

Journal of Applied Hydrography

HYDROGRAPHISCHE NACHRICHTEN

10/2025

HN 132

Vermessung
der
Küstenzone



AquapHOx Loggers & Transmitters

for optical oxygen sensors



Compact Underwater Solution for:

- ultra-high speed & ultra-trace O₂
- long-term logging & monitoring
- fast water column O₂ profiling
- Aquatic Eddy Covariance measurements

Liebe Leserinnen und Leser,

dieses Heft ist der Vermessung der Küstenzone gewidmet – einer zentralen Aufgabe der Hydrographie. In den Küstenzonen überlagern sich natürliche Dynamik, ökologische Bedeutung und gesellschaftliche Nutzung wie kaum irgendwo anders. Küsten sind Übergangsbereiche zwischen Land und Meer, in denen geomorphologische, ozeanografische und klimatische Prozesse auf engem Raum zusammenwirken. Gleichzeitig sind sie durch den steigenden Meeresspiegel, sich häufende Sturmflutereignisse und wachsenden Nutzungsdruck besonders verwundbar. Eine präzise, aktuelle und integrierte Erfassung dieser hochdynamischen Systeme ist daher Grundvoraussetzung für nachhaltigen Küstenschutz, Umweltplanung und Risikomanagement.

Die technologische Entwicklung der letzten Jahre hat das Instrumentarium der Küstenvermessung grundlegend erweitert. Neben klassischen hydrographischen Verfahren kommen heute flug- und satellitengestützte Systeme, Multisensorplattformen sowie KI-gestützte Analyseverfahren zum Einsatz. Diese ermöglichen eine zunehmend flächendeckende und zeitlich hochaufgelöste Erfassung der Küstenmorphologie, der Sedimentdynamik und der ökologischen Strukturen. Die Integration heterogener Datenquellen – von der Laserbathymetrie über multispektrale Fernerkundung bis hin zu unbemannten Messsystemen –

führt dabei zu einer neuen Qualität der Informationsgewinnung.

Gleichzeitig entstehen neue Herausforderungen. Die Heterogenität der Daten erfordert standardisierte Auswerteverfahren, leistungsfähige Dateninfrastrukturen und interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Geodäsie, Informatik, Ozeanografie und Umweltwissenschaften. Nur so lässt sich aus den wachsenden Datenmengen belastbares Wissen ableiten, das als Grundlage für Planungen und Entscheidungsprozesse dient.

Die regelmäßige Küstenvermessung liefert wichtige Informationen – auch in Hinblick auf den Umgang mit den Folgen des Klimawandels. Sie schafft die Basis für die Modellierung morphodynamischer Prozesse, für die Bewertung ökologischer Zustände und für die Entwicklung nachhaltiger Schutzstrategien.

Die in dieser HN-Ausgabe versammelten Fachbeiträge und das Wissenschaftsgespräch mit Lutz Christiansen spiegeln diese Entwicklung wider. Sie zeigen, wie innovative Messmethoden, automatisierte Datenverarbeitung und internationale Kooperation dazu beitragen, das Verständnis der Küstenprozesse zu vertiefen und praxisrelevante Entscheidungsgrundlagen bereitzustellen.

Diese Zeitschrift dient gewiss nicht als Strandlektüre – schon gar nicht im Herbst –, doch in übertragenem Sinn bildet dieses Heft eine Ausnahme.



Lars Schiller

Impressum

Journal of Applied Hydrography
HN 132 – Oktober 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:

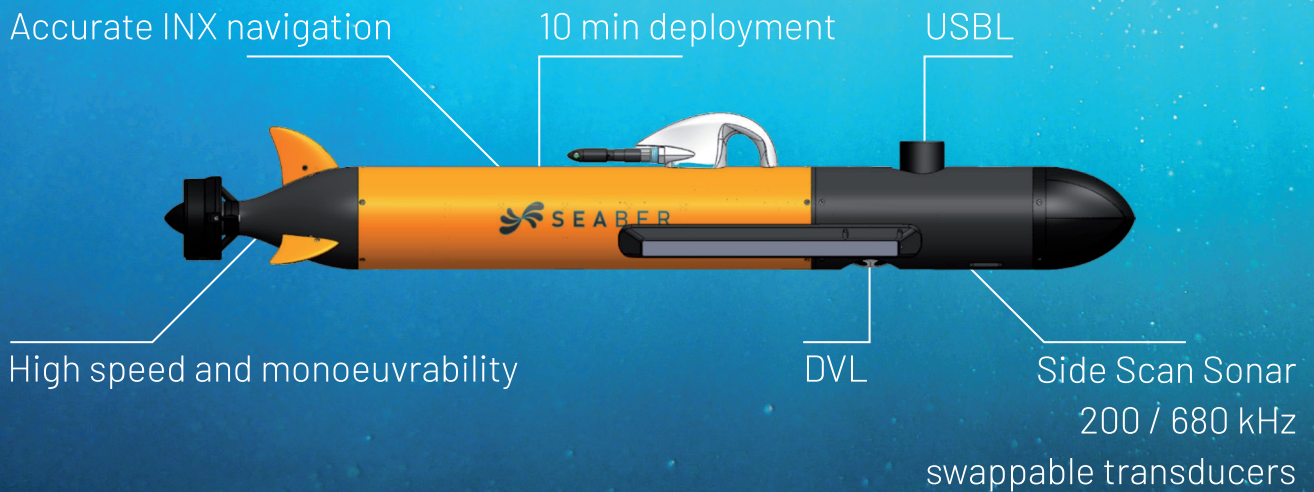
Dipl.-Ing. Peter Dugge; Dipl.-Met. Horst Hecht;
Ellen Heffner, M.Sc.; Dipl.-Phys. Holger Klindt;
Friederike Köpke, M.Sc.; Dr. Jens Schneider von Deimling;
Dipl.-Ing. Stefan Steinmetz; Dr.-Ing. Patrick Westfeld

Hinweise für Autoren und Inserenten:

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



© 2025



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



Aus dem Inhalt

Küstenzone

- 6 **Fluggestützte Topobathymetrie flacher Küstengewässer
Von der Datenaufnahme zum digitalen Abbild in HydroVISH**
Ein Beitrag von RAMONA BARAN, WOLFGANG DOBLER, WERNER BENDER und FRANK STEINBACHER
- 16 **REPMUS: A catalyst for innovation in uncrewed hydrography**
An article by RUI MIGUEL CÂNDIDO, NÁDIA RIJO and ANTÓNIO TAVARES
- 24 **Large-scale seafloor mapping of the Italian coasts using multi-sensor surveying
to characterise Posidonia oceanica and seafloor morphology in shallow waters**
An article by SANTE FRANCESCO RENDE, ALESSANDRO BOSMAN, NUNZIANTE LANGELLOTTO, VIVIANA BELVISI, RAFFAELE PROIETTI, ALFREDO PAZZINI, AGOSTINO TOMMASELLO, MONICA MONTEFALCONE, ALBERTO GUARNIERI, GIORGIO DE DONNO, VALERIO BAIOCCHI, DANIELA CARRION, FILIPPO MUCCINI, RICCARDO BARZAGHI, TANJA DUFEK, PAULA GARCIA RODRIGUEZ, MARCO FILIPPONE, BENOIT CAJELOT, DHIRA ADHIWIJANA, FEDERICO BARTALI, HUGH PARKER, MICHELLE WAGNER, NICK RACKEBRANDT, LEONARDO TAMBORRINO, KNUT HARTMANN, CONSTANTIN SANDU, ANDREAS MÜLLER and GIORDANO GIORGI
- 30 **Satellitengestützte Bathymetrie als Instrument zur schnellen Beurteilung
sturmbedingter Auswirkungen auf die Strandaufschüttung**
Ein Beitrag von EDWARD ALBADA, MORJANA SIGNORIN, LINDINO BENEDET, CHELSEA RYAN, KNUT HARTMANN, CHRISTIAN BÖDINGER and KIM KNAUER
- 38 **Monitoring küstennaher Flachwasserbereiche durch raumzeitliche Satellitenbilddatenanalyse
mittels KI-gestützter optischer Hydrographie für eine anlassbezogene Seevermessung**
Ein Beitrag von PETER GRABBERT, MIRKO BOTHE und PATRICK WESTFELD

Wissenschaftsgespräch

- 48 **»Ohne uns Geodäten bleiben die Fenster der GIS-Programme und der CAD-Programme leer«**
Ein Interview mit LUTZ CHRISTIANSEN

Forschungsschiff

- 56 **Das schwimmende Labor**
**Das neue Hereon-Forschungsschiff CORIOLIS ist Innovationsplattform, Digitalisierungsprojekt
sowie Botschafter für Klima, Küste und Technologie**
Ein Beitrag von CHRISTOPH WÖHRLE

Datenverarbeitung

- 60 **SidescanTools**
Eine Open-Source-Software zur Verarbeitung und Visualisierung von Seitensichtsonardaten
Ein Beitrag von STEFFEN STADLER, FINN SPITZ und MIA SCHUMACHER

Veranstaltung

- 64 **»From Data to Decision: Embracing the S-100 Standard«**
World ECDIS Day in Hamburg
Ein Beitrag von PETER DUGGE

Fluggestützte Topobathymetrie flacher Küstengewässer

Von der Datenaufnahme zum digitalen Abbild in HydroVISH

Ein Beitrag von RAMONA BARAN, WOLFGANG DOBLER, WERNER BENDER und FRANK STEINBACHER

Küstenzonen sind Hotspots mit komplexen Wechselwirkungen zwischen marinen, terrestrischen und klimatischen Prozessen. Aufgrund ihrer zumeist dichten Besiedlung sind die Auswirkungen des Klimawandels unter anderem über einen steigenden Meeresspiegel hier besonders kritisch und oft auch katastrophal. Für effektive Schutzmaßnahmen sowie zur Erhaltung bedeutsamer Ökosysteme, wie dem Wattenmeer in der Nordsee, ist eine genaue und hochaufgelöste Vermessung der Flachwasserbathymetrie sowohl zur Planung von Schutzmaßnahmen als auch für ein verbessertes Prozessverständnis unerlässlich. In unserem Beitrag konzentrieren wir uns daher auf die effiziente Auswertung fluggestützter Topobathymetriedaten in unserer Software HydroVISH und beleuchten hierzu spezifische Arbeitsschritte näher. Dies vor allen Dingen um zu zeigen, wie aus den gewonnenen Daten ein möglichst optimaler Nutzen im Sinne des Küstenschutzes gezogen werden kann.

Topobathymetrie | Full Waveform | Klassifizierung | Küstenmorphologie | DGM
topobathymetry | full waveform | classification | coastal morphology | DTM

Coastal zones are hotspots with complex interactions between marine, terrestrial and climatic processes. Due to their mostly dense population, the effects of climate change, including a rising sea level, are particularly critical and often catastrophic. For effective protective measures and the preservation of important ecosystems, such as the Wadden Sea in the North Sea, accurate and high-resolution surveying of shallow water bathymetry is essential both for planning protective measures and for improving our understanding of the processes involved. In our article, we therefore focus on the efficient evaluation of flight-based topographic bathymetry data in our software HydroVISH and highlight specific processing steps in more detail. The main aim is to show how the data obtained can be used to achieve the best possible benefits in terms of coastal protection.

Autoren

Dr. Ramona Baran, Dr. Wolfgang Dobler, Dr. Werner Bender und Dr. Frank Steinbacher arbeiten bei der Airborne HydroMapping GmbH in Innsbruck.

r.baran@ahm.co.at

1 Einleitung

In den letzten 10 bis 15 Jahren hat sich die luftgestützte Laserbathymetrie (ALB) sowohl von flachen Küsten- als auch Binnengewässern zu einem State-of-the-Art-Instrument in der allgemeinen Gewässervermessung entwickelt. Damit wird die räumliche (Daten-)Lücke zwischen dem klassischen topografischen Airborne Laserscanning (ALS) und der zur Vermessung der tieferen Bathymetrie eingesetzten Echolotung effektiv geschlossen. Die möglichst engmaschige Vermessung insbesondere von Küstengebieten als einem der am dichtesten besiedelten Lebensräume, wo die Auswirkungen des Klimawandels unter anderem über einen steigenden Meeresspiegel oder Sturmfluten quasi unmittelbar auf Land treffen, gewinnt dabei zunehmend an Bedeutung.

Zum einen bilden topobathymetrische Vermessungsergebnisse dabei eine wesentliche Arbeits-

grundlage im modernen Küstenschutz, denn aus den Messdaten in Form von Punktwolken werden zuallererst und zumeist hochauflösende Geländemodelle abgeleitet (Abb. 1). Mit diesen lassen sich dann beispielsweise küstennahe Sedimenttransport- und Erosionsprozesse sowie Morphodynamiken von Stränden, Dünen und Wattflächen detailliert analysieren. In diesem Kontext werden topobathymetrische Daten unter anderem verwendet für:

- hydraulische Modellierungen von Sturmfluten und Überflutungsereignissen,
- Dimensionierung und Planung von Schutzbauwerken wie Deichen, Buhnen, Wellenbrechern und Ähnlichem,
- Monitoring und Quantifizierung von Küstenerosion oder -anlandungen bei wiederholten Vermessungen eines Küstenabschnittes,

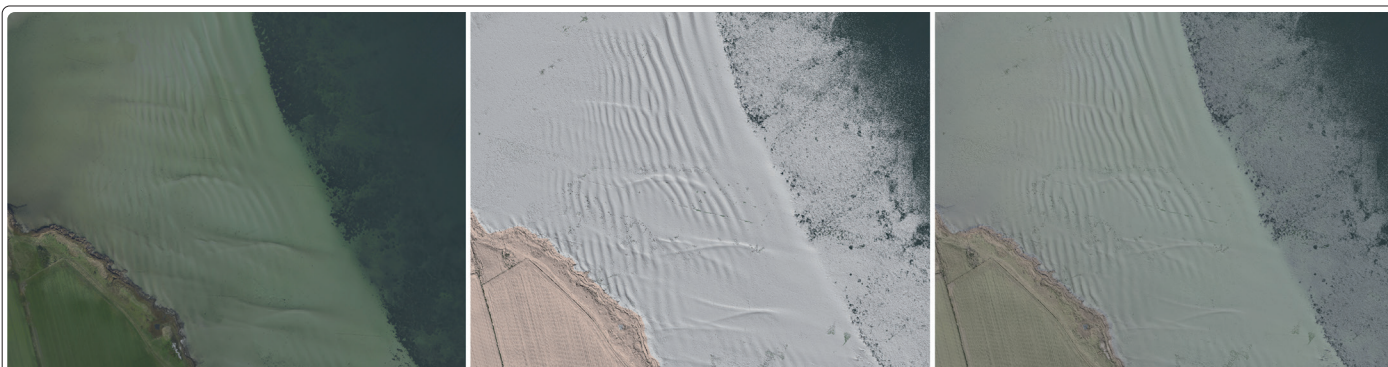


Abb. 1: Ausschnitt eines Küstenbereiches mit typischen wellen- und strömungsbedingten morphologischen Strukturelementen (links Orthobild, Mitte DGM, rechts Überlagerung DGM und Orthobild)

- Bewertung der Wirksamkeit von spezifischen Maßnahmen wie Sandaufspülungen,
- ökologische Bewertung küstennaher Renaturierungsmaßnahmen, z. B. Rückverlegung von Schutzdeichen ins Landesinnere zur Schaffung natürlicher Pufferzonen in Form von Überflutungsflächen.

Topobathymetrische Lasersysteme zeichnen sich insbesondere durch einen kleinen Footprint (Radius 25 cm) und hohe Pulsraten aus, wodurch hochaufgelöste und komplexe Punktwolken erzeugt werden. Unter klaren Wasserbedingungen können so am Ende auch kleinräumige morphologische Details der Gewässersohle bis in eine Wassertiefe von 25 m abgebildet werden (Abb. 1). Die äußeren Witterungs- und Wasserbedingungen sind entscheidende Einflussfaktoren, die die Ergebnisse von ALB-Vermessungen wesentlich beeinträchtigen können. An Meeresküsten führt insbesondere auflandiger Wind schon ab Windstärke 4 zu Wellengang mit Weißwasserbildung und dann zu teilweiser Mobilisierung der Gewässersohle, was zu Trübung führt. Des Weiteren können selbst bei ruhigen Wetterbedingungen andere Prozesse zu Trübung führen, dazu gehören etwa das Auftreten von Ebbe und Flut oder der Eintrag von Trübung an Flussmündungen. Auch die Eigenschaften der Gewässersohle selbst haben Einfluss auf das Messergebnis, eine dunkle Sohle reflektiert weniger gut als ein heller, sandiger Meeresgrund wie in Abb. 1. Wie Vegetation an Land bei der ALS-Vermessung hat auch Unterwasservegetation einen abschattenden Effekt für die Vermessung der Gewässersohle, das heißt, in Bereichen mit dichter Unterwasservegetation kann die Sohle nur lückenhaft erfasst werden. So ist beispielsweise in Abb. 1 im rechten Teil des Orthobilds Unterwasservegetation erkennbar und in genau diesem Bereich zeigen sich beim Vergleich mit dem DGM kleinräumige Lücken (Abb. 1, Mitte).

In solchen Fällen sind dann nicht nur die Laserkonfiguration selbst und die Signaldigitalisierung durch den Sensor während der Datenaufnahme

– das sogenannte Online Waveform Processing (OWP) – von Bedeutung, um bestmögliche Ergebnisse zu erzielen, sondern auch die Datenprozessierung nach der Vermessung ist entscheidend, um die Eindringung in den Wasserkörper zu erhöhen und damit die räumliche Abdeckung der Gewässersohle zu erhöhen (Abb. 2). Letzteres wird durch die Auswertung der für alle Lasersignale mit aufgezeichneten Full Waveform (FWF) unmittelbar nach der Datenaufnahme erreicht (z. B. Schwarz et al. 2017 oder Steinbacher et al. 2021).

Die bei der Datenaufnahme und -verarbeitung auflaufenden Datenmengen sind enorm. Bei der Vermessung von größeren Küstenbereichen mit einer zu erfassenden Fläche von ca. 500 km² liegt die Datengröße allein für die aufgezeichneten Rohdaten ohne weitere Prozessierung im Durchschnitt bei 3,5 bis 4 Terabyte (RXP-Format bei Befliegung mit VQ880-G, Riegl LMS). Auch die Komplexität der Daten – zeitliche Verläufe (FWF) und direkte räumliche Information (OWP-Punkte), abgespeichert im selben Datensatz (Abb. 2) – sowie die Notwendigkeit bestimmter Arbeitsschritte bei der ALB-Datenprozessierung – Berechnung der Refraktionskorrektur für Punkte unterhalb des Wasserspiegels zur Ermittlung der korrekten Gewässersohlgeometrie bezüglich Lage und Tiefe/Höhe – stellen einige Herausforderungen an die Verarbeitung und Speicherung topobathymetrischer Daten.

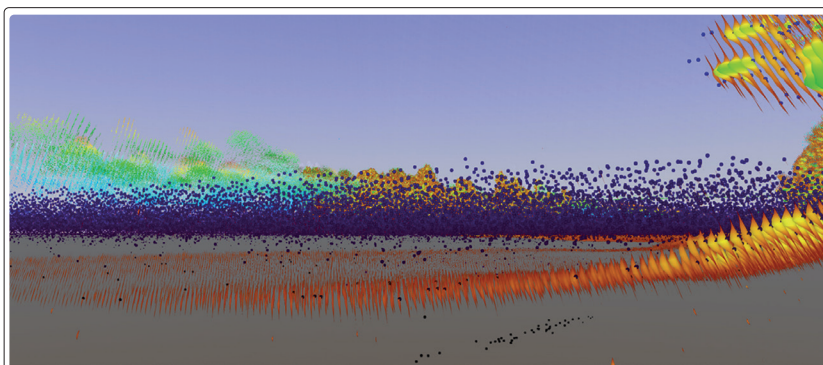


Abb. 2: Visualisierte Full Waveform im Kontext der OWP-Punktwolke zeigt den Mehrgewinn an Information über den Sohlverlauf im Gewässerquerschnitt

Die Airborne HydroMapping GmbH wurde 2010 ursprünglich als akademisches Spin-off der Universität Innsbruck gegründet. Von Anfang an verstanden und verstehen wir uns als spezialisierter Serviceprovider für topobathymetrische Daten, angefangen bei der fluggestützten Datenerhebung, über die spezifische Datenprozessierung mit der hauseigenen Software HydroVISH bis hin zur finalen Berechnung von DGMs als eine der nötigen Arbeitsgrundlagen des modernen Küstenschutzes. Einer der wesentlichen Arbeitsschwerpunkte in den letzten Jahren waren und sind großräumige Vermessungen an der deutschen sowie dänischen Nord- und Ostseeküste sowie auch der westlichen Atlantikküste von Grönland nahe Nuuk. Auf Grundlage früherer (Dobler et al. 2013) und der zuletzt gesammelten Projekterfahrungen stellen wir im Folgenden beispielhaft ausgewählte Arbeitsschritte in unserer hauseigenen Software HydroVISH dar, um optimale Ergebnisse bei der topobathymetrischen Datenauswertung zu erreichen.

2 Hintergrund zu HydroVISH

Durch die Komplexität sowohl der aufgezeichneten ALB-Daten selbst als auch der notwendigen Prozessierungsschritte sind die Anforderungen an geeignete – das heißt skalierbare – Dateiformate für eine effiziente und umfassende Datenspeicherung sowie an Softwarelösungen, die eine interaktive, schnelle und integrierte Datenverarbeitung ermöglichen, gestiegen. Verfügbaren Softwaretools fehlen oft bestimmte notwendige Datenverarbeitungsschritte oder die verwendeten Dateiformate sind zu spezialisiert und daher zu begrenzt, um den gesamten Informationsgehalt der aufgezeichneten Rohdaten während der gesamten Verarbeitungskette zu erhalten (Steinbacher et al. 2021). Darüber hinaus müssen zusätzliche Datenattribute berücksichtigt werden können, um die Analyse topobathymetrischer Punktwolken zu erleichtern. RGB-Werte aus zeitgleich aufgenommenen Luftbildern, räumliche Informationen zu Bodentypen,

Trübungs- und Wasserstandmesswerte von Pegelstationen eines untersuchten Gewässers während der Datenaufnahme sind nur einige dieser Attribute. Die Möglichkeit der Kombination mit weiteren 3D-Daten der Gewässersohle beispielsweise aus Echolotvermessungen erhöht den Mehrwert für eine ganzheitliche Prozessbetrachtung dabei erheblich. HydroVISH (z.B. Benger et al. 2007, 2017) ist die hauseigene Software zur Verarbeitung von topobathymetrischen Daten mit leistungsstarken Visualisierungsansätzen für detaillierte Einblicke und Analysemöglichkeiten dieser Daten (Abb. 2). Es sind keine weiteren Softwarepakete notwendig – alles erfolgt aus einer Hand.

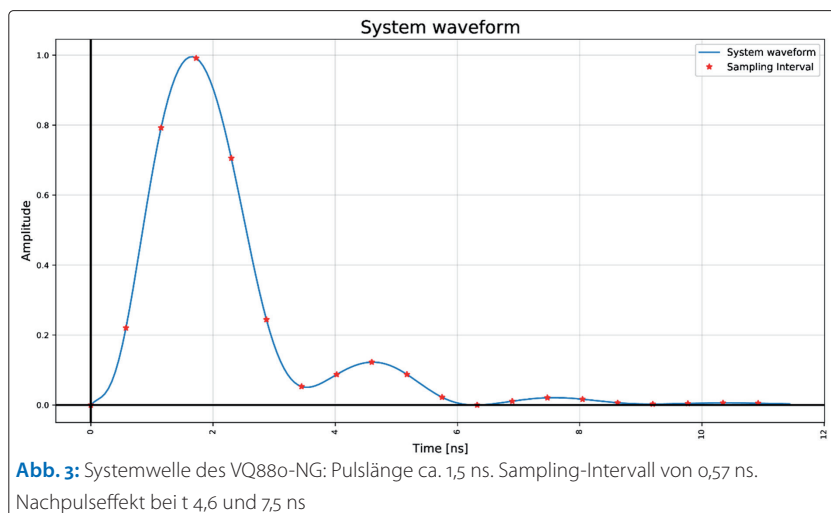
3 FWF-Auswertemethoden für die Peak-Detektion

Die aufgezeichneten Wellenformen sind eine Amplituden-Zeit-Funktion mit einem Sampling-Intervall von 0,57 ns. Die Form der aufgezeichneten Wellenformen hängt auch von der Systemwelle ab, die vom Hersteller vorgegeben ist und besteht hier aus einem möglichst kurzen, gaußähnlichen Puls (Abb. 3). Der Nachpulsereffekt (zweites und drittes Aufschwingen bei $t = 4,6$ und $7,5$ ns) ist hardwarebedingt und lässt sich nicht vermeiden. Dieser Effekt erschwert nicht die Peak-Detektion an sich, sondern vielmehr die Unterdrückung von detektierten Peaks, die nicht vom Hauptmaximum stammen.

Die vom Sensor ausgesendete Systemwelle trifft nun auf ein Objekt am Boden, den beleuchteten Target-Querschnitt (Laserfootprint) und es kommt zu einer Rückstreuung des Signals. Dieses wird von den Fotodioden im Sensor detektiert und in weiterer Folge abgespeichert. Das Zusammenspiel der Systemwelle mit dem Target-Querschnitt wird als Faltung bezeichnet. Das Ergebnis der Faltung ist daher eine durch die Systemwelle leicht geglättete Wellenform mit geringerer zeitlicher Auflösung, die bei einer Pulslänge von $\sim 1,5$ ns dann 0,45 m beträgt, damit zwei Objekte nicht überlappen. Um nun den Effekt der Systemwelle aus der Wellenform herauszurechnen, wird die aufgezeichnete Wellenform entfaltet. Die Entfaltung der FWF ist nicht immer möglich, da das Rauschen dadurch massiv verstärkt wird. Es gibt jedoch zahlreiche Möglichkeiten, wie der Target-Querschnitt rückgerechnet werden kann (z.B. Roncat et al. 2010; Schwarz et al. 2017). In HydroVISH sind vier Methoden implementiert:

- lineares Fitten von einzelnen Gaußkurven,
- Gauß'sche Zerlegung,
- Entfaltung nach Richardson und Lucy,
- hybrider Ansatz aus Gauß'scher Zerlegung und Entfaltung nach Richardson und Lucy.

Das primäre Prinzip der erwähnten Methoden ist eine genauere bzw. verlässlichere Entfernungsbe-



stimmung mit Hilfe der aufgezeichneten Wellenformen (Roncat 2016).

3.1 Ansatz mit Gauß-Funktionen

Die Entfaltung der Wellenformen wird mit Hilfe von eingepassten Gauß-Funktionen angenähert:

$$y_t = A e^{-\frac{(t - \mu)^2}{2s^2}}$$

Dabei ist t die Zeit, A die Amplitude, μ die temporale Peak-Position und s die Pulsweite oder auch Standardabweichung. Dies erfolgt unter der Annahme, dass der rückstreuende Querschnitt sich aus einer Summe von Gauß-Funktionen beschreiben lässt, die auch als Gauß'sche Zerlegung bekannt ist (Wagner et al. 2006). Drei Schritte werden dazu durchgeführt und in den nächsten Abschnitten genauer erläutert:

- Schätzen von lokalen Maxima μ ,
- Schätzen der Gauß-Parameter μ , s und A ,
- nicht lineares Fitten der Gauß-Kurven mit der Methode der kleinsten Quadrate.

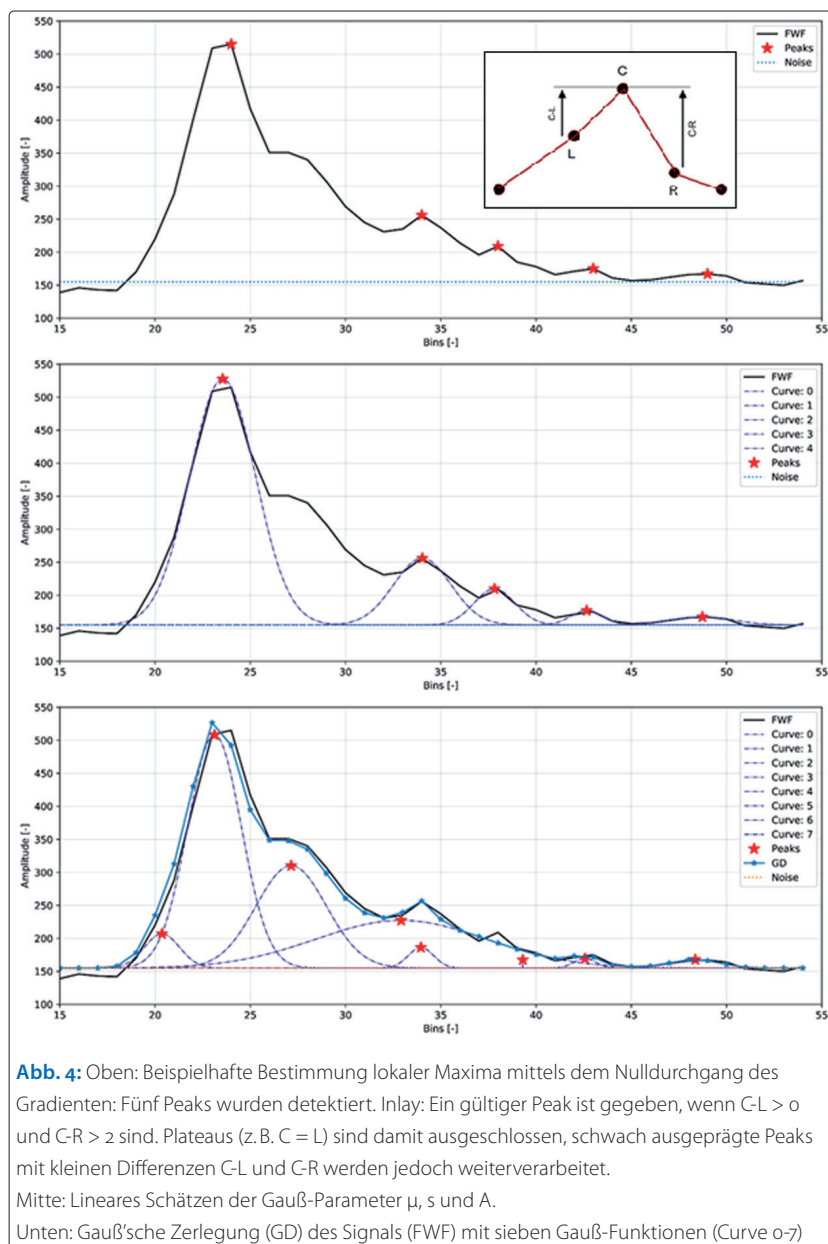
Unter dem zweiten Punkt werden als schnelle und einfache Methode (lineares Fitten von einzelnen Gauß-Kurven) dabei immer anhand von drei Punkten die Gauß-Parameter nach Caruana et al. (1986) geschätzt. Diese Ergebnisse werden dann im dritten Punkt als Startbedingung für das klassische, nicht lineare Fitten nach Wagner et al. (2006) verwendet.

3.2 Bestimmen von lokalen Maxima

Um eine Gauß'sche Zerlegung durchzuführen, wird zunächst nach potenziellen Peaks in der FWF gesucht. Die verwendete Methode ist dabei der Nulldurchgang des Gradienten, der eine gute Abschätzung der zeitlichen Lage des Peaks ergibt und auch nahe beieinander liegende Peaks noch unterscheiden kann (Wagner et al. 1999). Peaks, die durch den Nulldurchgang des Gradienten bestimmt werden, werden nur dann nicht weiter berücksichtigt, wenn sie zu einem Plateau gehören (Inlay in Abb. 4, oben) oder unterhalb des Rauschlevels liegen. Nachdem der Schwellenwert für das Rauschen nur knapp oberhalb davon liegt, werden tendenziell zu viele Peaks detektiert, die dann mit der anschließenden Klassifikation gelöscht werden müssen. Damit erreicht man aber, dass auch sehr schwach ausgeprägte Peaks detektiert werden, die sonst nur durch Nutzung anderer Verfahren wie dem Waveform-Stacking gefunden werden können. Ein Beispiel für die Bestimmung lokaler Maxima ist mit der Detektion von fünf Peaks in Abb. 4 (oben) dargestellt.

3.3 Lineares Schätzen der Gauß-Parameter mit drei Punkten

Mit der Abschätzung der zeitlichen Lage in der Wellenform (Abb. 4, oben) wird für jeden Peak eine



Gauß-Funktion eingepasst. Anhand dieser werden die Parameter μ , s und A geschätzt, die dann im Weiteren für die Gauß'sche Zerlegung verwendet werden. Für das Einpassen wird mit Hilfe des natürlichen Logarithmus die Gauß-Funktion linearisiert (Caruana et al. 1986) und anschließend über drei benachbarte Amplitudenwerte (L , C und R im Inlay in Abb. 4, oben) mit einer QR-Zerlegung gelöst. In Abb. 4 (Mitte) sind die so geschätzten Gauß-Kurven für das Beispiel aus Abb. 4 (oben) abgebildet. Nachdem die zeitliche Position μ , mit der die XYZ-Koordinate des zugehörigen Punktes bestimmt wird, eine ähnliche Lagegenauigkeit aufweist wie der OWP-Punkt, ist das lineare Schätzen als erste Auswertemethode festgelegt worden.

3.4 Gauß'sche Zerlegung

Für die Gauß'sche Zerlegung wird mit den zuvor geschätzten Parametern μ , s und A ein nicht lineares

res Fitten mittels Levenberg-Marquardt-Algorithmus durchgeführt. Dabei werden die Differenzen zwischen der Wellenform und den superponierten Gauß-Funktionen minimiert (Wagner et al. 2006). Sollten nach der ersten Iteration noch Differenzen zwischen den superponierten Gauß-Funktionen und der Wellenform vorhanden sein, werden mit den Differenzen neue Peaks detektiert und anschließend ein weiterer Iterationsprozess gestartet. Abb. 4 (unten) zeigt das Resultat dieses iterativen Prozesses, durch den im Vergleich zu Abb. 4 (Mitte) mit fünf Funktionen drei weitere Gauß-Funktionen ermittelt wurden.

3.5 Entfaltung nach Richardson und Lucy

Der Target-Querschnitt kann wie oben erwähnt durch eine Entfaltung der FWF mit der Systemwel-

le berechnet werden. Der iterative Algorithmus nach Richardson und Lucy ist rechenintensiver als die Gauß'sche Zerlegung, liefert dafür aber bessere Ergebnisse (Wu et al. 2011). Zusätzlich werden die Wellenform und die Systemwelle mittels linearer Interpolation um den Faktor 5 feiner aufgelöst, um die in analytischer Form vorliegende Systemwelle (Abb. 3) besser abzubilden. Das Ergebnis für ein analytisches Testbeispiel mit der Entfaltung nach Richardson und Lucy ist in Abb. 5 (oben) illustriert. Der Target-Querschnitt (dunkelgrün, leicht verdeckt) stellt einen Wasserkörper dar, der am Ende mit zwei Peaks versehen ist. Dieser wird mit der Systemwelle (hellgrün) gefaltet und man erhält die aufgezeichnete FWF (blau), an deren Ende nur noch ein einzelner Peak erkennbar ist. Wenn nun diese Wellenform mit der Systemwelle nach Richardson und Lucy entfaltet wird, erhält man wieder den ursprünglichen Target-Querschnitt (rot) mit dem Doppelpeak am Ende der Kurve. Ein weiterer wesentlicher Vorteil dieses Verfahrens ist, dass der durch die Systemwelle bedingte Nachpulsereffekt in der Wellenform im Target-Querschnitt nicht mehr auftritt. Nachdem durch das oben beschriebene Sub-Sampling die Auflösung der Wellenform um das Fünffache erhöht wurde, erhält man im Ergebnis eine »geschärfte« Wellenform (Abb. 5, Mitte), die eine einfache und genaue Peak-Detektion mit der im Inlay von Abb. 4 (oben) gezeigten vereinfachten Methode ermöglicht. Im Ergebnis wird die Gewässersohle nach der Entfaltung im Vergleich zur OWP räumlich deutlich besser erfasst.

4 Automatische Klassifizierung von Punktwolken

4.1 Klassifizierung über aufgezeichnete und berechnete Punkattribute

Die Klassifizierung von ALB-Daten konzentriert sich in erster Linie auf die Definition von Gelände- und Wasseroberflächenpunkten. Dabei werden eine Reihe von Klassifikationsansätzen integriert, die im Folgenden kurz beschrieben werden. Hilfreiche Parameter für die Klassifizierung sind bei der Aufnahme abgespeicherte Punkattribute, wie z. B. die Return Number in Kombination mit der Number of Returns für jeden Punkt. Insbesondere die Vor-Klassifizierung von trockenem Gelände ist durch die Verwendung von Single Returns möglich (Abb. 6). In einem weiteren Schritt müssen Punkte für die Gewässersohle unterhalb der Wasseroberfläche definiert werden. Aufgrund von Ausreißern unterhalb des Geländes, die durch die FWF-Verarbeitung induziert werden, ist eine Punktklassifizierung allein über geometrische Merkmale nicht möglich. Die FWF-Verarbeitung liefert nicht nur eine bessere Abdeckung des Gewässerbodens, sondern eben auch eine dickere Wassersäule und

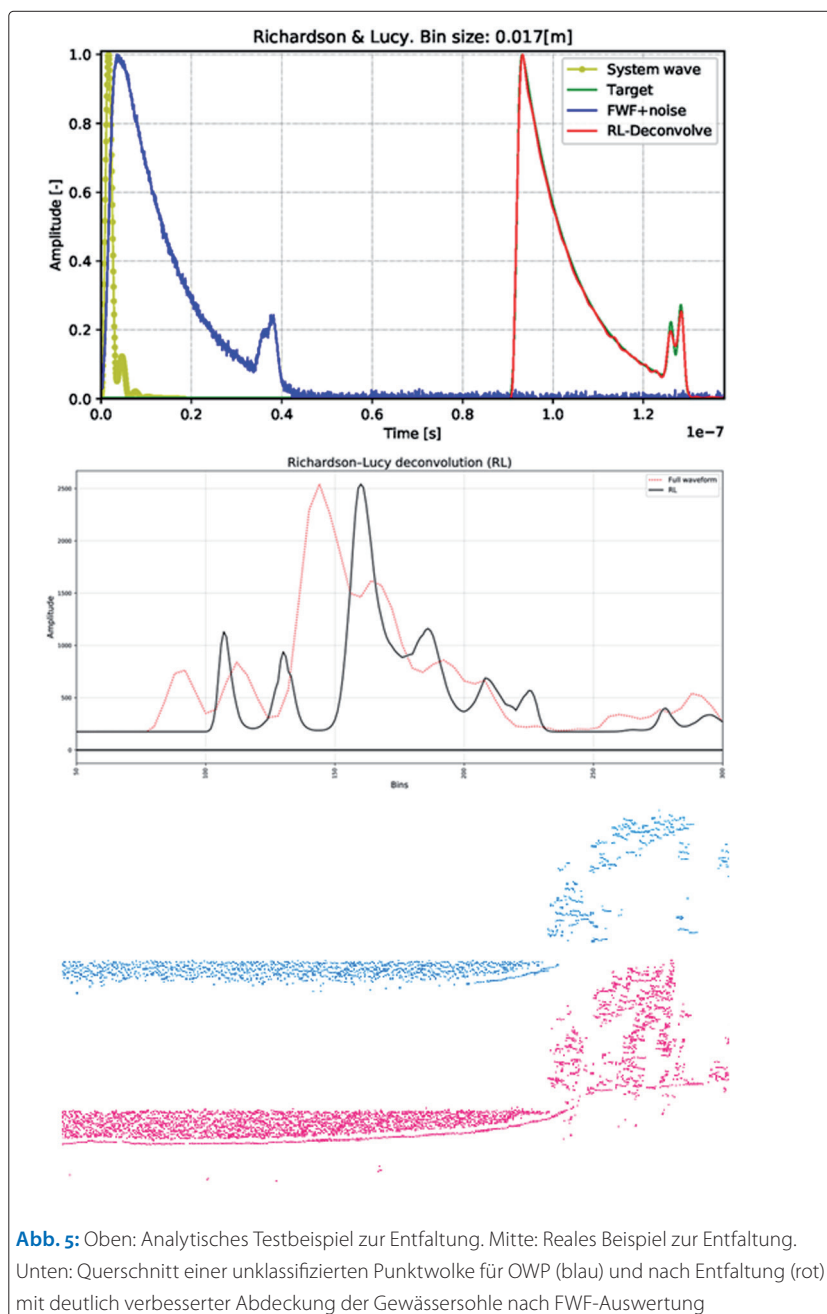


Abb. 5: Oben: Analytisches Testbeispiel zur Entfaltung. Mitte: Reales Beispiel zur Entfaltung. Unten: Querschnitt einer unklassifizierten Punktwolke für OWP (blau) und nach Entfaltung (rot) mit deutlich verbesserter Abdeckung der Gewässersohle nach FWF-Auswertung

gegebenenfalls mehr Ausreißer. Hierfür ist die Amplitude als weiteres Punkattribut gut geeignet. In Abb. 7 (unten) ist der Geländeverlauf unterhalb der Wasseroberfläche als ein Bereich mit Punkten lokaler Amplitudenmaxima sichtbar, unabhängig von der Anzahl und Verteilung der darunter liegenden Ausreißer.

Zur Geländedetektion in ALS/ALB-Punktwolken werden der Zusammenfassung von Lohani und Ghosh (2017) folgend unter anderem morphologische Filter (z.B. Sithole 2001; Meng et al. 2009) und oberflächenbasierte Filter (z.B. Kraus und Pfeifer 1997; Lohmann et al. 2000) und deren Erweiterungen sowie Varianten eingesetzt. Hier werden geometrische Eigenschaften wie die Planarität berechnet, die angibt, wie sehr ein lokaler Bereich in der Punktwolke einer Ebene ähnelt (Abb. 8). Außerdem können mit Hilfe der lokalen planaren Regression Vegetationspunkte in der Punktwolke sehr gut von der Geländeklassifizierung entfernt werden. Diese Attribute und Methoden bieten hilfreiche Indikatoren für die Bereinigung der zuvor extrahierten Geländepunkte, um damit dann die automatische Klassifizierung der Geländepunkte über und unter Wasser abzuschließen (Abb. 9). Gebäude und insbesondere Dächer werden über dreidimensionalen Alpha Shapes identifiziert. Diese lineare Approximation des Datensatzes rekonstruiert die allgemeine Form der Punktwolke. Mit einer guten Schätzung der Alpha-Shape-Werte ist es möglich, nur Geländepunkte zu erfassen und so Gebäude und andere Strukturen von der Geländeklassifizierung zu trennen.

4.2 Klassifizierung mit Random Forest

Der in HydroVISH implementierte Random-Forest-Algorithmus (Breiman 2001) ist eine leistungsstarke Methode des maschinellen Lernens, die insbesondere für die Verarbeitung von ALB/ALS-Punktwolken verwendet wird (Ni et al. 2017). Er funktioniert, indem er eine Vielzahl von Entscheidungsbäumen kombiniert, um ein robustes Modell zu erstellen. Diese Bäume werden unabhängig voneinander trainiert, wobei jeder Baum auf einem zufälligen Unterdatensatz des Gesamtdatensatzes arbeitet. Dieser Ansatz trägt dazu bei, Überanpassung zu vermeiden und die Vorhersagegenauigkeit der Klassifizierung zu verbessern.

Für die Verarbeitung von ALB/ALS-Punktwolken können verschiedene Merkmale bzw. Datenattribute verwendet werden, um den Random-Forest-Algorithmus zu trainieren. Dazu gehören beispielsweise räumliche Positionen, der Normalenvektor oder die Amplitude der Rückkehrsignale, da sie in gewissem Maß Information über die Gelände- und Oberflächenbeschaffenheit und über deren Umgebung beinhalten.

Der entscheidende Vorteil des Random-Forest-Algorithmus ist hierbei die Fähigkeit, mit großen

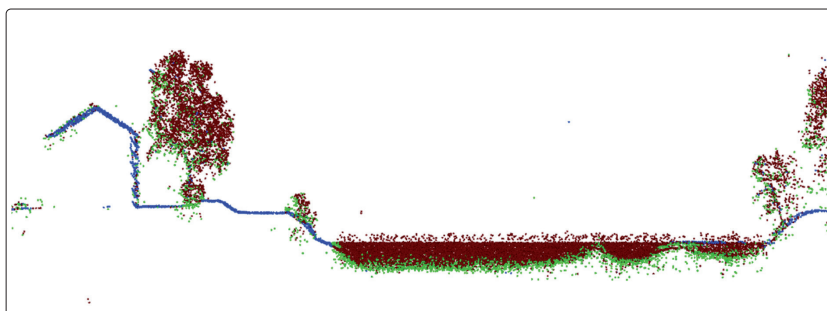


Abb. 6: Querschnitt einer unklassifizierten Punktwolke eingefärbt nach Last Return in Grün (Return Number = Anzahl der Returns) und Single Returns in Blau (Return Number = Number of Returns = 1). Sowohl Return Number als auch Number of Returns werden bei der ALB-Aufnahme als Punkattribute abgespeichert

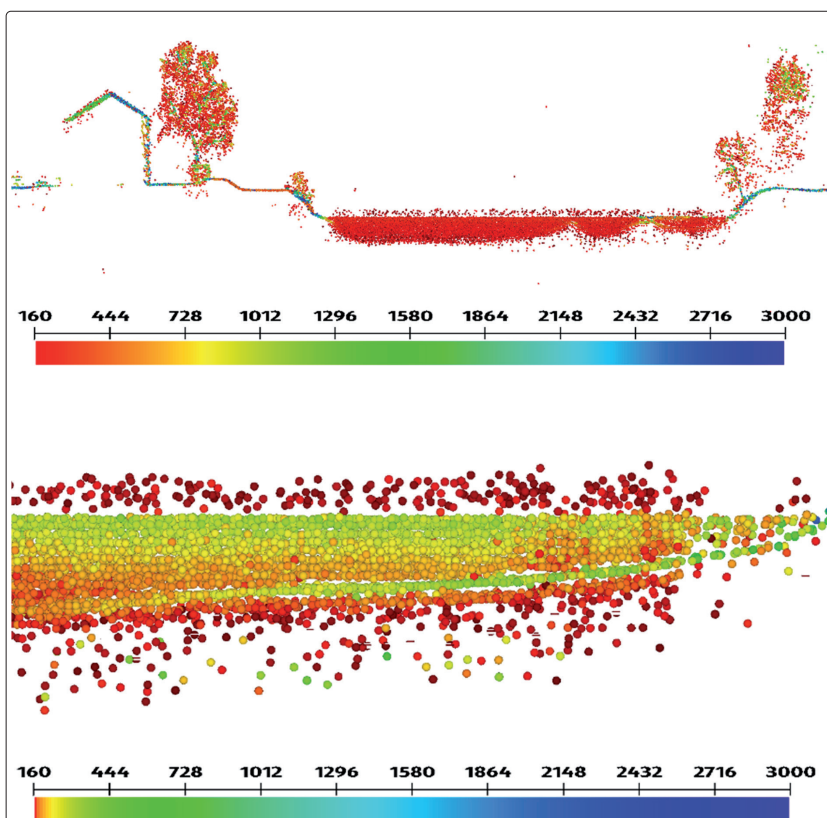


Abb. 7: Querschnitt (oben) und Detailquerschnitt (unten) einer unklassifizierten Punktwolke, eingefärbt nach Amplitude

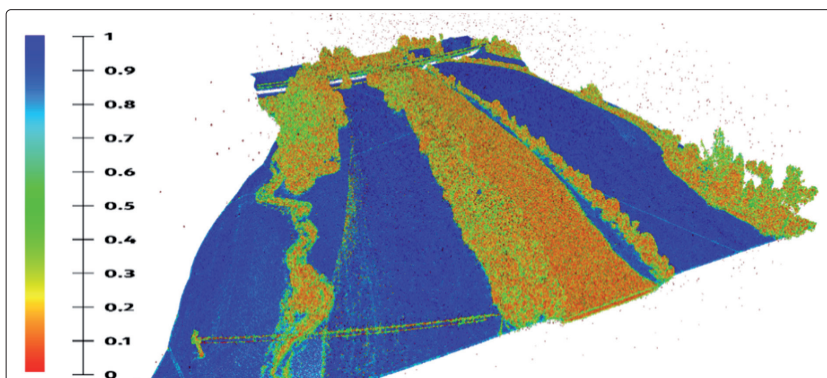
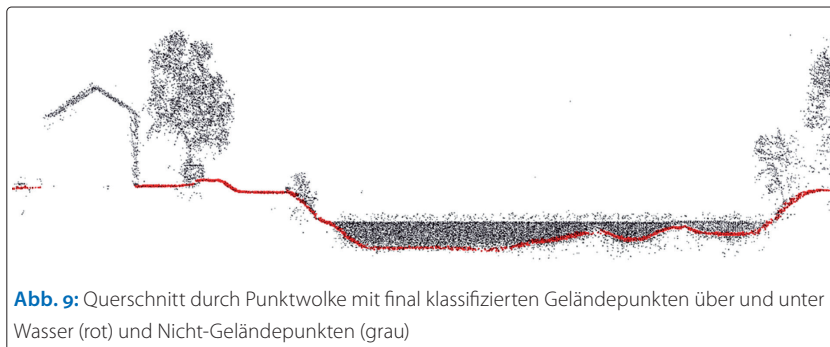


Abb. 8: Punktwolke eingefärbt nach Planarität: blaue Bereiche entsprechen hoher Planarität und rote Bereiche geringer Planarität

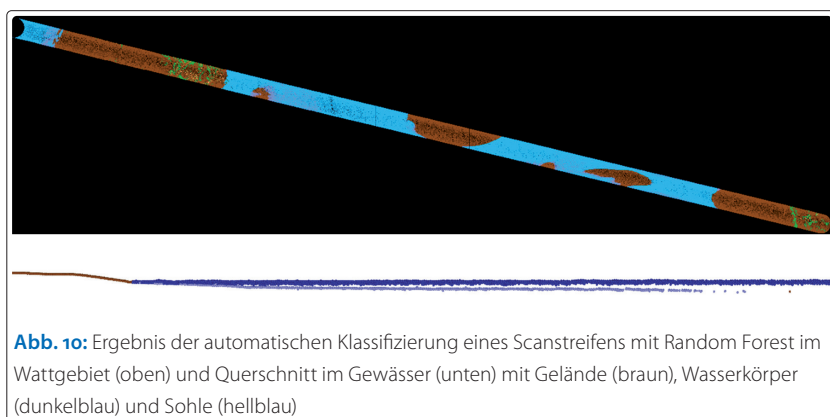


Datensätzen effizient umzugehen, ohne dass eine aufwendige Vorverarbeitung erforderlich ist. Durch die Kombination der Vorhersagen vieler Bäume kann der Random-Forest-Algorithmus präzise Ergebnisse liefern, wie Abb. 10 beispielhaft anhand eines Scanstreifens zeigt. Die Vorklassifizierung erfolgt streifenweise in die grundlegenden Klassen:

- 2 = Boden trocken,
- 4 = Vegetation,
- 6 = Gebäude,
- 8 = Wasser (Wasserspiegel + Wasserkörper),
- 10 = Sohle.

5 Manuelle Editierung von Punktwolken

Die automatische Klassifizierung von ALB-Punktwolken ist nicht fehlerfrei und weist dann lokal begrenzte Fehler auf, z.B. als Wasseroberfläche/ Wasserkörper klassifizierte Gewässersohle (Abb. 11, oben) oder in urbanem Gebiet als Vegetation klassifizierte Hausfassaden sowie vice versa und als Boden klassifizierte Dachflächen (Abb. 11, unten). Zudem kann in besonderen Fällen der geforderte Detailgrad der Punktklassen bezüglich spezifischer Objekte insbesondere von wasserbaulicher Relevanz wie z.B. Buhnen, Brückenpfeilern, Dalben, Brücken usw. bisher nicht ausreichend über automatische Ansätze abgebildet werden. Daher werden die automatischen Klassifizierungsergebnisse der ALB-Punktwolke in HydroVISH grundsätzlich visuell geprüft und entsprechend den jeweiligen Anforderungen manuell korrigiert.



Dafür sind ein effizientes manuelles Toolkit zur Bearbeitung von Punktwolken sowie eine schnelle und flexible Visualisierung und Navigation in Punktwolken unabhängig von der Dateigröße wichtige Voraussetzungen, um den manuellen Korrekturaufwand für Klassifizierungsergebnisse zu minimieren. Manuelle Bearbeitungswerkzeuge sind oft Standardkomponenten verschiedener verfügbarer ALS/ALB-Softwarepakete, wie beispielsweise Terrasolid (Terrasolid Ltd.) oder RiProcess (RIEGL LMS; Steinbacher et al. 2021). Hier stellen wir kurz die in HydroVISH integrierten manuellen Editierwerkzeuge vor (Benger et al. 2023).

5.1 Interaktive Navigation und Selektion

Um für den Benutzer die Orientierung und Navigation in einem globalen ALB-Datensatz für oftmals lokal begrenzt notwendige Korrekturen der automatischen Klassifizierung in HydroVISH zu erleichtern, ist die 3D-Anzeige und Navigation sowohl im gesamten Datensatz als auch in kleineren durch den Benutzer definierbaren großen Teilabschnitten möglich (Abb. 12, oben). Wie in der Bildbearbeitung kann zur Punktauswahl ein Umriss auf dem Bildschirm gezeichnet werden, der dann in den 3D-Raum projiziert wird, um tatsächliche Punkte auszuwählen (Abb. 12, Mitte). Das Programm bietet mehrere Funktionen:

- Polygon: Mit jedem Mausklick wird ein weiterer Punkt hinzugefügt, die Punkte werden durch gerade Linien verbunden.
- Freihand: Während die Maustaste gedrückt gehalten wird, werden der Form Punkte hinzugefügt, während die Maus bewegt wird.
- Eine zuvor unter anderem via Polygon oder Freihand definierte Form kann über den Bildschirm gezogen werden, ähnlich wie ein Pinsel in Adobe Photoshop (Abb. 12, Mitte).

Das Zeichenwerkzeug bietet Auswahlaktionen, die so konfiguriert werden können, dass sie je nach Wahl des Benutzers verschiedene Datenbearbeitungsaktionen ausführen:

- Ohne Konfiguration muss zum Zeichnen einer Auswahl in der Benutzeroberfläche eine bestimmte Schaltfläche angeklickt werden, um Punkte auszuwählen. Dieser Modus ist nützlich, wenn der Benutzer zuerst sorgfältig eine Form zeichnen möchte, bevor er eine Auswahl trifft.
- Die Auswahl kann sofort bei jeder Änderung der Form vorgenommen werden, sowohl beim Hinzufügen weiterer Punkte zur Umrissform (Polygon/Freihand) als auch beim Bewegen einer definierten Form über den Bildschirm (Pinsel).
- Die Auswahl kann vorgenommen werden, wenn die Umrisszeichnung geschlossen ist, das heißt wenn der letzte Punkt eines Umrisses gezeichnet wurde und der Umriss gelöscht wurde,

um eine neue Zeichenoperation zu starten. Dies geschieht in der Regel mit einem modifizierten Mausklick, z. B. Alt + linke Maustaste oder rechte Maustaste, um diesen Vorgang vom Zeichnen der Form zu unterscheiden.

5.2 Klassenbezogene Editierung und Nachvollziehbarkeit

Die Kennzeichnung von Punkten durch Zuweisung ganzzahliger Werte ist das Ergebnis eines Klassifizierungsprozesses zur Identifizierung von Objekten in einer Punktwolke (Abschnitt 4.). Die manuelle Korrektur verbessert die Klassifizierung und liefert die wesentlichen Grundlagendaten für ein verfeinertes Training von Algorithmen via Machine Learning wie mit Random Forest (Abschnitt 4.2.). Bei solchen vorab klassifizierten Datensätzen müssen in der Regel nur wenige Punkte neu gekennzeichnet werden (Abb. 11). Daher ist es wünschenswert, Klassen in »editierbar« oder »nicht edi-

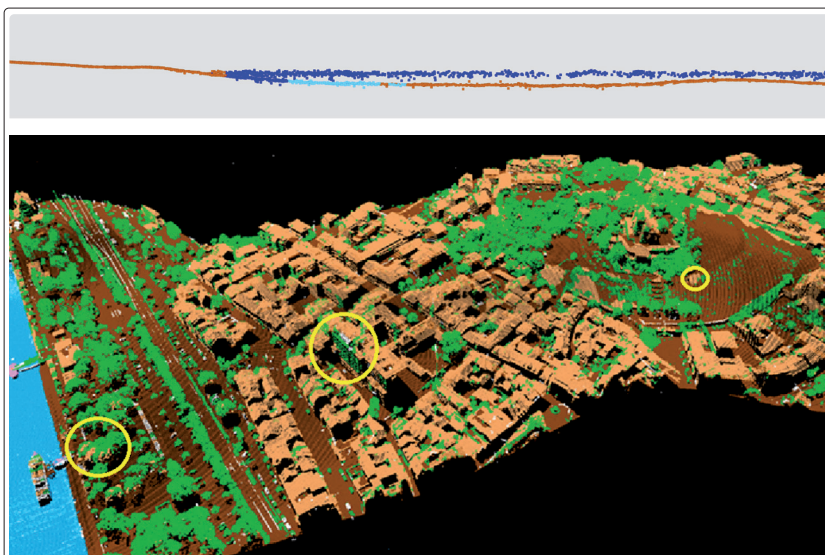


Abb. 11: Beispiele für lokale Fehlklassifizierungen in ALB-Punktwolken im Gewässer (oben) und in urbanem Gebiet (unten). Erläuterung im Text

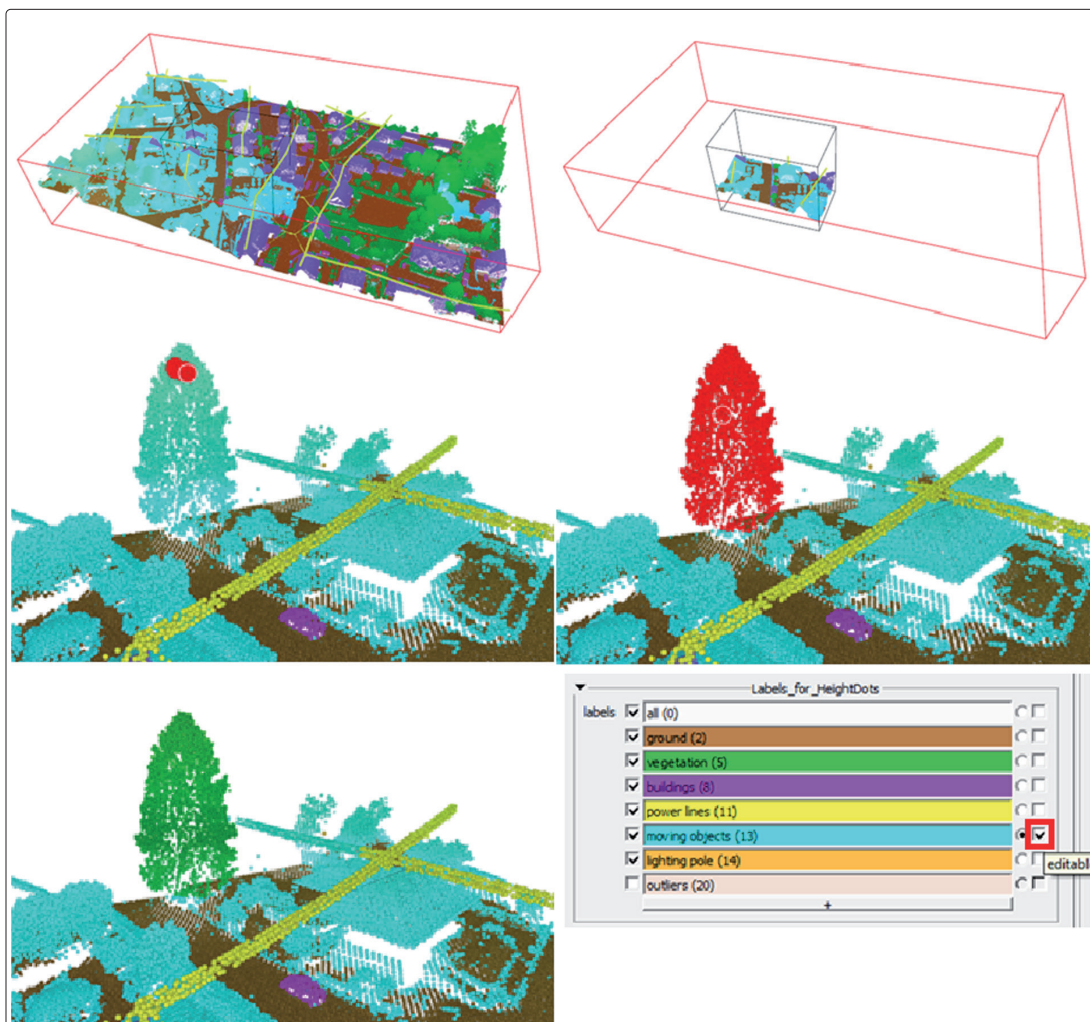


Abb. 12: Oben: Möglichkeit der manuellen Bearbeitung der Punktwolkenklassifizierung entweder in gesamter Punktwolke (links) oder in durch den Benutzer frei dimensionierbaren Teilabschnitten (rechts).

Mitte: Manuelle Punktauswahl in HydroVISH via Pinsel-Modus mit Kreisform (rot).

Unten: Finale Zuweisung der korrekten Klasse (grün) für zuvor ausgewählte Punkte sowie Festlegung der Editierbarkeit einzelner Punktklassen

tierbar« zu unterscheiden (Abb. 12, unten rechts). Nach Fertigstellung der Punktauswahl kann die korrekte Klasse über eine vom Benutzer definierte Tastenkombination oder eine Schaltfläche der Benutzeroberfläche den ausgewählten Punkten zugewiesen werden (Abb. 12, unten links).

Aber auch bei der manuellen Korrektur der Klassifizierung können Fehler passieren. Um diese auch im Nachgang nachvollziehen zu können, können sämtliche via HydroVISH durchgeführten Korrekturschritte zur Klassifizierung einer Punktwolke gespeichert werden und sind auch nach späterem Neustart des Programmes reproduzierbar. Undo/Redo-Operationen während der manuellen Bearbeitung sind in vielen Anwendungen üblich und in HydroVISH persistent verfügbar als (optionaler) Teil der verarbeiteten Daten. Das bedeutet, wenn festgestellt wird, dass bei der Bearbeitung ein Fehler gemacht wurde, kann dieser mit der Undo-Funktion auch nachträglich behoben und der Klassifizierungsstand vor dem Fehler wiederhergestellt werden. Der Undo-Modus funktioniert dabei auch über eine konfigurierbar beliebige Anzahl von Korrekturschritten hinweg und bleibt im Datensatz nachvollziehbar gespeichert. Gleiches gilt für durchgeführte Redo-Operationen während der manuellen Korrektur. Das Vorgehen und der datentechnische Hintergrund dazu sind in Benger et al. (2023) detailliert beschrieben.

6 Geplante Entwicklungen: Bestimmung minimaler Wassertiefe

In den etablierten Standardanwendungen werden Sohlpunkte bestimmt und daraus ein Unterwasser-DGM. Jedoch liefert die FWF auch in jenen Regionen Information, wo keine Sohlpunkte identifiziert werden können, da die Länge der FWF und damit die Eindringtiefe bekannt ist. Sofern das Signal der FWF durch ausreichende Reflexion im

Wasserkörper (das heißt Trübung) signifikant über dem instrumentellen Rauschen liegt, lässt sich damit – unter Berücksichtigung der Refraktion – die minimale Tiefe der Wassersäule bestimmen, was beispielsweise für die Schifffbarkeit des entsprechenden Gewässers von Bedeutung sein kann. Mangels Nachfrage sind derartige Erweiterungen der FWF-Auswertung bislang noch nicht ausreichend untersucht, jedoch durchaus Forschungsgegenstand weiterer Entwicklungen.

7 Abschließende Bemerkungen

Die Prozessierung topobathymetrischer Daten umfasst noch weitere, hier jedoch nicht näher erläuterte Arbeitsschritte wie die MTA-Berechnung (Multiple Time Around), den Streifenabgleich, die Berechnung der Refraktion oder Qualitätsnachweise. Aber die hier herausgestellten Schritte zeigen, wie komplex der Umgang mit derlei Daten tatsächlich ist und wie wichtig dabei jeder einzelne Arbeitsschritt für optimale Ergebnisse ist. Mit der Verarbeitung topobathymetrischer Daten in HydroVISH wird eine konsistente Prozesskette ausgehend vom Rohdatensatz bis zum finalen Datenprodukt wie einem DGM ermöglicht, ohne in ein anderes Softwarepaket zu wechseln. Dabei ist es auch möglich, in HydroVISH Datensätze weiterer topobathymetrischer Sensoren ausgehend vom entsprechenden Rohdatenformat durch die Implementierung einer jeweiligen Schnittstelle zu prozessieren. Nachdem sich über die luftgestützte Topobathymetrie bisherige Datenlücken in der Flachwasserzone zwischen dem Vorland hin zur mittels Echolot vermessenen tieferen Bathymetrie schließen lassen, ist die Kombination der Messergebnisse aus beiden Vermessungen für die ganzheitliche Betrachtung eines Küstenraums die optimale Lösung und auch dies ist mit HydroVISH effizient möglich (z. B. Dobler et al. 2013). //

Literatur

- Benger, Werner; Georg Ritter; René Heinzl (2007): The Concepts of VISH. 4th High-End Visualization Workshop, Berlin. Lehmanns Media-LOB.de, Obergurgl, Austria, pp. 26–39
- Benger, Werner; Wolfgang Dobler; Frank Steinbacher; Ramona Baran (2017): New technical opportunities for efficient management and integration of big data from topobathymetric projects in applications, data processing and management: Teradot rendering Bavaria in HydroVISH, KomVISH. Hydro 2017 Conference Proceedings, p. 6
- Benger, Werner; Anca Voicu; Ramona Baran; Cosmin Barna; Frank Steinbacher; Loredana Gonciulea (2023): The Method of Mixed States for Interactive Editing of Big Point Clouds. Proceedings of the WSCG 2023 Conference, DOI:10.24132/CSRN.3301.21
- Breiman, Leo (2001): Random Forests. Machine Learning 45, DOI: 10.1023/A:1010933404324
- Caruana, Richard A.; Roger B. Searle; Thomas Heller; Saul I. Shupack (1986): Fast Algorithm for the Resolution of Spectra. Analytical Chemistry, DOI: 10.1021/ac00297a041
- Dobler, Wolfgang; Ramona Baran; Frank Steinbacher; Marcel Ritter; Manfred Niederwieser; Werner Benger; Markus Aufleger (2013): Die Verbindung moderner und klassischer Gewässervermessung – Airborne Hydromapping und Echolotvermessung entlang der Ostseeküste nordöstlich von Kiel. Hydrographische Nachrichten, Nr. 95, pp. 16–22
- Kraus, Karl; Norbert Pfeifer (1997): A new method for surface reconstruction from laser scanner data. In: IAPRS, XXXII, 3/2W3, Haifa, Israel
- Lohani, Bharat; Suddhasheel Ghosh (2017): Airborne LiDAR technology: A review of data collection and processing systems. Proceedings of the National Academy of Sciences, DOI: 10.1007/s40010-017-0435-9

Lohmann, Peter; Andreas Koch; Michael Schäffer (2000):

Approaches to the filtering of laser scanner data. The International Archive of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXIII (B3/1), pp. 540–547

Meng Xuelian; Le Wang; José Luis Silván-Cárdenas; Nate Currin

(2009): A multi-directional ground filtering algorithm for airborne LIDAR. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2008.09.001

Ni, Huan; Xiangguo Lin; Jixian Zhang (2017): Classification of ALS point cloud with improved point cloud segmentation and random forests. Remote Sensing, DOI: 10.3390/rs9030288

Roncat, Andreas; Gunther Bergauer; Norbert Pfeifer (2010):

Retrieval of the backscatter cross-section in full-waveform LIDAR data using B-splines. Proceedings of the International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVIII (3B), pp. 137–142

Roncat, Andreas (2016): Full-Waveform-Laserscanning:

Moment(e), da geht noch mehr! Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation (VGI), Nr. 104(4), S. 167–177

Schwarz, Roland; Norbert Pfeifer; Martin Pfennigbauer;

Andreas Ullrich (2017): Exponential Decomposition with Implicit Deconvolution of Lidar Backscatter from the Water Column. Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science, DOI: 10.1007/s41064-017-0018-z

Sithole, George (2001): Filtering of laser altimetry data using

a slope adaptive filter. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXIV (3/4), pp. 203–210

Steinbacher, Frank; Wolfgang Dobler; Werner Benger;

Ramona Baran; Manfred Niederwieser; Wolfgang Leimer (2021): Integrated Full-Waveform Analysis and Classification Approaches for Topo-Bathymetric Data Processing and Visualization in HydroVISH. Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science, DOI: 10.1007/s41064-021-00150-3

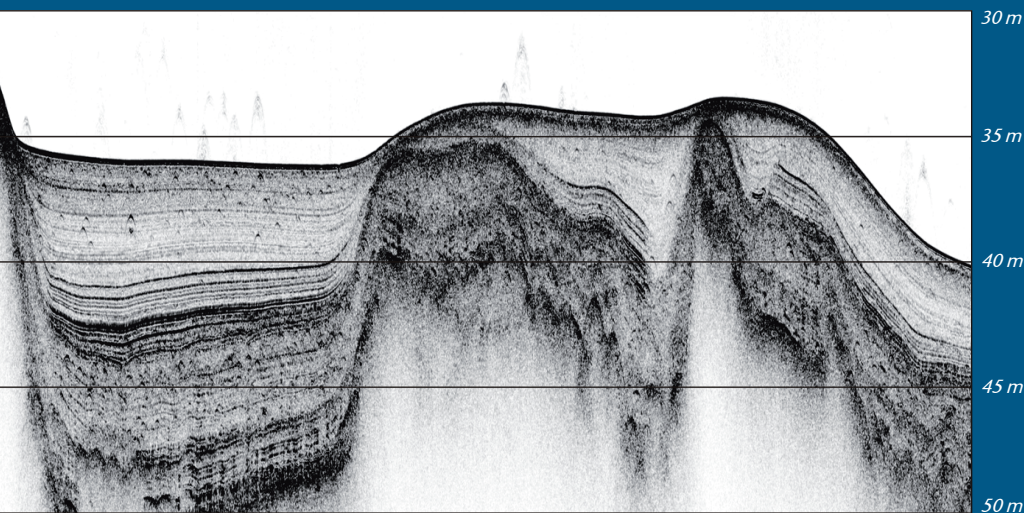
Wagner, Wolfgang; Andreas Ullrich; Thomas Melzer; Christian Briebe; Karl Kraus (1999): From single-pulse to full-waveform airborne laser scanners: Potential and practical challenges.

International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXV

Wagner, Wolfgang; Andreas Ullrich; Vesna Ducic; Thomas Melzer; Nick Studnicka (2006): Gaussian decomposition and calibration of a novel small-footprint full-waveform digitising airborne laser scanner. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2005.12.001

Wu, Jiaying; J. A. N. van Aardt; Gregory P. Asner (2011): A comparison of signal deconvolution algorithms based on small-footprint LiDAR waveform simulation. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, DOI: 10.1109/TGRS.2010.2103080

www.innomar.com



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

Innomar Parametric Sub-Bottom Profilers

- ▶ Discover sub-seafloor structures and buried objects (cables, pipelines)
- ▶ Acquire unmatched hi-res sub-seabed data with excellent penetration
- ▶ Cover all depth ranges from less than one metre 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

Next User Workshop "Seabed Acoustics" 5/6. Nov. 2025, Rostock / DE

Innomar Technologie GmbH • Schutower Ringstr. 4 • DE-18069 Rostock • Germany

▶ Shallow-Water Solutions



▶ High-Power Solutions



▶ Remotely-Operated Solutions



▶ Multi-Transducer Solutions



Innomar



A NORBIT Company

REPMUS: A catalyst for innovation in uncrewed hydrography

An article by RUI MIGUEL CÂNDIDO, NÁDIA RIJO and ANTÓNIO TAVARES

REPMUS (Robotic Experimentation and Prototyping with Maritime Unmanned Systems) is an annual multinational exercise led by the Portuguese Navy with NATO, EU, academia and industry partners. Unlike traditional military drills, it focuses on technological development, prototyping and integration of uncrewed systems across maritime, aerial and subsurface domains. REPMUS24 gathered over 2,000 participants from 30+ nations to test capabilities in realistic scenarios, such as hydrography, rapid environmental assessment (REA), amphibious surveys, glider-based oceanographic monitoring and critical underwater infrastructure protection. The exercise accelerates innovation by transitioning prototypes into operational tools, fostering interoperability and knowledge exchange.

REPMUS | maritime unmanned systems (MUS) | rapid environmental assessment (REA) | critical underwater infrastructure (CUI) protection | multi-domain operations (MDO)
REPMUS | maritime unbemannte Systeme (MUS) | schnelle Umweltbewertung (REA) | Schutz kritischer Unterwasserinfrastruktur (CUI) | Multi-Domain-Operationen (MDO)

REPMUS (Robotic Experimentation and Prototyping with Maritime Unmanned Systems) ist eine jährliche multinationale Übung unter der Leitung der portugiesischen Marine mit Partnern aus der NATO, der EU, der Wissenschaft und der Industrie. Im Gegensatz zu traditionellen Militärübungen konzentriert sie sich auf die technologische Entwicklung, das Prototyping und die Integration unbemannter Systeme in den Bereichen See, Luft sowie unter Wasser. REPMUS24 versammelte über 2000 Teilnehmer aus mehr als 30 Nationen, um Fähigkeiten in realistischen Szenarien zu testen, darunter Hydrographie, schnelle Umweltbewertung (REA), amphibische Vermessungen, ozeanografische Überwachung mit Glidern und Schutz kritischer Unterwasserinfrastruktur. Die Übung beschleunigt Innovationen, indem sie Prototypen in einsatzfähige Werkzeuge überführt und Interoperabilität und Wissensaustausch fördert.

Authors

Rui Miguel Cândido and António Tavares work at the Portuguese Hydrographic Institute (Instituto Hidrográfico) in Lisbon, Portugal. Nádia Rijo works at the NATO Maritime Geospatial, Meteorological, and Oceanographic Centre of Excellence in Lisbon, Portugal.

miguel.candido@hidrografico.pt

Introduction

REPMUS (Robotic Experimentation and Prototyping with Maritime Unmanned Systems) is an exercise series spearheaded by the Portuguese Navy and co-organised by the Faculty of Engineering of the University of Porto (FEUP), the Northern Atlantic Treaty Organization (NATO) Centre for Maritime Research and Experimentation, the NATO Joint Capability Group for Maritime Unmanned Systems and the European Defence Agency. REPMUS is designed to foster large scale experimentation with uncrewed systems, while promoting collaborative efforts among military, academia and industry stakeholders. Its ultimate goal is to develop, assess and validate state-of-the-art technology applicable to both maritime security and naval operations.

The latest edition, REPMUS24, convened a large-scale international participation, gathering over 2,000 participants, including civilian and military personnel from more than 30 nations. Contributions spanned over 130 official entities from Portugal, NATO and the European Union (EU), alongside with industry and universities.

Herein, the hydrography-related activities conducted during the exercise are addressed, with a particular emphasis on the deployment of uncrewed assets to perform environmental characterisation under an operational context.

REPMUS

Unlike traditional military exercises that focus primarily on tactical manoeuvres or combat readiness, REPMUS is centred on technological development and operational prototyping. Bringing together military forces, academia, and industry it tests and validates cutting-edge systems in realistic maritime environments.

The exercise is held annually in Portugal's Infante D. Henrique Technological Free Zone (TFZ), a vast area encompassing oceanic, estuarine and terrestrial domains. This diverse and challenging setting provides an ideal sandbox for experimentation with surface, subsurface and aerial systems, with a primary focus on security and defence applications (Fig. 1). Covering over 2,500 square kilometres, it includes the municipalities of Sesimbra and Setúbal, historic maritime hubs with enduring sig-

nificance in shipping and fishing. The TFZ Infante D. Henrique is managed by the Portuguese Navy's Operational Experimentation Centre (Centro de Experimentação Operacional da Marinha – CEOM). Its facilities, including an artificial island, host a significant portion of REPMUS activities.

One of REPMUS' defining features is its multi-domain scope. While maritime unmanned systems (MUS) are the core focus, the exercise also explores their integration into broader operational contexts, including cyber defence, communications and intelligence, surveillance and reconnaissance (ISR). This holistic approach is in line with NATO's strategic emphasis on Multi-Domain Operations (MDO), where capabilities across air, sea, land, space and cyber must be synchronised to achieve mission success.

REPMUS is structured to simulate real-world operational scenarios, allowing participants to test systems under conditions that mirror those encountered in crisis response, humanitarian missions and conventional warfare. These scenarios often involve complex coordination between crewed and uncrewed platforms, data fusion from multiple sensors and rapid decision-making based on real-time information. For example, unmanned aerial vehicles (UAV) may be tasked with ISR missions, while unmanned underwater vehicles (UUV) conduct seabed mapping or mine detection, and unmanned surface vehicles (USV) perform hydrographic surveys or logistics.

A key objective of REPMUS is to accelerate the transition from concept to capability. By enabling live experimentation with prototypes and pre-commercial technologies, the exercise helps identify operational strengths, limitations and integration challenges early in the development cycle. This feedback loop is invaluable for refining system design, improving interoperability and aligning technological innovation with national and international organisation's doctrinal and strategic requirements.

Moreover, REPMUS fosters a culture of collaboration and knowledge exchange. It provides a venue for NATO, EU and partner nations to share best practices, harmonise standards and build trust through joint experimentation. The inclusion of academic institutions and private sector innovators ensures that the exercise remains at the forefront of technological advancement, while also promoting dual-use applications that benefit both defence and civilian sectors.

Participating in REPMUS

Participation in REPMUS is highly structured and requires coordination through official channels. The exercise is open to a range of stakeholders, including NATO nations and partners, industry and academic institutions, under specific conditions:

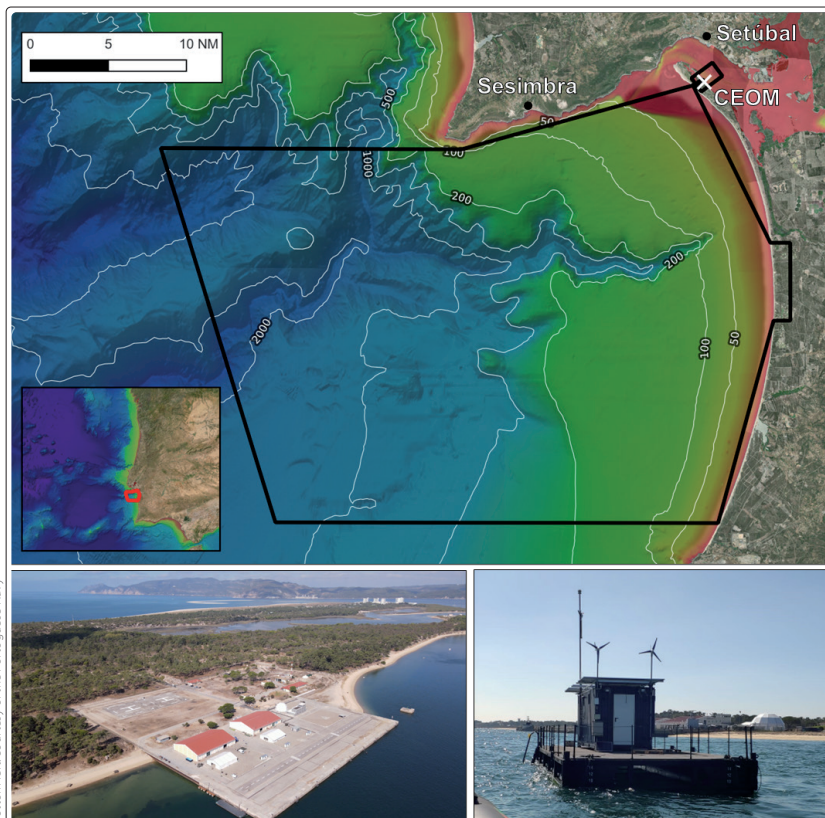


Fig. 1: REPMUS whereabouts. Top: TFZ Infante D. Henrique. Bottom left: CEOM facilities (courtesy of the Portuguese Navy). Bottom right: CEOM's artificial island

- NATO nations and partners: Military forces from NATO nations and invited partners participate through their respective national chains of command and NATO planning teams, ensuring alignment with operational objectives and security protocols.
- Industry participation is divided into two categories:
 - Directly contracted companies – participate under formal agreements with a navy or the Ministry of Defence of a participating nation;
 - Sponsored companies – supported by a participating nation, which may demonstrate or integrate systems during the exercise.
- Academia and research institutions: typically involved through partnerships with NATO, EU or national sponsors, contributing to experimentation and knowledge exchange.

The experimentation goals of each participant are integrated into thematic Working Groups (WG). The so-called Operations WGs, which foster a considerable slice of the experimentation activities, are the following:

- Underwater Warfare (UWW),
- Above Water Warfare (AWW),
- Naval Mine Warfare (NMW),
- Maritime Safety and Security (MSS),
- Rapid Environmental Assessment (REA).

Each WG is mandated to identify the main problems and challenges within its community and to coordinate the activities to address them.

REA and the MGEOMETOC COE

The evolving nature of NATO’s operational landscape – ranging from crisis response and humanitarian missions to traditional warfare – demands rapid, accurate and comprehensive environmental intelligence. REA has emerged as a critical capability to meet this demand, enabling the collection, processing and dissemination of environmental data to support decision-making and enhance operational effectiveness.

During the REPMUS24 exercise, REA was exercised as a warfare capability under the coordination of the NATO Maritime Geospatial, Meteorological, and Oceanographic Centre of Excellence (MGEOMETOC COE), headquartered in Lisbon, Portugal.

The MGEOMETOC COE played a central role in orchestrating REA activities, acting as the doctrinal and operational hub for environmental support. Its mandate includes developing and standardising NATO’s geospatial and METOC capabilities. REPMUS24 provided a unique opportunity to test and refine REA procedures in a realistic, multi-domain operational scenario. The MGEOMETOC COE coordinated the integration of MUS across underwater, surface and aerial domains to collect in-situ environmental data, which was then processed and transformed into actionable products.

REA activities were conducted in the TFZ Infante D. Henrique. This region offers a diverse and com-

plex bathymetric landscape – featuring submarine canyons, sandbanks and narrow channels – ideal for testing REA capabilities and presenting realistic challenges for environmental data collection and analysis.

The planning of REA activities followed a structured approach aligned with the four stages of the REA process: direction, data collection, processing and dissemination. The REA WG, composed of NATO member states, industry partners and academic institutions, collaboratively defined four key challenges to guide the exercise:

- Improving expeditionary shallow-water and littoral REA,
- contributing to the Seabed Warfare concept,
- optimising REA information exchange,
- conducting REA operations from the sea.

To address these challenges, specific objectives were established, including bathymetric surveys of Setúbal Harbour, topographic and bathymetric mapping of amphibious landing beaches, hydrographic and oceanographic monitoring and support for underwater contact detection. These objectives simulated real-world operational needs and tested the effectiveness of MUS in delivering timely and accurate environmental data.

The execution of REA activities involved a wide array of MUS platforms, including gliders, UUVs, USVs and UAVs, provided by multiple participants. These systems were equipped with advanced sensors such as multibeam echo sounders (MBES), side-scan sonars, Light Detection and Ranging (LiDAR) sensors, multispectral and hyperspectral cameras and physical sampling probes. The integration of these technologies enabled comprehensive data collection across all environmental domains.

A notable innovation during REPMUS23 was the deployment of a multinational REA Processing Team, composed of subject matter experts from NATO COEs, partner nations’ navies, research institutions and industry. This team was responsible for processing, analysing and validating the data collected by MUS, and for generating REA products to support operational decision-making. The collaborative structure ensured interoperability and leveraged diverse expertise, significantly enhancing the quality and speed of product development.

The REA Command and Control structure was also tested and refined during the exercise. Led by the REA Commander, the structure included three support cells: underwater/surface operations, air operations and data handling. Each cell was tasked with specific responsibilities, from MUS deployment and data acquisition to processing and dissemination. This model, developed in accordance with NATO’s doctrine, proved effective in manag-

Images courtesy of Schiebel, Maritime Robotics, Nava Research Lab, Instituto Hidrográfico, Xer and Yellowscan

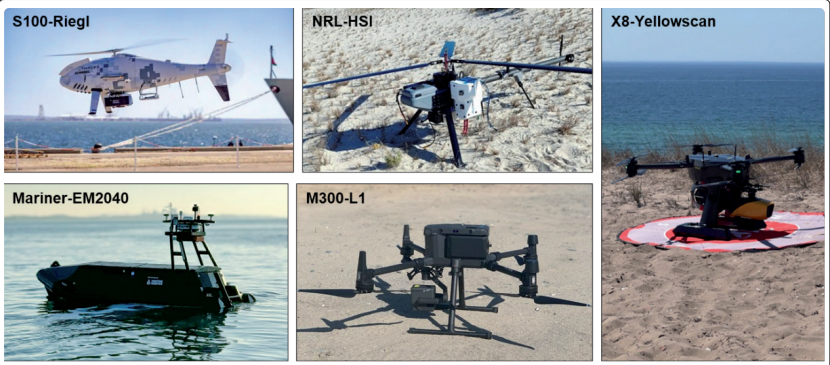


Fig. 2: Platforms and payloads used for the topographic and bathymetric surveys conducted during REPMUS24

Platform	Payload	Designation
Maritime Robotics Mariner (USV)	Kongsberg Discovery EM2040 (MBES)	Mariner-EM2040
Schiebel Camcopter S-100 (UAV)	Riegl VQ-860-G (Topo-bathy LiDAR)	S100-Riegl
Xer X8 (UAV)	Yellowscan Navigator (Topo-bathy LiDAR)	X8-Yellowscan
Naval Research Laboratory (NRL) helicopter (UAV)	Headwall HyperSpectral camera	NRL-HSI
DJI Matrice 300 RTK (UAV)	DJI Zenmuse L1 (Topo LiDAR)	M300-L1

Table 1: Platforms and payloads used for topographic and bathymetric surveys in REPMUS24

ing complex REA operations and coordinating efforts across multiple domains.

One of the key achievements of REPMUS24 was the development and demonstration of a cloud-based REA dissemination tool, created in partnership with Kongsberg Geospatial. This tool allowed exercise participants to access, visualise, and download REA products immediately after they had been created and validated by the data handling team, greatly enhancing information exchange and operational responsiveness. Although bandwidth limitations affected accessibility from certain locations, this tool marked a major advancement in REA product dissemination and is slated for further development and integration into future exercises.

Hydrography related experimentation highlights

Topo-bathymetric surveys

One of the central responsibilities of the REA WG at REPMUS is to deliver actionable environmental information to operational clients in a specific area of operations. This includes coordinating multi-platform data acquisition, ensuring its timely processing and the rapid dissemination of products tailored to the mission's needs.

Since REPMUS23, the Malha da Costa beach has been designated as the primary amphibious operations area, serving as a natural laboratory for testing uncrewed systems in hydrographic applications. Its comprehensive survey requires both bathymetric and topographic data to produce a continuous model of the area. To achieve this, several uncrewed surface and aerial systems, equipped with MBES, LiDAR and hyperspectral optical payloads were deployed, as listed in Table 1 and illustrated in Fig. 2.

In the context of REA, timeliness outweighs formal accuracy, resulting in products not being expected to comply with hydrographic or cartographic standards (e.g. International Hydrography Organization (IHO) S-44). Nonetheless, assessing data quality remains crucial to understand how processes can be improved. To this end, prior to the start of REPMUS, a traditional crewed vessel equipped with a 1° × 1° Kongsberg Discovery (KD) EM2040C MBES and Real-Time Kinematic (RTK) positioning, partially surveyed Malha da Costa. This dataset outputted a reference bathymetric model, fully compliant with IHO S-44 Special Order standard, which served as a benchmark for the following uncrewed surveys. The survey coverage of each platform-payload pair is illustrated in Fig. 3. These were more often constrained by logistical and scheduling issues than actual technological limitations of either the platform or the payload.

From an operational perspective, UAVs fitted

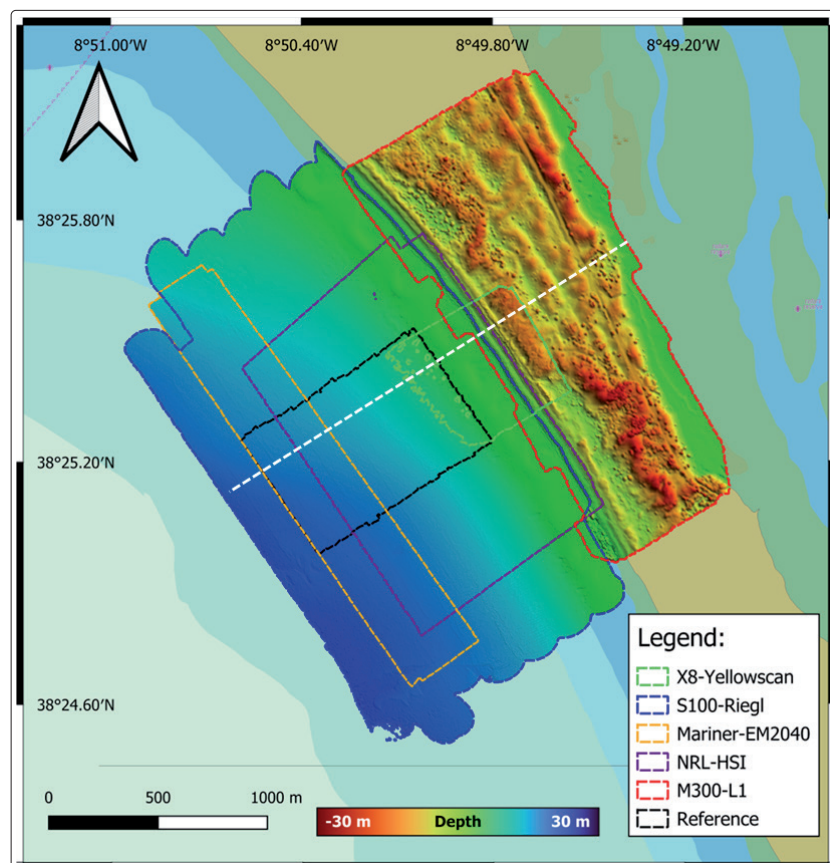


Fig. 3: Contribution of each system to the Malha da Costa bathymetric model. Depth profiles along the white dotted line are represented in Fig. 4

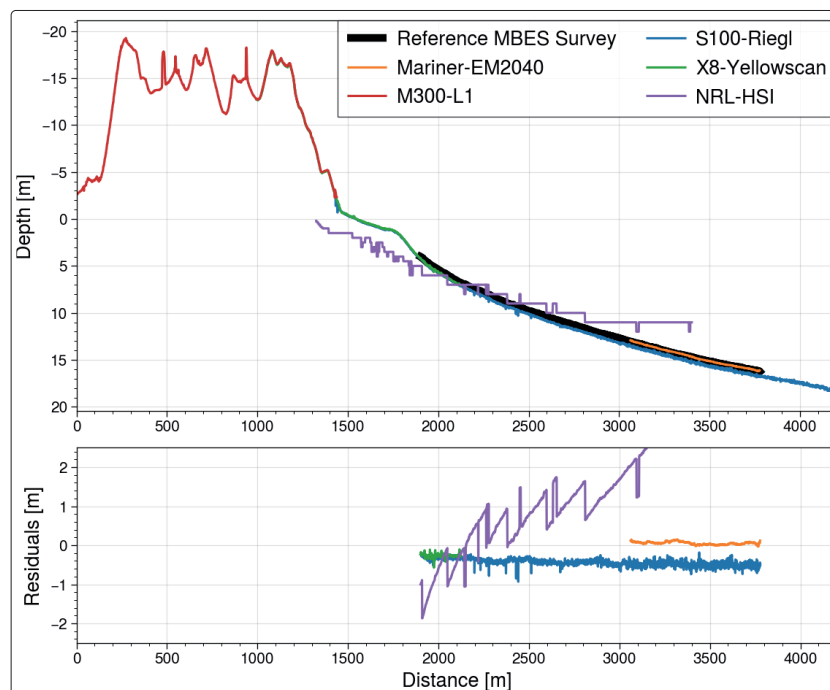


Fig. 4: Residuals between the reference model and the UxV bathymetric models, along the white dotted line represented in Fig. 3

with topo-bathymetric LiDARs delivered particularly valuable coverage, completing in a few hours what would take days with a sonar-equipped ves-

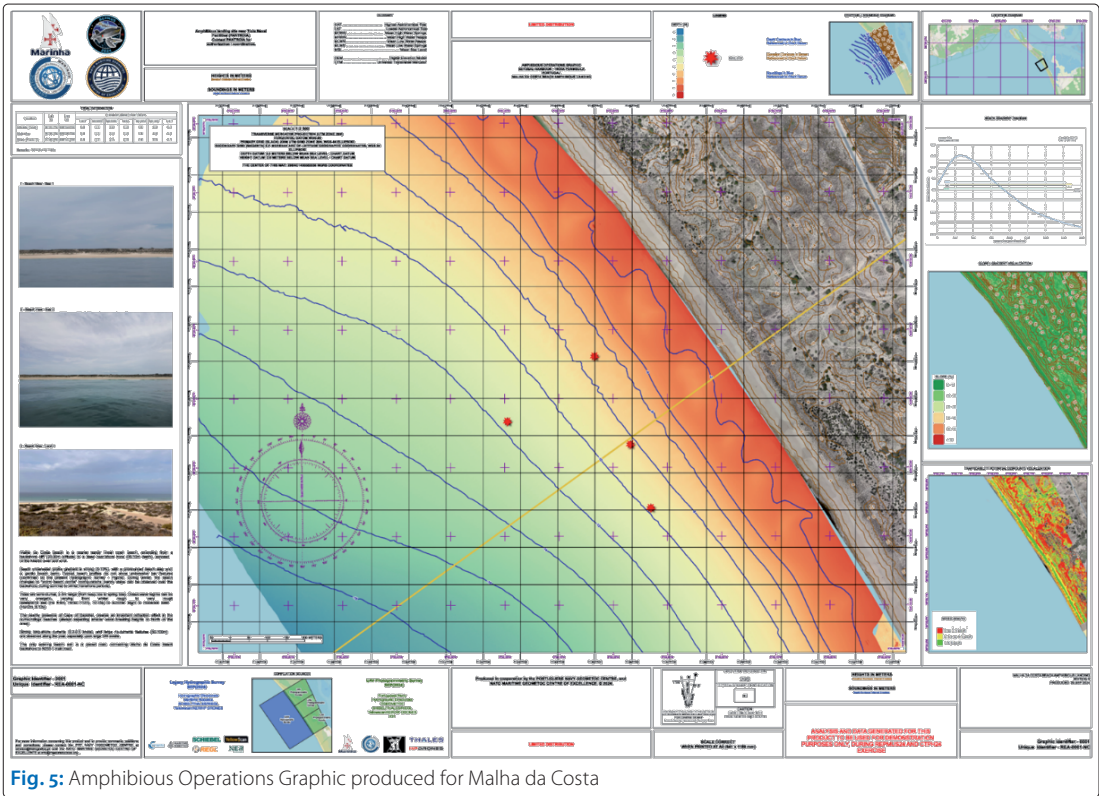


Fig. 5: Amphibious Operations Graphic produced for Malha da Costa

sel. Of the tested LiDAR systems, only the S100-Riegl pair successfully reached the deeper zone (to a maximum depth of ~20 m), while the others were limited to shallower waters.

To assess vertical accuracy, the residuals between the digital terrain models obtained from UxV surveys and the reference model were computed (Fig. 4), showing that the MBES data yielded the lowest residuals. As a prototyping exercise,

REPMUS platforms and payloads may not have been operating at full capacity, thus no system performance ranking is implied.

An in-depth assessment of the surveys performed throughout REPMUS23 is available in Constantinou et al. (2024).

The digital terrain models generated by the uncrewed surveys were fused into an Amphibious Operations Graphic (AOG) (Fig. 5), integrating both bathymetry and topography, and annotations such as hazards (e.g. wrecks, mines) and aids to navigation. The AOG aimed to provide operational commanders a mission-oriented chart depicting beach gradients, approach corridors and terrain trafficability (i.e. the speed at which a soldier on foot or in a vehicle can traverse the terrain). Although not IHO compliant, the AOG exemplifies REA products: fast, tailored and operationally relevant.

Glider deployment

Throughout REPMUS24, eleven gliders (some depicted in Fig. 6) – long-endurance autonomous UUVs capable of adjusting their buoyancy to move through the water column – continuously roamed the area of operations. Their task was to characterise its oceanographic environment and provide a persistent environmental dataset which, directly or indirectly, supported the activities of the other WGs.

Glider profiled the water column from the surface to depths of up to 1,000 m, sampling, among other parameters, temperature, salinity, oxygen,



Fig. 6: Examples of gliders deployed during REPMUS24. Top: Alseamar SeaExplorer. Bottom: Teledyne Slocum

Top: retrieved from Alseamar (2024). Bottom: retrieved from Marinha (2024)

and chlorophyll. These were interpolated into the so-called Oceanographic Cube, allowing the comprehensive modelling of the water column (Fig. 7). For the UW WG, the Cube enabled the generation of sound speed profiles (SSPs), essential for sonar processing and for feeding acoustic propagation models to predict sonar detection ranges.

From a hydrographic standpoint, gliders also proved valuable. Some USVs used for bathymetry acquisition lacked onboard sound speed profilers, and interrupting surveys to perform a SSP cast is both inefficient and potentially risky. By supplying sound speed data, the gliders enabled uninterrupted surveying and reduced dependence on winch-deployed profilers – devices often prone to tangles that ultimately still require human intervention.

Critical underwater infrastructure monitoring

Submarine cables are the backbone of the global information infrastructure, carrying an estimated 99 % of international internet traffic (International Telecommunication Union, 2024). By 2025, more than 570 active cables span over 1.48 million kilometres of seabed (Telegeography, n.d.). Every year, approximately 100 cables suffer considerable damage with 70 % of incidents stemming from human activity – from accidental anchor strikes to deliberate sabotage (Carvalho, 2023).

Given this vulnerability, REPMUS has incorporated Critical Underwater Infrastructures (CUI) monitoring and protection scenarios since 2023. These typically involve laying a mock fibre-optic cable on the seabed and tasking uncrewed systems to locate, inspect and monitor it, while simulated threats are introduced. In REPMUS23, a cable was deployed at 60 m depth near Sesimbra, rigged with decoy »explosives« to evaluate MUS monitoring and detection capabilities. In REPMUS24, the scenario escalated considerably: an 18 mm diameter cable was laid at 800 m depth, with a lander simulating the threat. Fig. 8 depicts the locations of the 2023 and 2024 CUI scenarios.

From a hydrographic perspective, these scenarios required high-resolution seabed mapping and imaging. Only two UUVs were capable of tackling the 800 m CUI scenario (Fig. 9): the KD HUGIN 3000, fitted with a KD EM2040 and a KD HISAS 1032, and the INESC TEC (Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores, Tecnologia e Ciência) EVA UUV/Remotely Operated Vehicle (ROV), equipped with a Norbit iWBMS and custom optical scanners. Both successfully located the asset threatening the fiber-optics cable (Fig. 10).

Closing remarks

REPMUS is more than a military exercise – it is a strategic innovation engine for uncrewed maritime operations. It has demonstrated how MUS

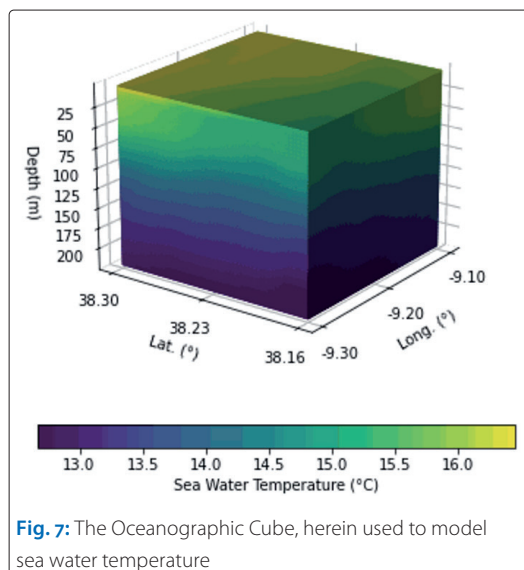


Fig. 7: The Oceanographic Cube, herein used to model sea water temperature

can deliver rapid, actionable environmental intelligence that directly supports operational decision-making in complex maritime environments. By bridging research, prototyping and field experimentation, the exercise accelerates the transition from concept to capability, offering tangible lessons for future operations.

REPMUS has been providing hydrographic-ena-

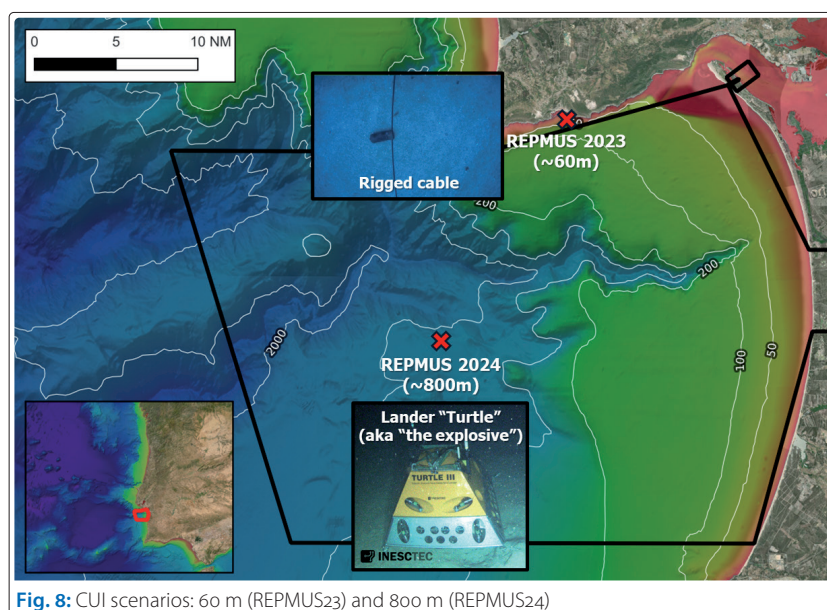


Fig. 8: CUI scenarios: 60 m (REPMUS23) and 800 m (REPMUS24)



Fig. 9: Assets employed in REPMUS24 CUI scenarios: KD HUGIN 3000 (left) and INESC TEC EVA (right)

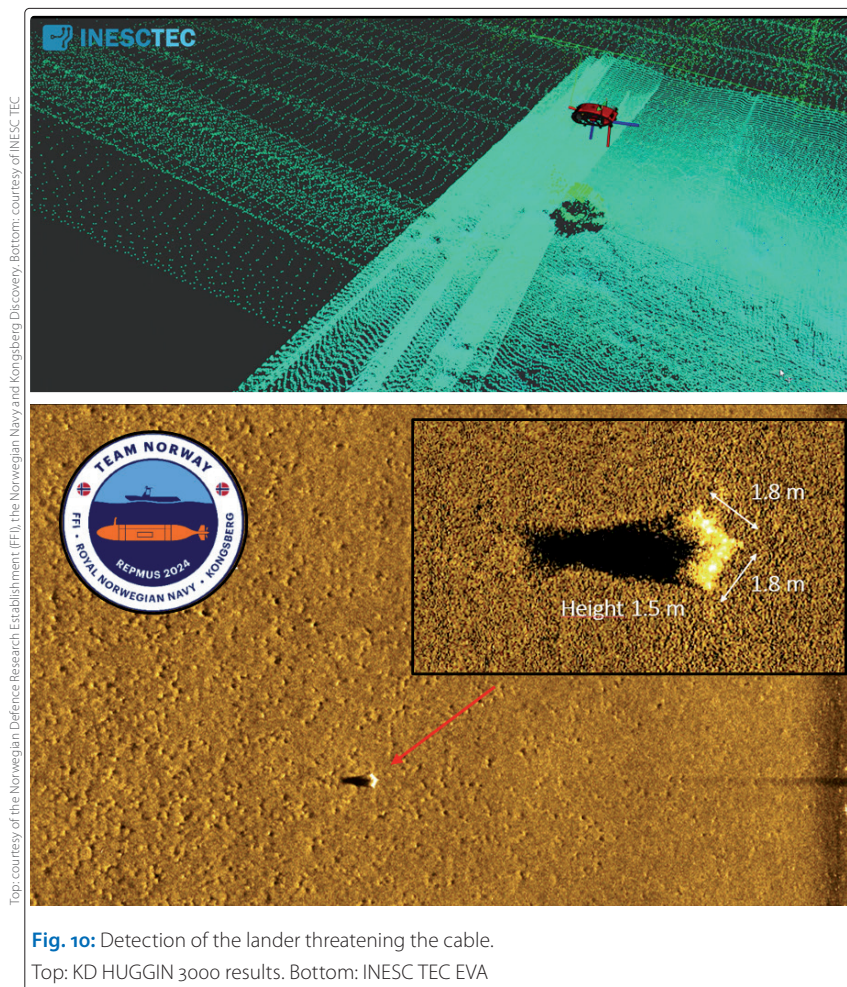


Fig. 10: Detection of the lander threatening the cable.

Top: KD HUGGIN 3000 results. Bottom: INESC TEC EVA

bled assets with opportunities to prove their mettle across diverse scenarios:

- Amphibious operations areas have been thoroughly and swiftly surveyed using both UAVs and USVs.
- Oceanographic modelling of a large area of operations was made possible by the deployment of multiple gliders, which persistently and comprehensively sample the water column properties.
- Deep CUIs have been successfully monitored and protected.
- A cloud-based infrastructure was deployed, demonstrating its ability to rapidly disseminate environmentally relevant products to operational clients.

Looking ahead, REPMUS25 will build on these achievements. Planned activities include more complex CUI monitoring scenarios and conducting REA operations exclusively from naval vessels – raising the bar for MUS command and control, data processing and fusion, and the subsequent dissemination of data and products.

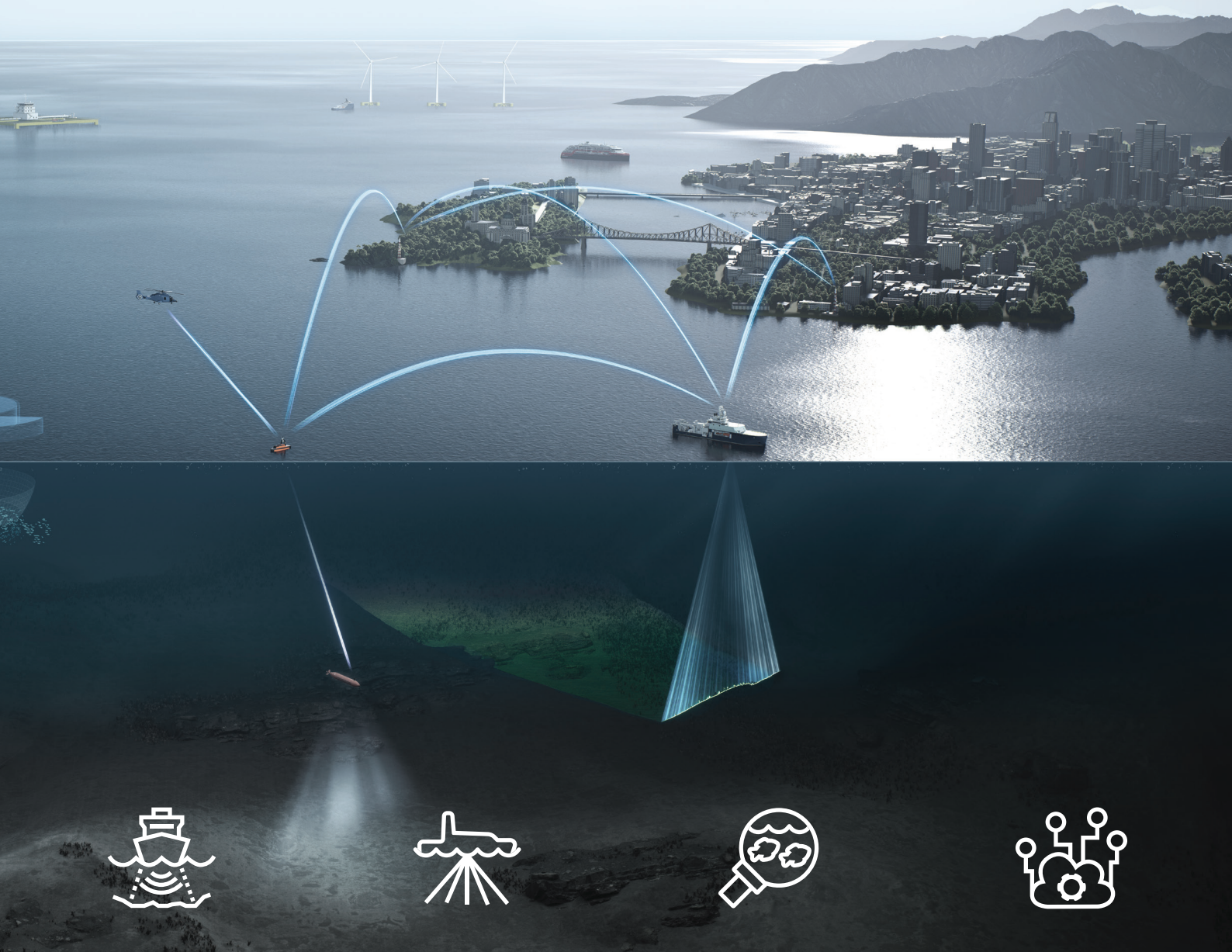
In conclusion, REPMUS exemplifies how rapid experimentation, multi-platform integration and multinational cooperation address maritime capability gaps, ensuring that participating nations, NATO and EU remain agile, technologically advanced and prepared to operate in increasingly complex maritime domains. //

References

- Alseamar (2024): This year again, ALSEAMAR is taking part in the REPMUS24 exercise, strengthening our engagement to providing innovative solutions for maritime missions. www.linkedin.com/posts/alseamar_seaexplorer-gliders-acoustic-activity-7240361483530858497-XaOb
- Carvalho, António Ramos (2023): Cabos submarinos – Portugal (novamente) no epicentro da globalização. Revista da Armada, www.marinha.pt/conteudos_externos/Revista_Armada/PDF/2023/RA_583.pdf, pp. 22–24
- Constantinoiu, Laurențiu-Florin; António Tavares; Rui Miguel Cândido; Eugen Rusu (2024): Innovative Maritime Uncrewed Systems and Satellite Solutions for Shallow Water Bathymetric Assessment. *Inventions*, DOI: 10.3390/inventions9010020
- International Telecommunication Union (2024): Submarine Cable Resilience. www.itu.int/en/mediacentre/backgrounders/Pages/submarine-cable-resilience.aspx
- Marinha (2024): O exercício REPMUS 24 começou! www.marinha.pt/pt/media-center/Noticias/Paginas/O-exercicio-REPMUS-24-come%C3%A7ou.aspx
- Telegeography (n.d.): Submarine Cable Frequently Asked Questions. www2.telegeography.com/submarine-cable-faqs-frequently-asked-questions



KONGSBERG



Discovering
the **secrets**
of the ocean



kongsberg.com/discovery

Large-scale seafloor mapping of the Italian coasts using multi-sensor surveying to characterise *Posidonia oceanica* and seafloor morphology in shallow waters

An article by SANTE FRANCESCO RENDE, ALESSANDRO BOSMAN, NUNZIANTE LANGELLOTTA, VIVIANA BELVISI, RAFFAELE PROIETTI, ALFREDO PAZZINI, AGOSTINO TOMMASELLO, MONICA MONTEFALCONE, ALBERTO GUARNIERI, GIORGIO DE DONNO, VALERIO BAIOCCHI, DANIELA CARRION, FILIPPO MUCCINI, RICCARDO BARZAGHI, TANJA DUFEK, PAULA GARCIA RODRIGUEZ, MARCO FILIPPONE, BENOIT CAJELOT, DHIRA ADHIWIJANA, FEDERICO BARTALI, HUGH PARKER, MICHELLE WAGNER, NICK RACKEBRANDT, LEONARDO TAMBORRINO, KNUT HARTMANN, CONSTANTIN SANDU, ANDREAS MÜLLER and GIORDANO GIORGI

The Italian Institute for Environmental Protection and Research (ISPRA) is leading a nationwide initiative to map and restore seagrass meadows under the Marine Ecosystem Restoration (MER) project. This effort addresses the alarming decline of *Posidonia oceanica* and *Cymodocea nodosa* habitats, which are critical for carbon sequestration, biodiversity and coastal resilience. The MER project's mapping component, executed by Fugro and Compagnia Generale Ripreseaeree (CGR), in partnership with EOMAP and PlanBlue, employed a multi-sensor approach, combining satellite, airborne, vessel-based (high-resolution multibeam echo sounder, MBES) and autonomous underwater vehicle (AUV) technologies. The integration of bathymetric LiDAR, MBES, optical and multispectral data allowed continuous bathymetric coverage from the coastline to a depth of 50 metres. The Virgeo platform, specifically developed by Fugro, facilitated real-time monitoring of acquisitions and data collected by ships and aircraft engaged in the surveys. This integrated approach provides a robust baseline for restoration planning and long-term monitoring, offering a scalable, cost-effective solution for national marine habitat assessments.

marine ecosystem restoration | habitat and seafloor mapping | multi-sensor surveying |
seagrass monitoring | machine learning classification
Wiederherstellung mariner Ökosysteme | Kartierung von Lebensräumen und Meeresböden |
Multisensor-Vermessung | Seegrassüberwachung | Klassifizierung mittels maschinellen Lernens

Das italienische Institut für Umweltschutz und -forschung (ISPRA) leitet eine landesweite Initiative zur Kartierung und Wiederherstellung von Seegrasswiesen im Rahmen des Projekts »Marine Ecosystem Restoration« (MER). Diese Initiative befasst sich mit dem alarmierenden Rückgang der Lebensräume von *Posidonia oceanica* und *Cymodocea nodosa*, die für die Kohlenstoffbindung, die Artenvielfalt und die Widerstandsfähigkeit der Küsten von entscheidender Bedeutung sind. Die Kartierungskomponente des MER-Projekts, die von Fugro und Compagnia Generale Ripreseaeree (CGR) in Zusammenarbeit mit EOMAP und PlanBlue durchgeführt wurde, basierte auf einem Multisensor-Ansatz, bei dem Satellitentechnologien, luft- und schiffsgestützte Technologien (mit hochauflösendem Fächerecholot) und autonome Unterwasserfahrzeugtechnologien (AUV) kombiniert wurden. Die Integration von bathymetrischen LiDAR-, Fächerecholot-, optischen und multispektralen Daten ermöglichte eine kontinuierliche bathymetrische Abdeckung von der Küstenlinie bis zu einer Tiefe von 50 Metern. Die speziell von Fugro entwickelte Virgeo-Plattform ermöglichte die Echtzeitüberwachung der Erfassungen und der Daten, die von den an den Vermessungen beteiligten Schiffen und Flugzeugen gesammelt wurden. Dieser integrierte Ansatz bietet eine solide Grundlage für die Planung von Wiederherstellungsmaßnahmen und die langfristige Überwachung und stellte eine skalierbare, kostengünstige Lösung für nationale Bewertungen von Meereslebensräumen dar.

Introduction

Seagrass meadows are among the most valuable coastal ecosystems on the planet. They provide a wide range of ecosystem services, with carbon storage standing out as one of the most important. Beyond their remarkable capacity to capture and retain carbon, seagrass meadows enhance marine biodiversity, stabilise sediments and reduce wave energy, offering natural protection for coastlines against storms.

In the Mediterranean Sea, meadows of *Posidonia oceanica* – an endemic species – have been recognised as a priority habitat under the European Union's Habitats Directive (Habitat Type 1120: *Posidonia oceanica*). It is estimated that *Posidonia oceanica* alone has sequestered between 11 % and 42 % of the region's carbon dioxide emissions since the onset of the Industrial Revolution (Pergent et al. 2014).

Despite their ecological importance, *Posidonia oceanica* and other seagrass meadows are increasingly under threat from human activities such as coastal development, bottom trawling, anchoring, pollution and declining water quality. Climate change further accelerates their decline through rising sea-surface temperatures and sea-level rise (Boudouresque et al. 2009). Alarming, research suggests that *Posidonia oceanica* meadows in the Mediterranean have shrunk by about 34 % over the past 50 years (Telesca et al. 2015).

To counteract this degradation, the Italian government has established the Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR) Marine Ecosystem Restoration (MER) project, implemented by the Italian Institute for Environmental Protection and Research (ISPRA). The activities are carried out within the framework of the NextGenerationEU investment projects – Mission 2: Green Revolution and Ecological Transition; Component 4: Protection of Land and Water Resources; Measure 3: Safeguard air quality and biodiversity through the protection of green areas, soil and marine areas; Investment 3.5 has been planned: Restoration and Protection of Seabeds and Marine Habitats.

The MER project aims to restore the marine habitats and fortify the national system for observing marine and coastal ecosystems. The first crucial component of the MER project involves the mapping of *Posidonia oceanica* and *Cymodocea nodosa* seagrass meadows across Italian waters. Secondly, it aims to provide high-resolution bathymetric coverage and morphological mapping with continuity from the subaerial to the submerged portions down to a depth of 50 metres, in order to provide high-resolution digital elevation models (DEMs) useful for: maritime navigation; coastal risk indicators to which people and infrastructure are exposed; monitoring coastal infrastructure and assets in relation to climate change; geomorphologi-

cal analysis of the seabed in relation to coastal geo-hazards; support for the management of coastal areas by the State Property Agency; support for the management of archaeological assets, scenarios of relative sea level rise and more.

Only by fully understanding the status of seagrass meadows along the Italian coast, appropriate steps can be taken to protect and restore this vital marine ecosystem. An integrated approach using multiple data acquisition methods ensures the accurate and high-resolution mapping of the abundance and distribution of seagrass meadows with different spatial configurations (Rende et al. 2020).

The seagrass mapping initiative under the MER project is performed by Fugro and Compagnia Generale Ripreseeree (CGR), in partnership with EOMAP – a Fugro company, and PlanBlue. The project started in March 2024 and will last until June 2026. The project includes mapping the entire Italian coastline, covering 12,600 km² using topographic and bathymetric LiDAR, aerial RGB-NIR imagery, aerial gravimetry and satellite sensors, 3,798.2 km² using high-resolution MBES technology from vessels and 4,000 km² using autonomous underwater vehicles (AUVs).

The unique feature of this project is the extensive spatial coverage combined with the high number of sensor platforms, instrument types and data derivatives employed. Data is collected from space, air, water surface and below water – each of these datasets with its own characteristics and advantages. The strength lies in the integration of these different datasets and types, which enables the creation of a comprehensive data basis for a thorough and complete analysis of the seafloor morphologies.

Table 1 provides an overview of the equipment and data used in the MER project. Typically, a specific data type is acquired through multiple sensors. For instance, bathymetric and

Authors

Sante Francesco Rende, Alessandro Bosman, Viviana Belvisi, Giordano Giorgi, Raffaele Proietti and Alfredo Pazzini work at the Italian Institute for Environmental Protection and Research. Nunziante Langellotto works at the Italian Navy, Hydrographic Institute. Agostino Tommasello works at Università degli Studi di Palermo. Monica Montefalcone works at the University of Genoa. Alberto Guarnieri works at Università degli Studi di Padova. Giorgio De Donno, Valerio Baiocchi and Daniela Carrion work at Sapienza Università di Roma, DICEA. Filippo Muccini works at Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (La Spezia). Riccardo Barzaghi works at Politecnico di Milano. Tanja Dufek, Paula Garcia Rodriguez, Marco Filippone, Benoit Cajelot, Dhira Adhiwijana, Federico Bartali, Hugh Parker, Michelle Wagner and Nick Rackebrandt work at Fugro. Leonardo Tamborrino works at PlanBlue. Knut Hartmann, Constantin Sandu and Andreas Müller work at EOMAP – a Fugro company.

paula.garcia@fugro.com

Sensor/platform	Type	Data derivatives	Resolution
Satellite EO	WorldView-2, WorldView-3	RGB, Satellite-derived bathymetry (SDB), Sub-surface reflectance (SSR)	2 m
Topographic LiDAR (ALT)	Leica TerrainMapper CityMapper 2/3	Orthophotos, DSM, DTM	10 cm
Bathymetric LiDAR (ALB)	Fugro RAMMS 2.0	Bathy DTM, Topo DTM, Bathy Intensity, RGB-NIR	1 m
MBES	Kongsberg EM2040, EM 710-712	DEM, Backscatter	0.2 m to 0.5 m
AUV SeaCat	Camera PlanBlue, MBES, SSS	RGB imagery, Orthophoto, Point Clouds, DEM	Sub-centimetre
Gravimetry	Strapdown Airborne Gravimeter, Land Relative Gravimeter	Free-Air Gravity Anomalies along track, Complete Spherical Bouguer Anomalies along track, Gridded Free-Air and Complete Spherical Bouguer Anomalies	Variable, ranging from 1.5 to 3.0 km

Table 1: Overview of employed sensors and their data derivatives

intensity data are collected via satellites (satellite-derived bathymetry, or SDB), by airborne LiDAR bathymetry (ALB), as well as by ship-borne high-resolution MBES. Whereas SDB and ALB are limited in terms of penetration depth, MBES completes these datasets by covering deeper water areas. In contrast, space- and airborne systems are particularly effective in capturing data in very shallow and onshore areas, enabling a seamless and comprehensive data compilation across the entire survey domain ranging from the land to a water depth of approximately 50 metres.

Fig. 1 shows examples of the different data (LiDAR bathymetry and intensity, MBES bathymetry and backscatter and RGB-NIR satellite imagery), covering a large seagrass meadow.

Challenges in the large-scale multi-sensor mapping MER project

The MER project, which aims to conduct large-scale mapping of the Italian coastline using a wide variety of sensors and datasets, presents significant technological and methodological challenges. These include the integration of geophysical, optical and multispectral data; the generation of high-resolution digital land-sea models; and their homogenisation within a national reference system and official datum. Some of the key considerations are outlined below.

Planning data acquisition

When multiple sensors complement each other in terms of spatial coverage and depth ranging, such as ALB and MBES for bathymetry and intensity/

backscatter data, careful acquisition planning is essential to ensure sufficient data overlap.

ALB covers shallow water areas. It can penetrate up to three Secchi depths, which is about 20 metre depth (depending on the environmental characteristics). MBES, on the other hand, is used in deeper waters beyond ALB's range, extending to about 50 metre depth. This depth marks the natural limit for seagrass growth due to its reliance on photosynthesis.

An effective acquisition planning must account for various factors:

- **Seafloor morphology:** MBES is typically acquired parallel to the slope (i.e., parallel to the isobaths and shoreline), while ALB acquisition patterns may differ as subaerial terrain features such as mountains and coastal infrastructure must be considered when planning flight lines and the turns in between.
- **Environmental conditions:** weather plays a significant role, particular for ALB. Water turbidity, which negatively affects ALB measurement range, varies not only by location but is also influenced by recent weather events. Rainfall, for instance, can increase the water turbidity (i.e., flash flood), sea condition, etc.
- **Operational constraints:** local restrictions on flight times or airspace usage may also impact the scheduling and execution of airborne data acquisition. As for vessel- and AUV-based operations, they can be affected by local survey permit regulations as well as tourism during the summer period. Furthermore, emergencies such as summer fires and volcanic activity (Stromboli and Etna) may also have an impact.

Positioning, datum and reference system

All MBES bathymetric data, bathymetric and topographic LiDAR datasets, ortho-mosaics and derived cartographic products are integrated within a standard Reference System and Datum (ETRF2000 RDN2008). National GNSS CORS geodetic networks (Leica SmartNet, Trimble Spectra and Topcon) are employed for all kinematic positioning systems.

The maximum baseline distances used for post-processing kinematic (PPK) positioning between aircraft/ship platforms (rovers) and the CORS reference stations does not exceed 20 km. This ensures a plano-altimetric accuracy of only a few centimetres, and in any case less than one decimetre.

Data acquisition is carried out using latest-generation, multi-frequency and multi-constellation GNSS receivers in combination with IMUs. Post-processing is performed using precise ephemerides, allowing the generation of DEMs in both orthometric height (H – ITALGEO2005) and ellipsoidal height. Finally, the data are also referenced to the local mean sea level.

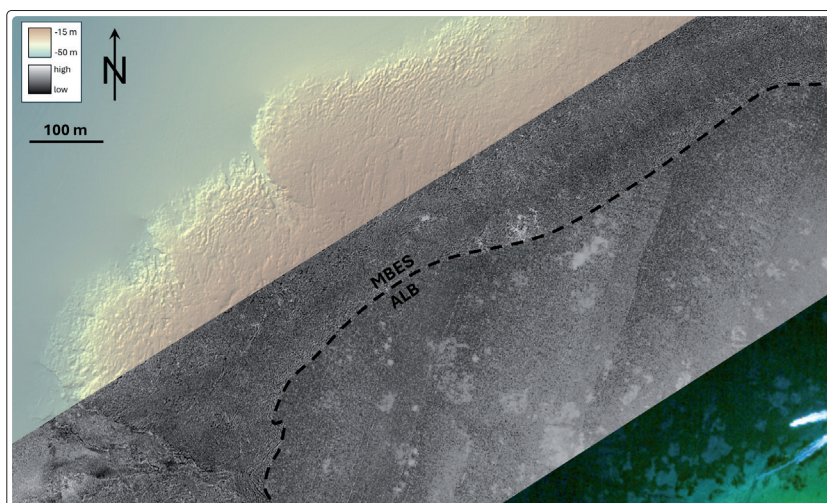


Fig. 1: Different data collected by sensors for high-resolution seafloor mapping. From bottom right to top left: RGB satellite imagery, combined ALB and MBES bathymetry and backscatter. Seagrass meadows are visible in the RGB imagery as darker-toned areas, indicating denser vegetation. In the intensity data seagrass appears as regions of generally lower values with greater inhomogeneity due to stronger variation in reflectance and backscatter intensity. Posidonia oceanica meadows in bathymetric data (DEM) are associated with morphologically detected features with a specific roughness. The dotted black line separates the MBES backscatter from LiDAR intensity data

Monitoring project progress and data status

Managing large and heterogeneous datasets requires a robust system to ensure effective oversight of project progress and data processing status. For the MER project, Fugro adopted Virgeo – a cloud-hosted platform specifically designed to streamline data management.

Field, vessel and office teams can upload datasets into Virgeo, making them accessible in real-time to all project stakeholders. This centralised access not only enhances decision-making but also significantly improves operational efficiency.

As illustrated in Fig. 2, the Virgeo interface allows users to visualise the real-time positions of vessels and aircraft, alongside all datasets collected. In addition to displaying spatial data layers, the platform provides live asset tracking and colour-coded indicators that reflect the temporal status of the MER project.

Merging MBES and ALB data

The integration of MBES and ALB datasets is essential for generating unified information layers, which can subsequently be used for advanced analyses such as automated seafloor classification. When applying machine learning and other AI techniques, it is particularly important to ensure that the datasets are free of artefacts and that differences in data properties, such as resolution, are properly addressed.

One of the main challenges in this process is the integration of MBES and ALB intensity data. MBES backscatter values are typically expressed in decibels, whereas ALB intensity values are derived from laser reflectance and depend on both post-processing steps and the specific data format of the derivative product.

To obtain consistent and artefact-free results, inter-sensor normalisation is required. For MBES backscatter data, normalisation is carried out using the Kongsberg system (the equipment employed in this project) for each sector and acquisition mode, ensuring internal consistency within datasets collected by the same system. The subsequent step involves the normalisation of datasets acquired from different vessels and flight missions, thereby homogenising the data and ensuring high-quality, comparable outputs across all sources.

Automated seagrass classification

Once all datasets have been processed, automated classification techniques using machine learning are applied to identify and assess seagrass coverage and other morphologies such as rock and mobile sediment. The success of this classification is strongly influenced by the diversity and quality of input data. Especially data derivatives such as slope, aspect, backscatter and intensity can improve the classification results.

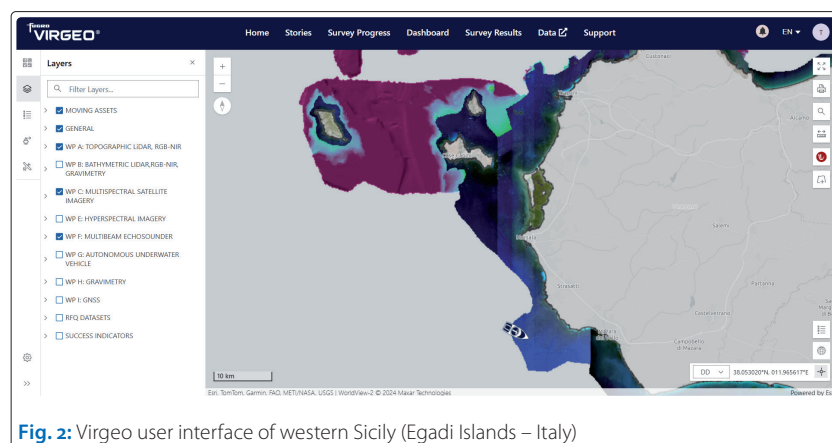


Fig. 2: Virgeo user interface of western Sicily (Egadi Islands – Italy)

The classification process in this project is carried out using Trimble eCognition software (Rende et al. 2020; Rende et al. 2022; Tomasello et al. 2022). The process starts with a segmentation, where the data is divided into regions based on shared properties across different datasets. These segments are then grouped and assigned to thematic classes such as rock, sediment or seagrass, using high-resolution orthophotos as ground truth, to validate information retrieved from other sensors and training machine learning classification. Fig. 3 shows a preliminary result of the automated seafloor classification (part D, bottom right), alongside some of the data layers used in the process.

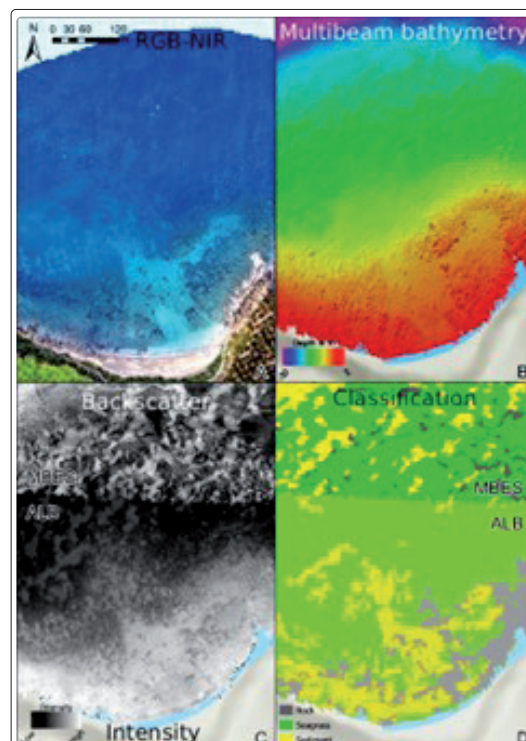


Fig. 3: Mapping process for seafloor classification.

A: Aerial RGB photo. B: High-resolution MBES and LiDAR bathymetry. C: LiDAR intensity (preliminary, not processed) and MBES backscatter. D: Preliminary seafloor classification results derived from their integrated analysis

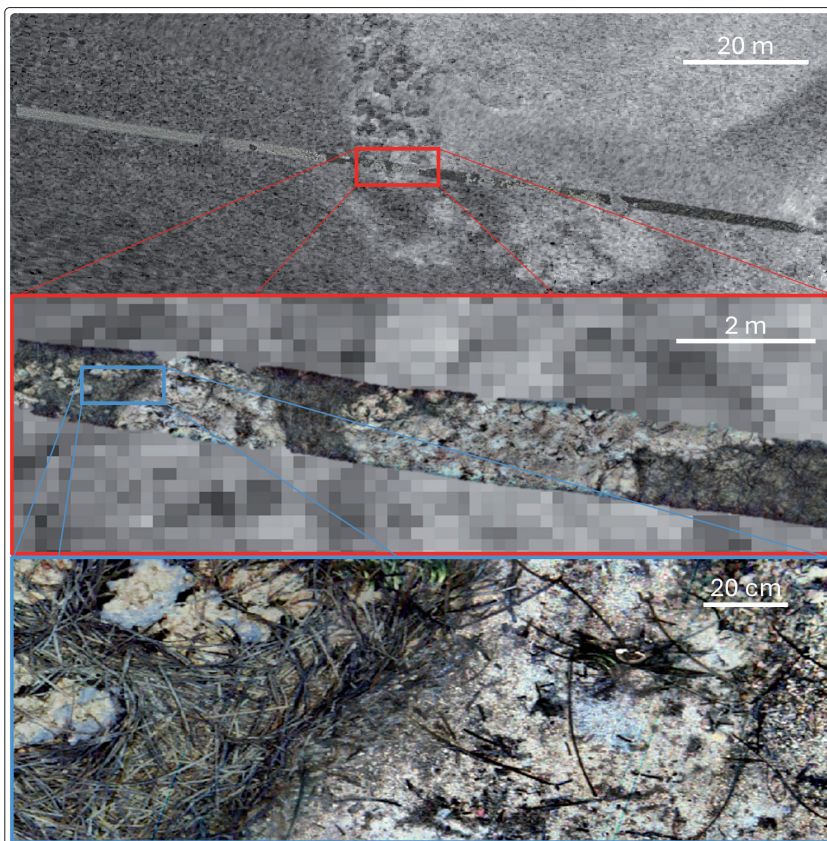


Fig. 4: MBES backscatter mosaic (0.2 metre) with seagrass area overlaid by an high-resolution AUV orthophoto. The different inset maps show the high detail of the visual information

The orthophotos used for ground-truthing are captured by an AUV, operating two to three metres above the seafloor at speeds of up to three knots. These images provide detailed visual information that not only confirms seagrass presence but also enables assessments of its health.

Fig. 4 and Fig. 5 illustrate the high amount of detail provided from the AUV imagery (ortho-

photo, resolution 0.2 cm, PlanBlue). This AUV survey was carried out during seagrass winter dormancy in Secche di Vada (Tuscany). Fig. 4 shows AUV imagery overlaid on MBES backscatter data (resolution of 0.2 metres) in an area of seagrass coverage at a water depth of approximately 35 metres.

Conclusion and remarks

The MER project represents the first national-scale, high-resolution mapping initiative dedicated to the study of *Posidonia oceanica* meadows and seabed morphology. It addresses significant technological and methodological challenges, with the capacity to generate DEMs and accurate maps through the integration of ground, marine (surface and deep), aerial and satellite sensors, all referenced within a unified official system.

This multi-sensor approach ensures full coverage of *Posidonia oceanica* habitats, from the coastline down to depths of about 50 metres. By combining different acquisition methods, it provides reliable mapping of seagrass meadows and seabed classification, supporting both restoration planning and long-term monitoring. Moreover, it offers the most cost-effective solution for establishing ecological baselines and conducting large-scale, repeatable assessments. The integration of multiple high-resolution data sources reduces the uncertainties of single-sensor analyses and enables investigation down to the lower limits of meadow distribution.

Within this framework, the project directly contributes to the implementation of major European policies and regulations:

- The Habitats Directive (92/43/EEC), which recognises *Posidonia oceanica* meadows as a priority habitat requiring protection.

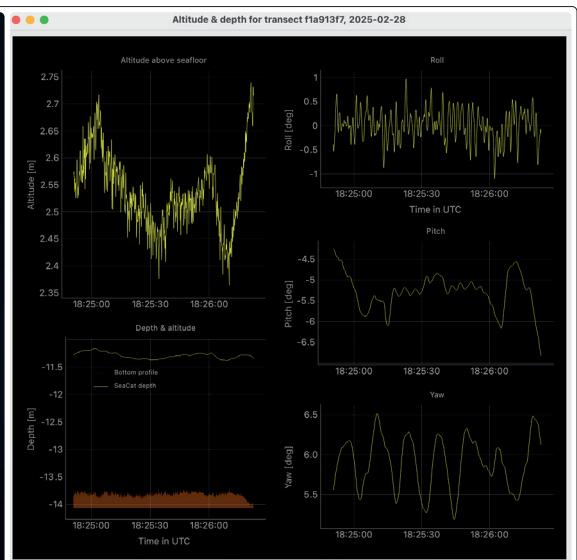
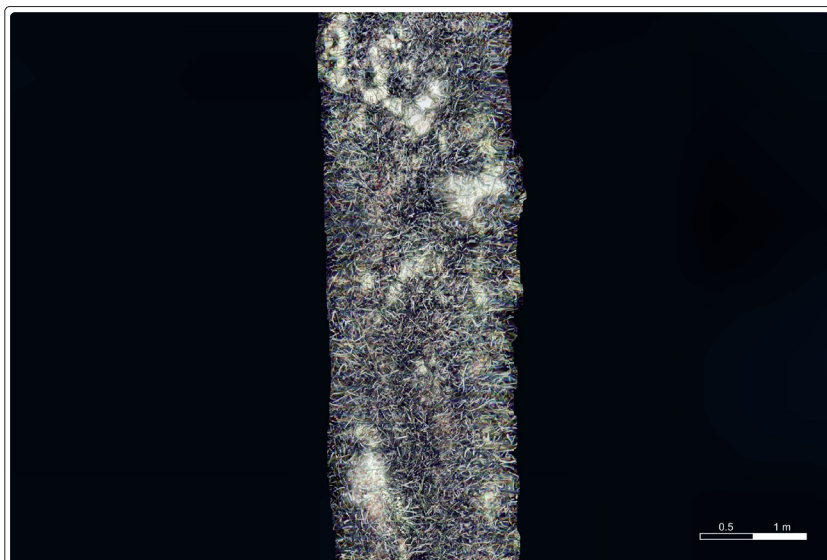


Fig. 5: Left: High-resolution orthophoto collected during night test (low environmental visibility) in east Pianosa Island, Tuscan Archipelago, Italy. Right: Windows showing altitude, depth and motion parameters for quality checks

- The Marine Strategy Framework Directive (2008/56/EC), which requires Member States to achieve good environmental status of marine ecosystems.
- The recent Nature Restoration Law, which sets legally binding targets for the restoration of degraded habitats, including seagrass meadows.

The knowledge generated will support policy-makers in developing targeted strategies to mitigate pressures, preserve existing meadows and guide effective restoration actions, in line with European regulatory commitments. In this way, the MER project makes a significant contribution to the long-term protection of one of the Mediterranean's most valuable marine ecosystems. //

This article is also published in GEOmedia, No. 3/2025

References

Boudouresque, Charles; Guillaume Bernard; Gerard Pergent et al. (2009): Regression of Mediterranean seagrasses caused by natural processes and anthropogenic disturbances and stress: A critical review. *Botanica Marina*, DOI: 10.1515/BOT.2009.057

Pergent, Gerard; Hocein Bazairi, Carlo Nike Bianchi et al. (2014): Climate change and Mediterranean seagrass meadows: a synopsis for environmental managers. *Mediterranean Marine Science*, DOI: 10.12681/mms.621

Rende, Sante Francesco; Alessandro Bosman; Rossella Di Mento et al. (2020): Ultra-High-Resolution Mapping of Posidonia oceanica (L.) Delile Meadows through Acoustic, Optical Data and Object-based Image Classification. *Journal of Marine Science and Engineering*, DOI: 10.3390/jmse8090647

Rende Sante Francesco; Alessandro Bosman; Fabio Menna et al. (2022): Assessing Seagrass Restoration Actions through a Micro-Bathymetry Survey Approach (Italy, Mediterranean Sea). *Water*, DOI: 10.3390/w14081285

Telesca, Luca; Andrea Belluscio; Alessandro Criscoli et al. (2015): Seagrass meadows (*Posidonia oceanica*) distribution and trajectories of change. *Scientific Reports*, DOI: 10.1038/srep12505

Tomasello, Agostino; Alessandro Bosman; Geraldina Signa et al. (2022): 3D-Reconstruction of a Giant *Posidonia oceanica* Beach Wrack (Banquette): Sizing Biomass, Carbon and Nutrient Stocks by Combining Field Data With High-Resolution UAV Photogrammetry. *Frontiers in Marine Sciences*, DOI: 10.3389/fmars.2022.903138



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



Satellitengestützte Bathymetrie als Instrument zur schnellen Beurteilung sturmbedingter Auswirkungen auf die Strandaufschüttung

Ein Beitrag von EDWARD ALBADA, MORJANA SIGNORIN, LINDINO BENEDET, CHELSEA RYAN, KNUT HARTMANN, CHRISTIAN BÖDINGER und KIM KNAUER

Behörden stehen nach Sturmereignissen vor der Aufgabe, Strandvolumenverluste schnell zu quantifizieren, um Katastrophenmeldungen vorzubereiten. Traditionelle Methoden stützen sich auf visuelle Schätzungen und wenige Messungen wie Strandhöhe, Steilhanghöhe oder Dünenabstand. Diese Verfahren sind jedoch fehleranfällig, da Daten zum Offshore-Bereich des Strandprofils meist fehlen. Vollständige Strandprofiluntersuchungen, die sowohl den trockenen Strand als auch den Unterwasserbereich einbeziehen, liegen erst später vor. Satellitengestützte Bathymetrie (SDB) kann diese Lücke schließen: Sie liefert flächendeckende, konsistente Daten, die zeitnah vor und nach einem Sturm verfügbar sind. Dadurch lassen sich vorläufige Volumenschätzungen präzisieren und Katastrophenmeldungen auf eine fundiertere Datengrundlage stellen. Eine vergleichende Analyse von SDB-Daten und traditionellen topobathymetrischen Vermessungen am Beispiel von Coquina Beach (Anna Maria Island, Florida) zeigt, dass SDB die Genauigkeit schneller Nachsturmbeurteilungen verbessert. Trotz methodischer und verarbeitungsbedingter Einschränkungen kann SDB entscheidend dazu beitragen, wirtschaftliche Verluste realistisch abzuschätzen und eine schnellere, besser informierte Reaktion auf Sturmereignisse zu ermöglichen.

Erdbeobachtung | satellitengestützte Bathymetrie | Sturmschaden | Strandvolumen | Küstenresilienz
earth observation | satellite-derived bathymetry | storm damage | beach volume | coastal resilience

After storm events, authorities are faced with the task of quickly quantifying beach volume losses in order to prepare disaster declarations. Traditional methods rely on visual estimates and a few measurements such as beach elevation, scarp height or distance from dune to waterline. However, these methods are prone to errors because data on the offshore portion of the beach profile are usually missing. Complete beach profile surveys, including both the dry beach and the underwater area, are only available later. Satellite-derived bathymetry (SDB) can close this gap: It provides comprehensive, consistent data that is available promptly before and after a storm. This allows for more precise preliminary volume estimates and provides a more solid data basis for disaster declarations. A comparative analysis of SDB data and traditional topo-bathy surveys using Coquina Beach (Anna Maria Island, Florida) as an example shows that SDB improves the accuracy of rapid post-storm assessments. Despite methodological and processing limitations, SDB can make a decisive contribution to realistically estimating economic losses and enabling a faster, better-informed response to storm events.

Einleitung

Für Regierungsbehörden ist es oft eine Herausforderung, unmittelbar nach einem Sturmereignis schnelle Einschätzungen der Strandvolumenverluste vorzunehmen. Diese Einschätzungen spielen eine wichtige Rolle bei der Quantifizierung der Verluste und helfen bei der Entscheidungsfindung bezüglich der Erklärung des Katastrophenfalls. Traditionell wird die Strandbewertung unmittelbar

nach einem Sturm anhand von Sichtschätzungen durchgeführt, die durch begrenzte Messungen (Strandhöhe, Höhe der Böschung, Abstand zwischen Düne und Wasserlinie usw.) unterstützt werden. Schnelle Einschätzungen auf Grundlage von Sichtschätzungen und begrenzten Messungen weisen häufig eine erhebliche Fehlerquote auf, insbesondere aufgrund fehlender Daten zum Offshore-Teil des Strandprofils. Herkömm-

liche Strandprofiluntersuchungen, einschließlich des trockenen Strands und des Offshore-Teils des Strandprofils, werden erst zu einem späteren Zeitpunkt, nach ersten Einschätzungen und Erklärungen des Katastrophenfalls, durchgeführt. Die Nutzung satellitengestützter Bathymetrie (SDB) für den Offshore-Teil des Profils unmittelbar nach einem Sturm könnte das Problem fehlender Offshore-Daten während der schnellen Bewertung nach einem Sturm lösen.

Satellitengestützte Bathymetrie (SDB) hat sich als vielversprechender Ansatz zur Erfassung bathymetrischer Daten im Flachwasser erwiesen. Im Vergleich zu akustischen oder luftgestützten LiDAR-Methoden bietet sie deutliche Vorteile hinsichtlich Zugänglichkeit und Kosteneffizienz. SDB ermöglicht den Zugriff auf historische Informationen und solche in nahezu Echtzeit in sehr flachen oder gefährlichen Gewässern, die mit herkömmlichen Methoden schwer zu erfassen sind. Da die Technologie keine Mobilisierung von Personal oder Ausrüstung vor Ort erfordert, ist sie im Vergleich zu In-situ-Erhebungen äußerst kostengünstig.

SDB-Verarbeitung

SDB ist die Berechnung der Flachwassertiefe anhand aktiver oder passiver Satellitensensoren (IHO 2024). Es gibt grundsätzlich zwei Arten von SDB-Verfahren zur Erzielung einer hohen räumlichen Auflösung: die empirische und die physikbasierte Methode. Beide basieren auf der multispektralen Reflexion des Sonnenlichts vom Meeresboden. Die empirische Methode ist eine nichtlineare Lösung, die eine Bandverhältnisberechnung (Stumpf et al. 2003; Lyzenga et al. 2006) der logarithmisch transformierten Wasserreflexion von Bändern mit unterschiedlicher Wasserabsorption verwendet und bathymetrische Daten vor Ort benötigt, um sie mit einer bekannten Tiefe zu korrelieren (IHO 2024). Mit Zugriff auf ausreichende und genaue Daten vor Ort, die mit dem Zeitpunkt der Satellitenbildaufnahme übereinstimmen, was bei Bewertungen nach Stürmen selten der Fall ist, kann die empirische Methode eine durchaus genaue SDB ergeben. Für Anwendungen ohne aktuelle und zuverlässige Vermessungsdaten (entlegene Standorte oder dynamische Umgebungen) kann nur eine physikbasierte Spektralmodellierung zuverlässige SDB-Oberflächen erzeugen. Forscher entwickeln seit den 1990er-Jahren SDB-Algorithmen. Die Prozesse umfassen verschiedene analytische Verfahren, wie z.B. Korrekturen der Nachbarschaftseffekte, Sonneneinstrahlung und Atmosphäre, unter Verwendung einer iterativen Lösung der Inversion der Strahlungstransportgleichung (Radiative Transfer Equation, RTE). Die RTE beschreibt das elektromagnetische Sonnenlichtsignal, wie es die verschiedenen Medien (z.B. obere Atmosphäre, Wasseroberfläche, Wassersäule)

durchläuft und zum Satellitensensor zurückreflektiert wird.

Für diese Studie basiert das RTE-Modell der gekoppelten Atmosphäre-Wasser-Systeme auf dem Referenzmodell der Finite-Element-Methode (FEM) (Kisselev 2004; Bulgarelli et al. 1999; Kisselev et al. 1995) im Rahmen eines »Modular Inversion Program« (MIP). Innerhalb des MIP werden Wassertiefe, optische Eigenschaften der Wasserbestandteile sowie die Reflexion des Untergrunds und des Meeresbodens in einem gekoppelten, iterativen Prozess abgeleitet (Abb. 1).

Der MIP-Prozess umfasst die folgenden Schritte:

- Korrektur der Satellitendaten hinsichtlich der Auswirkungen der Nachbarschaftseffekte angrenzender Landmassen.
- Korrektur der atmosphärischen und Meeresoberflächeneinflüsse durch gekoppelte Ableitung optischer Eigenschaften im Wasser (IOPs) und der Atmosphäre (Heege et al. 2014).
- Minimierung der Auswirkungen von Sonnenlichtreflexion auf der Wasseroberfläche.
- Ableitung räumlich aufgelöster Informationen zur spektralen Absorption und Streuung (in physikalischen Einheiten) inhärenter optischer Eigenschaften.
- Ableitung räumlich aufgelöster Informationen zur Wassertiefe und Meeresbodenalbedo.
- SDB-Daten sowie Daten zur Meeresbodenreflexion und Reflexion unterhalb der Wasseroberfläche werden hinsichtlich ihrer horizontalen Genauigkeit verbessert. Dies geschieht durch Berücksichtigung der Aufzeichnungsgeome-

Autoren

Edward Albada arbeitet bei EOMAP USA Inc.
Morjana Signorin, Lindino Benedet und Chelsea Ryan arbeiten bei Coastal Protection Engineering in Florida.
Dr. Knut Hartmann, Christian Böding und Kim Knauer arbeiten bei der EOMAP GmbH & Co. KG in Seefeld.

knauer@eomap.de

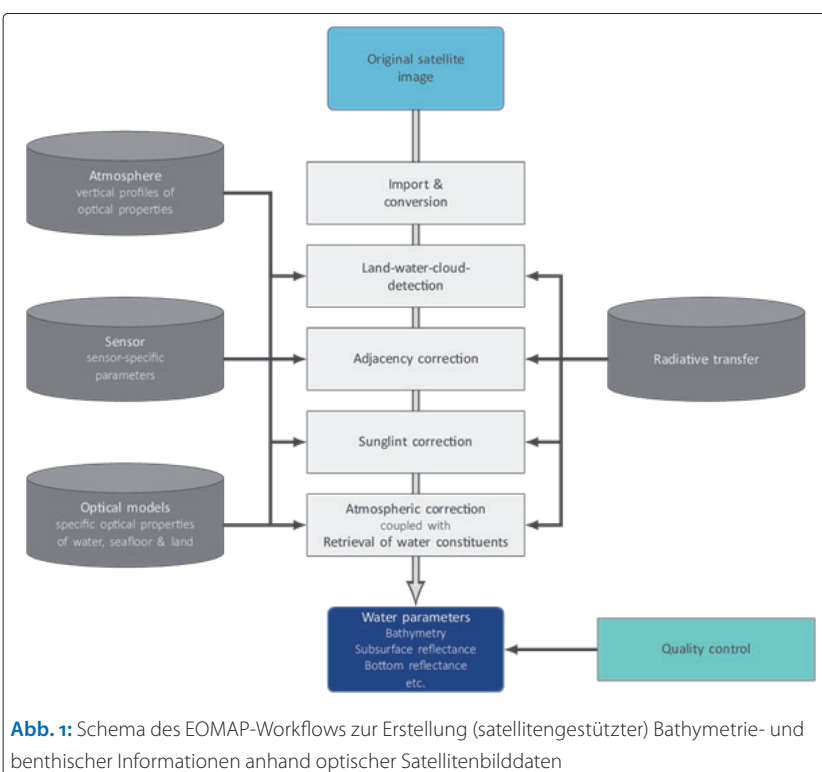


Abb. 1: Schema des EOMAP-Workflows zur Erstellung (satellitengestützter) Bathymetrie- und benthischer Informationen anhand optischer Satellitenbilddaten

trie und des Brechungsindex von Licht an der Wasseroberfläche, um den mit größerer Tiefe zunehmenden horizontalen Unsicherheiten Rechnung zu tragen.

- Korrektur der Wasserstandshöhen anhand vorhergesagter oder gemessener Tideninformationen der nächstgelegenen Station. Wenn keine gemessenen Tidendaten verfügbar sind und nicht bereitgestellt werden können, werden vorhergesagte Tidendaten aus der Admiralty-Total-Tide-Datenbank des britischen Hydrographischen Dienstes verwendet.
- Ein QA/QC-Verfahren, das Unsicherheitsprodukte aus der Fehlerfortpflanzung und manuelle Prüfungen auf verzerrte oder ungültige Pixel kombiniert, wird angewendet. Darüber hinaus werden extreme Ausreißer entfernt und die Daten auf logische Inkonsistenzen überprüft.
- Im Anschluss an den QA/QC-Prozess werden für jedes Pixel vertikale Unsicherheitsinformationen generiert. Diese Daten werden aus einer Sensitivitätsanalyse des SDB-Modells berechnet, wobei Unsicherheiten durch Meeresbodenfarbe, Wellengang und abnehmende Lichtintensität mit der Tiefe berücksichtigt werden.
- Vergleich der SDB-Raster mit allen verfügbaren vorhandenen Vermessungsdaten zur Bestätigung der allgemeinen vertikalen Genauigkeiten.

- Der letzte Schritt umfasst die Erstellung des Lieferpakets, einschließlich der Derivate (Höhenlinien, Objektidentifikation und -beschriftung, FGDC-konforme Metadaten).

Bemerkenswert ist, dass die physikbasierte Methode neben den bathymetrischen Daten auch die Extraktion wertvoller Daten zur Reflexion unterhalb der Wasseroberfläche und des Meeresbodens ermöglicht. Die Reflexion unterhalb der Wasseroberfläche wird um den Einfluss von Atmosphäre, angrenzenden Landmassen und Wasseroberflächeneffekten korrigiert und stellt eine Ansicht des Meeresbodens dar, wie man ihn beim Schnorcheln knapp unter der Wasseroberfläche sehen würde. Sie ermöglicht die detailliertere Identifizierung von Meeresbodenmustern und -objekten als die Strahlungsdaten an der Obergrenze der Atmosphäre. Sie ermöglicht zudem einen normalisierten Vergleich über Standorte und Zeiten hinweg, was bei Strahlungsdaten nicht der Fall ist. Die Reflexion des Meeresbodens wird ebenfalls um den Einfluss von Atmosphäre, angrenzenden Landmassen, Wasseroberflächen- und Wassersäuleneffekten korrigiert und stellt eine Ansicht des trockenen Meeresbodens ohne die darüberliegende Wassersäule dar. Mit anderen Worten: Die Meeresbodenreflexionsdaten werden um die Effekte der darüberliegenden Wassersäule (sowie der Atmosphäre, der Wasseroberfläche, der Beleuchtung und der Betrachtungsgeometrien) normalisiert. Dadurch ermöglicht sie die Identifizierung von Bodenmerkmalen ähnlicher Farbe in verschiedenen Tiefen (eine der zentralen Herausforderungen der satellitengestützten Meeresbodenkartierung). Da die Lichtdurchdringung mit längeren Wellenlängen stark abnimmt, hängt der Umfang der Reflexionsinformationen von den Bändern/Wellenlängen der Satelliten ab. Die blauen und grünen Wellenlängen haben die höchste Eindringtiefe, während Wellenlängen im roten oder nahen Infrarotbereich nur Daten zur Meeresbodenreflexion in sehr flachen Gewässern liefern.

Die räumliche Auflösung der SDB hängt vom verwendeten Satellitenbild ab und reicht von sehr hoch (40 bis 200 cm) bis hoch (10 m). Die Bearbeitungszeiten betragen je nach Projektkomplexität und Standort zwischen wenigen Stunden und einem Tag nach der Satellitenbildaufnahme. Aufgrund der hohen räumlichen Auflösung und der schnellen Verarbeitungszeit kann die SDB ein vielseitiges Instrument zur Unterstützung schneller Sturmfolgenbewertungen sein.

Vergleich der Sturmreaktion zwischen SDB und SBES

Vom 29. bis zum 30. August 2023 traf Hurrikan Idalia Florida als Hurrikan der Kategorie 4 und war damit der drittstärkste Hurrikan in der Big-Bend-



Abb. 2: Coquina Beach, Manatee County, Florida

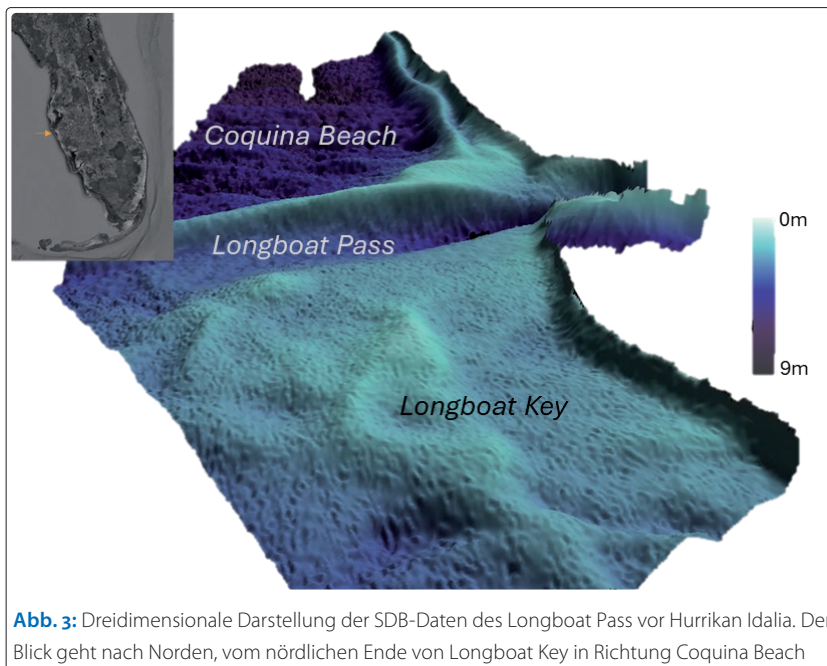
Region Floridas (NOAA 2023). Coquina Beach, ein Strand am südlichen Ende von Anna Maria Island im Manatee County, Florida (Abb. 2), war besonders von einer Kombination aus extremer Brandung und Wellengang betroffen. Die NOAA-Station 42099 (vor der Küste von St. Petersburg, Florida) maß eine signifikante Wellenhöhe von 10,3 m und in Tampa wurde eine Sturmflut von +1,37 m-MLLW aufgezeichnet (NOAA 2024). Diese Sturmbedingungen beschleunigten die Erosion am Coquina Beach, an dem im Jahr 2021 eine Strandaufschüttung von etwa 57300 m³ erfolgte (Manatee County 2024).

Um die Auswirkungen des Hurrikans auf Coquina Beach zu quantifizieren, wurde im Oktober 2023 nach Durchzug des Sturms »post-Idalia« eine traditionelle Strandprofiluntersuchung mit akustischen Messungen mittels Single-Beam-Echolot (SBES) durchgeführt. Diese Untersuchung wurde mit einer im Dezember 2022 vor Hurrikan Idalia durchgeführten Untersuchung verglichen. Diese bathymetrischen SBES-Messungen vor und nach dem Sturm bieten eine praktische Vergleichsbasis mit SDB-basierten Untersuchungen. Zu diesem Zweck wurden SDB-Daten (Abb. 3) aus Satellitenbildern erstellt, die im gleichen Zeitraum wie die Untersuchungen aufgenommen wurden. Die Ergebnisse dieses Vergleichs bieten Einblicke in die potenziellen Anwendungen von SDB in der Bewertung nach Stürmen.

Daten und Methoden

Wie oben erwähnt, wurden im Dezember 2022 (vor Hurrikan Idalia) und im Oktober 2023 (nach Idalia) topografische und bathymetrische Vermessungen des Strandes an jedem veröffentlichten Referenzpunkt des Florida Department of Environmental Protection (FDEP) zwischen T-30 und R-41+305 durchgeführt (vergleiche Abb. 4 bis Abb. 6 für Positionen der Referenzpunkte). Die vertikalen und horizontalen Vermessungsdaten wurden relativ zum North American Vertical Datum 1988 (NAVD88) und dem Florida-West-State-Plane-Koordinatensystem, North American Datum 1983 (NAD83), erhoben.

Die satellitengestützte Bathymetrie (SDB) wurde für dieselben Zeiträume erstellt, basierend auf Daten der Super-Dove-Satelliten von Planet, einer Konstellation multispektraler Sensoren mit acht Spektralbändern von Blau bis Nahinfrarot mit täglichen Überflügen. Die SDB-Daten wurden mit einer räumlichen Auflösung von ca. 3 m im UTM-Koordinatensystem Zone 18N relativ zum mittleren Meeresspiegel (MSL) in Metern bereitgestellt und anschließend in das Florida-West-State-Plane-Koordinatensystem relativ zu NAVD88 in Fuß umgerechnet. Bereiche ohne Sonnenlichtreflexion vom Meeresboden (und somit ohne SDB-Daten) wurden ausgeschlossen.



Volumenänderungen zwischen den Zeitpunkten vor und nach dem Sturm wurden für beide Datentypen entlang von Querprofilen an jeder R-Landmarke vom landseitigen Vermessungslimit bis zur sogenannten »depth of closure« (DOC) berechnet. Die DOC ist die vertikale Grenze des aktiven Strandprofils, unterhalb derer der Quersandtransport im Jahresmittel als vernachlässigbar gilt. Für Coquina Beach wurde die DOC basierend auf früheren Berichten und historischen Daten auf –5,5 m NAVD88 festgelegt. Einschränkungen galten für Daten in tieferen Gewässern sowie für Gebiete mit künstlichen Riffen oder felsigem Untergrund, wo das Sensorsignal für SDB zu schwach war.

Oberflächenkarten wurden erstellt, um die Bodenhöhen vor und nach dem Sturm visuell darzustellen. Beide Datentypen wurden auf die Ausdehnung der hydrographischen Daten von Oktober 2022 abgestimmt. Die Single-Beam-Vermessungsdaten wurden mittels Delaunay-Triangulation interpoliert, um Höhenunterschiede zu berechnen und Differenzkarten zu erzeugen.

Vergleich zwischen SDB-Daten und traditionellen Vermessungen

Vergleich von Oberflächenkarten

Oberflächenkarten wurden für Dezember 2022 und Oktober 2023 sowohl mit hydrographischen Vermessungsdaten als auch mit SDB-Daten erstellt. Zusätzlich wurden Differenzkarten erstellt, die die Veränderungen vor und nach dem Sturm zeigen. Abb. 4 und Abb. 5 zeigen die Tiefenmessungen beider Methoden, während Abb. 6 die Höhenveränderungen zwischen den Zeitpunkten darstellt. Jede Karte zeigt die DOC-Grenze und die Lage der

zuvor kartierten felsigen Böden und künstlichen Riffe.

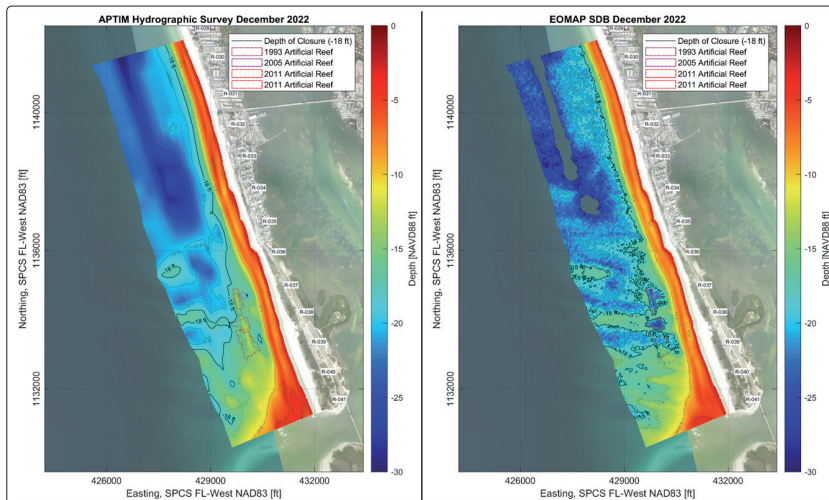


Abb. 4: Hydrographische Vermessung vom Dezember 2022 und SDB-Tiefen zum gleichen Zeitpunkt

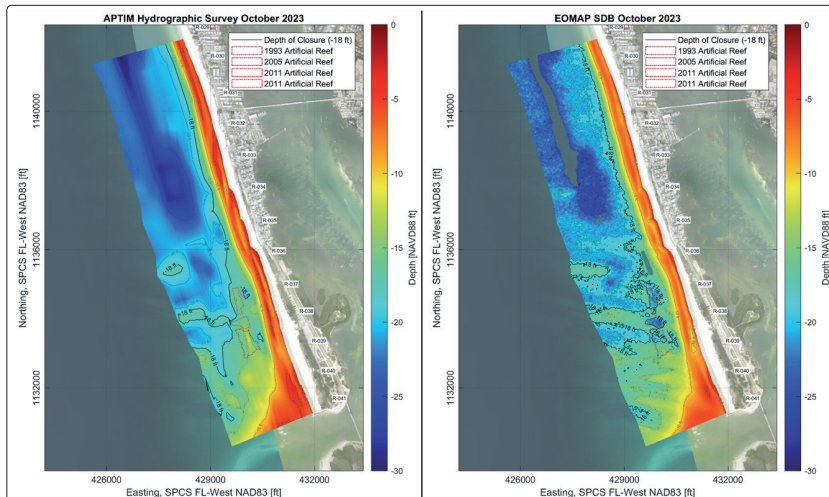


Abb. 5: Hydrographische Vermessung vom Oktober 2023 und SDB-Tiefen zum gleichen Zeitpunkt

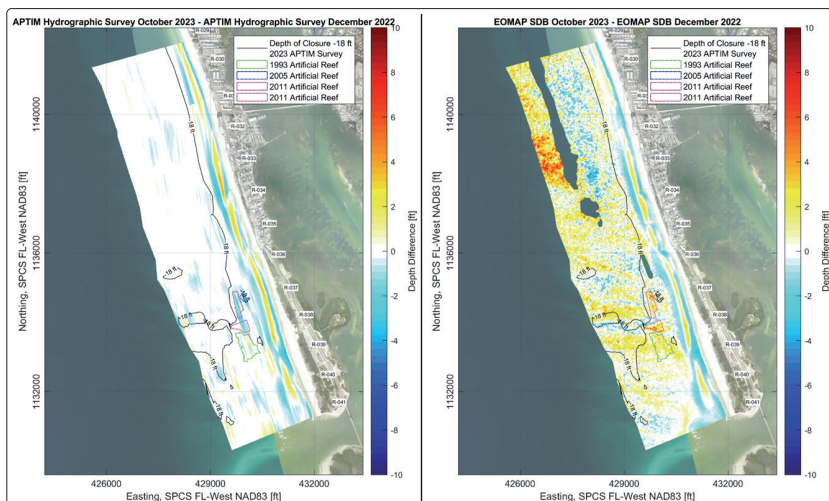


Abb. 6: Höhenunterschied von Dezember 2022 zu Oktober 2023 für die hydrographische Vermessung (links) und SDB-Daten (rechts)

Ein Vorteil der SDB ist die hohe räumliche Auflösung, die eine detaillierte Darstellung der Tiefenveränderungen im gesamten Untersuchungsgebiet ermöglicht. Im Gegensatz dazu liefern hydrographische Vermessungen Datenpunkte in etwa 300 m Abstand. Besonders nahe der Mündung zeigen die SDB-Daten feine morphologische Merkmale, während die Single-Beam-Vermessung eine geglättete Morphologie aufweist. Zwischen den Linien der hydrographischen Vermessung erfasste Merkmale werden durch SDB sichtbar und bieten ein vollständigeres Bild der Morphologie.

Die Differenzkarten zeigen ähnliche Trends bei bathymetrischen Veränderungen in Bereichen oberhalb der DOC, mit Erosions- und Akkumulationsmustern an der küstennahen Sandbank. Unterhalb der DOC zeigen die Datensätze größere Unterschiede. Die Konfidenzzone (CATZOC) der SDB (quantifiziert als »vertikale Unsicherheit« pro Pixel) nimmt mit zunehmender Wassertiefe und abnehmender Klarheit zu.

Auffällig sind Unterschiede bei den künstlichen Riffen (zwischen R-36 und R-39), wo SDB größere Tiefen als die hydrographische Vermessung angibt. Dunkle Hartbodenstrukturen erscheinen in Satellitenbildern wie Vertiefungen, ähnlich wie ausgebagerte Bereiche, was in Abb. 6 sichtbar ist. Dies weist auf eine physikalische Einschränkung der SDB-Methoden hin, die darauf angewiesen sind, dass Sonnenlicht vom Meeresboden reflektiert wird – extrem dunkle Oberflächen behindern diese Reflexion. Um Unsicherheiten in diesen kritischen Bereichen zu vermeiden, können die betreffenden Standorte vor der SDB-Verarbeitung identifiziert werden. Dies kann entweder durch manuelle Erkennung bekannter Riffgebiete oder durch eine separate satellitengestützte Klassifizierung des Meeresbodens (Seafloor Classification, SFC) erfolgen. Die so erkannten Bereiche würden dann entweder im Modell angepasst oder mit einer festgelegten, bekannten Tiefe maskiert, um die vertikale Unsicherheit zu verringern.

Angesichts dieser Einschränkungen wurden Bereiche mit küstennahen Hartböden und künstlichen Riffen von den Volumenberechnungen in den folgenden Abschnitten dieser Arbeit ausgeschlossen.

Vergleich von Strandprofil-Diagrammen aus SDB und Vermessungen

Für einen direkten Vergleich zwischen den gemessenen SBES-Daten und den verarbeiteten SDB-Daten wurden die SDB-Daten an denselben Standorten extrahiert, an denen die topobathymetrischen Vermessungen bei den Landmarken T-30 bis R-41+305 durchgeführt wurden. Die Vergleiche erfolgten für die Zeitpunkte Dezember 2022 und Oktober 2023. Abb. 7 zeigt ein Beispielsdiagramm.

Beim Vergleich einzelner Profilverläufe zeigt sich, dass die SDB-Daten die Gesamtform des Strandprofils mit wenigen Ausnahmen präzise erfassen. Im Durchschnitt beträgt die Abweichung zwischen der hydrographischen Vermessung und den SDB-Messungen etwa 30 cm. In flacheren Bereichen ist die Standardabweichung tendenziell geringer, während in tieferen Bereichen – insbesondere unterhalb von -4 m – größere Unterschiede zwischen den beiden Datensätzen auftreten.

Statistischer Vergleich zwischen SDB- und Vermessungsdaten

Die SDB-Ergebnisse wurden statistisch mit den Vermessungsdaten validiert, wobei die Messungen vom Oktober 2023 und Dezember 2022 getrennt analysiert wurden (siehe Abb. 8). Für beide Zeitpunkte zeigen die Statistiken die vertikale Genauigkeit gemäß CATZOC (Category Zone of Vertical Confidence), einem gängigen Maß zur Angabe von Unsicherheiten in Seekarten (IHO 2024). Für diese Validierung wurde die Kategorie CAT A2 erreicht, was bedeutet, dass über 95 % der Daten eine absolute Unsicherheit von 1 m und eine relative Unsicherheit von 2 % aufweisen. Es wird jedoch angemerkt, dass auch die höchste Kategorie CAT A1 (mit 50 cm absoluter und 1 % relativer Unsicherheit) fast erreicht wurde.

Diese Statistiken basieren auf allen Vermessungsprofilen, wobei – wie in den vorherigen Abschnitten gezeigt – die vertikale Genauigkeit je nach lokalen Bedingungen variieren kann.

Wichtig ist, dass die SDB-Daten ohne Zugriff auf die Single-Beam-Vermessungsdaten erstellt wurden. Daher dient die Single-Beam-Vermessung hier ausschließlich als Vergleichsgrundlage und nicht als Trainingsdatensatz. Dies ist relevant, da die Studie untersuchen sollte, wie genau SDB den Meeresboden erfassen kann, ohne auf aktuelle Vermessungsdaten zurückzugreifen – mit dem Ziel, zukünftige Veränderungen des Meeresbodens allein durch SDB zu erkennen.

Ergebnisse der Volumenänderung

Die Volumenänderungen wurden zwischen den einzelnen Vermessungspunkten von T-30 bis R-41+305 im Zeitraum von Dezember 2022 bis Oktober 2023 berechnet. Basierend auf den SDB-Daten wurde ein Volumenverlust von 54000 m³ im Untersuchungsgebiet ermittelt, was einer Materialdicke von etwa 245 m³/m Küstenlinie entspricht. Im Vergleich dazu ergaben die hydrographischen Vermessungsdaten einen Volumenverlust von rund 59400 m³, entsprechend einer Dichte von 268 m³/m Küstenlinie.

Die Differenz zwischen den beiden Datensätzen beträgt somit 5000 m³, was einer Abweichung von 23 m³/m Küstenlinie entspricht.

Es ist jedoch wichtig zu beachten, dass bei ei-

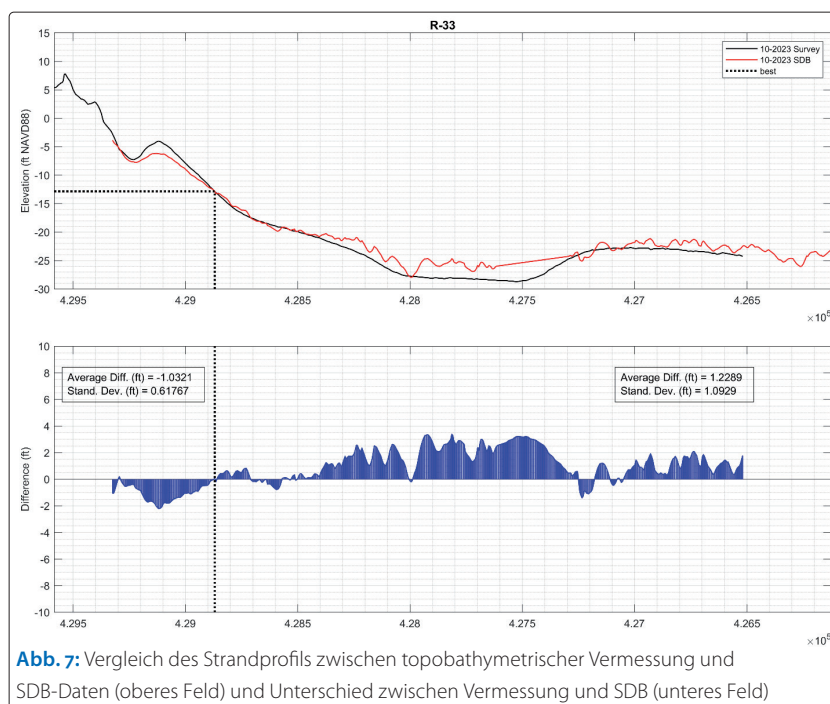


Abb. 7: Vergleich des Strandprofils zwischen topobathymetrischer Vermessung und SDB-Daten (oberes Feld) und Unterschied zwischen Vermessung und SDB (unteres Feld)

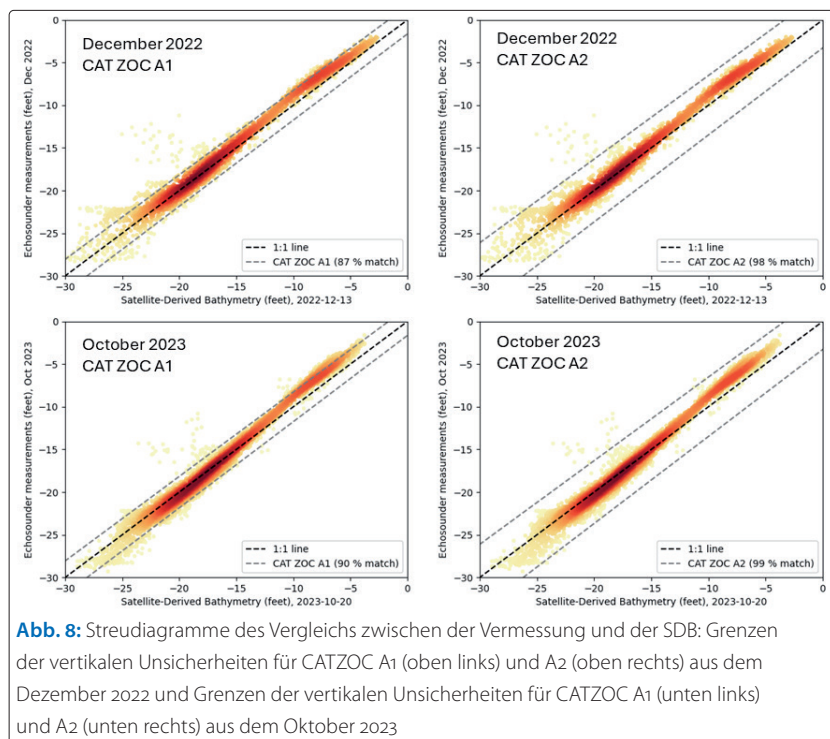


Abb. 8: Streudiagramme des Vergleichs zwischen der Vermessung und der SDB: Grenzen der vertikalen Unsicherheiten für CATZOC A1 (oben links) und A2 (oben rechts) aus dem Dezember 2022 und Grenzen der vertikalen Unsicherheiten für CATZOC A1 (unten links) und A2 (unten rechts) aus dem Oktober 2023

nem Vergleich der Volumenänderungen profilweise teils deutliche Unterschiede zwischen einzelnen Profilen festgestellt wurden, während andere Profile nur geringe Abweichungen zeigten (siehe Tabelle 1).

Vergleich von Zeit und Kosten zwischen SDB und SBES

Die Hauptvorteile der satellitengestützten Bathymetrie (SDB) gegenüber der schiffsbasierten Single-Beam-Vermessung (SBES) liegen in der Effizienz: SDB kann nach einem Sturmereignis schnell

Profile	Distanz	SDB		Hydrographische Vermessungen		Differenz	
		Dichte	Volumen	Dichte	Volumen	Dichte	Volumen
T-30	1126 ft	-2,3 cy/ft	-1900 cy	-5,0 cy/ft	-2000 cy	2,7 cy/ft	100 cy
R-31	900 ft	-1,1 cy/ft	-4500 cy	1,4 cy/ft	-900 cy	2,5 cy/ft	3600 cy
R-32	966 ft	-8,9 cy/ft	-10400 cy	-3,3 cy/ft	-1900 cy	5,6 cy/ft	8500 cy
R-33	952 ft	-12,5 cy/ft	-15200 cy	-0,5 cy/ft	-8600 cy	12,0 cy/ft	6600 cy
R-34	1019 ft	-19,5 cy/ft	-7600 cy	-17,5 cy/ft	-8300 cy	2,0 cy/ft	700 cy
R-35	922 ft	4,6 cy/ft	700 cy	1,2 cy/ft	-900 cy	3,4 cy/ft	1600 cy
R-36	521 ft	-3,2 cy/ft	-4200 cy	-3,1 cy/ft	-2000 cy	0,1 cy/ft	2200 cy
R-36.5	506 ft	-12,9 cy/ft	-4000 cy	-4,6 cy/ft	-2700 cy	8,3 cy/ft	1300 cy
R-37	440 ft	-2,8 cy/ft	-2800 cy	-6,1 cy/ft	-3300 cy	3,3 cy/ft	500 cy
R-37.5	440 ft	-9,9 cy/ft	-1900 cy	-8,7 cy/ft	-4200 cy	1,2 cy/ft	2300 cy
R-38	464 ft	1,4 cy/ft	-2100 cy	-10,5 cy/ft	-4000 cy	11,9 cy/ft	1900 cy
R-38.5	465 ft	-10,4 cy/ft	-3400 cy	-6,7 cy/ft	-7800 cy	3,7 cy/ft	4400 cy
R-39	453 ft	-4,3 cy/ft	400 cy	-27,0 cy/ft	-6800 cy	22,7 cy/ft	7200 cy
R-39.5	453 ft	6,2 cy/ft	3700 cy	-3,1 cy/ft	-6000 cy	9,3 cy/ft	9700 cy
R-40	429 ft	10,3 cy/ft	-800 cy	-23,3 cy/ft	-7200 cy	33,6 cy/ft	6400 cy
R-40.5	425 ft	-14,1 cy/ft	-8000 cy	-10,3 cy/ft	-7100 cy	3,8 cy/ft	900 cy
R-41	291 ft	-23,5 cy/ft	-9200 cy	-23,0 cy/ft	-4000 cy	0,5 cy/ft	5200 cy
R-41+305		-39,9 cy/ft		-4,4 cy/ft		35,4 cy/ft	
Study Area	10774 ft	-6,6 cy/ft	-71200 cy	-7,2 cy/ft	-77700 cy	0,6 cy/ft	6500 cy

Tabelle 1: Volumenänderungen zwischen Untersuchungen vor und nach dem Sturm unter Verwendung jedes Datensatzes auf Profilbasis

und kostengünstig genaue Daten liefern. Ein wertbares Satellitenbild für die SDB-Verarbeitung ist unmittelbar nach dem Durchzug des Sturms möglich – vorausgesetzt, die Wolkenbedeckung und die Wassertrübung normalisieren sich. Planets multispektrale SuperDove-Satelliten können Daten mehrmals täglich erfassen.

Da die physikbasierten SDB-Daten aus der Ferne verarbeitet werden und keine Vor-Ort-Daten erforderlich sind, muss kein Vermessungsteam oder Schiff entsendet werden. Dies spart Zeit und vermeidet Risiken, die mit manuellen Vermessungen verbunden sind. Die Verarbeitung der SDB-Daten

erfolgt wenige Stunden nach Erhalt des Bildmaterials – deutlich schneller als eine traditionelle schiffsgestützte Vermessung. Diese Faktoren führen zu erheblichen Kosteneinsparungen. Obwohl keine genauen Kosten für die SBES-Vermessungen vorliegen, ist davon auszugehen, dass SDB etwa zehnmal günstiger ist als herkömmliche SBES-Messungen.

Zusammenfassung der Ergebnisse

Diese Analyse vergleicht hydrographische Vermessungen vor und nach Hurrikan Idalia mit SDB-Daten. Die wichtigsten Erkenntnisse sind:

- SDB liefert hochauflösende räumliche Veränderungen und ermöglicht eine präzise Darstellung morphologischer Veränderungen im gesamten Untersuchungsgebiet. Besonders in der Nähe von Mündungen zeigt SDB feine Strukturen, die mit SSB nicht erfasst werden.
- Die Gesamtform des Strandprofils wird durch SDB zuverlässig erfasst, insbesondere in Bereichen oberhalb der »depth of closure« (DOC), die als Grenze für Volumenberechnungen nach Sturmereignissen dient.
- Die durchschnittliche Abweichung zwischen SDB und SBES beträgt etwa 30 cm, wobei die Genauigkeit in flachen Gewässern höher ist als in tieferen Bereichen.
- An künstlichen Riffen zeigen sich deutliche Unterschiede: SDB weist größere Tiefen auf als SBES, was auf methodische Einschränkungen bei der SDB-Datenanalyse zurückzuführen ist. Diese können vermieden werden, wenn Riffstandorte vorab identifiziert werden.
- Die SDB-Daten erfüllen die Anforderungen der Genauigkeitskategorie CATZOC A2 und nähern sich sogar der höchsten Kategorie CATZOC A1 – und das ohne Einsatz von Trainingsdaten vor Ort. Weitere Verbesserungen sind durch nachträgliche Kalibrierung mit wenigen Vermessungsprofilen möglich.
- Vertikale Unsicherheiten nehmen zu bei geringer Lichtreflexion des Meeresbodens, etwa durch große Wassertiefe oder dunkle Sedimente. In solchen Fällen kann eine Maskierung der Daten zur Sicherstellung einer Mindestgenauigkeit erfolgen.
- Beide Datensätze zeigen ähnliche Volumenverluste im Untersuchungsgebiet:
 - SBES: ca. 59400 m³,
 - SDB: ca. 54400 m³.
 Diese Unterschiede sind auf lokale Morphologie und das Vorhandensein von dunklem, felsigem Seegrund zurückzuführen.

In Anbetracht der durchgeführten Analyse haben die SDB-Daten das Potenzial, ein wertvolles Instrument für die schnelle Katastrophenbewertung künstlich angelegter Strände nach Stürmen zu

sein. Im Vergleich zu herkömmlichen Methoden bietet SDB Vorteile hinsichtlich Zugänglichkeit und Kosteneffizienz sowie die einzigartige Möglichkeit, vor dem Sturmereignis eine bathymetrische Basisoberfläche zu erstellen und anschließend eine schnelle Bewertung nach dem Sturm durchzuführen. Daher ist es ein wertvolles Instrument für schnelle Entscheidungen nach einem Sturm, insbesondere für die Erstellung erster Schätzungen der Volumenverluste für Katastrophenerklärungen durch staatliche und bundesstaatliche Behörden. Bestimmte Einschränkungen der Methode müssen jedoch im Einzelfall berücksichtigt werden, abhängig von den geomorphologischen Merkmalen des Gebiets, für das die Daten bereitgestellt werden.

Zukünftige Trends bei multispektralen Satellitenbildern für Küstenanwendungen

Der Bedarf an sehr hochauflösenden Bildern sowohl für archivierte (historische) Daten als auch für Nachsturmereignisse, die für diese Analyse erforderlich sind, stellt für die Anbieter multispektraler Satellitenbilder eine Herausforderung dar. Für

die benötigten hochauflösenden Daten verfügen derzeit nur die SuperDoves von Planet über eine kontinuierliche tägliche Aufzeichnung der Erde in einer räumlichen Auflösung von unter 4,5 Metern. Im Gegensatz zu anderen Anbietern kommerzieller Satellitendaten (oder luftgestützter Dienste), die auf Abruf arbeiten, sammelt Planet systematisch Bilder ohne spezifisches Tasking, was ein erheblicher Vorteil für die Analyse der Auswirkungen von Stürmen auf Strände vor und nach dem Ereignis ist.

In letzter Zeit gab es einen deutlichen Anstieg der Kapazitäten neuer Satelliten aus verschiedenen Quellen. Die ersten Satelliten der Maxar-Legion-Konstellation wurden kürzlich gestartet und werden in der Lage sein, ähnlich anspruchsvolle Anwendungen mit höherer räumlicher Auflösung zu unterstützen. Auch andere Anbieter wie Airbus tragen zur Bereitstellung von hochauflösenden Bildern bei, um eine kontinuierliche Beobachtung der Hurrikan-bedrohten Gebiete innerhalb der kontinentalen USA zu ermöglichen. Mit der Inbetriebnahme technologisch fortschrittlicherer Satellitensensoren wird die Fähigkeit zur Erstellung hochauflösender SDB in Qualität, Genauigkeit und Häufigkeit zunehmen. //

Literatur

- Bulgarelli, Barbara; Viatcheslav B. Kisselev; Laura Roberti (1999): Radiative transfer in the atmosphere-ocean system: The finite-element method. *Applied Optics*, DOI: 10.1364/AO.38.001530
- Heege, Thomas; Viatcheslav Kiselev; Magnus Wettle; Nguyen Nghia Hung (2014): Operational multi-sensor monitoring of turbidity for the entire Mekong Delta. *International Journal of Remote Sensing*, DOI: 10.1080/01431161.2014.890300
- IHO (2024): Guidance to Satellite-derived Bathymetry (1st ed.). IHO Publication B-13, International Hydrographic Organization, Monaco. https://iho.int/uploads/user/pubs/bathy/B_13_Ed100_032024.pdf
- Kisselev, Viatcheslav; Barbara Bulgarelli (2004): Reflection of light from a rough water surface in numerical methods for solving the radiative transfer equation. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, DOI: 10.1016/S0022-4073(03)00236-X
- Kisselev, Viatcheslav; Laura Roberti; Giovanni Perona (1995): Finite-element algorithm for radiative transfer in vertically inhomogeneous media: Numerical scheme and applications. *Applied Optics*, DOI: 10.1364/AO.34.008460
- Lyzena, David R.; Norman P. Malinas; Fred J. Tanis (2006): Multispectral bathymetry using a simple physically based algorithm. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, DOI: 10.1109/TGRS.2006.872909
- Manatee County (2024): Beach nourishment updates. www.myanatee.org/departments/sports_and_leisure_services/parks__preserves____beaches/beach_renourishment_update
- NOAA (2023): National Hurricane Center Tropical Cyclone Report: Hurricane Idalia (AL102023). www.nhc.noaa.gov/data/tcr/AL102023_Idalia.pdf
- NOAA (2024): National Data Buoy Center, Station 42099 – Offshore St. Petersburg, FL (144). www.ndbc.noaa.gov/station_page.php?station=42099
- Stumpf, Richard P.; Kristine Holderied; Mark Sinclair (2003): Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types. *Limnology and Oceanography*, DOI: 10.4319/lo.2003.48.1_part_2.0547

Monitoring küstennaher Flachwasserbereiche durch raumzeitliche Satellitenbilddatenanalyse mittels KI-gestützter optischer Hydrographie für eine anlassbezogene Seevermessung

Ein Beitrag von PETER GRABBERT, MIRKO BOTHE und PATRICK WESTFELD

Die Kenntnis der Variabilität des Meeresbodens ist eine wesentliche Voraussetzung für eine bedarfsgerechte und ressourceneffiziente Seevermessung. Ein möglicher Ansatz zur Generierung dieses Wissens besteht in der Bereitstellung und Analyse raumzeitlich hochaufgelöster Bathymetrien aus multispektralen Satellitenbilddaten. Das auf diesen Entwicklungen basierende Verfahren wurde prototypisch als vollautomatischer operationeller Dienst beim Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie realisiert. Die im ersten Schritt notwendige spektrale Ableitung der Bathymetrie wird mit Hilfe eines Convolutional Neural Network für Flachwasserbereiche bis circa 10 m Tiefe ermittelt. In den durchgeführten Untersuchungen wurde ein mittlerer absoluter Fehler von 0,47 m sowie ein RMSE von 0,86 m ermittelt. Für die anschließende Änderungsanalyse werden verschiedene Verfahren eingesetzt, darunter eine Hauptkomponentenanalyse, eine Change-Vector-Analyse, ein Least-Squares-Tracking und eine robuste Median-differenz. Die Ergebnisse werden stochastisch gewichtet, zu einem repräsentativen Änderungswert zusammengefasst, räumlich aggregiert und schließlich in ein intuitives Ampelschema überführt. Auf dieser Grundlage werden für die Einsatzplanung der Seevermessung anlassbezogene Handlungsempfehlungen bereitgestellt.

optische Hydrographie | Sentinel-2 | multispektrale Tiefenbestimmung | satellitengestützte Bathymetrie | Änderungsdetektion | Monitoring | Einsatzplanung
optical hydrography | Sentinel-2 | spectrally-derived bathymetry | satellite-derived bathymetry | change detection | monitoring | hydrographic survey planning

The knowledge of the variability of the seabed is an essential prerequisite for needs-based and resource-efficient hydrographic surveying. One possible approach to generating this knowledge is to provide and analyse high-resolution bathymetry data from multispectral satellite imagery. The process based on these developments was implemented as a prototype fully automated operational service at the German Federal Maritime and Hydrographic Agency (BSH). The spectral derivation of bathymetry required in the first step is performed using a convolutional neural network for shallow waters up to a depth of approximately 10 m. The investigations carried out determined an average absolute error of 0.47 m and an RMSE of 0.86 m. Various methods are used for the subsequent change analysis, including principal component analysis, change vector analysis, least squares tracking and robust median difference. The results are stochastically weighted, merged into a representative change value, spatially aggregated and finally converted into an intuitive traffic light scheme. On this basis, event-related recommendations for action are provided for the deployment planning of hydrographic surveying at BSH.

1 Einführung

Das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) ist als Hydrographischer Dienst Deutschlands für die Vermessung des Meeresbodens der deutschen Küstengewässer und der ausschließli-

chen Wirtschaftszone (AWZ) in Nordsee und Ostsee verantwortlich. Ein wichtiges Ziel ist, notwendige Grundlagedaten für eine wirtschaftliche Nutzung bei gleichzeitigem Schutz der Meere bereitzustellen. Hierfür sind insbesondere aktuelle und genaue

Informationen zu Wassertiefen von zentraler Bedeutung. Sie ermöglichen eine sichere Navigation der Schifffahrt, was insbesondere vor dem Hintergrund des zunehmenden Schiffsverkehrs, der wachsenden Schiffsgrößen sowie der räumlichen Einschränkungen durch Naturschutzgebiete, Off-shore-Infrastrukturen und anderer Nutzungsansprüche von großer Bedeutung ist. Besonders die Anforderungen an die Genauigkeit und Aktualität bathymetrischer Daten haben in den letzten Jahren deutlich zugenommen. Gleichzeitig unterliegt die Unterwassertopografie insbesondere im Flachwasserbereich kontinuierlich Veränderungen, die durch regelmäßig durchgeführte schiffsgestützte Echolotvermessungen (und perspektivisch Laserbathymetriebeeinflugungen) erfasst werden. Dabei kann es vorkommen, dass Gebiete einbezogen werden, in denen keine unmittelbar erkennbaren Veränderungen der Meeresbodentopografie vorliegen. Dieses Vorgehen bringt einen gewissen Ressourceneinsatz mit sich und steht zugleich vor der Herausforderung, den unterschiedlichen Anforderungen der Nutzerschaft – insbesondere im Hinblick auf die Aktualität der BSH-Produkte – bestmöglich gerecht zu werden. Eine weitergehende Kenntnis über tatsächliche Veränderungen könnte dazu beitragen, Vermessungseinsätze noch gezielter zu planen und die verfügbaren Kapazitäten entsprechend zu priorisieren.

Um diese Lücke zu schließen, wurde ein prototypischer Dienst entwickelt, der satellitengestützte Erdbeobachtung nutzt, um kontinuierlich Veränderungen der Bathymetrie zu überwachen. Dafür können die Methoden der spektral abgeleiteten Bathymetrie (spectrally-derived bathymetry; konkret satellite-derived bathymetry (SDB) aus passiv erzeugten multispektralen Bilddaten) genutzt werden, um küstennahe Flachwasserbereiche zu vermessen (Lyzenga 1978). Zwar erreichen die Ergebnisse nicht die Genauigkeit von hydroakustischen Messungen, bieten jedoch eine hohe zeitliche Abdeckung bei vergleichsweise geringem Aufwand (Abschnitt 3.2). Die abgeleiteten raumzeitlich aufgelösten Bathymetriedaten bilden die Grundlage für ein kontinuierliches Monitoring, das Veränderungen der Unterwassertopografie detektiert und quantifiziert (Abschnitt 3.3).

Im Ergebnis stehen diverse Entscheidungsparameter zur Verfügung, die der Einsatzplanung der BSH-Seevermessung über ein intuitives Ampelschema Handlungsempfehlungen für die Neuvermessung veränderlicher Flachwassergebiete liefert. Durch eine anlassbezogene Seevermessung können im gesamten Aufgabengebiet die knappen Ressourcen gezielter eingesetzt und zeitgleich die Datenaktualität gesteigert werden. Darüber hinaus trägt eine anlassbezogene Seevermessung dazu bei, Eingriffe in sensible Meeresökosysteme zu reduzieren.

2 Methodische Grundlagen und Stand der Forschung

2.1 Multispektrale Tiefenbestimmung

SDB zielt darauf ab, einen Zusammenhang zwischen den am Bildsensor empfangenen Reflexionswerten der unterschiedlichen spektralen Kanäle und der Gewässertiefe herzustellen. Die gemessenen Reflexionswerte sind allerdings nicht nur von der Gewässertiefe, sondern auch von weiteren Faktoren wie der atmosphärischen Beschaffenheit (z.B. Wasserdampf, Aerosole und Wolken), dem Reflexionsverhalten an der Wasseroberfläche (unter anderem bedingt durch Wellen und Sonnenspiegelung), der Beschaffenheit der Wassersäule (unter anderem beeinflusst durch Trübung) und den Reflexionseigenschaften des Gewässeruntergrunds abhängig. Um aus den gemessenen Reflexionswerten die Gewässertiefe zu ermitteln, werden unterschiedliche Ansätze verfolgt. Diese reichen von physikalischen Modellierungen (z.B. Lyzenga et al. 2006; Hartmann et al. 2022) bis hin zu datengetriebenen Regressionsverfahren, wie beispielsweise klassische KI-basierte Techniken (z.B. Mudiyansele et al. 2022; Susa 2022). Einen umfassenden methodischen Überblick geben Laporte et al. (2020), Mandlbürger (2022) und IHO (2024). SDB ist ein passives optisches Messverfahren, das messprinzipbedingt eine geringere Tiefenmessperformance als vergleichbare aktive Fernerkundungstechniken wie Laserbathymetrie aufweist. Die maximale Eindringtiefe entspricht circa der einfachen Sichttiefe (1x-Secchi) (Jégat et al. 2016), was den Einsatzbereich von SDB auf Flachwasserbereiche beschränkt.

Der Großteil der bisher veröffentlichten SDB-Ansätze sind Arbeiten, die Bathymetrie in sehr klaren Gewässern mit entsprechend hohen Sichttiefen ableiten (z.B. in Karibik und Mittelmeer) (Geyman und Maloof 2019; Najar 2022; Susa 2022; Chu et al. 2023; Xie et al. 2024). Die Ziele sind dabei in der Regel die einmalige Ableitung der Bathymetrie eines Gebietes; nicht aber das Monitoring, also die Ableitung einer hochaufgelösten bathymetrischen Zeitreihe. Dieser Ansatz ermöglicht eine überaus strenge Auswahl des genutzten Satellitenbildes bzw. der genutzten Satellitenbilder, sodass lediglich nahezu optimale Satellitenbilder im Hinblick auf Bewölkung, atmosphärische Bedingungen, Seegang, Sonnenreflexion und Trübung analysiert werden müssen. Um eine kontinuierliche Zeitreihe zu erhalten, muss aber auch auf Satellitenbilder zurückgegriffen werden, die herausforderndere Umweltbedingungen aufweisen. In diversen Studien konnten dabei deren negative Einflüsse und zugleich die begrenzten Möglichkeiten der Kompensation gezeigt werden (Ashphaq 2023; Caballero und Stumpf 2023; Zhuang et al. 2025).

Um die Gewässertiefe unter herausfordernden

Autoren

Peter Grabbert, Mirko Bothe und Dr. Patrick Westfeld arbeiten beim Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) in Rostock.

peter.grabbert@bsh.de

Das vorliegende Manuskript stellt die gekürzte deutsche Fassung eines begutachteten Fachzeitschriftenartikels dar, der im November 2024 in der *The International Hydrographic Review (IHR)* erschienen ist. Der Originaltitel lautet: »Spatiotemporal analysis of satellite imagery using AI-based optical hydrography for adaptive planning of hydrographic resources«. DOI: 10.58440/ihr-30-2-a15

Bedingungen spektral ableiten zu können, sind unter anderem Convolutional Neural Networks (CNN) geeignet. Diese können aufgrund ihrer integrierten räumlichen Filter komplexe Strukturen und Situationen analysieren (LeCun et al. 1998). CNNs sind künstliche neuronale Netze und verfolgen einen rein empirischen Ansatz, bei dem der Zusammenhang zwischen den Eingangsgrößen und der Zielgröße (Bathymetrie) mit Hilfe von bereitgestellten Referenzdaten hergestellt wird. Dabei haben sich insbesondere CNNs in U-Net-Struktur aufgrund ihrer Kombination aus der Analyse von klein- bis großräumigen Nachbarschaftsverhältnissen als besonders geeignet erwiesen (Ronneberger et al. 2015). Auch für die SDB finden CNNs in U-Net-Struktur Anwendung. So konnte die Gewässertiefe von Mandlbürger et al. (2020) mit einer Standardabweichung von 40 cm bis circa 5 m Tiefe in Süßwasserseen, von Knudby und Richardson (2023) mit einem mittleren absoluten Fehler (MAE) von 1,13 m bis 20 m Tiefe im Mittelmeer und von Lumban-Gaol et al. (2022) mit bis zu 1,22 m als Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers (root mean square error, RMSE) bis 20 m Tiefe erreicht werden.

2.2 Stand der Forschung zur Änderungsanalyse auf Grundlage spektral abgeleiteter Bathymetrien

Die Analyse von bathymetrischen Änderungen auf Basis spektral abgeleiteter Wassertiefen ist eine Kernaufgabe des zu entwickelnden Dienstes und ein bisher wenig untersuchtes Forschungsfeld. So führten Hermann et al. (2022) einen Vergleich zweier Zeitpunkte für die Jahre 2019 und 2021 in einem Küstenabschnitt des Golfs von Mexiko durch, wobei je ein Sentinel-2-Bild und ICESat-2-Track verwendet wurde. Die Wassertiefen wurden mit Hilfe des Bandverhältnisverfahrens nach Stumpf et al. (2003) berechnet. Die ICESat-2-Daten dienten als Referenz für die lineare Regression. Die Änderungsanalyse erfolgte über eine einfache Differenzbildung, gefolgt von einer Medianfilterung zur Glättung der Ergebnisse. Zur Validierung wurden luftgestützte LiDAR-Daten (Light Detection and Ranging) herangezogen, wobei die Standardabweichung 1,29 m und der RMSE 2,11 m betrug. In einer weiteren Studie von Lowell und Rzhonov (2025) wurden die durch den Hurricane Irma im Jahr 2017 verursachten Meeresbodenänderungen über einen Vergleich der Zeitpunkte 2016 und 2019 ermittelt. Dafür wurden pro Zeitpunkt die Gewässertiefen über den semi-empirischen Ansatz nach Stumpf et al. (2003) aus jeweils mehreren Landsat-Aufnahmen berechnet. Die Ergebnisse wurden mit auf Laserbathymetriebefliegungen basierenden Referenzänderungen verglichen. Die erzielten Ergebnisse variieren gebietsabhängig deutlich und reichen von einem RMSE von 0,12 m

bis 0,59 m bzw. einem RMSE von 6 % bis 41 % im Verhältnis zur Wassertiefe.

2.3 Weiterführende Techniken zur Änderungsanalyse

Die vorhandenen Studien zur Ableitung der Änderungen aus SDB nutzen vergleichsweise einfache SDB-Methodiken und Differenztechniken (Abschnitt 2.2). Daher wurde zur Entwicklung dieses Dienstes auf weitere in der Fernerkundung verbreitete Änderungsdetektionstechniken zurückgegriffen. Hierfür wurde eine Hauptkomponentenanalyse (HKA) implementiert, um die redundanten Informationen der unveränderten Gebiete in einer Bildsequenz zu reduzieren (Wold et al. 1987). Durch die Transformation der Bildsequenz in den Eigenvektorraum und deren Rücktransformation können insbesondere veränderliche Bildbereiche hervorgehoben werden. Die HKA ist in der Fernerkundung eine bewährte Methode zur Änderungsdetektion und findet in unterschiedlichen Anwendungen Einsatz (Lu et al. 2004; Deng et al. 2008; Afaq und Manocha 2021; Dharani und Sreenivasulu 2021). Eine weitere Methode ist die Change-Vector-Analyse (CVA), welche für den n-dimensionalen (spektralen) Raum Verschiebungsvektoren berechnet (Malila 1980). Die CVA ist eine verbreitete Technik und findet in unterschiedlichen fernerkundlichen Anwendungen Einsatz (Chen et al. 2003; Singh und Talwar 2013; Thonfeld et al. 2016; Xu et al. 2019). Gebiete, in denen Änderungen detektiert wurden, können einer detaillierten Analyse unterzogen werden. So ermöglicht beispielsweise das durch Westfeld (2012) entwickelte 2,5D-Least-Squares-Tracking (LST) die Berechnung eines raumzeitlich hochaufgelösten 3D-Bewegungsvektorfeldes. 2,5D-LST verarbeitet dabei Intensitäts- und Tiefeninformationen simultan und ermöglicht die zuverlässige Verfolgung von Oberflächensegmenten mit Subpixelgenauigkeit. 2,5D-LST wurde von Westfeld et al. (2013) genutzt, um Richtung und Betrag menschlicher Bewegungen in Bildsequenzen einer 3D-Time-of-Flight-Kamera zu schätzen.

3 Entwicklung und Realisierung eines automatischen operationellen Dienstes

Ziel ist die Entwicklung und Realisierung eines Dienstes, der automatisch auf der BSH-eigenen IT-Infrastruktur arbeitet und nahezu ohne personellen und finanziellen Mehraufwand die Einsatzplanung der Seevermessung optimieren kann. Der Dienst ist modular aufgebaut und verfügt über standardisierte Schnittstellen, sodass Erweiterungen um z.B. neue Datenquellen und Auswertelgorithmen einfach möglich sind. Eine zentrale Steuerungskomponente erlaubt es, den Dienst flexibel auf unterschiedliche Anwendungsfälle anpassen zu können, um die Bearbeitung von sowohl regel-

mäßig wiederkehrenden Standardauswertungen als auch lokale Einzelanalysen zu ermöglichen. Die einzelnen Arbeitsschritte sind dabei so gekapselt, dass eine Ausführung durch unterschiedliche PCs bzw. Server möglich ist und diese Recheneinheiten darüber hinaus flexibel eingebunden werden können. Die Arbeitspakete des Dienstes (Abb. 1) beinhalten dabei unter anderem den Download und die Bereitstellung der multispektralen Satellitenbilder (Abschnitt 3.1), die Ableitung der Gewässertiefe mit Hilfe eines CNN (Abschnitt 3.2) und die Änderungsanalyse auf Grundlage der abgeleiteten bathymetrischen Zeitreihe (Abschnitte 3.3 und 3.4).

3.1 Datenquellen

Der vorgestellte Dienst basiert auf multispektralen Sentinel-2-Satellitenbilddaten (ESA 2025), welche sich durch eine hohe räumliche Auflösung (bis zu $10\text{ m} \times 10\text{ m}$) und einen kostenfreien Datenzugriff auszeichnen. Die Mission der European Space Agency (ESA) besteht derzeit aus drei Satelliten, wobei diese sich auf einem sonnensynchronen Orbit mit jeweils einer Wiederholrate von zehn Tagen befinden. Die Satellitenbilder bestehen aus 13 spektralen Bändern, von denen fünf Bänder – von coastal blue (B1 mit $\lambda \approx 442\text{ nm}$) bis nahes Infrarot (NIR; B5 mit $\lambda \approx 704\text{ nm}$) – zumindest teilweise in Wasser eindringen können. Die anderen Bänder unterstützen die SDB-Berechnung durch Extraktion weiterer Merkmale wie Wolken, Eis, Landflächen und Algen (Grabbert et al. 2024).

Damit das CNN für die Bathymetrieberechnung trainiert werden kann, sind Referenzdaten zu den Gewässertiefen erforderlich. Die Datengrundlage wurde hierfür durch Fächer- und Vertikalecholotvermessungen bereitgestellt, wobei jeweils die neuesten verfügbaren Daten zu einem Raster in einer Auflösung von $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ prozessiert wurden. Trotzdem gibt es einen Zeitversatz zwischen Satellitenbild und Aufnahme der Referenzmessung, der von wenigen Tagen bis zu einigen Jahren reichen kann. Mögliche in dieser Zeitspanne auftretende bathymetrische Änderungen führen dazu, dass insbesondere in dynamischen Gebieten die Referenzmessungen veraltet sein können und damit eine ungenaue »Referenz« darstellen. Allerdings sind diese Gebiete, in denen die so entstehenden Ungenauigkeiten die erwartbare SDB-Untergrenze (einige Dezimeter bis wenige Meter) übersteigen, nach den Erfahrungswerten der BSH-Seevermessung für die deutsche Ostsee relativ klein. Daher wird der so erstellte bathymetrische Referenzdatensatz dennoch als für das Training des CNN geeignet angesehen.

3.2 Entwickelte Methodik zur Ableitung der Bathymetrie

Dieser Abschnitt umfasst die Prozessschritte von der Verarbeitung der bereitgestellten multispek-

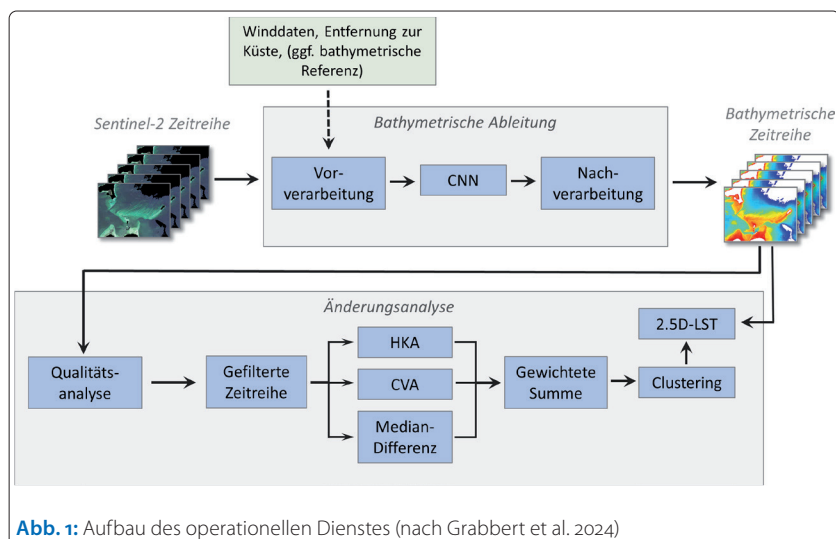


Abb. 1: Aufbau des operationellen Dienstes (nach Grabbert et al. 2024)

tralen Satellitenbilder bis hin zur Ableitung der bathymetrischen Zeitreihe (Abb. 1), welche ausführlich in Grabbert et al. (2024) erläutert werden.

Zunächst wird die Eignung der multispektralen Satellitenbilder für die SDB-Analyse untersucht, wobei insbesondere die Umweltbedingungen unter Berücksichtigung von Wolken, Wolken Schatten, sonstigen atmosphärischen Bedingungen, Trübung, Seegang, Sonneneinstrahlung, Schaum, Algen und Eis zu berücksichtigen sind. Dabei werden nicht nutzbare bzw. stark gestörte Satellitenbilder oder Satellitenbildbereiche detektiert und von der weiteren Analyse ausgeschlossen. Für die geeigneten Bildbereiche findet eine Vorprozessierung statt, bei der unter anderem Trübungsindizes und logarithmische Bandkombinationen nach Geyman und Maloof (2019) berechnet werden.

Die anschließende Schätzung der Bathymetrie findet durch eine Regression mit Hilfe eines CNNs statt. Das genutzte CNN wurde von Žak (2020) entwickelt und weist eine U-Net-Struktur nach Ronneberger et al. (2015) auf. Das aktuell genutzte Modell wurde mit Hilfe von circa 350 Sentinel-2-Bildern trainiert, die zu insgesamt circa 10000 Bildsegmenten verarbeitet wurden. Jedes Bildsegment beinhaltet sowohl die spektralen Bänder von coastal blue bis NIR als auch die während der Vorprozessierung berechneten Trübungsindizes und logarithmischen Bandkombinationen. Das Modelltraining umfasste 80 Epochen, wobei 80 % der Bildsegmente auf das Training und 20 % auf die Validierung entfielen. Während der Berechnung der SDB wird dieses Modell genutzt, um die Gewässertiefe aus den vorverarbeiteten Satellitenbildern zu bestimmen. In einer Nachbereitung werden die bathymetrischen Ergebnisse unter hoher Überlappung (80 %) arithmetisch gemittelt und zu einer für die weitere Verarbeitung zweckdienliche Größe von circa $20\text{ km} \times 20\text{ km}$ zusammengefügt.

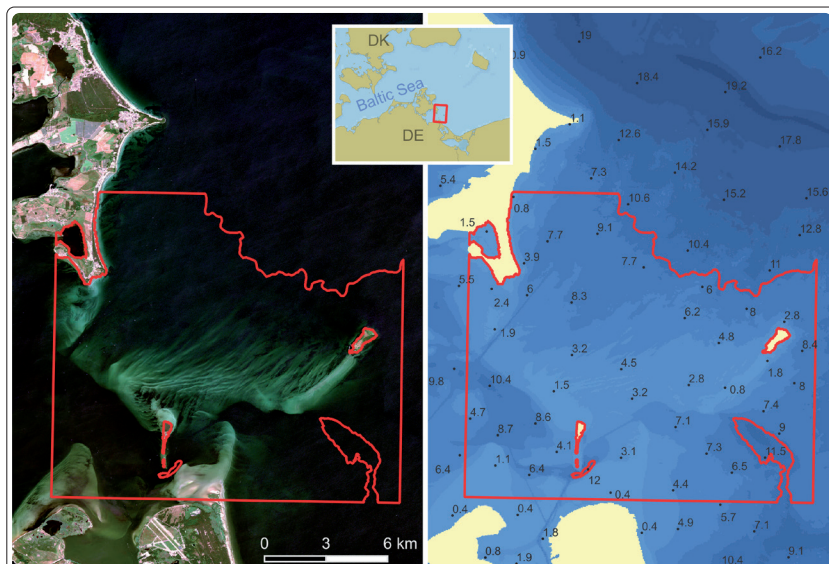


Abb. 2: Darstellung des rot umrandeten Untersuchungsgebietes im Greifswalder Bodden bis zu einer Tiefe von circa 10 m. Hintergrund: Sentinel-2 RGB (links), Wassertiefen in [m] (rechts)

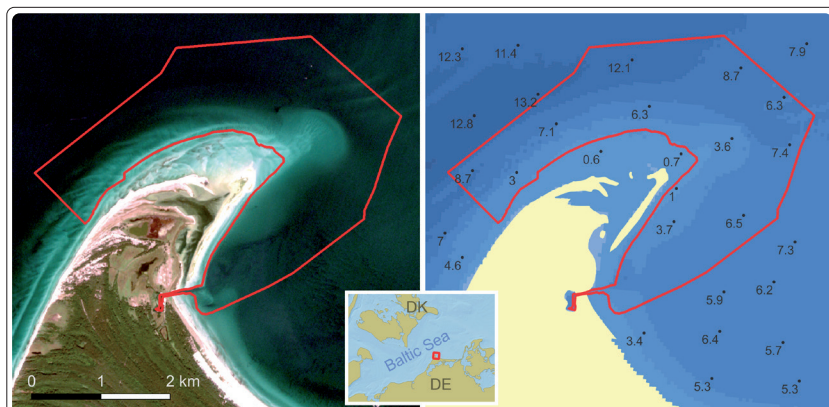


Abb. 3: Darstellung des rot umrandeten Untersuchungsgebietes bis zu einer Tiefe von circa 10 m nördlich »Darßer Ort«, Halbinsel Fischland-Darß-Zingst. Hintergrund: Sentinel-2 RGB (links), Wassertiefen in [m] (rechts)

3.3 Änderungsanalyse

Die Änderungsanalyse basiert auf den SDB-Ergebnissen (Abschnitt 3.2) zu verschiedenen Zeitpunkten. Diese bathymetrische Zeitreihe bildet die Grundlage für die Detektion und Quantifizierung der geometrischen Veränderungen des Meeresbodens (Abb. 1). Im ersten Schritt wird eine Qualitätsanalyse durchgeführt, bei der die einzelnen Satellitenbilder und die daraus abgeleitete Bathymetrie bewertet werden. Dabei werden zum einen die Konsistenz zu den benachbarten Zeitpunkten betrachtet. Zum anderen werden die Umweltbedingungen berücksichtigt, wobei Bewölkung, Windstärke, Trübung/Algen und Sonnenstand mit einfließen. So werden insbesondere Satellitenbilder mit hohen bathymetrischen Differenzen zu den zeitlich benachbarten Satellitenbildern bei zugleich hohen Wolken-, Wind- oder Trübungswerten aussortiert. Im Ergebnis entsteht eine auf die geeigneten Bilder reduzierte Zeitreihe, welche im Durchschnitt aus fünf bis zehn Zeitpunkten

pro Jahr besteht. In empirischen Untersuchungen hat sich eine strenge Filterung und ein Fokus auf wenige Zeitpunkte unter möglichst ungestörten Umweltbedingungen gegenüber einer milden Filterung und der Auswertung von mehr, aber teils gestörten Zeitpunkten bewährt.

Im nächsten Schritt werden verschiedene Methoden der Änderungsdetektion genutzt, um die Variabilität jedes Pixels über die Bildsequenz hinweg zu quantifizieren. Dafür werden eine HKA, eine CVA und eine robuste Mediandifferenz berechnet, die jeweils einen oder mehrere Parameter zur Beschreibung der Veränderlichkeit erzeugen. Im Anschluss werden diese Werte normalisiert, gewichtet und zu einem Gesamtveränderungswert summiert. Dieser wird mit Hilfe des k-Means-Algorithmus (MacQueen 1967) geclustert, morphologisch gefiltert und in vier Klassen von 0 (keine Veränderung) bis 3 (sehr starke Veränderung) eingeteilt, welches dem angestrebten Ampelschema entspricht. Für die als veränderlich erkannten Gebiete werden mit 2,5D-LST Bewegungsvektorfelder berechnet und Bewegungsrichtung und -betrag als zusätzliches Ergebnis ausgegeben.

4 Untersuchungen

4.1 Untersuchungsgebiete

Die Untersuchungen wurden in zwei unterschiedlichen Gebieten durchgeführt. Für die Betrachtung der SDB ist ein statisches Gebiet mit wenigen Veränderungen vorteilhaft, wohingegen für die Untersuchung der Änderungsanalyse ein dynamisches Gebiet zielführend ist.

Die Untersuchung der SDB-Methodik (Abschnitt 3.2) wurde im Gebiet des Greifswalder Boddens durchgeführt, welcher von ausgedehnten Flachwasserbereichen geprägt ist (Abb. 2). Der Gewässeruntergrund ist überwiegend mit hellen Sand- und Kiesböden bedeckt, unterbrochen von einigen im Bild dunkel erscheinenden mit Vegetation bedeckten Gebieten.

Das Untersuchungsgebiet zur Erprobung der entwickelten Methodik zur Änderungsanalyse (Abschnitt 3.3) liegt nördlich der Halbinsel Fischland-Darß-Zingst in der deutschen Ostsee (Abb. 3). Die Küstenlinie und der vorgelagerte Küstenabschnitt »Darßer Ort« gehören nach den Erfahrungswerten des BSH zu den hochdynamischen Gebieten in der deutschen Ostsee. Der Meeresboden wird von hellen, sandigen Sedimenten dominiert, wobei im östlichen Teil einige dunkel erscheinende Gebiete mit Vegetation auftreten.

4.2 Ergebnisse der spektral abgeleiteten Bathymetrie

Für die Testuntersuchung zur Bathymetrieableitung (Abschnitt 3.2) wurde die Sentinel-2-Aufnahme vom 23.06.2019 als Eingangsdatensatz

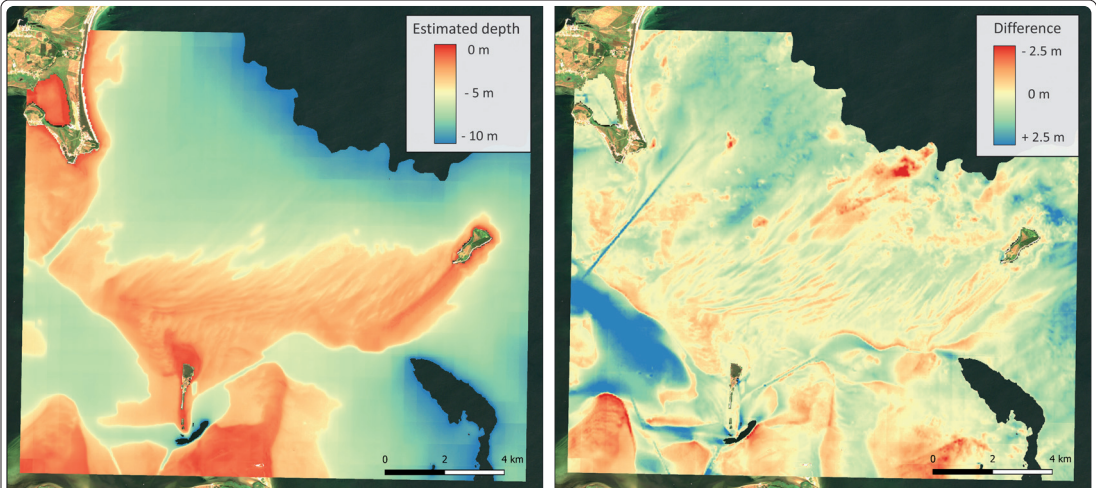


Abb. 4: Abgeleitete Bathymetrie aus der automatischen SDB-Berechnung des Dienstes (links) und die Abweichungen zu den Referenztiefen (rechts) (Grabbert et al. 2024)

genutzt. Die Ergebnisse sind in Abb. 4 dargestellt und werden ausführlicher in Grabbert et al. (2024) erläutert.

Die abgeleiteten SDB-Ergebnisse wurden mit einem Referenzdatensatz von 10 m × 10 m verglichen, welcher aus Echolotdaten der BSH-Seevermessung zwischen 2013 bis 2020 berechnet wurde. Die durchschnittliche Abweichung weist einen RMSE von 0,86 m auf. Der Median des absoluten Fehlers (MedAE) beträgt 0,47 m (Tabelle 1). Damit liegen die erzielten Genauigkeiten im Bereich vergleichbarer SDB-Auswertungen (Abschnitt 2.1). Für den Anwendungsfall des entwickelten Dienstes ist dabei zu berücksichtigen, dass sich im Rahmen der Änderungsanalyse systematische Fehler durch die integrierte Differenzbildung minimieren.

4.3 Ergebnisse der Änderungsanalyse

Die im Untersuchungsgebiet durchgeführte Änderungsanalyse wurde auf Grundlage von 43 Sentinel-2-Satellitenbildern zwischen 2018 und 2022 durchgeführt. Die erzeugten und in Abb. 5 dargestellten Ergebnisse wurden mit Referenzdaten verglichen, die aus zwei Vermessungsperioden in 2018 und 2022 erzeugt wurden. Für eine Genauigkeitsabschätzung wurden die Referenzänderungen und die vom Dienst berechneten Änderungen binarisiert (keine Änderung/Änderung). Die Klassifikationsunterschiede sind in Abb. 6 zu sehen, wo-

bei der Großteil mit 85 % der Fläche richtig, 10,5 % falsch positiv (Änderung erkannt, obwohl keine vorlag) und 4,5 % falsch negativ (keine Änderung erkannt, obwohl eine Änderung vorlag) klassifiziert wurden. Die berechnete Änderung weist im Vergleich zur Referenzänderung eine geringere räumliche Schärfe auf. Dies lässt sich zum Teil darauf zurückführen, dass die Satellitenbilder den gesamten Zeitraum und damit die kontinuierliche Änderung abbilden, während die Referenzmessung lediglich zwei spezifische Zeitpunkte berücksichtigt. Weite-

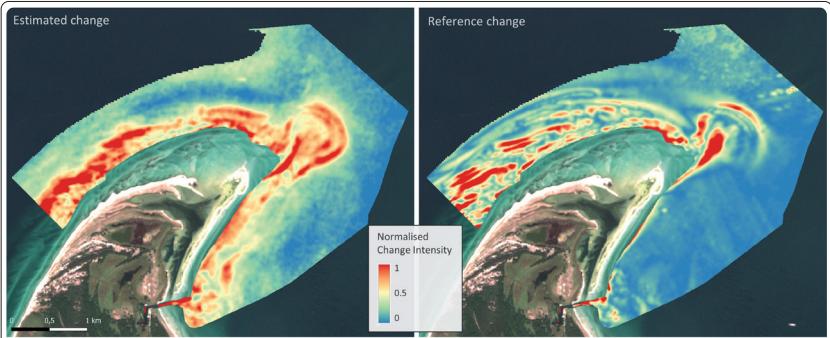


Abb. 5: Darstellung der normierten absoluten Veränderungsintensität der Ergebnisse des Veränderungsanalyse-Workflows (links) und der Referenzveränderung (rechts) (Grabbert et al. 2024)

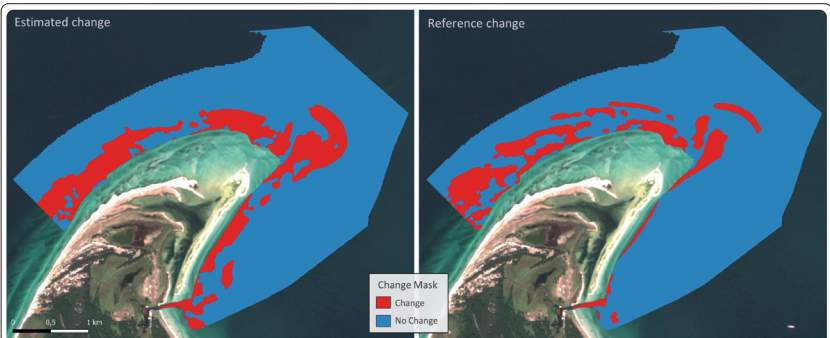
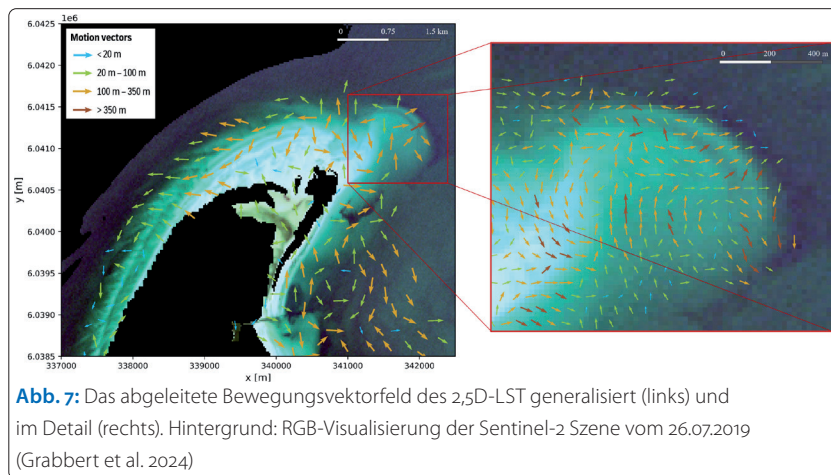


Abb. 6: Binarisierte Änderung der berechneten Änderung (links) und der Referenzänderung (rechts) (Grabbert et al. 2024)

Median (E)	0,26 m
Standardabweichung (E)	0,79 m
RMSE (AE)	0,86 m
MedAE (AE)	0,47 m
90. Perzentil (AE)	1,37 m
95. Perzentil (AE)	1,74 m

Tabelle 1: Im Untersuchungsgebiet erreichte statistische Parameter zum einfachen Fehler (E) und zum absoluten Fehler (AE)



re fälschliche Klassifikationen sind auf temporäre Ablagerungen von Vegetationsresten oder eine temporäre starke Trübung zurückzuführen.

4.4 Ergebnisse zum Tracking des Gewässeruntergrunds

Das in Abb. 7 dargestellte Bewegungsvektorfeld wurde mit 2,5D-LST berechnet. Die Standardabweichung der lateralen Bewegung beträgt dabei 0,29 px, was 5,9 m entspricht. Die Standardabweichung in Tiefenrichtung beträgt 0,15 m. Darüber hinaus beträgt die Medianunsicherheit der berechneten Verschiebung im Durchschnitt ein Zehntel der Vektorlänge. Zu beachten ist, dass diese Genauigkeitsangaben innere Genauigkeiten sind, da aufgrund fehlender Referenzwerte zu den realen Verschiebungen einzelner Gewässerbodenoberflächensegmente keine äußeren Genauigkeiten bestimmt werden können. Dennoch wurde eine Plausibilitätsprüfung mittels Zeitreihensequenzen der Satellitenbilder durchgeführt, welche die ermittelten Bewegungsrichtungen und -beträge bestätigen.

5 Diskussion

Auch in Zukunft wird der Bedarf einer anlassbezogenen Seevermessung bestehen bleiben, um die begrenzten Ressourcen der schiffgestützten hydroakustischen und der flugzeuggestützten LiDAR-Vermessung möglichst effizient priorisieren zu können. Die Untersuchungen zeigten, dass sich durch die Auswertung von multispektralen Bildsequenzen mittels SDB und anschließender Änderungsanalyse der Meeresbodentopografie Ansätze zur Priorisierung ergeben können. Der hierfür entwickelte Dienst wird derzeit prototypisch für die deutsche Ostsee bis zu einer Tiefe von etwas über 10 m genutzt, was in etwa 25 % der Fläche der deutschen Ostsee entspricht. Eine Effizienzsteigerung in der BSH-Seevermessung ist zu erwarten, da küstennahe Flachwasserbereiche in der Regel sowohl besonders dynamisch als auch aufwendig in der Vermessung mittels Echolot sind.

Für die Ergebnisse des Dienstes ist die Berechnung der SDB als Grundlage für die Änderungsanalyse von zentraler Bedeutung. Die Genauigkeit der SDB-Ergebnisse ist von zahlreichen Umweltfaktoren wie Wolkenbedeckung, Trübung, Algen, Schaumkronen, Untergrund, Sonnenreflexion, Wellen und Sonnenstand abhängig, welche durch die getroffenen Maßnahmen zur Reduktion bzw. Kompensation nicht vollständig aufgefangen werden können (Abschnitt 3.2) (Grabbert et al. 2024). Dennoch konnten in der Untersuchung in Abschnitt 4.2 ein MedAE von 0,47 m und ein RMSE von 0,86 m erreicht werden, was vergleichbar mit den Ergebnissen aktueller SDB-Verfahren ist (Chu et al. 2023). Ebenso wird durch die Änderungsanalyse der Einfluss von systematischen Fehlern reduziert, sofern sie über die Zeitreihe hinweg konsistent auftreten.

Die in Abschnitt 4.3 dargestellten Ergebnisse zeigen, dass der entwickelte Dienst circa 85 % der Gebiete korrekt klassifiziert, was auf ein vielversprechendes Potenzial hinweist. Die aktuelle Konfiguration der Algorithmen tendiert dazu, die veränderlichen Gebiete zu überschätzen, wodurch falsch-positive Klassifikationen etwa doppelt so häufig wie falsch-negative Klassifikationen auftreten. Ein Hauptgrund hierfür ist eine signifikante Änderung der Reflektanz ohne zugehörige Tiefenänderung, welche von der derzeitigen SDB-Methodik nicht abgefangen werden kann. Das führt dazu, dass diese nicht gesuchten Änderungen von der Änderungsanalyse erkannt und nicht vollständig von den gesuchten Tiefenänderungen unterschieden werden können. Die größte Herausforderung stellen dabei langfristige Reflexionsänderungen (ohne Tiefenänderung) dar, welche zum Beispiel durch das Wachsen bzw. Absterben von Seegrasflächen oder das Ablagern bzw. Wegschwemmen von Seetang hervorgerufen werden. Ein Ausschluss dieser Gebiete oder eine Korrektur muss dabei im Vorfeld der Änderungsanalyse erfolgen, da eine Kompensation dieser Effekte während der eigentlichen Änderungsanalyse nicht mehr möglich ist. Zum derzeitigen Entwicklungsstand werden diese vereinzelt auftretenden Gebiete interaktiv als irrelevante Änderung gekennzeichnet. Weiter stellen periodische radiometrische Unterschiede aufgrund saisonaler Vegetationszyklen von beispielsweise Seegras, Kelp oder Algenblüten in Bodden oder tiefen Buchten eine Herausforderung dar. Die vollständige Korrektur ist zwar theoretisch möglich, erfordert aber eine dichte ganzjährige Zeitreihe von Satellitenbildern. Dies ist durch die eingeschränkte Bildverfügbarkeit in den Wintermonaten und aufgrund der wetterabhängigen Wachstumszyklen nicht umsetzbar. Weiterhin sind Gebiete mit ständigen starken Schwankungen der Reflexionseigenschaften problematisch, was insbesondere

Bereiche in der und um die Brandungszone betrifft. Aufgrund von aufgewirbeltem Sediment, Wellen, Schaum und Vegetationsresten sind hier die Unsicherheiten der abgeleiteten Bathymetrie besonders groß; die Gebiete werden daher als variabel erkannt. Abhilfe kann die ausschließliche Nutzung ungestörter Satellitenbilder schaffen, indem beispielsweise nur windstille Tage betrachtet werden. Dies würde allerdings den verfügbaren Datenpool erheblich einschränken. Der Großteil der Reflexionsänderungen ist allerdings kurzzeitiger und unregelmäßiger Natur und wird durch Wolken bzw. atmosphärische Einflüsse, Trübung, Algen, Sonnenreflexion oder Schiffe verursacht. Diese Einflüsse werden überwiegend durch die Nutzung der Information aus der gesamten Zeitreihe in der Änderungsanalyse mit der integrierten Mittelung bzw. Medianbetrachtung und der vorherigen Bildauswahl bzw. Bildmaskierung abgefangen. Diese Maßnahmen sind geeignet, um zumindest teilweise Effekte der oben beschriebenen periodischen und der hochfrequenten Änderungen zu reduzieren.

Die Robustheit des entwickelten Dienstes resultiert aus der gezielten räumlichen und zeitlichen Glättung der Messdaten zur Änderungserkennung. Dieser Ansatz erweist sich vor dem Hintergrund der messprinzipbedingten Einschränkungen von SDB und des Anwendungsziels als zweckdienlich, um Fehlalarme zu minimieren und die Einsatzplanung der Seevermessung zu unterstützen. So erfordert in der aktuellen Konfiguration mit einer Pixelgröße von 20 m × 20 m und einer Filterung über 3 px × 3 px eine detektierbare Veränderung eine Mindestfläche von 60 m × 60 m. Darüber hinaus muss diese Änderung über mehrere Epochen hinweg bestehen. Je nach Stärke der Änderung müssen in der aktuellen Konfiguration circa zwei bis fünf Satellitenbilder beeinflusst sein, um eine zuverlässige Unterscheidung zu Messrauschen treffen zu können. Schließlich ist eine Mindeständerung der Wassertiefe notwendig, die von der Präzision der lokalen SDB-Berechnungen abhängt. So war während der Entwicklung in der Regel eine Änderung von mindestens einigen Dezimetern notwendig.

Die vollautomatische Erkennung von bathymetrischen Veränderungen erfordert einen robusten Workflow und bleibt herausfordernd. Dennoch ist der bisher entwickelte prototypische Dienst in der Lage, dynamische Bereiche zu erkennen. Er besitzt damit schon jetzt das Potenzial, einen wertvollen Beitrag für die Einsatzplanung der BSH-Seevermessung zu leisten. Dies gilt insbesondere vor dem Hintergrund, dass der Dienst kostenfreie Sentinel-2-Daten nutzt und vollautomatisiert ist, sodass ein nur vernachlässigbarer finanzieller und personeller Mehraufwand im Betrieb besteht.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel ist die Entwicklung eines vollautomatischen Dienstes zur Detektion von Veränderungen der Meeresbodentopografie in Flachwasserbereichen auf der Basis von multispektralen Sentinel-2-Satellitenbildern. Der Dienst umfasst dabei zwei Phasen: die Schätzung der Bathymetrie mittels SDB und eine darauf aufbauende Änderungsanalyse. In der ersten Phase werden die Satellitenbilddaten vorverarbeitet, gefiltert, die Tiefenbestimmung mittels eines U-Net-basierten CNN durchgeführt und die abgeleitete Tiefe zu einem Bathymetriedatensatz aufbereitet. Die Genauigkeit der Wassertiefenberechnung konnte in einer Untersuchung mit einem MedAE von 0,47 m und einem RMSE von 0,86 m bestimmt werden. Die zweite Phase des Dienstes umfasst die Änderungsanalyse auf Grundlage der zuvor berechneten raumzeitlich aufgelösten Bathymetrien. Diese bathymetrische Zeitreihe wird mittels einer Qualitätsanalyse gefiltert, sodass gestörte Satellitenbilder bzw. Bathymetrien ausgeschlossen werden. Im Anschluss werden verschiedene Verfahren der Änderungsdetektion angewandt, um Parameter zur Beschreibung der Variabilität zu bestimmen. Diese Parameter werden zu einem gewichteten Gesamtindikator zusammengeführt, klassifiziert, in einem Ampelsystem visualisiert und mit konkreter Handlungsempfehlung versehen. In einer Fallstudie konnte der Dienst eine Klassifikationsgenauigkeit von 85 % bei der Unterscheidung zwischen stabilen und veränderlichen Gebieten erreichen. Damit unterstützt der Dienst die effizientere Planung der hydrographischen Vermessung, indem dynamische Bereiche priorisiert und Wiederholungsmessungen in stabilen Regionen reduziert werden können. Der entwickelte vollautomatische Dienst hat das Potenzial, einen erheblichen Mehrwert für mit der großflächigen Erfassung von Flachwasserbereichen betraute Institutionen zu bieten. Darüber hinaus werden durch den Dienst zeitlich hochaufgelöste bathymetrische Daten von Flachwassergebieten geliefert, die einen Beitrag zum Umweltmonitoring und für ähnliche Anwendungen mit im Vergleich zur Seevermessung geringeren Genauigkeitsanforderungen an die Bathymetrie leisten können.

Der Dienst befindet sich bereits in der operativen Phase des Prototypenstadiums und generiert kontinuierlich sowohl auf SDB basierende Flachwasserbathymetrien bis zur 10-m-Wassertiefenlinie als auch die darauf basierenden Änderungsdaten für die deutsche Ostsee. Beide Datentypen sind zeitnah über das frei zugängliche SVDB-Portal, dem öffentlichen Zugang zur Seevermessungsdatenbank beim BSH, abrufbar (Bothe et al. 2024).

Zukünftige Arbeiten beschäftigen sich mit der Verbesserung des Genauigkeits- und Zuverlässigkeitspotenzials der SDB-Ergebnisse durch unter

Danksagung

Wir danken dem Bundesministerium für Verkehr (BMV) für die Finanzierung dieser Forschungsarbeiten im Rahmen des Förderprogramms »DLR – Entwicklung und Implementierungsvorbereitung von Copernicus Diensten für den öffentlichen Bedarf in Deutschland« unter dem Förderkennzeichen 50EW2204.

anderem die Einbindung aktueller »Referenz«-Daten höherer Genauigkeit aus Crowdsourced Bathymetry und Bathymetrie aus satellitengestützten LiDAR-Messungen (z.B. ICESat-2). Aufgrund der begrenzten räumlichen Verteilung sind diese Daten für flächendeckende Analysen wenig geeignet, erlauben jedoch die Erkennung und/oder Korrektur systematischer Fehler innerhalb der SDB bzw. eine lokale Korrektur der daraus abgeleiteten Bathymetrie. Weiterhin ist die Einbindung der Ergebnisse des 2,5D-LST in die gewichtete Zusammenführung der Ergebnisse der Änderungsanalysetechniken unter Abschnitt 3.3

geplant. Dafür müssen die berechneten Verschiebungsvektoren unter Berücksichtigung ihrer Richtung und Länge gemittelt und in eine gerasterte, normalisierte Änderungsinformation transformiert werden. Darüber hinaus erlaubt der modulare Aufbau des Dienstes eine flexible Weiterentwicklung und erleichtert die Integration zukünftiger technologischer Fortschritte. Dazu zählen insbesondere neue Satellitenmissionen mit höherer räumlicher und zeitlicher Auflösung, leistungsfähigere Rechenkapazitäten sowie fortgeschrittene Auswertemethoden wie neue Entwicklungen im Bereich der KI-Verfahren. //

Literatur

- Afaq, Yasir; Ankush Manocha (2021): Analysis on change detection techniques for remote sensing applications: A review. *Ecological Informatics*, DOI: 10.1016/j.ecoinf.2021.101310
- Ashphaq, Mohammad; Pankaj K. Srivastava; D. Mitra (2023): Preliminary examination of influence of Chlorophyll, Total Suspended Material, and Turbidity on Satellite Derived Bathymetry estimation in coastal turbid water. *Regional Studies in Marine Science*, DOI: 10.1016/j.rsma.2023.102920
- Bothe, Mirko; Patrick Westfeld; Frank Sellerhoff (2024): SVDB-Portal – Öffentlicher Zugang zur Seevermessungsdatenbank beim Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie. In: Ralf Bill; Marco L. Zehner (Hrsg.): *GeoForum MV 2024 – 20 Jahre Geoinformation – Quo vadis? GEOMV*, www.geomv.de/wp-content/uploads/2024/09/Tagungsband_GeoForum-MV-2024_epdf.pdf
- BSH (2025): Grundlagen der Seevermessung – Sollaufgabe. Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, www.bsh.de/DE/THEMEN/Vermessung_und_Kartographie/Seevermessung/Grundlagen/grundlagen_node.htm
- Caballero, Isabel; Richard P. Stumpf (2023): Confronting turbidity, the major challenge for satellite-derived coastal bathymetry. *Science of the Total Environment*, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.161898
- Chen, Jin; Peng Gong; Chunyang He; Ruiliang Pu; Peijun Shi (2003): Land-use/land-cover change detection using improved change-vector analysis. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, DOI: 10.14358/PERS.69.4.369
- Chu, Sensen; Liang Cheng; Jian Cheng; Xuedong Zhang; Jinming Liu (2023): Comparison of Six Empirical Methods for Multispectral Satellite-derived Bathymetry. *Marine Geodesy*, DOI: 10.1080/01490419.2022.2132327
- Deng, J. S.; K. Wang; Y. H. Deng; G. J. Qi (2008): PCA-based land-use change detection and analysis using multitemporal and multisensor satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, DOI: 10.1080/01431160801950162
- Dharani, Mundluru; G. Sreenivasulu (2021): Land use and land cover change detection by using principal component analysis and morphological operations in remote sensing applications. *International Journal of Computers and Applications*, DOI: 10.1080/1206212X.2019.1578068
- ESA (2025): Overview of Sentinel-2 Mission. SentiWiki. <https://sentiwiki.copernicus.eu/web/s2-mission>
- Geyman, Emily C.; Adam C. Maloof (2019): A simple method for extracting water depth from multispectral satellite imagery in regions of variable bottom type. *Earth and Space Science*, DOI: 10.1029/2018EA000539
- Grabbert, Peter; Mirko Bothe; Patrick Westfeld (2024): Spatiotemporal analysis of satellite imagery using AI-based optical hydrography for adaptive planning of hydrographic resources. *The International Hydrographic Review*, DOI: 10.58440/ihr-30-2-a15
- Hartmann, Knut; Mona Reithmeier; Kim Knauer; Julian Wenzel; Christoph Kleih; Thomas Heege (2022): Satellite-derived bathymetry online. *The International Hydrographic Review*, DOI: 10.58440/ihr-28-a14
- Herrmann, Joan; Lori A. Magruder; Jonathan Markel; Christopher E. Parrish (2022): Assessing the ability to quantify bathymetric change over time using solely satellite-based measurements. *Remote Sensing*, DOI: 10.3390/rs14051232
- IHO (2024): Guidance to Satellite-derived Bathymetry (1st ed.). IHO Publication B-13, International Hydrographic Organization, Monaco. https://iho.int/uploads/user/pubs/bathy/B_13_Ed100_032024.pdf
- Jégat, Veronique; Shachak Pe'eri; Ricardo Freire; Anthony Klemm; John Nyberg (2016): Satellite-derived bathymetry: Performance and production. *Canadian Hydrographic Conference*, S. 16–19
- Knudby, Anders; Galen Richardson (2023): Incorporation of neighborhood information improves performance of SDB models. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, DOI: 10.1016/j.rsase.2023.101033
- Laporte, Jean; Henri Dolou; Joseph Avis; Olivier Arino (2020): Thirty years of Satellite Derived Bathymetry: The charting tool that Hydrographers can no longer ignore. *The International Hydrographic Review*, DOI: 10.58440/ihr-29-a20
- LeCun, Yann; Léon Bottou; Yoshua Bengio; Patrick Haffner (1998): Gradient-based learning applied to document recognition. *Proceedings of the IEEE*, DOI: 10.1109/5.726791
- Lowell, Kim; Yuri Rzhano (2025): An Empirical Evaluation of the Localised Accuracy of Satellite-Derived

- Bathymetry and SDB Depth Change. *Marine Geodesy*, DOI: 10.1080/01490419.2024.2402884
- Lu, Dengsheng; Paul Mause; Eduardo Brondizio; Emilio Moran (2004): Change detection techniques. *International Journal of Remote Sensing*, DOI: 10.1080/0143116031000139863
- Lumban-Gaol, Yustisi; Ken Arroyo Ohori; Ravi Peters (2022): Extracting coastal water depths from multi-temporal Sentinel-2 images using convolutional neural networks. *Marine Geodesy*, DOI: 10.1080/01490419.2022.2091696
- Lyzenga, David R. (1978): Passive remote sensing techniques for mapping water depth and bottom features. *Applied Optics*, DOI: 10.1364/AO.17.000379
- Lyzenga, David R.; Norman P. Malinas; F. J. Tanis (2006): Multispectral bathymetry using a simple physically based algorithm. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, DOI: 10.1109/TGRS.2006.872909
- MacQueen, J. B. (1967): Some methods of classification and analysis of multivariate observations. In: *Proceedings of 5th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, S. 281–297
- Malila, William A. (1980): Change vector analysis: An approach for detecting forest changes with Landsat. In: *LARS symposia*; S. 326–335
- Mandlbürger, Gottfried; Michael Kölle; Hannes Nübel; Uwe Soergel (2021): BathyNet: A deep neural network for water depth mapping from multispectral aerial images. *PFG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, DOI: 10.1007/s41064-021-00142-3
- Mandlbürger, Gottfried (2022): A Review of Active and Passive Optical Methods in Hydrography. *The International Hydrographic Review*, DOI: 10.58440/ihr-28-a15
- Mudiyansele, Sanduni Disanayaka; Amr Abd-Elrahman; Benjamin Wilkinson; Vincent Lecours (2022): Satellite-derived bathymetry using machine learning and optimal Sentinel-2 imagery in South-West Florida coastal waters. *GIScience & Remote Sensing*, DOI: 10.1080/15481603.2022.2100597
- Najar, Mahmoud Al; Rachid Benshila; Youssra El Bennioui et al. (2022): Coastal bathymetry estimation from Sentinel-2 satellite imagery: Comparing deep learning and physics-based approaches. *Remote Sensing*, DOI: 10.3390/rs14051196
- Ronneberger, Olaf; Philipp Fischer; Thomas Brox (2015): U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015*, DOI: 10.48550/arXiv.1505.04597
- Singh, Sartajvir; Rajneesh Talwar (2013): Review on different change vector analysis algorithms based change detection techniques. 2013 IEEE Second International Conference on Image Information Processing (ICIIP-2013), DOI: 10.1109/ICIIP.2013.6707570
- Stumpf, Richard P.; Kristine Holderied; Mark Sinclair (2003): Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types. *Limnology and Oceanography*, DOI: 10.4319/lo.2003.48.1_part_2.0547
- Susa, Tyler (2022): Satellite derived bathymetry with Sentinel-2 imagery: Comparing traditional techniques with advanced methods and machine learning ensemble models. *Marine Geodesy*, DOI: 10.1080/01490419.2022.2064572
- Thonfeld, Frank; Hannes Feilhauer; Matthias Braun; Gunther Menz (2016): Robust change vector analysis (RCVA) for multi-sensor very high resolution optical satellite data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, DOI: 10.1016/j.jag.2016.03.009
- Westfeld, Patrick (2012): Geometrische und stochastische Modelle zur Verarbeitung von 3D-Kameradaten am Beispiel menschlicher Bewegungsanalysen. *Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften*, ISBN 978-3-7696-5099-0
- Westfeld, Patrick; Hans-Gerd Maas; Oliver Bringmann; Daniel Gröllrich; Martin Schmauder (2013): Automatic techniques for 3D reconstruction of critical workplace body postures from range imaging data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2013.08.004
- Wold, Svante; Kim Esbensen; Paul Geladi (1987): Principal component analysis. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, DOI: 10.1016/0169-7439(87)80084-9
- Xie, Congshuang; Peng Chen; Siqi Zhang; Haiqing Huang (2024): Nearshore Bathymetry from ICESat-2 LiDAR and Sentinel-2 Imagery Datasets Using Physics-Informed CNN. *Remote Sensing*, DOI: 10.3390/rs16030511
- Xu, Hanqiu; Yifan Wang; Huade Guan; Tingting Shi; Xisheng Hu (2019): Detecting ecological changes with a remote sensing based ecological index (RSEI) produced time series and change vector analysis. *Remote Sensing*, DOI: 10.3390/rs11202345
- Žak, Karol (2020): keras-unet. GitHub. <https://github.com/karolzak/keras-unet?tab=readme-ov-file>
- Zhuang, Qizhi; Shanlin Gao; Yitong Liu et al. (2025): Analysis of sentinel-2 image time series for enhancing satellite-derived bathymetry. *Marine Geodesy*, DOI: 10.1080/01490419.2025.2470705

»Ohne uns Geodäten bleiben die Fenster der GIS-Programme und der CAD-Programme leer«

Ein Wissenschaftsgespräch mit LUTZ CHRISTIANSEN

Den Namen Lutz Christiansen kennt jeder, der schon einmal bei einem Hydrographentag war. Zwar hielt sich der Namensträger bei den jährlichen Veranstaltungen der DHyG meist dezent im Hintergrund, doch von dort aus hat er mit seinem Arbeitskreis die Hydrographentage verlässlich organisiert. Im Interview verrät Lutz, wo der Hydrographentag stattgefunden hat, der ihm im Rückblick besonders gelungen scheint. Im ersten Teil des Gesprächs geht es freilich um seinen Job beim LKN.SH, wo er für die Vermessung der Küstenzone verantwortlich ist. Dabei erwies er sich als Pionier, weil er schon sehr früh auf die Methoden der Laserbathymetrie und der satellitengestützten Bathymetrie gesetzt hat.

LKN.SH | Laserbathymetrie | Sichttiefe | Satellitenbilder | Wasser-Land-Linie | satellitengestützte Bathymetrie | Hydrographentage

LKN.SH | laser bathymetry | visibility depth | satellite images | water-land line | satellite-derived bathymetry | Hydrographentage

Anyone who has ever been to a »Hydrographentag« (the annual hydrographic conference in Germany) knows the name Lutz Christiansen. Although he usually kept a low profile at the annual DHyG events, he and his working group reliably organised the Hydrographentag from behind the scenes. In this interview, Lutz reveals where the conference took place that he considers to have been particularly successful in retrospect. The first part of the conversation focuses on his job at LKN.SH, where he is responsible for surveying the coastal zone. He proved to be a pioneer in this field, as he was one of the first to use laser bathymetry and satellite-derived bathymetry methods.

Interviewer

Lars Schiller und Peter Dugge führten das Interview mit Lutz Christiansen per E-Mail im Oktober.

lutz.christiansen@lkn.landsh.de

Du arbeitest beim LKN.SH – die Abkürzung steht für: Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein –, wo du den Fachbereich »Vermessung, Topographie, Morphologie« leitest. Wie erklärst du die Aneinanderreihung dieser drei Substantive? Und warum fehlt in der Reihe »Hydrographie«?

Aus der Verwaltungsreform 2008 ging der LKN.SH hervor, der seitdem für den Küstenschutz an der schleswig-holsteinischen Nord- und Ostseeküste zuständig ist. Mit Einrichtung des LKN.SH wurde erstmalig für den Vermessungsbereich in der Küstenschutzverwaltung ein eigenständiger Fachbereich installiert. An der Namensfindung war ich mit beteiligt. Das Aufgabenfeld umfasst nicht allein die Vermessung, sondern beinhaltet auch beispielsweise das Erstellen von Bestandsplänen mit der Topografie für Bauplanungen oder die Durchführung von Analysen zur Ermittlung der morphologischen Veränderungen. So ist diese sicher etwas sperrige Bezeichnung entstanden. Der Begriff »Hydrographie« fehlt, weil darunter meist nur die Vermessung von wasserbedeckten Flächen mit

Hilfe von Schiffen und Echolottechniken verstanden wird. Die einzusetzenden Vermessungsmethoden für den Küsten- und Meeresbereich sind aber viel umfassender. Sie reichen von der terrestrischen Vermessung mit Nivellieren, Tachymetern oder Laserscannern über hydrographische Vermessungen mit diversen Echolotsystemen sowie luftgestützte Vermessungen mit Drohnen oder Flugzeugen und laserbasierten oder bildbasierten Erfassungstechniken bis hin zu satellitenbasierten Vermessungen der Küsten- und Flachwasserbereiche. Daher passt der Begriff »Vermessung« eher als der Begriff »Hydrographie«.

Wenn wir uns deine Veröffentlichungen der letzten Jahre ansehen oder die Titel deiner Vorträge lesen, dann sehen wir da ganz viel Befliegung, Luftbilder der Küstenzone, Laserbathymetrie. Das war von Anfang an dein Thema. Wie lange beschäftigst du dich schon mit der Laserbathymetrie? Was sind nach all den Jahren deine Erkenntnisse?

Um konkrete Küstenschutzmaßnahmen festlegen zu können, werden umfangreiche Daten benötigt, die das Gebiet der Maßnahmen und das

erweiterte Umfeld mit den räumlichen und zeitlichen Veränderungen ausreichend beschreiben. Es gilt, diesen Bedarf zu decken. Zu meinen Aufgaben gehört es nach meinem Verständnis, fortlaufend Datenquellen zu erschließen, die für den Küstenschutz relevante Informationen liefern können. Das Thema Laserbathymetrie hat mich quasi meine gesamte Dienstzeit begleitet. Bereits 1992 wurde ein erster Testflug auf Sylt durchgeführt, um die Möglichkeiten der Technik und die erreichbaren Tiefen kennenzulernen. Diesen Test habe ich damals als Zuschauer begleitet und später in den Akten den Hinweis gefunden: »Die Ergebnisse lassen bei einer Weiterentwicklung auf brauchbare Ergebnisse hoffen.« Diese Aussage bezog sich auf einen Einsatz im Bereich der Nordseeküste.

Mit Einrichtung des LKN.SH im Jahr 2008 und der Zuständigkeit nun auch für die Ostseeküste habe ich mich seit etwa 15 Jahren mit dem Thema Laserbathymetrie vertieft befasst, weil ich diese Technik hier für besonders geeignet halte. Wichtig war es mir zunächst, die naturgegebenen Rahmenbedingungen und insbesondere die Sichttiefen in der Nord- und Ostsee zu erfassen beziehungsweise Ergebnisse verschiedener Organisationen für die schleswig-holsteinischen Küstenregionen zusammenzutragen.

Von welchen Sichttiefen sprechen wir denn in Nord- und Ostsee?

Generalisiert ergeben sich für die Ostsee Sichttiefen von 3 Metern in den Förden und von bis zu 5 Metern im offenen Meeresgebiet, für das Wattenmeer der Nordsee mit seinen Prielen von 0 bis 2 Metern und außerhalb des Wattenmeeres wie vor Sylt von etwa 3 Metern. Bis heute bilden diese Daten meine Grundlage für die Abschätzung, welche generellen Tiefen im Bereich der Nord- und der Ostsee mit dem Verfahren der Laserbathymetrie erreichbar sind.

Zwei Faktoren spielen eine entscheidende Rolle zur Bestimmung der erreichbaren Tiefe. Neben der Sichttiefe als naturbedingte Gegebenheit ist die Leistungsstärke der Lasersysteme als technische Eigenschaft zu berücksichtigen. Die Hersteller beschreiben die Leistungsstärke ihrer Systeme als ein Vielfaches der Sichttiefen. Dabei lassen sich zwei Kategorien definieren. Eine Kategorie umfasst die Systeme, die die einfache bis zweifache Sichttiefe erfassen können, eine weitere Kategorie umfasst die Systeme, die die dreifache bis vierfache Sichttiefe erfassen können. Diese Leistungsunterschiede spiegeln sich allerdings sowohl in den Beschaffungskosten als auch in den Kosten für eine Dienstleistung wider. Grundsätzlich werden die aus Sichttiefe und Leistungsstärke der Systeme abgeleiteten Tiefen unter Berücksichtigung naturbedingter Schwankungen in den durchgeführten Flügen bestätigt.

Nach meiner Erfahrung ist die Laserbathymetrie auf Basis eines grünen Lasers, der in das Wasser ein-



Lutz Christiansen

dringt, ein geeignetes Verfahren, um die küstennahen Gebiete der Ostsee sowie die Wattenflächen in der Nordsee flächendeckend und wirtschaftlich zu erfassen. Nur die dauerhaft wasserführenden Prielsysteme können aufgrund der Trübung nicht erfasst werden. Hier kommt weiterhin die hydrographische Vermessung zum Einsatz.

Ein grüner Laser ist also gut. Und was ist mit einem roten Laserstrahl?

Das Airborne-Laserscanning auf Basis eines roten Lasers, der nicht in das Wasser eindringt, halte ich für die Erfassung von Wattflächen für nicht geeignet. Auf den Wattflächen bleiben bei Niedrig-

»Mit Laserbathymetrie wird innerhalb von zwei Tagen das gesamte Küstenvorfeld von Sylt erfasst. Auf eine hydrographische Vermessung, die etwa vier Wochen in Anspruch nimmt, kann seitdem verzichtet werden«

Lutz Christiansen

wasser Restwasserflächen bestehen, weil dort ein natürlicher Abfluss fehlt. Das kann größere Flächen betreffen mit Tiefen von 0,5 Meter bis zu etwa 1 Meter. Für morphologische Analysen werden flächendeckende Geländemodelle, die den Meeresboden und den Wattboden darstellen, benötigt. Diese kann der rote Laser nicht liefern.

Welche Faktoren beeinflussen die Wahl der Fluggeräte, die für Laserbathymetrie und Luftbilder eingesetzt werden? Wann nehmt ihr Flugzeuge, wann Hubschrauber, wann Drohnen?

Jährlich beauftrage ich Flächen von etwa 400 bis 700 Quadratkilometern im Bereich der Nord- und Ostseeküste, um dort die Laserbathymetrie auszuführen, und noch einmal etwa die gleiche Flächengröße, um Orthofotos des Wattenmeeres herstellen zu lassen. Bei diesen Flächengrößen werden üblicherweise Flugzeuge eingesetzt. Drohnen eignen sich eher für kleinere lokale Bereiche.

Welche Tiefen habt ihr maximal erreicht? Und auch wenn die Frage vielleicht seltsam ist, wie tief muss das Wasser mindestens sein, um zu verlässlichen Ergebnissen zu kommen?

Grundsätzlich verwende ich Laserbathymetriesysteme, die die einfache bis zweifache Sichttiefe erfassen können. Damit wird der küstennahe Bereich der Ostsee flächendeckend bis in Tiefen von 3 Metern bis 5 Metern erfasst. Dieses ist weitgehend ausreichend für unmittelbare Fragestellungen des Küstenschutzes. Weiter seewärts werden die verfügbaren hydrographischen Vermessungen verwendet.

Im Bereich der Nordseeküste werden zu Niedrigwasser die dann freiliegenden Wattflächen vollständig erfasst einschließlich der Wasserflächen, die bei Ebbe auf den Watten verbleiben. Nur die dauerhaft wasserführenden Priele werden hydrographisch vermessen.

Einzig vor Sylt werden Laserbathymetriesysteme verwendet, die die dreifache bis vierfache Sichttiefe erfassen können. Diese Vermessung erfolgt regelmäßig alle drei Jahre. Es wird innerhalb von zwei Tagen das gesamte Küstenvorfeld bis in Tiefen von mehr als 8 Metern erfasst, sodass hier auf eine hydrographische Vermessung, die einen Umfang von mehr als 1000 Kilometern an Messprofilen umfasst und etwa vier Wochen mit zwei bis drei Schiffseinheiten in Anspruch nimmt, seitdem verzichtet werden kann.

Die zweite Frage nach der Mindesttiefe ist gar nicht so seltsam, weil die Mindesttiefe den Bereich beschreibt, der vom grünen Laser nicht korrekt erfasst werden kann. Unter anderem spielen die Wellenlänge des Lichtes und die Brechung am Wasserspiegel beim Eintritt und beim Austritt eine Rolle. Die Mindesttiefe liegt nach meiner Kenntnis bei etwa 1 Dezimeter bei den hier verwendeten Systemen.

Da stellt sich jetzt aber schon die Frage, wie die Topografie der Wattflächen, auf denen das Wasser manchmal ein paar Zentimeter stehen bleibt, vollständig erfasst werden kann. Wartet man, bis das Wasser wieder steigt, um noch einmal zu messen? Oder lebt man mit den Datenlücken?

Es entsteht keine Datenlücke, sondern die Laserpunktwolke kann in der Höhe im flachsten Bereich nicht so exakt berechnet werden wie im tieferen Bereich.

Für welche Fragestellungen eignen sich deiner Erfahrung nach Satellitenbilddaten für das Küstenmonitoring?

Satellitenbilddaten bekommen einen zunehmend hohen Stellenwert für das Küstenmonitoring. Sie zeigen in einer sehr hohen zeitlichen Auflösung von täglich bis zu wenigen Tagen die Situation auf der Erdoberfläche. Die Aufnahmen finden immer zum nahezu gleichen Zeitpunkt an dem gleichen Ort statt. Dieses stellt für Vergleiche und Analysen eine sehr geeignete Grundlage dar. Bildgebende Satellitendaten, auf die ich mich hier einmal beschränken möchte, werden allerdings durch Wolkeneinfluss gestört. Dennoch lassen sich vielfältige Informationen aus den wolkenfreien Bereichen der Satellitenbilder ableiten und vergleichen. Hier möchte ich mich auf die Morphologie beziehen, die Teil meines Aufgabengebietes ist, auch wenn beispielsweise Vegetation mit jahreszeitlichen Veränderungen oder Veränderungen in der Sedimentzusammensetzung ablesbar sind. Aus den Satellitendaten lassen sich verschiedene morphologische Elemente extrahieren. Dazu zählen die Küstenlinien als Trennlinie zwischen Strand und Festland, die Steilufer mit oberer und unterer Begrenzungslinie oder Unterwasserstrukturen wie Sedimentbarren oder Riffe, dargestellt als Helligkeitsunterschiede. Ein weiteres Element ist die Wasser-Land-Linie, die die Trennlinie zwischen dem trockenen und dem

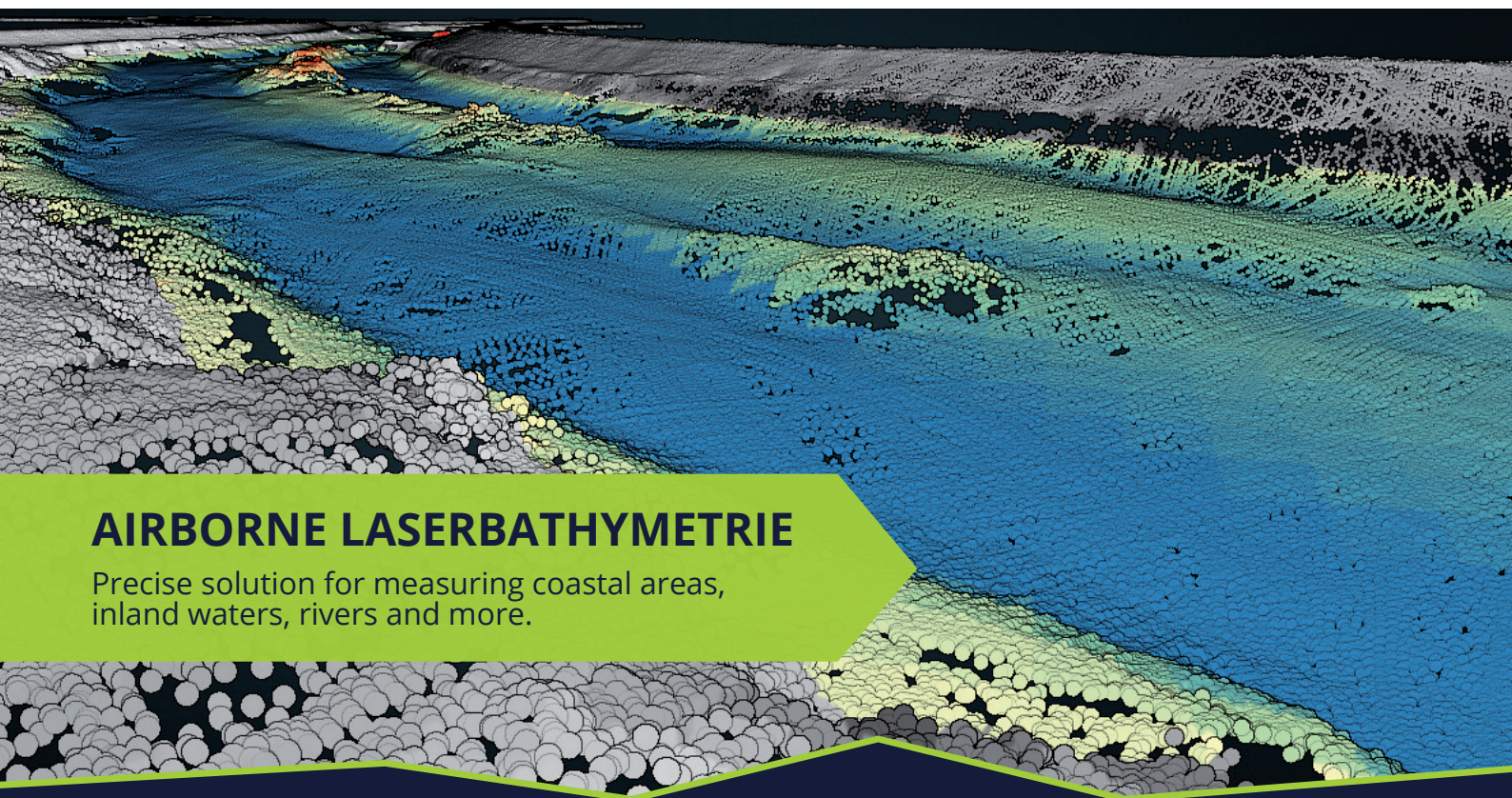
wasserbedeckten Bereich darstellt. Da der Zeitpunkt der Satellitenaufnahme bekannt ist, kann der Wasserstand für die dargestellte Region ermittelt werden und der Wasser-Land-Linie als Höhe zugeordnet werden. Diese wird dadurch zu einer dreidimensionalen Höhenlinie. Insbesondere für das Wattenmeer ist dieses von besonderer Bedeutung. Die Tide zwischen Ebbe und Flut bewirkt, dass sich der Wasserspiegel in jeder Phase um etwa 2 Meter bis fast 4 Meter hebt oder senkt. Die Satellitenaufnahme erfolgt aber zum gleichen Zeitpunkt. Daher ist immer ein anderer Wasserstand abgebildet, der der Wasser-Land-Linie zugeordnet wird. Die Ufer der Wattflächen zu den Prielen werden durch die Vielzahl dieser Höhenlinien innerhalb eines Zeitraumes, beispielsweise eines Jahres, abgebildet. Stehen Daten mehrerer Zeiträume zur Verfügung, lassen sich die Veränderungen der Ufer in der Lage ablesen. Da das Wattenmeer nur alle sechs Jahre vollständig vermessen wird, ist es möglich, mit Hilfe dieser Höhenlinien aus den Satellitenbildern morphologische Veränderungen der Priele und Wattflächen abzuleiten und den Zeitraum bis zur nächsten vollständigen Vermessung zu überbrücken.

Welche Veränderungen werden denn auf diese Weise sichtbar?

Für das schleswig-holsteinische Wattenmeer habe ich die Sentinel-Satellitenbilder für den Zeitraum von 2015 bis 2023 hinsichtlich der Wasser-Land-Grenzen mit der Zuordnung der jeweiligen Wasserstände auswerten lassen. Diese Daten zeigen, dass der seewärtige Hang des Wattenmeeres ostwärts wandert mit etwa 10 Metern pro Jahr. Auch wenn der Effekt durch verschiedene lokale Analysen grundsätzlich bekannt ist, ergibt sich durch die Darstellung der satellitenbasierten Höhenlinien erstmalig eine Gesamtübersicht.

Verstehen wir das richtig – wenn der seewärtige Hang ostwärts wandert, dann bedeutet das doch, dass entweder der Meeresspiegel steigt oder dass Sediment abgetragen wird, was dann wiederum die Küsten gefährdet?

Das bedeutet, dass Sediment abgetragen wird und damit das Wattenmeer in seiner Ausdehnung schmaler wird mit Auswirkungen auf das Ökosystem Wattenmeer und auf die Küstenschutzfunktion. Was hältst du von satellitengestützter oder dronengestützter Bathymetrie mit passiven multispek-



AIRBORNE LASERBATHYMETRIE

Precise solution for measuring coastal areas, inland waters, rivers and more.

skyability

UAV, AIRBORNE & TERRESTRIAL SERVICES

✉ office@skyability.com

🌐 www.skyability.com



tralen optischen Aufnahmen im Gegensatz zur Laserbathymetrie?

Auch die mit diesen Verfahren erzeugten Daten aus Satelliten- oder Drohnenbildern haben einen hohen Wert für Fragestellungen des Küstenschutzes nach den Zuständen und Veränderungen der Küsten und des Küstenvorfeldes insbesondere aufgrund der zeitlich hohen Verfügbarkeit. Die Verfahren sind anwendbar für die wasserbedeckten Bereiche, die in den Bildern enthalten sind. Hier wird grundsätzlich die Mächtigkeit der Wassersäule bestimmt und mit der Höhe des Wasserspiegels zum Aufnahmezeitpunkt verknüpft.

»Wir Geodäten digitalisieren die Erdoberfläche als Grundlage für jedes Projekt. Ohne diese Tätigkeit bleiben die Fenster der GIS- und der CAD-Programme leer!«

Lutz Christiansen

Ich habe mich 2018/2019 intensiver mit dem Thema der Satellite-derived Bathymetry befasst. Die damaligen Untersuchungen haben gezeigt, dass das Wattenmeer der Nordsee weniger geeignet ist aufgrund der Trübung in der Wassersäule, im Bereich der Ostseeküste aber der Meeresboden bis in Tiefen

von etwa 10 Metern erfasst werden kann. Im Vergleich zur Laserbathymetrie, wie ich sie verwende, kann hier etwa die doppelte Tiefe erreicht werden. Abstriche müssen aber hinsichtlich der Höhengenaugigkeit in Kauf genommen werden, die bei etwa 0,5 Meter liegt gegenüber 0,2 Meter bei der Laserbathymetrie. Dafür schließen die Ergebnisse dieses Verfahrens nicht nur die zeitliche Lücke der alle sechs Jahre stattfindenden Vermessung durch die Laserbathymetrie, sondern sie liefern in kurzzeitlichen Abständen Informationen zu Veränderungen in der Morphologie, auf die gegebenenfalls reagiert werden kann. Allerdings gab es dann den Corona-Cut, der seinerzeit vieles durcheinander gebracht hat, sodass ich dieses Thema nicht weiterbewegt habe.

Was trägt die Arbeit deines Fachbereichs am LKN. SH konkret zum Küstenschutz und zum Meereschutz bei, denen sich der Landesbetrieb ja schon dem Namen nach verschrieben hat?

Lasst es mich etwas überspitzt sagen: Wir Geodäten digitalisieren die Erdoberfläche als Grundlage für jedes Projekt. Ohne diese Tätigkeit bleiben die Fenster der GIS- und der CAD-Programme leer! Wir sind als erstes gefordert und tragen eine hohe Verantwortung, eine geeignete Grundlage zu schaffen. Meist heißt es: »Vermesst alles!« Die Schwierigkeit besteht darin, die eigentliche Aufgabenstellung zu erkennen und zu verstehen, und daraus die vermessungstechnische Umsetzung abzuleiten.

Vermessungsdaten werden für die vorausgehenden Analysen, für die Bauplanungen, für die Bauphasen und für die Zustandserfassung nach

Abschluss der Maßnahmen sowie anschließend für die sich danach ergebende morphologischen Veränderungen benötigt. Es ist ein dauerhafter Prozess, die Veränderungen an den Küsten und dem Küstenvorfeld zu erfassen und zu analysieren.

Wir sind mit einem Team von aktuell 14 Personen unterwegs, um die benötigten Daten im Bereich der Nordsee mit etwa 570 Kilometer Küstenlänge und der Ostsee mit etwa 550 Kilometer Küstenlänge zu erheben, aufzubereiten und zur weiteren Nutzung zur Verfügung zu stellen.

Gab es spektakuläre Projekte? Kam es durch Bilder von oben zu neuen Ansichten und Einsichten?

Wir Geodäten oder Hydrographen sind eher bodenständig. Daher kann ich nicht mit spektakulären Projekten aufwarten. Bei dem Stichwort »Bilder von oben« fällt mir aber die Vogelschutzinsel Trischen ein, südwestlich vor Büsum gelegen, die ich in den 1990er-Jahren einige Male zu Vermessungszwecken aufgesucht habe. Diese Insel ist während meiner Dienstzeit in den 35 Jahren bis heute um etwa 600 Meter ostwärts gewandert. Die verfügbaren Orthofotos von damals und heute belegen es.

Wenn Du einmal zurückblickst auf die letzten Jahre und Jahrzehnte im Dienst für die Hydrographie, was waren die größten Änderungen? Was war besonders positiv?

Unter dieser Fragestellung möchte ich das Rahmenvermessungskonzept für das Gebiet der Nordsee als etwas Besonderes hervorheben. 2015 haben sich die mit der Seevermessung befassten Personen der für die Nordsee zuständigen Wasserstraßen- und Schifffahrtsämter, des BSH und der Küstenschutzverwaltungen der Bundesländer zusammengesetzt und die jeweiligen Aufgabenstellungen, die vorgegebenen Zeitintervalle und die verfügbare Ressourcen insbesondere in der Hydrographie zusammengestellt und sich ein Konzept für die Umsetzung überlegt und abgestimmt. Es beinhaltet, dass innerhalb von sechs Jahren das gesamte Wattenmeergebiet der Nordsee von der dänischen Grenze bis zur niederländischen Grenze erfasst wird, zum einen durch den Einsatz von Laserbefliegungen der trockenfallenden Wattflächen und zum anderen durch ergänzende hydrographische Vermessungen der dauerhaft wasserführenden Priele. Dazu wurden Zuständigkeiten definiert, also welche Institution für die Ausführung der Laserbefliegung zuständig ist und auch die Kosten übernimmt sowie die Datenauswertung und Datenbereitstellung durchführt. Dieses Konzept wird seit 2016 umgesetzt. Die Abstimmungen finden im Rahmen der jährlichen Arbeitsplanung des BSH für die Durchführung der hydrographischen Vermessungen statt. Alle Beteiligten zeigen Interesse, dieses Konzept umzusetzen. Unter anderem für Fragestellungen zu den Auswirkungen des Meeresspiegelanstieges haben diese flächendeckenden Geländemodelle eine besondere Bedeutung.

In einigen Monaten gehst du in Rente. Die Stelle am LKN.SH wird neu besetzt. Steht schon fest, wer dir am LKN.SH nachfolgen wird?

Ich werde nächsten Sommer – genauer: am 1. Juli 2026 – in den Ruhestand gehen. Gerne greife ich die Frage auf, um etwas Werbung für meine Nachfolge zu machen. Es wird eine Person mit einem Master in der Hydrographie gesucht, die zum 1. Mai 2026 beginnen kann. Einige Aufgabenstellungen habe ich ja schon genannt. Weitere Infos sind schon heute auf der Internetseite der DHyG eingestellt. Die offizielle Stellenausschreibung wird zu gegebener Zeit auch dort eingestellt.

Gibt es Themen, die du gerne deiner Nachfolge mitgeben möchtest?

Ich sehe die Weiterentwicklung der autonomen Systeme generell und insbesondere in der Hydrographie als ein Thema an, in das sich auch meine Nachfolge einbringen sollte. Hier gibt es einen Arbeitskreis der DHyG, der dieses Thema bearbeitet. Auch die KI wird sicher Einzug halten und bei vielen Informationen, die unsere Vermessungssysteme neben Koordinate und Höhe sekundär liefern, unterstützen. Die Klassifizierung von Punkt-

wolken sehe ich als ein Beispiel. Hier die Bedarfe des LKN.SH zu erkennen und sich in die geeignete Nutzung einzubringen, möchte ich meiner Nachfolge mitgeben.

Du hast jahrelang die Hydrographentage organisiert. Unter deiner Ägide sind diese Veranstaltungen in den letzten Jahren sehr erfolgreich geworden. Von Jahr zu Jahr registrieren sich mehr Teilnehmer. Das mag an der Qualität des Vortragsprogramms liegen, am Veranstaltungsort, am Rahmenprogramm oder auch schlicht nur am Versprechen, sich mit Gleichgesinnten ein paar Stunden lang auszutauschen. Was ist aus deiner Sicht das Erfolgsrezept für einen gelungenen Hydrographentag? An was muss man bei der Organisation alles denken?

Ich möchte zunächst die Gelegenheit nutzen, mich bei allen Mitgliedern des Arbeitskreises Hydrographentage zu bedanken, die gemeinsam und vertrauensvoll mit mir die Hydrographentage der vergangenen Jahre organisiert und umgesetzt haben. Viele Jahre war es Jens Schneider von Deimling, der federführend für die Vortragsprogramme zuständig war. Und seit Langem ist auch



HYPACK
a xylem brand



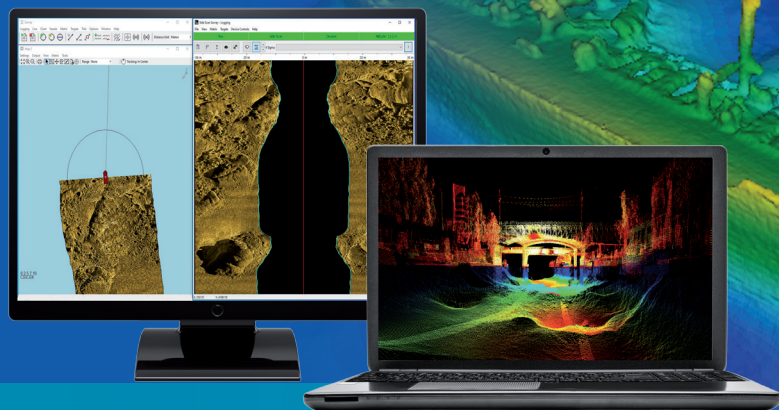
HYPACK® & HYSWEEP®

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



Boris Schulze dabei, der vor allem für die Fachfirmenausstellungen und die Umsetzung vor Ort zuständig ist. Herzlichen Dank euch beiden!

Nun zu deiner Fragestellung: Als die wichtigsten Komponenten für einen gelungenen Hydrographentag sehe ich die Qualität des Vortragsprogramms und ausreichend Zeit zum Networking an. Die Ablaufplanung sollte dieses berücksichtigen. Bei den großen Hydrographentagen sind Besuchszeiten für die Fachfirmenausstellungen, unter anderem durch längere Vortragspausen, und auch für die in den letzten Jahren eingeführten Bootsdemos einzuplanen. Ein geeigneter Veranstaltungsort und ein kleines Rahmenprogramm befördern das Networking.

Welcher Hydrographentag hat Dir am besten gefallen? Warum?

Grundsätzlich haben alle Vortragenden, alle Moderierenden, alle Ausstellenden und alle im Hintergrund Agierenden und Organisierenden zu erfolgreichen Hydrographentagen beigetragen. Dafür danke ich an dieser Stelle einmal allen.

Die Frage möchte ich rein subjektiv beantworten. Für mich war es der Hydrographentag in Lindau am Bodensee 2018. Die Ankunft mit der Bahn und der Blick gleich auf den Hafen, der geräumige Tagungsort für Vorträge und die Ausstellung sowie die Icebreaker-Party, die Nähe zum Wasser für die Bootsdemos und das Rahmenprogramm mit der Schifffahrt über den Bodensee nach Friedrichshafen zur Zeppelin-Werft mit entsprechender Besichtigung haben mich persönlich und als Organisator besonders angesprochen.

Um die Organisation der Hydrographentage muss sich künftig jemand anderes kümmern. Der Hydrographentag 2026 wird der letzte sein, den du

organisierst. Verrätst du uns schon etwas mehr, vor allem den Veranstaltungsort?

Der nächste Hydrographentag 2026 wird vom 23. bis zum 25. Juli in Travemünde auf dem Priwall stattfinden. Dort ist die Veranstaltung im Tagungshotel SlowDown geplant, das unmittelbar am Hafen gelegen ist und einen Blick auf die *Passat* bietet. Es wird dann wieder eine gemeinsame Veranstaltung von der DHyG und dem DVW sein. Die DHyG ist verantwortlich für die Organisation, der Arbeitskreis Hydrographie des DVW verantwortet das Vortragsprogramm. Ich hoffe auf eine hohe Beteiligung.

Mit welchen Gefühlen bereitest du dich auf den Ruhestand vor?

Im Moment ist meine Zeit mit dem »Aufräumen« meiner Themen und der Frage, wie es sich mit der Nachfolge in den nächsten Monaten ergeben wird, mehr als gefüllt. Es war für mich immer klar, dass ich nicht verlängern möchte. Und das fühlt sich bislang weiterhin gut an. Mein Abschluss wird der Hydrographentag in Travemünde sein – und das freut mich doch sehr.

Wirst du der Hydrographie auch im Ruhestand verbunden bleiben?

Aktuell denke ich, dass ich mich nicht aktiv in Themen einbringen werde. Gleichwohl werde ich die Entwicklungen über die *Hydrographischen Nachrichten* gerne weiter verfolgen.

Was würdest Du gerne besser können?

Ich habe einige handwerklichen Fähigkeiten, aber mit der Maurerkelle umzugehen, liegt mir nicht. Für Haus und Hof würde ich dieses gerne besser können.

Was weißt Du, ohne es beweisen zu können?

Darüber muss ich noch nachdenken. Das werde ich dann in meinem Ruhestand tun ... //



DHyG Student Excellence Award

Neu ab 2026:
Preise für die ersten drei Plätze!

Alle Infos unter:

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



Das schwimmende Labor

Das neue Hereon-Forschungsschiff *CORIOLIS* ist Innovationsplattform, Digitalisierungsprojekt sowie Botschafter für Klima, Küste und Technologie

Ein Beitrag von CHRISTOPH WÖHRLE

Die *CORIOLIS* ist das neue Forschungsschiff des Helmholtz-Zentrums Hereon. Mit Hybridantrieb aus Wasserstoff und Diesel, innovativer Membrantechnik und digitaler Ausstattung gilt sie als umweltfreundliches Hightech-Labor. Für 18 Millionen Euro gebaut, untersucht sie unter anderem Küsten- und Klimaveränderungen, Mikroplastik, Nährstoffkreisläufe und Auswirkungen der Offshore-Windkraft – ein nachhaltiger Meilenstein moderner Meeresforschung.

Helmholtz-Zentrum Hereon | *CORIOLIS* | Forschungsschiff | Hybridantrieb
Helmholtz-Zentrum Hereon | *CORIOLIS* | research vessel | hybrid propulsion

The *CORIOLIS* is the new research vessel of the Helmholtz-Zentrum Hereon. With hybrid propulsion powered by hydrogen and diesel, innovative membrane technology and digital equipment, it is considered an environmentally friendly high-tech laboratory. Built at a cost of €18 million, it investigates coastal and climate change, microplastics, nutrient cycles and the effects of offshore wind power, among other things – a sustainable milestone in modern marine research.

Autor

Christoph Wöhrle ist Wissenschaftsredakteur am Helmholtz-Zentrum Hereon in Geesthacht.

christoph.woehrle@hereon.de

Sie ist jetzt schon ein absoluter Klassenprimus in der maritimen Schule: die *CORIOLIS*. Das neue Forschungsschiff des Helmholtz-Zentrums Hereon – Ende vergangenen Jahres wurde es getauft – ist schwimmendes Labor und Trendsetter zugleich.

Die *CORIOLIS* vereint Innovationen, wie einen hybriden Antrieb aus Wasserstoff und Diesel. Sie verringert den Ausstoß von Stickoxiden durch Membranen. Zudem ist sie »durchdigitalisiert« und wird helfen, Erkenntnisse aus Wasser- und Sedimentproben von Flüssen und – vor allem den deutschen – Küsten zu ziehen.

Gebaut wurde das Forschungsschiff für rund 18 Millionen Euro auf der Hitzler Werft in Lauenburg an der Elbe. Mit öffentlichen Mitteln, das Gros kam vom Bund, entworfen vom Planungsbüro Technolog in Hamburg. Der Prozess von der Konstruktion bis zur Taufe im November 2024 dauerte gerade einmal zwei Jahre.

Einen Tiefgang von knapp 1,9 Metern und die maximale Geschwindigkeit von 12 Knoten komplettiert das Schiff mit einer Antriebsleistung von 720 kW. Zwei Mann Besatzung und bis zu zwölf Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler teilen sich 30 Meter Länge und 8 Meter Breite. Die Forschenden schlafen aber nicht auf dem Schiff, denn weiter als 100 Seemeilen wird es in der Regel nicht in Richtung offenes Meer hinausfahren.

Beim Rundgang über das Deck zeigt Dr. Jens

Meywerk die Feinheiten. Er ist der Mann, der die Fäden zusammenhält. »Hier ist einer der drei Anker montiert. Außer mit ihnen ist das Schiff mit einer Teleskopstange fixierbar, einem sogenannten Ankerpfahl, mit dem man auf jedem Grund festmachen kann«, sagt der Hereon-Projektleiter, während er über die Planken läuft. Man merkt ihm sofort den technischen Sachverstand an, die Detailverliebtheit und auch den Stolz auf das nagelneue Schiff.

Die *CORIOLIS* ist nach dem französischen Entdecker Gaspard Gustave de Coriolis der Corioliskraft benannt. Jene ist dafür verantwortlich, dass sich Luft- und Wassermassen nicht einfach geradlinig von hohem zu niedrigem Luftdruck bewegen, sondern in ihrer Bahn in eine kreisförmige Bewegung abgelenkt werden, wie das bei großräumigen Wettergebilden wie Tief- und Hochdruckwirbeln sowie Ozeanwirbeln zu sehen ist. Für die Namensfindung wurde ein Wettbewerb unter den Mitarbeitenden des Hereons ausgeschrieben. Am Ende gewann »Coriolis« mit Abstand.

Das Schiff stärkt und bemüht viele der Disziplinen des Hereons; hier kommen Küsten- und Klimaforschung zusammen, werden flankiert durch die Materialwissenschaft und Polymerforschung in Form von Wasserstoffantrieb und Membranen.

Das schwimmende Labor analysiert unter anderem, welche Nähr- und Schadstoffe von den

Flüssen ins Meer transportiert werden. Wie ist der Sauerstoff- und der Stickstoffgehalt? Wie der Wert für Fluoreszenz (spontane Emission von Licht kurz nach der Anregung eines Materials durch eine Lichtquelle)? Welche Mikroorganismen, Algen und Abfälle wie Fischkot schwimmen darin?

Wie verhält es sich mit dem »Marine Snow« als optisches Phänomen, bei dem Partikel kontinuierlich von oberflächennahen Schichten des Wassers bis in die Tiefsee absinken? Aber auch die Ausbreitung von Mikroplastik im Meer und in den Flüssen wird untersucht.

Im Mittellauf der Elbe kommt es ferner immer wieder zu einem Wachstum von Mikroalgen. Im weiteren Verlauf des Flusses sterben jene dann ab und werden von Bakterien abgebaut, was Sauerstoff verbraucht. Solche Veränderungen wollen die Forschenden besser verstehen, um Lösungsvorschläge und Empfehlungen an die Politik zu erarbeiten, die Auswirkungen des Klimawandels immer im Blick.

Denn kleinste Veränderungen, etwa durch die Parameter Landwirtschaft, Fischerei und Schifffahrt können die Ökosysteme der Küsten und Flüsse dramatisch beeinflussen. Weniger Sauerstoff heißt weniger Fisch. Weniger Fisch heißt weniger Vögel. Ein umfassender Einsatz von Schleppnetzen verändert die Sedimente.

Und: Wie beeinflusst all dies die »marine Kohlenstoffpumpe« und somit den Klimawandel ganz direkt? Der erste Begriff beschreibt, dass ein Teil der Biomasse, die pflanzliches Plankton an der Meeresoberfläche durch Photosynthese bildet, in Form kleiner, kohlenstoffhaltiger Partikel absinkt. Dadurch wird das CO₂ für lange Zeit in der Tiefsee gespeichert.

»Wir werden auch überprüfen, wie sich die Offshore-Windkraft auf Umwelt und Ökosysteme auswirkt«, sagt Meywerk. Umweltchemiker messen dann etwa, wie stark die Emissionen durch Korrosionsschutz ausfallen, die das Meer von den gestrichenen Fundamenten der Windräder abträgt – oder sogar der Abrieb der Rotoren ist messbar.

Modellierer schauen zudem mit gewonnenen Daten darauf, wie sich Windräder gegenseitig den Wind wegnehmen und durch Wirbelschleppen Temperatur und Strömung an der Meeresoberfläche beeinflussen. (Wirbelschleppen, man kennt den Begriff aus der Luftfahrt, sind im Meer turbulente Wasserwirbel, die in den Nachläufen von Offshore-Windparks entstehen und die Schichtung sowie die Strömung des Wassers und damit auch die Trübung beeinflussen.)

Der Weg von der Idee zur Innovation führt – wie überall am Hereon – auch auf der *CORIOLIS* über ein kontinuierliches Wechselspiel zwischen Experimenten, Modellierung und künstlicher Intelligenz bis hin zu Digitalen Zwillingen, die die vielfältigen Parameter von Klima und Küste oder der Biologie des Menschen im Rechner abbilden.

So werden komplexe Systeme ganz im Sinne der Zentrumsstrategie greifbar. Sogar vom – wahrhaft komplexen – System der *CORIOLIS* selbst soll ein Digitaler Zwilling entstehen.

»Die exakten Zeiten für die ersten Expeditionen stehen noch nicht fest. Zuerst laufen noch verschiedene Tests. Aber ab 2026 geht es los«, sagt Jens Meywerk. 225 Tage im Jahr wird die *CORIOLIS* im Einsatz sein.

Alle umweltrelevanten Forschungsdaten, die während der Fahrt ermittelt werden, könnten in Echtzeit abgerufen oder direkt mit anderen Schif-

Foto: Hereon, Niemann



Abb. 1: Testfahrt der *CORIOLIS* auf der Nordsee



Abb. 2: Die CORIOLIS im Hafen

fen und Landstationen geteilt werden. Somit sei das Schiff, das über 100 Messwerte aufzeichnen und übertragen kann, auch ein Meilenstein der Digitalisierung.

Beim Rundgang zeigt Meywerk auch die noch fast frisch gestrichene, fertige Brücke und die Messe. Von manchen Decken hingen bis vor kurzem in der Bauzeit noch viele Strom- und Datenkabel herab. 34 Kilometer Kabel verschiedenster Art und drei Kilometer Rohrleitungen wurden eingezogen, 150 Tonnen Stahl sind verbaut, alles in allem sind, die verschiedensten Gewerke inbegriffen, rund 250 Mitarbeitende am Bau des Schiffs beteiligt gewesen.

Ganz wichtig bei modernen Forschungsobjekten: Auf das Mikrosystem eines einzelnen Schiffes wirken sich globale Fragestellungen aus. Rund 90 Prozent des Welthandels werden auf dem Seeweg abgewickelt. Täglich verkehren auf den Meeren an die 100 000 Schiffe. Der Schiffsverkehr insgesamt ist für fast drei Prozent der globalen CO₂-Emissionen verantwortlich, Tendenz steigend. Die

Internationale Seeschifffahrtsorganisation der Vereinten Nationen hat deshalb 2023 beschlossen, bis 2050 die Klimaneutralität erreichen zu wollen. Das setzt Reeder auf allen Kontinenten unter Druck, klimaneutrale Antriebe zu finden. Die ersten haben bereits reagiert. So stellte Hapag Lloyd die *Berlin Express* in Dienst, einen Containergiganten, der mit LNG – also Flüssiggas – betrieben wird. Was den CO₂-Ausstoß immerhin um 30 Prozent reduziert.

Doch das ist nicht genug, dachten sich die »Geburts helfer« des Hereon-Forschungsschiffs. Auf der CORIOLIS ist der Gedanke der Nachhaltigkeit weitergedacht worden. Das Prunkstück ist der innovative Antrieb, bestehend aus elektrischen Motoren, die auf verschiedene Energiequellen zugreifen. Eine davon: die Brennstoffzelle, die auf ein speziell am Hereon entwickeltes Tanksystem zugreift, in dem Wasserstoff in Metallhydriden gespeichert wird.

Wasserstoff ist das häufigste Element im Universum. Wird die Energie genutzt, hinterlässt es kein umweltschädliches CO₂ oder Methan, sondern ausschließlich Wasserdampf als »Abgas«. Eine Brennstoffzelle wandelt Wasserstoff schadstofffrei in Strom für den Betrieb der Motoren und anderer elektrischen Verbraucher um. Gegenüber Dieselmotoren hat Wasserstoff mit 33,33 kWh/kg eine etwa dreimal höhere Energiedichte.

Der gewonnene Strom wird auf einen sogenannten Gleichstromzwischenkreis gespeist und lädt darüber entweder eine Batterie oder wird direkt für Bordstrom oder den Antrieb des Schiffes genutzt.

Metallhydride sind gut recycelbar und als Speicherelement besonders zukunftssträftig. Wie ein Schwamm werden die Wasserstoffatome »aufgesaugt«, also chemisch im Metallpulver oder -gitter gebunden. Um das Gewicht so gering wie möglich zu halten, suchen die Forschenden nach leichten und effizienten Materialkombinationen.

Mit weniger Druck und moderaten Temperaturen wird die Speicherung einfacher und günstiger.

CORIOLIS

Länge / Breite / Tiefgang	29,90 m / 8,00 m / 1,90 m
Besatzung / Wissenschaftler	2 (+ 1) / 12
Laborfläche / Fläche Arbeitsdeck	47 m ² / 70 m ²
Einsatzbereich	Küstenfahrt, international 100 Seemeilen
Geschwindigkeit	maximal 12 Knoten
Antriebsleistung	720 kW
Einsatztage im Jahr	circa 225
Brennstoffzellenleistung	100 kW
Metallhydridtank	30 kg Wasserstoffkapazität
Batterie	140 kWh Kapazität, 100 kW Leistung

ger als bei herkömmlichen Hochdrucktanks (die müssen oft 700 bar aushalten) oder Flüssigwassertanks (sie müssen mitunter auf minus 253 °C heruntergekühlt sein). Für die Speicherung wird je nach Metallhydrid nur noch ein Druck von etwa 70 bar benötigt, das Volumen verringert sich somit deutlich.

In Verbindung mit der Brennstoffzelle wird, durch Nutzung der Abwärme, keine zusätzliche Energie zur Freisetzung des Wasserstoffs aus dem Metallhydrid benötigt. Zwei bis acht Stunden, je nach Schiffsgeschwindigkeit, kann das Schiff mit einer Tankfüllung Wasserstoff (30 Kilogramm) fahren.

Auch der Einsatz von Membranen ist neu. CO₂ oder Schadstoffe aus Emissionsströmen abzutrennen oder Wasser aufzubereiten, sind Aufgaben, die in der Hereon-Forschung und für eine Industriegesellschaft der Zukunft essenziell sind. Denn Wassermangel, Klimawandel und Energiewende – bei diesen Herausforderungen spielen Stofftrennungen eine zentrale Rolle – brachten in der Forschung neue Membranverfahren sowohl

für flüssige als auch gasförmige Anwendungen hervor und folgen einem ganzheitlichen Ansatz. Sie minimieren auf der CORIOLIS Stickoxide in der Abgasluft, wenn der Dieselantrieb genutzt wird. Gerade in Häfen ist die Abgasluft problematisch, wenn es keinen Landstromanschluss gibt.

Die Hereon-Membranen konzentrieren sich auf die im Motor verbrannte Luft. Die Idee: Ein Modul trennt einen Teil des Sauerstoffs aus der Verbrennungsluft ab, indem es Sauerstoff besser hindurchströmen lässt als Stickstoff. Damit senkt sie den Sauerstoffgehalt ab, was zur Folge hat, dass die Temperatur sinkt und damit auch der Stickstoffausstoß – um satte 80 Prozent.

Auch für den abgeleiteten Gasstrom soll es Lösungen geben. Da er mehr Sauerstoff enthält als normale Luft, suchen die Konstrukteure derzeit nach Möglichkeiten, ihn sinnvoll in das Gas- und Energiesystem einzukoppeln. Der Sauerstoff könnte für die Brennstoffzelle verwendet werden.

Am Ende ist ein ganzes Forschungszentrum sehr froh, über den neuen schwimmenden »Kollegen«. Ein Schiff, das den Unterschied macht. //



Motion & Navigation
you can trust



Navsight Marine

All-in-one Motion &
Navigation Solution



Qinertia Software

Next Generation INS/GNSS
Post-processing Software



SidescanTools

Eine Open-Source-Software zur Verarbeitung und Visualisierung von Seitensichtsonardaten

Ein Beitrag von STEFFEN STADLER, FINN SPITZ und MIA SCHUMACHER

Seitensichtsonare sind ein zentrales Werkzeug zur maritimen Kartierung, Objektidentifikation und Wrackinspektion. Mit SidescanTools steht jetzt eine frei verfügbare Open-Source-Software für die Verarbeitung gängiger Formate (XTF, JSF) bereit. Die Python-basierte Anwendung bietet Funktionen wie Grundlinienerkennung, geometrische und radiometrische Korrekturen sowie Verstärkungs-Normalisierung und verbessert damit Auflösung und Reichweite der Daten. Ergebnisse können als georeferenzierte Rasterbilder exportiert werden. Entwickelt im Projekt GhostNetBusters, richtet sich SidescanTools insbesondere an Forschung, NGOs und Citizen-Science-Initiativen, die Sonardaten kostengünstig und flexibel aufbereiten möchten.

Seitensichtsonar | Open-Source-Software | Visualisierung
side-scan sonar | open-source software | visualisation

Side-scan sonars are a key tool for maritime mapping, object detection and wreck inspection. With SidescanTools, an open-source software is now available to process common data formats (XTF, JSF) free of charge. The Python-based application provides core functionalities such as bottom detection, geometric and radiometric corrections and gain normalisation, thereby enhancing data resolution and range. Processed results can be exported as georeferenced raster images. Developed within the GhostNetBusters project, SidescanTools is designed for researchers, NGOs, and citizen science initiatives aiming to analyse sonar data in a cost-effective and flexible way.

Autoren

Steffen Stadler und Finn Spitz arbeiten bei der Kieler sonoware GmbH. Mia Schumacher ist beim Geomar Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung beschäftigt.

mschumacher@geomar.de

Einleitung

Seitensichtsonare sind bereits seit ihrer Einführung in den 1950er-Jahren ein elementarer Bestandteil für die Unterwasserortung und genießen bis heute sowohl in Forschung als auch Wirtschaft eine breite Anwendungsvielfalt (Woock 2015). Insbesondere zur Inspektion von Wracks, zur Kabelverlegung sowie zur Detektion von besonders kleinen Objekten sind sie bis heute relevant (BSH 2025). Die Auflösung des Sonarbildes hängt hierbei stark von der Signalqualität des Sonars ab und unterliegt insbesondere der Frequenzhöhe, dem Umgang mit Hintergrundrauschen, Nachhall sowie Reflexionseigenschaften der detektierten Umgebung (Blondel 2009). Erhobene Daten müssen für die weitere Verwendung aufbereitet werden.

Derzeit sind einige kommerzielle Lösungen für die Seitensichtsonar-Datenverarbeitung am Markt erhältlich. Bekannte Namen sind hier vor allem SonarWiz von Chesapeake Technology (Chesapeake Technology 2025), Survey Engine von Coda Octopus (Coda Octopus Products Ltd. 2025) oder SonarPro von Klein Marine Systems (Klein Marine Systems 2025). Mit SidescanTools können nun insbesondere NGOs und Hobbyforscher eine kos-

tenlose Verarbeitungssoftware für die gängigen Datenformate nutzen (FOSSGIS 2025).

Technische Funktionsweise

SidescanTools ist ein Open-Source-Python-Programm und wird unter der GPL-3.0 Lizenz auf GitHub entwickelt und veröffentlicht. Es verfügt über eine nutzerfreundliche GUI (Abb. 1). Unter anderem werden die Python-Pakete aus Tabelle 1 verwendet.

Unterstützte Datenformate

SidescanTools unterstützt zwei Datenformate von gängigen Sonaren:

- XTF: Ein plattformübergreifend lesbares Dateiformat, das als gemeinsamer Standard für Sonardaten dient. Es besteht aus mehreren

QtPy bzw. QT Backend	GUI
napari	Datenvisualisierung
GDAL	Geodatenverarbeitung
pyxt	Datenimport bzw. Einlesen
Anaconda	Umgebungsmanagement und Installation

Tabelle 1: Python-Pakete in SidescanTools

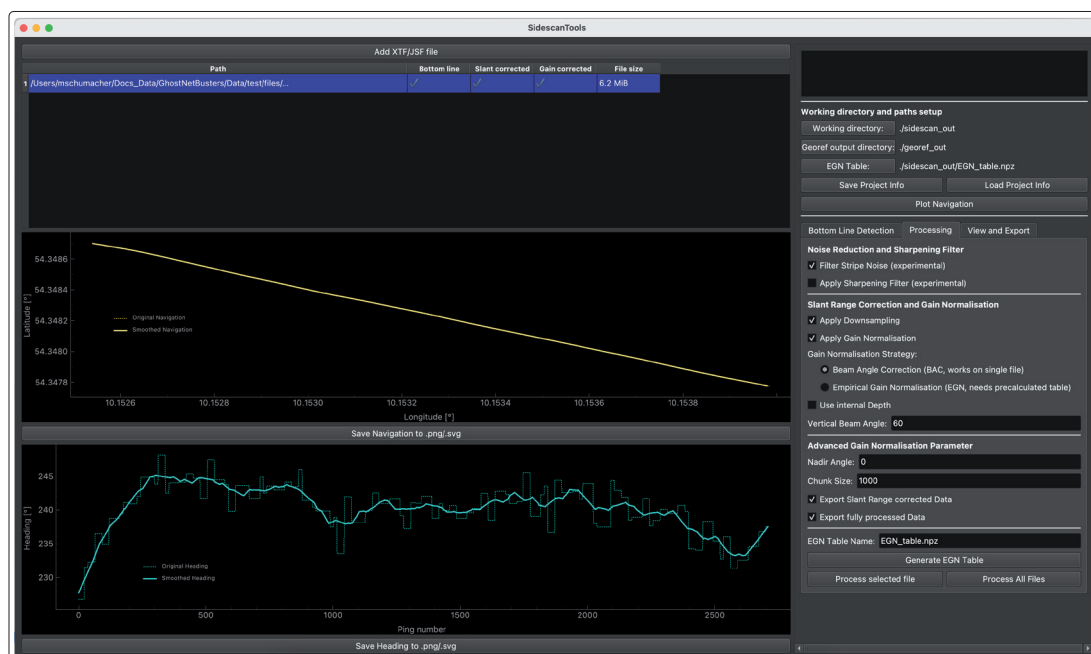


Abb. 1: Die GUI von SidescanTools

Paketen, die jeweils mit einem eigenen Header geliefert werden, was es zu einem äußerst vielseitigen Dateiformat macht. Das XTF-Format ist besonders nützlich, da nahezu jedes Rohdatenformat für Sonardaten in XTF konvertiert werden kann.

- JSF: Ein von Edgetech entwickeltes Dateiformat, das in der maritimen Vermessungsindustrie weit verbreitet ist. Dieses Dateiformat wurde gemäß der offiziellen Edgetech-Dokumentation decodiert (Edgetech 2025).

Kernfunktionalitäten

Die Software ermöglicht die Verarbeitung aufgenommener Daten in einem Projekt. Zunächst muss die Grundlinie in den Daten detektiert werden, worauf aufbauend geometrische, radiometrische und zusätzliche Nachverarbeitungen angewandt werden können, um abschließend das Ergebnis als GeoTIFF oder PNG zu exportieren.

Die Grundlinienerkennung wird in SidescanTools durch eine blockweise Datenpräsentation sowie eine schwellenwertbasierte Segmentierung umgesetzt, welche die wahrscheinlichste Distanz zum Meeresboden berechnet. Mit Hilfe der Schwelle wird für jeden Rückstreuwert festgelegt, ob dieser zum Meeresboden oder der Wassersäule gehört. Daraus ergibt sich ein binäres Bild auf welchem mit Hilfe von typischen Ansätzen der Kantenerkennung der beste Kandidat für die Grundlinie gefunden wird. Hierbei kann noch eine manuelle Korrektur vorgenommen werden, wenn beispielsweise Seegras oder größere Hindernisse die automatische Bodendetektion verfälscht haben.

Nach der Bodendetektion erfolgt die geometrische Korrektur, genauer die Schrägsichtkorrektur

(Blondel 2009), um dem perspektivischen Verzerrungseffekt aufgrund des Einfallswinkels des ausgehenden Signals zu begegnen und die Position der detektierten Objekte exakt zu bestimmen (Chang et al. 2010). Hierzu werden die Daten samplweise auf einen als flach angenommenen Meeresboden projiziert.

Zur qualitativen Verbesserung der Sonardaten können anschließend radiometrische Korrekturen angebracht werden (Blondel 2009). Diese sind notwendig, um die durch Signalausbreitungsdistanz, Strahlungsmuster (beam pattern) und Bewegung des Sonars auftretende Varianz zu minimieren.

Hierbei kommen zunächst Filter zum Einsatz, die auf 2D-FFT basieren (zweidimensionale Fast-Fourier-Transformation), welche akustische Artefakte und Rauschen aus den Datensätzen entfernen. Diese entfernen Störungen, die im Spektrum auf einer gemeinsamen Achse liegen und sich in der Regel durch Streifen im Sonarbild zeigen. Die Ursachen dieser Störungen sind in der Regel nicht eindeutig, so können diese durch eine fehlerbehaftete Korrektur des Strahlungsmusters, durch Rollbewegungen des Sonars – zum Beispiel durch Wellen – oder auch elektronisches Rauschen verursacht werden (Wilken et al. 2012).

Nachfolgend kann eine Verstärkungsnormalisierung angewandt werden, um einer Dämpfung der Signalreichweite und damit verbundenem Qualitätsabfall mit zunehmender Detektionsdistanz entgegenzuwirken. Hierbei werden die einzelnen Strahlmuster statistisch analysiert, um eine Korrekturtabelle zu berechnen. Es stehen zwei verschiedene Methoden zur Verfügung, die abhängig von der Menge der aufgenommenen Daten verwendet werden können. Der erste Algorithmus, BAC

(englisch: Beam Pattern Correction), arbeitet nur auf der aktuell ausgewählten Datei und schätzt das Strahlmuster in Abhängigkeit der Winkel jedes einzelnen Rückstreuwertes zum Sonar. Der zweite Algorithmus, EGN (englisch: Empirical Gain Normalisation), wertet zusätzlich zum Winkel auch den Abstand der einzelnen Punkte zum Sonar aus und erreicht damit eine deutlich spezifischere Korrekturtabelle, benötigt jedoch auch eine ausreichend große Menge an Daten. Dieser Ansatz arbeitet daher auf mehreren Dateien in einem Projekt, womit üblicherweise alle Aufnahmen eines Tages/einer Fahrt, die unter ähnlichen Bedingungen aufgenommen wurden, verarbeitet werden.

Abschließend können zusätzliche Bildnachverarbeitungen angewandt werden. Um das Bild zu schärfen, kann ein homomorpher Filter angewandt werden, welcher symmetrisch tiefe Frequenzen dämpft und hohe Frequenzen verstärkt. Dies bewirkt, dass die Kanten an Grenzen von Übergängen verstärkt werden und somit Objekte im Bild klarer zu erkennen sind (Gonzalez und Woods 2002).

Um insgesamt den Kontrast innerhalb des Bilds zu erhöhen, kann außerdem eine Histogramm-Normalisierung vorgenommen werden, die durch die CLAHE-Methode (englisch: Contrast Limited Adaptive Histogram Equalisation) umgesetzt wurde. Im Gegensatz zu gewöhnlichen Histogramm-Streckungen werden hier durch eine adaptive Methode jeweils die Histogramme für mehrere Bildabschnitte angepasst, um den jeweiligen lokalen Kontrast zu erhöhen (scikit-image development team 2025).

Datenexport

Sobald die Sonardaten die gewünschte Qualitätsgüte erreicht haben (Abb. 2), kann ein georeferenziertes Bild als GeoTIFF-Datei exportiert werden. Dafür werden die Daten in Bildstreifen aufgeteilt, die jeweils fünf Pings umfassen. Für diese Streifen werden die Koordinaten der vier Ecken ermittelt und diese dann mittels ground control points (GCPs) auf globale Koordinaten projiziert. Anschließend werden alle Streifen zu einem geo-

referenzierten Mosaik zusammengefügt. Die Umsetzung erfolgt mit GDAL, einem Open-Source-Paket für Geodatenverarbeitung (GDAL 2025).

Nachwort

Die Open-Source-Software SidescanTools ist im Rahmen des öffentlich geförderten Projekts GhostNetBusters entwickelt worden und dient in erster Linie dem Sichtbarmachen von Indikatoren von verlorenem Fischereigut.

Das Projekt wird vom Geomar Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel und der Kieler Sonoware GmbH durchgeführt und ist im Rahmen der KI-Richtlinie der Staatskanzlei des Landes gefördert (Geomar 2025).

Die Software kann auf GitHub unter folgendem Link heruntergeladen werden:

<https://github.com/sonoware/sidescantools> //

Literatur

- Blondel, Philippe (2009): Sidescan sonar data processing. In: The Handbook of Sidescan Sonar; Springer, DOI: 10.1007/978-3-540-49886-5_4
- BSH (2025): Verfahren der Wracksuche. www.bsh.de/DE/THemen/Vermessung_und_Kartographie/Wracksuche/Verfahren/verfahren_node.html
- Chang, Yet-Chung; Shu-Kun Hsu; Ching-Hui Tsai (2010): Sidescan sonar image processing: Correcting brightness variation and patching gaps. Journal of Marine Science and Technology, DOI:10.51400/2709-6998.1935
- Chesapeake Technology (2025): SONARWIZ. <https://chesapeakeotech.com>
- Coda Octopus Products Ltd. (2025): Survey Engine. www.codaoctopus.com
- Edgetech (2025): JSF file and message descriptions. www.edgetech.com/wp-content/uploads/2023/04/0023492_Rev_O.pdf
- FOSSGIS (2025): media.ccc.de. SidescanTools – open source Sidescan Processing Software, <https://media.ccc.de/v/fossgis2025-62620-sidescantools-open-source-sidescan-processing-software>
- Geomar (2025): Ghostnetbusters. www.geomar.de/en/ghostnetbusters
- Gonzalez, Rafael C.; Richard E. Woods (2002): Digital Image Processing. Pearson
- Klein Marine Systems (2025): SonarPro Software Package. www.klein.com/product/sonarpro-software-package
- scikit-image development team (2025): scikit-image. <https://scikit-image.org/docs/0.25.x/api/skimage.exposure.html>
- Wilken, Dennis; Peter Feldens; Tina Wunderlich; Christoph Heinrich (2012): Application of 2D Fourier filtering for elimination of stripe noise in side-scan sonar mosaics. Geo-Marine Letters, DOI: 10.1007/s00367-012-0293-z
- Woock, Philipp (2015): Umgebungskartenschätzung aus Sidescan-Sonardaten für ein autonomes Unterwasserfahrzeug. KIT, S. 68–70
- zenodo (2025): Zenodo. <https://zenodo.org/records/15869424>

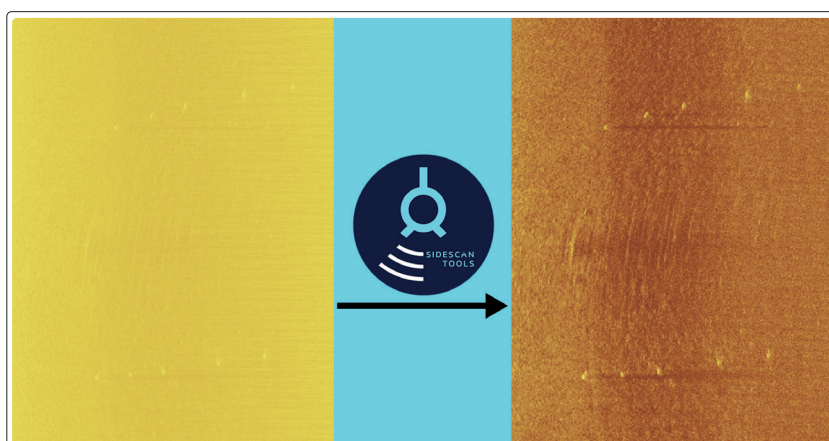


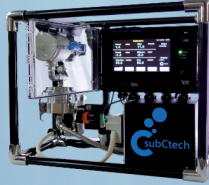
Abb. 2: Links: unprozessierte Rohdaten. Rechts: korrigierte und qualitätsoptimierte Daten

Ocean Power & Monitoring

Transform into the cost-efficient and sustainable future



OceanPack™
Underway



Racing

SOCAT
ready



pCO₂ optical Analyzer

GHG Monitoring

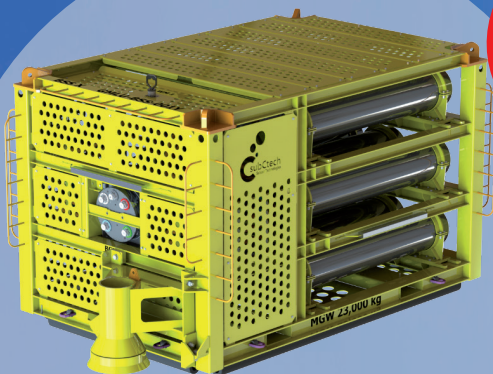
Modular, easy to use and reliable
monitoring incl. pCO₂ and Microplastic

Subsea Li-Ion Batteries

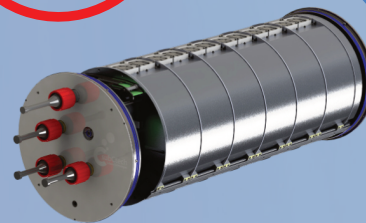
Highly reliable, efficient and safe underwater
power solutions for DC + AC



Standard Batteries



Energy Storage &
UPS Systems



Vehicles

API17F
Offshore
certified

»From Data to Decision: Embracing the S-100 Standard«

World ECDIS Day in Hamburg

Ein Beitrag von PETER DUGGE

Der World ECDIS Day 2025 fand am 17. September im Maritimen Museum Hamburg statt und zog über 170 internationale Teilnehmende aus Schifffahrt, Industrie, Behörden und Wissenschaft an. Seit 2015 wird die Konferenz alle zwei Jahre von Chartworld organisiert und widmet sich der Förderung von ECDIS (Electronic Chart Display and Information System) und elektronischen Seekarten. Das Motto 2025 lautete »From Data to Decision: Embracing the S-100 Standard«. Im Fokus standen die Einführung des neuen S-100-Standards, die rechtzeitige Entwicklung und Bereitstellung entsprechender Systeme sowie die Anpassung der Ausbildung. Vorträge, Podiumsdiskussionen und Produktvorstellungen gaben Einblicke in geplante Datenprodukte wie S-101 (ENC), S-102 (Tiefenkarten), S-104 (Wasserstand) und S-111 (Strömungen). Besonders hervorgehoben wurden Chancen wie dynamische Sicherheitstiefenlinien, aber auch Herausforderungen bei Datenverfügbarkeit und Marktentwicklung. Neben Fachbeiträgen boten Pausen Gelegenheit zum Austausch; den Abschluss bildeten Preisverleihungen und eine Abendveranstaltung.

ECDIS | ENC | S-100
ECDIS | ENC | S-100

World ECDIS Day 2025 took place on September 17 at the Maritime Museum in Hamburg and attracted over 170 international participants from shipping, industry, government agencies and academia. Since 2015, the conference has been organised every two years by Chartworld and is dedicated to promoting ECDIS (Electronic Chart Display and Information System) and electronic nautical charts. The motto for 2025 was »From Data to Decision: Embracing the S-100 Standard«. The focus was on the introduction of the new S-100 standard, the timely development and provision of appropriate systems and the adaptation of training. Presentations, panel discussions and product demonstrations provided insights into planned data products such as S-101 (ENC), S-102 (depth charts), S-104 (water levels), and S-111 (currents). Particular emphasis was placed on opportunities such as dynamic safety depth lines, but also on challenges in data availability and market development. In addition to technical presentations, breaks provided opportunities for discussion, and the event concluded with award ceremonies and an evening event.

Autor

Peter Dugge arbeitet im Entwicklungsbereich der TKMS Atlas Elektronik als System Designer für Navigations- und Kartensysteme und für die Bearbeitung geodätischer Fragestellungen. Er ist Mitglied der HN-Redaktion.

peter.dugge@dhg.de

Der diesjährige World ECDIS Day (Logo in [Abb. 1](#)) fand am 17. September 2025 in Hamburg statt. Ver-

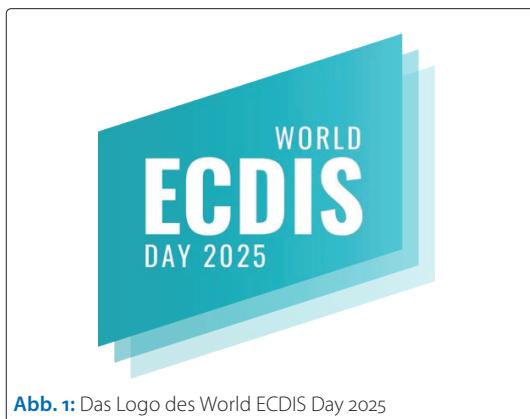


Abb. 1: Das Logo des World ECDIS Day 2025

anstaltungsort war das Maritime Museum ([Abb. 2](#)). Der Tag richtete sich wie auch die Jahre zuvor an Nutzer und Hersteller von ECDIS (Electronic Chart Display and Information System) und ENC (Electronic Navigational Charts). Er hat die Förderung der Nutzung von ECDIS zum Ziel und findet seit 2015 alle zwei Jahre statt. Dieses Jahr stand er unter dem Motto »From Data to Decision: Embracing the S-100 Standard«. Die Veranstaltung wurde von über 170 nationalen und internationalen Teilnehmenden aus Schifffahrt, Industrie (ECDIS, Marine-Schiffsführungssysteme), Behörden und Wissenschaft besucht ([Abb. 3](#)).

Zu der Veranstaltung eingeladen hatte das World ECDIS Day Team im Auftrag der Firma Chartworld.

Schwerpunkthemen waren der Terminplan für die Schiffsausrüstungspflicht mit S-100-fähigen ECDIS, die abschließende Entwicklung der zugehörigen Standards, die frühzeitige Entwicklung und Bereitstellung von S-100-fähigen ECDIS, die an S-100 angepasste Ausbildung des Seefahrtpersonals und die Bereitstellung von S-100-Kartenprodukten.

Die Vortrags- und Diskussionssprache war durchweg Englisch.

Im Eingangsbereich der Veranstaltungsräume stellte sich auf Einladung von Chartworld die ehrenamtliche Crowdsourcing-Initiative »EyeSea« mit einem kleinen Ausstellungsstand vor. Gegenstand ihrer Arbeit ist die Kartierung der Meeresverschmutzung (www.eyesea.org).

Sponsoren des World ECDIS Days waren das United Kingdom Hydrographic Office (UKHO), das Kommunikationsunternehmen PeopleTechMaritime und die Firma Raymarine Commercial.

Nach einleitenden Worten von Björn Röhlich (von Chartworld), der einen Rückblick auf die letzten World ECDIS Days gab, von Peter Tamm vom Maritimen Museum (als Videoaufzeichnung) und der anschließenden Eröffnungsrede von Frau Dr. Melanie Leonhard, der Senatorin für Wirtschaft und Innovation in Hamburg, wurde den Teilnehmenden ein enggetaktetes, informatives Programm geboten:

- S-100-Update – Vortrag von Matthew Garland, UKHO,
- Podiumsdiskussion zu S-100 (Hendrik Göhmann – SevenCs, Matthew Garland – UKHO, Kevin Black – Primar, Friedhelm Moggert-Kägeler – Caris),
- S-100-ECDIS – Produktvorstellung von Raymarine Commercial,
- S-100-ChartServer – Produktvorstellung von SevenCs,
- Fragerunde.

Das Programm wurde aufgelockert durch Pausen mit Gelegenheit zum intensiven fachlichen Austausch zwischen den Teilnehmenden. Den Abschluss bildete die Verleihung von Preisen für persönliche Verdienste bei der Förderung von ECDIS seit den 1990er-Jahren und schließlich eine Abendveranstaltung.

Schwerpunkte beim offiziellen Programm und bei den Randgesprächen waren wie zum Teil schon oben genannt unter anderem:

- Der enge S-100-Zeitplan der IHO,
- die zunächst wesentlichen S-100-Datenprodukte,
- erste S-100-Versuche,
- die Bereitstellung von S-100-Datenprodukten.

Der Zeitplan der IHO sieht eine Bereitstellung aller erforderlichen Vorschriften (Datenstandards, Prüf-

vorschriften) so rechtzeitig vor, dass im Prinzip ab 2026 ein typgeprüftes, S-100-fähiges ECDIS für die freiwillige Schiffsausrüstung zur Verfügung stehen könnte. Ab 2029 ist vorgesehen, dass ECDIS-Neuinstallationen verpflichtend S-100-fähig sein müssen (als »Dual-Fuel«, das heißt, sie müssen ENCs in den Formaten S-57 und S-100 verarbeiten können). In der Podiumsdiskussion wurde deutlich, dass in Industriekreisen erst ab circa 2028 mit einem ersten typgeprüften S-100-fähigen ECDIS gerechnet wird.

Als erste bereitzustellende S-100-Datenprodukte wurden genannt:

- S-101 (ENC, Teil der Ausrüstungspflicht),
- S-102 (hochauflösende Tiefenkarten),
- S-104 (Wasserstandsinformationen),
- S-111 (Oberflächenströmungen).

An mehreren beeindruckenden Beispielen wurde gezeigt, was durch eine Kombination aller dieser Produkte möglich ist: So fallen in der ECDIS-Darstellung zum Beispiel Einzellotungen und Bagger-Solltiefen weg; sie werden ersetzt durch hochauf-



Abb. 2: Das Maritime Museum im Kaispeicher B in Hamburg, wo der World ECDIS Day 2025 stattfand



Abb. 3: Im Publikum saßen dicht gedrängt 170 Teilnehmende

lösende Tiefeninformationen mit einer vertikalen Auflösung von zum Beispiel einem Meter oder besser. Das erlaubt unter anderem, die dargestellte Sicherheitstiefenlinie recht genau an den aktuellen Schiffstiefgang anzupassen. Dabei können aktuelle Wasserstandsinformationen die Sicherheitstiefenlinie dynamisch beeinflussen. Das sind Möglichkeiten, die bisher zum Beispiel im Lotsenbetrieb, aber nicht auf standardisierten ECDIS zur Verfügung standen.

Anhand eines vom UKHO vorgestellten Seeversuchs im Seegebiet zwischen Großbritannien und Frankreich wurden – wie auch in der Fragerunde – die Herausforderungen, die sich dabei stellen, deutlich: Neben dem Umgang der Schiffsbesatzungen mit den neuen Möglichkeiten sind dies aktuell vor allem die Bereitstellung von aktuellen S-100-Daten. Da nur das Mitführen von ENC's Pflicht ist und die Ausstattung mit S-102-, S-104- und S-111-Datenprodukten freiwillig erfolgt, ist zurzeit offen, wie sich der Markt für die über die ENC hinausgehenden Datenprodukte entwickeln

wird und wann damit der Großteil der Vorteile von S-100-ECDIS zum Tragen kommen wird.

Neben den Kosten und der fehlenden Infrastruktur für die Bereitstellung dieser zusätzlichen Daten spielt dabei auch die Doppelbelastung der Hydrographischen Dienste eine Rolle, die für viele Jahre ENC's in S-57 und in S-101 parallel bereitstellen müssen.

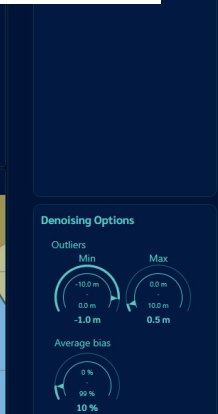
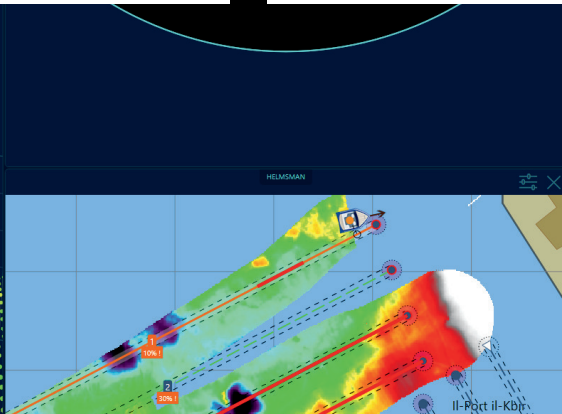
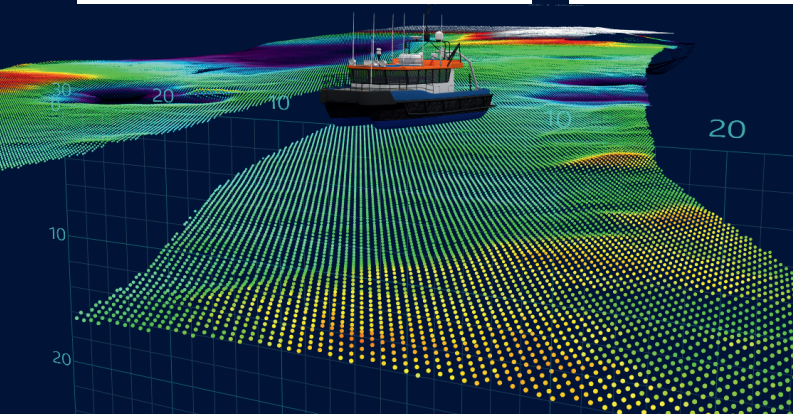
Außer seegehenden Versuchen gibt es – wie sich in den Nebengesprächen zeigte – auch simulatorgestützte Versuche mit S-100-Datenprodukten unter Beteiligung mehrerer nationaler Hydrographischer Dienste, zum Beispiel Baltic Sea e-Nav (interreg-baltic.eu/project/baltic-sea-e-nav).

Wie in den Vorjahren handelte es sich auch beim World ECDIS Day 2025 um eine gewinnbringende Veranstaltung, und ich freue mich, dass für 2027 der nächste World ECDIS Day geplant ist – dann mit vielleicht etwas längeren Pausen, um die Fülle der dargebotenen Informationen im Gespräch zwischen den Teilnehmenden noch besser reflektieren zu können. //



Powering Energy. Enabling Science Equipment. Expertise. Integration.

From sonars and ADCPs to crewed and autonomous survey platforms, our marine technology drives offshore energy and ocean science operations across Europe. Whether purchasing, renting, or integrating equipment, our expert team ensures fast delivery and responsive support, keeping your next project on time and on budget.



Now stocking Voxometer from R3 Vox and Origin ADCP from Sonardyne
Contact our expert team today: sales@subsea-europe.com



Ocean engineering from space into depth

Realise your projects in cooperation with our hydrographic services

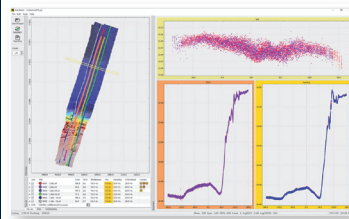
CTDs & SVPs



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