

Geologisch-geomorphologische Untersuchungen des sub-aquatischen Bereichs von Erdströmen in den Traunsee (OÖ) unter Anwendung von Fächerecholot und parametrischem Sedimentecholot



Erwin Heine, Wien, Johannes Thomas Weidinger, Gmunden und Joachim Götz, Salzburg

Dieser Beitrag wurde als „reviewed paper“ angenommen.

Kurzfassung

Am Ostufer des Traunsees befindet sich das bereits seit dem Mittelalter bekannte Rutschgebiet des Gschlifgrabens, das letztmalig im Winter 2007/2008 reaktiviert wurde. Neben der Umsetzung zahlreicher (Sofort-)Maßnahmen zur Stabilisierung der Großmassenbewegung wird deren landseitiger Bereich bis heute mithilfe eines umfangreichen Multiparameter-Systems überwacht. Im Hinblick auf ein noch umfassenderes Monitoring wurde im April 2013 der subaquatische Ausläufer des Gschlifgrabenfächers unter Einsatz von Fächerecholot und parametrischem Sedimentecholot (sub-bottom-profiler) hydrographisch vermessen. Diese sub-bottom-profiler Daten – mit Eindringtiefen in den Seeboden von bis zu 15 m – unterstützen geologische, geomorphologische und geotechnische Studien mit Informationen über den oberen Schichtaufbau und ermöglichen eine wesentlich genauere Interpretation jener Prozesse, die zur Sedimentation bzw. zur Umlagerung von Sedimenten bis in größere Seetiefen geführt haben.

Schlüsselwörter: Hydrographische Vermessung, Fächerecholot, parametrisches Sedimentecholot, Traunsee, Gschlifgraben, Subaquatischer Schwemmfächer, Geomorphologie

Abstract

In Winter 2007/2008 a huge landslide occurred at Gschlifgraben at the east shore of Lake Traunsee. In April 2013 a hydrographic survey of the subaquatic portion of the debris fan was undertaken using a multibeam echo sounder and parametric sediment sonar systems. The parametric sub-bottom-profiler sonar penetrated the lake floor up to 15 m and enables the identification of zones of different reflectivity. These echograms support geological, geomorphological and geotechnical studies with information about the structures of the upper most debris fan layer and enables a more precise interpretation of sedimentation processes along the slope to the deeper zones of the lake floor. Repeated hydrographic surveying of the subaquatic debris fan as well as the lake bottom allows the detection of subaquatic topographic change and the monitoring of recent sedimentation processes. Furthermore, the method might help to detect areas of increased susceptibility for potential larger scale subaquatic slope failures in the future.

Keywords: Hydrographic Surveying, Multi Beam Echo Sounding, Parametric Sub Bottom Profiler, Traunsee, Gschlifgraben, Subaquatic Fan, Geomorphology

1. Einleitung

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 $4 \times 10^6 \text{ m}^3$ 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).

Vom Forsttechnischen Dienst der Wildbach- und Lawinenverbauung (WLV) wurden zur Verringerung der akuten Rutschbewegung zunächst Sofortmaßnahmen entwickelt und umgesetzt (Poisel et al., 2012) bevor der landseitig situierte Kernbereich der Massenbewegung auch intensiv geologisch und geophysikalisch untersucht wurde (z. B. Amtmann J. und C. G. Eichkitz, 2010; Marschallinger et al. 2009, Millahn et al. 2008;

Supper et al., 2010; Schreilechner et al., 2012). Nach erfolgreicher Stabilisierung der Rutschung wurde in Kooperation zwischen der Geologischen Bundesanstalt (GBA) und der WLW 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 potentielles 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, stehen heute genauere und höher auflösende Messsysteme zur Verfügung. Für das Monitoring von subaquatischen Rutschungen und Sedimentations- und Auskolkungsprozessen in Binnengewässern gewannen hydroakustische Sensoren, wie Fächerecholote und Sedimentecholote daher zunehmend an Bedeutung (Shugar, 2013). Jüngst werden immer häufiger auch inneralpine Seen untersucht (Hilbe et al., 2011). Das Potential derartiger Messsysteme für die detaillierte Erfassung der subaquatischen Topographie, der heterogenen seebodennahen Sedimentstrukturen sowie deren geologisch-geomorphologischer Interpretation wird mit dieser Studie am Beispiel des Gschlifgrabenfächers gezeigt.

Der wiederholte Einsatz der Methode würde darüber hinaus die Detektion von Reliefunterschieden und damit ein zukünftiges subaquatisches Monitoring ermöglichen.

2. Hydrographische Vermessungen des subaquatischen Ausläufers des Muren- und Schwemmfächers

2.1 Messvorgang

Die hydrographische Vermessung des subaquatischen Gschlifgrabenfächers wurde im April 2013 in zwei Durchgängen durchgeführt:

1. Die flächendeckende Aufnahme der Topographie mittels eines Flachwasser-Fächerecholots
2. Die Erfassung und Visualisierung der seebodennahen Sedimentstrukturen unter Einsatz eines parametrischen Sedimentecholots / parametrischen sub-bottom-profilers (SBP).

Die Fächerecholotmessungen wurden mit Unterstützung der VERBUND Hydro Power mit dem trailerbaren Messboot durchgeführt. Für die mehrtägigen Sedimentecholotungsfahrten wurde das am Traunsee stationierte Kajütboot der Energie AG Oberösterreich eingesetzt, wobei das sub-bottom-profiler-Schwingersystem inklusive RTK-GNSS-Ortungseinheit und Inertialmesssystem INS (inertial navigation system) mittels einer Aluminiumträgerkonstruktion auf dem Bootsdeck installiert wurde (Abbildung 1).

2.2 INS-gestützte GNSS-Ortung

Sollen die hydrographischen Messergebnisse aus unterschiedlichen Vermessungskampagnen vergleichbar sein, so muss eine dem Monitoring-Prozess entsprechende Wiederholmessgenau-



Abb. 1: Echolot-Messboot mit RTK-GNSS und IMU Sensorik und Operator-Arbeitsplatz

igkeit gewährleistet sein. Bei einer Steilheit des Hanges von 17° und Rollbewegungen des Bootes von $\pm 3^\circ$ (entspricht am See einem leichten Wellengang) ergeben sich bei einer mittleren Wassertiefe von 70 m Fehlpositionierungen des Fächerecholotmesspunktes (footprint \varnothing 1.8 m) von 7.4 m und ein Höhenfehler von über einem halben Meter. Eine zusätzliche Erhöhung von Roll- oder Stampfwinkel, und somit der Fehlpositionierung des Messpunktes, wird auch durch eine Veränderung in der Beladung des Messbootes, wie dies z. B. durch Mitnahme von Besucher entsteht, oder durch besondere „Mobilität“ von Besatzungsmitgliedern während der Messfahrt verursacht.

Nur durch die Integration eines Inertialmesssystems INS (inertial navigation system), mit dem sämtliche Rollbewegungen und Beschleunigungen des Sensorträgers (Messboot) mit einer Genauigkeit von $\pm 0.1^\circ$ erfasst und gemeinsam mit den RTK-GNSS-Messungen verarbeitet werden, kann die Raumlage der exzentrisch zur GNSS-Antenne montierten Echolotschwinger präzise erfasst, und somit die tatsächliche Position des

einzelnen Messpunktes am Seeboden bestimmt werden (Abbildung 1).

2.3 Fächerecholotung

Die Vermessung der Topographie erfolgte mit einem Flachwasser-Echolot Kongsberg EM 3002, das über eine dynamische Fokussierung der 255 Beams verfügt, wobei durch Berücksichtigung der Messdistanz die Einflüsse der kugelförmigen Schallwellenausbreitung auf die Distanzmessgenauigkeit im Flachwasser erhöht wird. Unter Einbeziehung von INS-Daten werden des weiteren Stampf- und Rollbewegungen dynamisch kompensiert. Zur Bestimmung der systematischen Einbauwinkel-Fehler (Roll-, Stampf und Kurs) des Fächerecholotschwingers im Verhältnis zum GNSS/INS-System sowie einer Latenz in der Positionierung wurde vor Beginn der Messungen ein sogenannter Patch-Test gefahren. Dabei wird ein bestimmtes Muster abgefahren und anschließend werden daraus die Offsets der Montagewinkel sowie die Latenz bestimmt.

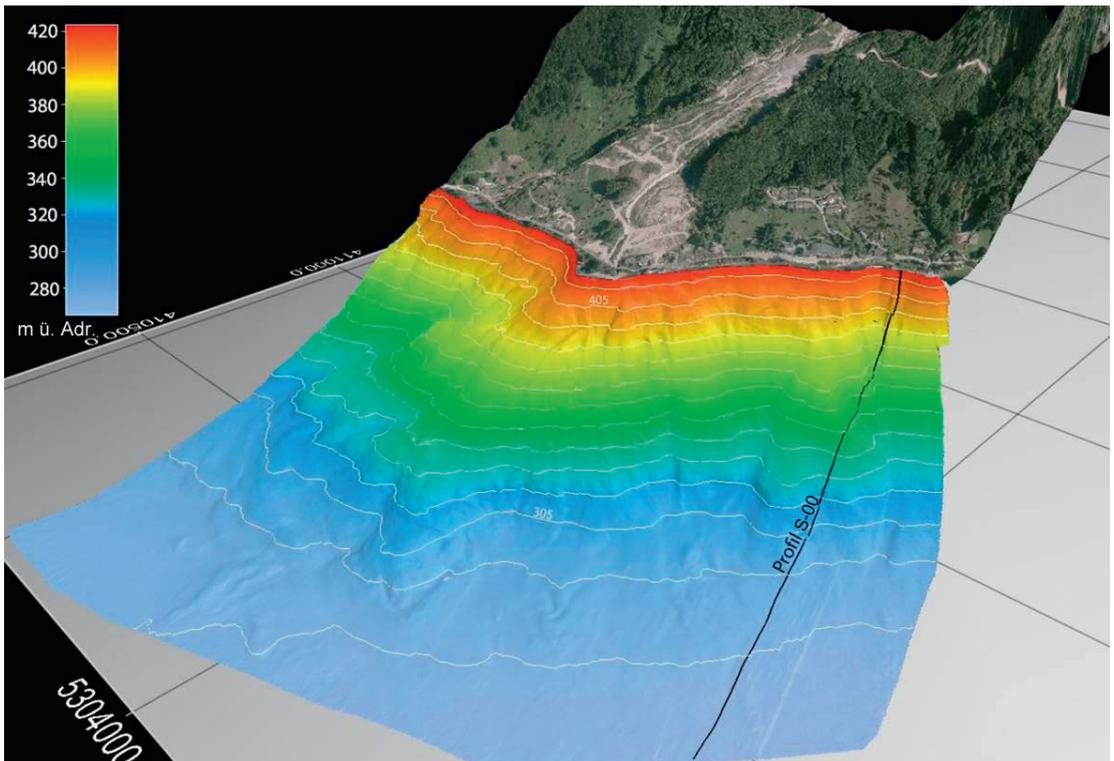


Abb. 2: Aus Fächerecholotmessungen generiertes DGM des subaquatischen Ausläufers des Gschlifgrabenfächers inklusive beispielhafter Visualisierung der Spur der Sedimentecholotmessfahrt S-00

Zur Erhöhung der Detailgenauigkeit wurden die einzelnen Messstreifen mit mindestens 50%iger Überlappung zwischen den benachbarten Streifen gefahren, d.h. die Topographie wurde mehrfach und aus verschiedenen Strahlrichtungen abgetastet. Dadurch konnte für einen mittleren Tiefenbereich von 70 m eine Punktdichte von neun Punkten/m² mit einem relativen mittleren Höhenfehler von besser als ± 5 cm (zwischen den sich überlappenden Messstreifen) und einem absoluten mittleren Höhenfehler von besser als ± 10 cm erzielt werden.

Das resultierende, detailgetreue Geländemodell des subaquatischen Kegels beschreibt somit flächendeckend und dezimetergenau morphologisch interessante Details, wie subaquatische Rutschungen, von der Abbruchkante bis zum Ablagerungsgebiet (Abbildung 2).

2.4 Parametrische Sub-Bottom-Profilier Messungen (Sedimentecholotung)

Zur Kartierung der oberen Sedimentschichten des Seebodens wurde ein hochauflösendes Sedimentecholot vom Typ SES 2000 der Firma Innomar eingesetzt. Dieser sogenannte sub-bottom-profiler (SBP) nutzt den parametrischen Effekt, bei dem durch zwei relativ eng beieinander liegenden akustischen Frequenzen von rund 100 kHz eine tiefe Frequenz von 10 kHz erzeugt wird. Hierdurch 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 oberen Sedimentschichten zu kartieren. Je nach Sedimentzusammensetzung, Lagerungsdichte und dem Gasanteil im Boden wird das Signal an den Schichtgrenzen total oder teilweise reflektiert, sodass ein Teil der Welle weiter eindringt und am nächsten Reflexionshorizont wieder total oder teilweise reflektiert wird usw. Die registrierten Reflexionen werden im Echogramm als Schichtabfolge und entsprechend ihrer Intensität farbcodiert dargestellt (Heine, 2015). Durch die große Bandbreite und die schmale Schallkeule liefert das parametrische Echolot ein Echogramm mit hohem Kontrast und einer Schichtauflösung von acht Zentimetern. Die Prozessierung der 10 kHz Frequenz-Messdaten sowie deren Georeferenzierung erfolgten mit der systemeigenen Software ISI. Die resultierenden Echogramme wurden anschließend als Bitmap exportiert und für die weiterführenden geologisch-geomorphologischen Untersuchungen in die 4D-Visualisierungs- und Analysesoftware Fledermaus der Firma QPC importiert.

Die Kartierung des heterogenen Internbau des subaquatischen Gschlifgrabenfächers erfolgte durch mehr als 60 Profile mit einem Parallelabstand von 10 m (Abbildung 3). Die Länge der Einzelprofile beträgt in etwa 700 m und reicht somit

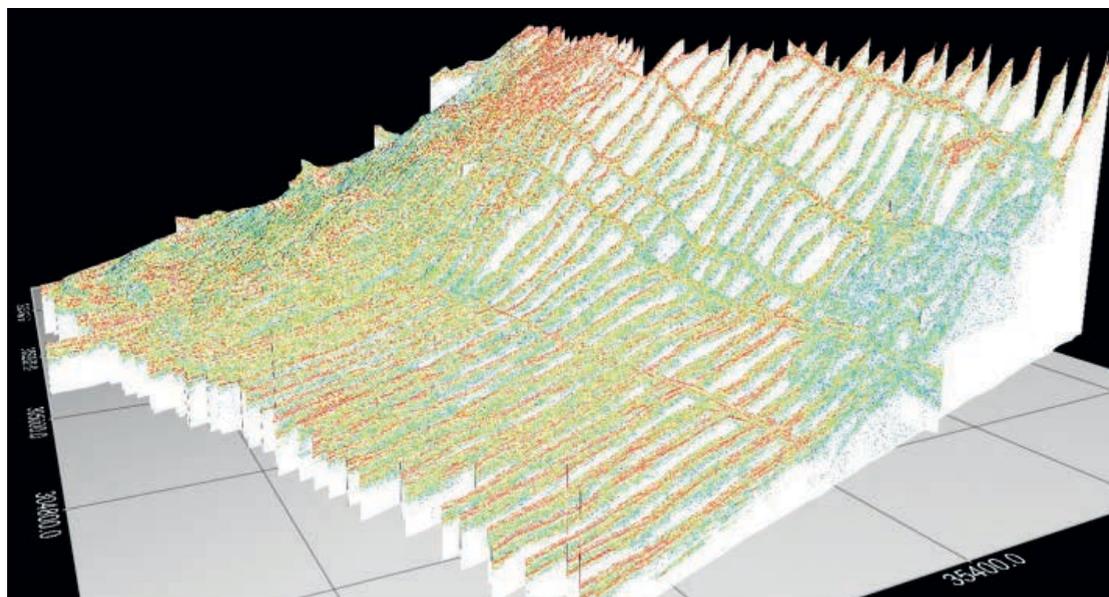


Abb. 3: SBP-Echogramme des subaquatischen Gschlifgrabenfächers

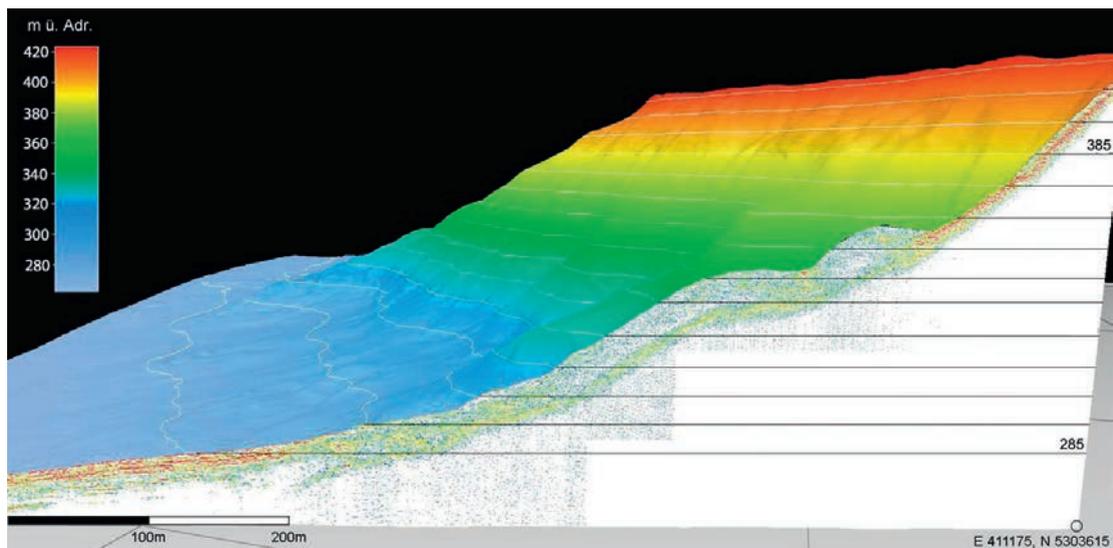


Abb. 4: Aus Fächerecholotmessungen abgeleitetes Oberflächen-DGM des subaquatischen Erd-Schuttströme-Kegels kombiniert mit sub-bottom-profiler-Echogramm von SBP-Messprofil S-00

vom Ufer bis über den Hangfußbereich auf eine Wassertiefe von 140 m hinaus.

Visualisierungsformen, wie die Kombination von DGM und eingehängtem SBPEchogramm („vertical curtain“) bieten verbesserte Möglichkeiten bei der Interpretation des Aufbaues des Schuttkegel-ausläufers (Abbildung 4).

3. Tektonisch-geologisch-geomorphologische Einflussnahme auf den Internbau des Gschlifgrabenfächers

Aus geowissenschaftlicher Sicht sind für den Aufbau des Gschlifgrabenfächers folgende Aspekte von besonderer Bedeutung.

3.1 Der tektonische Bau am Rand der Nördlichen Kalkalpen

Ein komplexer tektonischer Bau samt schollenartiger Zerstückelung am Südrand des Gschlifgrabenfächers – im Bereich der Grenze zwischen *Kalkalpinen Randschuppe* („Kalkofenzug“) und (*Ultra*-)Helvetikum – wurde vor allem von Prey (1983) dokumentiert und zuletzt von Weidinger (2010) bestätigt. Augenfälligster Beweis dafür ist der sogenannte „Schoberstein“, eine Scholle aus dunklem *Rhätolias-Kalk*, die dort unmittelbar am Traunsee-Ostufer ausbeißt. Diese setzt sich mit hoher Wahrscheinlichkeit auch subaquatisch in die Tiefe und gegen Westen hin, in den Traunsee

hinein fort und könnte zudem weiter tektonisch zerschert sein (Abbildung 5).

3.2 Die Spät- bis Postglaziale Entstehung des Gschlifgrabenfächers

Mit dem Abschmelzen des „Farngruben-Gletschers“ am Fuße der Traunstein-Nordwand kamen auch die für das Gebiet typischen Erdströme in Gang, die sich ihren direkten Weg nach Westen zum Ufer des Traunsees bahnten und den Beginn der Rutschaktivität im Gschlifgraben markieren (Abbildung 6 und 7). Das seither folgende, rasche Anwachsen des Muren- und Schwemmfächers an der orographisch rechten Nordseite (Datierung dazu siehe Baumgartner & Sordian, 1982; S. 232) bedingte nicht nur seinen heterogenen Internbau, sondern implizierte dadurch auch dessen Labilität mit fallweise spontanem, mechanischem Versagen. Dies war nicht nur aus historischer Überlieferung bekannt (Weidinger, 2009), sondern bei der Großrutschung in den Jahren 2007-2008 auch befürchtet (Gasperl, 2009).

3.3 Mögliche Massenbewegungen am Gschlifgrabenfächer im Holozän und deren Bewegungsmechanismen

Da selbst aus historischer Zeit diverse „Uferbrüche“ aus dem Gschlifgraben-nahen Traunsee-Ostufer bekannt sind (Weidinger, 2009), kann man davon ausgehen, dass derartige, spontane Massenumlagerungen in die Tiefen des Traunsees im

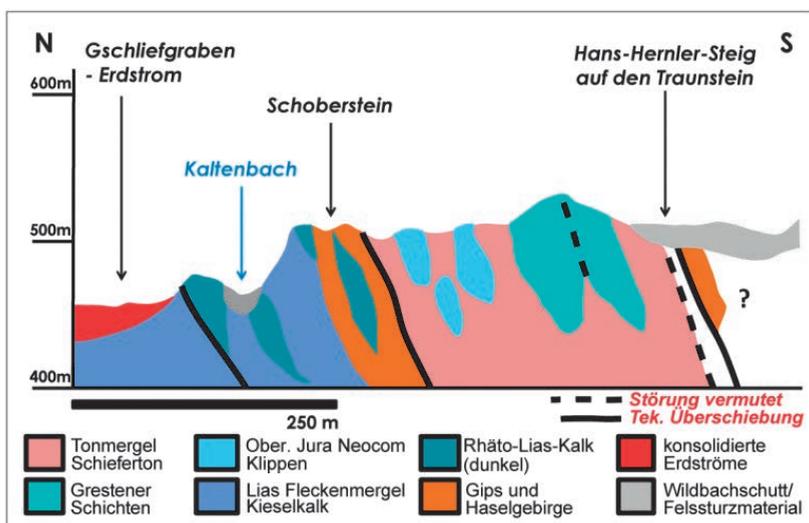
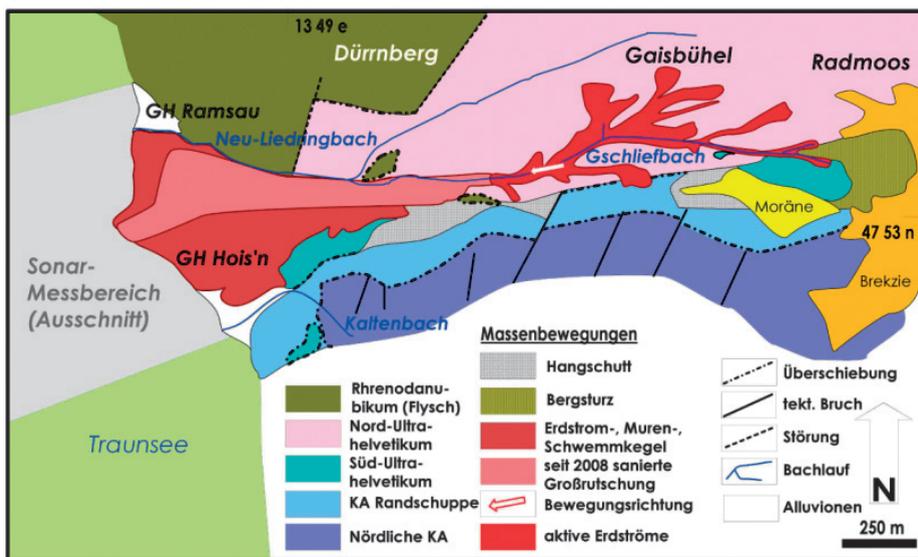


Abb. 5: Oben: Geologische Übersichtsskizze des Liedring-Gschlifgraben-Traunstein-Nordwand-Bereichs. Unten: N-S Profilschnitt durch den komplizierten tektonischen Bau am NW-Fuß des Traunsteins zum SW-Ende des Gschlifgraben-Kaltenbach-Bereichs hin (verändert nach Prey 1983).

gesamten *Holozän* regelmäßig stattfanden. Dies war vermutlich vor allem dann der Fall, wenn die Sedimentauflasten im ufernahen Bereich größeres Gewicht hatten, als der Auftrieb des Traunsees der inneren Reibung des Materials entgegensetzen konnte.

Erste Erkenntnisse dazu lieferten Schneider et al. (1987), und in der vergangenen Dekade waren es Millahn & Fruhwirth (2009), die sich der subaquatischen Untersuchung des Traunsees mittels geophysikalischer Methoden (Seismik) annahmen.

Prinzipiell geht man beim Aufbau des Gschlifgrabenfächers von der modellhaften Vorstellung eines Schichtbaus aus, bei welchem die jeweils jüngeren Erdströme die älteren überlagern (Moser, 2009; S. 66; Weidinger et al., 2011; S. 401). Je nach Einfluss des jeweiligen Einzugsgebietes und der damit verbundenen geänderten Sedimentzufuhr können sich sowohl die Materialien (eher kalkig, eher sandig oder eher tonig) als auch deren Anteile ändern. Kalkalpiner Schutt, der vom Traunstein als Wildbachschotter angeliefert wird, ist aufgrund seiner geringen Transportweite

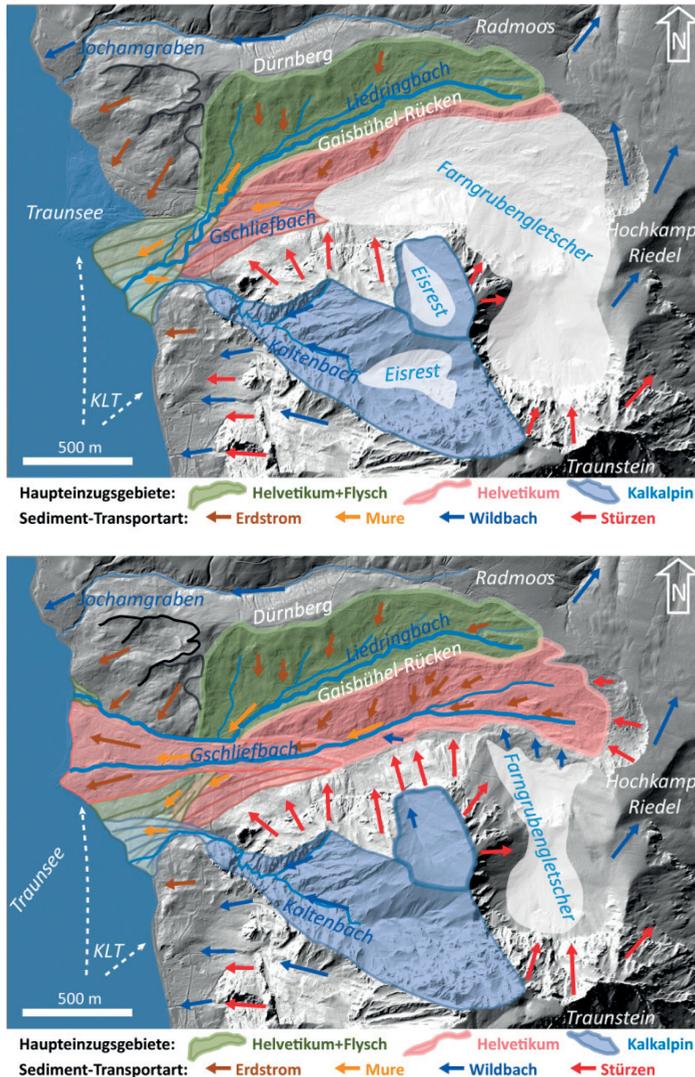


Abb. 6 (oben) und 7 (unten): Die geomorphologische Auswertung des geschummert dargestellten Laserscan-Höhenmodells des Gebietes Traunstein-Nordwestfuß-Gschlifgraben-Dürnberg. Die paläogeographische Bedingungen mit veränderten Einzugsgebieten, Abflussrichtungen und Sedimenttransportbedingungen vom frühen Spätglazial (links) zum frühen Postglazial (rechts) sowie die damit verbundene, wahrscheinlichste Genese und Materialzusammensetzung des Gschlifgrabenfächers sind dargestellt.

nur kantengerundet (Gasperl, 2008; S. 122) und neigt demnach zu höherer Stabilität und steilerem Böschungswinkel. Dahingegen zeigen die Kornverteilungen des Erdstrommaterials aus dem Gschlifgraben einen recht hohen Tongehalt von 11–31 %. Eine ausführliche Tonmineralanalyse ergab 73 % Smektit in der Tonfraktion. Eine hohe Fließgrenze (bis zu 59,7 %) sowie eine Austauschkapazität von bis zu 30,9 cmol/kg bestätigen den hohen Anteil an Schichtsilikaten. Dieser wird in oberflächennahen Schichten erst durch die

Verwitterung rutschungsrelevant, da seine hohe Quellfähigkeit zu Reibungsverlusten und Instabilitäten führt (Gunzl & Lackner, 2009).

4. Geologische Interpretation

In den folgenden Kapiteln (4.1–4.5) werden ausgewählte Profilschnitte der Fächerecholot- und SBP-Messungen (Abbildung 8) hinsichtlich des Aufbaus des Gschlifgrabenfächers sowie unterschiedlicher Prozesse am Abhang des Fächers interpretiert.

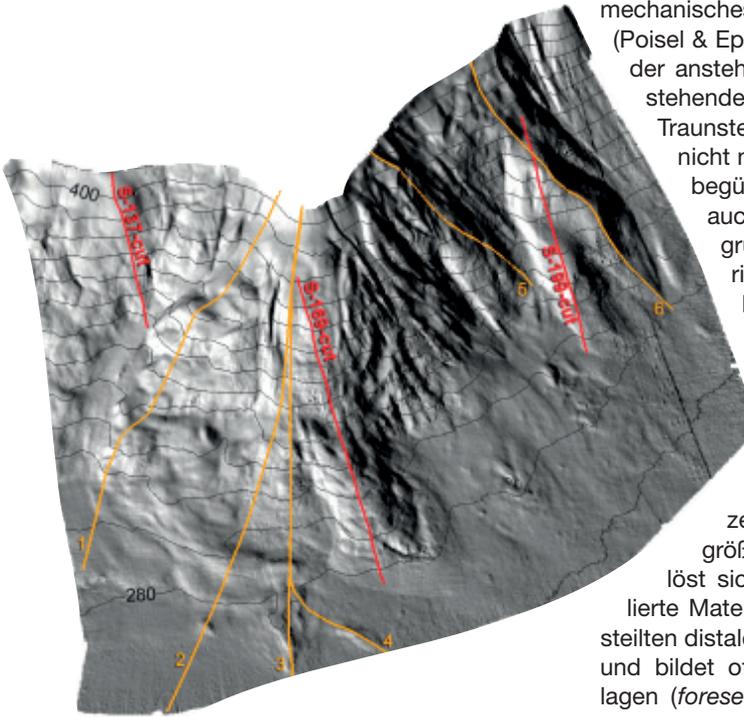


Abb. 8: Lage der DGM-Profileschnitte (1–6, gelb) sowie der Teilstücke („-cut“) der SBP-Messfahrten S-169, S-137 und S-199 (rot)

4.1 „Abbrüche“ aus Anstehendem im ufernahen Bereich

Felsstürzen und -gleitungen geht die Verringerung der Scherspannung an mehr oder weniger klar definierten Trenn- oder Gleitflächen voraus. Ob sich daraus eine Translationsrutschung, eine Rotationsrutschung oder ein Herauskippen (=toppling) bzw. eine Mischung aus allen dreien einstellt, hängt von den petrophysikalischen Eigenschaften des jeweiligen Materials/Sediments, dem Trennflächengefüge und den Gefügeeigenschaften ab. Als Ablagerung lassen sich bei fester kalkiger Unterlage Blockschichten oder Blockhalden zuordnen. Mehr oder weniger gut geschichtete Gleitmassen bzw. Gleitschollen lassen sich eher in weicheren Materialien (auflagernden Seesedimenten) identifizieren.

Im Bereich des Gschlifegraben Erdstrom-Muren- und Schwemmfächers sind solche Prozesse am Südrand der Ablagerungen zu erwarten. Dort sind es zum einen die anstehenden, tektonisch verschuppten Schollen der spröden Kalkalpenbasis, die auf dem unterlagernden duktilen Sockel des (Ultra-)Helvetikums aufliegen und so ein

mechanisches System „hart auf weich“ vorgeben (Poisel & Eppensteiner, 1989). Andererseits wird der anstehende Felsuntergrund durch vertikal stehende Brüche der „Königsee-Lammertal-Traunstein- (KLT-)Störung“ getrennt, die nicht nur solche Prozesse vorbereiten und begünstigen, sondern im speziellen Fall auch zu einer „Abtreppung“ des Untergrunds führen können. Von den bisherigen Messkampagnen wurde dieser Bereich allerdings noch nicht erfasst.

4.2 „Ab- und Eingleitungen“ aus Wildbachschwemmfächern im ufernahen Bereich

Ein typisches Phänomen von Deltaschüttungen in Seen ist das sukzessive Umlagern von Sedimenten in größere Tiefen des Gewässers. Meist löst sich dabei das in Schichten akkumulierte Material (*topset*) sukzessive an der übersteilten distalen Vorderfront des Schwemmkegels und bildet oft ebenso steil geneigte Sedimentlagen (*foreset*) der Schüttung. Diese verzahnen sich wiederum mit den am ferneren Seeboden zur Ablagerungen kommenden Feinsedimenten (*bottomset*). Gleiten größere Sedimentmassen auf ähnliche Weise ab, weicht das System nicht wesentlich von diesen Grundannahmen ab. Ein zu dieser Vorstellung passendes Bild liefern die Messdaten entlang des Sedimentsonarprofilabschnittes S-199-cut (Abbildung 9).

Das Profil beginnt (im Bild links oben) mit dem angeschnittenen Übergangsbereich zwischen kaum geschichteten Gschlifegraben-Erdströmen und dem flach und gut geschichteten *topset* der Wildbachschotter (ca. 8–13 m mächtig, stark reflektierend) aus dem Kaltenbach, die sich in Ufernähe (links oben) miteinander verzahnen. Die Schotter weisen eine deutliche Abbruchkante auf, die in eine teils oberflächlich gut sichtbare, teils durch Sedimente verdeckte aber gut erkennbare Diskontinuitätsfläche übergeht, welche als ehemalige Abgleitfläche einer größeren Sedimentmasse gedeutet wird. Die nicht geschichtete *foreset*-Schüttung verzahnt sich mit dem bzw. unterlagert das geschichtete *bottomset* weiter seewärts mit ca. 10–12 m Mächtigkeit. Dieses bildet eine geschichtete, ca. 7 m mächtige Auflage. Zuunterst, gegen den tieferen Seebereich hin, treten wieder mehrere Lagen (Generationen) von Erdstomablagerungen hervor, die an typischen Gefällsknicken im Profil zu erkennen sind.

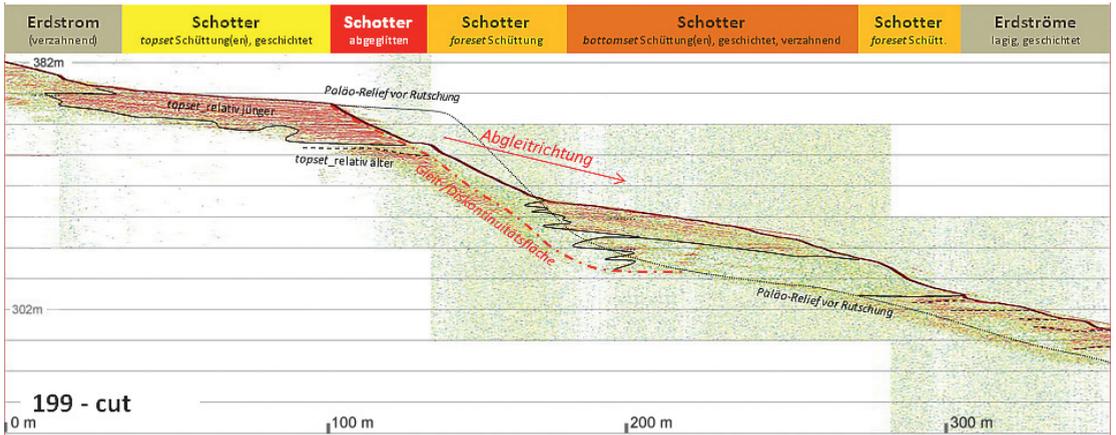


Abb. 9: Geologisch-geomorphologische Interpretation der SBP-Daten entlang des Profilabschnittes S-199-cut (Lage siehe Abb. 8)

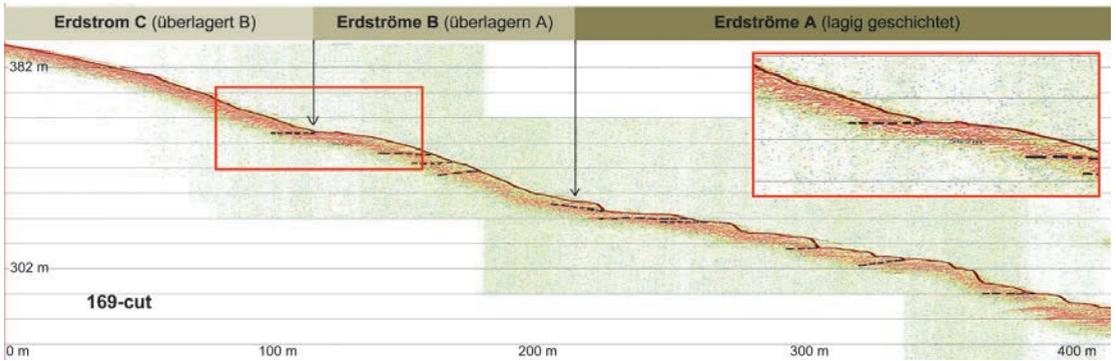


Abb. 10: Geologisch-geomorphologische Interpretation der SBP-Daten entlang des Profilabschnittes S-169-cut inkl. Detailvergrößerung (rotes Rechteck)

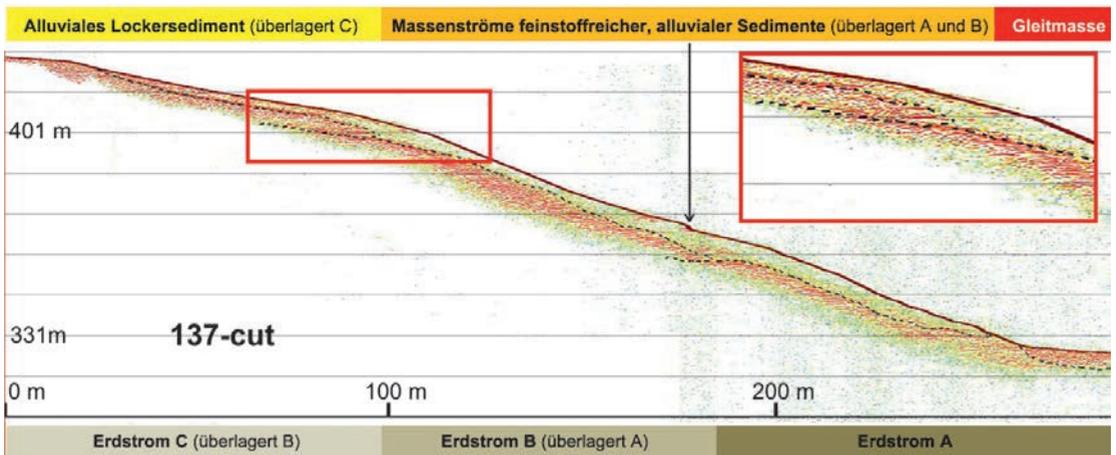


Abb. 11: Geologisch-geomorphologische Interpretation der SBP-Daten entlang des Profils S-137-c inkl. Detailvergrößerung (rotes Rechteck)

4.3 „Erdstromloben“ am Abhang des Gschlifgrabenfächers ins Traunseebecken

Mögliche Prozessarten können hier Rutschungen, Massenströme, Schuttströme (*Olisthostrome*) und daraus generierte Schlammströme sein, wobei es zu einem sukzessiven Abbau der Scherspannung bis hin zu einer quasi Verflüssigung innerhalb des gesamten bewegten Materials kommt. Solche subaquatischen Vorgänge sind anhand ihrer Produkte, wie Rutschmassen und Massenstromablagerungen (= *Olistholithe*) zu erkennen. Wie bereits aus der Analyse des obertägig aktiven Erdstroms von 2007-2008 ersichtlich wurde (Poisel et al., 2012; S. 271), scheint von solchen und ähnlichen Vorgängen vor allem der zentrale und orographisch rechte Teil des subaquatischen Gschlifgrabenfächers betroffen zu sein. In Kombination mit seiner stark bindigen Materialzusammensetzung (Gunzl & Lackner, 2009) weist er dadurch auch ein geringeres Gefälle als sein älterer und besser konsolidierter, südlicher Nachbar auf (Weidinger & Weber, 2010; S.17).

Im zentralen Teil dieses nördlichen Bereiches treten Massenstromablagerungen auf, die sich bis auf den Grund des Traunsees fortsetzen und den obertägigen Erdstromloben ähnlich sind.

Der SBP-Profilabschnitt S-169-cut (Abbildung 10) zeigt vom Liegenden zum Hangenden drei Bereiche: Zuunterst ist eine lagig geschichtete Abfolge aus max. 5 m mächtigen Erdströmen erkennbar, die sich durch eine mehr oder weniger deutliche Abtreppung und sie trennende Diskontinuitätsflächen erkennen lassen (Erdströme A). Beides, wie auch die daraus resultierende, gleichmäßige Gefällskurve dieses Abschnitts könnte durch den

Materialwechsel (vermehrt sandig-tonig aus dem Liedringgraben) innerhalb einer allerersten spät- bis postglazialen Erdstromgeneration bedingt sein. Diese Interpretation wird durch die an Land gewonnenen Bohrkerne und deren geologische Interpretation untermauert (vergleiche Moser, 2009; S. 66). Darüber folgen ein weniger deutliches Erdstromsystem (Erdströme B), sowie ein überlagernder homogener Erdstrom C. Beide zeigen ein leicht konvexes Längsprofil, welches sich durch die geänderte Materialzufuhr (vermehrt bindig-tonig aus dem Gschlifgraben) im Postglazial ergeben hat und zumindest auf subrezent aktive Vorstöße (ähnlich einem Gletscher) hinweist.

Auch ganz im Norden des Sedimentfächers lassen sich ähnliche Phänomene beobachten. Wie die Auswertung des Messprofilabschnittes S-137-cut zeigt (Abbildung 11), treten hier drei übereinander lagernde, d.h. nach oben hin jünger werdende Generationen von Erdströmen auf, deren Mächtigkeit durch das Sonar nicht erfasst werden konnte. Für die in Ufernähe alluvial eingetragene Sedimentlage darüber dürften Schüttungen des dem Profil nahen Liedringbaches verantwortlich gewesen sein. Vor allem feinere (weil schlechter reflektierende) Bestandteile dieses Bachsediments glitten in zumindest 2 Massenströmen (Pfeil markiert Geländeknick) in größere Tiefen des Traunsees ab und überlagern mit einer Mächtigkeit von ca. 5 m die Erdstromgenerationen.

4.4 „Spontane Rutschung(en)“ am Abhang des Gschlifgrabenfächers ins Traunseebecken

Eine Sonderstellung nimmt der Bereich zwischen den Profilabschnitten S-169-cut und S-137-cut

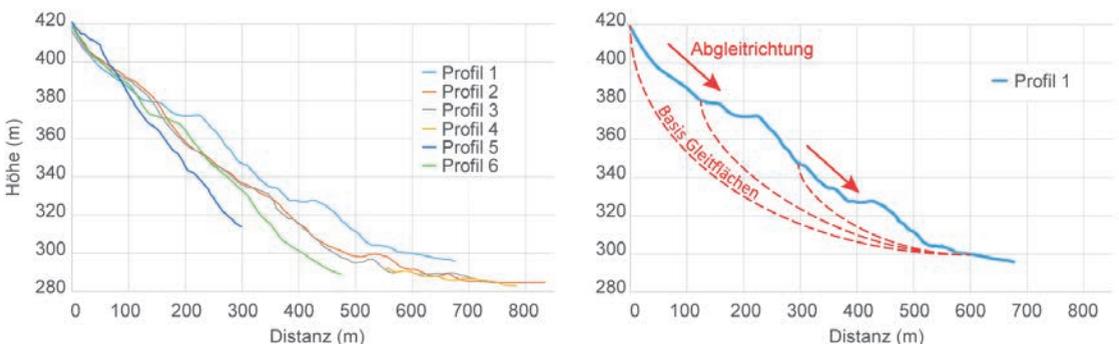
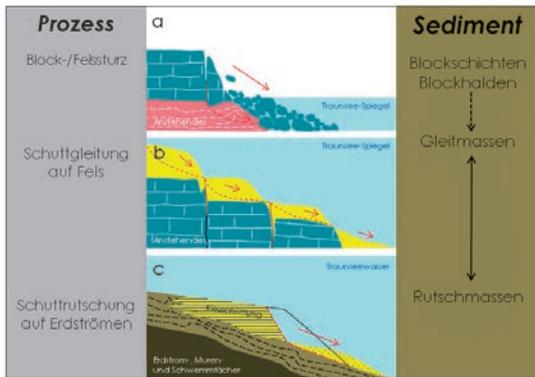


Abb. 12: Vergleicht man eine repräsentative Auswahl von DTM-Profilen über den Sedimentfächer (links), so unterscheidet sich das Gefälle von Profil 1 (in blau) deutlich von allen anderen. Zwei Verebnungsflächen in ca. 50 m und 90 m Seetiefe weisen auf eine Rotationsrutschung (b) hin, die entlang mehrerer Gleitflächen in Teilschollen vonstattengegangen sein dürfte (Lage der Profile siehe Abb. 8).



4.5 Subaquatische Muren und Trübeströme

Mit dem Abgleiten von stark wassergesättigtem Feinsediment gerät dieses durch Turbulenzen in Suspension, wobei sich Trübeströme (= *turbidity currents*) bilden, die sich als *Turbidite* mit gradierter Schichtung abgelagern (Abbildung 13f). Diese scheinen sich am Gschlifgrabenfächer vor allem aus den bereits abgelagerten Rutschmassen oder aus Feinsedimenteintrag der Bäche gebildet zu haben und dringen am weitesten in die Tiefen und gegen die Seemitte hin vor, vor allem am Rande vom zentralen zum nördlichen Bereich.

5. Interpretation der ausgewerteten Messprofile

Der Gschlifgrabenfächer ist von prozessual unterschiedlich generierten und zudem lithologisch unterschiedlichen klastischen Sedimenten aufgebaut. Er besteht daher aus inhomogenem Material und zeigt einen heterogenen Internbau. In weiterer Konsequenz sind auch jene Prozesse zu unterscheiden, die dieses Sediment aus Ufernähe in größere Tiefen des Traunsees weiter umlagern. Vereinfacht ausgedrückt, setzt sich das landseitige morphologische Erscheinungsbild des Gschlifgrabenfächers (Weidinger & Weber, 2009; S. 17) bis in die Tiefen des Traunsees weiter fort (Abbildung 2).

So überwiegen im Süden einerseits Prozesse im System „hart auf weich“, andererseits wird der Umstand wirksam, dass der, aus dem Kalkalpin einziehende Kaltenbach große Schottermassen ins Fächersystem lieferte. Solche kiesigen Bereiche begünstigen offenbar verstärkte Erosion und Ufer(an)brüche, je nach Sortierung und Rundungsgrad der Komponenten bzw. der Lage des daraus resultierenden, kritischen Böschungswinkels („selbstorganisierte Kritikalität“). Mit Erreichen des zentralen Bereichs stellen sich vermehrt Erdstromablagerungen ein. Diese liegen in Generationen übereinander und bilden je nach Material mehr oder weniger steile, z.T. auch konvexe Böschungen, die subrezent unter Umständen aktiv vorstoßen. Aus ihnen können überlagernde feinkörnige Bachsedimente als Trübeströme abgleiten und die Erdströme damit überdecken. Kommt es – vermutlich im Zuge vermehrter Erdstromaktivität – zu großer Überlagerung im Uferbereich, können sich spontane Umlagerungen durch Abgleiten größerer Massen ergeben, was zu katastrophalen Uferbrüchen führen kann.

Auf der Grundlage des oben dargelegten und der (Sediment-) Sonarmessergebnisse können

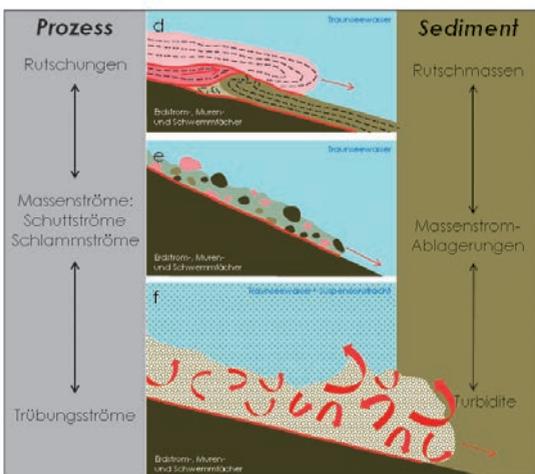


Abb. 13a-f: Mögliche Prozesse von subaquatischen Massenbewegungen i) am Fuße der Kalkalpin Randschuppe im ufernahen Bereich und ii) am Abhang des Liedring-Gschlifgraben-Kaltenbach-Schwemmfächer (a-c) bzw. iii) aus dessen abgelagerten Rutschmassen (d-f); (stark verändert nach Plöchingner & Karanitsch, 2002).

ein. Hier sind im DTM-Profil 1 durch mehrere Verebnungsflächen klar getrennte Schollen einer Großrutschung bzw. Phasen mehrerer Rutschungen zu erkennen (Abbildung 12, Lage Abbildung 8), was auf spontanes Abgleiten einer zu großen Auflast im Zuge erhöhter Erdstromaktivität hindeutet. Diese Beobachtungen decken sich mit historischen Daten, denn in diesem Bereich sollen in den 1730er Jahren mehrere Gehöfte mehr oder weniger rasch im Traunsee versunken sein (Weidinger, 2009; S. 197), wodurch sich am Ufer ein Bucht bildete, die noch heute zu erkennen ist und deren Begrenzung den „Abrissbereich der Abgleitung“ darstellt.

nun verschiedene Prozesstypen abgeleitet werden, die an diesen Materialumlagerungen vom Uferbereich in tieferes Wasser mehr oder weniger intensiv beteiligt waren und das Bild des subaquatischen Fächers besser verständlich machen (Abbildung 13 a-f).

Die Bewegungen unter Wasser unterscheiden sich dabei grundsätzlich nicht wesentlich von jenen an der Erdoberfläche. Allerdings werden durch das omnipräsente Wasser Scherspannungen an Bewegungsflächen sowie die innere Reibung des Materials verringert bzw. Suspensionspartikel vor der Sedimentation längere Zeit in Schwebelage gehalten. Ersteres kann zum vermehrten spontanen Abgleiten größerer Sedimentpakete führen, vor allem dann, wenn der kritische Böschungswinkel je nach Kornrundungsgrad überschritten wird. Letzteres bedingt bei der verzögerten Sedimentation Unterschiede im Schichtaufbau (*Gradierung, Kreuzschichtung*), was wiederum zur Bildung von Schwächezonen führen kann.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Die Ergebnisse dieser interdisziplinären Studie zeigen, dass für detaillierte geologisch-geomorphologische Untersuchungen des subaquatischen Bereichs von Erdströmen hydrographische Vermessungsdaten erforderlich sind, welche einerseits die Topographie des Seebodens mit hoher Detailgenauigkeit darstellen, und andererseits Informationen über den Schichtaufbau der oberen Sedimentschichten liefern. Zur Detektion von Sedimentumlagerungsprozessen bedarf es eines flächendeckenden, detailgetreuen und dezimetergenauen Geländemodells aus Fächer-echolotmessungen. Um die Echolotdaten mit der geforderten hohen Genauigkeit zu erhalten, musste das gesamte Messsystem, aber auch der Messprozess die höchsten Qualitätsansprüche erfüllen. Dazu gehören neben einem adäquaten Vermessungsfächer-echolot insbesondere die Integration eines hochwertigen Inertialmesssystems mit einer Bewegungsgenauigkeit von besser als $\pm 0.1^\circ$, die Einengung des Fächeröffnungswinkels auf etwa Zweidrittel des Maximalöffnungswinkels, die überlappende Abtastung sowie eine maximale Geschwindigkeit von 5 km/h. Eine vorschriftsmäßige Kalibrierung des Messsystems (Patch-Test) sowie zeitlich und räumlich verteilte Wasserschallgeschwindigkeitsmessungen über den gesamten Tiefenbereich sind ebenso Voraussetzung für die Erreichung der geforderten DGM-Qualität des subaquatischen Erdstromausläufers.

Die sub-bottom-profiler-Daten der parametrisch erzeugten 10 kHz-Frequenz lieferten aussagekräftige Echogramme, in welchen die einzelne Reflektionshorizonte des Seebodenuntergrundes mit hoher räumlicher Auflösung (< 10 cm) ersichtlich sind. Voraussetzung dafür ist aber eine genaue Positionsbestimmung in Kombination mit einer hochwertigen Bewegungssensorik, um ein „verschmieren“ der Echolotmessdaten aufgrund von Roll- und Nickbewegungen des Bootes zu vermeiden. Anhand der mehr als 60 sub-bottom-profiler Messfahrten konnten wichtige Einblicke in den internen Aufbau der oberen Sedimentschichten des gesamten Untersuchungsgebietes gewonnen werden. Die in den 10 kHz-Echogrammen ersichtlichen Reflektionshorizonte weisen u.a. auf Bereiche mit lagig geschichteten Erdströmen und sie trennende Diskontinuitätsflächen oder auf subaquatische Abgleitungen hin.

Die wiederholte hochauflösende und flächendeckende Erfassung der subaquatischen Topographie sowie der heterogenen Seesedimentstrukturen würde eine verlässliche Detektion von Veränderungen der Oberflächenstruktur und damit ein Monitoring von rezenten subaquatischen Sedimentationsprozessen ermöglichen. Im Hinblick auf eine Frühwarnung von möglichen Folgeprozessen im Falle von Massenverlagerungen bei zukünftigen Rutschungsereignissen könnte mit dieser Methode auch auf Bereiche mit erhöhter Anfälligkeit für großflächiges Versagen hingewiesen werden.

Die im Rahmen dieser Studie erarbeiteten Ergebnisse sind somit eine sehr gute Grundlage für den fachlichen Diskussionsprozess im Rahmen des derzeit unter der Leitung der Wildbach- und Lawinenverbauung in Ausarbeitung befindlichen erweiterten Monitoringkonzepts für den Gschlifgraben.

Referenzen

- Amtmann, J. & Eichkitz C. G., 2010: Erzeugung eines dreidimensionalen Geschwindigkeitsmodells auf Basis von Refraktionstomographieauswertungen im Gschlifgraben, Österreich. *Journal of Alpine Geology*, 52, pp. 81, Wien.
- Baumgartner P. & Sordian H. 1982: Zum horizontalen und vertikalen Aufbau des Erd- und Schuttströme-Kegels des Gschlifgrabens am Traunsee bei Gmunden (Oberösterreich). *Jb. Oö. Mus.-Ver.* 127/1, 227-236, Linz.
- Eichkitz, C.G., Schreilechner, M.G., Amtmann, J. & Schmid, C. 2009: Shallow seismic reflection study of the Gschlifgraben landslide deposition area – Interpretation and three dimensional modeling. *Austrian Journal of Earth Sciences*, 102(2), pp. 52-60, Vienna.

- 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, Online ISBN 978-3-7001-7022-8/DOI 10.1553/gde2010, p. 45-58.
- Gunzl S. & Lackner S. 2009: Der Einfluss von Tonmineralen auf Massenbewegungen am Beispiel des Gschlifegrabens. Bakkalaureatsarbeit Universität für Bodenkultur, 121p., Wien.
- Heine, E. 2015: Hydrographische Vermessung des Gschlifegraben-Schuttkegelausläufers im Traunsee. In: In: Hanke, Klaus; Weinold, Thomas: 18. Internationale Geodätische Woche: Obergurgl 2015. Heidelberg: Wichmann, ISBN 978-3-87907-554-6, S. 28 - 34.
- 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. *Swiss Journal of Geosciences*, 104(3), 425–443. doi:10.1007/s00015-011-0083-z
- Marschallinger, R., Eichkitz, C.G., Gruber, H., Heibl, K., Hofmann, R. & Schmid, K. 2009: The Gschlifegraben landslide (Austria): A remediation approach involving torrent and avalanche control, geology, geophysics, geotechnics and geoinformatics. *Austrian Journal of Earth Sciences*, 102(2), pp. 35-51, Vienna.
- Millahn, K, Weber, F, Niesner, E, Grassl, H, Hyden, W, Kerschner, F, Morawetz, R, Schmid, C & Weidinger, JT 2008: Ergebnisse geophysikalischer Untersuchungen im Gschlifegraben bei Gmunden/OÖ in Hinblick auf die Massenbewegungen' Jahrbuch Geologische Bundesanstalt, vol 148, pp. 117-132, Wien.
- Millahn K. & Fruhwirth R. K. 2009: Seeseismik Traunsee. Vortrag und ppt-Präsentation beim ÖAW-Gschlifegraben-Symposium am 1. April 2009 in Gmunden.
- Moser G. 2009. *Geo-Management im Katastrophenfall Gschlifegraben*. In: Weidinger J.T. & Köck G. (eds.), ÖAW-Gschlifegraben-Symposium, Proceedings vom 1. April 2009, Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Online ISBN 978-3-7001-7022-8/DOI 10.1553/gde2010, p. 59-68.
- Plöchinger B. & Karanitsch P. 2002: Faszination Erdschicht mit Brennpunkt Mödling am Alpenostrand. Heimverlag, 238 p., Bruck an der Leitha.
- Poisel R. & Eppensteiner W. 1989: Gang und Gehwerk einer Massenbewegung Teil 2: Massenbewegungen am Rand des Systems „Hart auf Weich“. *Felsbau* 7/1, 16-20.
- Poisel R., Hofmann R., Preh A., Sausgruber T. & Schiffer M. 2012: Gschlifegraben mudslide (Austria): hazard evaluation and risk mitigation. *Natural Hazards* 61/1, 267-279
- Prey S. 1983: Das Ultrahelvetikum-Fenster des Gschlifegrabens südöstlich von Gmunden (Oberösterreich). *Jahrbuch der Geol. B.-A.* 126/1, 95-127.
- Schneider J., Müller J. & Sturm M. 1987: Die sedimentologische Entwicklung des Attersees und des Traunsees im Spät- und Postglazial. In: In: Dirk van Husen (Hrsg.), Das Gebiet des Traungletschers, Oberösterreich – eine Typregion des Würm-Glazials. Mitt. Komm. Quartärforsch. Österr. Akad. Wiss. 7, 51-78.
- Schreilechner M. G., C. G. Eichkitz & J. Amtmann 2012: Geophysical study and structural modelling of a mass movement in upper Austria. In: D. de Wrachien: Monitoring, simulation, prevention and remediation of dense and debris flows IV, WIT transactions on engineering sciences. WIT Press, Southampton.
- Shugar, D. H. 2013: Bathymetric and geophysical surveys of the southern end of Kluane Lake, Yukon. In: K. E. MacFarlane, M. G. Nordling, & P. J. Sack (Hrsg.), Yukon Exploration and Geology 2013 (S. 221–231).
- Supper, R., Baron, I., Ita, A., Winkler, E., Jochum, B. & Motchka, K. 2010: Airborne geophysical survey and innovative landslide monitoring at Gschlifegraben, Austria. Near Surface 2010 – 16th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, 6 - 8 September 2010, Zurich, Switzerland.
- Weidinger J. T., Niesner E. & Millahn K. 2011: Chronicle of an Earthflow foretold – the 2008 Gschlifegraben event, Austria. *Zeitschrift für Geomorphologie* 55, Suppl. 3, 375-407.
- Weidinger J. T. 2009: Das Gschlifegraben-Rutschgebiet am Traunsee-Ostufer (Gmunden/OÖ) – ein Jahrtausende altes Spannungsfeld zwischen Mensch und Natur. *Jahrbuch der Geol. B.-A.* 149/1, 195-206.
- Weidinger J. T. 2010: Die geologisch-geomorphologische Kartierung des Gschlifegraben-Rutschgebiets bei Gmunden (OÖ) in den Jahren 2004-2007. In: Weidinger J.T. & Köck G. (eds.), ÖAW-Gschlifegraben-Symposium, Proceedings vom 1. April 2009, Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Online ISBN 978-3-7001-7022-8/DOI 10.1553/gde2010, p. 7-12.
- Weidinger J.T. 2011: „Was wäre gewesen, wenn ...?“ – Vier Jahre nach der Jahrhundertratschung aus dem Gschlifegraben bei Gmunden. *Mach 2-Zeitschrift für Technikgeschichte* 02/2012: 63-69, OÖ Landesmuseum-Linz.
- Weidinger J.T. & Weber F. 2010: Ergebnisse und geologische Interpretation der seismischen Messungen am Schuttkegel der Gschlifegraben-Erdströme bei Gmunden (OÖ) im Jahre 2004. In:
- Weidinger J.T. & Köck G. (eds.): ÖAW-Gschlifegraben-Symposium, Proceedings vom 1. April 2009, Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Online ISBN 978-3-7001-7022-8/DOI 10.1553/gde2010, p 13-32.

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

Mag. Dr. rer.nat. Johannes Weidinger, ERKUDOK © Institut in den Kammerhof Museen Gmunden (K-Hof), Kammerhofgasse 8, 4810 Gmunden.

E-Mail: museum@gmunden.ooe.gv.at

Mag. Dr. rer.nat. Joachim Götz, AG Geomorphologie und Umweltsysteme, Universität Salzburg, Hellbrunnerstrasse 34, 5020 Salzburg.

E-Mail: joachim.goetz@sbg.ac.at