerne von der WSV-Geschwindigkeit, die für uns Maßstab ist.

Auf verschiedenen Ebenen diskutieren wir unseren digitalen Weg und schaffen dadurch die Voraussetzungen, um auf der Höhe der Zeit zu sein. Der rasche Austausch von Daten und auch die Möglichkeit, durch digitale Module effizienter zu planen und zu bauen, zeigen eindrucksvoll die Vorteile.

Die neun Geoverbände Deutschlands, zu denen auch die DHyG zählt, fordern in einem gemeinsamen Positionspapier, das kurz vor der Bundestagswahl veröffentlicht wurde, dass Geoinformation als kritische Infrastruktur anerkannt werden soll. Da Geodateninfrastrukturen »heute für den sicheren Betrieb der meisten kritischen Infrastrukturen essentiell« seien, müssten die Geodateninfrastrukturen »dauerhaft abgesichert und nachhaltig finanziert werden«. Trifft das auch auf die Wasserstraßen und Bauwerke zu? Gibt es eine Geodateninfrastruktur der WSV?

Die WSV betreibt eine Geodateninfrastruktur, die stetig ausgebaut wird. Wesentliche Bausteine sind neben der Datenhaltungskomponente (Server) auch das GeoPortal als Datenbereitstellungskomponente, der GeoKatalog, ein Geodatenmanagementkonzept für den weiteren Ausbau sowie verschiedene Fach-IT-Verfahren und darauf aufgesetzte Dienste zur Datenbereitstellung. Aus dieser Geodateninfrastruktur heraus werden auch nationale und europäische Datendienste entsprechend den rechtlichen Regelungen bedient, so zum Beispiel der europäische INSPIRE-Dienst. Geodaten aus dem Bereich Vermessung, Liegenschaften, Kartenwesen, Peilwesen beziehungsweise Gewässervermessung zählen nicht zu den kritischen Daten – wenngleich diese Daten wichtige Basisdaten für das digitale Planen, Bauen und Betreiben der Wasserstraßen und ihrer Anlagen sind.

Der Klimawandel hat enorme Auswirkungen auf die Wasserstraßen. Welche Überlegungen gibt es, auf Niedrigwasser oder Hochwasser zu reagieren, damit die Schiffe täglich fahren können?

Wir befassen uns seit Jahren mit den Auswirkungen von Hoch- und Niedrigwasser. Die Überflutungen im Ahrtal und niedrige Wasserstände der Flüsse haben wir alle noch vor Augen. Durch professionelle fachliche Arbeit sorgen wir dafür, dass passgenaue Lösungen entwickelt werden. Wir stellen uns auf diese Herausforderungen ein, nehmen sie ernst und lernen als Behörde aus unseren Erfahrungen.

Bezogen auf die Hydrographie verweise ich darauf, dass vermehrte Hoch- und Niedrigwassersituationen auf den Bundeswasserstraßen steigende Anforderungen auch an die hydrographische Vermessung bedeuten. Dies gilt nicht nur hinsichtlich der flächenhaften Ausdehnung, sondern auch bezüglich der zeitlichen Messintervalle. Daher ist es unser Ziel, die Messkapazität hierauf optimal abge-



stimmt zu erhöhen und der Schifffahrt digital und bedarfsgerecht bereitzustellen.

**Wann werden Binnenschiffe autonom verkehren? Wie steht es um die Regularien, mit denen der Weg zur autonomen Schifffahrt geebnet wird?**

Es gibt vielversprechende Projekte, die darauf abzielen, dass mit Schiffen in bestimmten Größenklassen und auf geeigneten Wasserstraßenabschnitten eine teilautonome Fahrt möglich ist. Für uns als WSV zeigt sich diese Entwicklung als Option für die Zukunft. Die Binnenschifffahrt nutzt bereits jetzt Assistenzsysteme wie Spurhalteassistenten, die autonomes Fahren unterstützen. Digitalisierung und künstliche Intelligenz werden weitere Chancen eröffnen.

Auf bestimmten Strecken sind bereits remotegesteuerte Schiffe unterwegs, beispielsweise auf dem Rhein. Wir unterstützen die Zulassung dieser Schiffe und erteilen entsprechende Genehmigungen. Regularien für eine Fernbedienung von Binnenschiffen sind für Versuchsfahrten bereits in Kraft getreten. Bislang ist noch eine Mindestbesatzung an Bord vorgeschrieben. An Regelungen hin zu einer weiteren Automatisierung wird aktuell gearbeitet.

**Was wollen Sie mit der GDWS in den nächsten Jahren bewirken?**

Ich möchte meine Behörde zukunftsstark aufstellen und den Wasserstraßen mit unseren Systempartnern aus Schifffahrt, Industrie und Logistik eine noch größere Bedeutung verschaffen. Die Wasserstraßen sind der Verkehrsträger der Zukunft: ökologisch, verfügbar und staufrei.

Wir wollen Innovationstreiber sein, indem wir den Rahmen setzen für die maritime Wirtschaft und Logistik. Für mich geht es darum, den Weg freizumachen für innovative Entwicklungen. Digitalisierung wird uns auch dabei helfen, Prozesse zu straffen und schneller zu werden.

Wir bearbeiten in der WSV derzeit rund 16 000 Aufgaben mit einer enormen Bandbreite. Die Kolleginnen und Kollegen sind hoch motiviert. Flexibilität und die Weiterentwicklung unserer Aufgaben und Prozesse ist zentraler Kern und Markenzeichen unserer Behörde.

**Was würden Sie gerne besser können?**

Die Vorhersage der Lottozahlen.

**Was wissen Sie, ohne es beweisen zu können?**

Das Jahrzehnt der Wasserstraße beginnt jetzt. //



**HYPACK**  
a xylem brand



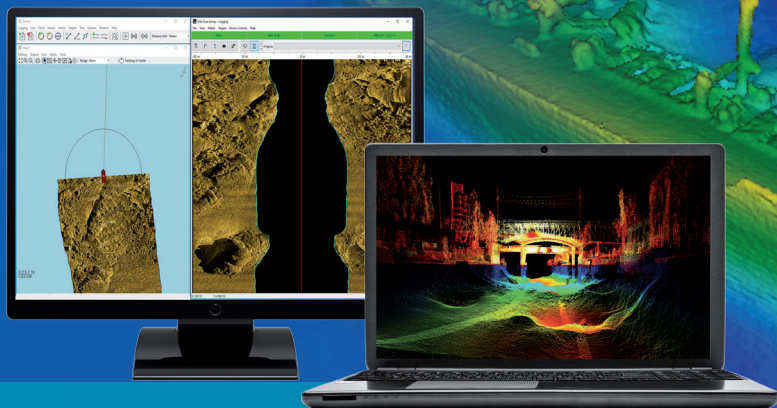
**HYPACK® & HYSWEEP®**

Survey and map your waters to collect and deliver high-resolution bathymetry and topography data.



**HYPACK® GEOPHYSICS**

Software package designed for the acquisition and processing of sub-bottom profiling, side scan, and magnetometer data.



Your Sensors,  
Our Software.  
Survey the World!



sales@hypack.com



# Die Entstehung des Bastelbogens »Gran Canaria«

Ein Beitrag von PETER DUGGE

Die Deutsche Hydrographische Gesellschaft (DHyG) hat anlässlich der HYDRO 2024 in Warnemünde ein Giveaway erstellen lassen, das auch die Nachwuchsgewinnung unterstützen soll: Einen farbigen Bastelbogen aus Papier für ein dreidimensionales Modell der Über- und Unterwasserlandschaft der Insel Gran Canaria im Maßstab 1 : 500 000. Aspekte aus Geologie, hydrographischer Messtechnik, Topografie, Kartografie und Nautik werden damit anschaulich dargestellt. Das Basteln und das anschließende Betrachten des fertigen Modells regen zu einer Entdeckungsreise zu diesen Themen an und wecken hoffentlich das Interesse an der vielfältigen Arbeitswelt der Hydrographie. Der Artikel stellt die Entstehung des Bastelbogens von der ersten Idee bis zum gedruckten Ergebnis dar.

DGM | 3D-Modell | Seamount | Seekarte | Dreiecksvermaschung  
DTM | 3D model | seamount | sea chart | triangular meshing

The German Hydrographic Society (DHyG) has organised the creation of a giveaway on the occasion of HYDRO 2024 in Warnemünde, which is also intended to support the recruitment of young talents: A coloured paper craft sheet for a three-dimensional model of the landscape of the island of Gran Canaria above and below the water surface at a scale of 1 : 500,000. The model vividly presents aspects of geology, hydrographic measurement technology, topography, cartography and navigation. The crafting and the subsequent viewing of the finished model invites to a journey of discovery on these topics and hopefully awakens interest in the manifold professional hydrographic work. The article describes the development of the craft sheet from the first idea to the printed result.

## Autor

Peter Dugge ist Redakteur beim Journal of Applied Hydrography (HN) und arbeitet als Systemdesigner für Navigationsanlagen bei der Atlas Elektronik GmbH in Bremen.

[peter.dugge@dhyg.de](mailto:peter.dugge@dhyg.de)

## Idee

Beim Besuch der Intergeo 2023 kam einem Redaktionsmitglied der *Journal of Applied Hydrography* (HN) die Idee, die Arbeit der DHyG zur Nachwuchsgewinnung für das Berufsfeld der Hydrographie durch einen Bastelbogen für ein dreidimensionales Modell eines Seamounts als Giveaway zu unterstützen. Die DHyG nimmt oft an den verschiedensten Veranstaltungen für Schüler und Schülerinnen sowie für Studierende teil, um für die Hydrographie zu werben (z. B. KonGeoS, Tag der Technik). Daher wurde schon länger nach einem passenden und besonderen Werbeartikel gesucht, der auf diesen Veranstaltungen verteilt werden kann. Die Idee für den Bastelbogen wurde vom Vorstand der DHyG dankend aufgegriffen.

Durch die Redaktionsleitung der HN wurde ein Team mit Fachleuten aus Geologie, Ausbildung, Dokumentation und Hydrographie zusammengestellt. Bei Papercraft Mountains, einer kleinen, auf Bergmodelle spezialisierten Firma, die von den Brüdern Johann und Jürnjacob Dugge nebenberuflich betrieben wird, wurde die Entwicklung eines Bastelbogens beauftragt. Zum Team gehörten Lars Schiller (HN), Peter Dugge (HN), Jens Schneider von Deimling (Christian-Albrechts-Universität zu Kiel,

CAU), Tanja Dufek (damals HafenCity Universität in Hamburg) und Sylvia Spohn (Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie in Rostock, BSH).

Durch das interdisziplinär zusammengesetzte, engagierte Team sollte ein visuell und haptisch ansprechendes, einfach baubares Modell entwickelt werden, bei dem mit einer nautischen Seekarte, einem Satellitenbild, einem digitalen Geländemodell (DGM) der Landfläche und des Meeresbodens und einer ansprechenden textlichen und farblichen Gestaltung viele Themen der Hydrographie anschaulich dargestellt werden. Das Modell sollte neugierig machen auf den »unterseeischen Saal (...) der Hydrographie (...) voller spannender Dinge, technischer Wunderwerke und farbenfroher räumlicher Darstellung in 4-D«, von dem Thomas Dehling, der 1. Vorsitzende der DHyG, in seiner Festrede anlässlich des 40-jährigen Bestehens der DHyG sprach (Dehling 2024).

## Auswahl von Gran Canaria

Zunächst war vorgesehen, einen echten Seamount, also einen vollständig unter der Wasseroberfläche liegenden Berg, wie z. B. den Vesteris Seamount bei Grönland, mit dem geplanten dreidimensionalen Papiermodell nachzubilden.

Bei den Abstimmungen im Team zeigten sich allerdings schnell die Vorzüge einer Insel als Modellgegenstand:

- Mit einer Insel werden die Herausforderungen der Hydrographie bei der ganzheitlichen Erfassung von Objekten und Strukturen, die zum Teil über und zum Teil unter der Wasseroberfläche liegen, deutlich.
- Das Modell einer Insel bietet mit seinem Überwasseranteil einen der Allgemeinheit vertrauten Anblick und führt von dort hinab in die für viele Betrachtende unbekanntes Unterwasserwelt, das Kerngebiet der Hydrographie.

Die Insel sollte ein Solitärberg sein, das heißt, sie sollte nicht wie der Mount Everest oder die Zugspitze nur Teil eines ganzen Gebirges sein, sondern sie sollte wie das Matterhorn, der Fujijama oder der Kilimandscharo in seiner Gesamtheit als eine eigenständige Struktur erkennbar sein, die klar von ihrer Umgebung abgegrenzt ist und am besten direkt vom Meeresgrund aus aufsteigt.

Als Kandidaten für die zu modellierende Insel kamen in die engere Auswahl: der Mauna Kea/Hawaii (der als größter und höchster Berg der Erde gilt, wenn man den Unterwasseranteil mit einbezieht), Réunion bei Madagaskar und Gran Canaria.

Die Wahl fiel auf Gran Canaria. Die Gründe dafür waren der Bekanntheitsgrad der Insel in Europa und ihre markante, aber relativ simple und damit gut mit einem Papiermodell darstellbare Form.

### Entwicklungsaufgabe

Das 3D-Seamount-Modell sollte relativ einfach zu basteln sein, weswegen es aus maximal 30 Dreiecken bestehen sollte. Es sollte mit einer Textur und erläuternden Texten versehen sein und auf beidseitig farbig bedrucktem Kartonpapier geliefert werden.

Als Arbeitsschritte für die Entwicklung und Fertigung des Bastelbogens waren geplant:

- Erstellung einer Textur für die Oberfläche des Modells,
- Entwicklung der dreidimensionalen Form des Modells,
- Konstruktion und Beschriftung der Seitenwände,
- Layout des Bastelbogens,
- Drucken des fertigen Bastelbogens.

### Einzubringende Daten

Für den Bastelbogen waren unterschiedliche Datensätze und Unterlagen erforderlich:

- Ein DGM für die Landflächen und den Meeresboden, um die dritte Dimension des Modells und eine hypsometrische Darstellung und Schummerung für die Textur erzeugen zu können,
- eine Seekarte für das gesamte Modellgebiet,
- ein Satellitenbild für den Landanteil.

### Das digitale Geländemodell

Als DGM stellte Jens Schneider von Deimling einen Datensatz von Prof. Sebastian Krastel zur Verfügung (Krastel et al. 2002) (siehe [Abb. 1](#)).

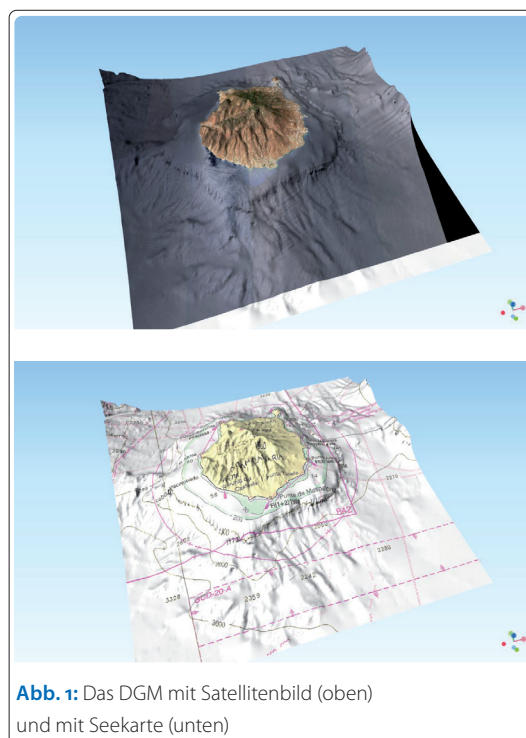
Der Datensatz enthält Daten unterschiedlicher Auflösung. Die Daten decken das Seegebiet um Gran Canaria nicht vollständig und gleichmäßig ab, sondern sind entsprechend den wissenschaftlichen Aufgabenstellungen, wie z. B. der Erfassung von Schelfkanten und Rutschungen, angelegt. Lücken zwischen den Daten sind mit GEBCO-Daten geschlossen worden.

Bei der Zusammenfassung der Daten von verschiedenen Messungen zeigte sich, dass es bei diesen Daten häufig nicht wie bei nautischen Vermessungen auf eine absolute, sondern auf eine relative Genauigkeit ankam, mit der sich geologische Formationen erkennen lassen. Differenzen zwischen den verschiedenen Datensätzen führten in der hypsometrischen Darstellung im Papiermodell zu Artefakten an den Datensatzgrenzen.

Neben den Tiefeninformationen für das Seegebiet rund um Gran Canaria enthält das DGM auch Höhendaten für die Landflächen Gran Canarias.

### Auswahl des Geländeausschnittes

Die konkrete Auswahl des Geländeausschnittes wurde anhand des DGM im Geoinformationssystem QGIS vorgenommen. Der Ausschnitt musste einerseits groß genug sein, um die Eigenschaft von Gran Canaria als Solitär gut erkennen zu können, und es galt andererseits zu beachten, dass nicht ein unnötig großes Gebiet zu zusätzlichen Bastel-Dreiecken führte. Außerdem sollte das Modell in seinen Abmessungen nicht zu groß werden,



**Abb. 1:** Das DGM mit Satellitenbild (oben) und mit Seekarte (unten)

aber gleichzeitig sollte es einen möglichst großen Maßstab haben, um in der Textur des Modells geologische Strukturen des Meeresbodens gut erkennen zu können.

Letztlich konnte ein Tiefseegebiet festgelegt werden, aus dem die Insel mit ihren steilen Flanken deutlich hervortritt und bei dem sie gleichzeitig ungefähr in der Mitte des Modells liegt.

Das trägt zur mechanischen Stabilität des Modells bei und verdeutlicht den großen vertikalen Abstand von rund 5000 m zwischen dem Tiefseeboden und dem höchsten Gipfel Gran Canarias, dem Pico de las Nieves mit einer Höhe von 1950 m.

### Maßstabswahl und Überhöhung

Als »runder«, möglichst großer, horizontaler Maßstab wurde 1 : 500 000 festgelegt, womit sich das Modell gut auf drei DIN-A4-Blättern abbilden ließ.

Zusätzlich musste der vertikale Maßstab festgelegt werden. Aus praktischen Gründen sollte eine gewisse Höhe des Gesamtmodells nicht überschritten werden. Gleichzeitig sollte genügend Raum für die deutliche dreidimensionale Wiedergabe der Insel und auf den Seitenwänden ausreichend Platz für eine erläuternde Beschriftung und auch das DHyG-Logo bleiben.

Unter Berücksichtigung dieser Gesichtspunkte erwies sich eine vertikale Maßstabsüberhöhung von 1 : 5 als sinnvoll, womit sich ein »runder« vertikaler Maßstab von 1 : 100 000 ergab. Damit werden im dreidimensionalen Modell die starke Neigung der unterseeischen Sockelbegrenzung Gran Canarias und die ausgeprägte Erscheinungsform des Überwasseranteils als nahezu perfekter Kegel gut wiedergegeben.

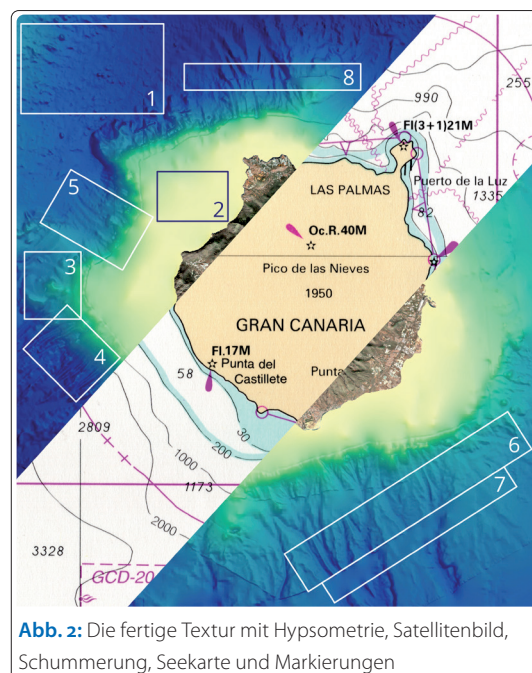


Abb. 2: Die fertige Textur mit Hypsometrie, Satellitenbild, Schummerung, Seekarte und Markierungen

### Auswahl der Seekarte

Schnell fiel die Entscheidung, in die Textur eine konventionelle Seekarte statt eines Ausdrucks einer elektronischen Seekarte (ENC) einzubinden, obwohl letzterer »moderner« gewirkt hätte. Der Grund lag vor allem darin, dass es um eine statische Kartendarstellung auf Papier und nicht etwa um eine dynamische Darstellung mittels eines elektronischen Gerätes wie etwa eines ECDIS ging. Für diesen Zweck schien die Nutzung einer Papierkarte geeigneter. Die Gründe dafür sind vielfältig und umfassen unter anderem die höhere Auflösung und die kleineren Symbole der Papierseekarte gegenüber einer ECDIS-Darstellung. Ferner sieht man in einer ENC bestimmte Informationen nicht auf den ersten Blick, sondern erst durch interaktives Anklicken.

Im Archiv des BSH in Rostock standen mehrere Papierseekarten mit unterschiedlichen Maßstäben und grafischen Informationsdichten zur Verfügung. Die Wahl fiel auf eine Karte mit klarer und einfacher Signatur, generalisiert auf den Maßstab 1 : 1,1 Millionen, die BSH-Seekarte 837 (INT 1083).

Als Herausforderung erwies sich das Scannen der Karte: Da die Auflösung einer Papierseekarte traditionell sehr hoch ist, die BSH-Karte 837 außerdem eine besonders feine Liniensignatur hat, das Kartenbild auf dem Papiermodell ungefähr doppelt so groß wie im Original sein und die Druckauflösung für das Modell sehr hoch sein würde, musste das Scannen ebenfalls mit einer sehr hohen Auflösung erfolgen (1200 dpi).

### Auswahl von Satellitenbilddaten

Für die visuelle Darstellung der Landflächen wurden frei verfügbare, mit den Sentinel-Satelliten des europäischen Copernicus-Programms aufgenommene optische Daten genutzt. Es standen genügend wolkenfreie Szenen mit einer Auflösung von 10 m zur Verfügung. Im Modell führte das zu einer Auflösung von 0,02 mm (ca. 1200 dpi), was sich als ausreichend erwiesen hat.

### Die Textur

Bei »normalen« Bergmodellen kommt in der Regel eine vergleichsweise einfach zu erzeugende Textur aus einem Luft- oder Satellitenbild zum Einsatz. Gegebenenfalls kommt noch eine aus einem DGM erzeugte Schummerung hinzu.

Beim Seamount-Modell der DHyG wurde eine wesentlich komplexere Textur realisiert, um möglichst viele hydrographische Themen abzudecken. Sie besteht aus einer geschummerten hypsometrischen Darstellung des Seegebietes, einem geschummerten Satellitenbild des Landanteils, einer teilweisen Überlagerung durch eine Seekarte und einer Markierung von geologischen und hydrographischen Besonderheiten (Abb. 2).

Die Tiefendaten des DGM sind hypsometrisch,

das heißt mit einer die Tiefen repräsentierenden Farbskala, dargestellt. Dafür wurde eine von der CAU zur Verfügung gestellte, spezielle Farbskala verwendet, die auch Betrachtenden mit Farbschwäche einen guten Eindruck der dargestellten Tiefen vermittelt.

Von den Satellitenbilddaten ist der Landanteil übernommen und in die hypsometrische Darstellung eingepasst worden.

Der kombinierte Datensatz ist mit einer aus dem DGM abgeleiteten, speziellen Schummerung versehen worden, die besonders geeignet ist, geologische Strukturen hervorzuheben. Die Parameter der Schummerung wurden interaktiv dahingehend optimiert, dass wesentliche geologische und hydrographische Merkmale des DGM möglichst deutlich dargestellt werden.

Die geschummerte Kombination aus Satellitenbild und Hypsometrie ist mit einem vom Nordosten des Modells über die Mitte der Insel nach Südwesten verlaufenden Streifen aus der Seekarte überdeckt. Im Streifen enthalten sind im Nordosten viele nautische Informationen (Leuchtturm, Hafen, Kabel) und im Südwesten beeindruckende Tiefeninformationen. Die Tiefenlinien verlaufen dabei quer über den Streifen und erlauben an den Streifenkanten einen direkten Vergleich mit der hypsometrischen Darstellung. Die Texte aus der Seekarte sind kaum abgeschnitten.

Die Visualisierung der vertikalen Charakteristika der Insel in der Seekarte, dem Satellitenbild und der Hypsometrie wird durch die dritte Dimension des Papiermodells eindrucksvoll verstärkt. Beispiele dafür sind die steilen Hänge über und unter Wasser, die 200-m-Tiefenlinie als Begrenzung des Schelfgebietes, der tiefste Einzelpunkt mit einer Tiefe von 3328 m und der Pico de las Nieves mit seiner Höhe von 1950 m.

Ergänzt wurde die Textur mit nummerierten Markierungen für einige in der Textur sichtbare geologische und hydrographische Besonderheiten des Meeresgebietes und der Datensätze wie unterseeischen Rutschungen, dem Schelfgebiet und mehreren Artefakten.

### Das dreidimensionale Papiermodell

Das Entwickeln eines dreidimensionalen Papiermodells für einen Berg ist ein komplexer Prozess: Ausgehend von einem DGM wird zunächst ein speziell für die Generierung von Papiermodellen entwickeltes Programm für die Erzeugung einer Dreiecksvermaschung eingesetzt (Dugge und Dugge 2016). Für die Dreiecksvermaschung für Papiermodelle gelten besondere Anforderungen. So können sehr kleine und sehr schmale Dreiecke schlecht geschnitten und gefaltet werden. Mit dem Programm werden die angestrebte Anzahl der Dreiecke und deren geometrischen Eigenschaften ebenso berücksichtigt wie die

Abweichung der Dreiecksflächen vom DGM. Als nächster Schritt erfolgt mit der Spezialsoftware »Pepakura« die Zusammenfassung von mehreren Dreiecken zu einzelnen, ebenen Falzelementen und schließlich deren Zuordnung zu übergeordneten, voneinander getrennten Papierelementen. Den Papierelementen werden Klebelaschen und Klebekanten zugeordnet, die ihrer Klebereihenfolge entsprechend nummeriert werden. Automatisch erfolgt dabei das Einzeichnen von Berg- und Tal-Falzlinien.

Neben dem DGM wird die Textur von Anfang an in diesen interaktiven Arbeitsprozess eingebracht, um charakteristische Geländemerkmale wie Gipfel, Rücken, Talsohlen und Bruchlinien ihrer Bedeutung entsprechend im naturgemäß stark generalisierten dreidimensionalen Modell angemessen berücksichtigen zu können. Die Neigungskorrektur und eine über die Schnittkanten hinausgehende Extrapolation der Textur erfolgen dabei automatisch.

Ein wesentlicher Schritt bei der dreidimensionalen Generalisierung ist neben der Festlegung der Kanten der Falz- und Papierelemente auch die vertikale Generalisierung. So hat es sich z. B. als sinnvoll herausgestellt, die Schelfflächen rund um Gran Canaria, das heißt das Seegebiet mit einer Tiefe von bis zu ca. 200 m, im Papiermodell als ein einziges horizontales Papierelement wiederzugeben.

Als letzter Schritt bei der Entwicklung des Papiermodells folgt der Testbau. Dabei wird geprüft, ob sich die Papierelemente problemlos ausschneiden, falzen und zusammenkleben lassen, wie lang die Bauzeit ist, ob das fertige Modell stabil ist und ob es ansprechend aussieht (Abb. 3).

### Die Seitenwände

Die Seitenwände tragen mit ihren Falzen und Verstärkungen wesentlich zur Stabilität des Gesamtmodells bei. Sie geben dem Betrachter die Möglichkeit, das Modell in die Hand zu nehmen und von allen Seiten zu betrachten, ohne befürchten zu müssen, es dabei einzudrücken, und sie ermöglichen eine ansprechende Präsentation der Modelloberfläche (Abb. 3).

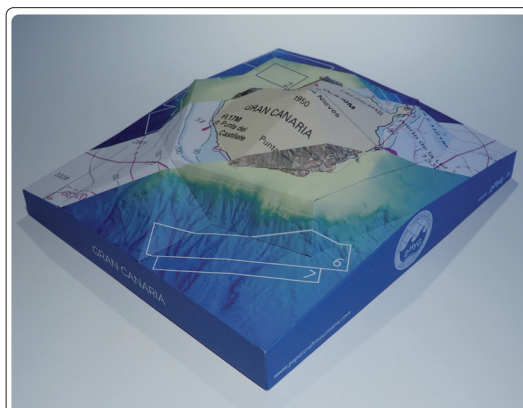


Abb. 3: Das fertig gebastelte Modell

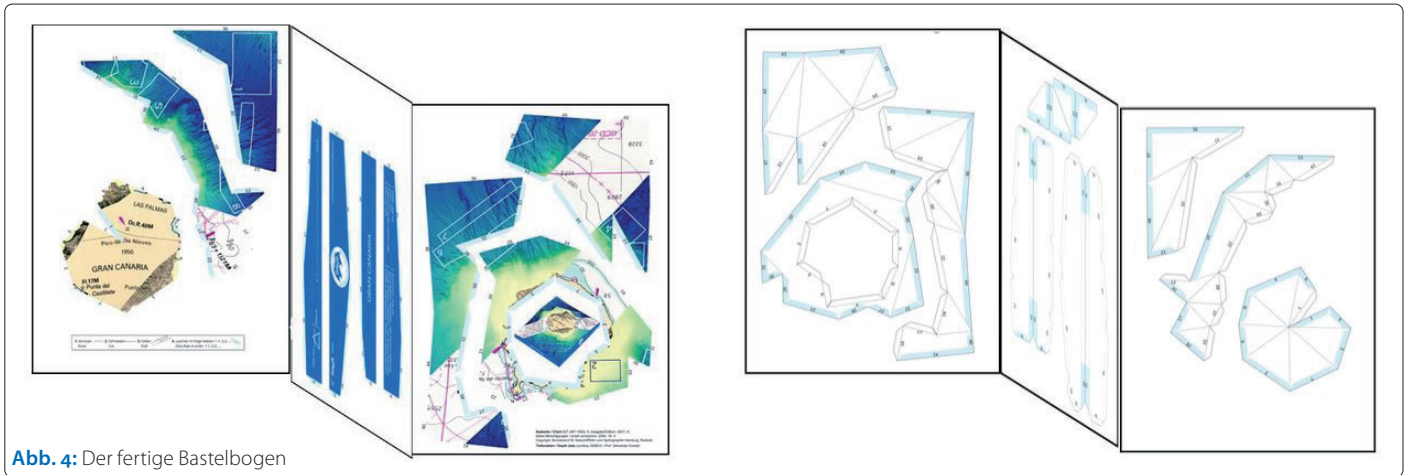


Abb. 4: Der fertige Bastelbogen

Farblich müssen die Seitenwände mit der Textur der Modelloberfläche harmonisieren, im besten Fall spiegeln sie das Thema des Modells wider. Für das Seamount-Modell wurde ein dunkles Blau gewählt.

Die Seitenwände sind ferner Träger für erläuternde kartografische Angaben wie den Maßstab, die Überhöhung und den Namen des dargestellten Berges. Beim DHyG-Modell kamen noch eine erläuternde, zweisprachige Legende mit Informationen zu geologischen und hydrographischen Besonderheiten sowie – deutlich sichtbar – das DHyG-Logo hinzu.

Alle diese Angaben haben Einfluss auf die Größe der Seitenwände, um ausreichend Platz für eine gut lesbare Darstellung und ein ansprechendes Layout zu bieten.

### Der Bastelbogen

Für das Layout des Bastelbogens ist zunächst festzulegen, was außer den auszuschneidenden Modellanteilen noch auf ihm untergebracht werden soll. Beim DHyG-Modell waren das eine 3D-Ansicht des fertigen Modells, zweisprachige Angaben zu den Quellen der verwendeten Daten und eine zweisprachige Bauanleitung.

Die auszuschneidenden Modellelemente und die Texte werden möglichst platzsparend auf dem Bogen angeordnet, der beim DHyG-Modell aus drei als Zick-Zack-Falz zusammenhängenden Seiten im Format DIN A4 besteht (Abb. 4). Jedes Element des Modells muss dabei vollständig auf eine Seite passen und darf auch bei einem Zick-Zack-Falz nicht über den Blattrand hinausragen.

Die 3D-Ansicht des Modells und die Quellenangaben sind beim DHyG-Modell auf der Vorderseite der ersten und die Bauanleitung auf der Rückseite der dritten Seite des Bastelbogens angeordnet. Dadurch sind sie bei zusammengefaltetem Bogen sichtbar und die Bauanleitung ist mit ihren detaillierten Hinweisen zur Bearbeitung von Falz- und Schnittkanten beim Basteln stets zur Hand, ohne dass man den Bogen umdrehen muss.

### Druck und Papier

Für die Herstellung des Bastelbogens sind die Wahl des Papiers, ein passgenauer Druck auf der Vorder- und Rückseite, eine gute Druckauflösung und eine hohe Qualität der Farbwiedergabe von entscheidender Bedeutung für die Baubarkeit und das ansprechende Aussehen des fertigen Modells.

Beim Modell von Gran Canaria war das besonders für die saubere Darstellung der Linien und Symbole der nautischen Seekarte und für die farbliche Wiedergabe der geschummerten Land- und Meeresbodenflächen und der Hypsometrie wichtig.

### Nachwuchs für die Hydrographie

Die Entwicklung des Bastelbogens von Gran Canaria hat fast ein Jahr gedauert. In der erreichten Qualität wäre sie nicht möglich gewesen ohne die Kompetenz, das Engagement, die Flexibilität und die Zielorientierung aller beteiligten Personen und die Unterstützung durch das BSH und die CAU.

Die Arbeit war geprägt von einem interdisziplinären Austausch zwischen allen Beteiligten und spiegelte damit ein wesentliches Merkmal aller hydrographischen Tätigkeiten wider.

Wenn sich der Geist dieser Arbeit und die Begeisterung für die vielen damit verbundenen Fachdisziplinen auch nur auf einen jungen Menschen überträgt, der dadurch für eine Tätigkeit in der Hydrographie gewonnen wird, dann hat der Bastelbogen seinen Zweck erfüllt. //

### Literatur

- Dehling, Thomas (2024): Wir sind nicht niemand. Hydrographischen Nachrichten, DOI: 10.23784/HN127-01
- Dugge, Jürnjakob; Johann Dugge (2016): A Method for Creating Papercraft Raised Relief Maps from Digital Elevation Models. Proceedings of the 10th ICA Mountain Cartography Workshop, S. 39–53
- Krastel, Sebastian; Hans-Ulrich Schminke; Colin L. Jacobs; Roland Rihm; Timothy P. Le Bas; Bárbara Alibés (2001): Submarine landslides around the Canary Islands. Journal of Geophysical Research, DOI: 10.1029/2000JB900413

# Autonomous Data Acquisition

## Safe. Smart. Sustainable.

Subsea Europe Services USV and AUV platforms efficiently gather, analyse, and deliver accurate ocean data. From site surveys to integrity monitoring, our solutions prioritise safety, cost-effectiveness, and a low-carbon footprint.

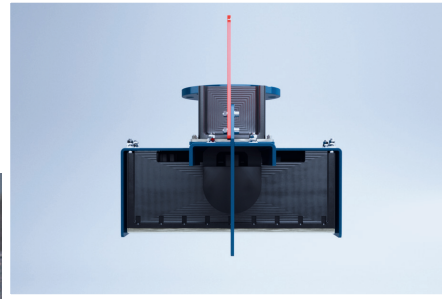
### **Survey class USVs**

Proven, trusted autonomous platforms



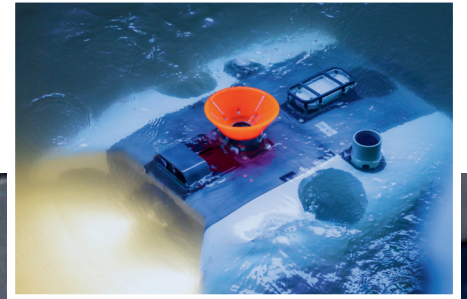
### **Integrated payloads**

Transforming your situational awareness



### **Hybrid ROVs and AUVs**

Deployed and recovered by USVs



Follow us on LinkedIn and get onboard at [subsea-europe.com](https://www.subsea-europe.com)

Consulting



# Ocean engineering from space into depth

Realise your projects in cooperation with our hydrographic services

**CTDs & SVPs**



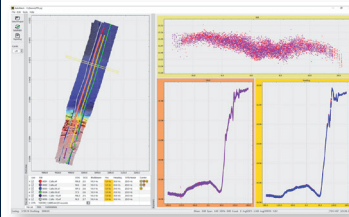
Our hydrography engineers are happy to develop systems tailored exactly to your needs and to provide professional advice and support for setting up your systems and training your staff.

MacArtney Germany benefits from being part of the MacArtney Group and enjoys unlimited access to cutting-edge engineering competences and advanced facilities.

**Acoustic sensors**



**Software**



**Position and motion sensors**



**Integration**

