

## Hydrografische Vermessung des Neusiedler Sees



*Erwin Heine, Willi Loiskandl, Christian Briese, Christian Eberhöfer, Wien und Elmar Csaplovics, Dresden*

### Kurzfassung

Die Hydrographische Vermessung basierend auf Echolot Messungen mit Einzelstrahl-Echolot, Sub-Bottom-Profilier und Seitensichtsonar, liefert die Basisdaten für die Generierung der Seeboden- und Schlammoberflächenmodelle. Vertikalprofile von der Wasser-Schlamm-Seebodensediment-Schichtung basierend auf Einzelpunktmessungen mit einem adaptierten bodenphysikalischen Messsystem diente zur Validierung der Echolot-Schallausbreitungswerte für Schlamm, zur Erfassung der Seichtwasserflächen sowie zur Beschreibung des Schlammkörpers im Schilfgürtel.

**Schlüsselwörter:** Hydrographische Vermessung, Echolotung, Neusiedler See, Schlammstärke, Seeprofilaufbau, Seebodenaufbau

### Abstract

In order to create a high resolution digital terrain model (DTM) of the lake bed, a comprehensive survey of the lake bottom and the mud layer was initiated. Hydrographic surveying methods based on acoustic echo sounding techniques provide the back bone of topographic data generation of the lake bottom and the mud layer. Acoustic echo sounding comprises side scans, single beam high and low frequency sensors. To verify the echo sounding measurements, to obtain data in areas with a water depth lower than 50 cm (where echo sounding is not applicable), and to provide data for the transition zone between the water body and the reed belt, a combination of soil physical sensors in a measuring system was introduced.

**Keywords:** hydrographic surveying, sub-bottom-profiling, side scan sonar, Lake Neusiedl, mud layer, lake profile, lake bottom layer detection

## 1. Einleitung

### 1.1 Das Projekt GENESEE

Der Neusiedler See stellt als ausgeprägt windexponierter, extrem flacher Steppensee eine europäische Besonderheit dar (Herzig & Dokulil 2001). Die Hydromorphologie des Sees wird durch Sedimentlagen bestimmt, die einer signifikanten raumzeitlichen Variation unterliegen. Sedimenteintrag erfolgt über einige wenige natürliche Zuflüsse wie die Wulka und periodisch wasserführende Gräben entlang des West-, Nordwest- und Süd-Ufers, über künstliche Zuleitungen wie den Golser Kanal und über diffusen atmosphärischen Eintrag sowie Sedimentation von Pflanzenmaterial im Schilfgürtel (Altschilf). Die flächendeckende Ermittlung der Verteilung und Mächtigkeit des Sediments im Seebecken ist zufolge der spezifischen Terrainverhältnisse – ca. 140 km<sup>2</sup> offene Wasserflächen und ca. 180 km<sup>2</sup> Schilfflächen – nur durch speziell zu adaptierende geodätische Messmethoden möglich. Eine auf diesen Grundlagen für das

gesamte Seebecken durchgeführte Inventur wurde auf österreichischer Seite in den Jahren 1985–1987 und auf ungarischer Seite in den Jahren 1994–1995 durchgeführt. Darauf aufbauend konnten das erste Mal in der Geschichte raumbezogener Forschung am Neusiedler See ein grenzüberschreitend homogener Datenbestand und in Folge digitale Oberflächenmodelle für Sedimentoberkante und Sedimentunterkante für das Seebecken tiefer als 116.50 m berechnet werden (Csaplovics 1989, Csaplovics et al. 1997). Dieser Datenbestand repräsentierte bis zur Fertigstellung des gegenständlichen Projektes die einzige grenzüberschreitend existierende raumbezogene Informationsgrundlage betreffend Höhenverhältnisse des Seebodens und Mächtigkeit der Sedimentlagen im Seebecken (Csaplovics et al. 2014a).

Das Projekt zur Geodätischen Neuerfassung des Seebodens des Neusiedler Sees (GeNeSee) baut auf diesem Vorgängerprojekt auf und erweitert den Ansatz auf Grundlage hochaktueller technologischer Entwicklungen sowohl in Bezug



sitzern um den See mit Nachdruck betriebene Unternehmungen zur Entwässerung des Seebeckens durch ein System von Kanälen, von denen einzig der sogenannte Einserkanal im Jahre 1909 fertiggestellt wurde. Die profilweise Vermessung des Seebodens auf Grundlage von Lotungen im Jahre 1901 im Auftrag der sogenannten Raabregulierungsgesellschaft (Rábaszabályozási Társulat), die insbesondere auch zum Zwecke der Entwicklung von Projekten zur Entwässerung des Sees gegründet worden war, sowie Projekte während der ersten Jahrzehnte des 20. Jahrhunderts waren durchwegs diesen Zielen gewidmet (Szonthag et al. 1903, Grünhut-Bartoletti 1935).

In den 1950er-Jahren kam es zu einem Er-wachen des naturschutzbezogenen Interesses am See, das in zunehmendem Maße neben die wasserwirtschaftlichen Interessen rückte. Durch außergewöhnlich niedrige Wasserstände zu Ende der 1950er- und zu Anfang der 1960er-Jahre begünstigt konnte 1963 eine Vermessung des Seebodens mittels Nivellement auf Grundlage von Querprofilen – mit Nachmessungen bis in die späten 1960er Jahre – auf österreichischer und ein wenig zeitversetzt auf ungarischer Seite durchgeführt werden (Kopf 1964 ff., Vízgazdálkodási Tudományos Kutató Központ 1981, Kováts 1982). Seit 1965 sorgt eine Schleusenregelung am Einserkanal für ein kontrolliertes Ablassen von Seewasser ab bilateral akzeptierten Pegelständen. Ein erstmals ausreichend dichtes Netz an Profilen in den Wasser- und Schilfbereichen des Seebeckens wurde mit damals hochaktuellen Methoden der geodätischen Vermessung – trigonometrische Höhenbestimmung und elektro-optische Distanzmessung – in Messkampagnen von 1985–1987 auf österreichischer und in analoger Messanordnung auf ungarischer Seite von 1994–1995 aufgenommen und führte zur Schaffung erstmals homogener grenzüberschreitend flächendeckender digitaler Modelle des Seebodens bezogen auf Sedimentoberkante und Sedimentunterkante und somit auch bezogen auf die raumbezogen dokumentierte Verteilung der Sedimentlagen und insbesondere deren Mächtigkeit. In diesem Zusammenhang gelang ein erstmals kartographisch umfassend dokumentierter Nachweis einer Sediment-Wallbildung entlang der unmittelbar seeseitigen Schilfzone, die in Abhängigkeit abnehmender Wasserstände zu lokal differenzierten Unterbrechungen des Wasseraustausches zwischen offenem Wasserkörper und einem Großteil des Schilfgürtels führt (Csaplovics 1989, Csaplo-



Abb. 2: Karte der Sedimentablagerungen im Seebecken in Stufen von  $\Delta h = 20$  cm, Stand 1987/95 (Csaplovics et al. 1997)

vics et al. 1997). Auf Grundlage dieser Modelle ist ein Trockenfallen fast des gesamten Schilfgürtels für Pegelstände tiefer als 115.00 m dokumentiert.

Um nunmehr aufbaubare Zeitreihen der Sedimentbildung und Sedimentverfrachtung (1985/87 – 1995/94 versus 2012/14) analysieren zu können, bedarf es gleichzeitig verstärkter Bemühungen, systematische Untersuchungen der Dynamik der Strömungsverhältnisse im offenen See, der Austauschmechanismen mit den seeseitigen Zonen des Schilfgürtels und der dadurch modellierbaren Prozesse der Sedimentation und deren Korrelation mit spezifischen Schilfstrukturen zu intensivieren (Józsa et al. 2008, Csaplovics et Schmidt 2011).

## 2. Hydroakustische Vermessung der freien Wasserfläche

Ziel der hydrographischen Vermessung ist eine erstmalige, einheitliche, beide Staatsgebiete umfassende hydrographische Vermessung der Schlammoberfläche sowie des festen Untergrunds der offenen Wasserflächen des Neusiedler Sees, dessen Hauptkanäle sowie des Hanságkanals bis zur (Schleusen-) Wehranlage. Die besonderen Herausforderungen bestehen dabei in den geringen Wassertiefen von maximal 1,7 m und dem, durch den häufig auftretenden Starkwind und der geringen Wassertiefe verursachten starken Wellengang mit brechenden Wellenkämmen und kurzen, durch Überlagerung deutlich überhöhten Wellen.

### 2.1 Echolotmess- und Systemkonfiguration

Voruntersuchungen im Jahr 2010 haben für die gegebenen Rahmenbedingungen folgende Mess- und Systemkonfiguration ergeben:

- Ausrüstung eines eigenen Flachwasser-Messbootes für Dreimann-/ Zweischicht-/ 7 Tage-Vermessungsbetrieb
- Rasterförmige Vermessung entlang von vordefinierten Profillinien
- GPS-RTK-Beschickung zur Positionierung und Einsatz von Motion-Sensorik für die Lagewinkeldefinition
- Einzelstrahl-Echolote (*single beam echo sounder*, SBES) liefern Informationen über die oberste Bodenschicht
- Parametrische Sedimentecholote (*sub bottom profiler*, SBP) dringen in die Sedimentschichten ein und liefern Informationen über den Schichtaufbau und der Lage des Seebodens (= Übergang zum kompakten Schlamm bzw. kompakten Sediment).
- Seitensicht-Sonaraufnahmen (*side scan sonar*, SSS) dienen zur Beschreibung der Morpholo-

gie des Seebodens zwischen den gemessenen Längs- und Querprofilen.

- Kalibrierung der SBES-Messungen in Gebieten mit Weichschlamm sowie der schichtdurchdringenden SBP-Messungen an repräsentativen Stellen des Sees durch bodenphysikalische Messungen der vertikalen Bodenschichtung.

### 2.2 Bootaufbau und Messfahrten

Am 22.8.2011 begannen am Neusiedler See die Vorarbeiten der Echolotmessung in Zusammenarbeit mit den Kollegen von der Hafencity Universität (HCU) Hamburg. Die „Biologische Station Neusiedlersee“ in Illmitz diente dabei als Vorort-Stützpunkt, an dem durch die beteiligte Arbeitsgemeinschaft Gesamtkonzept Neusiedler See (AGN) neben Büro und Werkstattmöglichkeiten auch personelle Unterstützung gegeben war. Der aufwendigste Teil der Vorbereitungen betraf dabei die Adaption des Kajütbootes der biologischen Station, um aus dem Multifunktions-Arbeitsboot ein hochtechnisiertes Messboot für die Echolotvermessung zu machen (Abbildung 3).

Der gesamte Kajüten-Innenraum wurde zu einem „Messlabor“ ausgebaut, und für die Aufnahme der fünf Echolotschwinger und der GNSS-Ausrüstung wurde basierend auf 3D-CAD-Konstruktionsplänen eine auf die Bootsgeometrie angepasste Trägerkonstruktion aus Aluminium gefertigt.

Die Daten sämtlicher Sensoren wurden unter der Nutzung der GPS-Signale als gemeinsame Zeitreferenz synchronisiert. Für die Zusammenführung der Navigations-, Echolot-, Sonar- und Schallgeschwindigkeitsdaten zur Datenauswertung und Visualisierung wurden die Softwarepakete EA 400, Innomar SES sowie QINSy-Survey verwendet.

Um die Topographie des Seebodens auch für vergleichende Untersuchungen mit historischen



Abb. 3: Messboot mit Echolotaufbauten (links), Arbeitsplatz Messboot (rechts)

Daten zu erfassen, wurden die Hauptmesslinien – wie auch schon in den vorangegangenen Seevermessungen – quer zur Seemittelachse definiert. Der Abstand der Querprofile wurde mit 100 m festgelegt. Längsprofile im 500 m Abstand, Umfahrungslinien der Inselgebiete sowie uferparallele Umfahrungslinien inkl. der Hafenbecken verdichteten das Messliniennetz (Abbildung 4). Insgesamt beträgt die Gesamtlänge der befahrenen Messlinien mehr als 2.000 km.

### 2.3 GNSS/INS-gestützte Positionierung

Der Einsatz eines RTK-GNSS-Ortungssystems ermöglicht eine absolute Bestimmung der Tiefenwerte, bei der höhenkritische Einflüsse, wie Wasserspiegel und Hub, verursacht durch Wellenbewegung sowie Sunk und Schwall vorbeifahrender Schiffe direkt und mit einer Genauigkeit von wenigen Zentimetern erfasst und in Echtzeit mit dem aktuellen Messdatensatz des Echolotes verknüpft werden (Heine, 2009).

In den ersten Projektwochen erfolgte die GNSS-RTK-Lösung durch Nutzung des VRS-Dienstes APOS des österreichischen Bundesamtes für Eich- und Vermessungswesens (BEV). Die Übertragung der Korrekturdaten im Grenzgebiet

Österreich-Ungarn mittels GSM/UMTS war jedoch unabhängig vom jeweiligen Provider instabil und lückenhaft, sodass ein eigener Basisstationsbetrieb in Breitenbrunn, Illmitz und Fertőrákos mit stabiler UKW-Funkdatenübertragung eingerichtet wurde.

Der durch die gegebene Windsituation häufig erzeugte starke Seegang mit kurzen, sich gegenseitig überlagernden Wellen bewirkt ruckartige Beschleunigungen und starke Lagewinkeländerungen des Messbootes.

Durch Integration einer IMU (Inertial Measurement Unit IXSEA OCTANS III, Wiederholgenauigkeit  $\pm 0.025^\circ$ ) und gemeinsamer Verarbeitung von GNSS/INS-Messungen kann einerseits die GNSS-basierte Positionsbestimmung stabilisiert, und andererseits die Raumlage der exzentrisch zur GPS-Antenne montierten Echolotschwinger für jeden Zeitpunkt präzise erfasst werden.

Durch die GNSS/INS-Positionierung wurde nicht nur das Genauigkeitspotenzial der Echolotsensorik für die Seebodenvermessung genutzt, sondern die Vermessungsarbeiten konnten in effizienter Weise – nicht nur an Tagen mit ruhiger See – durchgeführt werden.

### 2.4 Einzelstrahl-Echolotung

Während tiefe Frequenzen ( $< 15\text{ kHz}$ ) tiefer in den Untergrund eindringen, reflektieren die hohen Frequenzen besser auf leichtem, weichen Untergrund, wie Schlick oder Schlamm. Für den Neusiedler See unterteilt Preisinger (1979) die obersten Seebodenschichten entsprechend de-

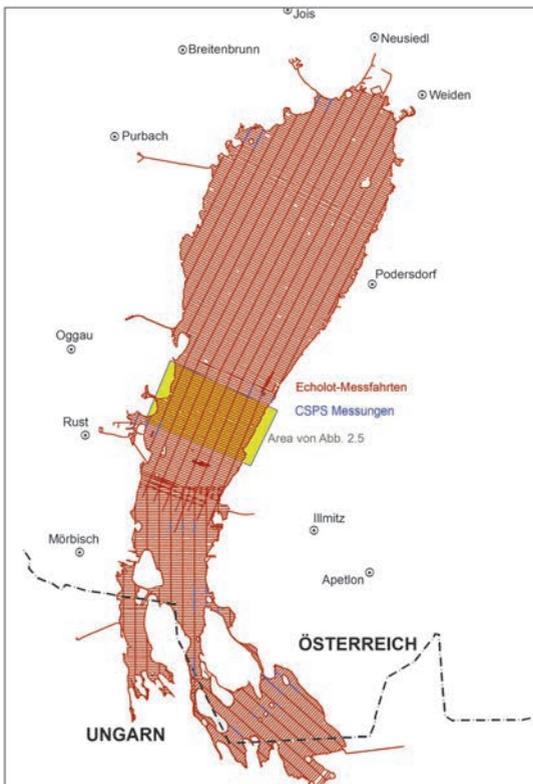


Abb. 4: links: 2.000 km Echolot-Messfahrten inkl. Kalibrierpunkt (CSPS); rechts: Messfahrten Detailansicht: Seepark Weiden

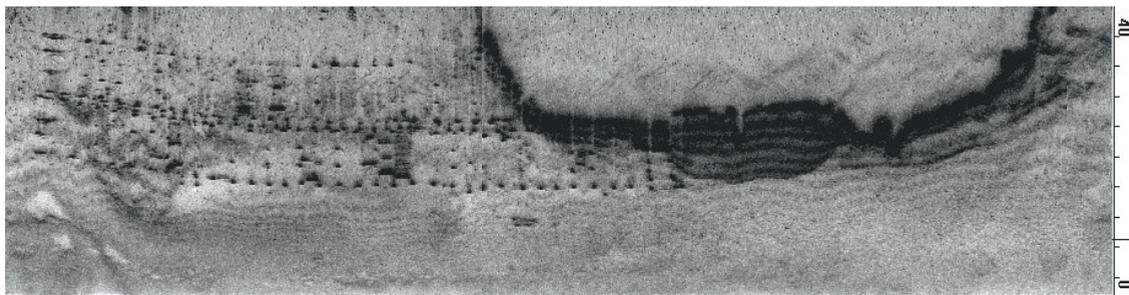


Abb. 5: Seitensichtsonaraufnahme in der Hafeneinfahrt Weiden. Pfähle der Bootssteganlage und südliche Uferkante der Seepark-Halbinsel I.

ren Wassergehalt in Weichschlamm (> 60 %vol.) und Schlamm (30 %vol. – 60 %vol.). Die Tiefenlage dieser Schichtgrenzen wurde durch Einzelstrahl-Echolotmessungen (SBES) zwischen 100 kHz und 710 kHz entlang der vorab definierten Profillinien erfasst.

## 2.5 Seitensichtsonaraufnahme

Um zusätzliche Information über die Morphologie des Seebodens zu erhalten, wurden die Bereiche links und rechts der Messprofile mittels Seitensichtsonaraufnahmen (SSS) abgebildet (Abbildung 5).

Eine besondere Herausforderung stellte dabei die Abstimmung der Pulsaussendungen („Trigger“) der hydroakustischen Schwinger der unterschiedlichen Hersteller dar. Im nichtgetriggerten Zustand sind die Sidescanaufnahmen nahezu unbrauchbar, da durchsetzt von „Störsignalen“. Nach erfolgreicher Triggerung der Signale konnte die SSS-Aufnahme ohne Störsignale erfolgen. Je nach Wassertiefe und Morphologie konnte eine nutzbare Breite von 25 m – 40 m nach jeder Seite der Profillinie erfasst werden (Abbildung 5).

Mit dem Auswerteprogramm EASSM (Side Scan Mosaicing) wurden die einzelnen Streifen-elemente georeferenziert und zu einer „Sidescan-Bildkarte“ des Seebodens zusammengeführt.

## 2.6 Sub Bottom Profiler: Sedimentecholotung

Sedimentecholote, auch bekannt als Sub Bottom Profilers (SBP), sind in ihrer Struktur einem Einzelstrahlcholot sehr ähnlich, arbeiten allerdings mit wesentlichen niedrigeren Frequenzen. Ziel ist es ein Querschnittsprofil des Gewässerbodens zu erfassen, das die Struktur der Sedimentschichtungen aufzeigt (Abbildung 6).

Um die Sedimentmächtigkeiten im Neusiedler See zu bestimmen wurde ein Sedimentecholot vom Typ Innomar SES 2000 eingesetzt. Das Gerät nutzt den parametrischen Effekt um aus zwei hochfrequenten Wellen (um die 100 kHz) eine tiefe Frequenz zwischen 4 kHz und 12 kHz zu erzeugen. Die hier genutzte 10 kHz Frequenz dringt in das Sediment ein und zeigt auch Reflexionen von tiefer liegenden Schichten auf. Dies ermöglicht die Detektion der Schlammmächtigkeit und des Bodenaufbaus im Neusiedler See.

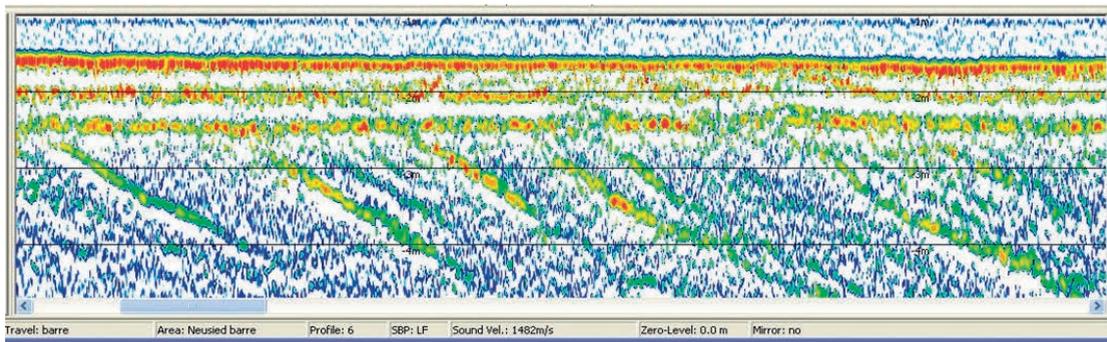


Abb. 6: Echogramm einer sub-bottom-profiler-Messung: Die Eindringtiefe in den Seegrund beträgt hier etwas mehr als 3 m. Die Reflexionen der Schallwellen (rot, gelb, blau = stark; mittel, schwach) weisen hier auf einen zweischichtigen Seebodenaufbau hin, bei dem sich unter der eigentlichen Schlammschicht noch eine Schicht von teilkonsolidiertem Schlamm befindet. Der vollständig konsolidierte Seeboden weist hier eine schräge Schichtung auf.

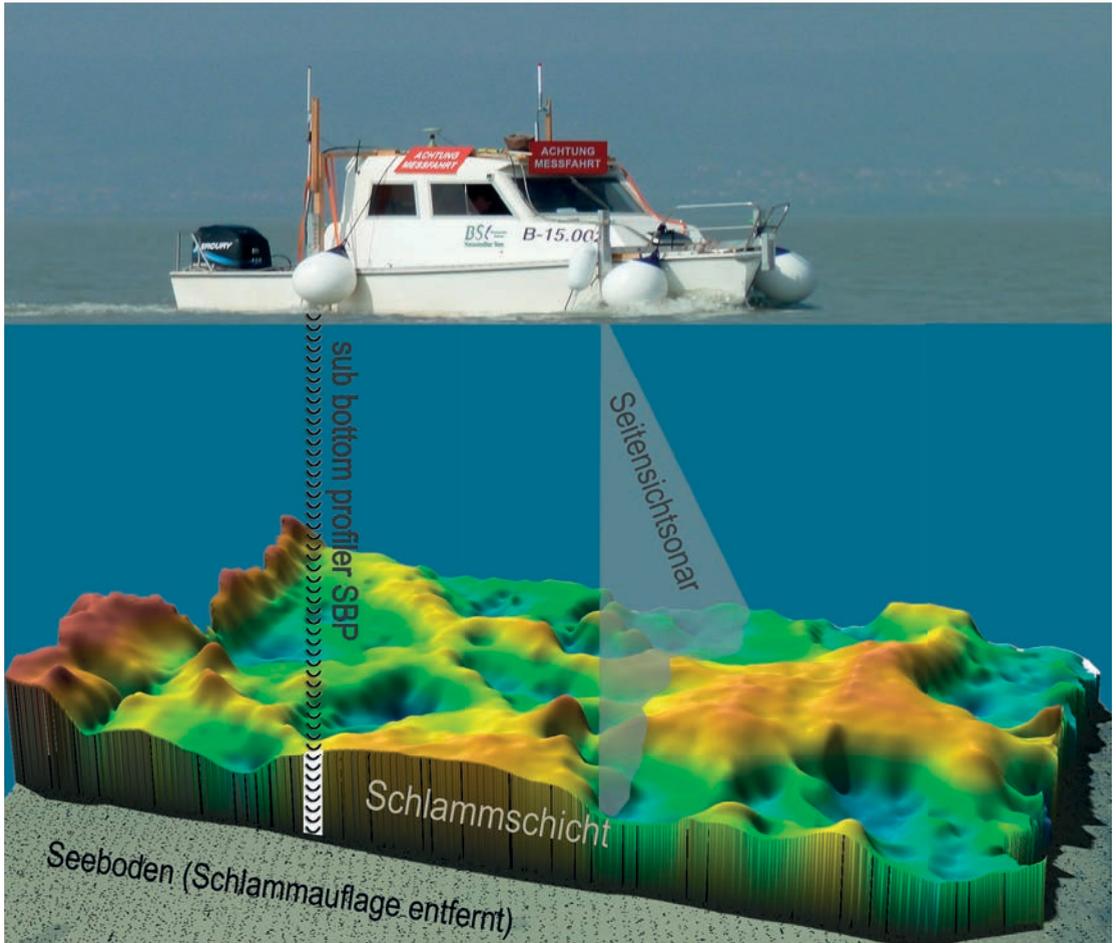


Abb. 7: Prinzipskizze der hydrographischen Vermessung des Neusiedler Sees

Um die erfassten Daten für die Schichtenauswertung nutzen zu können ist es nötig diese im Vorfeld zu prozessieren, wie fehlerhafte Positionsdaten zu eliminieren oder das das Signal/Rausch Verhältnis des Echogramms durch Anpassung von Power und Gain zu verbessern. Anschließend können die Tiefenlinien digitalisiert werden, die wiederum die Basis für die digitale Geländemodellierung darstellen. Gerade das Digitalisieren der tiefen Frequenz ist äußerst aufwendig, da der Verlauf der Sedimentschichten von Fall zu Fall unterschiedlich interpretiert werden muss. Für diese Aufgabe gibt es leider noch keinen zufriedenstellend arbeitenden Algorithmus, sodass die Arbeit größtenteils von Hand erledigt werden musste.

Das parametrische Sedimentecholot lieferte ab einer Wassertiefe von einem Meter verlässliche Informationen über die Sedimentschichtung des Seebodens. Schlammschichtdicken im Meterbe-

reich sowie nachfolgende Bodensedimentstrukturen von mehreren Metern sind in den Echogrammen in hochauflösender Form enthalten.

Um die Interpretation der Sedimentschichtung zu validieren, wurden die Echolotdaten mit Messungen aus bodenphysikalischen Geräten verglichen. Ziel ist es, die entsprechenden Schichten im Echogramm über die bodenphysikalischen Untersuchungsergebnisse durch Anpassung der Schallgeschwindigkeitswerte für den Signalweg (Wasser-Schlamm) zu „kalibrieren“ (siehe Kap. 3). Die Koordinaten der Probenpunkte wurden so gewählt, dass sie sich auf zwei sich kreuzenden Profilen der Echolotmessungen befinden und sich möglichst gut über den See verteilen. Die bodenphysikalischen Messwerte wurden in die Echogramme integriert und graphisch repräsentiert.

Durch Anpassung der Schallgeschwindigkeit in den jeweiligen Seebodenzonen ist eine Genauig-

keit der SBP-Tiefendigitalisierung von besser als  $\pm 10$  cm möglich.

Durch die Kombination von hydroakustischen Messmethoden und bodenphysikalischer Messungen war es möglich, einen vollständigen, qualitativ hochwertigen Datensatz höchstmöglicher Auflösung zur Generierung Digitaler Geländemodelle (DGM) der Schlammoberfläche und des Seebodens (Abbildung 7), und somit zur Bestimmung der Schlammverteilung dieses 150 km<sup>2</sup> großen und weniger als 2 m tiefen Steppensees zu erzeugen.

### 3. Einzelpunktmessungen mittels bodenphysikalischem Messsystem

#### 3.1 CSPS-Systemaufbau

Als Referenz für die hydroakustische Schlamm- und Seebodendetektierung, sowie für die Schlammickenbestimmung im Uferbereich und des Schilfgürtels wurde der Profilaufbau des Bodens mit einem kombinierten bodenphysikalischen Messsystem (CSPS: Combination of Soil Physical Sensors) bestimmt, das aus einem kapazitiven Sensor und einem Penetrometer synchronisiert

mit einer satellitengestützten Verortungseinheit (GNSS\_RTK) besteht.

Das CSPS detektiert mittels dynamischer Messungen von vertikalen Profilen die Schlammoberfläche, den konsolidierten Seeboden und weitere seichte, konsolidierte Sedimentschichten mit hoher Verortungsgenauigkeit. Die Vorteile des angewendeten Systems sind in situ Bodenparametermessungen ohne aufwendige Probenentnahme, die Aufzeichnung eines kontinuierlichen Profils mit Ausweisung signifikanter Schichtungen und die Ausgabe von reproduzierbaren physikalischen Werten (Heine et al., 2014).

Im Detail ist das CSPS aus vier Komponenten aufgebaut: (1) der Hydra Probe (Stevens Water Monitoring System), einem kapazitiven Sensor basierend auf „Frequency Domain Reflectometry“ (FDR, 50 MHz), der über die dielektrische Permittivität indirekt den volumetrischen Wassergehalt  $\theta$  (m<sup>3</sup>m<sup>-3</sup>) anzeigt; (2) einem modifizierten Penetrometer (Eijkelkamp), der den Eindringwiderstand  $PR$  (MPa) in den Boden misst; (3) einer GNSS-RTK Positionierung, und (4) einem Datenlogger (CRX23, Campbell) und einer eigens entwickelten

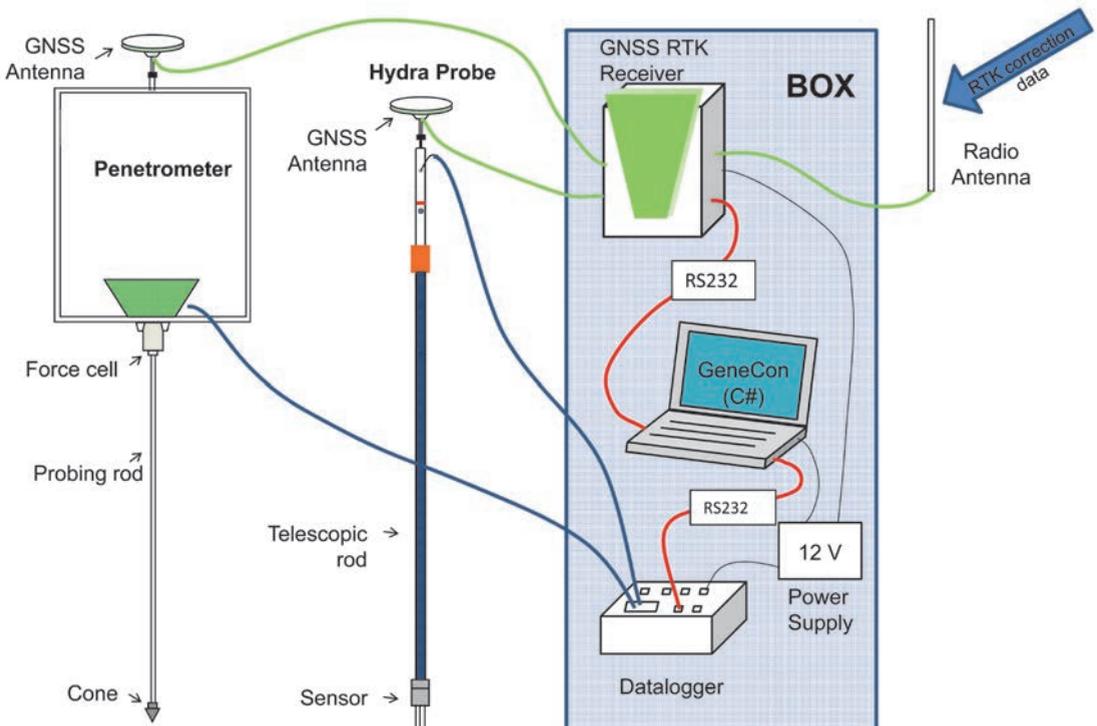


Abb. 8: Schema des kombinierten bodenphysikalischen Messsystems CSPS

C# Software, welche die Sensormessdaten mit den GNSS-RTK Positionsdaten synchronisiert, speichert und weiterverarbeitet (Abbildung 8). Dazu erfolgte noch eine Adaption der bodenphysikalischen Sensoren für deren außergewöhnliches Einsatzgebiet am See. Der zylindrische Körper der Hydra Probe und die GNSS Antenne wurden jeweils an einem Ende einer Teleskopstange fixiert. Beim Penetrometer wurde die Kraftmesszelle direkt mit dem Datalogger verbunden, das Messgestänge auf 5 m Gesamtlänge variabel kombinierbar verlängert, und die GNSS Antenne an einem Alurahmen zentrisch über der Konuspitze angebracht.

Die Hydra Probe misst direkt den Realteil der temperaturkorrigierten relativen, komplexen dielektrischen Permittivität  $\epsilon_{\text{TCORR}}$ . Der signifikante Unterschied der dielektrischen Permittivität in den Medien Luft-Wasser-Sediment erlaubt eine eindeutige Bestimmung der Schichtgrenzen, d.h. der Wasseroberfläche und der Schlammoberfläche.  $\epsilon_r$  in Luft ist 1 %, in Neusiedler See Wasser 70–80 %, und im Sediment 4–7 %. Anhand von  $\epsilon_{\text{TCORR}}$  wird über eine Kalibrierfunktion der volumetrische Wassergehalt  $\theta$  ( $\text{m}^3\text{m}^{-3}$ ) ausgegeben. Die Kalibrierfunktion wurde im Labor für repräsentative Schlammproben vom Neusiedler See ermittelt, womit die vorherrschende heterogene Schlammzusammensetzung berücksichtigt wurden (d'Amboise, 2012). Daraus ergibt sich ein Hydra Probe Messfehler von  $\pm 1.5$  % für  $\epsilon_{\text{TCORR}}$ . Die Kalibrierung des vol.  $\theta$  auf den Schlamm des Neusiedler Sees resultiert in ein vol.  $\theta < 1$  für Seewasser, weil die relativ hohe elektrische Leitfähigkeit und die hohe anorganische Trübung des Seewassers eine Reduktion von  $\epsilon_r$  und somit von  $\theta$  bewirken.

Als zweiter bodenphysikalischer Sensor wird der Penetrometer eingesetzt, der den Eindringwiderstand  $PR$ , als erforderliche Kraft zum Eindringen in den Boden, wiedergibt. Zur Umrechnung der abgelesenen Ausgangsspannung der Penetrometer Kraftzelle in MPa wurde das aus Laborkalibrierung ermittelte lineare Verhältnis aus der abgelesenen Ausgangsspannung zum aufgebrauchten Gewicht um die mittlere gemessene Basisspannung sowie den variablen Faktor des Stangengewichts korrigiert und in MPa umgerechnet (Kogelbauer & Loiskandl 2014).

### 3.2 Messablauf und Auswertung

Der Messablauf mit dem CSPS im Feld erfolgt immer nach demselben Schema. Die Hydra Probe Messung startet oberhalb der Wasseroberfläche

mit den Hydra Probe Messstäben noch in der Luft. Danach wird der Sensor langsam ins Wasser eingetaucht und kontinuierlich tiefer versenkt, bis ein weiteres Eintauchen aufgrund der angetroffenen kompakten Schlammschicht nicht mehr möglich ist. Die Penetrometer Messung startet im Wasser oder losen Schlamm, wo kein oder nur minimaler Eindringwiderstand aufgezeichnet wird. Ab diesem Initialisierungspunkt wird er kontinuierlich weiter eingetaucht bzw. in die Schlamm- und Bodensedimentschicht mit Muskelkraft hineingepresst. Steigt der Eindringwiderstand an einer bestimmten Tiefe rapide an, so weist dies auf eine dort vorherrschende konsolidierte Sedimentschicht hin. Ist diese Schicht von geringer Mächtigkeit so wird diese durchstoßen, und es kann eine Messung der darunter liegende Schichten erfolgen. Um die Variabilität innerhalb der Schlammschicht und der Seebodentopographie zu berücksichtigen (wie eingebettete Steine oder Wurzelstücke im vertikalen Messprofil), wurden mit jedem Sensor mindestens drei Messungen in Folge innerhalb eines Radius von rund einem Meter durchgeführt (= Punktgruppe). Zur Validierung der angewendeten Echolot-Schallausbreitungswerte für Schlamm (sub-bottom-profiler) wurden an 61 vorab festgelegten Punkten im See CSPS-Messungen durchgeführt. Als Messplattform diente dabei eine Arbeitszille, welche an den Messpunkten für die Zeit der Messung stabil verankert wurde. Schlamm- und Sedimentkerne wurden an den vordefinierten Referenzpunkten mit einem Coresampler gezogen, indem ein PVC Rohr in den Schlamm gedrückt und in Lage und Höhe verortet wurde. Diese Kerne wurden qualitativ (Farbe, Wurzeln) und quantitativ (Korngrößenverteilung, Textur, gesamter und anorganischer Kohlenstoff, Stickstoff, pH, elektrische Leitfähigkeit und Mineralogie) für die Kalibrierung der CSPS Sensoren analysiert.

Die softwaregestützte, halbautomatische Zuweisung der Schichten für die Wasser-Schlammgrenze (Schlammoberfläche) und dem Seeboden bei  $\sim 0.8$  MPa erfolgt anhand ermittelter Parameter. In einem weiteren Schritt wurden die Schichtzuweisungen der Einzelpunkte je Gruppe für die Weiterverarbeitung (z.B. in einem DEM) als Mittelwert zusammengefasst und die mittlere Schlammmächtigkeit für diesen Ort ausgegeben. Eine anschauliche visuelle Aufbereitung der Profildaten unterstützt den manuellen Interpretationsprozess bei der Schichtzuweisung an den einzelnen Messpunkten.

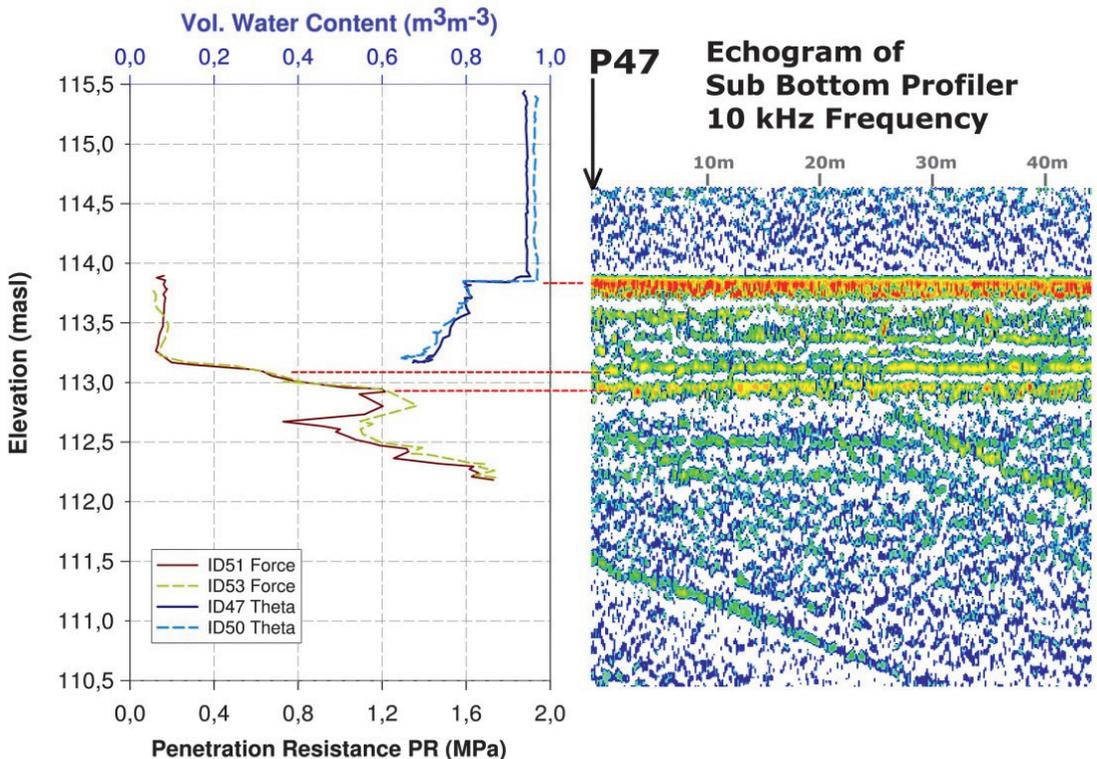


Abb. 9: CSPS-Profil (links) und SBP-Echogramm (rechts) am Referenzpunkt P47

### 3.3 CSPS-Referenzprofile zur SBP-„Kalibrierung“

Beispielhaft sei hier das Profil des Referenzpunktes P45, wobei zwei Messwiederholungen je Sensor im CSPS Profil dargestellt sind, im Detail diskutiert (Abbildung 9).

Beim Übergang von Wasser auf Schlamm fällt der Wert rapide auf ein vol.  $\theta$  von  $<0.80$ . Dieser Übergang wird auch als Lutocline bezeichnet, mit einem hohen Dichtegradienten an der Grenzfläche zwischen Wasser oberhalb und Schlamm unterhalb (Wolanski et al. 1989). Die Lutocline tritt vor allem unter einem hohen Anteil an Feinsedimenten auf, und manifestiert sich an einer ausgeprägten Stufenstruktur im Vertikalprofil (Metha&McAnally, 2008). Aufgrund der Elektrodenlänge des Hydroprobe-Sensors von 5.6 cm erfolgt im CSPS Profil der Werteübergang nicht sprunghaft sondern schleifend, bis die Messspitzen völlig im neuen Medium eingetaucht sind. Darunter befindet sich ein 0,72 m mächtiger Schlammkörper mit annähernd konstantem vol.  $\theta$ . Dennoch weisen minimale Schwankungen von vol.  $\theta$  auf eine Schichtung im Schlammkörper hin. Beim weiteren Eindringen

in der Schlammschicht sinkt der vol.  $\theta$  Wert stark ab, bis ein weiteres Eindringen der Hydra Probe durch den bereits hohen Verdichtungsgrad des Schlammes nicht mehr möglich ist. Der an dieser tiefsten, versenkten Stelle gemessene vol.  $\theta$  variiert abhängig vom vorherrschenden Verhältnis der Feinsedimente Sand-Schluff-Ton (mittlerer vol.  $\theta \sim 0.57$ ). Dieser sinkt bei einem Sandgehalt  $>6\%$  auf einen durchschnittlichen vol.  $\theta$  von 0.54 ab (Kogelbauer & Loiskandl, 2014). In diesem Bereich erhöhter Verdichtung beginnt der Messbereich des Penetrometers, der hier erste signifikante Signale aufgrund des Eindringwiderstandes liefert. Im Gegensatz zum nicht messbaren Eindringwiderstand im losen Schlamm darüber deutet der bereits messbare Eindringwiderstand auf einen schwach konsolidierten Bereich im Schlamm hin. Der Eindringwiderstand steigt mit einer konstanten Neigung bis zum ersten Peak, der als Seeboden definiert ist und die obere Grenzfläche einer bereits konsolidierten Sedimentschicht darstellt. Auf der freien Seewasserfläche liegt dieser erste Peak zu meist bei  $\geq 0.8$  MPa. Der Penetrometer detektiert am Referenzpunkt P42 unter der Schlammschicht

jedoch zwei Layer im Bereich des Seebodens, welche auch im Echogramm aufgrund der starken Signalreflexion in rot-gelber Farbe erkennbar sind (Abbildung 9 rechts). Der rapide Anstieg des Eindringwiderstandes deutet auf einen geringmächtigen Übergangsbereich vom teilkonsolidierten Schlamm hin. Dabei handelt es sich um eine kompakte, noch nicht vollständig konsolidierte bodennahe Schicht. Kurz gesagt, am Punkt der Neigungsänderung befindet sich die Grenzfläche die in eine tieferliegende vollständig konsolidierte Schicht gleichbleibender Sedimentcharakteristika übergeht. Innerhalb einer Sedimentschicht ist die Neigung des Eindringwiderstandes aufgrund gleichbleibender Reibung konstant. Anhand der Neigungsübergänge können auch tieferliegende vollständig konsolidierte Sedimentschichten angezeigt werden.

Die Ergebnisse und Vergleiche mit den SPB-Echogrammen an den 61 Referenzpunkten zeigen, dass das neue, adaptierte CSPA als Referenz für die Echotmessungen und für deren Schallgeschwindigkeitsanpassung in feinsedimentreichen Gewässern eingesetzt werden kann.

### 3.4 CSPA-Einsatz im Schilfgürtel und Uferbereich

Das CSPA-System bewies sich im Zuge des Projektes neben der (1) „Kalibrierung“ von SBP-Echotmessungen auch als wertvolles Tool zur Datenerhebung (2) in ufernahen Flachwasserbereichen mit einer Wassertiefe kleiner 0,5 m zur Beschreibung der Ufertopographie, (3) in Braun- und Freiwasserflächen innerhalb des Schilfgürtels und (4) im Schilf. Um die Schlamm- und Seebodentopographie am Übergang vom Schilf zum See zu beschreiben, wurden im Uferbereich kurze, orthogonal auf die Uferlinie verlaufende Transekte gemessen. Dabei wurde im Schilf, an der Schilfkante und auf der freien Seewasserfläche gemessen. Zusammen mit den Side Scan Sonar Daten kann damit die Topographie des Uferbereichs beschrieben werden und Verlandungsbereich ausgewiesen werden.

Der Aufbau des Systems und die eingesetzten Sensoren ermöglichen damit eine einheitliche Schichtzuweisung in den verschiedenen Ökotope am See. Die Ökotope zeigen charakteristische CSPA Profile (Kogelbauer&Loiskandl, 2014), die Rückschlüsse auf den momentanen Wasserkörperzustand zulassen und Verlandungstendenzen aufzeigen. Anhand der Hydra Probe kann durch den indirekt gemessenen vol.  $\theta$  auch

auf den Salzgehalt in den Ökotope und auf die windinduzierte anorganische Trübung durch aufwirbeln von Feinsedimenten auf der freien Wasserflächen geschlossen werden. Der mittlere vol.  $\theta$  vom Wasser zeigt aufgrund des charakteristisch hohen Salzgehaltes, auch belegt durch die dazu proportionale hohe elektrische Leitfähigkeit, niedrigere Werte für das Schilf (0.80) und das Braunwasser (0.81). Der höchste mittlere vol.  $\theta$  vom Wasser (0.91) wird auf den freien Wasserflächen im Schilf gemessen, unter anderem weil hier die anorganische Trübung schwächer ist als auf der stark windexponierten freien Seewasserfläche (0.87) (Kogelbauer&Loiskandl, 2014). Aus vorliegenden Daten ist auf der freien Seewasserfläche ein deutlicher Einfluss des Windes auf den vol.  $\theta$  im Wasser durch aufwärtsgerichtete Diffusion von feinen Sedimentpartikeln aus dem Schlammkörper erkennbar (Kogelbauer & Loiskandl, 2014). Der Wind reduziert den vol.  $\theta$  vom Wasser, dennoch bleibt die Lutocline erhalten und in ihrer Höhe unverändert, lediglich der  $\theta$ -Gradient wird aufgrund höherer Trübung geringer (Kogelbauer&Loiskandl, 2014). Die präzise Ausweisung der Schlammoberfläche anhand der Lutocline bleibt damit gewährleistet. Ein tendenzieller Zusammenhang des maximal erreichbaren Eindringwiderstandes der Seebodengrenzfläche mit der vorherrschenden Mineralogie ist erkennbar, der jedoch noch geprüft werden muss. Dabei ist das Verhältnis der Anteile an Quarz, Feldspäten, Calcit und Dolomit maßgeblich.

### 4. Erstellung der Digitalen Oberflächenmodelle für die Sedimentoberkante und Sedimentunterkante

Zur Erstellung der digitalen Oberfläche für die Sedimentoberkante und Sedimentunterkante im Bereich des Neusiedler Sees sowie die Einbindung der Geländemodelle im Schilfbereich wurden Datensätze von drei verschiedenen Messmethoden herangezogen: (1) Multi-frequente Echot-Messungen (100 m bzw. 500 m Längs- bzw. Querprofilabstand) im offenen Seebereich, (2) Punktmessungen zur Bestimmung der Sedimentoberkante und Sedimentunterkante, sowie (3) vorhandene ALS Messungen in Österreich (Befliegung des Landes Burgenland) und im Projekt GeNeSee neu erfasste ALS-Messungen im ungarischen Seebereich. Eine Übersicht aller vorhandenen Messdaten ist der Abbildung 10 zu entnehmen. Alle Messdaten wurden im ETRS89 erfasst und anschließend in den österreichischen

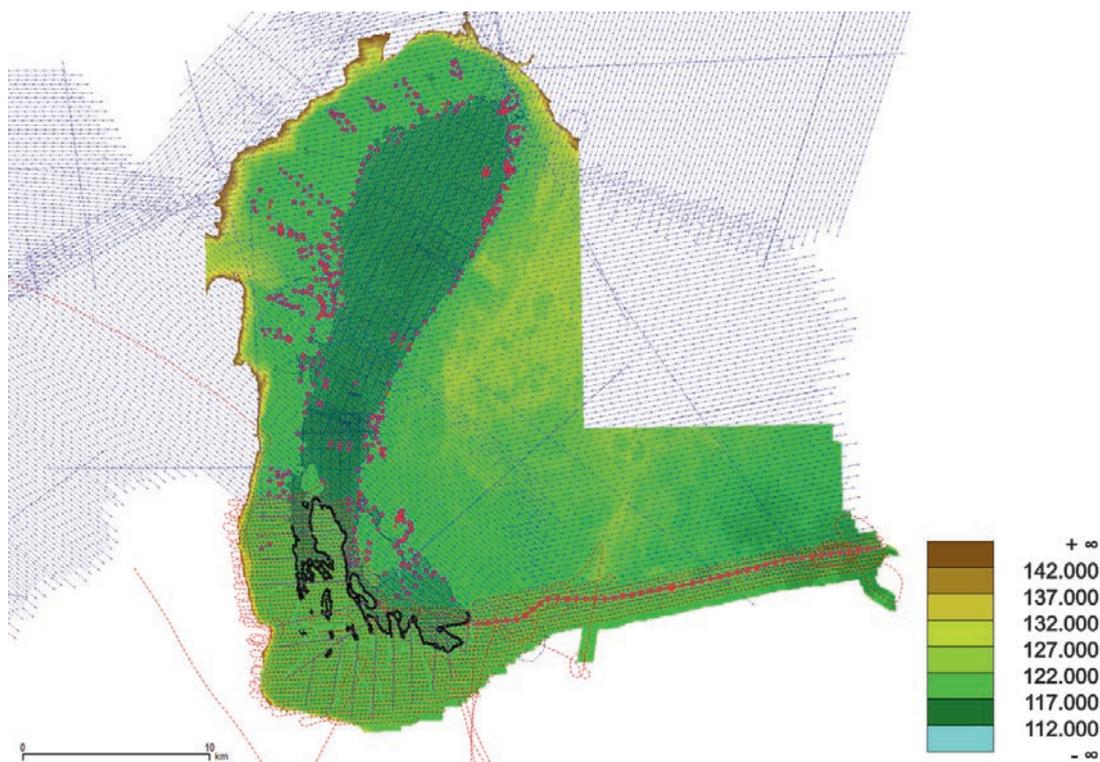


Abb. 10: Echolot-Messungen (Längs- und Querprofilfahrten im Seebereich); Einzelpunktmessungen (Magenta und Schwarz), ALS Befliegung Österreich (blaue Flugstreifen) und Ungarn (rote Flugstreifen); im Hintergrund ist das höhenkodiert Modell der Sedimentoberkante zu sehen.

Referenz-Koordinatenrahmen GK-M34 in das österreichische Gebrauchshöhensystem transformiert. Mit Unterstützung des Bundesamtes für Eich- und Vermessungswesen ist es gelungen, dieses System in den ungarischen Bereich des Neusiedler Sees zu erweitern. Um einen homogenen ALS Datenbestand zu erhalten wurden im Rahmen der Streifenausgleichung der neu erfassten ungarischen ALS Daten idente Passflächen genutzt (bereits bestimmte Passflächen der Burgenländischen Laserscanning-Befliegung im Nord- und Mittelburgenland).

Um die ALS-Daten im Bereich des Gewässers zu maskieren wurde anhand eines normalisierten Oberflächenmodells (nDOM), einer Echo-Ratio-Karte (Höfle et al., 2009) und manueller Überarbeitung (v.a. in den Hafengebieten) eine Schilfmaste erstellt. Im Schilfbereich wurden die ALS-Daten nach entsprechender Filterung (Berücksichtigung der Echoweite im Schilfbereich) zur Erstellung des Modells der Sedimentoberkante herangezogen.

Um ein möglichst homogenes Modell im Seebereich aus den Echolotdaten (sehr dichte

Messungen innerhalb eines Profiles (Punktabstand wenige Dezimeter) und Profilabstände von ca. 100 m) und den Einzelpunktmessungen zu erhalten, war die Berechnung eines Verdichtungsgitters notwendig. Dazu wurde anhand von ausgedünnten Echolotdaten (ein Punkt innerhalb eines 2.5 m Gitters) und der Einzelpunktmessungen ein Verdichtungsgitter mit einer Gitterweite von 50 m abgeleitet, dass in der Folge anhand der ausgedünnten Messungen und des 50 m Gitters noch auf ein 20 m Gitter verdichtet wurde um die darauffolgende Interpolation des Gesamtmodells anhand aller Messdaten zu stützen.

Anhand aller Echolotdaten, der Einzelmessungen und des 20m Verdichtungsgitters konnte ein finales Oberflächenmodell sowohl für die Sedimentoberkante und Sedimentunterkante erstellt werden. Die verwendete Datengrundlage zur Interpolation der finalen Modelle ist in dem in der Abbildung 11 dargestellten Ausschnitt zu sehen. Das finale Modell der Sedimentoberkante ist der Abbildung 12 zu entnehmen, während Abbildung 13 das Modell der Sedimentmächtigkeit darstellt.

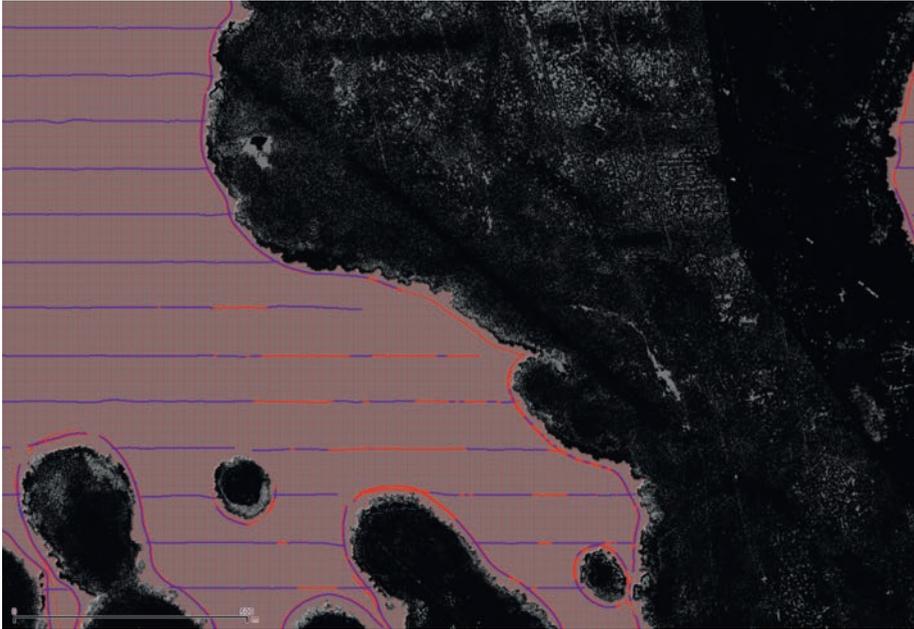


Abb. 11: ALS-Daten innerhalb der Schilfmaske (Schwarz), Echolot-Messungen (Sedimentoberkante (Blau, durchgehend vorhanden) überlagert mit den erfolgreichen Messungen der Sedimentunterkante (Rot) und 2.5 m Verdichtungs-gitter (Rote Gitterpunkte).



Abb. 12: Finales Modell der Sedimentoberkante im Bereich des Neusiedler Sees und des Einser Kanales erstellt aus den Echolot-Daten, den Einzelpunktmessungen und ALS-Daten.

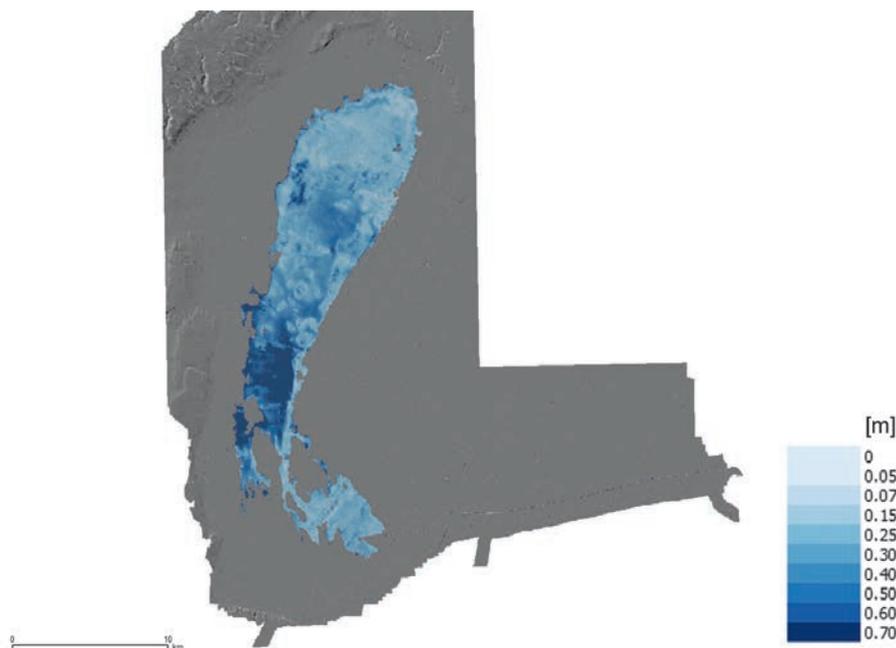


Abb. 13: Modell der Sedimentmächtigkeit im Bereich des Neusiedler Sees und Einser Kanals (Differenzmodell der beiden Sedimentmodelle, Legende in [m]).

## 5. Zusammenfassung und Ausblick

Beruhend auf den flächendeckend für das gesamte Seebecken (ca. 320 km<sup>2</sup>) generierten digitalen Oberflächenmodellen der Sedimentlagen und deren Mächtigkeit mit Stand 2014 sowie auf den ebenfalls flächendeckend digital vorliegenden Seemodell-Daten mit Stand 1987/1995 können die wichtigsten Schritte für eine nachhaltigen Dokumentation und Analyse der Dynamik des Seeboden-Reliefs erstmals operationell und nachvollziehbar, das heißt für die lokal-regionalen Akteure direkt nutzbar, aufbereitet und bereitgestellt werden. Das Ziel, die hydromorphologischen Besonderheiten des Seebeckens im offenen See und in den Schilfbereichen in ihrer einzigartigen Charakteristik zu erhalten, wird durch das Monitoring des Oberflächenreliefs des gesamten Seebeckens (Sedimentoberkante und Sedimentunterkante) und der angrenzenden Bereiche des Hanság sowie der resultierenden Sedimentmächtigkeit auf Grundlage der digitalen Geländemodelle aus dem gegenständlichen Projekt entscheidend unterstützt. So ist mit Stand 1995 für den österreichischen Seeteil eine Relation von Wasservolumen zu Sedimentvolumen von 51 : 49 bei Pegelstand 115,50 m. ü. A., für den ungarischen Seeteil von 18 : 82 bei Pegelstand 115,30 m ü. A. nachgewiesen (Csaplovics et al. 1997). Mit

Vorliegen der Projektergebnisse aus GeNeSee werden das Wissen um die hydromorphologische Dynamik des Seebeckens und die Möglichkeiten von Voraussagen/Simulationen von Einflüssen von Management-Maßnahmen und von natürlichen Prozessen durch die Modellierung von Dynamismen der Sedimentbildung und der Sedimentverlagerung mit Hilfe von Zeitreihen auf Grundlage von historischen und aktuellen Datenbeständen ausgebaut. Ein Monitoring der Veränderungen sollte durch periodische Datenaufnahmen im Intervall von ca. 10 Jahren sowie damit einhergehende aktualisierte Modellierung von Szenarien der Sedimentation möglich gemacht werden. Um den Einfluss von Szenarien klimatischer und hydromorphologischer Veränderungen auf die hydrodynamischen Eigenschaften (Wellen, Wassertiefen, Strömungen) des Sees besser abschätzen zu können, sollten auf Grundlage der vorliegenden und sukzessive auszubauenden Zeitreihen digitaler Oberflächenmodelle numerische Modelle weiterentwickelt werden, die aus Windstress über der Seefläche, aus Wellengang und Strömungsgradienten in Funktion von Wassertiefen deren Einfluss auf Sedimenttransport und auf resultierende Prozesse von Ablagerung und Abtragung in den seeseitigen Zonen des Schilfgürtels ableitbar machen. Um Maßnahmen zur Verhinderung einer

unkontrollierten Verlandung des Schilfgürtels zu unterstützen, können auf Grundlage der digitalen Oberflächenmodelle der Sedimentlagen trockenfallende Flächen im Schilfgürtel in Abhängigkeit des entsprechend aktuellen Wasserspiegels ermittelt und Szenarien des Trockenfallens in Funktion von Wasserspiegelschwankungen simuliert werden. Des Weiteren können Aufgaben der Bewahrung eines ökologischen Gleichgewichtes betreffend Wasserhaushalt des Sees durch die gezielte Analyse der Seebodenmodelle nach Veränderungen der Sedimenthöhen und Sedimentvolumina entlang des seeseitigen Schilfrandes und durch die damit verbundene Modellierung von Austauschprozessen zwischen Schilf- und Seewasser unterstützt werden.

Alles in allem zeigen die durchwegs positiven Erfahrungen im Rahmen der bilateralen wissenschaftlichen Kooperation zwischen österreichischen und ungarischen Forschungs- und Verwaltungseinrichtungen, dass angewandte Forschung auch in diesem thematischen Kontext das ideale Mittel zum Zweck, das heißt zur Schaffung von nachhaltig einsetzbarer, auf wissenschaftlich korrekten Grundlagen beruhender Implementierung angewandter Forschung im Verantwortungsbereich lokal und regional wirkender Akteure darstellt. Dies im konkreten Anwendungsfall zu bewerkstelligen erfordert die Einrichtung einer bilateral strukturierten und agierenden Monitoring-Gruppe, die grenzüberschreitende, auf homogene Mess- und Auswerteverfahren gründende Inventuren und Analysen aller raum-zeitlich variablen Prozesse der Schilfentwicklung, der Sedimentation, der Schilfnutzung und der raumrelevanten Landnutzung im Naturraum Neusiedler See – Seewinkel – Hanság plant, koordiniert und durchführt.

#### Danksagung

Das Projekt-Team GeNeSee bedankt sich beim Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (BEV), Abteilung Grundlagen und namentlich bei DI Norbert Höggerl, Dr. Diethard Ruess und DI Erich Imrek bei der Unterstützung zur Realisierung des Koordinatenreferenzrahmens (Erweiterungen des Geoids und Höhen-Grid im ungarischen Bereich des Neusiedler Sees), den zur Projektabwicklung notwendigen Präzessionsnivelement-Messungen entlang des Einserkanals und der Analyse der österreichischen und ungarischen Nivelement-Messungen rund um den Neusiedler See.

#### Referenzen

- Csaplovics, E. (1989): Die geodätische Aufnahme des Bodens des Neusiedler Sees. Wiss. Arbeiten aus dem Burgenland, Band 84. Burgenländisches Landesmuseum. Eisenstadt.
- Csaplovics E., Bácsatyai L., Márkus I., Sindhuber A. (1997): Digitale Geländemodelle des Neusiedler Seebeckens. Wissenschaftliche Arbeiten aus dem Burgenland, Band 97. Burgenländisches Landesmuseum. Eisenstadt.
- Csaplovics, E., Schmidt, J. (2011): Mapping the Austrian reed bed of Lake Neusiedl by means of airborne optical scanner imagery. In: Csaplovics, E., Schmidt, J. (Eds) International Symposium on Advanced Methods of Monitoring Reed Habitats in Europe, Illmitz 25-26 November 2010. Rhombos, Berlin 2011 (Fernerkundung und angewandte Geoinformatik 9), pp 55-62.
- Csaplovics, E., Krámer T., Józsa J., Homoródi K., Kiss M. (2014): Hydromorphologie. In: Wolfram, G., Déri, L., Zech, S. (Hrsg.) Strategiestudie Neusiedler See, Phase 1. Studie i.A. der Öst.Ungar.Gewässerkommission, Wien, Szombathely, pp 23-33.
- Csaplovics, E., Király, G., Márkus, I. (2014b): Entwicklung des Schilfgürtels. In: Wolfram, G., Déri, L., Zech, S. (Hrsg.) Strategiestudie Neusiedler See, Phase 1. Studie i.A. der Öst. Ungar.Gewässerkommission, Wien, Szombathely, pp 34-39.
- D'Amboise, C.J.L., 2012: Development of Profile Measurements Using a Frequency Domain Reflectometry Sensor in a Soft Sludge and Calibration for Use in the Neusiedler See. – M.Sc. Thesis, University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna, Austria.
- Godinger, C. (1835) *Hydrotechnischer Plan zur Entwässerung des Neusiedler Sees und der Hanság-Sümpfe, nivelirt, sondirt und entworfen i.J. 1835 von Ingenieur C[arl] Godinger. M=1:14400.* ÖNB Kartensammlung Alb.B2.
- Grünhut-Bartoletti, C. (1937): Der Neusiedlersee – eine wasserwirtschaftliche Studie. Wasserwirtschaft und Technik Jg.1937, H.34-36, Wien.
- GENESE (2011): Geodätische Neuerfassung des Systems Neusiedler See – Hanságkanal. Projektantrag, Projektnummer L00130. Programm zur grenzüberschreitenden Kooperation Österreich – Ungarn 2007–2013. Universität für Bodenkultur Wien.
- Heine, E. (2009): Einsatz von Mehrfrequenz- und Multibeam-Echolotsystemen für die Seegrundaufnahme des Bodensee-Rheindeltas. In: Chesi G., Weinold Th. (Hrsg.): 15. Internationale Geodätische Woche Obergurgl. S. 39-48. Herbert Wichmann Verlag. ISBN:978-3-87907-485-3
- Heine E, Kogelbauer I, Zechmeister T, Loiskandl W.(2014): Bestimmung der Mächtigkeit und Verteilung des Schlammkörpers des Steppensees »Neusiedler See« mittels hydroakustischer und bodenphysikalischer Messsysteme. Hydrographische Nachrichten, 98, 37-41; ISSN 1866-9204
- Herzig, A., Dokulil, M.T. (2001): Neusiedler See – ein Steppensee in Europa. In: Dokulil M.T., Hamm A., Kohl J.G. (Hrsg.) Ökologie und Schutz von Seen. Facultas UTB, pp 401-415.
- Höfle, B., Mücke, W., Dutter, M., Rutzinger, M. and Dorninger, P.: Detection of building regions using airborne LiDAR - A new combination of raster and point cloud based GIS methods, Angewandte Geoinformatik 2009, Beiträge zum 21. AGIT-Symposium Salzburg 2009.
- Józsa, J., Krámer, T., Homoródi, K., Napoli, E., Sarkkula, J. (2008): Wind-induced hydrodynamics and sediment transport of Lake Neusiedl – Hungarian-Austrian-Finnish research cooperation from lake-wide to bay-wide scale. Research report, Budapest University of Technology and

Economics, Department of Hydraulic and Water Resources Engineering, Budapest.

*Jungwirth, M. (1979):* Currents In: Löffler H. (Hrsg.), Neusiedlersee. Limnology of a shallow lake in central Europe. Junk, The Hague Boston London, pp 85-88.

*Kogelbauer, I and Loiskandl, W. (2014):* Characterization of sediment layer composition in a shallow lake: from open water zones to reed belt areas. Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss., 11, 12627-12657.

*Kopf, F. (1964):* Höhenaufnahme des Neusiedler Sees (österreichischer Teil). Projektbericht. Neusiedler See Planungsgesellschaft, Wien.

*Kopf, F. (1965):* Die Auswertung der Seevermessung des Jahrs 1901 und Vergleich mit der Seevermessung 1963. Techn. Bericht, Manuskript. Wien (unveröff.).

*Kopf F. (1968):* Der Schilffortschritt im Neusiedler See. Techn. Bericht, Manuskript. Wien (unveröff.).

*Kováts, Z. (1982):* A Fertő tó mederviszonyai (Das Seebcken des Neusiedler Sees) In: Kováts Z., Kozmáné Tóth E. (Hrsg.) A Fertő-tó természeti adottságai (Naturverhältnisse des Neusiedler Sees). Országos Meteorológiai Szolgálat - Északdunántúli Vízügyi Igazgatóság (ÉduVíz), Budapest 1982, pp 13-40 (ungarisch mit deutschsprachiger Zusammenfassung).

*Krámer, T., Józsa, J. (2005):* An adaptively refined, finite-volume model of wind-induced currents in Lake Neusiedl. Periodica Polytechnica Civil Engineering 49(2), Budapest, pp 111-136.

*Metha, A. J. and McAnally, W. H. (2008):* Fine-Grained Sediment Transport, in Sedimentation Engineering: Processes, Measurements, Modeling and Practice, edited by Marcelo H. García, p. 1132, American Society of Civil Engineers, New York.

*Preisinger, A. (1979):* Sediments. In: Löffler, H.(ed): Neusiedlersee: The limnology of a shallow lake in central europe. Monographiae Biologicae, Vol. 37. W. Junk. London.

*Stalzer, W., Spatzierer, G. (1987):* Zusammenhang zwischen Feststoff- und Nährstoffbelastung des Neusiedler Sees durch Sedimentverfrachtung. AGN-Forschungsbericht 1985-1986. Wissenschaftliche Arbeiten aus dem Burgenland 77, Eisenstadt, pp. 93-226.

*Szontagh, T.v. (1902):* Untersuchungsbericht der Gemischten Fertő-Kommission. Budapest.

*Szontágh, T.v., Horusitzky H., Marosi, P., Asboth, B. (1903):* A Fertő-tó geológiai és mezőgazdasági viszonyainak tanulmányozására kiküldött bizottság jelentése. F.M. kiadás, Pallas Részvénytársaság nyomdája, Budapest.

*Vízgazdálkodási Tudományos Kutató Központ (Hrsg.) (1981):* Fertő Tó. Budapest (Vízrajzi Atlasz Sorozat 24)

*Wolanski, E., Asaeda, T. and Imberger, J. (1989):* Mixing across a lutocline, Limnol. Oceanogr., 34(5), 931-938.

#### **Anschrift der Autoren**

**Ass. Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Erwin Heine**, Institut für Vermessung, Fernerkundung und Landinformation, Universität für Bodenkultur Wien, Peter-Jordan-Straße 82, 1190 Wien.  
E-Mail: erwin.heine@boku.ac.at

**Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn Willibald Loiskandl**, Institut für Hydraulik und landeskulturelle Wasserwirtschaft, Universität für Bodenkultur Wien, Muthgasse 18, 1190 Wien.  
E-Mail: willibald.loiskandl@boku.ac.at

**Dipl.-Ing. Dr.techn. Christian Briese**, Department für Geodäsie und Geoinformation, Technische Universität Wien, Gußhausstr. 27-29/E120, 1040 Wien.

E-Mail: christian.briese@geo.tuwien.ac.at  
und

**EODC Earth Observation Data Centre for Water Resources Monitoring GmbH**, Gußhausstr. 27-29/CA0206, 1040 Wien.  
E-Mail: christian.briese@eodc.eu

**Dipl.-Ing. Christian Eberhöfer**, Department für Geodäsie und Geoinformation, Technische Universität Wien, Gußhausstr. 27-29/E120, 1040 Wien.  
E-Mail: christian.eberhoefer@geo.tuwien.ac.at

**Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Elmar Csaplovics**, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Dresden, Helmholtzstraße 10, D-01062 Dresden.  
E-Mail: elmar.csaplovics@tu-dresden.de