
Hydroakustisches Monitoring des Ausläufers des Gschlifgrabenfächers im Traunsee

Erwin HEINE

1 Einleitung und Zielsetzung

1.1 Rutschung und Sofortmaßnahmen 2007/2008

Am Ostufer des Traunsee liegt – eingebettet zwischen Traunstein und Grünberg – der ca. 3 km lange und 1 km breite Gschlifgraben, welcher schon seit dem Mittelalter als Rutschgebiet mit katastrophalen Großereignissen bekannt ist. Im November 2007 gerieten, reaktiviert durch zunehmende Wasserinfiltration, nahezu 4×10^6 m³ Material in Bewegung und gefährdeten über eine Dauer von acht Monaten zwölf bewohnte Objekte. Die sich auf dem Erdstrom-Mur-Schwemmfächer in Ufernähe befindlichen Häuser wurden in dieser Zeit bis zu fast einem Meter Richtung Traunsee verschoben (WEIDINGER 2009).

Nach erfolgreicher Stabilisierung der Rutschung wurde in Kooperation zwischen der Geologischen Bundesanstalt (GBA) und dem Forsttechnischen Dienst der Wildbach- und Lawinenverbauung (WLV) landseitig ein innovatives Multiparameter-System zur Überwachung der Vorgänge im Untergrund installiert (GASPERL 2008, GASPERL 2009, BMLFUW 2012).

Nach dem Großereignis 2007 wurde auch ein Versagen des subaquatischen Ausläufers des Schwemmfächers als potenzielles Risiko angesehen. Zur Abklärung der unmittelbaren Gefahr wurden im Januar, Februar, Mai und Dezember 2008 Echolotvermessungen am 600 m breiten und bis auf 140 m Tiefe reichenden Hang durchgeführt. Die Zeitreihenauswertung der Einzelstrahlecholotung wies aber auf keine Anzeichen eines großräumigen Versagens hin, sodass keine weiteren Maßnahmen eingeleitet wurden (MARSCHALLINGER 2009).

Gegenüber herkömmlichen Einzelstrahlecholotmessungen ohne Sensorbewegungskompensation und häufig mit Profilabständen von mehreren Zehnermetern, gewannen in den letzten Jahren genauere und höher auflösende Messsysteme, wie Fächerecholote und Sedimentecholote zunehmend an Bedeutung für das Monitoring von subaquatischen Rutschungen und Sedimentations- und Auskolkungsprozessen in Binnengewässern (SHUGAR 2013, HILBE et al. 2011).

Das zentrale Thema dieser Arbeit ist die eingehende Betrachtung der in zwei hydrographischen Vermessungskampagnen (2013 und 2016) mit einem Fächerecholot und einem parametrischen Sedimentecholot erzielten Ergebnissen in Hinblick auf deren Genauigkeit und möglicher Maßnahmen zu deren Verbesserung. Das übergeordnete Ziel dieser Untersuchungen ist es, eine fundierte Aussage über die Möglichkeit einer verlässlichen Detektion von Veränderungen der Oberflächenstruktur und damit einem Monitoring von rezenten subaquatischen Sedimentationsprozessen unter Einsatz hydrographischer Messsysteme zu liefern.

2 Fächerecholot- und Sub-Bottom-Profilier-Messung 2013

Für eine detaillierte geologisch-geomorphologische Interpretation des Erdstrom-Mur-Schwemmfächers sowie als Basis für die Detektion von Veränderungen erfolgte im April 2013:

- eine Aufnahme der Topographie des subaquatischen Gschlifgrabenfächers mittels eines hydrographischen Flachwasser-Fächerecholots sowie
- eine Erfassung und Visualisierung der Schichtung des bodennahen Untergrundes unter Einsatz eines parametrischen Sedimentecholots/parametrischen Sub-Bottom-Profilers (SBP).

Sämtliche Echolotmessungen wurden unter Einsatz von RTK-GNSS-Ortungssystemen und INS-basierten Lage- und Beschleunigungsmesssystemen durchgeführt.

Die Vermessung der Topographie ($\sim 1 \text{ km}^2$) erfolgte mit dem Flachwasser-Echolot Kongsberg EM 3002, wobei aufgrund der angewandten Messanordnung die Oberfläche aus verschiedenen Strahlrichtungen mehrfach abgetastet wurde. Somit beschreibt das resultierende, detailgetreue Geländemodell flächendeckend und dezimetergenau morphologisch interessante Details, wie subaquatische Rutschungen, von der Abbruchkante bis zum Ablagerungsgebiet.

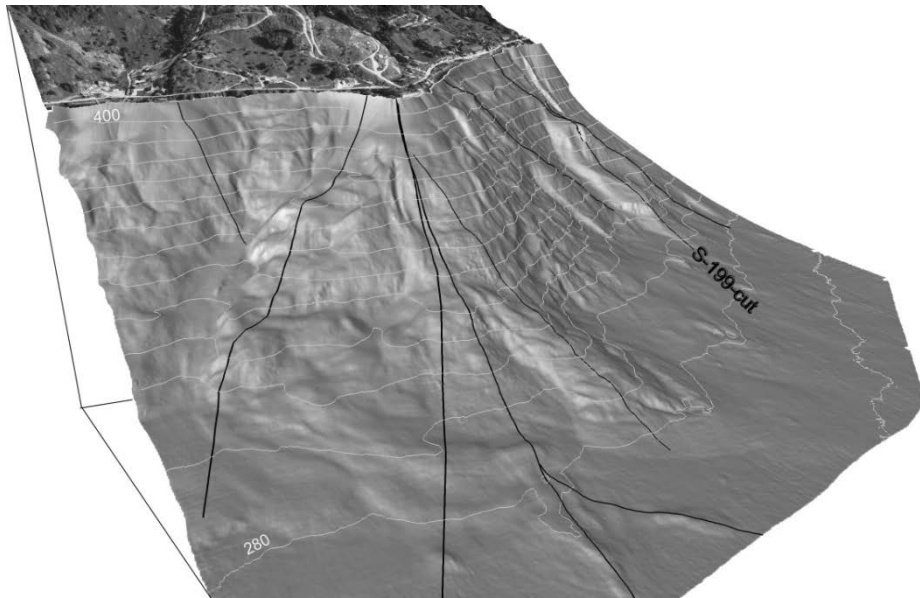


Abb. 1: Fächerecholot-DGM des subaquatischen Gschlifgrabenfächers inkl. Lage der Sub-Bottom-Profilier-Wiederholungsmessungen von 2016 (schwarze Linien)

Die Kartierung der oberen Sedimentschichten des Seebodens erfolgte mit dem hochauflösenden Sedimentecholot SES 2000 der Firma Innomar durch mehr als 60 Profile mit einem Parallelabstand von 10 m (Abb. 2). Die Länge der Einzelprofile beträgt in etwa 700 m und reicht somit vom Ufer bis über den Hangfußbereich auf eine Wassertiefe von 140 m hinaus.

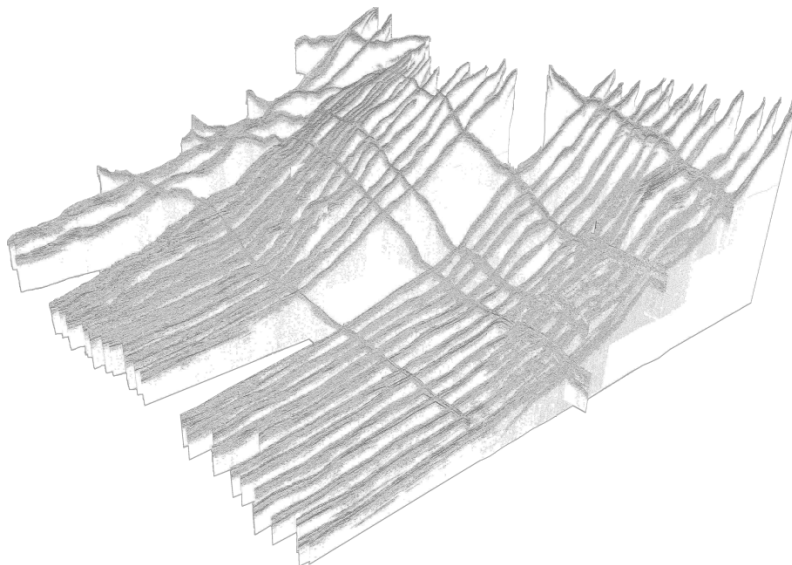


Abb. 2: Auszug aus der Gesamtheit der Echogramme der Sedimentecholotung 2013 mit dem parametrischen Sub-Bottom-Profilier SES 2000

Eine umfassende Beschreibung der angewandten Methodik, der Messdurchführung sowie der erhobenen Datensätze findet sich bei HEINE (2015) sowie HEINE et al. (2016).

3 Genauigkeitsanalyse monitoringrelevanter Parameter

Bei der Fächerecholotung hängen Bodenauflösung und Genauigkeit einerseits von der internen Instrumentengenauigkeit und andererseits von der Qualität der externen Sensorelemente, wie GNSS, inertielle Messeinheit (IMU), Schallgeschwindigkeitssonden (SVP) und deren korrekter Implementierung in den Messprozess ab. Laut Herstellerangabe liegt die erzielbare Genauigkeit des hier verwendeten Fächerecholots Kongsberg EM3002 unter Einsatz entsprechend hochwertiger externer Sensoren im Bereich zwischen 6 cm im Flachwasserbereich und 10 cm bei 150 m Wassertiefe (KONGSBERG 2004).

3.1 Kalibrierung – patch test

Das hier für die Fächerecholotmessung eingesetzte Messsystem der Verbund Hydro Power wurde als Gesamtsystem vom Fächerecholothersteller Kongsberg für den hochgenauen Vermessungseinsatz im Flachwasser konfiguriert und auch mit entsprechend hochwertigen externen Sensoren ausgestattet (Bewegungssensor Seatex MRU 5, Gyro-Kompass Seatronics Seapath, Schallgeschwindigkeitssonde Valeport). Sämtliche Sensorelemente sind stabil und passgenau am Sensorträger montiert und ihre Position im Messsystemkoordinatensystem millimetergenau eingemessen (kalibriert).

An- und Abbau von Sensoren, Vibrationen im Messbetrieb sowie Temperaturschwankungen führen jedoch zu geringfügigen Veränderungen der Einbauwinkel, sodass das System am Beginn jedes Messeinsatzes einer Überprüfung der Kalibrierung durch einen sogenannten patch test unterzogen werden muss. Dabei wird ein bestimmtes Muster abgefahren und anschließend werden daraus die neuen Offsets der Montagewinkel für den Schwinger berechnet (Tab. 1). Entsprechend der Richtlinien für die Durchführung von patch tests werden parallele sowie gegenläufige Fahrten über flache sowie strukturierte Seebodenabschnitte durchgeführt. Dabei sollten diese in möglichst großen Tiefen und direkt im Messgebiet bzw. an dessen Rand durchgeführt werden. Des Weiteren sollte der patch test auch in mehreren Bereichen sowie auf den Messzeitraum verteilt durchgeführt werden.

Tabelle 1: Ergebnisse der Kalibrierung der Fächerecholot-Einbauwinkel („patch test“)

Gebiet/Wassertiefe	Roll	Stampf	Kurs	Versatz durch Stampfwinkelfehler
Systemvoreinstellung	0.67°	-0.42°	0.29°	
Ebensee/90 m	0.52°	-1.33°	1.54°	
Gschlieffgraben/145 m	0.61°	-1.11°	2.34°	

Unter Einbeziehung der von der IMU gelieferten Drehwinkel kann nun mit dem kalibrierten System die Raumlage des exzentrisch zur GNSS-Antenne montierten Echolotswingers berechnet werden.

Aus den bekannten Richtungen, der Laufzeit des Signals und der Wasserschallgeschwindigkeit ergibt sich sodann über einfache geometrische Beziehungen die Lage des Punktes am Seeboden, an dem das Signal zurückgestreut wurde.

3.2 Schallgeschwindigkeit und Fächeröffnungswinkel

Für die unmittelbare Tiefenmessgenauigkeit ist in erster Linie die Kenntnis der Schallgeschwindigkeit (~ 1500 m/s) entlang des Echolotstrahls entscheidend. Ein Fehler in der mittleren Schallgeschwindigkeit von 1 % (= 15 m/s bzw. ~ 4 °C) bewirkt bei der maximalen Wassertiefe des Messgebietes von 140 m einen Tiefenmessfehler von 1.1 m. Die von der Nadirrichtung entfernten Strahlen erfahren zusätzlich noch eine Veränderung ihres akustischen Weges aufgrund des Schallgeschwindigkeitsgradienten. Diese Refraktion nimmt nach außen hin exponentiell zu, wobei ein Gradient ($g = (c_u - c_o)/z$) von $0,1 \text{ sek}^{-1}$ bei 140 m einen Tiefenfehler im Bereich mehrerer Meter für die äußersten beams bei voll geöffnetem Fächer (130°) verursacht (SIMONS & SNELLEN 2003, LURTON 2002). Durch die „Verbiegung“ des akustischen Weges ergibt sich aber zusätzlich auch ein Lageversatz von mehreren Metern für die äußersten beams (65° von Nadir); d. h. die Reflektion kommt nicht von der berechneten footprint-Position. Um die Fehler der Schallgeschwindigkeit zu verhindern bzw. zu minimieren, werden an repräsentativen (tiefen) Stellen im Messgebiet mit einer Schallgeschwindigkeits-Sonde (SVP) die Geschwindigkeitswerte entlang von vertikalen Profilen – beginnend an der Wasseroberfläche bis zum Seeboden – aufgenommen und in die Echolot-Datenerfassungs- sowie der Auswertesoftware an die Echolotdaten angebracht.

Je nach Topographie des Messgebietes, Temperaturverteilung, Strömungssituation, tageslaufbedingte Wassertemperaturänderungen etc. werden die SVP-Profile an repräsentativen

Stellen im Messgebiet mehrmals täglich durchgeführt, um der Echolotsignalauswertung den zum Messzeitpunkt und am jeweiligen Messort aktuell vorherrschenden Schallgeschwindigkeitsverlauf zur Verfügung zu stellen (Abb. 3).

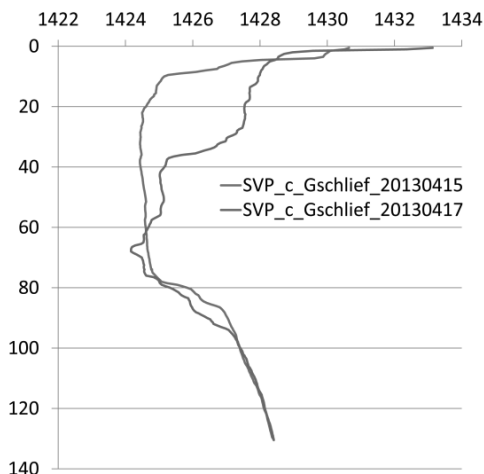


Abb. 3: Schallgeschwindigkeitsprofile vom Untersuchungsgebiet Gschlifgraben im Traunsee, aufgenommen am 15. und 17. April 2013

3.3 Punktdichte und Genauigkeit der Testmessungen

In Anbetracht der hier behandelten Fehlereinflüsse wird für Fächercholotvermessungen im Flachwasserbereich empfohlen, den Fächeröffnungswinkel der Einzelschwinger nicht weiter als auf 100° zu öffnen, wenn eine Höhengenaugigkeit von $2\sigma = \pm 7$ cm in der patch test Kalibrierung (als Referenzmaß für die Gesamtvermessung) erreicht werden soll (vgl. SOMBROWSKY 2011, BURNETT 2016).

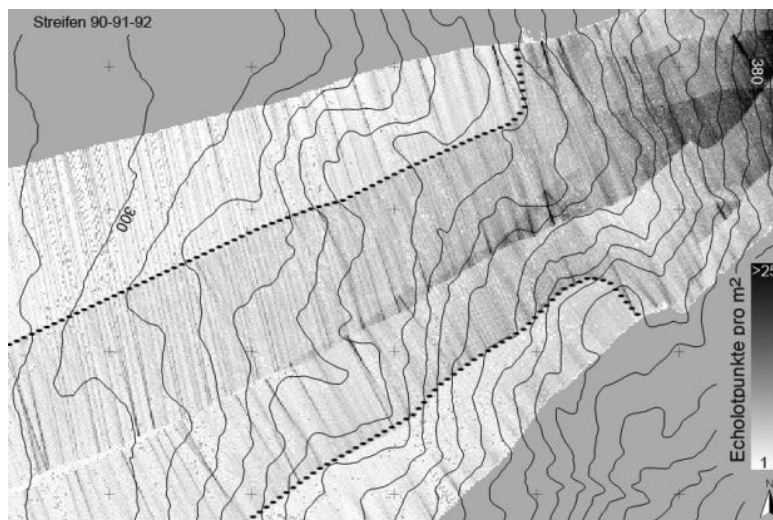


Abb. 4: Punktdichte der Einzelfächer und im Überlappungsbereich der Streifen 91-92-93 (innerhalb der strichlierten Linie)

Eine Aussage über die tatsächlich erzielte Genauigkeit und erreichte Punktdichte lässt sich nur durch überlappende Aufnahme des Messgebietes erzielen. Je nach Wassertiefe und der topografischen Struktur des Bodens lag bei der 2013er-Vermessung die Punktdichte pro Quadratmeter auf 130 m Wassertiefe bei 3-5 Punkten, bei 80 m Wassertiefe bei 7-12 Punkten, und bei 30 m Wassertiefe bei mehr als 30 Punkten (vgl. Abb. 4), und die doppelte Standardabweichung der Messdaten lag im Bereich weniger Dezimeter (vgl. Abb. 5).

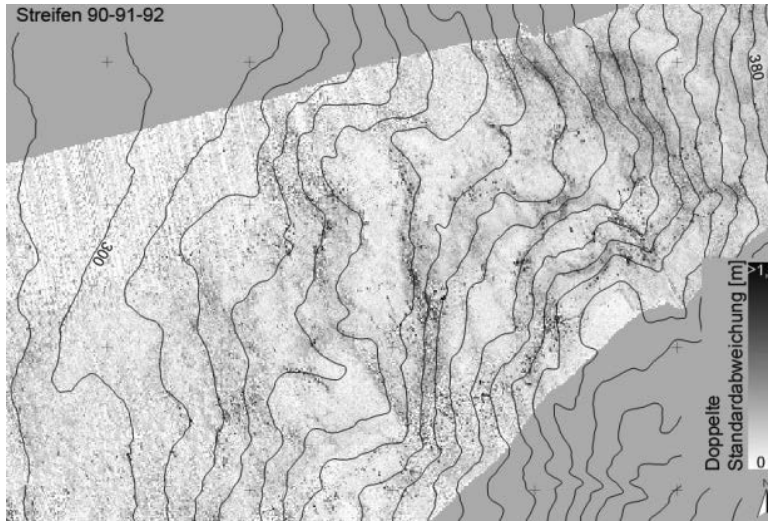


Abb. 5: Doppelte Standardabweichung der Rohmessdaten im $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ Raster (Wassertiefenbereich des Ausschnittes: 40 m bis 130 m)

4 Geologisch-geomorphologische Untersuchungen

4.1 Geologische Interpretation der Messprofile

Im Winter 2015/16 wurden von den Geologen Dr. J. T. Weidlinger (erdok, Gmunden) und Dr. J. Götz (Universität Salzburg) ausgewählte Profilschnitte der Fächerecholotung und SBP-Messungen hinsichtlich des Aufbaus des Gschlieffgrabenfächers sowie unterschiedlicher Prozesse am Abhang des Fächers interpretiert. Eine detaillierte Zusammenfassung der Interpretationsergebnisse findet sich in der gemeinsamen Publikation von HEINE, WEIDINGER & GÖTZ (2016). In Hinblick auf ein noch umfassenderes Monitoring für den Gschlieffgraben kann zusammengefasst werden, dass auf Basis des detailreichen digitalen Geländemodells des Unterwasserbereiches sowie der Schichtungsinformation des bodennahen Untergrundes verschiedene Prozesstypen abgeleitet werden können, die an Materialumlagerungen vom Uferbereich in tieferes Wasser mehr oder weniger intensiv beteiligt waren und das Bild des subaquatischen Fächers näher verständlich machen.

Ein für die weiterführende hydroakustische Projektbearbeitung wichtiges Ergebnis dieser interdisziplinären Zusammenarbeit war, dass für vertiefende Einblicke in den Internaufbau der oberen Sedimentschichten zusätzlich zu den vorhandenen, in Fallrichtung verlaufenden SBP-

Messung, weitere SBP-Aufnahmen entlang geologisch relevanter Profilverläufe notwendig wären. Des Weiteren würde eine höhere Eindringtiefe die Möglichkeit einer Anbindung der hydroakustischen Ergebnisse an die vorhandenen seismischen Informationen ermöglichen.

4.2 Multischwinger-Sub-Bottom-Profiler Messungen 2016

In Anbetracht der Ergebnisse der geologischen Interpretation wurden im Mai 2016 weiterführende Sub-Bottom-Profiler-Messungen mit dem parametrischen Sedimentecholot SES2000 QUATTRO der Firma Innomar durchgeführt. Bei der SES-Serie gelingt es durch Ausnutzung des parametrischen Effektes, 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 Schwingereinheiten (25 cm × 25 cm) in einem Quadrat angeordnet, und ermöglichen dadurch einen höheren Energiepegel der Messfrequenz.

Die wiederholte Messung der 2013 mit dem SES-Einzelschwingersystem aufgenommenen und der geologischen Interpretation unterzogenen Profile (Abb. 1) ermöglicht durch den direkten Vergleich konkrete Aussagen der Leistungsfähigkeit des QUATTRO-Systems in Bezug auf Eindringtiefe und Schichtdickendetektion im subaquatischen Erdstromfächer des Gschlifgrabens zu tätigen.

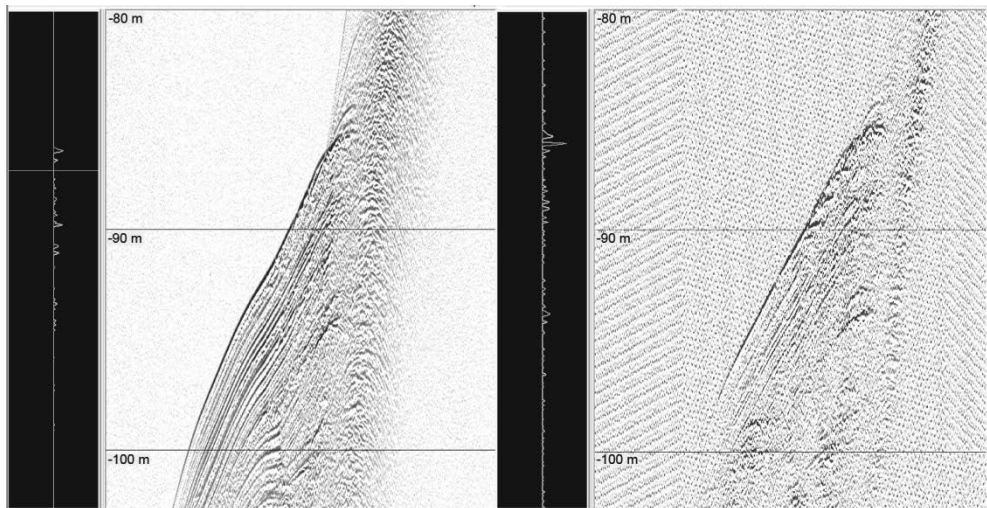


Abb. 6: Echogrammausschnitte der SBP-Messungen 2016 (links) und 2013 (rechts) aus dem Profilabschnitt „S-199-cut (vgl. Abb. 1)“

Beispielhaft dafür sei hier der Profilabschnitt S-199-cut angeführt (Abb. 6). Die hier dargestellten Echogramme sind mit den gleichen Signalverarbeitungsparametern prozessiert worden, mit Ausnahme des „Stacking“, also dem Zusammenfassen von mehreren aufeinanderfolgenden Echosignalen zu einem neuen Echosignal, um aufgrund der unterschiedlichen Fahrtgeschwindigkeit von 2013 und 2016 eine gleiche Skalierung hinzubekommen. Des

Weiteren ist bei der Beurteilung zu berücksichtigen, dass in den Daten von 2013 auch elektrische Störungen (die parallelen Linienmuster im Echogramm) enthalten sind. Die Analyse der Echolotergebnisse zeigt jedoch eindeutig, dass die Daten der 2016er Messungen ein deutlich besseres Signal/Rausch Verhältnis haben als die Daten von 2013. Dadurch sind in diesen Daten etwas mehr Details zu erkennen, insbesondere in den Ablagerungsbereichen.

Zusammenfassung

Die Sub-Bottom-Profiler-Daten liefern aussagekräftige Echogramme, in welchen die einzelne Reflektionshorizonte des Seebodenuntergrundes mit hoher räumlicher Auflösung (< 10 cm) ersichtlich sind. Voraussetzung dafür ist aber eine cm-genaue Positionsbestimmung in Kombination mit einer hochwertigen Bewegungssensorik, um ein „verschmieren“ der Echolotmessdaten aufgrund von Roll- und Nickbewegungen des Bootes zu vermeiden.

Die Ergebnisse der Fächerecholotaufnahmen haben gezeigt, dass eine wiederholte hochauflösende und flächendeckende Erfassung der subaquatischen Topographie sowie der heterogenen Seesedimentstrukturen eine verlässliche Detektion von Veränderungen der Oberflächenstruktur und damit ein Monitoring von rezenten subaquatischen Sedimentationsprozessen ermöglichen würde.

Literatur

- BMLFUW (2012): Monitoring und Prognose von Ereignissen. <http://www.naturgefahren.at/karten/chronik/ereignisdoku/Monitoring.html> (21.11.2014).
- BURNETT, J. (2016): Patch and Performance Tests.HYPACK 2016 Users Training Event on January 5th, 2016 in Tampa, Florida. <http://www.ustream.tv/recorded/80999691>.
- GASPERL, W. (2008): „Monitoring“ Gschlifegraben. In: Agricultural Research and Education Centre Raumberg-Gumpenstein (Eds.), Monitoring Methods – Systems behind a safer environment, 117-123, Irdning/Styria.
- GASPERL, W. (2009): Katastrophenbewältigung und Maßnahmen im Gschlifegraben – Gmunden/Oberösterreich. In: WEIDINGER, J. T. & KÖCK, G. (Eds.): ÖAW-Gschlifegraben-Symposium. Proceedings vom 1. April 2009. Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, 45-58. DOI 10.1553/gde2010.
- HEINE, E. (2015): Hydrographische Vermessung des Gschlifegraben-Schuttkegelausläufers im Traunsee. In: HANKE, K. & WEINOLD, T. (Hrsg.): 18. Internationale Geodätische Woche Obergurgl 2015. Wichmann, Heidelberg, S. 28-34.
- HEINE E., WEIDINGER J. & GÖTZ J. (2016): Geologisch-geomorphologische Untersuchungen des subaquatischen Bereichs von Erdströmen in den Traunsee (OÖ) unter Anwendung von Fächerecholot und parametrischem Sedimentecholot. In: Vermessung & Geoinformation, 1/2016, S. 25-37.
- HILBE, M., ANSELMETTI, F. S., EILERTSEN, R. S., HANSEN, L. & WILDI, W. (2011): Subaqueous morphology of Lake Lucerne (Central Switzerland): implications for mass movements and glacial history. In: Swiss Journal of Geosciences, 104 (3), S. 425-443. doi:10.1007/s00015-011-0083-z.

- KONGSBERG (2004): Kongsberg EM 3002 Multibeam echo sounder Product description. Horten, Norway.
- LURTON, X. (2002): An introduction to underwater acoustics. Springer, Berlin/Heidelberg.
- MARSCHALLINGER, R. (2009): The Gschlifgraben Landslide (Austria): A Remediation Approach involving Torrent and Avalanche Control. Geology, Geophysics, Geotechnics and Geoinformatics.
- SHUGAR, D. H. (2013): Bathymetric and geophysical surveys of the southern end of Kluane Lake, Yukon. In: MACFARLANE, K. E., NORDLING, M. G. & SACK, P. J (Eds.): Yukon Exploration and Geology 2013, S. 221-231.
- SIMONS D. G. & SNELLEN M. (2003): "Seafloor mapping", Lecture notes, part 2. Course: Acoustic Remote Sensing and Sea Floor Mapping. Delft Institute of Earth Observation and Space Systems (DEOS). https://ocw.tudelft.nl/course-readings/lecture-6-7-noise-principles-sonar-mapping-systems/?course_id=7189.
- SOMBROWSKY W. (2009): Multibeam Echo Sounder Errors. Presentation handout from the 13th Kongsberg Maritime FEMME conference, April 12th – 15th, Trondheim Norway.
- Weidinger J. T. (2009): Das Gschlifgraben-Rutschgebiet am Traunsee-Ostufer (Gmunden/OÖ) – ein Jahrtausende altes Spannungsfeld zwischen Mensch und Natur. In: Jahrbuch der Geol. B.-A., 149/1, S. 195-206.