

Hydroakustische Methoden. Möglichkeiten und Grenzen zur Langzeitüberwachung archäologischer Denkmale im Flachwasser

Martin Wessels, Flavio Anselmetti, Martin Mainberger und Michael Hilbe¹

Gewidmet Prof. Dr. Ing. Volker Böder, HafenCity Universität Hamburg, Professor für Geodäsie und Hydrographie, der bei Forschungsarbeiten am 1. Sept. 2012 im Rhein bei Basel tragisch verunglückte. Wir werden seine offene, herzliche und zuvorkommende Art sehr vermissen.

Hydroakustische Methoden werden oft zur Vermessung von archäologischen Fundstellen und zur Objektsuche in der Flachwasserzone von Seen und Flüssen eingesetzt. In diesem Beitrag werden die technischen Grundlagen hydroakustischer Messverfahren erläutert und eine kurze Beschreibung üblicherweise eingesetzter Messgeräte gegeben. Anschließend zeigen wir Beispiele von Vermessungen mit unterschiedlichen Singlebeam-Echoloten, Multibeam-Echoloten, einem Sidescan-Sonar und einem Interferometrischen Sonar. Mit den Arbeiten aus dem Bodensee, Zürichsee und dem Vierwaldstättersee werden die Möglichkeiten und Grenzen der Hydroakustik in der Binnengewässerarchäologie erläutert.

Hydroacoustic methods are often used for surveying archaeological sites and for searching for objects in the shallow water zones of rivers and lakes. In this article, we explain the technical basis of hydroacoustic methods and describe instruments which are frequently used. Afterwards we present examples of surveys using different singlebeam echosounders, multibeam echosounders, a sidescan sonar and an interferometric sonar. With examples from Lake Constance, Lake Zurich and Lake Lucerne, we exemplify the possibilities and limitations of hydroacoustic methods in freshwater archaeology.

Einleitung

Zur Untersuchung archäologischer Fundstellen gehört stets eine exakte räumliche Zuordnung im Gelände. Unterwasserfundstellen stellen in dieser Hinsicht besondere Herausforderungen dar, gerade auch in sehr seichtem Wasser. Flachwasserzonen unterliegen einer hohen Dynamik: zahlreiche Faktoren wie wechselnde Wasserstände, Wellen von Schiffen oder von Starkwindereignissen, lokale Strömungsmuster und Uferverbau führen zur Bewegung von Seebodenmaterial. Wesentlich für Richtung und Umfang dieser Sedimentumlagerungen sind neben der Exposition gegenüber den einwirkenden Kräften die aktuelle großräumige und kleinräumige Geländeform, z.B. die Breite der Flachwasserzone, einzelne Strukturen wie Erhebungen, Art und Umfang von

Makrophytenbeständen, die großräumige Situation (verbautes Ufer, Nähe zu Flussmündungen etc.) und das Substrat an sich (Korngröße, Kompaktion). Archäologische Denkmale selbst sind ebenfalls Strukturen, die durch Erosion freigelegt werden können und an denen es dann zu Schäden durch mikrobielle Zersetzung organischer Substanz und mechanische Zerstörung kommt. Da die einwirkenden Kräfte (vor allem Wind und Schiffswellen) mit hohen Amplituden aus unterschiedlichen Richtungen wirken können, werden in der Summe zahlreiche hochdynamische, sich überschneidende und mit Rückkopplungseffekten verbundene Mechanismen wirksam, deren Beitrag im Einzelnen kaum quantifizierbar und noch weniger zu prognostizieren ist.

Geländeaufnahmen in der Flachwasserzone haben darum im Vergleich mit terrestrischen Aufnahmen oder Vermessungen in tiefem Wasser in der Regel nur eine zeitlich begrenzte Gültigkeit. Andererseits lassen sich mit hydroakustischen Methoden vergleichsweise schnell große Gebiete kartieren und der aktuelle Zustand dokumentieren. Durch Wiederholungsmessungen lassen sich frühzeitig Veränderungen im Gefährdungspotential einer Fundstelle zeigen.

Mit diesem Beitrag möchten wir darum die Grundlagen und Möglichkeiten von hydroakustischen Verfahren zur Beschreibung von archäologischen Fundstellen in der Flachwasserzone beleuchten. Nach einer kurzen Einführung in die technischen Grundlagen werden verschiedene verwendete Systeme vorgestellt. Zu den einzelnen Verfahren gibt es jeweils Beispiele, an denen Stärken und Schwächen und auch Grenzen der Methoden gezeigt werden, um die Aussagekraft von Tiefenvermessungen bewerten zu können.

Grundlagen

In diesem Abschnitt sollen kurz die physikalischen Grundlagen der hydroakustischen Messverfahren genannt werden. Für eine intensivere Auseinandersetzung verweisen wir auf die einschlägige grundlegende Fachliteratur, z.B. IHO (2005) oder auch die sehr umfassende Zusammenstellung sämtlicher hydrographischer Arbeiten (s. dazu auch Abb. 1) des

¹ Anschrift der Verfasser: Martin Wessels, Dr., Institut für Seenforschung der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Argenweg 50/1, 88085 Langenargen, Deutschland, Martin.Wessels@lubw.bwl.de; Flavio Anselmetti, Dr., Prof., Institute of Geological Sciences, University of Bern, Baltzerstraße 1+3, 3012 Bern, Schweiz, flavio.anselmetti@geo.unibe.ch; Michael Hilbe, EAWAG, Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz, Überlandstraße 133, 8600 Dübendorf, Schweiz, michael.hilbe@eawag.ch; Martin Mainberger, Dr., Ballrechterstr. 3, 79219 Stautfen, Deutschland, martin.mainberger@uwar.de

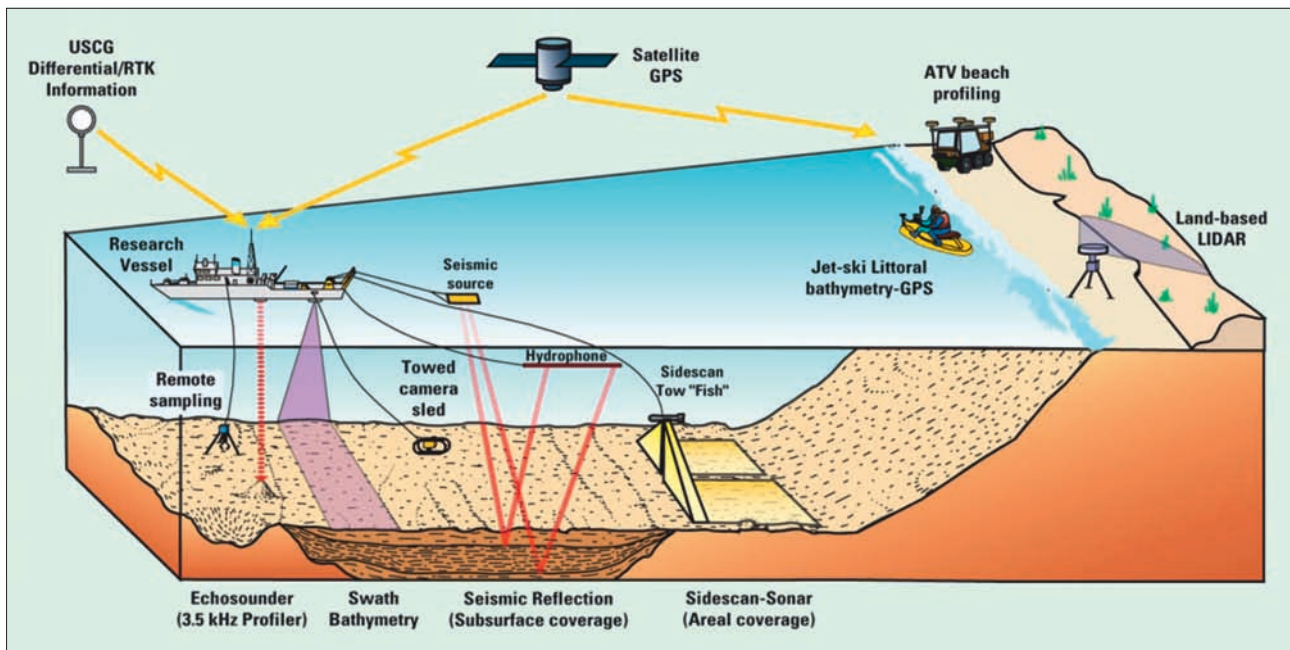


Abb. 1: Das Diagramm des US Geological Survey zeigt beispielhaft eine ganze Anzahl hydroakustischer Geräte im Einsatz.

US Army Corps of Engineers (2002). Einen übersichtlicheren Eindruck der vollen Komplexität einer professionellen hydrographischen Datenerfassung und -verarbeitung kann man auch dem Beitrag von Cronin et al. (2003) entnehmen. Wir beschränken uns auf Methoden zur Tiefenvermessung (im wesentlichen Echolot), da andere präzise Methoden nur sehr grob auflösende Geländemodelle liefern (z.B. Messungen von Einzelpunkten mit RTK-GPS oder Tachymetern). Andere Verfahren, z.B. flugzeuggestütztes Unterwasser-LIDAR oder Multispektralaufnahmen, liefern zwar flächendeckend und schnell große Datensätze, sind aber nach unserer Ansicht für die meisten archäologischen Fragestellungen bisher zu ungenau.

Hydroakustische Verfahren nutzen das Prinzip der Laufzeitmessung. Von einem Schallwandler (»transducer«) wird ein Schallsignal ausgesendet, durchläuft die Wassersäule und wird von Objekten in der Wassersäule und am Gewässerboden reflektiert. Das Echo wird mit dem Empfänger detektiert und die Laufzeit zwischen Aussenden und Empfang des Signals bestimmt. Aus der Laufzeit und der Schallgeschwindigkeit lässt sich der Abstand zwischen Objekt und Schallquelle und damit die Wassertiefe bestimmen.

Der bestimmende Parameter zur Laufzeitmessung ist die Schallgeschwindigkeit im Wasser, die wiederum von Salzgehalt, Temperatur und der Signaldämpfung in der Wassersäule abhängt. Für genaue Messungen müssen deshalb vor allem die Salinität und das Temperaturprofil bekannt sein, um die Laufzeiten zu korrigieren. In die Bediensoftware für höherwertige Geräte lassen sich entsprechende Schallgeschwindigkeitsprofile einlesen.

Neben den akustischen Eigenschaften der Wassersäule ist die Frequenz bzw. Wellenlänge der verwendeten Schallquelle wichtig. Niederfrequente Signale mit wenigen kHz (und Wellenlängen im Dezimeterbereich) haben eine hohe

Reichweite und wenig Auflösung, wogegen hochfrequente Signale von mehreren 100 kHz in der Reichweite reduziert sind, aber eine Auflösung von unter einem Zentimeter liefern. Das Signal wird je nach Einsatzzweck des Gerätes mit einer bestimmten Form ausgesendet: hydrographische Echolote haben in der Regel einen relativ engen Öffnungswinkel ($<10^\circ$) und eine Kegelform (»Schallkeule«) und sind senkrecht zum Gewässerboden gerichtet; Sidescan-Systeme senden ein scheibenförmiges Signal im rechten Winkel zum gefahrenen Kurs aus, um Objekte in der gesamten Wassersäule und am Gewässerboden abzubilden. Neben der Geometrie des erzeugten Schallsignals bestimmt auch die Form der einzelnen Signale das Ergebnis. Ein klar definiertes Signal mit klarem Anfang und Ende (rechteckiger Signalverlauf) lässt sich besser auswerten als ein Signal mit sinusförmigem Verlauf.

Da das Schallsignal eine bestimmte Geometrie (Öffnungswinkel, Nebenkeulen) besitzt und sich nicht wie ein Lichtstrahl ausbreitet, kann das vom Gewässerboden reflektierte Echo stark verändert werden. Aus einem gut definierten Anregungssignal kann so, je nach Form der Schallkeule, der Bodentopographie und den akustischen Eigenschaften des Gewässerbodens ein stark verändertes Signal am Empfänger ankommen, aus dem die Wassertiefe digitalisiert wird. Hierbei können Fehler auftreten, so dass besonders bei steiler Topographie, größerer Wassertiefe und Systemen mit großem Öffnungswinkel größere Areale zur Echoerzeugung beitragen. Die Tiefe kann dann von einem nicht zentral unter dem transducer liegenden Echo digitalisiert werden und zu einer korrekten Position eine falsche Tiefe erzeugen.

Neben der Laufzeit und den geometrischen Zusammenhängen zwischen Boot, Schallwandler und Bodenmorphologie liefert die empfangene Signalstärke wichtige Informationen über den Untergrund. Sind die akustischen

Eigenschaften im Vergleich mit Wasser sehr verschiedenen (z.B. Fels, Steine, Sand, Luftblasen in Makrophytenbewuchs), sind die Echos sehr stark, wogegen weiche, wassergesättigte Ablagerungen ein schwaches Echo erzeugen. Moderne Geräte und Auswerteverfahren versuchen, diese Informationen zur flächendeckenden Bodenklassifizierung auszuwerten, was je nach Randbedingungen mehr oder weniger gut gelingt.

Nicht zuletzt besitzen alle akustischen Systeme eine gewisse »Totzeit«: nachdem das Signal ausgesendet wurde, verstreicht eine minimale Zeit, bevor ein Echo empfangen werden kann. Hierdurch wird die minimale detektierbare Wassertiefe begrenzt. Allen Geräten ist zudem gemeinsam, dass ihre Information mit dynamischen Ortungssensoren (in der Regel GPS) verknüpft werden muss, um die Tiefeninformation mit einer Position zu verknüpfen. Zudem verändern Schiffsbewegungen die Geometrie zwischen Schallwandler und Gewässerboden und damit die Laufzeit und Signalform, so dass hierfür eigene Bewegungssensoren verwendet werden, um die Messdaten zu korrigieren.

Da die Laufzeitmessung so vielfältigen Einflüssen unterliegt, dürfte nachvollziehbar sein, dass die von den Herstellern angegebenen Genauigkeiten in der Regel nur unter Laborbedingungen eingehalten werden können. Insgesamt hängt der Aufwand aber wesentlich von dem gewünschten Ergebnis ab: ein grobes Geländemodell mit mehreren Metern Maschenweite erfordert deutlich weniger Aufwand und Genauigkeit als das Erkennen feiner Strukturen in der Größenordnung von Dezimetern.

Verwendete Geräte

Grundlegend lassen sich mehrere Gerätetypen zur Kartierung von Sedimentoberflächen unterscheiden. Echolote produzieren Lage und Höhenkoordinaten, mit denen Geländemodelle hergestellt werden können. Sidescan-Sonare erfassen keine direkte Tiefeninformation, sondern erzeugen ein akustisches Abbild des Seebodens und der Wassersäule, auf dem Objekte erkannt werden können. Interferometrische Sonare erzeugen wie Sidescan-Sonare zur Seite gerichtete Signale, interpretieren aus den Echos aber zusätzlich die Wassertiefe. Mit Verfahren der Sedimentechographie (»Reflexionseismik«) schließlich, die aber in diesem Beitrag nicht ausführlicher beschrieben werden, werden Informationen von Strukturen im Untergrund gewonnen.

Singlebeam-Echolot

Echolote sind die am weitesten verbreiteten Geräte und gewinnen Informationen aus der Wassersäule oder vom Seeboden lediglich unmittelbar unter dem Sender. Einfache Geräte werden häufig im Freizeitbereich eingesetzt, genügen aber nicht den Anforderungen für einigermaßen genaue und verlässliche Tiefeninformationen. Hydrographische Echolote zur professionellen Seegrundvermessung arbeiten häufig mit zwei Frequenzen, um je nach Bodentyp verlässliche Tiefeninformationen zu gewinnen.

In einer Variante lassen sich von einer Prozessoreinheit mehrere, versetzt angebrachte Schallwandler ansteuern, die in rechtem Winkel zur Fahrtrichtung Messwerte registrieren. Je nach Möglichkeiten des Erfassungssystems müssen dabei Multiplexer eingesetzt werden, welche die einzelnen Schwinger einzeln ansteuern. So werden praktisch mehrere Singlebeam-Echolote gleichzeitig betrieben und der Nachteil der wenigen Daten entlang der Profile verringert. Diese auch konstruktiv aufwändige Lösung haben wir nicht getestet.

Multibeam-Echolot

Bei modernen Fächerecholoten werden gleichzeitig bis zu mehrere Hundert Signale ausgesendet und die dazugehörigen Tiefeninformationen verarbeitet. Die Schallsignale sind fächerartig angeordnet und überstreichen am Gewässerboden einen Streifen in rechtem Winkel zur Fahrtrichtung. Es gibt Lote mit fester Geometrie der Piezoelemente zur Schallerzeugung sowie Systeme, bei denen die einzelnen Strahlen (»Beams«) dynamisch gesteuert werden, um beispielsweise Schiffsbewegungen auszugleichen. Über die Bediensoftware können gegebenenfalls einzelne, randliche Signale weggefiltert werden oder z.B. äquidistante Echos vom Seeboden generiert werden. Die einzelnen Beams haben üblicherweise einen sehr kleinen Öffnungswinkel von 1–2°, so dass nur eine kleine Fläche des Gewässerbodens zum Echo beiträgt. Die Fächeröffnung kann bis über 140° betragen, sodass ein sehr großer Bereich abgedeckt wird. Bei ebenem Seeboden treffen die äußeren Beams aber in sehr flachem Winkel auf den Seeboden, so dass das Signal-Rausch-Verhältnis wesentlich verschlechtert wird und die Qualität der Messungen erheblich leidet.

Zwingend für die Vermessung mit Fächerecholoten ist die Verwendung einer präzisen Positionierung (RTK-GPS) in Verbindung mit einem genauen Richtungssignal (Kreiselkompass oder GPS-Kompass), einem Bewegungssensor und einer präzisen Zeitsynchronisation aller Geräte.

Üblicherweise beträgt die Überdeckung ein Mehrfaches der Wassertiefe, so dass bei der Befahrung in einem Meter Wassertiefe realistisch sämtliche Signale in einem 2–4 m breiten Streifen liegen. Man wird damit gezwungen, für eine flächendeckende Vermessung entsprechend viele Profile bei sehr geringer Wassertiefe und hohem Nervenkitzel für die Besatzung zu fahren. Bei solch geringen Wassertiefen werden bis zu 800 Beams mit maximal 50 Hertz generiert, also 40.000 Tiefenwerte/Sekunde produziert, so dass schnell sehr große Datensätze entstehen, die entsprechend aufwändig zu prozessieren sind. Der Vorteil ist, dass sich Geländemodelle mit entsprechend hoher Auflösung anfertigen lassen.

Alternativ zu einem senkrecht montierten Schallwandler besteht die Möglichkeit, den *transducer* schräg zu montieren, um einen größeren Überdeckung (*swath*) zu erreichen. Das muss jedoch zwangsweise mit einem flacheren Winkel zur Sedimentoberfläche, einem schlechten Signal-Rausch-Verhältnis und damit reduzierter Genauigkeit erkauft werden. Die ebenfalls mögliche Verwendung eines Doppelschwingersystems haben wir nicht getestet.

Sidescan-Sonar

Mit dem Sidescan-Sonar werden Strukturen am Seeboden und in der Wassersäule erfasst und kartiert. Im Gegensatz zu den Echoloten werden mit einem Sidescan-Sonar primär keine Tiefenwerte erzeugt, sondern es werden mit dem scharf gebündelten Signal Oberflächen abgetastet und Strukturen erfasst. Die *transducer* sind seitlich an einem »Fisch« montiert und bilden die gesamte Ebene in rechtem Winkel zur Fahrtrichtung von der Wasseroberfläche bis zum weit entfernten Seeboden ab. Der Fisch selbst kann in flachem Wasser am Schiff fest montiert sein oder (in tiefem Wasser) an einem Kabel geschleppt werden. Da Signalerfassung und Darstellung laufzeitabhängig sind, können zeitgleiche Echos aus der Wassersäule und vom Seeboden vom *transducer* erfasst und ausgewertet werden, wofür aber einige Erfahrung bei der Interpretation der Bilder notwendig ist. Üblicherweise arbeitet man mit hohen Frequenzen (ab 300 kHz) und *ranges* von 50 m bzw. 75 m. Bei einer Schiffsgeschwindigkeit von 4–5 km/h lassen sich so, verglichen mit anderen Methoden, sehr große Gebiete in kurzer Zeit untersuchen.

Interferometrisches Sonar

Eine Zwischenstellung haben interferometrische Sonare: wie beim Sidescan-Sonar werden die Signale zur Seite ausgesendet und von mehreren versetzten Empfängern aufgefangen. Aus den Laufzeitunterschieden lassen sich Richtung und Entfernung von horizontal weit entfernten Echos und damit eine Tiefenangabe ableiten. Wie beim Fächerlot haben im Flachwasser die weit außen liegenden Signale allerdings ein schlechtes Signal-Rausch-Verhältnis, wodurch die Messwerte ungenau werden. Der Zeitaufwand für das nachträgliche Prozessieren kann dadurch ein Mehrfaches der eigentlichen Messzeit betragen.

Software für Datenerfassung und Nachprozessieren

Es gibt eine Vielzahl von Software-Paketen für die hydrographische Datenerfassung und Auswertung. Sie sind in der Regel auf die Bedürfnisse der Berufsschiffahrt und den küstennahen Einsatz zugeschnitten und für den gelegentlichen Einsatz recht komplex und schwer überschaubar. Es können darum nur einige subjektive Eindrücke und ein generelles Bearbeitungsschema für hydrographische Daten vorgestellt werden.

Besonders zur Datenerfassung mit dem Fächerlot muss eine Vielzahl von Sensoren in eine Bediensoftware integriert werden. In der Praxis werden Messfahrten mit Fächerloten so angelegt, dass für ein Gebiet ein regelmäßiges Gitter mit definierter Zellgröße (»*bins*«) erzeugt wird und alle vom Echolot produzierten Messwerte in die zugehörige Gitterzelle gespeichert werden. Diese Zelle wird farbkodiert dargestellt und die Bediener sehen bereits während der Datenerfassung, ob für den Geländeausschnitt Daten oder Datenlücken vorhanden sind und wie die Daten statistisch verteilt sind. Die Tiefenwerte des gesamten Fächers lassen

sich in einem Profil anzeigen und der Bediener kann so nicht plausible Werte erkennen und gegebenenfalls die Einstellungen des Echolotes justieren.

Einfachere Systeme, besonders für Singlebeam-Echolote, dokumentieren lediglich die zurückgelegte Strecke und zeigen ein farbkodiertes Tiefenprofil der zurückgelegten Strecke. Da Echolot und GPS ihre Messwerte mit unterschiedlicher Taktung (z.B. 1 Hz GPS, 10 Hz Echolot) ausgeben, sollte eine entsprechende Korrektur der Daten mit Kalibrationsfahrten erfolgen. Die Mindestanforderung hierbei sollte sein, dass GPS-Signal und Tiefenwerte zeitkodiert abgelegt werden und dann verschnitten werden.

Zur Bediensoftware für Sidescan-Sonare gehören in der Regel eine Anzeige der zurückgelegten Kurse, die flächenhafte Überdeckung und natürlich das Sonarsignal. Meistens ist auch ein einfaches »*target-management*« integriert, in dem die Lage auffälliger Objekte gezeigt wird.

Unabhängig von der Erfassung ist einiger Aufwand zur Qualitätskontrolle und Eliminierung fehlerhafter Messwerte notwendig. Dieses Nachprozessieren kann in der Erfassungssoftware integriert sein oder mit anderen Programmen erledigt werden. Für die Herstellung von Geländemodellen aus Echolotdaten gibt es verschiedene Ansätze. Zunächst werden die Datensätze bereinigt, wobei ein »*area-based editing*« sinnvoll sein kann. Hierbei werden einzelne Datenpunkte dreidimensional farbkodiert dargestellt und individuell oder in Gruppen manipuliert (entfernen/korrigieren fehlerhafter Messwerte). Zu einer einfachen Plausibilisierung der Daten gehören eine Häufigkeitsverteilung der Messwerte oder auch das Anwenden eindeutig definierter automatischer Filter, um Ausreißer zu erkennen.

Mit den bereinigten Datensätzen werden Geländemodelle erzeugt, aus denen wiederum Karten mit Tiefenlinien erstellt werden oder Modelle, die in allen Raumrichtungen gedreht und manipuliert werden können. Wesentlich für den Informationsgehalt ist die Wahl der horizontalen Auflösung des Geländemodells. Mit Fächerlotdaten aus dem Flachwasser lassen sich Geländemodelle mit einer horizontalen Auflösung von 10 cm produzieren, wogegen Datenreihen mit größerem horizontalem Abstand voneinander (z.B. einzelne Kurse mit Singlebeam-Daten) nur mit entsprechend gröber aufgelösten Geländemodellen visualisiert werden. Wie die Geländemodelle mit welcher Auflösung und welchen Verfahren zu berechnen sind, hängt sehr stark vom Untersuchungsobjekt, der Fragestellung und der Datendichte ab.

Die einzelnen Messprofile des Sidescan-Sonars werden mit einer »*mosaicking*«-Software georeferenziert, zusammengefügt und so ein akustisches Bild des Seebodens hergestellt. Hierbei ist einige Bearbeitung des Rohsignals notwendig, um die unterschiedlichen Echostärken sinnvoll darzustellen und z.B. falsche Bodenwerte zu korrigieren. Danach werden Punktobjekte oder flächenhafte Objekte klassifiziert, dokumentiert und gegebenenfalls ausgemessen; beispielsweise ist aus der Länge eines akustischen Schattens abzuleiten, wie hoch ein Objekt (z.B. ein Pfahl) aus

dem Seeboden herausragt. Die Objektdaten lassen sich dann einfach in ein übliches Geographisches Informationssystem übertragen und mit anderen Informationen verknüpfen.

Erfahrungen mit hydroakustischen Verfahren

Singlebeam-Messungen im Zürichsee

Einige Erkenntnisse zum Einsatz eines Singlebeam-Echolots konnten bei einem Versuch im Zürichsee im November 2009 gewonnen werden, bei dem zwei Fundstellen (Grosser Hafner/Zürich und Rörli/Rüschlikon) vermessen wurden. Dabei wurde ein einfaches, eher für Freizeitanwendungen geeignetes Einfrequenz-Echolot (Lowrance HDS5, 50/200 kHz) zusammen mit einem präzisen GPS-Positionierungssystem (Leica GX 1230 mit swipos-GIS/GEO RTK) verwendet. Bei den Messfahrten wurde versucht, ein rechteckiges Gitter von Profilen mit einem Abstand von 5–10 m (Hafner) bzw. ein Gitter von parallel und senkrecht zum Hang verlaufenden Profilen (Rörli) aufzuzeichnen. Der Verlauf der Profile wurde nicht im Voraus festgelegt, sondern erst während der Messfahrten, um eventuell notwendige Abweichungen laufend berücksichtigen zu können. Die aufgezeichneten Tiefenmesswerte entlang der Profile wurden anschließend grafisch gefiltert, für eine konstante Schallgeschwindigkeit von 1.447 m/s und einen Seespiegel von 406 m ü. NN (NSH) korrigiert und in reguläre Rasterdaten überführt.

Als Resultate liegen Rasterdatensätze der beiden Gebiete mit einer Zellengröße von 5 m vor, welche ein detailliertes Bild der Topographie der beiden Fundstellen und ihrer Umgebung liefern (Abb. 2). Bei der gewählten Zellengröße weisen die Rasterdaten im Durchschnitt 2,1 (Hafner) bzw.

2,3 (Rörli) Messwerte pro Zelle auf. Da die Messwerte nicht gleichmäßig verteilt sind, sondern entlang von Profilen liegen, beträgt der Anteil der Rasterzellen, die mindestens einen Messwert aufweisen, im optimalen Fall (zentrale Teile des Untersuchungsgebiets) ca. 80 % (Hafner). In den Randbereichen kann dieser Wert bis auf etwa ein Drittel abfallen, d.h. zwei Drittel der Zellen weisen interpolierte Werte auf. Für das Gebiet Rörli sind diese Werte noch etwas ungünstiger verteilt.

Diese Zahlen illustrieren ein Hauptproblem der Vermessung mit Singlebeam-Echoloten: Die mit sinnvollem Aufwand erreichbare horizontale Auflösung und Dichte an Messwerten ist beschränkt. Die genaue Aufnahme von Messprofilen mit einem Abstand von 5 m oder weniger ist mit herkömmlichen Messbooten schwierig. Weiterhin ist die Verteilung der Tiefenmessungen entlang von Profilen für das Erstellen von Geländemodellen und für das Erkennen von Objekten ungünstig. Dieser Nachteil lässt sich auch nicht durch den Einsatz von hochwertigen, hydrographischen Echoloten mit höherer Pingrate oder besseren Algorithmen zur Bodenerkennung überwinden. Das verwendete einfache Echolot erwies sich zudem als für Vermessungen ungeeignet und zu wenig genau, was sich beispielsweise durch eine nicht sehr zuverlässige Bodenerkennung (Lücken in Profilen) und durch teilweise deutliche Versätze (bis zu mehreren Dezimetern) von sich kreuzenden Profilen ausdrückte. Die Resultate sind daher zwar für eine grobe topographische Beschreibung der Fundstellen und ihrer Umgebung ausreichend, für eine Darstellung von allfälligen sichtbaren Artefakten oder als Grundlage für zukünftige Differenzmessungen ungeeignet.

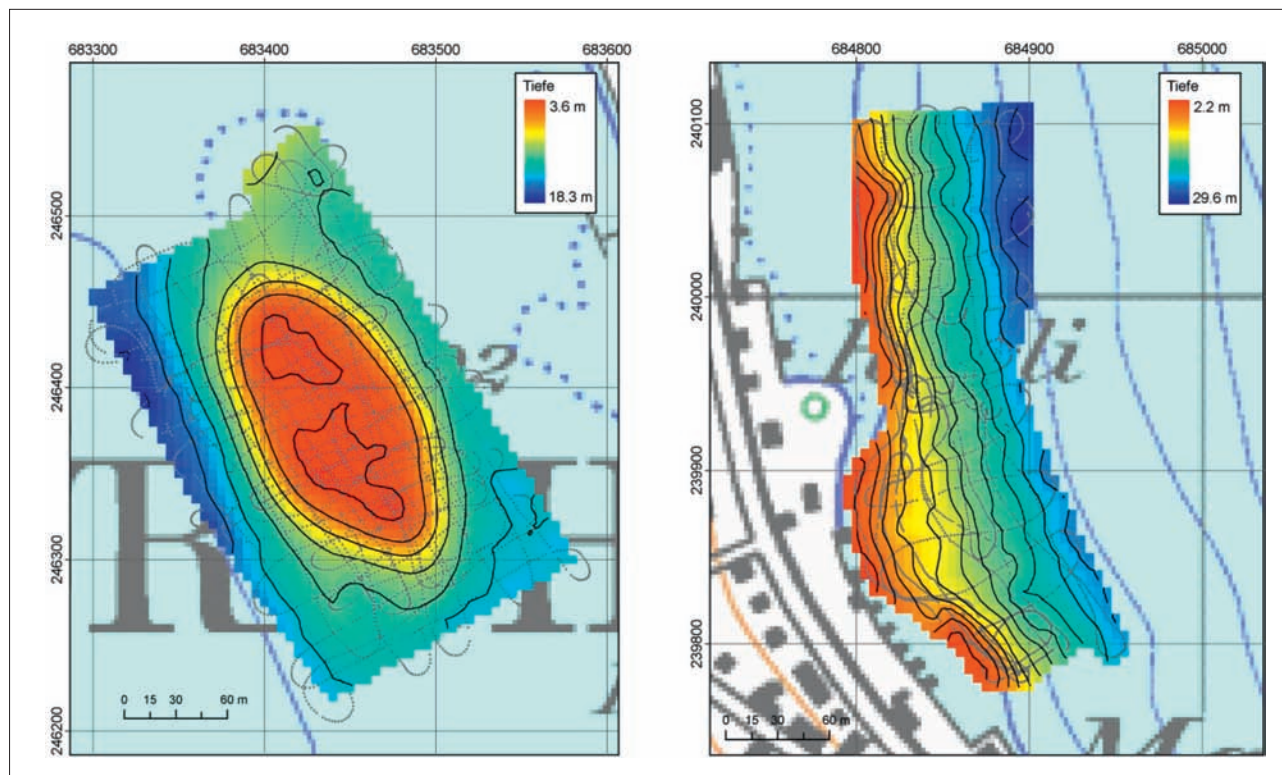


Abb. 2: Kurse der Singlebeam-Profile im Zürichsee (links: Hafner, rechts: Rörli). Graue Punkte zeigen die gefahrenen Kurse, schwarze Linien sind die konstruierten Isobathen im Abstand von 2 m über der farbkierten Karte.

Multibeam-Aufnahmen im Flachwasser des Bodensees

An mehreren archäologisch bedeutsamen Stellen wurden in der Flachwasserzone des Bodensees mit zwei Fächerloten Aufnahmen gemacht (Abb. 3). Mit einem Reson Seabat 8101 wurde gezielt die Geländesituation in archäologischen Denkmälern (Eschenz/Öhningen, Steckborn, Güttingen, Litzelstetten, Sipplingen und Unteruhldingen) aufgenommen. Das Gerät arbeitet mit fest installierten Transducer-Elementen (240 kHz), die einen Fächer von 150° abdecken. Die gesamte Gerätekonfiguration ist bei Böder und Wessels (2009) beschrieben. Ein Kongsberg EM 3002 wurde zu Vergleichszwecken eingesetzt, dafür ebenfalls auf einem kleinen Boot montiert und so erneut die Stationen Sipplingen und Unteruhldingen befahren. Das Kongsberg-Fächerlot verfügt über eine dynamische Beamstabilisierung und wertet bis zu 254 Signale bei 300 kHz und einer Fächeröffnung von 130° aus. Das Gerät lässt sich mit gleichen Winkeln zwischen den Echos oder gleichen Abständen am Seegrund (äquidistant) betreiben.

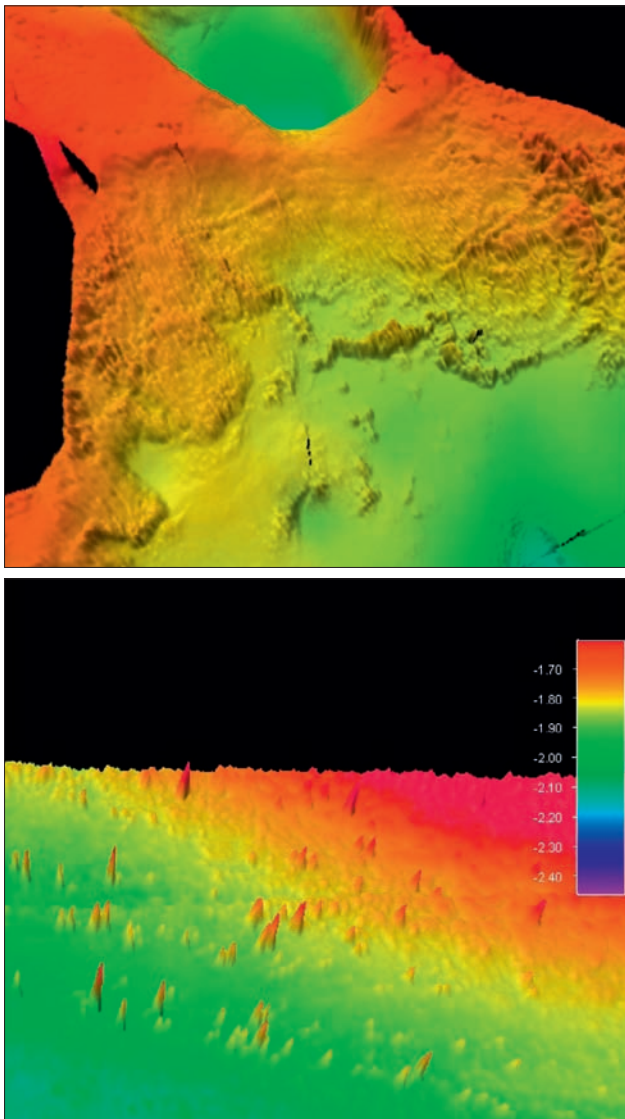


Abb. 3: Geländemodell einer Fächerlotaufnahme vom Orkopf am Ausfluss des Untersees. Ein dichter Makrophytenbewuchs stört die Bodenerkennung (oben). Auf dem Geländemodell aus Unteruhldingen sind deutlich einzelne Pfähle zu erkennen (unten).

Unser Eindruck bei den Aufnahmen und dem Vergleich der Geländemodelle ist, dass die wesentlichen Geländeinformationen von beiden Systemen mit hoher Genauigkeit wiedergegeben werden. Generell ist jedoch der Aufwand bei der Erfassung mit einem nicht stabilisierten Lot um einiges höher. Die Fächerbreite musste ständig auf die Gegebenheiten angepasst werden, da randliche Beams häufig zu erratischen Tiefenwerten führten, die schon bei der Erfassung gefiltert werden mussten. Das stabilisierte Lot erwies sich als deutlich weniger fehleranfällig, so dass keine Filterung notwendig war. Insgesamt ist deshalb durch den Einsatz eines stabilisierten Lotes die Datendichte um einiges höher.

Mit beiden Datensätzen können problemlos plausible Geländemodelle mit 10 cm Gitterweite hergestellt werden und sowohl natürliche wie künstliche Geländestrukturen wiedergegeben werden.

Sidescan-Aufnahmen im Flachwasser des Bodensees

Mit einem Sidescan-Sonar (Klein 3000, 100 bzw. 500 kHz) wurden von einem kleinen Boot aus die Flachwassergebiete in Unteruhldingen (Abb. 4), Sipplingen, Litzelstetten und Güttingen befahren. Für die Aufnahmen wurde das Sonar neben dem Boot an einem Draht ins Wasser gehängt und die Kurse mit einem trimble dGPS Kartenplotter mit ca. 1 m Genauigkeit navigiert.

Mit dem Sidescan-Sonar werden viele Strukturen in der Wassersäule und am Seeboden abgebildet, die von einem Fächerlot nicht erfasst werden können. Man erkennt die Schiffsrümpfe verankerter Boote, deren Ankerketten, die von den Ketten erzeugten Schwjokreise und dichte Makrophytenbestände. Grobkörnige Sedimente (Sande und Kiese) stellen, ebenso wie Gasblasen an Makrophyten, sehr »schallharte« Strukturen dar, deren Echos schwer zu interpretieren sind. Sehr gut erkennbar sind klare Erhebungen aus dem Seeboden, z.B. ein Schiffswrack in der Nähe der Hafeneinfahrt von Unteruhldingen, weit vom Seeboden exponierte Einzelpfähle, aber auch Erhebungen, die sich nach Betauchung als Kliffkanten erwiesen (vgl. Beitrag Königer/Wessels in diesem Band). In tieferem Wasser lassen sich auch Hölzer von Fischreisern oder auch die Haldenkante klar erkennen. Insgesamt ist die Objektvielfalt so groß, dass in jedem Fall eine intensive Diskussion der Befunde mit einem Kenner der Unterwasser-Situation sehr empfehlenswert ist.

Ein Versuch, dieselben Gebiete im Winter zu befahren, um den störenden Makrophytenbewuchs zu vermeiden, war wenig erfolgreich. Der niedrigere Wasserstand schränkt den Einsatzbereich deutlich ein.

Kombination von Singlebeam-Daten und Multibeam-Daten am Orkopf und am Krähenhorn im Bodensee

Am Bodensee wurde ein Sedimentecholot der Firma SonderSonar, Jena, eingesetzt. Dieses Echolot arbeitet mit zwei Frequenzen (70/150 kHz) und ist nach Herstellerangaben (trotz der hohen Frequenzen) für die Sedimentechographie (d.h. Analyse der tieferen Sedimentschichten) konzipiert. Da die

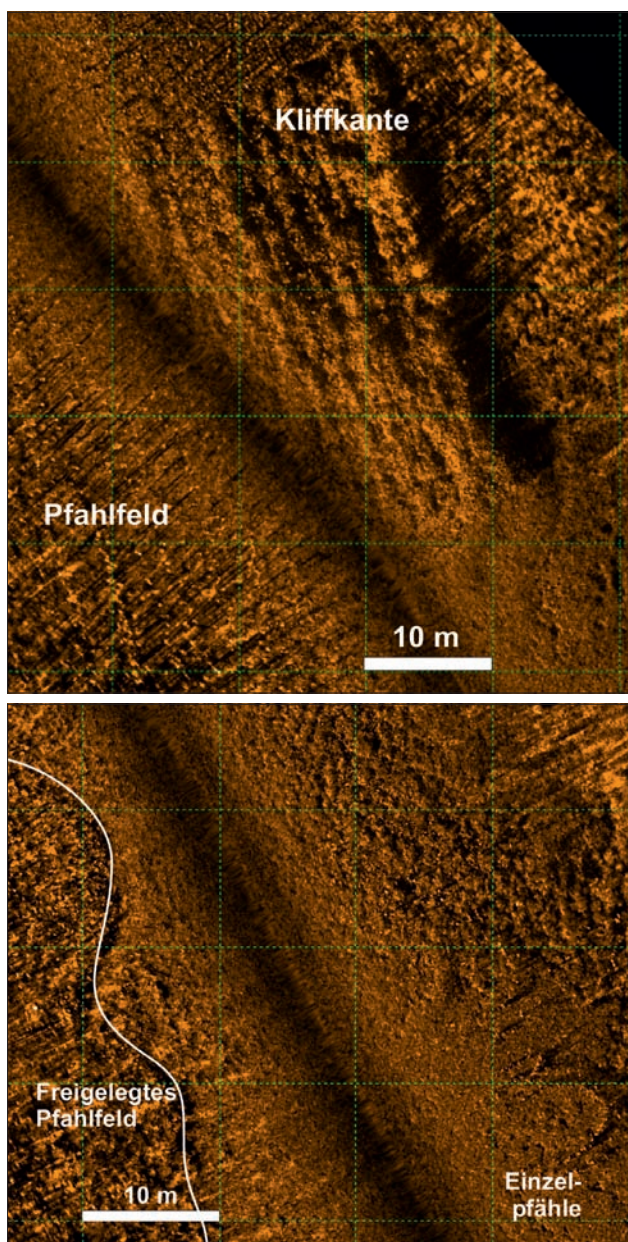


Abb. 4: Sidescan-Bilder von der Fundstelle in Unteruhldingen: Sie zeigen eine Kliffkante mit dahinterliegendem dunklem akustischem »Schatten« und links unten viele Einzelpfähle (helle Punkte) (oben). Ein Pfahlfeld am linken Bildrand neben einem Gebiet ohne herausragende Pfähle (vermutlich Akkumulationszone) und rechts halbkreisförmig angeordnete Einzelpfähle (unten).

Wassertiefe aus dem Datensatz abgeleitet wird, ist das Sonar als vollwertiges Echolot einsetzbar. Es wurde bereits in zahlreichen archäologischen Fundstellen an den deutschen Küsten, in Flüssen und Baggerseen, aber auch im Voralpenland eingesetzt (vgl. z.B. Storch 2008; Pflederer et al. 2009b, Abb. 2). Der zentrale Vorteil des Verfahrens besteht darin, dass das Lot eine besonders kurze Totzeit hat und in Wassertiefen unter 50 cm betrieben werden kann. Das System ist für die Montage auf einem Boot vorgesehen, arbeitet aber auch auf einem kleinen, ferngesteuerten Katamaran (Pflederer et al. 2009a, 39). Die oben beschriebenen Korrekturen der Bewegungen des Messbootes können mit dem Sonar nicht durchgeführt werden. Die horizontale Verortung

erfolgte bei unseren Tests über ein GPS mit Messgenauigkeit im Bereich von Dezimetern.

Das Sonar wurde in zwei Fundstellen (Litzelstetten-Krähenhorn, Öhningen/Eschenz-Orkopf) eingesetzt. In beiden Stationen hatten vorher Peilfahrten mit Multibeam-Echoloten stattgefunden, wobei große Areale der Flachwasserzone wegen des Tiefganges des Messbootes nicht befahren werden konnten (vgl. auch Fallstudie Orkopf und Fallstudie Krähenhorn in diesem Band). Die fehlenden Flächen wurden nun mit einem kleinen Auslegerboot bis in Wassertiefen unter 20 cm befahren. Auf den Flächen wurden Vergleichsmessungen mit einem RTK-GPS durchgeführt.

Die Echolotmessung in solch geringen Wassertiefen hat in beiden untersuchten Stationen vielversprechende Perspektiven eröffnet (vgl. hierzu Fallstudie Orkopf in diesem Band). Das Höhenmodell vom Orkopf (Abb. 5) ist aus Fächerecholotdaten und SOSO-Daten errechnet, die miteinander verschnitten wurden. Es zeigt ein gegenüber der amtlichen Tiefenvermessungskarte (Braun/Schärpf 1994) sehr viel differenzierteres Bild der Tiefenverhältnisse. Insofern stellen die neuen Geländemodelle eine wertvolle Datenbasis im Bezug auf künftige Überlegungen zum dauerhaften Schutz der untersuchten Unterwasserdenkmale dar.

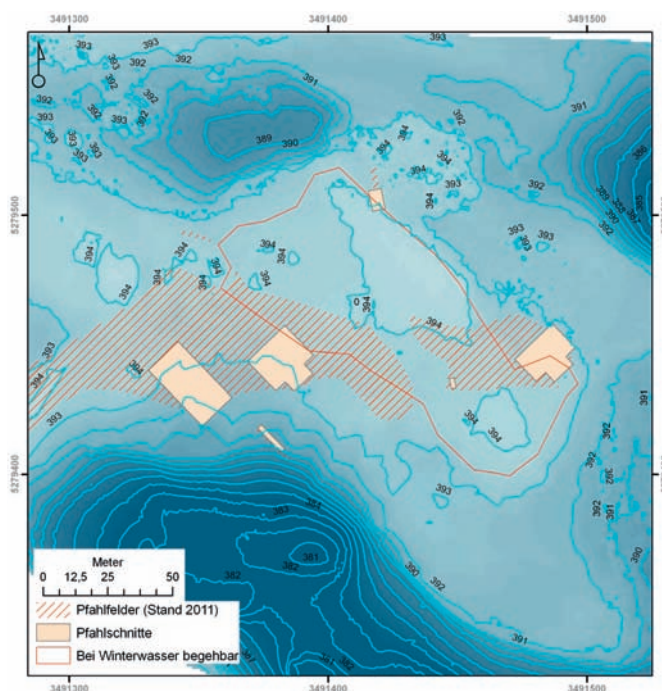


Abb. 5: Bathymetrie am Ausfluss des Untersees. Das Geländemodell wurde aus Daten des Fächerecholotes und dem SOSO-Echolot zusammengesetzt. Alle Höhen sind in m. ü. NN angegeben.

Allerdings muss – wie bei der Vermessung im Zürichsee – mit Fehlern im Dezimeterbereich gerechnet werden. So mussten die Fächerecholotdaten um 20 cm korrigiert werden, da sie mit den im gleichen Jahr durchgeführten Referenzmessungen mit RTK-GPS nicht in Übereinstimmung zu bringen waren. Ursprünglich waren diese im UTM-Gitter aufgenommen worden und mussten anschließend umgerechnet werden. Es bleiben trotz der Anpassung Versätze

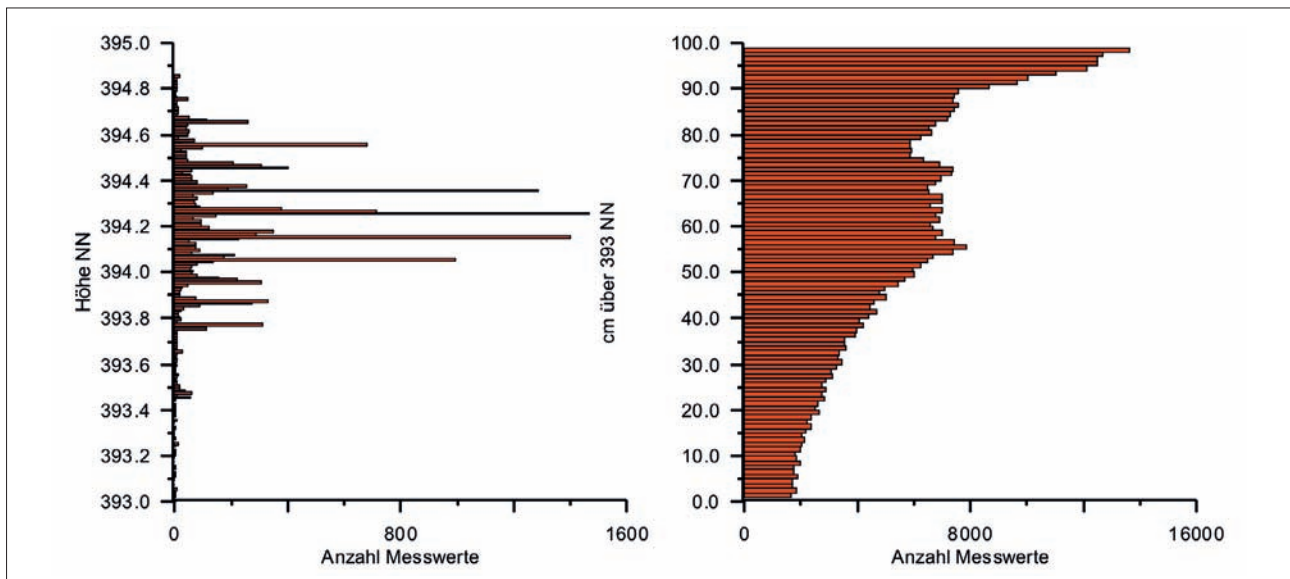


Abb. 6: Häufigkeitsverteilung der Messwerte als einfacher Test zur Plausibilisierung der Messwerte. Die SOS0-Daten zeigen alle 10 cm starke Häufigkeitsmaxima. Die Fächerlotdaten (rechts) zeigen eine plausible harmonische Verteilung mit der Wassertiefe.

im Überlappungsbereich der beiden Datensätze von einigen Zentimetern. Die Ursache solcher Diskrepanzen kann im Auftreten von Makrophytenteppichen liegen, die besonders die Fächerecholotdaten verfälschten. Eine systematische Fehlerquelle ist sicher auch eine ungenügende Umrechnung der Gitter (UTM in Gauß-Krüger), bei der eine genauere Anpassung der lokalen Transformationsparameter notwendig gewesen wäre. Probleme treten aber auch bei den Singlebeam-Daten auf. Ein einfacher Test zur Häufigkeitsverteilung der Tiefenmessungen zeigte, dass die Messwerte keine Normalverteilung aufweisen: auf der Grafik sind stark erhöhte Häufigkeiten im Abstand von 10 cm zu erkennen. Zurückzuführen ist dies auf das verwendete Verfahren der Datenprozessierung, das Daten im Dezimeterabstand auf Plausibilität überprüft und entsprechend gewichtet (Abb. 6). Die vertikale Auflösung der Singlebeam-Daten ist darum mit entsprechenden Einschränkungen verbunden.

Interferometrisches Sonar im Vierwaldstätter See

Im Rahmen einer Pilotstudie in Schweizer Seen (in Zusammenarbeit mit Schweizerischen Bundesämtern, der Universität Genf und dem Norwegischen Geologischen Dienst) wurde das Gebiet der neolithischen Seeufersiedlung bei Kehrsiten am Ufer des Vierwaldstättersees erkundet (Hilbe et al. 2008). Für diese Kampagne im Vierwaldstättersee wurde ein interferometrisches Sonar vom Typ »Geoswath Plus« der Firma Geoacoustics Ltd. verwendet. Das Gerät arbeitet mit einer Frequenz von 125 kHz und kann in Wassertiefen bis etwa 200 m eingesetzt werden. Die absolute Genauigkeit der resultierenden Rasterdaten hängt von mehreren Faktoren – wie der Wassertiefe und der Dichte der Messungen – ab. Sie liegt nach Herstellerangaben in horizontaler Richtung typischerweise bei einigen Dezimetern, in vertikaler Richtung bei wenigen Dezimetern. Die relative Auflösung in vertikaler Richtung beträgt einige Zentimeter. Die prozes-

sierten Daten der einzelnen Linien wurden am Schluss zu einem Rasterdatensatz (X, Y, Tiefe) mit einer Zellengröße von 0,3 m zusammengefügt.

Entlang eines 600 m langen Uferabschnitts wurde für Teile der ufernahen, seichten Plattform (»Kehrsitenerplatte«) und den Abhang zum Chrüztrichter ein detailliertes Tiefenmodell des Sees mit einer Zellengröße von 0,3 m berechnet (Abb. 7). Der mäßig steil abfallende Nordwestfuß des Bürgenstocks wird unter Wasser von einer flachen Plattform mit mehreren zehn Metern Breite und Wassertiefen von weniger als 7 m umsäumt. In Kehrsiten ist diese Plattform zwischen 45 m und 75 m breit. Hier befindet sich die neolithische Siedlung, die im Jahre 2003 durch einen Hobbytaucher entdeckt und danach wissenschaftlich untersucht wurde (Hügi 2006). Die Siedlungsreste befinden sich einige Meter unter dem heutigen Wasserspiegel, weil der Seespiegel im Neolithikum dementsprechend tiefer lag oder die Plattform etwas in tieferes Wasser abgeglitten ist. Die Plattform wird gegen den See durch eine fast geradlinig verlaufende Kante in einer Wassertiefe zwischen 5 und 6,5 m begrenzt. Anschließend folgt eine Steilstufe bis in eine Tiefe von etwa 20 m, zuoberst mit einer Neigung von mehr als 40°, dann ein mäßig steiler Abhang (~13°) mit unregelmäßiger, hügeliger Topographie, der schließlich ab einer Wassertiefe von ~70 m im flacheren Grund des Beckens ausläuft. Anhand der generellen Morphologie lässt sich die äußere Kante der Plattform als Anriss einer bis zum Beckenrand reichenden Rutschung interpretieren, die den internen Aufbau der Plattform mit den Kulturschichten entlang der Anrissnische unterseeisch aufgeschlossen hat. Vorangegangene Studien konnten zeigen, dass diese Rutschungen durch Erdbeben ausgelöst wurden, die 1601 AD und/oder ~300 v. Chr. stattgefunden haben (Schnellmann et al. 2002 und 2006). Die im Allgemeinen geradlinig verlaufende Kante weist kleinmaßstäbliche Unregelmäßigkeiten auf, welche einen besseren Einblick in die interne Architektur der Plattform geben.

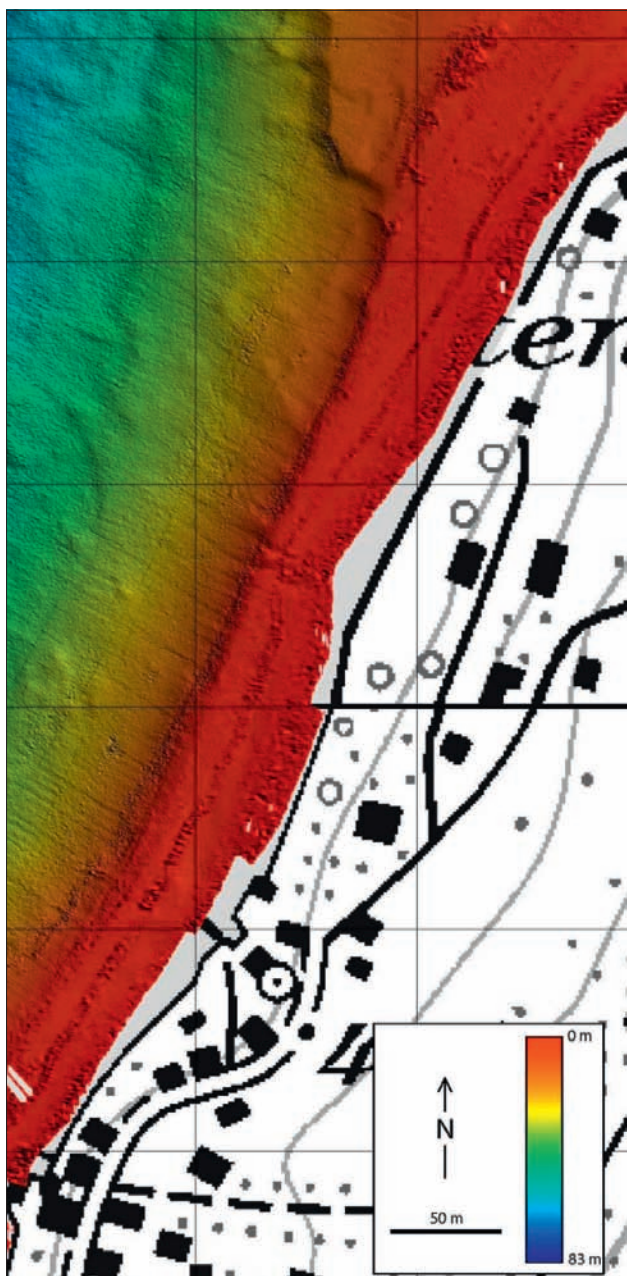


Abb. 7: Mit dem interferometrischen Sonar aufgenommene bathymetrische Karte der Station Kehrseiten im Vierwaldstätter See. Man erkennt deutlich die Artefakte entlang des Schiffskurses.

Mit solchen bathymetrischen Untersuchungen lässt sich die Topographie des Seebodens mit guter Genauigkeit im cm-Bereich flächenhaft erfassen, doch die horizontale Auflösung begrenzt die Erkennbarkeit kleiner Objekte. Bei der Interpretation der visualisierten Daten sind einige Punkte zu beachten. Viele der beobachteten kleinen Unregelmäßigkeiten sind Datenartefakte, z.B. quer zur Fahrriichtung verlaufende Linien, die durch Bewegungen des Bootes während der Erfassung entstehen, und Datenrauschen, welches vor allem entlang der Fahrspur senkrecht unter dem Gerät auftritt und besonders bei ufernahen Linien auf der Plattform sichtbar ist. Auch die vermeintlich stark strukturierte Sedimentoberfläche entlang des Randes der Plattform ist hauptsächlich hierauf zurückzuführen. Archäologisch interessante

Objekte – wie Pfähle – lassen sich nicht klar identifizieren, tragen aber möglicherweise einen Teil zu den beobachteten Unregelmäßigkeiten bei. Mit interferometrischem Sonar können Zonen mit seichtem Wasser vergleichsweise effizient vermessen werden, allerdings müssen dafür die Erfassungsparameter sorgfältig gewählt werden. Die durchgeführte bathymetrische Untersuchung gibt einen Einblick in die Topographie und Morphologie des Seebodens bei Kehrseiten, es ist jedoch nicht möglich, anthropogene Strukturen (z.B. Pfähle) eindeutig zu identifizieren, da die erzielte Auflösung dafür zu gering und die Datenartefakte zu zahlreich sind. Die Verwendbarkeit für archäologische Fragestellungen wird hierdurch stark eingeschränkt.

Möglichkeiten und Grenzen hydroakustischer Methoden, Trends

Hydroakustische Verfahren sind eigentlich Methoden der Fernerkundung und für größere Wassertiefen entwickelt worden. Besonders in der Flachwasserzone geraten hydrographische Verfahren darum schnell an ihre Grenzen, vor allem, wenn für archäologische Fragestellungen eine hohe Genauigkeit gefordert wird. Diese Grenzen sind zum Teil konstruktionsbedingt, werden zum Teil aber auch von der Flachwasserzone vorgegeben: Ein Problem ist stets ein dichter Bestand von Unterwasserpflanzen. Makrophyten können luftgefüllte Stängel oder besonders im Sommer Gasblasen aus der Photosynthese an den Blättern haben. In freiem Gas im Wasser beträgt die Schallgeschwindigkeit, ähnlich wie in der Atmosphäre, um 300 m/s. Dies ist wesentlich geringer als in Wasser (ca. 1450 m/s). Die Gasblasen bewirken darum sehr harte Echos, so dass die Pflanzenoberfläche fehlerhaft als Bodenecho interpretiert werden kann. Ein dichter Bewuchs mit niederwüchsigen Kräutern führt zu Signalen, die dem eigentlichen Echo des Seebodens sehr ähnlich sind und nur von fortschrittlichen Bodenerkennungs-Algorithmen bei Single-beam-Echoloten erkannt werden. Fächerecholote bzw. die Auswertesoftware sind bisher nicht in der Lage, die Pflanzendecke zu berücksichtigen, da normalerweise lediglich die Tiefenwerte gespeichert werden. Das zusätzliche Abspeichern der Echos aus der gesamten Wassersäule ist zumindest in tieferem Wasser möglich, müsste unter den Bedingungen der Flachwasserzone aber erst getestet werden. Der Aufwand hierfür wird bei den hohen Pingraten immens sein.

Im Flachwasser ist der Untergrund in der Regel aus harten und kompakten Sedimenten (Kiese, Sande) aufgebaut, die ein sehr hartes Echo produzieren. Durch Multiplen (mehrfaches Reflektieren der Echos zwischen Wasseroberfläche und Seeboden) kann es zu Fehlinterpretationen kommen.

Das beschriebene Problem der Totzeiten der Echolote führt dazu, dass sie ab einer bestimmten Wassertiefe nicht mehr eingesetzt werden können. Problematisch ist hier, dass viele archäologische Fundstellen in sehr flachem Wasser liegen und darum mit den meisten hydroakustischen Verfahren nur die in tieferem Wasser liegenden Bereiche vermessen werden können.

Für moderne Verfahren mit aufwändiger Technik (besonders Multibeam und interferometrisches Sonar) wird zum Teil umfangreiches Zubehör und zusätzliches Bedienpersonal benötigt. Hierdurch wird ein größeres Boot notwendig, was die minimale Einsatztiefe einschränkt. Zudem sind die Schallwandler größer (und erheblich teurer) als bei Singlebeam-Echoloten, so dass besonders in flachem Wasser mit unerwarteten Hindernissen nur mit größter Vorsicht bzw. entsprechendem Nervenzettel der Besatzung gefahren werden kann.

Wechselnde Wasserstände in nicht regulierten Seen schränken das Zeitfenster für hydroakustische Messungen ein. Im Bodensee liegen die hohen Wasserstände im Sommer und Herbst, wenn die Makrophyten wachsen bzw. voll ausgebildet sind. Wiederholungsmessungen zum Erkennen von Veränderungen der Topographie sind erst nach mehreren Jahren sinnvoll.

Prinzipiell ist es auch möglich, Daten aus unterschiedlichen Vermessungen miteinander zu kombinieren. Man gerät jedoch schnell an die Grenzen der geforderten Genauigkeit, da besonders bei verschiedenen Bearbeitern und Systemen in der Praxis immer Probleme auftauchen. Häufig werden Daten in einem unterschiedlichen Raumbezug produziert (z.B. UTM, Gauß-Krüger-Koordinaten oder lokale Gitter, Bezugsniveau Wasserspiegel oder Geoid), die sich nur mit eingeschränkter Genauigkeit in ein anderes Koordinatensystem umrechnen lassen. Um die Daten langfristig verwenden zu können, ist darum auf jeden Fall eine saubere Dokumentation der jeweiligen Verfahren und Messparameter und eine eindeutige Definition der zu verwendenden Koordinatensysteme notwendig.

Obwohl hydroakustische Verfahren Methoden der Fernerkundung sind, können mit Daten von Fächerecholoten bis zu einer Wassertiefe von etwa einem Meter hochauflösende digitale Geländemodelle mit einer Gitterweite von wenigen Zentimetern Auflösung gut angefertigt werden. Mit Singlebeam-Geräten sind engere Profilabstände als 5 m kaum realistisch; Geländemodelle der Flachwasserzone sind darum nur bei speziellen Fragestellungen sinnvoll. Mit Sidescan-Sonaren lassen sich einzelne Objekte (z.B. Pfähle) innerhalb sehr kurzer Zeit kartieren, was aber nur bei seltenen Bedingungen (weit aus dem Untergrund herausstehende Objekte) möglich ist.

Der Trend bei der Messung hydroakustischer Oberflächendaten geht zu Fächerloten. Die spezifischen Probleme bei Messungen in der Flachwasserzone (vor allem die Gefahr der Beschädigung des Schallwandlers) ließen sich vermutlich in den Griff bekommen, wenn das gesamte System manuell (ohne Motor) bewegt würde. Systeme, die auf kleinen Plattformen montiert und navigiert werden können, bieten für die Zukunft gute Aussichten, archäologische Denkmale in der Flachwasserzone schnell, effektiv und mit der Möglichkeit gut vergleichbarer Wiederholungsmessungen hydroakustisch zu beobachten (Pflederer et al. 2009). Inwieweit LIDAR-Systeme (Laserscanning) im Flachwasser mit höherer Genauigkeit als bisher betrieben werden können, bleibt derzeit noch offen.

Literatur- und Quellenverzeichnis

Braun/Schärpf 1994:
E. Braun/K. Schärpf, Internationale Bodensee-Tiefenvermessung 1990: eine Dokumentation über die von 1985 bis 1990 durchgeführte Tiefenvermessung der Internationalen Gewässerschutzkommission für den Bodensee (Stuttgart 1994) 1–98.

Cronin et al. 2003:
D. Cronin/M. Broadus/B. Reed/S. Byrne/W. Simmons/G. Lindsay, Hydrographic Work Flow – From Planning to Products (The Hydrographic Society of America) 1–13.

Hilbe et al. 2008:
M. Hilbe/F. S. Anselmetti/V. Sastre/W. Wildi, Bathymetrische Untersuchungen in Schweizer Seen/Lever bathymétrie des lacs Suisses, Pilotstudie / Etude pilote. [Schlussbericht/Rapport final 2008] 104 S.

Hügi 2006:
U. Hügi, Stansstad NW-Kehrsiten. Neolithische Seeufersiedlungen am Alpen-nordrand. Jahrbuch Archäologie Schweiz 89, 2006, 7–23.

IHO 2005:
International Hydrographic Organization (Hrsg.), Manual on Hydrography. Publication C-13 (Monaco 2005) 539 S.

Storch 2008:
K. Storch, SOSO Sediment-Vermessungsecholot im Dienst der Unterwasserarchäologie. In: R. Bleile, Quentzin – Eine spätslawische Burg auf der Kohlinsel im Plauer See. Befunde und Funde zur Problematik slawischer Inselnutzungen in Mecklenburg-Vorpommern. Beiträge zur Ur- und Frühgeschichte Mecklenburg-Vorpommerns 48 (Schwerin 2008) 212–216.

Pflederer et al. 2009a:
T. Pflederer/M. Prell/H. Beer, Unterwasserarchäologische Prospektion. Bericht der Bayerischen Bodendenkmalpflege 50, 2009, 21–40.

Pflederer et al. 2009b:
T. Pflederer/M. Mainberger/H. Beer, Außenposten am Rand der Alpen: Die jungneolithische Seeufersiedlung Berg-Kempfenhausen. Bericht der Bayerischen Bodendenkmalpflege 50, 2009, 125–136.

Schnellmann et al. 2002:
M. Schnellmann/F. S. Anselmetti/D. Giardini/J. A. McKenzie/S. Ward, Prehistoric earthquake history revealed by lacustrine slump deposits. *Geology* 2002, Vol. 30, Nr. 12, 1131–1134.

Schnellmann et al. 2006:
M. Schnellmann/F. S. Anselmetti/D. Giardini/J. A. McKenzie, 15,000 years of mass-movement history in Lake Lucerne: Implications for seismic and tsunami hazards. *Eclogae Geologicae Helvetiae* 99, 2006, Heft 3, 409–428.

U.S. Army Corps of Engineers 2002:
Department of the Army, U.S. Army Corps of Engineers (Hrsg.), EM 1110-2-1003. Engineering and Design. Hydrographic Surveying (Washington 2002).