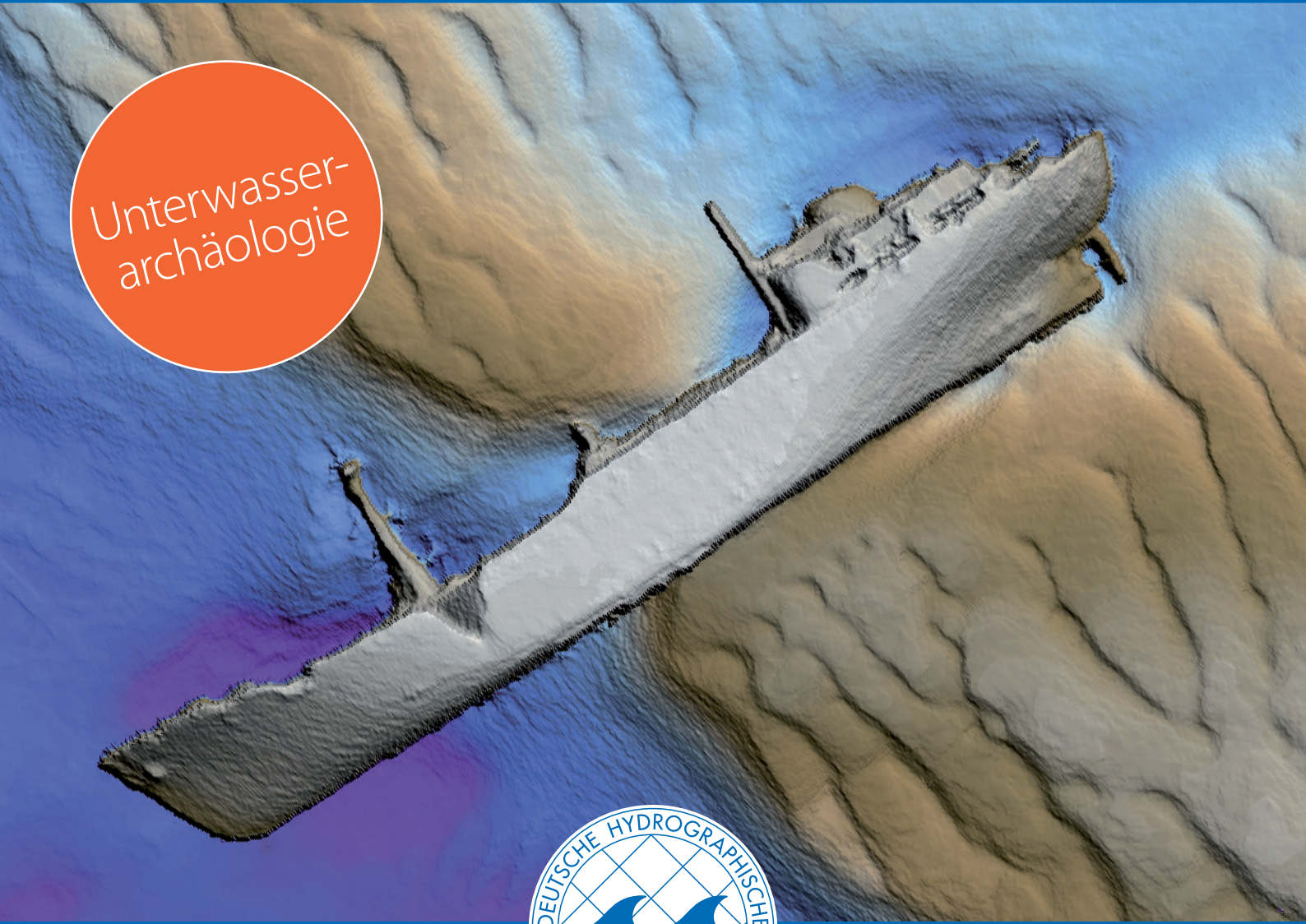


Journal of Applied Hydrography

HYDROGRAPHISCHE NACHRICHTEN

03/2026

HN 133



Lückenschluss im »Weißen Band« vor Helgoland

Fusion von Mikrobathymetrie, Snippet-Backscatter und parametrischer Echolotung für die hydrographische und geoökologische Prospektion

Ein Beitrag von JENS SCHNEIDER VON DEIMLING und MERVE JENSEN

Die Vermessung der Helgoländer Flachwasserzone (bis 10 m Tiefe) ist aufgrund starker Gezeiten, Untiefen und dichten Kelpbewuchses äußerst anspruchsvoll. Um diese Kartierungslücke zu schließen, setzt die Arbeitsgruppe der CAU Kiel das Forschungsboot *FB Zostera* ein. Durch die Fusion von hochauflösender Fächerecholot-Bathymetrie, Snippet-Backscatter und parametrischer Sedimentecholotung wird ein digitales Geländemodell mit einer Auflösung von 0,5 Metern erstellt. Die Methodik ermöglicht es, rein akustisch sowohl die Vegetationsoberkante als auch die Morphologie des wahren Meeresbodens zu differenzieren. Diese Daten bilden die Basis für präzise Habitatmodellierungen, geologische Analysen des Helgoländer Unterwassersockels sowie die Detektion unterwasserarchäologischer Funde.

Helgoländer Felssockel | Mikrobathymetrie | Habitatmodellierung | Weißes Band | Rückstreustärke
Heligoland rocky reef | micro-bathymetry | Benthic habitat mapping | White ribbon | backscattering strength

Surveying the Heligoland shallow water zone (down to 10 m depth) is highly demanding due to strong tidal currents, shoals and dense kelp forests. To bridge this mapping gap, the research group at CAU Kiel utilises the research vessel *FB Zostera*. By fusing high-resolution multibeam echo sounder (MBES) bathymetric data, snippet backscatter and parametric sub-bottom profiling, a digital terrain model with a 0.5-metre resolution is generated. This methodology enables a purely acoustic differentiation between the vegetation canopy and the true seafloor morphology. These data provide the foundation for precise habitat modelling, geological analysis of the mesozoic basement and the detection of underwater archaeological finds.

Autoren

Dr. Jens Schneider von Deimling lehrt und forscht an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel (CAU) zum Thema experimentelle Hydroakustik und Habitatkartierung. Merve Jensen ist Doktorandin an der CAU mit Schwerpunkt auf experimenteller Hydroakustik und der Kartierung von Braunalgen um Helgoland.

jens.schneider@ifg.uni-kiel.de

Helgoland ist aus vielerlei Perspektiven ein ganz besonderer Ort. Aus geologischer Sicht erheben sich hier Schichten aus der Erdmittelzeit (Mesozoikum), deren prominenteste Ausprägung die »Lange Anna« aus rotem Buntsandstein bildet. Im Norddeutschen Becken liegt dieser Buntsandstein normalerweise in Tiefen von rund 3000 Metern, wurde hier jedoch infolge salztektonischer Prozesse an die Oberfläche gehoben. Diese geologische Anomalie setzt sich unter Wasser fort und bildet eine in der Nordsee einmalige Unterwasserlandschaft aus Felsriffen, welche zur artenreichsten Region in deutschen Gewässern führte und unter anderem ein wertvolles Habitat für Großalgen und Hummer darstellt.

Aus hydrographischer Sicht stellt Deutschlands einzige Hochseeinsel eine wahre Herausforderung dar: flaches Wasser, unbekannte Untiefen und Felsvorsprünge, starke Gezeitenströme und ein raues, sich ständig wechselndes Wellenbild machen

Vermessungsarbeiten außerordentlich anspruchsvoll. Besonders kritisch ist hierbei das sogenannte »Weiße Band« der Küstenkartierung – eine ultraflache Übergangszone (ca. 1 bis 6 Meter Wassertiefe). Dieser Bereich ist für die meisten Vermessungs- und Forschungsschiffe nicht sicher befahrbar und bleibt optischen Fernerkundungsmethoden aufgrund der Trübung und des Bewuchses vor Helgoland weitgehend verborgen. Um die Kartierungslücken innerhalb dieses Bereiches zu schließen, führte unsere Arbeitsgruppe »Marine Geophysik und Hydroakustik« an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel (CAU) in den vergangenen Jahren intensive Kartierungen mit *FK Littorina* und *FB Zostera* durch. Diese Arbeiten wurden unlängst durch die Initiative des Aktionsprogramms Natürlicher Klimaschutz (ANK) weiter gefördert. Unser Ziel ist ein lückenloses, nahtloses Modell des Meeresbodens des gesamten Helgoländer Felssockels. Dafür kooperieren wir eng mit dem Bundesamt

für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), das die tieferen Bereiche mit dem Vermessungsschiff *Wega* abdeckt, sowie mit dem Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein (LKN.SH), der topobathymetrische LiDAR-Daten beisteuert (Abb. 1).

Methodik und nautische Herausforderungen im Ultraflachwasser

Für die Vermessung der extrem flachen Bereiche setzen wir unser spezialisiertes Küstenforschungsboot *FB Zostera* ein. Das Boot ist mit einem Norbit iWBMS-Fächerecholot (MBES) sowie dem Applix-INS Wavemaster II ausgestattet. Die Positionierung und Höhenbestimmung erfolgen mit Zentimetergenauigkeit mittels RTK-Korrekturdaten (dank der Unterstützung durch die AXIO-NET GmbH). Parallel betreiben wir ein parametrisches Sedimentecholot (Innomar smart), welches über eine eigens entwickelte Trigger-Box mit dem MBES synchronisiert im Master-Slave-Betrieb arbeitet, um akustische Interferenzen zu vermeiden.

Die Vermessung verlangt dem Team (Abb. 2) und dem Material alles ab: Die exponierte Lage in der Deutschen Bucht führt zu teils erheblichem Wellengang, der unser kleines, nur 7 Meter langes Flachwasserboot (Abb. 2) mitunter an seine nautischen Grenzen bringt. Aufgrund der komplexen Bathymetrie navigieren wir bei der Datenerfassung mit einer schlanken Echtzeit-Visualisierung (Norbits DCT) auf hellen, großen Monitoren – dies ist für die Sicherheit in den teils unkartierten Gebieten überaus wichtig.

Hinzu kommt eine äußerst komplexe Ozeanografie, welche die Datenqualität maßgeblich beeinflusst: rund um Helgoland treffen drei verschiedene Wasserkörper aufeinander, die mit den Gezeiten stark verlagert werden. In den morphologischen Senken zwischen den aufragenden Felsrücken bilden sich oftmals abgeschlossene, stagnierende Wassermassen mit abweichender Dichte. Dies führt zu erheblichen räumlichen und zeitlichen Schwankungen der Schallgeschwindigkeit in der Wassersäule. Zur Minimierung der daraus resultierenden Refraktionsfehler erfassen wir jede Stunde mehrere Schallgeschwindigkeitsprofile mit einer AML Minos-X-Sonde. Die MBES-Auswertung einschließlich Raytracing-Korrektur, Patch-Test, automatischer und manueller Filterung und Tiefenbeschickung mittels RTK auf das Mean Sea Level (MSL) unter Verwendung des GCG2016-Modells erfolgte in QPS Qimera. Die bereinigten MBES-Daten passen sich gut in die umgebenden LiDAR-Daten des LKN.SH ein (Abb. 3). Um die Backscatter-Signale bestmöglich auswerten zu können, wurden die Daten gemäß den Empfehlungen der Backscattering Working Group (BSWG) mit konstanter Sendeleistung aufgenommen (Lamarche und Lurton 2018).

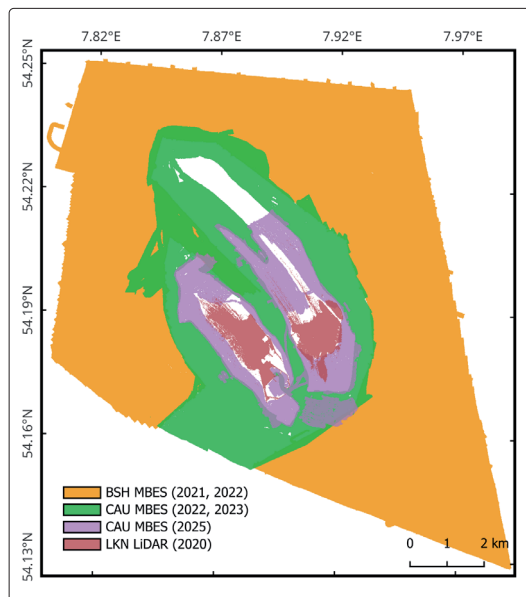


Abb. 1: Übersichtskarte der Datenfusion am Helgoländer Felssockel. Dargestellt ist die räumliche Abdeckung der verschiedenen Vermessungskampagnen. Die nahtlose Karte setzt sich aus hochauflösenden Fächerecholotdaten der CAU Kiel für das Flachwasser, den tieferen Messungen des BSH (*Wega*) sowie den topobathymetrischen LiDAR-Daten des LKN.SH zusammen

Geologische Strukturen in neuer Dimension

Während sich die großräumige Geologie des Helgoländer Felssockels mittels der vom BSH erstellten Rasterauflösung von 10 Metern erahnen lässt, bleibt die feinskalige Morphologie im Meter- und



Abb. 2: Im Einsatz auf Helgoland. Das Team der Arbeitsgruppe Marine Geophysik und Hydroakustik (CAU Kiel) und des AWI Sylt im Hafenbecken. Das wendige und nur 7 Meter lange Forschungsboot *FB Zostera* wurde speziell für die hydroakustische Vermessung von extremen Flachwasserzonen umgebaut und ausgerüstet

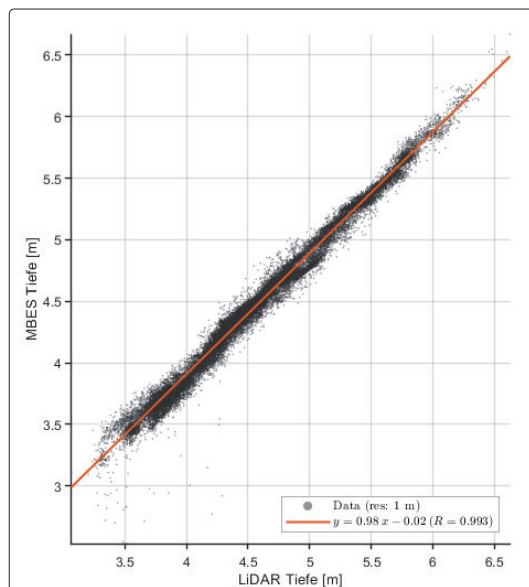


Abb. 3: Datenvalidierung durch Korrelationsplot. Gezeigt ist der direkte statistische Vergleich der im ultraflachen Bereich durch das *FB Zostera* erhobenen bathymetrischen Daten mit den überlappenden LiDAR-Daten. Der Plot demonstriert die exakte Einpassung und die hohe Konsistenz der unterschiedlichen Messverfahren in der Übergangszone, was durch eine hervorragende statistische Korrelation von $R = 0,993$ bestätigt wird

Dezimeterbereich nur unzureichend abgebildet. Mit unseren neuen Daten können wir Grids mit einer Auflösung von $0,5 \times 0,5$ Metern generieren, erst hierdurch werden wahre geologische und tektonische Vorgänge sichtbar.

Wie in Abb. 4 zu erkennen ist, lassen sich an den anstehenden Felsformationen tektonische Verwerfungen, geologisches Schichteinfallen und Streichen, oder verschiedene Erosionsmuster quantitativ messen. Dies ist ein fundamentaler Schritt für die zukünftige geologische 3D-Rekonstruktion des gesamten Helgoländer Komplexes.

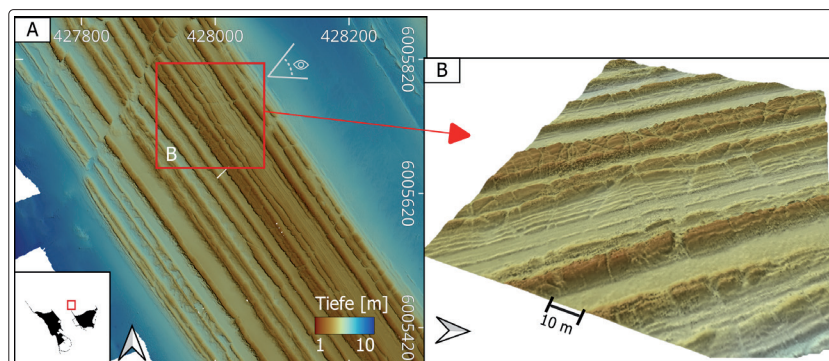


Abb. 4: Bathymetrische Darstellung des geologischen Muschelkalk-Aufschlusses. Das extrem feine Raster macht komplexe Bruchzonen sichtbar. Hier lässt sich das geologische Schichteinfallen und Streichen tatsächlich exakt messen. Dies ist ein fundamentaler Schritt für die zukünftige geologische 3D-Rekonstruktion des gesamten Untergrunds

Vom Tiefenwert zum Prädiktor: Mikrobathymetrie als Basis der Habitatmodellierung

Für viele Hydrographen und Geowissenschaftler stellt das bathymetrische Raster das klassische Endprodukt dar. In der modernen marinen Ökologie ist es jedoch eher der Anfang, und in den letzten 15 Jahren wurde das große Potenzial hydrographischer Messungen für die benthische Lebensraumuntersuchung und Modellierung erkannt (Brown et al. 2011). Fächerecholote setzen sich hier immer mehr durch als das Mittel der Wahl gegenüber herkömmlichen Seitensichtsonaraufnahmen (Misiuk und Brown 2024). Allerdings, wenn das Basis-Grid zu grob ist (wie bei den historischen 10-Meter-Rastern), liefern auch die daraus abgeleiteten morphometrischen Parameter – die sogenannten Prädiktoren – falsifizierte oder unbrauchbare Werte für die Habitatmodellierung.

Mit unseren neuen, ultrahochauflösenden Datensätzen können wir diese essenziellen Prädiktoren nun quantitativ exakt berechnen. Zu den wichtigsten aus der Bathymetrie abgeleiteten Parametern für maschinelle Lernverfahren zählen die Hangneigung (Slope), die Exponierung (Aspect) sowie die Rauigkeit (Terrain Ruggedness Index – TRI). Die Exponierung steuert maßgeblich den Einfluss von Strömungs- und Wellenenergie. Wo exakt die verschiedenen benthischen Lebensformen bevorzugt siedeln, ist Gegenstand aktueller Untersuchungen, und wir erachten die Ergebnisse als überaus zielfördernd für eine verbesserte Modellierung der benthischen Arten (Schubert et al. 2016). Die Rauigkeit (TRI) quantifiziert die lokale topografische Heterogenität und ist bei Helgoland ein exzellenter Indikator für freiliegendes Felsgestein (Jensen 2024). Gleichzeitig liefert sie entscheidende Hinweise auf Mikronischen, auf die beispielsweise juvenile Hummer angewiesen sind, und kann hiermit hilfreich sein für optimierte Wiederansiedlungsmaßnahmen für den Hummer. Ergänzt wird dies durch den Benthischen Lageindex (BPI), der Kuppen und Senken identifiziert. Neben der akustischen Rückstreustärke gehören gerade diese bathymetrischen Ableitungen zu den stärksten Prädiktoren überhaupt, um benthische Habitate verlässlich vorherzusagen.

Snippet Backscatter: Ein neuer Blick auf den Meeresboden

Für eine detaillierte geologische und biologische Habitatkartierung ist das Rückstreusignal (Backscatter) von unschätzbarem Wert, da wir auf eine Differenzierung von Hartsubstrat und Weichsediment angewiesen sind. Hierzu wurden die Daten in QPS FMGT radiometrisch und geometrisch korrigiert; eine sogenannte Beam-Pattern-Korrektur und Harmonisierung des Backscatter zwischen dem vom BSH aufgezeichneten

(Kongsberg) und den unsrigen (Norbit) Backscatter-Werten steht noch aus. Im Gegensatz zur reinen bathymetrischen Aufnahme mit einem Wert des Bodenfinders pro Beam, liefert die Snippet-Technologie eine Zeitreihe des Echos für jeden einzelnen Beam, wodurch sich side-scan-ähnliche Mosaiken mit einer räumlichen Auflösung von nur $0,1 \times 0,1$ Metern erzeugen lassen (Abb. 5).

Für eine physikalisch korrekte Klassifizierung muss der Backscatter vor Helgoland zwingend hinsichtlich des wahren Einfallswinkels unter Einbezug des detailreichen digitalen Geländemodells (DEM) korrigiert werden. Andernfalls wird die Rückstreustärke fälschlicherweise durch die Hangneigung und nicht durch die substratspezifischen Eigenschaften dominiert.

Die Herausforderung: Optische Limits, Kelpwälder und direkter Nachweis

Helgoland ist berühmt für seine dichten Unterwasserwälder aus Großalgen (Kelp), insbesondere dem Palmentang (*Laminaria hyperborea*). Was ökologisch von hohem Wert ist, erschwert die hydrographische Vermessung ungemein. Besonders deutlich wird dies bei dem Versuch, das Flachwasser mittels flugzeuggestützter optischer Methoden zu erfassen. Die Auswertung der topobathymetrischen LiDAR-Daten (Riegl VQ 820) des LKN.SH offenbarte eine maximale Eindringtiefe von wenigen Metern unter dem mittleren Meeresspiegel. Während über hellen, sandigen Sedimenten (vereinzelt bis zu maximal 6 Metern) noch optische Bodenechos registriert wurden, versagte das System über den bewachsenen Felsriffen nahezu vollständig. Da Großalgen in dichten, mehrstöckigen »Wäldern« wachsen, ist die kumulative Lichtabsorption entsprechend groß; inwieweit eine Full-Waveform-Analyse Abhilfe schaffen kann, soll zukünftig untersucht werden. Insgesamt wachsen vor Helgoland über 250 verschiedene Algenarten, optische Verfahren stoßen vor Helgoland hierdurch an physikalische Grenzen, weshalb wir das Gebiet mühsam akustisch mit der *Zostera* abfahren und vermessen mussten.

Das dichte Blätterdach des Palmentangs (*Laminaria hyperborea*) in der Wassersäule erzeugt auch bei Fächerecholotaufnahmen erhebliche akustische Störsignale, was die hydrographische Bestimmung des wahren Meeresbodens in hohem Maße erschwert: das resultierende Problem ist, dass der Bodenfindungsalgorithmus des Fächerecholots oft fälschlicherweise Missdetektionen an der Oberkante des Kelpwaldes durchführt, was eine manuelle Bereinigung der Echos erfordert (Abb. 6).

Diese Problematik lässt sich jedoch durch die Einbindung unserer synchronisierten Innomar-Messungen wirkungsvoll adressieren. Das parametrische Sub-Bottom-Profiler-System emittiert hochfrequente Primärsignale (100 kHz), aus denen

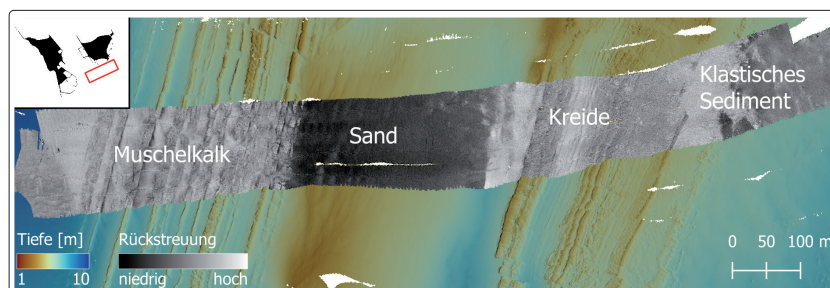


Abb. 5: Hochauflösender MBES-Snippet-Backscatter ($0,1 \times 0,1$ Meter), aufliegend auf der Bathymetrie südlich der Helgoländer Düne. Anhand der Rückstreustärke lassen sich die unterschiedlichen geologischen Formationen (Muschelkalk, Kreide, Sedimente), die Späth (1990) nach intensiven Taucharbeiten und nach Luftbildauswertung identifizierte, rein akustisch klar erkennen und zentimetergenau auskartieren. Erwähnenswert ist hierbei, dass das massive Festgestein oft eine geringere Rückstreuerung zeigt im Vergleich zum umliegenden klastischen Sediment, welches im Verhältnis zur akustischen Wellenlänge bei 400 kHz eine höhere Mikrorauigkeit aufweist

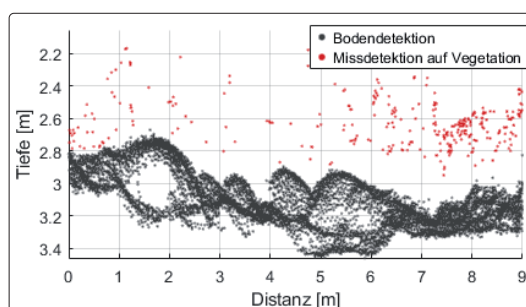


Abb. 6: Detektionen des Bodenfindungsalgorithmus des Fächerecholots (MBES) in Wassertiefen <4 Metern, aggregiert über 30 Pings. In vegetationsbedeckten Bereichen kommt es systematisch zu Fehlidentifikationen des Vegetationsdachs als Meeresboden

im Wasserkörper eine niederfrequente Differenzfrequenz (10 kHz) mit sehr schmalen Abstrahlwinkel erzeugt wird. Der resultierende Schallstrahl durchdringt das Blätterdach: im Echogramm zeichnet sich der wahre, harte Meeresboden als klarer Reflektor deutlich unterhalb der diffusen Vegetationsschicht ab (Abb. 7). Auf diese Weise wird nicht nur die zuverlässige Bodendetektion im dicht bewachsenen Flachwasser gewährleistet, aus der Differenz zwischen Boden und Oberkante der Vegetation lässt sich zudem die Bewuchshöhe der Pflanzen präzise bestimmen. Der direkte Nachweis dieser Volumenstrukturen in der Wassersäule mit Unterwasserkameraaufnahmen des Kelp durch das Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume (LLUR) und der Tauchfirma Submaris dient fortan als hervorragende, flächendeckende Ground-Truthing-Grundlage für unsere Vorhersagemodelle im Rahmen des ANK-Projekts LABLUC, um die gesamte Biomasse und das CO_2 -Einlagerungspotenzial bewerten zu können.

Darüber hinaus deuten unsere akustischen Untersuchungen darauf hin, dass sich bisher kartierte Großalgenarten wie *Laminaria hyperborea*, *Saccharina latissima* und *Desmarestia aculeata* künftig

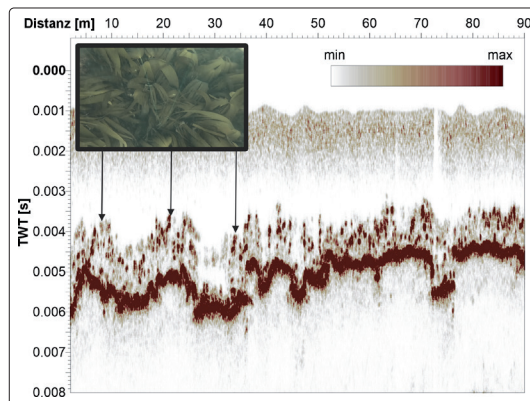


Abb. 7: Echogramm der hochfrequenten Komponente des Innomar-Systems (Darstellung des Amplitudenbetrags).

Der harte Buntsandstein tritt als klar definierter, kontinuierlicher Reflektor deutlich unterhalb der diffusen Vegetationsschicht hervor. Die eindeutige Trennung beider Signalanteile ermöglicht eine zuverlässige Bodendetektion im dicht bewachsenen Flachwasser sowie die präzise Bestimmung der Bewuchshöhe aus der Differenz zwischen Bodenreflektor und Vegetationsoberkante

möglicherweise rein akustisch voneinander differenzieren lassen. Um dieses enorme Potenzial für die Habitatkartierung zu erschließen, wird zukünftig im Rahmen einer Doktorarbeit eine detaillierte Full-Waveform-Analyse der akustischen Rückstreudaten durchgeführt. Hierbei werden charakteristische Parameter der Echo-Einhüllenden und der gesamten Wellenform untersucht, um verlässliche, artspezifische akustische Signaturen abzuleiten.

Schnittstelle zur Unterwasserarchäologie: Zufallsfunde im Sonar

Die hohe räumliche Auflösung unserer Kartierungen schlägt eine direkte Brücke zum Schwerpunktthema dieser HN-Ausgabe: der Unterwasserarchäologie. Wenn der Meeresboden mit Auflösungen im Dezimeterbereich vermessen wird, treten unweigerlich Strukturen zutage, die nicht-geologischen Ursprungs sind. Im Rahmen unserer Arbeiten kooperieren wir eng mit der For-

schungstaucher-Firma Submaris. Das Team von Submaris betachtet Helgoland seit über zehn Jahren, primär im Kontext des optischen Monitorings der Algenwälder. Dabei gelangen bereits spektakuläre Funde, darunter historische englische Kanonen (Abb. 8) sowie die Bergung einer U-Boot-Netzsäge aus dem Ersten Weltkrieg (Huber 2020).

Diese Funde zeigen das enorme Potenzial moderner Hydrographie für den Denkmalschutz auf. Solche archäologischen Verdachtsstellen und die Methodik zu ihrer Detektion in komplexen geologischen Umgebungen sind mittlerweile Gegenstand aktueller Forschungen, unter anderem im Rahmen des laufenden SEASCAPE-Projekts.

Fazit

Die Bündelung moderner hochauflösender hydroakustischer Technologie auf kleinen, flexibel einsetzbaren Plattformen wie dem *FB Zostera*, ergänzt durch Datensätze staatlicher Institutionen (BSH, LKN.SH, LLUR), ermöglicht es uns heute, das bislang nur fragmentarisch erfasste »Weiße Band« der Küste hochauflösend zu schließen – nicht nur aus hydrographischer, sondern auch aus der geökologischen Perspektive. Die daraus abgeleiteten Datenprodukte (von präziser Bathymetrie, über Wassersäulenanalysen bis hin zu Snippet-Backscatter und Meeresbodenklassifikation) sind nicht nur der Schlüssel für ein modernes geologisches Verständnis und den Schutz mariner Ökosysteme, sondern eröffnen uns auch völlig neue Einblicke in unser maritimes kulturelles Erbe. //

Literatur

- Brown, Craig J.; Stephen J. Smith; Peter Lawton; John T. Anderson (2011): Benthic Habitat Mapping: A Review of Progress Towards Improved Understanding of the Spatial Ecology of the Seafloor Using Acoustic Techniques. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, DOI:10.1016/j.ecss.2011.02.007
- Huber, Florian (2020): UC 71 – Archäologie und Geschichte eines deutschen U-Boots, *Historische Archäologie*, Sonderband 2020, S. 161–178
- Jensen, Merve (2024): Acoustic multibeam and topo bathymetric LiDAR analyses of Germany's complex underwater landscape around Heligoland (North Sea). Master thesis, CAU
- Lamarche, Geoffroy; Xavier Lurton (2018): Recommendations for improved and coherent acquisition and processing of backscatter data from seafloor-mapping sonars. *Marine Geophysical Research*, DOI: 10.1007/s11001-017-9315-6
- Misiuk, Ben; Craig Brown (2024): Benthic habitat mapping: A review of three decades of mapping biological patterns on the seafloor. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, DOI: 10.1016/j.ecss.2023.108599
- Schubert, Philipp; Jens Wein; Inka Bartsch (2016): Kartierung und Modellierung der Braunalgenbestände um Helgoland im Sommer 2015. Endbericht SUBMARIS (im Auftrag des LLUR
- Späth, Christian (1990): Zur Geologie der Insel Helgoland. *Die Küste*, Nr. 49, S. 1–32

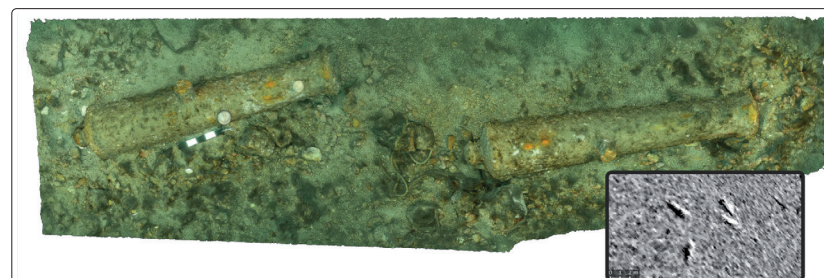


Abb. 8: Photogrammetrische Aufnahme einer englischen Kanone am Meeresboden. Der Referenzstab misst 0,5 Meter Länge. Die visuelle Dokumentation solcher Funde erfolgte durch die Forschungstaucher. Mit Hilfe unserer neuen hochauflösenden MBES-Snippet-Backscatter- und Bathymetriedaten (Inset) konnten solche morphologischen Anomalien identifiziert werden, was bei gezielten Tauchgängen zur Entdeckung von sechs weiteren, bisher völlig unbekannten Kanonen führte.

Dr. Florian Huber (Submaris)