

# **Pfahlbausiedlung „See“ am Mondsee: Multischwinger-Sub-Bottom-Profilier und hochauflösende Fächerecholote für die umweltwissenschaftliche und archäologische Prospektion**

Erwin HEINE

Universität für Bodenkultur Wien · erwin.heine@boku.ac.at

## **Zusammenfassung**

Im Mai 2016 wurde im Bereich der prähistorischen Pfahlbausiedlung „See“ am Mondsee (Österreich) ein Test von hydroakustischen Messsystemen in Hinblick auf ihren Einsatz zur archäologischen Prospektion durchgeführt. Neben Fächerecholotsystemen zur Dokumentation der Seebodenoberfläche wurde erstmals ein Multischwinger-Sub-Bottom-Profilier-System zur Dokumentation der Seebodensedimentschichten eingesetzt. Das resultierende Voxelmodell ermöglicht eine dreidimensionale Erforschung von im Boden verborgenen Objekten und Strukturen. Die Testmessungen haben gezeigt, dass die eingesetzten hydroakustischen Systeme in der Lage sind, auch in extremen Flachwasserzonen ihren Spezifikationen entsprechende Daten zu liefern, und als Ergänzung zu hochauflösenden Side-Scan-Sonaren einen Informationsgewinn für die archäologische Unterwasserprospektion darstellen.

## **1 Einleitung und Zielsetzung**

### **1.1 Prähistorische Pfahlbauten rund um die Alpen**

Im Boden von zahlreichen Seen rund um die Alpen verbergen sich urgeschichtlichen Siedlungen. Die Dörfer standen ehemals am Ufer oder auf kleinen Inseln in den Seen und sind erst durch den Anstieg des Seespiegels unter Wasser geraten. Im Salzkammergut liegen die Reste dieser Pfahlbauten in einer Tiefe zwischen einem und acht Metern unter der heutigen Seeoberfläche (DWORKY 2011). Nach alarmierenden Meldungen über Plünderungen und Zerstörung von Stätten begann 1969 das Bundesdenkmalamt die Bestandsaufnahme aller Unterwasserkulturgüter in den Salzkammergutseen durch systematisches Absuchen der Seeufer bis in 10m Wassertiefe, wobei die kartographische Erfassung durch eine verhältnismäßig einfach durchzuführende „Umrissvermessung“ erfolgte. Durch Bohrungen wurde nach Kulturschichten gesucht (Offenberger & Ruttkay 1997, Jansa 2013). Mit der Eintragung als UNESCO-Welterbe Prähistorische Pfahlbauten um die Alpen im Jahr 2011 folgten in Deutschland und der Schweiz folgten erste erfolgreiche Anwendungen von hydroakustischen Methoden zur Vermessung und zum Monitoring von Pfahlbausiedlungen, wie etwa der Einsatz vom Fächerecholot (MBES) und Sidescan-sonar an der Fundstelle in Unteruhldingen am Bodensee (KÖNINGER & WESSELS 2013).

## 1.2 Motivation und Zielsetzung

Aus Anlass der Oberösterreichische Landesausstellung 2020 mit dem Titel „Versunken - Aufgetaucht“ wurde vom Land Oberösterreich ein umfassendes Archäologieprojekt zur Erforschung der Pfahlbauanlagen gestartet. Neben der Dokumentation der Oberfläche ist für die Archäologie aber insbesondere die Detektion von im Boden verborgenen Objekten und Strukturen von Bedeutung. Mit der Markteinführung des Multischwinger-Sedimentecholots von Innomar im Jahr 2014 waren nun auch neue Möglichkeiten für eine dreidimensionale Erforschung der Seebodenstruktur und darin verborgener Objekte gegeben (LOWAG ET AL. 2010; MISSIAEN 2015).

Der Fokus dieser Publikation liegt in der Darstellung der Methodik und der technischen Realisierung der Messdatenerfassung. Die Interpretation der Paleolandschaften und die Validierung dieser Systeme werden in Folgearbeiten behandelt.

## 2 Aufgabenstellung und Testgebiet

Im Mai 2016 wurde am Mondsee eine zweiwöchige Messkampagne zur Validierung von hydrographischen Messsystemen in Hinblick auf ihre Leistungsfähigkeit für die zerstörungsfreie archäologische Unterwasserprospektion durchgeführt.

In einer auf den fachspezifische Erfahrungen und Erfordernissen basierenden Vorselektion wurden jene Systemhersteller ausgewählt, welche an den Testmessungen teilnehmen sollten. Einige der entscheidenden Vorauswahlkriterien dabei waren die Einsetzbarkeit (Installation und Betrieb) der Systeme auf einem kleinen, trailerbarem Messboot sowie ihre zu erwartende Performance in der Anwendung in extremem Flachwasser, wie minimale Wassertiefe, Fächeröffnungswinkel, erzielbare Auflösung und Genauigkeit. Die ausgewählten Unternehmen wurden jeweils zur Durchführung von zweitägigen Testmessungen eingeladen, wobei ein hydrographisches Messboot mit sämtlichen Basisinstallationen sowie der jeweils notwendigen, systemspezifischen Vorinstallation bereitgestellt wird. Die Testmessungen wurden – soweit möglich – unter identen Bedingungen und mit demselben Arbeitsumfang durchgeführt, um für die nachfolgende Validierung vergleichbare Rahmenbedingungen zu gewährleisten.

Als Testgebiet diente der östliche Bereich des Mondsees, mit der prähistorischen Pfahlbausiedlung „See“ an dessen Ostende, unmittelbar beim Auslauf des Sees (Abb. 1). Die Pfahlreste haben lediglich eine Dicke zwischen 2 und 20 cm und ragen teilweise nur wenige Zentimeter aus dem Boden oder sind mit Sediment überdeckt (DWORSKY 2011).

Die Messungen wurden in drei Bereichen mit unterschiedlicher Wassertiefe, Seebodentopographie und Oberflächenstruktur durchgeführt (Abb. 2):

- B1: Pfahlbausiedlung „See“; Wassertiefe < 10 m; stark strukturierte Oberfläche
- B2: Wassertiefe: ca. 15 m; bewegtes Gelände
- B3: Wassertiefe: ca. 65 m; nahezu ebene, kaum strukturierten Seebodenoberfläche



**Abb. 1:** Pfahlreste der Anlage „See“ (Bildquelle: POHL 2015) **Abb. 2:** Lage der Messgebiete B1, B2 und B3 im Mondsee (Karte: BEV, AMAP-Fly 5.0)

### 3 Messkonzeption und Ergebnisse

#### 3.1 Messboot und Sensorinstallation:

Um die seichten Bereiche der Pfahlbausiedlung - mit den knapp bis unter die Wasseroberfläche ragenden Pfählen - sowie die archäologisch interessanten, flach auslaufenden Uferzonen vollständig und gefahrlos Befahren zu können, wurde ein speziell für den Einsatz im Flachwasser konzipiertes Boot verwendet.

Ein wesentlicher Teil der Projektarbeit bestand aus dem Aufbau einer Messboot-Basisinstallation von EDV-Infrastruktur, auf welche die teilnehmenden Hersteller ihre firmenspezifisch konfigurierten Systemkomponenten direkt aufbauen konnten.

Für die präzise Navigation, das Prozessieren und Zuweisen der Bewegungsdaten an die Echoloteinheiten, die Synchronisation der Einzelsysteme sowie der Speicherung und Steuerung der hydroakustischen Systeme wurde eine eigenständige Messschiff-EDV-Anlage bestehend aus einem individuell konfiguriertem Industriecomputer mit vierfach Grafikboards für den Betrieb von drei Kontroll- und Steuerungsmonitoren zur dynamischen Messdatenvisualisierung und Vorort-Verifikation und einem eigenständigen Navigationsmonitor für den Schiffsführer installiert. Als Erfassungs- und Navigationssoftware kam das hydrographische Softwarepaket QINSy der Firma QPS zum Einsatz.

#### 3.2 Navigation und Bewegungsdetektion mittels GNSS/INS-Integration

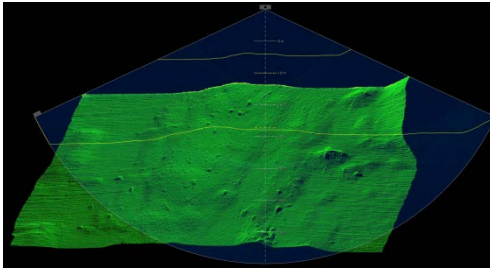
Der Einsatz eines RTK-GNSS-Ortungssystems ermöglicht durch Integration einer IMU (Inertial Measurement Unit) und gemeinsamer Verarbeitung von GNSS/INS-Messungen einerseits die Stabilisierung der GNSS-basierten Positionsbestimmung, und andererseits kann die Raumlage der exzentrisch zur GNSS-Antenne montierten Echolotschwinger für jeden Zeitpunkt präzise erfasst werden (HEINE et al. 2016).

Zum Einsatz kamen zwei unabhängig arbeitende Systeme mit unterschiedlichem, methodischem Ansatz: Das primäre System, welches als bei sämtlichen Echolotmessungen als unabhängige Referenz eingesetzt wurde, bestand aus einem RTK-GNSS-System GS25 (Leica Geosystems) in Kombination mit dem High-End-Bewegungssensor HYDRINS (iXBLUE), welcher auf faseroptischer Kreiseltechnik basiert, und den Kurs- sowie die Roll- und Stampfwinkel mit einer Genauigkeit von  $0,01^\circ$ , bei einer Auflösung von  $0,001^\circ$  liefert.

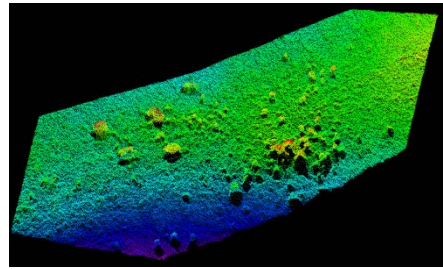
Alternativ dazu wurde das kostengünstigere, auf MEMS-Technik basierende IMU-System Apogee-A ( SBG-Systems) installiert. Die hierbei fehlende Kursbestimmung wurde durch Einsatz eines auf einem Doppel-GNSS-Antennensystem basierenden GNSS-Positionierungssystems, dem AsteRx-U (Septentrio) realisiert. Jedoch lieferte diese IMU/GNSS-Kombination im Vergleich zum Primärsystem keine zufriedenstellenden Daten, sodass diese Einheit bereits nach einem Messtag nicht mehr eingesetzt wurde. Als Positionierungssystem wurde das GNSS-System mit einer Antenne weiterhin und mit vergleichbarer Genauigkeit wie das Leica-System eingesetzt.

### 3.3 Multibeam Echolotung

Am Mondsee wurden Testmessungen mit high-end Fächerecholoten (multi beam echo sounder, MBES) der drei führenden Hersteller von „mid-range“-Systemen (Kristensen, 2016) durchgeführt, dem EM2040C Dual (Kongsberg), dem Sonic 2024 (R2Sonic) und SeaBat T50-P (Teledyne Reson). Zur Bestimmung der systematischen Einbauwinkel-Fehler (Roll-, Stampf und Kurs) der Fächerecholotsschwinger im Verhältnis zum GNSS/INS-System sowie einer Latenz in der Positionierung wurde vor Beginn der Messungen jeweils ein sogenannter Patch-Test gefahren (Testgebiet B2).



**Abb. 3:** Echtzeit-Messmodus-Ansicht des der Fächerecholotaufnahme



**Abb. 4:** Fächerecholotdaten des Pfahlfeldes

Die ufernahe Flachwasserzone der Pfahlbaustätte (Testgebiet B1), wurde zuerst flächendeckend mit weit geöffnetem Fächer befahren, um Aussagen über die Flächenleistung in Relation zu Detailauflösung und Nachbearbeitungsaufwand (Datenbereinigung) ableiten zu können (Abb.3). Innerhalb des Testgebietes wurden - in Hinblick auf die erzielbare Informationsgewinnung bei hochauflösenden Detailvermessungen - Kreuzprofilfahrten (=Abtastung aus unterschiedlichen Winkeln) an ausgewählten Stellen mit unterschiedlichen Fächeröffnungen und Messfrequenzen durchgeführt (Abb. 4). Neben den Tiefendaten liefern hochauflösenden „backscatter“-Darstellungen (rückstrahlende Energie) zusätzliche Information über den Aufbau des Seebodens (wie Sedimenttyp oder Bewuchs). Für die Detektion der bodennahen archäologischen Objekte ist die Multi-Detektions-Funktionalität dieser Messsysteme eine besonders interessante Option. Dabei wird aus den Reflektionen von einem Ping nicht nur ein Punkt aus dem letzten und stärksten rückgestreuten Signal (d.h. Seeboden) detektiert, sondern gleich mehrere Punkte im jeweiligen Interessensbereich, also z.B. Pfahloberfläche und Seeboden.

Im Bereich der größten Tiefe des Mondsees (Testgebiet B3) erfolgten die MBES-Messungen einerseits in Hinblick auf Aufnahmeleistung (Streifenbreite), Auflösung und Genauigkeit bei der Prospektion von Gebieten in größeren Wassertiefen, und andererseits

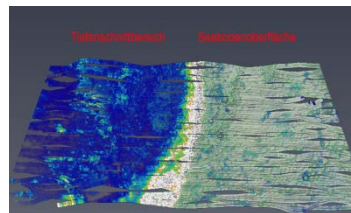
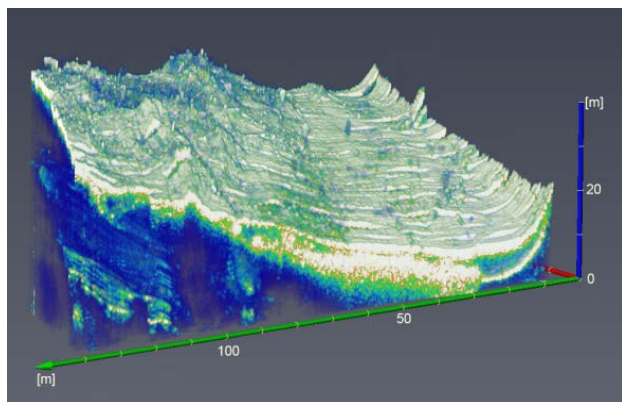
in Hinblick auf die Gewinnung von Informationen aus der Wassersäule, also dem vom Strahlenfächer durchlaufenen Wasserkörper zwischen Boot und Seeboden. Mit allen eingesetzten Fächerecholoten lassen sich Bilder der Wassersäule aufzeichnen (WCI-Daten) und auch online visualisieren, um potentielle interessante Bereiche, auf welchen Objekte wie etwa sogenannte Gasfahnen (Methangassaustritte) aufscheinen, unmittelbar einer detaillierteren Untersuchung unterziehen zu können (SCHNEIDER v. DEIMLING & WEINREBE 2014).

### 3.4 Multischwinger Sub-bottom-profiler Messung der Pfahlbauanlage

Der zentrale Punkt der Testmessungen am Mondsee war der Einsatz des Sedimentecholots SES2000 QUATTRO der Firma Innomar. Durch Ausnutzung des parametrischen Effektes gelingt es, ein eng gebündeltes, tieffrequentes akustisches Signal mit hoher räumlicher Auflösung zu erzeugen, das in der Lage ist, in den Seeuntergrund einzudringen und die Sedimentschichten zu kartieren. Beim SES2000 QUATTRO sind vier derartige Schwinger in einer Linie quer zur Fahrtrichtung in einem Abstand von 25 cm montiert, und ermöglichen somit die Aufnahme von vier äquidistanten Profilen (Echogrammen) bei einer einzigen Fahrt. Werden die Messfahrten mit einem Abstand von einem Meter durchgeführt, so ergibt sich eine „flächendeckende“ Vermessung des Messgebietes mit SBP-Profilen von 25 cm Querabstand.

Dementsprechend wurde die Pfahlbauanlage „See“ mit 40 Messfahrten (160 SBP-Profile) von 120 m Länge erfasst. Die erzielte Eindringtiefe lag dabei bei mehr als 10 m. Die Prozessierung der 10 kHz Frequenz-Messdaten sowie deren Georeferenzierung erfolgten mit der systemeigenen Software ISI. Die resultierende, ungeordnete 3D-Punktwolke - inklusive den jeweiligen Amplitudenwerten der Reflexion - wurden anschließend exportiert und in der gridding-Applikation SES-Gridder) in ein Voxelmmodell mit  $12,5 \times 12,5 \times 1 \text{ cm}^3$  umgerechnet.

Voxel-Visualisierungssoftware, wie der hier genutzten FEI Avizo, ermöglicht durch benutzerspezifische Definition von Farbzunordnungs- und Opazitätstabellen eine 3D-Visualisierung des Seebodenuntergrundes (Abb. 5). Dynamische Sequenzen sowie die Möglichkeit des schichtweisen Abtrags des Sedimentkörpers (sog. „time slices“) eröffnen ermöglichen eine dreidimensionale Erforschung der Seebodenstrukturen und der darin eingeschlossenen Objekte (Abb. 6).



**Abb. 5:** Voxel-Modell der Seebodenstrukturen der Pfahlbauanlage „See“

**Abb. 6:** Horizontaler Schnitt durch das Voxelmodell

## Danksagung

Mein Dank gebührt der Dekanin der Historisch-Kulturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Wien, Frau Prof. Dr. Theune-Vogt, in Vertretung für die involvierten archäologischen Institutionen, insbesondere auch dem Landesmuseum Oberösterreich. Weiterer besonderer Dank gebührt der Vermessungsabteilung der VERBUND Hydro Power AG unter Leitung von DI STÄUBLE, welche das Projekt durch Bereitstellung ihres Messbootes unterstützte. Ebenfalls bedanken möchte ich mich bei den Unternehmen IXBLUE Frankreich, KONGSBERG Maritim Hamburg, MBT Kiel (Teldyne-Reson), NAUTILUS Buxtehude (R2Sonic) und INNOMAR Rostock für ihre Teilnahme und ihren Einsatz an diesem Systemtest.

## Literatur

- DWORSKY C. (2011): Ein Fenster ins Neolithikum. Die Pfahlbauten des Salzkammerguts. [http://www.bda.at/text/136/Denkmal-des-Monats/16386/Ein-Fenster-ins-Neolithikum\\_Die-Pfahlbauten-des-Salzkammerguts](http://www.bda.at/text/136/Denkmal-des-Monats/16386/Ein-Fenster-ins-Neolithikum_Die-Pfahlbauten-des-Salzkammerguts) (30.11.2016).
- HEINE, E. LOISKANDL, W. BRIESE, C. EBERHÖFER, C. & CSAPLOVICS, E. (2016): Hydrografische Vermessung des Neusiedler Sees. Oesterreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation, 104, 9-24; ISSN 1605-1653, Wien.
- JANSA, V. (2013): Probleme und Lösungsansätze beim Monitoring unterwasserarchäologischer Fundstellen am Beispiel des UNESCO-Weltkulturerbes Pfahlbauten. Diplomarbeit. Universität Wien. <http://othes.univie.ac.at/24718/> (30.11.2016)
- KÖNINGER, J. & WESSELS, M. (2013): Zustandserfassung und Beobachtungen in der Station Unteruhldingen Stollenwiesen. In: BREM, H. (Hrsg): Erosion und Denkmalschutz am Bodensee und Zürichsee. Vorarlberg Museum Schriften: Vol. 1 (S. 247-255), Bregenz.
- LOWAG, J., WUNDERLICH J. & HUEMBS P. (2010): Three-dimensional investigation of buried structures with multi-transducer parametric sub-bottom profiler as part of hydrographical applications. Proc. Hydro 2010, Rostock-Warnemünde, Germany, 4.11.2010.
- MISSIAEN, T. (2015): 2D and 3D acoustic investigation of a submerged archaeological site near Ostend, Belgium. Proc. Seabed Acoustics 2015, Rostock, Germany, 20.11.2015.
- OFFENBERGER, J. & RUTTKAY E. (1997): Pfahlbauforschung in den österreichischen Salzkammergutseen. In: SCHLICHTERLE, H. & ASPES, A. (Hrsg): Pfahlbauten rund um die Alpen, Archäologie in Deutschland Sonderheft Plus.Theiss-Verlag, 76-80.
- POHL, H. (2015): Die Pfahlbau-Station See im Mondsee im Dezember 2015. Foto im Weblog „Kuratorium Pfahlbauten“. <http://www.pfahlbauten.at/blog/gr%C3%BCne-weihnachten-im-mondsee> (30.11.2016).
- SCHNEIDER VON DEIMLING, J. & WEINREBE, W. (2014) Beyond Bathymetry: Water Column Imaging with Multibeam Echo Sounder Systems Hydrographische Nachrichten, 31 (97).
- WESSELS, M., ANSELMETTI F. S., HILBE, M., & MAINBERGER, M. (2013): Hydroakustische Methoden. Möglichkeiten und Grenzen zur Langzeitüberwachung archäologischer Denkmale im Flachwasser. In: BREM, H. (Hrsg): Erosion und Denkmalschutz am Bodensee und Zürichsee. Vorarlberg Museum Schriften: Vol. 1 (S. 271-280), Bregenz.