

# 22. Geoforum Umhausen 15. – 16. Oktober 2020



**Geoforum**  
**Tirol**

# TAGUNGSBAND

## Grußworte 2020 von Landeshauptmann-Stellvertreter ÖR Josef Geisler

Sehr geehrte Tagungsteilnehmerinnen und Tagungsteilnehmer, werte Referentinnen und Referenten, liebes Organisationsteam!

Das heurige 22. Geoforum Umhausen findet in einem Jahr statt, das von der Corona-Pandemie geprägt ist. Dies hat auch zu Planungsänderungen für die Tagung geführt. Das nach außen hin sichtbarste Zeichen ist der Abendvortrag, der erstmals seit vielen Jahren nicht öffentlich, sondern nur für die Tagungsteilnehmer selbst durchgeführt wird.



Die Menschen in Tirol waren heuer bisher aber nicht nur von der pandemischen Krankheit Covid-19 stark betroffen, sondern teilweise - wie in den letzten Jahren auch - von Naturereignissen. Gerade die Bewohner des hinteren Ötztals waren auf Grund großer bedrohlicher Hangbewegungen wochenlang von Tirol abgeschnitten und mussten große Umwege über das Timmelsjoch und Südtirol in Kauf nehmen, um beispielsweise die Landeshauptstadt Innsbruck zu erreichen.

Das Problem der Unterbrechung der Ötztalstraße in das hintere Ötztal konnte Dank des interdisziplinären Zusammenwirkens von Geologen der Landesgeologie und externen Geologen, von Fachleuten der Abteilung Geoinformation des Landes und Technikern der Landesbaudirektion in der kürzest möglichen Zeit in vorbildlicher Weise gelöst werden. Als sowohl für Naturgefahren als auch für das Landesstraßennetz zuständiges Mitglied der Landesregierung begrüße ich es daher sehr, wenn ein Block von drei Vorträgen beim heurigen Geoforum diese sehr positive Zusammenarbeit thematisiert. Das sehr interessante Thema des Abendvortrages zeigt das Zusammenwirken meteorologischer Ereignisse und geologischer Prozesse auf, was thematisch zu diesem Vortragblock dazu passt.

Das 22. Geoforum Umhausen bietet mit seinen Vorträgen aber auch Einblick in neue Untersuchungsmethoden und in deren Weiterentwicklung, beispielsweise im Bereich der 3D Photogrammetrie, der geologischen Untersuchung von Sedimenten in Tiroler Seen oder betreffend hydrogeologische Untersuchungen an Grundwässern Tirols. Im Hinblick auf den aktuellen Prozess des Klimawandels befürworte ich diese Forschungen, die überwiegend unter dem leitenden Blick der Landesgeologie und der Abteilung Wasserwirtschaft ablaufen, sehr.

Ebenfalls möchte ich die Bedeutung der im heurigen Geoforum breiten Darbietung von Untersuchungsergebnissen unterstreichen, die im Zusammenhang mit der nötigen „Ertüchtigung“ unserer alpinen Wälder im Hinblick auf die Klimaänderungen stehen.

Ich bin sicher, dass das Geoforum auch heuer wieder erfolgreich Beiträge liefert, damit im Hinblick auf den Klimawandel geeignete Strategien entwickelt werden können, die der Tiroler Bevölkerung und den Gästen aus dem In- und Ausland zeigen, dass die Zukunft nicht von Schreckensszenarien geprägt sein wird, sondern dass es wert ist hier zu leben oder als Gäste den wohlverdienten Urlaub in unserem schönen Land Tirol zu genießen.

Ich wünsche Ihnen, meine sehr geehrten Damen und Herren aus dem In- und Ausland, auch heuer wieder eine fachlich hochwertige Tagung im Rahmen des 22. Geoforums Umhausen und möchte mich beim kleinen Organisationsteam dieser Tagung für ihr großes Engagement bedanken. Ich darf gleichzeitig meiner Zuversicht Ausdruck verleihen, dass die Erfolgsgeschichte des Geoforums noch viele Jahre weitergehen wird.

ÖR Josef Geisler  
(Landeshauptmann-Stellvertreter von Tirol)

## Grußworte 2020 von LA Klubobmann Bgm. Mag. Jakob Wolf

Sehr geehrte Tagungsteilnehmerinnen und Tagungsteilnehmer, sehr geehrte Vortragende, liebes Organisationsteam!

Als Bürgermeister der Gemeinde Umhausen freut es mich sehr, dass die renommierte und hochkarätige Tagung Geoforum Umhausen zum 22. Mal hier in Umhausen/Niederthai stattfindet.



Nicht nur Covid 19 hat 2020 das Leben weltweit - und damit auch in Tirol - sehr negativ beeinflusst, sondern auch die Auswirkungen des Wetters auf unser Leben und unseren alpinen Lebensraum sind auch heuer immer wieder deutlich spürbar geworden. Gerade das Ötztal als Tal in dem das Geoforum Umhausen jährlich abgehalten wird, war im heurigen Sommer besonders betroffen, war doch die einzige Straßenverbindung in die südlichen Talabschnitte und Siedlungsbereiche wochenlang isoliert. Die Ortsteile Untergurgl, Obergurgl, Hochgurgl, Zwieselstein und Vent waren nicht nur von ihrem Hauptort Sölden, sondern von ganz Tirol wegen bedrohlicher Sturz-, und Murenereignissen und Großhangbewegungen abgeschnitten. Nur durch das konsequente Handeln und das hervorragende Zusammenspiel der Dienststellen des Landes Tirol, nämlich der Landesgeologie, der Abteilung Geoinformation und der Experten der Landesbaudirektion und der Straßenmeisterei konnte die Gefahrensituation so rasch wie möglich in den Griff bekommen und der Verkehrsweg wieder in einen sicheren Zustand versetzt werden. Es ist dies eines der herausragenden Beispiele interdisziplinärer Zusammenarbeit, wie sie von den Gründern des Geoforums von Anfang an als Leitmotiv aller Geoforum-Tagungen gesehen wurde.

Auch die anderen Vorträge des 22. Geoforums Umhausen thematisieren, dass Interdisziplinarität notwendig ist, um komplexe Prozesse in unserer alpinen Natur verstehen zu können und um realisierbare Lösungen für komplizierte Probleme zu finden.

Als Bürgermeister von Umhausen bedauere ich es natürlich sehr, dass der Abendvortrag Corona-bedingt heuer nicht öffentlich zugänglich ist, sondern nur für die Tagungsteilnehmer abgehalten werden kann. Die Bevölkerung, für die dies bereits seit Jahren ein Fixpunkt auf dem Terminkalender ist, hat sicherlich dafür Verständnis, dass sie aus gesundheitlichen Sicherheitsgründen diesmal nicht an der Tagung teilhaben kann. Wir alle hoffen aber sehr, dass dies 2021 wieder möglich sein wird.

Ich wünsche dem tüchtigen Organisationsteam und Ihnen allen nun eine spannende und interessante Tagung und hoffe Sie auch 2021 zum 23. Geoforum Umhausen wieder in unserer Gemeinde begrüßen zu dürfen.

Mag. Jakob Wolf

(Klubobmann der Volkspartei im Tiroler Landtag und Bürgermeister der Gemeinde Umhausen)

## Grußworte 2020 von Hofrat Dr. Gunther Heißel

Sehr geehrte Tagungsteilnehmerinnen und Tagungsteilnehmer, sehr geehrte Referenten!

Das Jahr 2020 ist wahrlich ein Jahr voller Heimtücken und Erschwernisse und zwar in einem Ausmaß, wie wir es als Nachkriegsgeneration erst durch die Corona-Pandemie kennengelernt haben. Um mit Queen Elisabeth II. zu sprechen - es ist wahrhaft ein annus horribilis. Es ist nicht nur die Krankheit Covid-19, die uns so schwer zu schaffen macht, sondern es sind auch Naturereignisse, von der manche Bewohner unserer engen Tiroler Täler heuer betroffen waren.



Gerade der Umgang mit der Pandemie und deren teils verheerende Auswirkungen auf unsere Gesundheit, aber auch auf unser gesellschaftliches Leben und unsere Wirtschaft zeigt uns drastisch, wie wir mit derartigen schwerwiegenden Problemen nicht wirklich gut umgehen können. Das, was schon seit Jahren immer mehr auffällt, zeigt sich jetzt in ganzer Deutlichkeit: Wir haben verlernt zu diskutieren, andere Meinungen anzuhören oder gar gelten zu lassen. Eines von vielen Zitaten zeigt, dass dies immer offensichtlicher wird und einer Demokratie und der Wissenschaft eigentlich unwürdig ist. Ich darf die Redakteurin Anita Heubacher der Tiroler Tageszeitung mit ihrem Leitartikel vom 06.08.2020 zitieren, wenn sie auf Seite 2 im Zusammenhang mit dem Umgang mit der Pandemie sagt: *„...Das bloße In-Relationstellen von Zahlen reicht aus, um als Verharmloser der Corona Pandemie zu gelten und die Moralkeule auszupacken. Um endgültig jede Auseinandersetzung vom Tisch zu wischen, hat sich das Wort „Corona-Leugner“ etabliert. ....“*

Man sollte sich dabei im Klaren sein, dass es niemanden gibt, der die absolute Wahrheit erkennen kann. Es sind stets Wissensstände, die beim aktuellen Stand der Wissenschaften mehr oder weniger Sinn machen und so als (augenblicklicher) Stand des Wissens m. E. eine Zeit lang gelten dürfen. Wenn es z. B. heißt: „Alle Studien zeigen das“, kann man zwar ableiten, dass damit der aktuelle Wissensstand gegeben zu sein scheint. Man sollte aber nie vergessen, dass Wissen und Erkenntnis nicht eine Frage demokratisch zu zählender Meinungsmehrheiten sind, weil manchmal eine kleine Minderheit oder gar nur ein Einzelner in der Tat plausiblere und nachvollziehbarere Erkenntnisse und Ergebnisse vertritt und daher eher näher an der Wahrheit liegt und daher „gehört“ werden sollte. Die Geschichte der Wissenschaft der letzten paar hundert Jahre ist voll solcher Beispiele der Intoleranz.

Das Geoforum Umhausen hat sich seit seiner Gründung 1999 stets um einen offenen und fächerübergreifenden Diskurs bemüht. Dies ist eine der Stärken dieser Tagung seit 1999. Ich bin der Meinung, dass wir auch heuer wieder mit unserem Programm hochkarätige Vorträge aus den verschiedensten Bereichen der angewandten und theoretischen Wissenschaften anbieten können und es wäre fatal, wenn sich daraus nicht eine offene und ehrliche Diskussion entwickeln würde. Die heurige Tagung bietet jedenfalls von der Zeitplanung her genügend Möglichkeiten dazu.

Ich darf mir das jedenfalls sehr wünschen und bin sicher, dass dies auch in Ihrem Sinn ist.

Hofrat Dr. Gunther Heißel

(Präsident des Vereins Geoforum Tirol)

## **Grußworte von Mag. Oliver Schwarz, Tourismusverband**

Sehr geehrte Tagungsteilnehmerinnen und Tagungsteilnehmer des 22. Geoforum Umhausen 2020!

Das Leben in unserem schönen, vielfach von steilen Gebirgen geprägten Land ist immer wieder von Naturereignissen betroffen. Mitunter in geringerem Ausmaß, teils sehr stark. Gerade der heurige Sommer hat uns gezeigt, wie groß die Verwundbarkeit unserer Verkehrswege und Siedlungsräume sein kann. Gefährliche Erosionsprozesse haben eine wichtige Talstraße im Ötztal für mehrere Wochen unterbrochen. So waren die Ortschaften von Gurgl, deren wirtschaftliches Hauptstandbein der Tourismus ist, vollkommen von der Außenwelt abgeschnitten.



Von der Geologie bis zu den Technikern des Straßenbaus: Wir können froh sein, dass wir im Land Tirol auf hochkompetente Experten zurückgreifen können. Sie sind in kürzester Zeit in der Lage, Lösungen zu erarbeiten und auszuführen, um gerade in solchen Notlagen effizient Abhilfe zu schaffen. Dies gilt meines Erachtens auch für die anderen Themenkreise des heurigen Geoforums. So beschäftigt es sich u. a. mit den Grundwässern und damit letztlich mit unserer Wasserversorgung. Es ist wichtig, dass der Wald klimafit gemacht werden kann. Wir stehen angesichts anhaltender klimatischer Veränderungen vor der Herausforderung, Erosionen zu unterbinden und damit unseren Lebensraum in den Bergen zu erhalten. Letztlich gilt es, auch unseren touristischen Wirtschaftsraum und die Existenzgrundlage unserer Bevölkerung abzusichern.

Es zeichnet die Tagungsreihe Geoforum Umhausen besonders aus, dass sie interdisziplinär und mit Experten aus dem In- und Ausland für einen Wissensaustausch sorgt. Dabei werden auch praktikable und umsetzbare Problemlösungen erarbeitet.

Das Geoforum Umhausen hat seit Jahren einen ausgezeichneten Ruf und spricht nicht nur die teilnehmenden Fachleute, sondern auch externe Gäste an. Dass der Zutritt der Bevölkerung zum heurigen Abendvortrag aus Corona-Gründen unterbunden werden muss, ist deshalb ein kleiner Wermutstropfen. Dennoch freue ich mich sehr, das diesjährige Geoforum Umhausen eröffnen zu dürfen. Ich bin mir sicher, dass der Erfolgsweg dieses Formats in der Zukunft fortgesetzt wird.

So wünsche ich Ihnen allen eine aufschlussreiche und interessante Tagung und hoffe sehr, dass sie von allfälligen Beeinträchtigungen der COVID-Pandemie unbeeinflusst über die Bühne gehen kann.

Mag. Oliver Schwarz

Geschäftsführer Ötztal Tourismus

## Kriterien authentischer Hybridseismik

Walter Frei

GeoExpert AG, CH-8424 Embrach / Schweiz, [w.frei@geoexpert](mailto:w.frei@geoexpert)

### **Abstract**

*Conventional reflection seismic velocity analysis tools invariably provide unsatisfactory results when applied to seismic data acquired for mapping complex subsurface structures in the near surface depth range until 300 to 500 m.*

*The method of hybrid seismic surveying, a combination of high-resolution reflection seismic profiling with seismic refraction tomography inversion, overcomes this drawback by extracting more accurate information from the refraction seismic velocity field to be used for the derivation of stacking velocities and of time-to-depth conversion velocities in reflection seismic data processing.*

*Reciprocal calibration of the seismic reflection and refraction tomography results is instrumental for obtaining spatial imaging congruence resulting in the spin-off product of the best fitting velocity information possible. In opposition to the conventional "deep target" reflection seismic data processing schemes, the application of weathering and elevation field static corrections is integrated in the steps of NMO correction and final post stack time-to-depth conversion.*

### **Zusammenfassung**

*Konventionelle reflexionsseismische Analyseverfahren zur Herleitung seismischer Ausbreitungsgeschwindigkeiten erbringen ausnahmslos unbefriedigende Ergebnisse, wenn sie auf seismische Daten angewendet werden, die zur Kartierung komplexer Strukturen im oberflächennahen Tiefenbereich bis 500 m aufgenommen werden.*

*Die Methode der hybridseismischen Kartierung, eine Kombination von hochauflösender Reflexionsseismik mit refraktionsseismischer Tomographie, überwindet dieses Manko, indem präzisere Informationen aus dem refraktionsseismischen Geschwindigkeitsfeld gewonnen werden. Diese dienen dann zur Herleitung der Stapelgeschwindigkeiten (stacking velocities) und der Geschwindigkeitsmodelle zur Zeit-Tiefen-Wandlung (time-to-depth conversion) im Rahmen der reflexionsseismischen Datenverarbeitung.*

*Die reziproke Kalibrierung der reflexionsseismischen und refraktionstomographischen Ergebnisse ist unabdingbar, um eine räumliche Deckungsgleichheit in der Ergebnisdarstellung zu erzielen und führt als Nebenprodukt zur bestmöglich angepassten Geschwindigkeitsinformation.*

*Im Gegensatz zu den konventionellen reflexionsseismischen Datenverarbeitungssequenzen ist dabei die Anwendung feldstatischer Korrekturen (weathering and elevation statics) in die Schritte der NMO-Korrektur und der nach der CMP-Stapelung abschließenden Zeit-Tiefen-Wandlung integriert.*

*Hybridseismische Profile bilden Untergrundstrukturen ab und charakterisieren gleichermaßen die Festigkeit des Gesteins in den verschiedenen Formationen. Die Methode lässt sich ergänzend mit seismischer Scherwellen-Refraktionsstomographie erweitern. Deren Datenerfassung und EDV dient der nicht-intrusiven Bestimmung der dynamischen Elastizitätsmoduli, die räumlich kontinuierlich, zum Beispiel in Form 2-dimensionaler Profile des E-Moduls dargestellt werden.*

## 1. Allgemeine Beschreibung der hybridseismischen Datenbearbeitung

In Abb. 1 ist das seismische Geschwindigkeitsfeld durch refraktionsseismische Inversionstomographie (1) aus einem Datensatz abgeleitet, der in einem einzelnen Feldeinsatz erfasst wird. Als Messgrößen werden kleine Geophon- und Anregungs-abstände verwendet, wie sie für hochauflösende Reflexionsseismik typisch sind. Um eine refraktionsseismisch möglichst große Erkundungstiefe zu erreichen ist eine der gewünschten Eindringtiefe entsprechend lange aktive Empfängerauslage anzulegen.

Die daraus gewonnene Geschwindigkeitsinformation in (1) wird bei der reflexionsseismischen EDV (2) für die Aufgaben der NMO-Korrektur, CDP-Stapelung und Zeit-Tiefen-Wandlung genutzt.

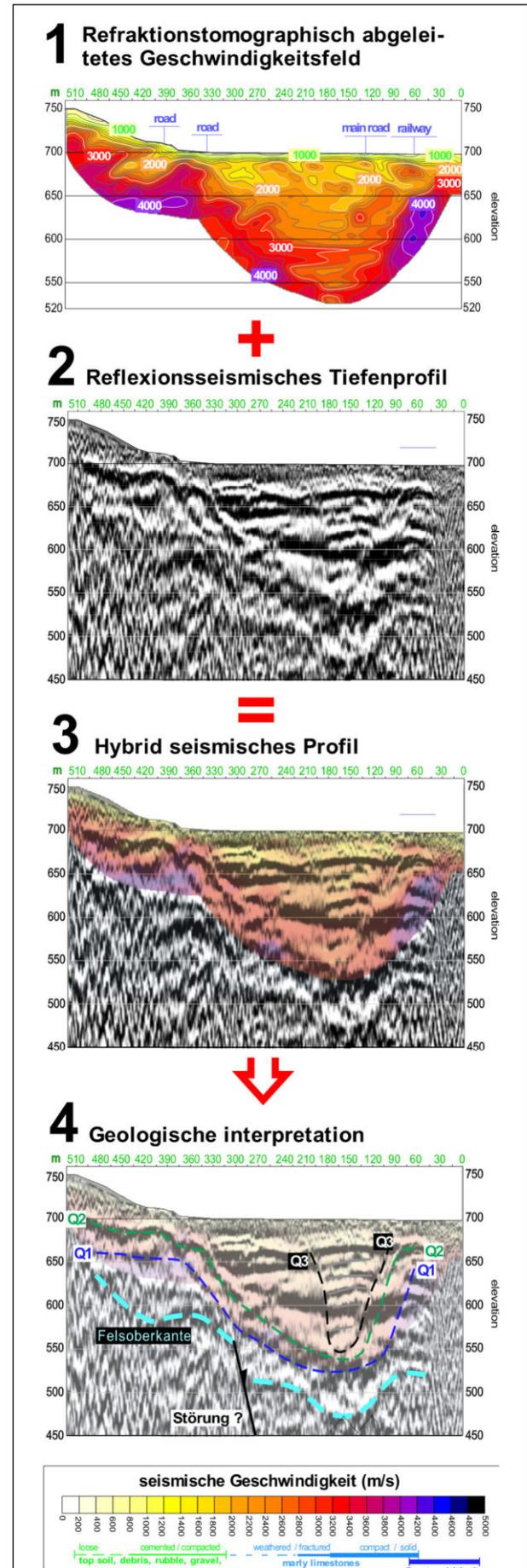
Das refraktionstomographische Geschwindigkeitsfeld (1) wird dem reflexionsseismischen Tiefen-schnitt (2) zwecks visueller Korrelation transparent überlagert und resultiert damit in einer hybridseismischen Darstellung (3), die dann geologisch-geotechnisch zu interpretieren ist (4).

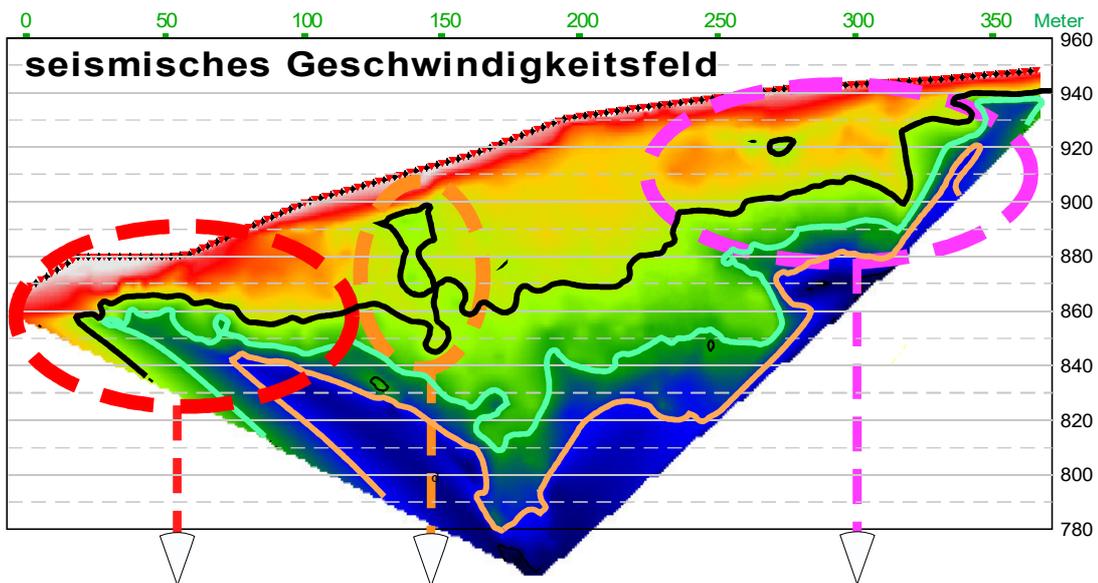
Durch die hybridseismische Kartierung werden strukturelle Details wie tektonische Strukturelemente und sedimentäre Schichtenlagen gemeinsam mit den geomechanischen Gesteinseigenschaften in den einzelnen Formationen aufgezeigt.

Die Ergebnisse von (1) und (2) sind gänzlich unabhängig voneinander, was das Risiko von interpretativen Unsicherheiten und Mehrdeutigkeiten weitgehend ausschließt.

### 1. Vorbedingung ist räumliche Kongruenz

Bei der hybridseismischen EDV werden die Abbildungen der Refraktionstomographie (1) und der Reflexionsseismik (2) durch gegenseitige Kalibrierung aufeinander abgestimmt, um eine räumliche Deckungsgleichheit der Abbildungen beider Methoden zu erreichen.





Strukturelemente müssen reflexions- & refraktionsseismisch sowohl in ihrer Lage als auch in ihrer Form deckungsgleich abgebildet werden, um Mehrdeutigkeiten bei der geologischen Interpretation auszuschließen.

Hauptanforderung an die hybridseismische EDV ist die reziproke Kalibrierung der reflexionsseismischen und refraktionstomographischen Abbildungen.

Räumliche Deckungsgleichheit ist das Kernstück der Hybridseismik.

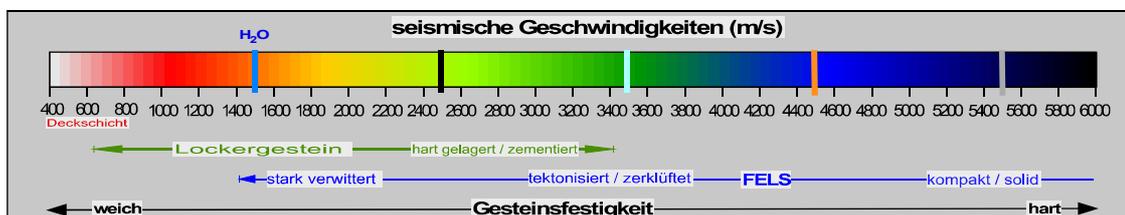
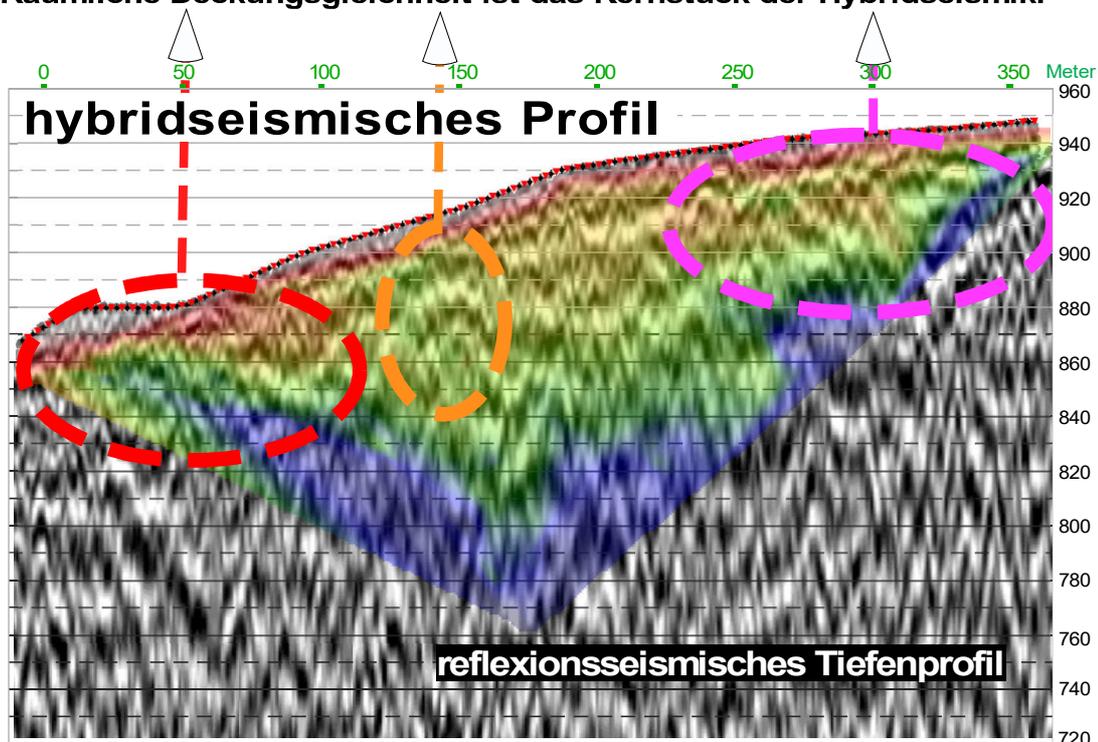


Abb. 2: Das Prinzip der räumlichen Deckungsgleichheit der refraktions- und reflexionsseismischen EDV-Ergebnis

## 2. Die Anwendung statischer Korrekturen im Ablauf der reflexionsseismischen EDV

Bei der EDV konventioneller Erdölreflexionsseismik werden für Daten aus Tiefen von mehr als 1500 m sog. feld- und reststatische Korrekturen abgeleitet um Echozeitanomalien durch die einerseits variable Topographie der Erdoberfläche und andererseits durch das sich sowohl in vertikaler und horizontaler Richtung stark ändernde Geschwindigkeitsfeld in den oberflächennahen Gesteinsschichten auszugleichen. Diese statischen Korrekturwerte, die auf jede einzelne Spur (Seismogramm von jeder Geophonstation) angewendet werden, sind hilfreich, um einen möglichst scharfen Reflexionseinsatz für tiefer liegende Zielhorizonte erhalten. Da diese Korrekturwerte auf das gesamte Seismogramm angewendet werden, geschieht dies leider auf Kosten der Auflösung in der Abbildung der oberflächennahen Schichten, die ja Gegenstand des Interesses der Ingenieurgeologen und Geotechniker sind.

In der hybridseismischen EDV werden vor der Stapelung der CDP-Spuren (*Common Depth Point* Seismogramme) keine statischen Korrekturwerte angewendet. Die "Nullzeit"-Linie entspricht dem Oberflächen-relief, unabhängig davon wie unregelmäßig das Terrain auch sein mag. Die feldstatischen Korrekturen, die oberflächennahe Geschwindigkeitanomalien ausgleichen, werden in die NMO-Korrektur integriert, indem Geschwindigkeitsfunktionen an jeder CDP-Position aus dem refraktionstomographischen Geschwindigkeitsfeld abgeleitet werden. Oberflächenstatische Elevationskorrekturen werden erst nach der Zeit-Tiefen-Wandlung der gestapelten Zeitsektion angewendet. Das Ergebnis ist ein reflexionsseismischer Tiefenschnitt mit strukturellen Informationen aus dem oberflächennahen Bereich, der mit dem transparent überlagerten, farbkodierten refraktionsseismischen Geschwindigkeitsfeld, als hybridseismische Sektion dargestellt wird (s. Abbildungen 1 & 2 oben).

## 3. Kontinuierlich abgeleitete dynamische Elastizitätsmoduli durch mit s-Wellen – Refraktions-tomographie ergänzte Hybridseismik dargestellt in 2D-Tiefenprofilen

Quantitative Bestimmungen der geotechnischen Elastizitätsmoduli, wie Young's  $E$ -Modul, Schermodul  $G$  oder die Poisson-Zahl  $\nu$  werden normalerweise durch Laboranalysen an Gesteinsproben aus Bohrungen ausgeführt oder aus Ergebnissen geophysikalischer Bohrlochmessungen abgeleitet. Die zu messenden Größen sind die Ausbreitungsgeschwindigkeiten für P- und S-Wellen ( $V_p$  &  $V_s$ ) und die Gesteinsdichte  $\rho$ . Die Refraktionstomographie mit P- und S-Wellen, ergänzt mit Reflexionsseismik, ermöglicht somit eine Herleitung der dynamischen Elastizitätsmoduli mit den folgenden Vorteilen gegenüber den Analysen aus punktuell eingesammelter Gesteinsproben oder von Bohrlochsonden:

- P- und S-Wellen Geschwindigkeiten ( $V_p$  &  $V_s$ ) werden in-situ und im ungestörten Untergrund gemessen;
- $V_p$  &  $V_s$  Geschwindigkeitsfelder werden entlang seismischer Linien vermessen, die abgeleiteten dynamischen Gesteins-Elastizitätsmoduli (z.B. Youngs'  $E$ -Modul) werden somit räumlich kontinuierlich ermittelt und als 2-dimensionale Tiefenschnitte abgebildet;
- Oberflächenbasierte, nicht-invasive seismische Methoden sind deutlich kostengünstiger als geophysikalische Bohrlochmessungen oder Probeentnahmen aus einzelnen Bohrlöchern.
- siehe Abb. 3, nächste Seite

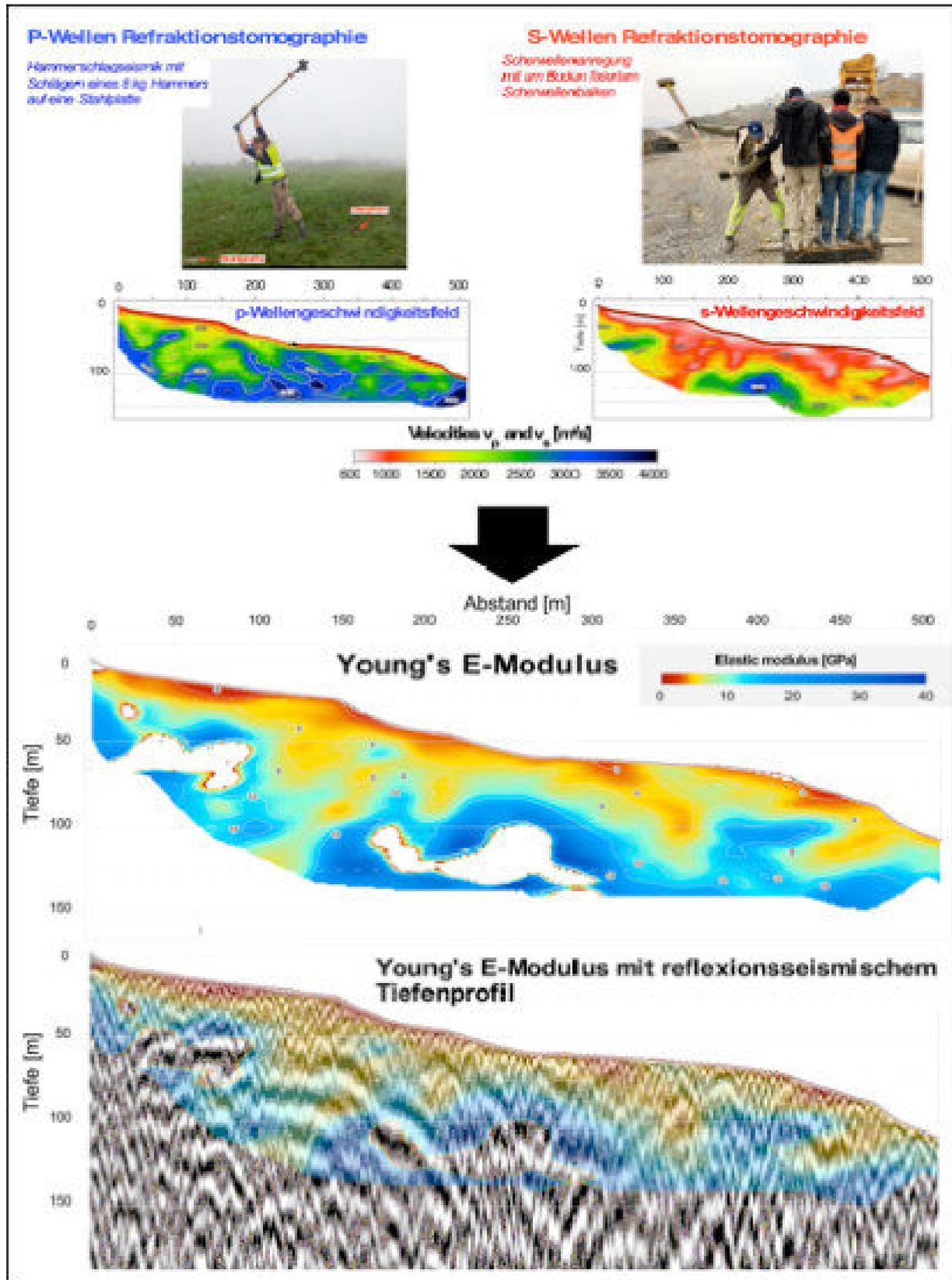


Abb. 3: Herleitung der dynamischen Elastizitätsmoduli in 2D Tiefschnitten, hier des E-Moduls

#### **4. Die Messgrößen der Datenerfassung im Hinblick auf optimale Detailgenauigkeit und maximale Erkundungstiefe**

Das Auflösungsvermögen reflexionsseismischer Abbildungen ist proportional zur räumlichen Datendichte. Diese wird bestimmt durch die Abstände der Empfängerstationen und der Anregungspunkte. Je kleiner die Abstände zwischen den Geophonstationen, desto höher ist die Detailgenauigkeit der Abbildung seismischer Daten.

Die erreichbare Erkundungstiefe der seismischen Refraktionstomographie ist eine Funktion der Länge der aktiven Empfängerauslage.

Selbst mit kleinen Empfängerabständen muss daher der Aufbau einer genügend langen Empfänger-auslage sichergestellt werden, um die gewünschte refraktionstomographische Erkundungstiefe zu erreichen. Aus diesem Grund ist eine ausreichende Anzahl verfügbarer Datenkanäle und Geophone unabdingbar.

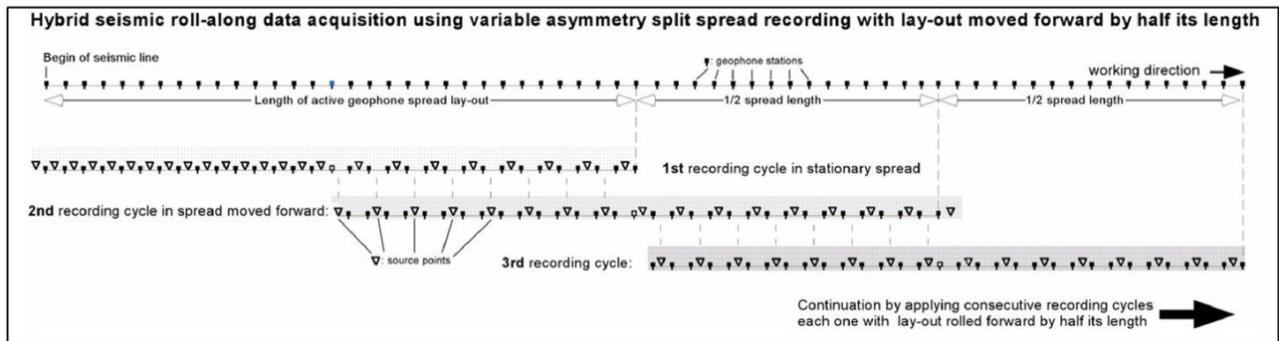
Basierend auf der gewünschten Erkundungstiefe sind für die hybridseismische Datenerfassung folgende grundlegenden Regeln anzuwenden, um eine ausreichende reflexionsseismische Datendichte und eine optimale refraktionstomographische Erkundungstiefe sicher zu stellen:

1. Die Abstände der Empfängerstationen sollten  $1/50$  bis  $1/30$  der erforderlichen Erkundungstiefe nicht überschreiten (abhängig von der lokal erzielbaren Datenqualität und der Komplexität der Untergrundstrukturen).
2. Die Länge der aktiven Auslage sollte mindestens 3 – 4 mal grösser sein als die gewünschte Erkundungstiefe.
3. Der Abstand der Quellenpunkte sollte nicht größer gewählt werden, als 1 – 3 mal den Abstand der Empfängerstationen (abhängig von der lokal erzielbaren Datenqualität und der Komplexität der Untergrundstrukturen).

Hier ein Arbeitsbeispiel aufgrund der oben angegebenen Regeln für eine gewünschte Erkundungstiefe von 100 m:

- Abstand der Empfängerstationen von 2 m ist angemessen (vgl. Regel 1, oben).
- Die Länge der Auslage muss 300-400 m betragen, was bedeutet, dass bei einem Geophonabstand von 2 m die aktive Auslage aus 150-200 Geophonen bestehen muss. Aus diesem Grund muss auch die Registrierapparatur mit dieser Anzahl an Kanälen ausgestattet sein (vgl. Regel 2, oben).
- Der Abstand der Quellenpunkte sollte 6 m nicht überschreiten. Unter schwierigen Bedingungen sind 2 m bis 4 m vorzuziehen (vgl. Regel 3, oben).

Empfehlenswert ist ein gestaffelter, "roll-along" Registrier-Zyklus' mit jeweiliger Verschiebungsdistanz der Geophonsauslage um ihre halbe Länge, wie in Abb. 4 unten dargestellt:



**Abb. 4:** Schematisches "roll-along" Datenerfassungsverfahren für volle Überdeckung von Daten mit maximalen Sender-Empfängerabständen entlang seismischer Linien, die mehrfach länger sind als die aktive Auslage.

Aufnahme-Zyklus 1: Beginn der Datenerfassung bei der ersten Position mit regulären Anregungsabständen bis zur Mitte der Auslage. Danach wird bis zum Ende der Auslage nur an jedem zweiten regulären Quellenpunkt angeregt.

Aufnahme-Zyklus 2: Verschiebung der gesamten aktiven Auslage um die Hälfte ihrer Länge nach vorne und Rückverlagerung der Quelle (Hammer oder Fallgewicht) an den neuen hinteren Anfang. Die Datenerfassung wird fortgeführt an jedem zweiten regulären Quellenpunkt, der im 1. Zyklus nicht genutzt wurde.

Aufnahme-Zyklus 3: Wie in Zyklus 2 Verschiebung der Auslage um die Hälfte der Länge nach vorne und Rückverlagerung der Quelle an den neuen hinteren Anfang. Die Aufnahme wird fortgeführt wie in Zyklus 2 an jedem zweiten Quellenpunkt.

Nachfolgende Registrierungs-Zyklen sind identisch mit Zyklus 3. Im letzten Zyklus muss sichergestellt werden, dass auf der letzten Hälfte der Geophonauslage wieder jeder reguläre Quellenpunkt bedient wird und damit entlang der gesamten Linie reguläre Abstände der Quellenpunkte vorliegen.

Dieses gestaffelte „roll-along“ Schema mit halb-stationären Auslagen (Abb. 4) hat den Vorteil, dass in jedem Zyklus Daten mit maximalen Quellen-Empfängerabstände in Vorwärts- und Rückwärts-Richtung aufgezeichnet werden, die kontinuierlich die maximal mögliche Erkundungstiefe der Refraktions-tomographie sicherstellen

## 5. Schlussfolgerungen

- Hochauflösende Hybridseismik ist ein allgemein anwendbares Verfahren zur Detaillierung des oberflächennahen Untergrunds bis in Tiefen von 500 m. Es macht das gesamte in den Seismikdaten enthaltene Aussagepotenzial der beiden voneinander unabhängigen Methoden der Reflexionsseismik (struktureller Aufbau) und der Refraktionstomographie (physikalische Gesteinseigenschaften) im Untergrund sichtbar.
- Hybridseismik ist auch einsetzbar zur Erkundung größerer Tiefenbereiche (z.B. in der Geothermie) und ist gleichwertig mit der standardisierten Erdölreflexionsseismik.
- Detaillierte Geschwindigkeitsinformation, entnommen aus dem Refraktionstomographischen Geschwindigkeitsfeld, ist unverzichtbar bei der EDV reflexionsseismischer Daten bis in Tiefen von 500 m. In der hybridseismischen Kartierung werden die Nachteile einer Methode durch die Vorteile der anderen kompensiert.
- Abgesehen von den erheblich geringeren Kosten durch Reduzierung der Datenerfassungsarbeiten auf eine einzige Feldkampagne ist der wesentliche Vorteil in der verbesserten Interpretationssicherheit der hybridseismischen Darstellung zu sehen. Die Beachtung des Kriteriums der räumlichen Deckungsgleichheit (*spatial congruence*) der Refraktionstomographischen und reflexionsseismischen Abbildungen schließt das Risiko interpretativer Mehrdeutigkeiten weitgehend aus.
- Unabdingbar für den Messerfolg ist die Befolgung der Vorgaben für die Wahl der Abstände für die Geophonstationen und der Anregungspunkte und die Länge der aktiven Geophonauslage.
- Die hybridseismische Methode lässt sich mit Scherwellen-Refraktionstomographie erweitern und ermöglicht damit die räumliche Bestimmung der dynamischen Elastizitätsmoduli, mit denen in 2-dimensionalen Tiefenschnitten der Untergrund geotechnisch charakterisiert wird.

## **Felssturz Vals: Monitoring mit geodätischen, geotechnischen und radarinterferometrischen Sensoren**

Christine Mayerhofer, Lienhart Troyer (Trigonos ZT GmbH)

*TRIGONOS ZT GmbH Ingenieurkonsulenten für Vermessungswesen, Schwaz*

### **1. Zusammenfassung**

Im Zuge des Felssturzes vom 24.12.2017 in Vals stürzten rund 120.000 m<sup>3</sup> Felsmasse aus der orographisch rechten Talflanke des Valser Tals ab. Trotz meterhoher Verschüttung der Straße forderte der Felssturz keine Opfer, weshalb dieser auch als „Weihnachtswunder“ bekannt ist.

In diesem Beitrag werden die Erfahrungen mit dem Betrieb der seit Februar 2018 installierten Monitoringsysteme zusammengefasst, welche neben der Funktion als Warnsystem auch zum besseren Prozessverständnis in Vals beitragen.

Im Auftrag der Wildbach- und Lawinerverbauung (WLV) und in Zusammenarbeit mit der Abteilung Geoinformation des Amtes der Tiroler Landesregierung wird von Trigonos seit Februar 2018 ein vollautomatisiertes tachymetrisches Monitoring sowie ab August 2018 eine automatische Rissweitenmessung – beide Systeme in Echtzeit - betrieben. Automatisierte Warnmeldungen werden bei Überschreiten von absoluten und geschwindigkeitsbezogenen Grenzwerten generiert.

Seit Juni 2019 wurde über einen Zeitraum von einem Jahr zusätzlich ein Testprojekt mit einem interferometrischen Radar durchgeführt, um die Zuverlässigkeit und Genauigkeit dieser wetterunabhängigen und vollflächig messenden Technologie unter realen Bedingungen zu testen und Methoden zur korrekten Georeferenzierung der Ergebnisse zu entwickeln. In einem Versuchsaufbau wurden die Genauigkeiten von tachymetrisch und interferometrisch gemessenen Verschiebungen verglichen.

### **2. Einleitung**

Am 24.12.2017 kam es an der „Tumelers Wand“, welche sich auf der orographisch rechten Seite des Valser Tals befindet, zu einem Bergsturz. Bei diesem Ereignis stürzten ca. 120.000 m<sup>3</sup> Felsmasse aufgrund eines großflächigen „Keilversagens“ ins Tal und verschütteten dabei Teile der Landesstraße L230. Wie durch ein Wunder gab es weder Tote noch Verletzte noch wurden die nahestehenden Häuser beschädigt. Nach Begutachtung durch die Landesgeologie sowie erfolgter Absicherung des betroffenen Gebiets durch das Österreichische Bundesheer konnten die bestehenden Hausevakuierungen aufgehoben werden und unter Aufsicht der Landesgeologie mit dem Räumen der Landesstraße begonnen werden.

Seit dem 27.12.2017 wurden von der Abteilung Geoinformation terrestrische Laserscannmessungen zuerst in sehr kurz aufeinanderfolgenden Intervallen, danach in regelmäßigen größeren Intervallen durchgeführt, anhand derer Ausbrüche im Nachhinein gut detektiert und flächenhaft dargestellt werden können.

Nach Modellierung möglicher zukünftiger Sturzzenarien seitens der Wildbach- und Lawinerverbauung und der Landesgeologie wurde mit dem Bau von Schutzdämmen für die umliegenden Häuser sowie der Verlegung der Landesstraße begonnen (vgl. [1]).

Ein umfangreiches Deformations-Monitoringprogramm begleitete das Projekt, um unmittelbare Aussagen über Geschwindigkeit und eine allfällige Beschleunigung von Bewegungen zu erhalten.



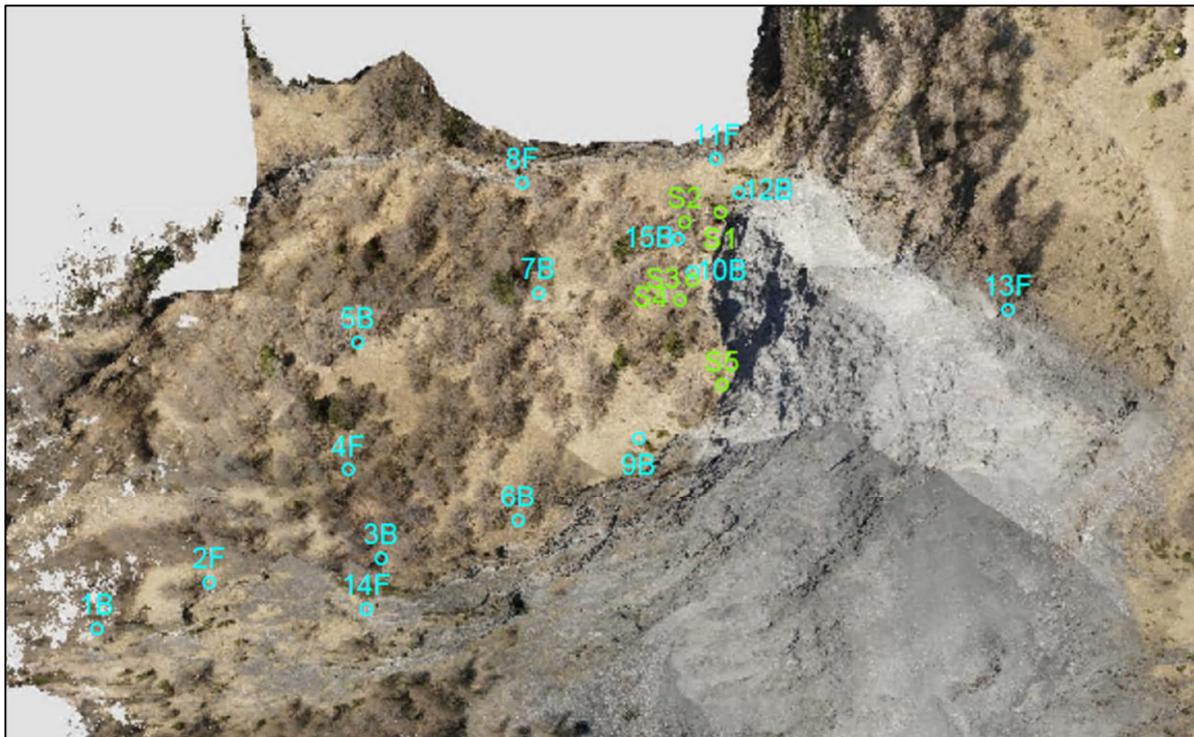
**Abbildung 1:** Bauarbeiten im Juni 2020

**Abbildung 2:** Orthophoto Juni 2020 (UAV-Befliegung Trigonos)



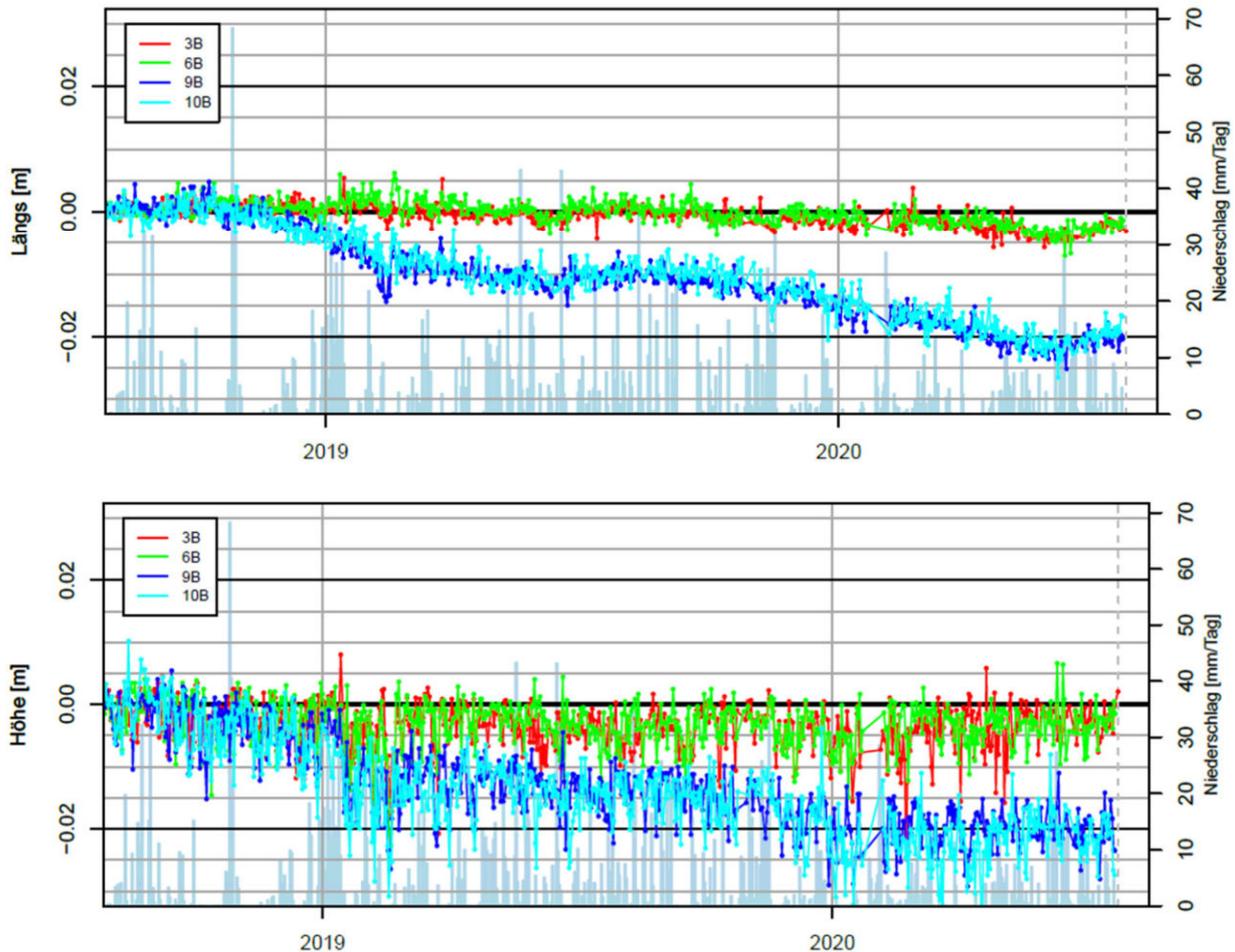
### 3. Tachymetrisches und Rissmonitoring

Unmittelbar nach dem Ereignis wurde von der Abteilung Geoinformation des Amtes der Tiroler Landesregierung mit Unterstützung der Trigonos ZT GmbH ein automatisches tachymetrisches 3D-Monitoring installiert, mit Hilfe dessen 16 an Baumstümpfen und Felsen oberhalb und beiderseits der Ausbruchsnische montierte Prismen überwacht werden. Obwohl Baumstümpfe längerfristig nicht die zuverlässigste Art der Stabilisierung für Prismen darstellen, haben sie sich in der Praxis sehr bewährt. Sie erlauben im Akutfall eine sehr rasche Befestigung mit minimalen Materialaufwand und helfen so die Arbeitszeit im Gefährdungsbereich zu verkürzen.



**Abbildung 3:** Überblick über die montierten Messprismen (hellblau) und Konvergenzextensometer/Fissurometer (grün)

Dieses System ist seit dem 01.02.2018 operativ und liefert stündlich aktuelle Werte, welche jederzeit als Zeit-Verformungs-, inverse Geschwindigkeit ( $1/v$ )- und Grundrissvektor-Grafik über ein Webportal für die Projektbeteiligten in Echtzeit einsehbar sind.



**Abbildung 4:** Messergebnisse der tachymetrischen Messpunkte mit den stärksten Deformationen

Die stärksten Deformationen weisen die beiden unterhalb des Hauptrisses befindlichen Messprismen 9B und 10B mit einer Senkung und einer Längsbewegung in Richtung Tal von jeweils 2 cm seit Messbeginn auf (siehe Abbildung 4). Um die Korrelation mit Niederschlagsdaten beurteilen zu können, wurde eine automatische Schnittstelle zum Messdatenserver des Hydrographischen Dienstes Tirol programmiert.

Die Messgenauigkeit ( $3\sigma$ ) der Einzelmessung liegt bei großen Zielweiten von bis zu 800m beim tachymetrischen Monitoring bei 4 mm in der Lage und 9 mm in der Höhe.

Im Juli 2018 erfolgte im Auftrag der Wildbach- und Lawinenverbauung eine Erweiterung des Monitorings um zwei Konvergenzextensometer und drei Fissurometer, welche in den Spalten oberhalb der Abbruchkante installiert wurden. Dem Hauptriss mit einer Länge von etwa 25 m einer Öffnung von 1,5 m und einer Tiefe von 4 - 6 m galt dabei besondere Aufmerksamkeit. Dieser wurde mit zwei Konvergenzextensometern bestückt, welche mit einer maximalen Länge von 3 m auch größere Spalten überspannen können. Weitere kleine Spalten wurden mit entsprechend kompakteren Fissurometern versehen. Der Messbereich beider Sensorarten beträgt 20 cm.

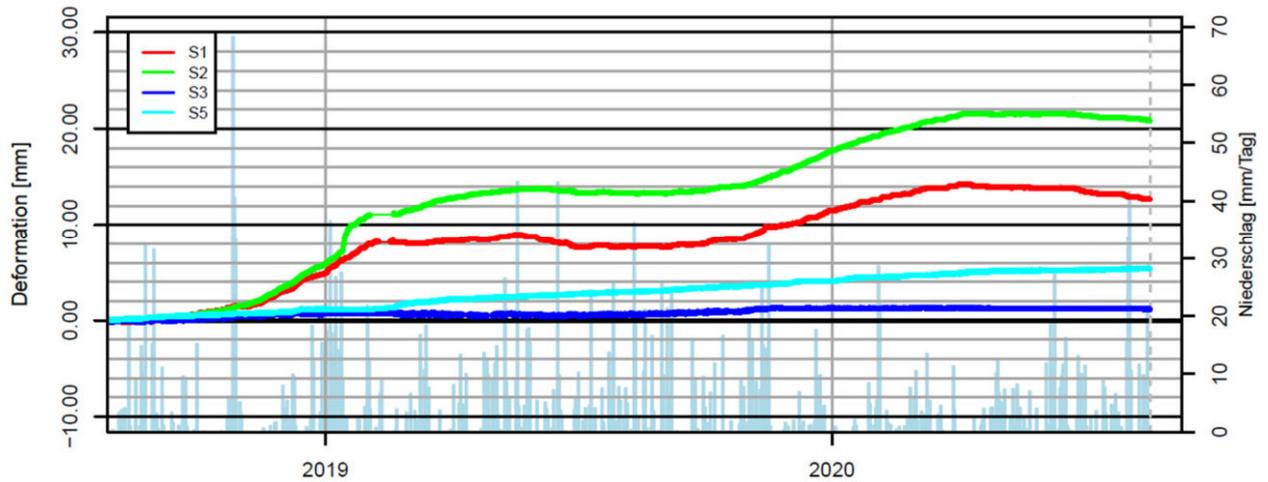
Mit diesen ergänzenden Messdaten war sichergestellt, dass ungeachtet der Sichtverbindung, die für die tachymetrische Überwachung erforderlich ist, kontinuierlich Messdaten für eine allfällige Warnung vor weiteren größerdimensionalen Nachbrüchen vorlagen.

Die Öffnung der beiden Konvergenzextensometer im Haupttriss, welche 21 mm bzw. 13 mm seit der Nullmessung beträgt, stimmt sehr gut mit den Bewegungen der trigonometrischen Punkte von bis zu 20mm überein. Auch an den übrigen Rissen ist eine leichte Dehnung im Bereich von 1 bis 5 mm messbar. Die Messgenauigkeit ( $\pm 3\sigma$ ) liegt bei den Fissurometern und Konvergenzextensometern zwischen 0,04 und 0,20 mm.



**Abbildung 5:** Fissurometer und Konvergenzextensometer

Um sowohl Installations- als auch Wartungsaufwand im Gefahrenbereich möglichst gering zu halten, wurde auf eine Low Power Wide Area Network (LPWAN) Lösung zurückgegriffen. Bei diesem System werden die Sensoren über batteriebetriebene Knotenpunkte ("Nodes") mit dem nötigen Strom versorgt. Von diesen Nodes erfolgt auch die Übermittlung der Messwerte über ISM Band zum Gateway im Tal. Das Gateway dient der Anbindung an den Datenserver. Durch den Einsatz dieses Systems konnte die Länge der zu verlegenden Kabel minimiert und die Stromversorgung im schwer zugänglichen Gelände stark vereinfacht werden. In Folge dessen beschränkt sich die regelmäßige Wartung im Gefahrenbereich beim gewählten Messintervall von einer Stunde auf einen Batterietausch im Jahr. Ein weiterer Vorteil dieses Systems ist, dass keine Mobilfunkverbindung im Bereich der Sensoren bestehen muss. Die Messergebnisse wurden in das Webportal eingebunden und sind somit ebenfalls in Echtzeit einsehbar.



**Abbildung 6:** Messergebnisse der Fissurometer und Konvergenzextensometer

In den darauffolgenden Monaten erfolgte in Zusammenarbeit mit der Lawinen- und Wildbachverbauung die Ausarbeitung und Implementierung eines Warnsystems, welches bei Überschreitung von definierten Geschwindigkeits- sowie Gesamtdeformationsschranken automatisch SMS und E-Mails an die Projektbeteiligten sendet. Da eindeutige, mechanisch wirksame Grenzwerte in den Rissen bzw. den absturzgefährdeten Felspartien nicht definiert werden konnten, wurden die Grenzwerte anhand der Messgenauigkeit der beiden Systeme sowie der aktuellen Verformungsgeschwindigkeiten festgelegt (vgl. [2]).

**Abbildung 7:** Schneeeinwehung im Hauptriss (Winter 2018/2019)



**Abbildung 8:** Einhausung der Konvergenzextensometer durch die WLW (Sommer 2019)



Im Winter 2018/2019 wurden von den beiden Sensoren S1 und S2 im Hauptriss große Bewegungsraten registriert, ohne sich in den tachymetrischen Messpunkten im Nahbereich widerzuspiegeln. Bei einer Begehung im Gelände stellte sich heraus, dass dies jedoch nicht auf eine tatsächliche Öffnung des Spaltes, sondern auf die durch Schneeeinwehungen entstandene Last auf die nicht ausreichend geschützten Konvergenzextensometer zurückzuführen ist. Die Stäbe waren stark durchgebogen, einer sogar gebrochen, was sich in den Messdaten als Dehnung des Stabes äußerte. Um zukünftig Beeinträchtigungen der Messung durch Umwelteinflüsse wie Schnee oder Steinschlag zu vermeiden, stellte die WLV Gebietsbauleitung Mittleres Inntal im Sommer 2019 eine halbseitig fixierte und rundherum schützende Einhausung der Sensoren her. (siehe Abbildung 8)

Als zusätzliche Hilfestellung zur Bewertung der aktuellen Verformungen wird vierteljährlich ein Gesamtbericht der beiden Systeme generiert und übermittelt.

#### **4. Ground-based InSAR**

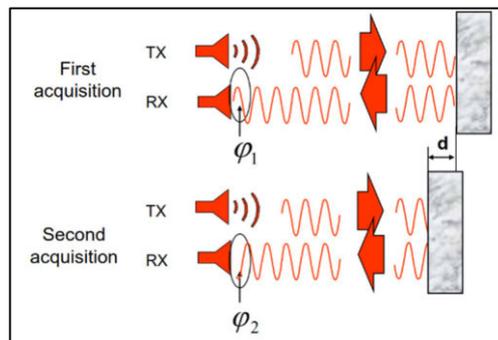
Die Kombination der beschriebenen Messmethoden in Vals vereint den Vorteil der Flexibilität und absoluten 3D Messgröße des Tachymeters mit der Wetterunabhängigkeit und der hohen Genauigkeit der Rissweitenmessung.

In den letzten Jahren wurde die ursprünglich aus dem Bereich der großen Tagebauten stammende Technologie des ground-based InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) auch bei Naturgefahren vermehrt für Deformationsmessungen eingesetzt. Die Vorteile dieser Technologie liegen in der Kombination von Wetterunabhängigkeit, vollflächiger Messung und einer hohen Reichweite. Um die Zuverlässigkeit und Genauigkeit dieser Systeme für ein Szenario wie in Vals zu erproben, wurde von Trigonos mit Unterstützung der Abteilung Geoinformation des Landes Tirol ein Testprojekt in Vals gestartet. Das ground-based InSAR, nachfolgend auch als GBinSAR oder Radar abgekürzt, war am Felssturz Vals für etwas mehr als ein Jahr im Einsatz. Während dieser Zeit war es möglich unterschiedliche Auswerteverfahren zu testen, um die Möglichkeiten und Genauigkeiten des Radars zu untersuchen.

Mithilfe der SAR Technologie wird eine größere Antenne durch die Bewegung des Scanners entlang einer Geraden simuliert, wodurch die räumliche Auflösung parallel zum Gerät um ein Vielfaches maximiert werden kann. Bei dem verwendeten Model wird durch die Linearverschiebung der Radareinheit, welche mit zwei kompakten Antennen ausgestattet ist, eine zwei Meter große Antenne simuliert. Die Länge der simulierten Antenne bestimmt dabei die entfernungsabhängige Auflösung parallel zum Scanner. Die Größe der Pixel normal zum Radar wird durch die Spanne des verwendeten Frequenzbereichs festgelegt und ist entfernungsunabhängig. Bei dem in Vals zum Einsatz gekommenen Radar IBIS-FM der Firma IDS beträgt die Auflösung in 1000 m Entfernung 0,75 m x 4,4 m. Die Messungen erfolgen somit flächenhaft und stets für den gesamten definierten Messbereich. Die maximal mögliche Messfrequenz ist von der Dauer der Bewegung der Linearverschiebeeinheit abhängig und beträgt im vorliegenden Fall zwei bis drei Minuten. Die maximale Reichweite liegt bei 4 km und ist somit um ein Vielfaches größer als bei kompakteren Systemen wie dem IDS Hydra-G, dessen maximale Reichweite bei 800 m liegt.

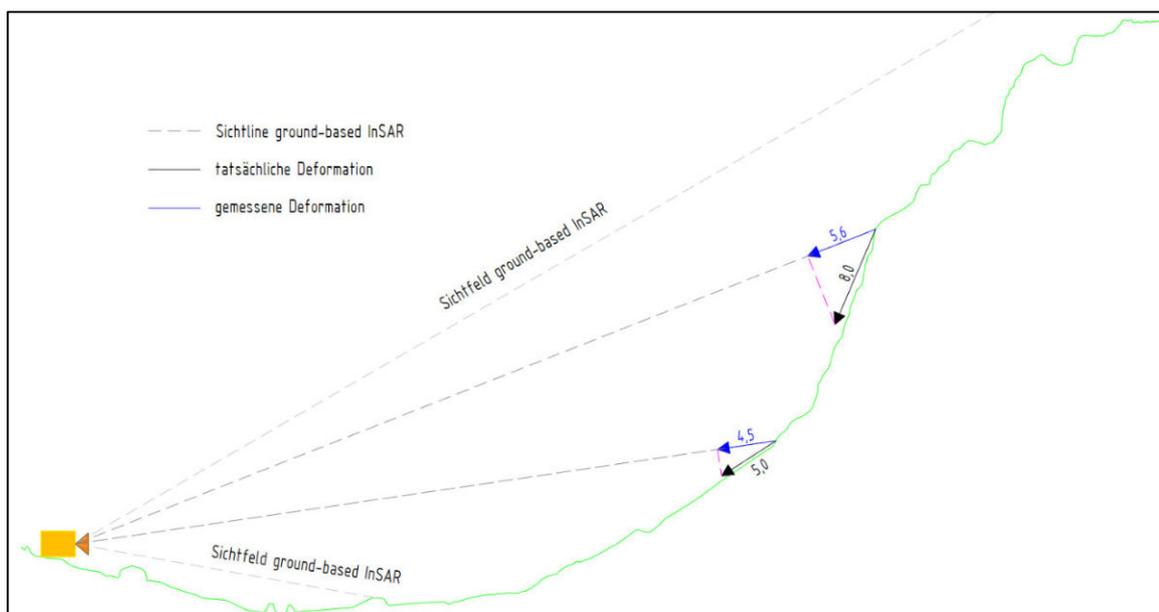
Die zweite Technologie, die im Namen enthalten ist, ist die der Interferometrie und beschreibt die Messmethode zur Feststellung der Deformationen. Bei jeder Messung wird eine Welle ausgesandt, welche vom Objekt reflektiert und von der Antenne wieder empfangen wird. Abhängig von der Distanz zum Objekt weist die Welle eine andere Phasenambiguität auf. Durch den Vergleich dieser Phasenambiguitäten zwischen aufeinander folgenden Messzyklen kann mit Hilfe der Wellenlänge auf die Deformation zwischen den Messungen geschlossen werden.

**Abbildung 9:** Messung der Phasendifferenz (Quelle: IDS)



Diese Differenz ist jedoch nur innerhalb eines Wellenzyklus eindeutig, wodurch sich eine maximal messbare Deformation zwischen zwei Messungen ergibt. Deformationen die größer als ein Viertel der Wellenlänge sind, können nicht mehr richtig aufgelöst werden. Im Fall des verwendeten Geräts können die Deformationen maximal 4,4 mm zwischen zwei Messzyklen betragen, wodurch sich bei gleichförmiger Bewegung eine maximal messbare Geschwindigkeit von etwa 13 cm/h ergibt.

Da die Distanzänderung zwischen Messgerät und dem zu überwachenden Objekt erfasst wird, können Deformationen nur entlang der Sichtlinie des Radars gemessen werden. Bei einer Verformung von beispielsweise 8 mm in einem Winkel von 45,4° zur Sichtlinie können 5,6 mm, also 70% der Bewegung, bei einer Verformung von 5 mm in einem Winkel von 24,6° zur Sichtlinie können 4,5 mm, also 90% der Bewegung vom GBinSAR erfasst werden. In Abbildung 10 sind beide Beispiele anhand des Profils in Vals dargestellt.



**Abbildung 10:** Profil und Sichtfeld GBinSAR in Vals (Bewegungsvektoren ohne Maßstab)

## 5. Installation und Georeferenzierung

Voraussetzungen zur Installation eines GBinSAR ist ein zuverlässiges GSM Netz sowie eine Stromversorgung am Aufstellungsort. Für den Fall, dass kein direkter Anschluss an das Stromnetz möglich ist, kann das System über eine Photovoltaikanlage mit Strom versorgt werden. Im gegenständlichen Fall war Netzstrom bereits für die früher installierten Messeinrichtungen vorhanden. Zur Montage wird ein Betonfundament im Ausmaß von 0,6 m (Höhe) x 0,6 m (Breite) x 2,2 m (Länge) benötigt. Zum Schutz des Geräts vor Niederschlag wurde eine halboffene Messhütte errichtet.



**Abbildung 11:** Linearverschiebeeinheit und Radarsensor

Vor der Installation des Radars vor Ort sollte außerdem ein Digitales Geländemodell (DGM) im Bereich des Überwachungsgebiets und des Sensorstandpunkts vorliegen. Ein DGM ist zwar nicht unbedingt erforderlich, doch vereinfacht es die Interpretation der gemessenen Deformationen enorm. So findet die Georeferenzierung im Raum ausschließlich durch die Projektion der Interferogramme auf das DGM statt, eine ungenaue Referenzierung führt zu systematischen Fehlern in den Verformungsdaten und kann so die Interpretation der Ergebnisse deutlich erschweren. In Vals konnte auf ein von der Abteilung Geoinformation des Landes Tirol zur Verfügung gestelltes DGM zurückgegriffen werden, dass aus einer Kombination von airborne- und terrestrischem Laserscan erstellt wurde.

Für die Georeferenzierung muss der Sensorstandpunkt sowie das Azimut der Sichtlinie des Radars und der eingestellte Vertikalwinkel bekannt sein. Für die genaue Bestimmung des Azimuts wurde von Trigonos ein Radarreflektor (Corner-cube Reflektor) mit integriertem Prisma konstruiert, welcher im Idealfall außerhalb der Massenbewegung installiert wird. (siehe Abbildung 12) Durch das Abgleichen der Position des Prismas mit den Pixeln, die aufgrund des Radarreflektors eine besonders hohe Signalstärke aufweisen, kann das korrekte Azimut bestimmt werden.

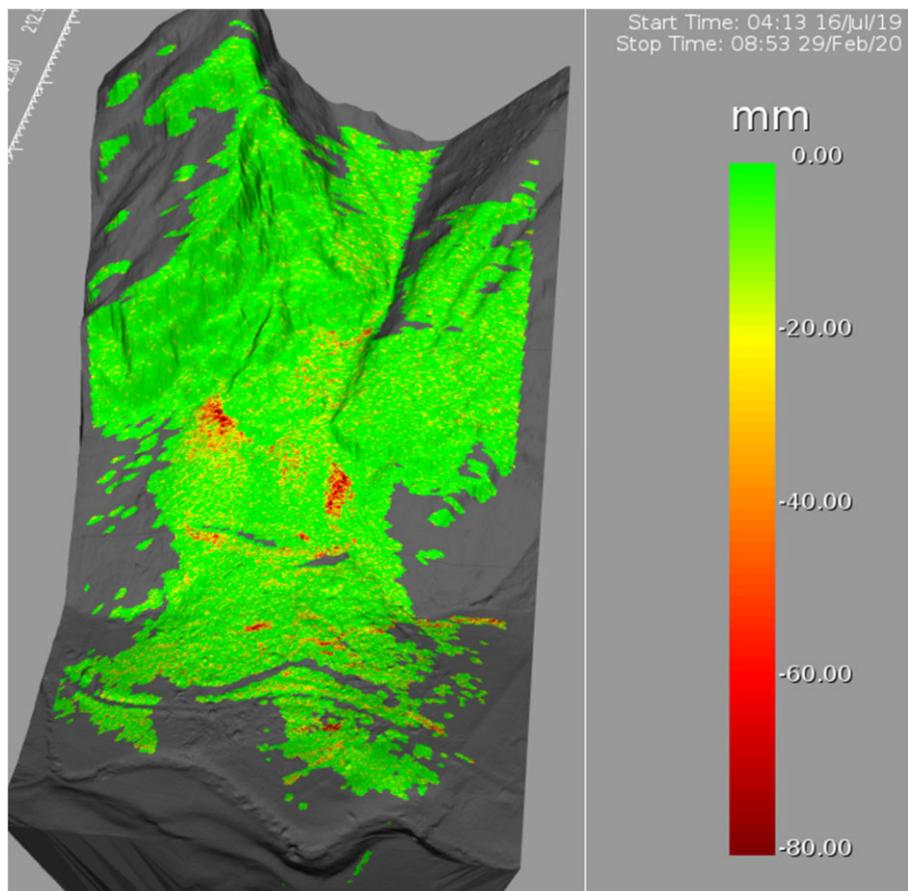


**Abbildung 12:** Corner-cube Reflektor mit integriertem Prisma zur Georeferenzierung

## 6. Ergebnisse

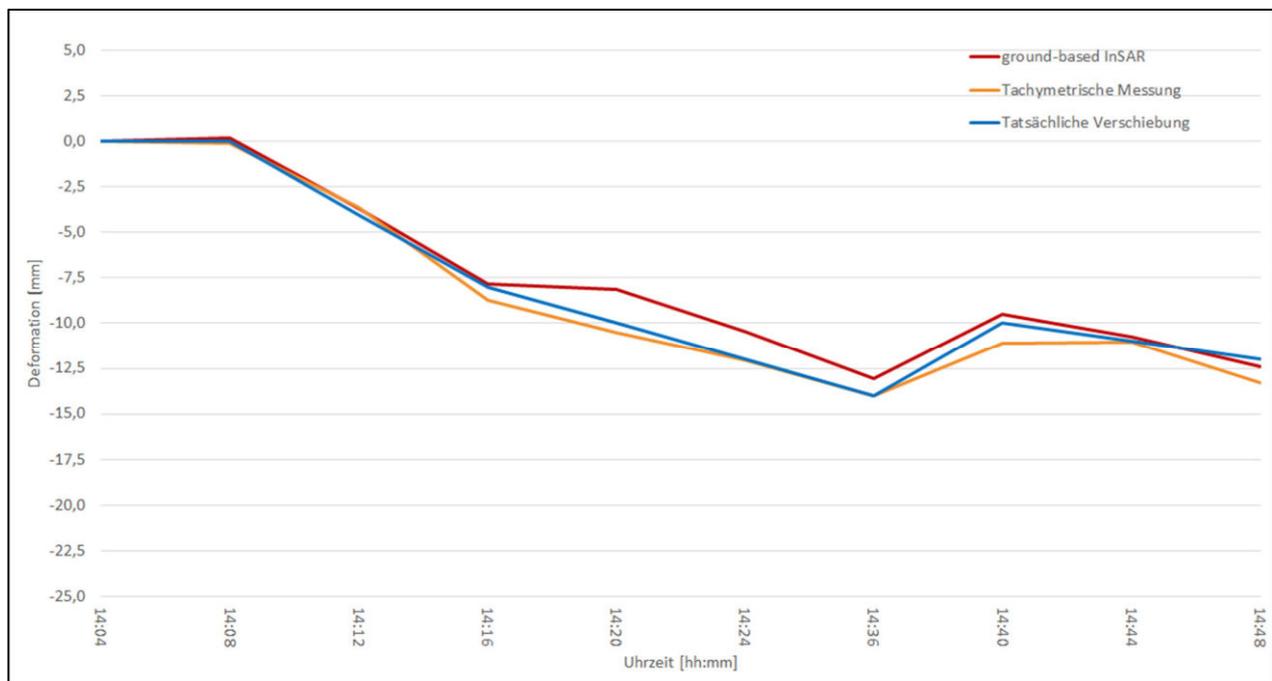
Als Ergebnis einer Radarmessung erhält man ein 2D-Raster dessen Pixel jeweils eine Streckendifferenz beinhalten. Nach jeder Messung wird ein Interferogramm erstellt, welches die Differenzen zur vorangegangenen Messung enthält. Um die Gesamtdeformation über einen längeren Zeitraum zu erhalten, werden die Streckendifferenzen der einzelnen Pixel aufsummiert.

**Abbildung 13:** Flächenhafte Darstellung der Verformung

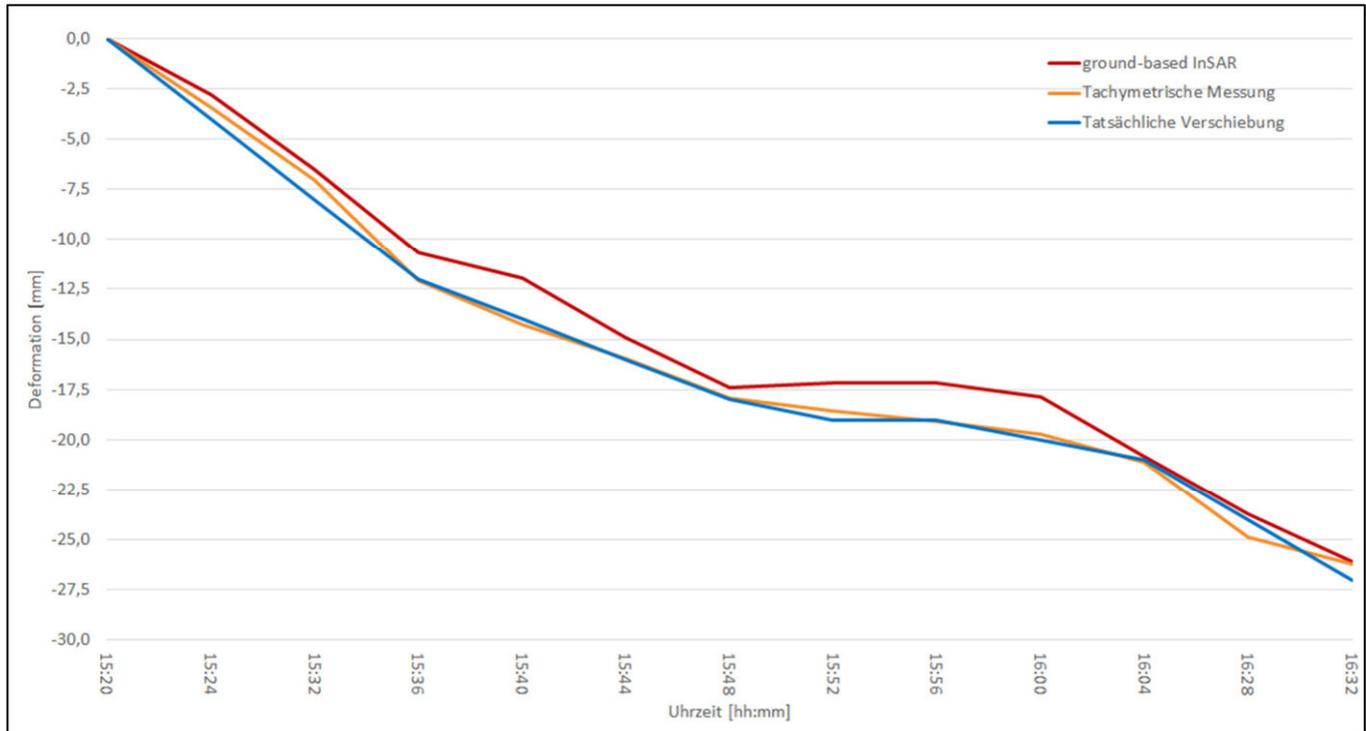


In Abbildung 13 sind die aufsummierten Interferogramme vom 16. Juli 2019 bis zum 29. Februar 2020 auf das DGM projiziert dargestellt. In der Felswand sind keine signifikanten Bewegungen erkennbar, im Schuttkegel unterhalb sind Bewegungen bis etwa 80mm sichtbar.

Die Herstellerangabe von 0.1mm ist als theoretische Genauigkeit unter Laborbedingungen zu verstehen. Daher wurde unter anderem mittels eines Verschiebeversuchs überprüft, welche Genauigkeiten im praktischen Einsatz tatsächlich erreichbar sind. Für diesen Versuch wurde an zwei unterschiedlichen Positionen innerhalb des Sichtfelds des Radars der zuvor beschriebene Radarreflektor mit integriertem Messprisma installiert. Nun wurde jeweils der Reflektor samt Prisma entlang einer mit einer Millimeterskala versehenen Halterung schrittweise verschoben. Nach jedem Schritt erfolgte jeweils eine Messung mittels GBinSAR und Totalstation. Zu Beginn wurden jeweils 4 mm Schritte ausgeführt, um die vom Hersteller angegebene maximal messbare Deformation zwischen zwei Messzyklen zu überprüfen. Anschließend wurde die Schrittweite immer weiter bis auf 1mm reduziert.



**Abbildung 14:** Ergebnis des Verschiebeversuchs am Punkt G1



**Abbildung 15:** Ergebnis des Verschiebeversuchs am Punkt G2

An beiden Punkten bildet sich der durchgeführte Vershub, sowohl in den Messungen mittels ground-based InSAR als auch in jenen mittels Totalstation, weitestgehend ab. In Tabelle 1 finden sich die zugehörigen Standardabweichungen:

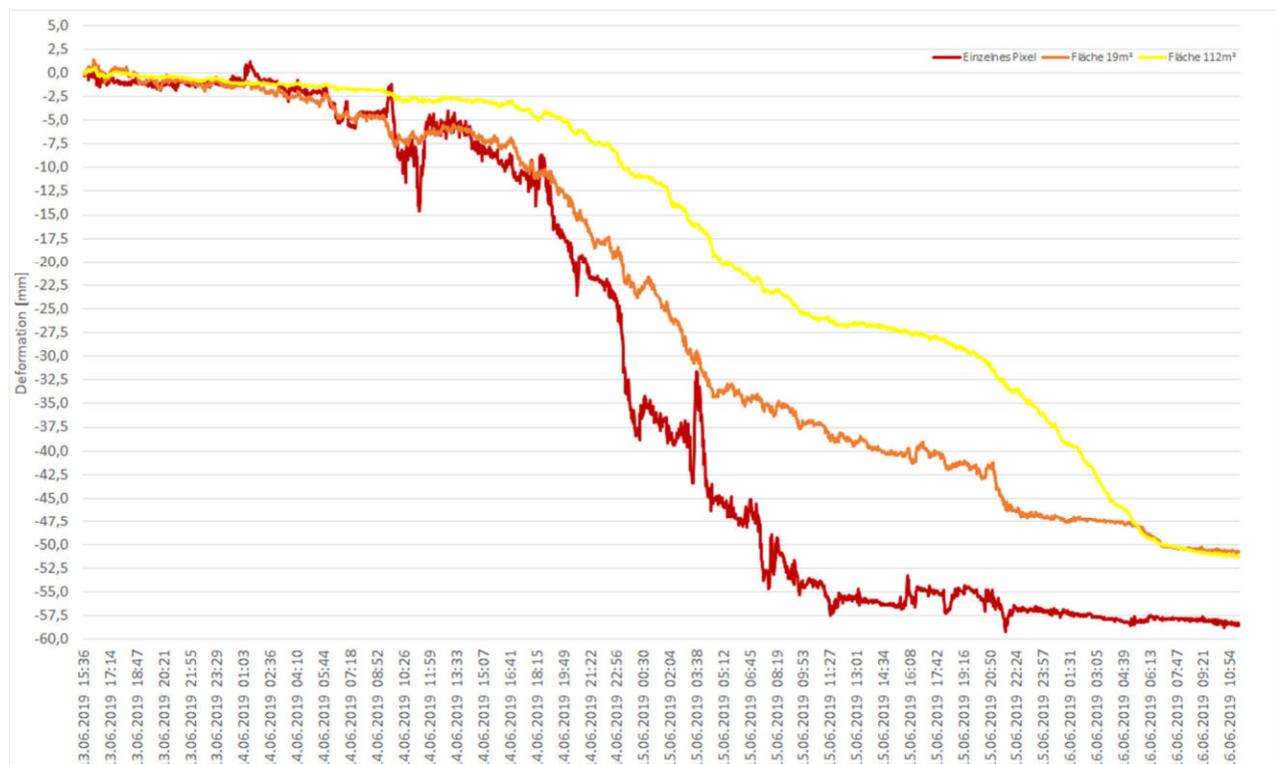
| Punkt \ Messsystem | Ground-based InSAR | Tachymetrische Messung |
|--------------------|--------------------|------------------------|
| G1                 | 0,9 mm             | 0,7 mm                 |
| G2                 | 1,4 mm             | 0,5 mm                 |

**Tabelle 1:** Standardabweichungen des Verschiebeversuchs

Wird von einer Normalverteilung der Messwerte ausgegangen, so liegen 99,7 % aller Werte der Radarmessung um maximal  $\pm 4,2$  mm ( $3\sigma$ ) um den tatsächlichen Wert verteilt. Die Genauigkeit der tachymetrischen Streckenmessung beträgt 2 mm ( $3\sigma$ ) bei einer Entfernung von etwa 420m.

Um die tatsächliche Deformation in einem Punkt zu analysieren, sind Zeit-Verformungsgraphiken die am weitesten verbreitete Darstellungsart. Auch ein effizientes Warnsystem benötigt als Grundlage Zeit-Verformungsgraphiken. Während bei einem tachymetrischen Monitoring der Messwert nur über die Zeit gemittelt werden kann, ist aufgrund der flächenhaften Messung des Radars auch eine Mittelung im Raum möglich. Wird ein einzelnes Pixel als Datengrundlage für die Zeit-Verformungskurve gewählt, enthält dieses zwar die gesamte Deformation an diesem Punkt, jedoch ist die Kurve stärker verrauscht. Wird eine Fläche,

um diese Pixel als Datengrundlage verwendet, schwächt sich das Rauschen der Kurve zwar ab, doch durch die etwas andere Deformation an den umliegenden Pixeln, geht die tatsächliche Deformation an genau diesem Pixel verloren. Je größer die Fläche, desto geringer das Rauschen, desto weniger stark geht die Deformation des einzelnen Pixels in die dargestellte Deformation der Kurve ein. Die beschriebene Systematik zeigt sich gut in Abbildung 16. Während die stark verrauschte rote Kurve die Deformation an einem einzelnen Pixel zeigt, wurde für die orange Kurve eine Fläche von 19m<sup>2</sup> und für die gelbe eine Fläche von 112m<sup>2</sup> um das Pixel gewählt. Das Abnehmen des Rauschens mit der Größe der Fläche ist klar erkennbar. Für ein möglichst gut funktionierendes Warnsystem ist es also von Vorteil möglichst größere Flächen zu finden, von denen anzunehmen ist, dass diese in sich gleichmäßig verformen. Die in Abbildung 16 dargestellten Deformationen wurden im Schuttkegel unterhalb der Felswand registriert.



**Abbildung 16:** Vergleich gemessene Deformation an einem einzelnen Pixel und Flächen um dieses Pixel

## 7. Schlussfolgerung

Die Wahl der Messmethode beim Monitoring von Naturgefahren wird - nach der Grundsatzentscheidung ob Warn- oder Alarmsystem - auf Grundlage von den Parametern Genauigkeit, Ausdehnung, Zugänglichkeit, Verfügbarkeit und nicht zuletzt des Budgets getroffen. Die tachymetrische Messung hat sich aufgrund der hohen Genauigkeit von 3D-Verformungen von Einzelpunkten, der Flexibilität und raschen Installation sowie des einfachen Übergangs zwischen Dauermonitoring und nachlaufenden manuellen Messungen nicht nur in Vals bewährt. Gemeinsam mit der Sub-Millimeter Genauigkeit der Rissweitenmessung wurde somit die Datengrundlage für ein zuverlässiges Warnsystem und tieferes Prozessverständnis seitens der betreuenden geologischen Experten geschaffen.

Ein ground-based InSAR bietet die Möglichkeit einer vollflächigen Aufnahme und eine Installation ohne Betreten des Gefährdungsbereichs und ermöglicht im Unterschied zu einem terrestrischen Laserscanner die Verfügbarkeit von Daten unabhängig von äußeren Einflüssen wie Nebel, tiefliegenden Wolken, starken Regen- und Schneefall. Zu beachten ist, dass beim Radar nur Deformationen entlang der Sichtlinie festgestellt werden, d.h. im Unterschied zu einem Tachymeter keine vollständige 3D-Information gewonnen wird und für die Definition des Messintervalls die zu erwartende Verformungsgeschwindigkeit sorgfältig abzuwägen ist. Die Zuverlässigkeit sämtlicher verwendeter Systemkomponenten (Radar, Datenübertragung, Software, Stromversorgung) wurde unter realistischen Bedingungen nachgewiesen. Eine Genauigkeit von einigen wenigen Millimetern, bei günstigen Messbedingungen und Flächen homogener Bewegung auch genauer, ist erreichbar. Die Bandbreite der Datenübertragung ist auch bei durchschnittlicher GSM-Netzqualität ausreichend, so dass der Einsatz als Warnsystem mit Internet-Anbindung bei den in alpiner Umgebung weit verbreiteten 2- oder 3G Netzen möglich ist.

Eine Kombination des GBinSAR mit geotechnischen und geodätischen Messungen hat sich als sinnvoll herausgestellt, da die individuellen Stärken der einzelnen Messsysteme somit optimal genutzt werden können und unabhängige Verifikationen der Ergebnisse ermöglicht werden. Qualitativ hochwertige Geobasisdaten, wie z.B. digitale Geländemodelle auf Grundlage von Laserscan oder Photogrammetrie, sind dabei als Fundament für Messungen verschiedenster Art wichtiger denn je.

## **8. Danksagung**

Die Durchführung des Testprojekts mit ground-based InSAR erfolgte mit Unterstützung der Abteilungen Geoinformation, sowie Verkehr und Straße des Amts der Tiroler Landesregierung.

## **9. Referenzen**

1. Fritzmann P., Anegg J., Heißel G., Nittel-Gärtner P., Huber W., Leuthold M., Plank J., Riedl F. (2018): Felssturz Vals – ein Weihnachtswunder. 20. Geoforum Umhausen Tirol
2. Mölk M., Sausgruber T., Rieder B. (2020): Bergsturz Vals 2017: Eine Beinahe-Katastrophe – und der Umgang mit den Gefährdungspotentialen danach, unveröffentlichter Bericht der WLV
3. Trigonos ZT GmbH (2018-2020): Monitoring Felssturz Vals, Monats- und Jahresberichte i. A. der WLV und des Amts der Tiroler Landesregierung

## Großrutschung im Bereich Leckgalerie Sölden, Geologie, Ursache und Auswirkung

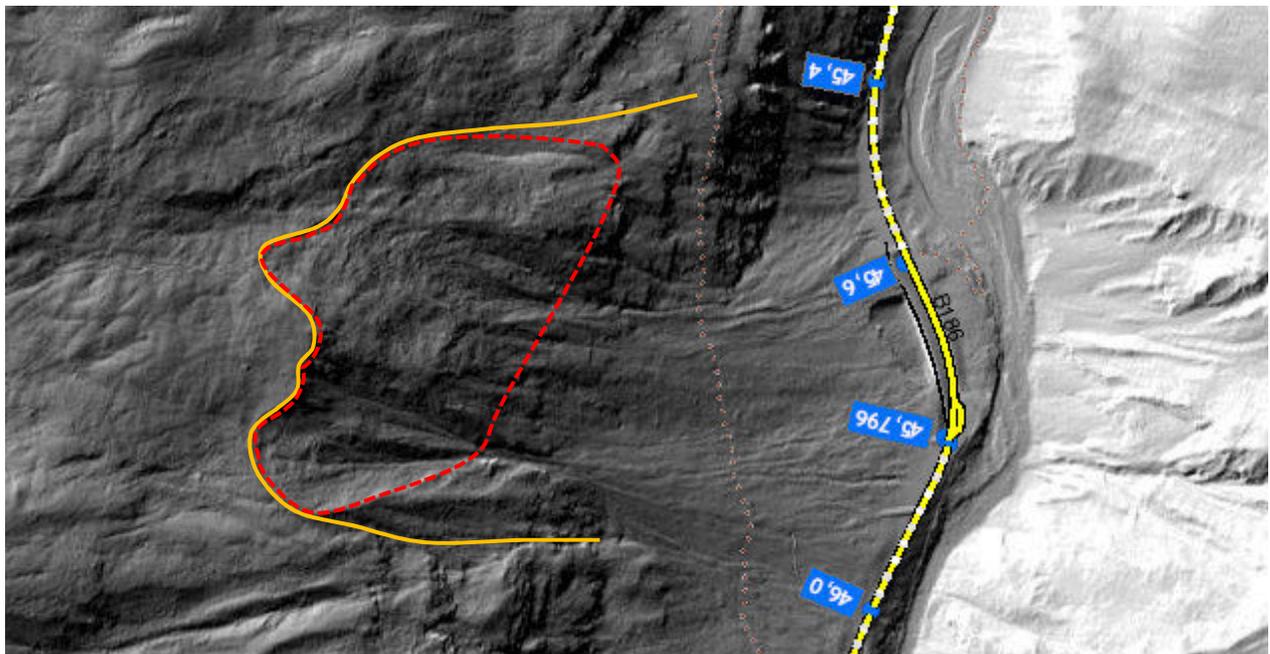
Thomas Figl<sup>1</sup>, Petra Nittel-Gärtner<sup>1</sup>, Katharina Gröbner<sup>1</sup>, Ribis Markus<sup>2</sup>

*Amt der Tiroler Landesregierung, Abt. Allg. Bauangelegenheiten, Landesgeologie*

<sup>2</sup> *geo.zt gmbh - poscher beratende geologen*

### 1. Hintergrund

Aufgrund eines einzelnen Blocksturzes auf das Galeriedach der Klammgalerie und des darauffolgenden Lokalausgleiches wurden im gegenständlichen Hang im Juli 2019 frisch aufgehende Risse und Absetzungen festgestellt. Der Hang zeige bereits damals im Laserscan Hinweise auf alt angelegte (nacheiszeitliche) Hangbewegungen ähnlich eines Talzschubs, die auf den Gletscherrückgang und die damit zusammenhängende Entlastung des Hanges zurückzuführen sind.



**Abb. 1.** Übersicht im Laserscan mit der gesamten Großrutschung (gelb) und den aktuellen Bewegungsbereichen rot strichliert.

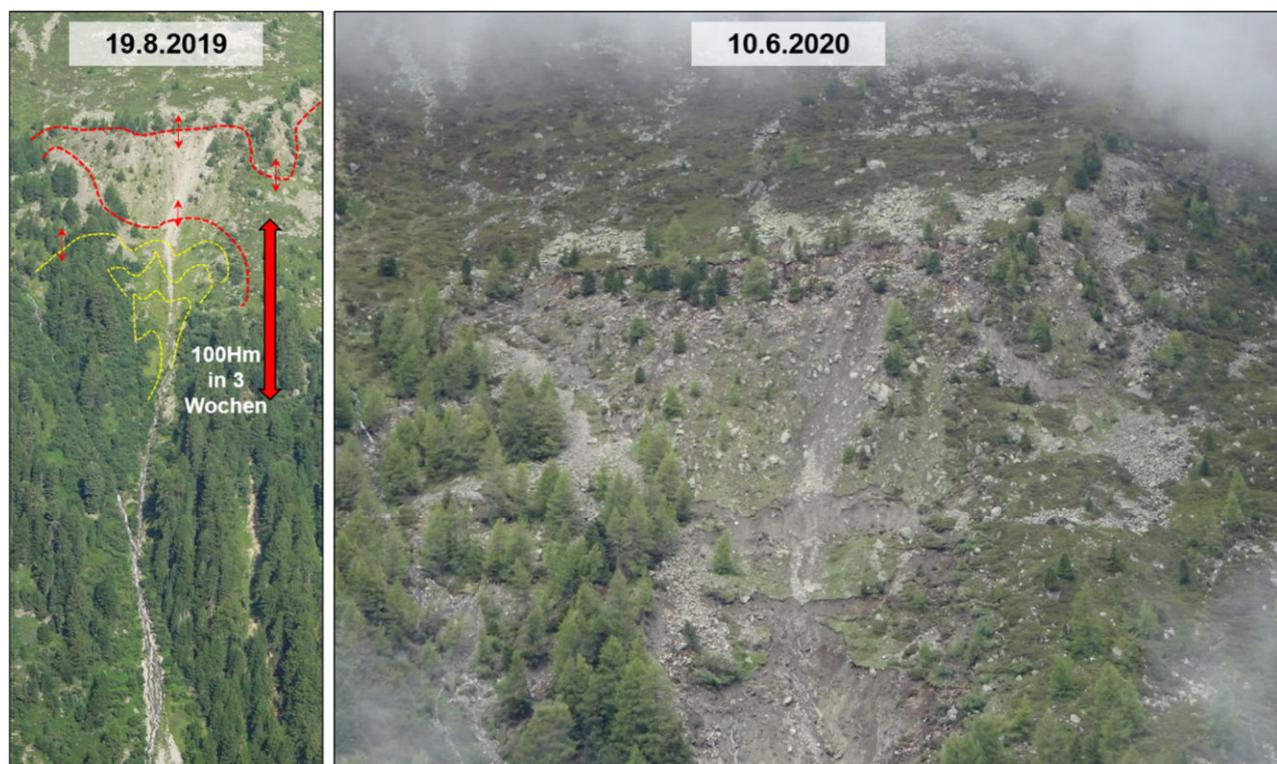
Durchgeführte Messungen mit dem terrestrischen Laserscan durch die Abt. Geoinformation und der Vergleich mit bestehenden Laserscandaten haben gezeigt, dass im Zeitraum 2017 – 2019 vor allem im talauswärtigen Bereich Bewegungen von ca. 2-3 m stattgefunden haben. Die Bewegungen im gegenständlichen Bereich wurden auf die extrem starke Schneeschmelze des Jahres 2019 zurückgeführt. Der Vergleich der früheren Laserscandaten (ca. 2006 bis 2016) hat keine Bewegungen des Hanges ergeben.

Eine weitere Laserscanmessung im Oktober 2019 hat eine deutliche Verringerung der Bewegungen im talauswärtigen Bereich und geringe Bewegungen im taleinwärtigen Bereich ergeben. Weiters wurden Steinschlagsimulationen durchgeführt, die zusammenfassend ergeben haben, dass aus den talauswärtigen Ablösebereichen keine Steine/Blöcke die Galerie erreichen, sodass der Einzelblocksturz als Einzelereignis bzw. als Ausnahme anzusehen ist. Bis zum Frühjahr 2020 wurden keine weiteren Ereignisse festgestellt.

Am 19.5.2020 wurde im Bereich der Leckgalerie (taleinwärtig der Klammgalerie) festgestellt, dass plötzlich Wassermassen über das Galeriedach abfließen. Es ist im taleinwärtigen Bereich der G zu einer Hangexplosion weit oberhalb der Straße gekommen. Im Anrissbereich trat ein Gerinne mit durchgehend trüber Wasserführung aus. Erste Maßnahmen (Ableitung des Wassers, Ablenkdam) wurden umgehend eingeleitet und umgesetzt.

In der Nacht des 20.5.2020 ist es zu einem weiteren Murereignis gekommen, sowie zu Blockstürzen, wobei ein Großblock mit ca. 30 m<sup>3</sup> ca. 40-50 Höhenmetern oberhalb der Galerie liegen geblieben ist.

Bis zum 10.6.2020 haben sowohl die Ereignisse, die Ereignisgrößen als auch die Gesamtausdehnung der bewegten Bereiche stetig und in einem Ausmaß zugenommen, dass das zunächst theoretische Gesamtversagen nicht mehr gänzlich ausgeschlossen werden konnte. Ein Gesamtversagen würde eine vom Galeriedach schadlos aufnehmbare Überlagerung von 1,5 m überschreiten, wodurch die Standsicherheit des Galeriebauwerkes nicht mehr gegeben wäre.



**Abb. 2.** Vergleich der rückschreitenden Anrisse des Frühjahrs 2020 mit Sommer 2019. Die rückschreitende Erosion der Anrisse beträgt dabei ca. 100 Höhenmeter (Hm) in drei Wochen.

Aufgrund dieses Umstandes und den damit zusammenhängenden akuten Gefährdungen durch Muren, Hangrutsche, Stein- und Blockschläge (im Oberhang befinden sich Großblöcke mit bis zu knapp 60m<sup>3</sup>) konnten zum damaligen Zeitpunkt keine weiteren Maßnahmen/Arbeiten auf dem Galeriedach mehr durchgeführt werden. Die Straßensperre musste aufrecht bleiben.

## 2. Geologische Situation

Das umliegende Festgestein besteht aus Paragneisen. Vermutlich kam es nach Abschmelzen der großen Gletscher bereits zu Hangbewegungen im Bereich der heutigen Großrutschung. Aufgrund dieser Bewegungen wurde das Festgestein über die Jahrhunderte beansprucht und zu Blöcken zerlegt.

Oberhalb des gegenständlichen Anrisses befinden sich Sedimente, die im Zuge der damaligen Vergletscherung abgelagert wurden. Es handelt sich hierbei um grobblockiges, lockeres Material. Das Gebiet bis zu den Graten (Nederkogel) ist von Kare ehemaliger Gletscher geprägt und auch hier ist das Festgestein großflächig von grobblockigem und lockerem Material bedeckt. In diesen flachen Plateaus befindet sich auf ca. 2435m Seehöhe (SH) der Nedersee.

In den Hohlräumen zwischen diesen Blöcken kann das Schmelzwasser sehr schnell versickern und entlang von unterirdischen „Bächen“ Richtung Tal fließen. Entlang solcher Wasserwege ist das Gestein besonders geschwächt und hier können größere Gesteinsmassen in Bewegung gesetzt werden. Genau diese ungünstige Situation liegt in den Hängen oberhalb der Leckgalerie vor, wodurch hier diese massiven Bewegungen stattfinden können. Das gesamte Schmelzwasser der oberhalb des Anrissbereichs liegenden Kare und Grate dringt in den Untergrund ein, wodurch enorme Mengen an Wasser auftreten. Oft wurde auch der Nedersee als Auslöser der Bewegungen genannt. Jedoch hat dieses Wasser im Vergleich zu den großen Wassermengen der Schneeschmelze nur einen kleinen Anteil.

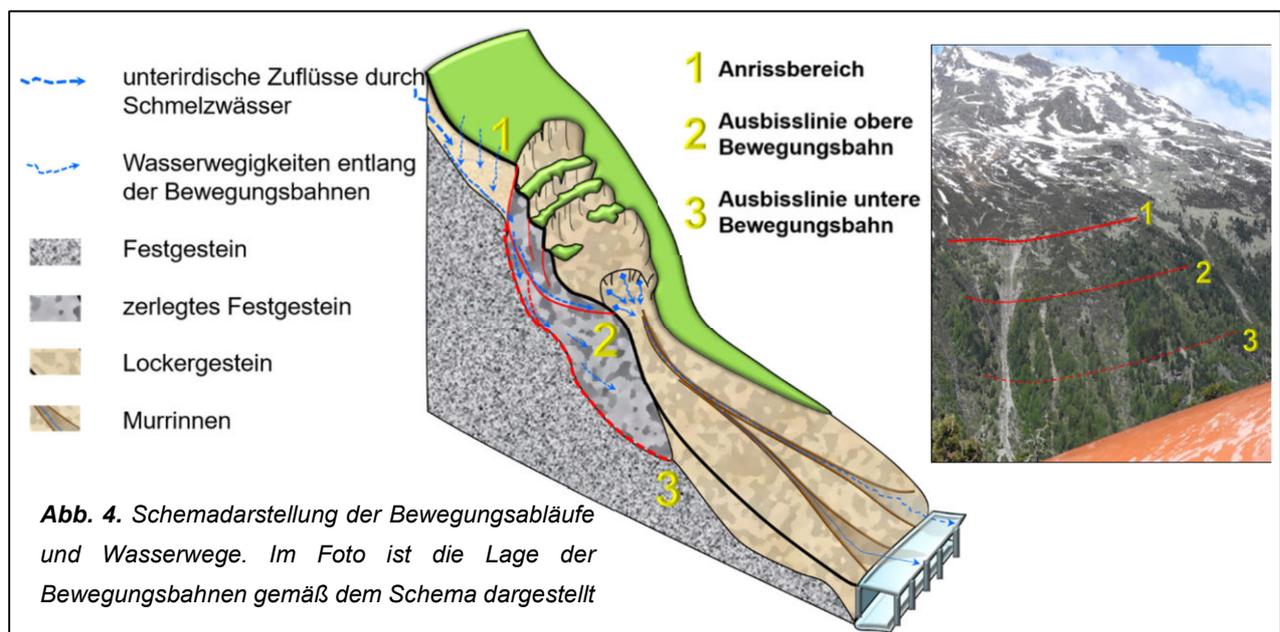


**Abb. 3.** Ansicht des bewegten Hanges von der gegenüberliegenden Seite aus mit dem abgeschätzten Einzugsgebiet.

Oft wird das Abschmelzen des Permafrostes als Ursache solcher Bewegungen genannt. Bei Permafrost handelt es sich um dauerhaft gefrorene Böden, die das gesamte Jahr eine Temperatur unter dem Gefrierpunkt aufweisen. Die gegenständliche Großrutschung befindet sich in etwa in einer Höhenlage von ca. 2140m SH und somit außerhalb der Permafrostzone, die in den Alpen generell mit ca. 2500m SH angesetzt wird. Folglich spielt der Permafrost im gegenständlich Bereich keine Rolle.

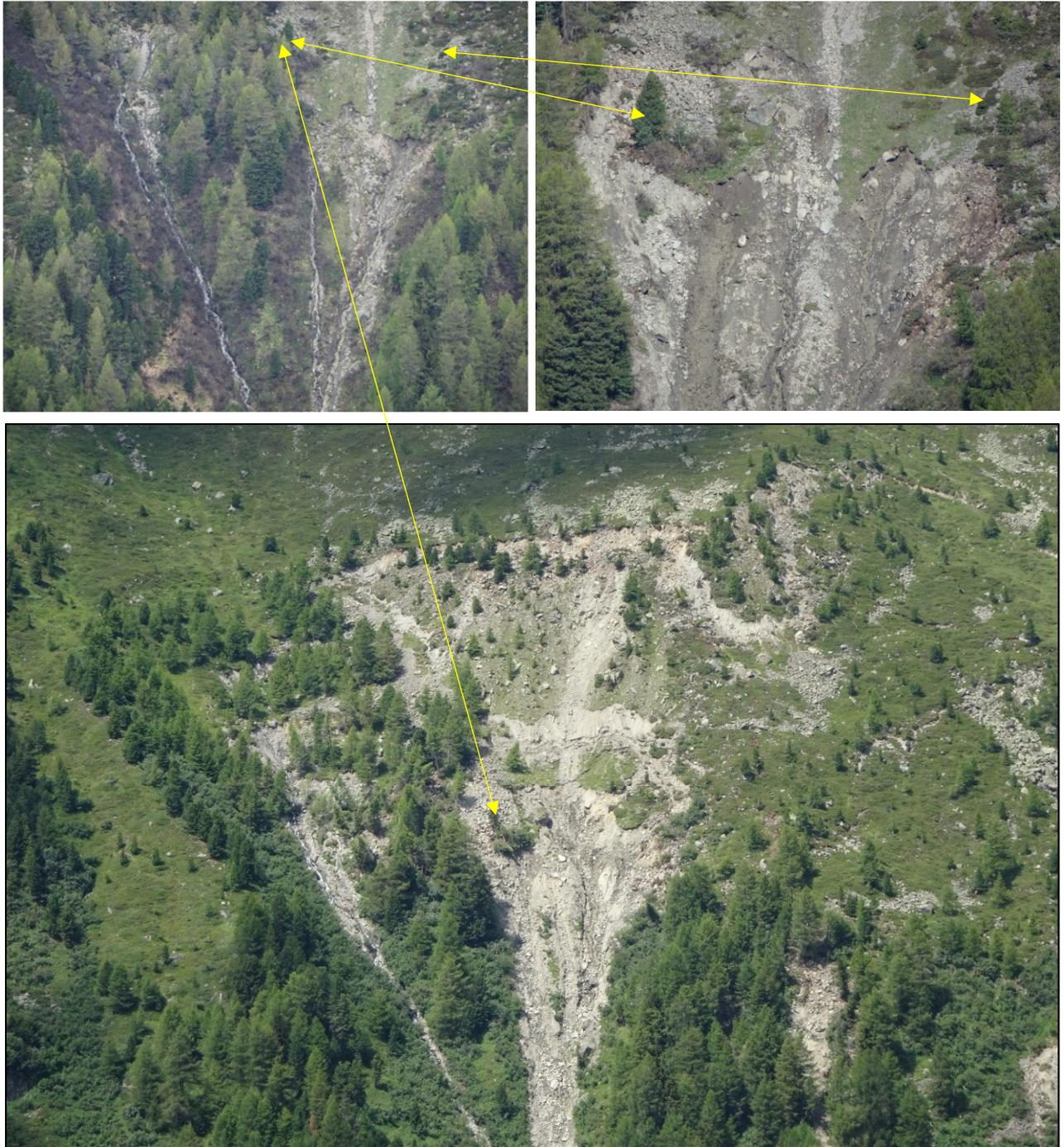
### 3. Prozesse und Ereignisse

In dem gegenständlichen Hang finden zahlreiche Prozesse statt, die wiederum eine Vielzahl von unterschiedlichen gravitativen Ereignissen hervorrufen. Diesen Ereignissen und Prozessen ist die Gesamthangbewegung übergeordnet. Die Gesamthangbewegung umfasst insgesamt in ihrer größten Ausdehnung ca. 14ha. Sie ist räumlich durch die obersten Abrisskanten begrenzt, sowie durch die Ausbisslinien der Bewegungsbahnen (siehe Abb. 1 und 4).



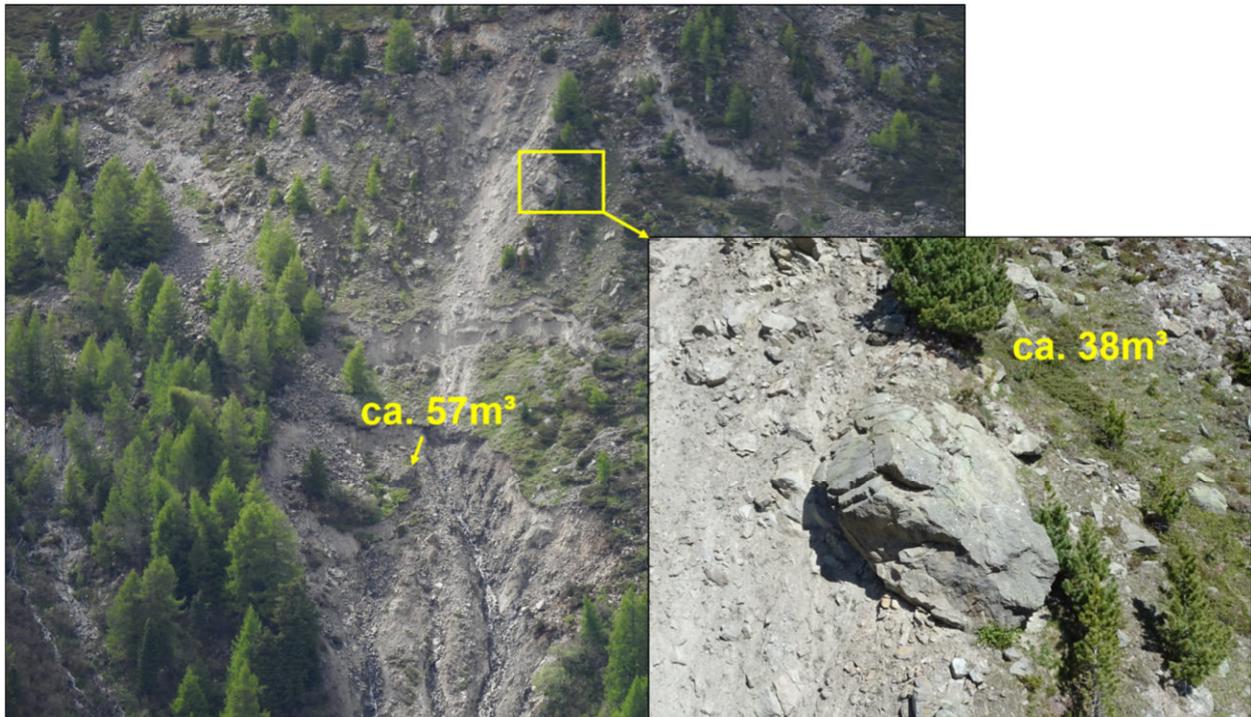
**Abb.5.** Frisch aufgegangene Absetzung und höchste Begrenzung des Großrutschung mit ca. 6m Absetzung.

Rund um die markanten Wasseraustritte findet ein massiver Abtrag von Material statt und auch rückschreitende Erosionen der Anrissbereiche (siehe Abb.2).



**Abb. 6.** Beispiel aus dem mittleren Anrissbereich links 19.05.2020, rechts 29.05.2020 und unten vom 29.07.2020.

Aufgrund der Hangbewegungen, die zu großen Absetzungen im obersten Bereich führen, kommt es neben Murereignissen auch zu Stein- und Blockschlägen bis hin zum Abstürzen von Großblöcken.



**Abb.7.** Anrissbereiche mit absturzgefährdeten Großblöcken.

Durch die Erosion und Umlagerung von Material ist es zu Murabgängen, deren Masse sich großteils im mittleren Abschnitt des Murschuttkegels abgelagert hat, gekommen. Murmaterial wurde aber auch im talauswärtigen und mittleren Bereich des Daches der Leckgalerie abgelagert.

Durch die immer wieder stattfindende Verlegung der Murrinne kam es zum Aufstau und schwallartigem Ausbrechen von Murmaterial, welches wiederum Blöcke in Bewegung bringt.



**Abb.8.** Neu entstandenes Murgerinne oberhalb der Leckgalerie. Das Foto wurde am gesperrten Wanderweg am 26.05.2020 aufgenommen.

Aufgrund dieser Verhältnisse liegen verschiedenste Gefährdungsszenarien (Muren, Hangexplosionen, Stein- und Blockschläge mit Großblöcken) vor, die unterschiedlicher Sicherungs- und Kontrollmaßnahmen bedürfen. Auch das theoretisch mögliche Szenario des Gesamtversagens des bewegten Bereiches wurde dabei berücksichtigt.

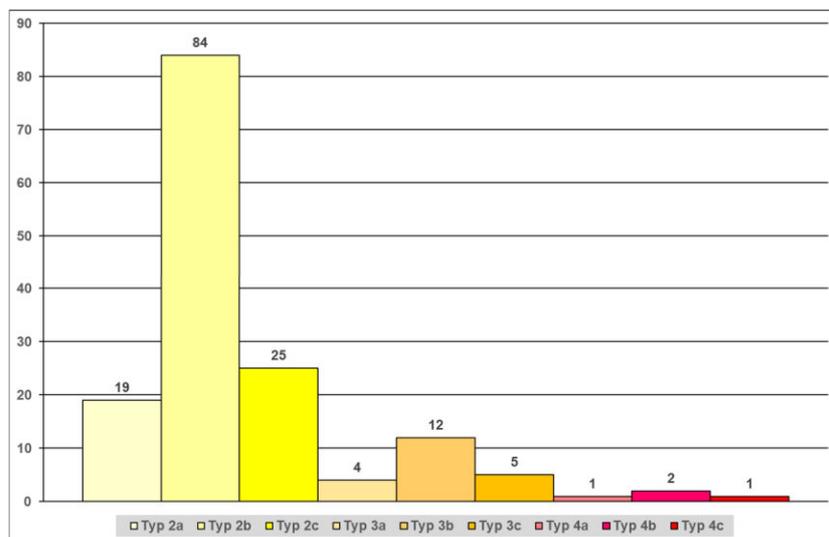
**4. Maßnahmen:**

Es wurden von der Abteilung Geoinformation in Zusammenarbeit mit mehreren Firmen verschiedene Messsysteme (terrestrischer Laserscan, Interferometer, hochauflösende Webcam) installiert, die laufend den Hang beobachten und von Fachpersonen ausgewertet werden. Zu den zahlreichen Messungen wurden auch Erhebungen im Gelände, Simulationen und Beobachtungen, sowie umfassende Dokumentationen des Hanges und von Ereignissen durchgeführt.

Durch die tägliche Dokumentation mittels Beobachtungsposten konnten von 03.06.2020 bis 31.07.2020 gesamt 153 Ereignisse dokumentiert werden, wobei an Spitzentagen bis zu 13 Ereignisse festgestellt werden konnten. Nachfolgende Tabelle und Abbildung zeigen die Gesamtverteilung der dokumentierten Ereignisse.

| Bereich   | Typ    | Beschreibung   | dokumentierte Ereignisse |
|-----------|--------|--|--------------------------|
| Bereich 1 | Typ 2a | Murereignis (kleinräumig)  | 19                       |
|           | Typ 2b | Blocksturz (Kleinblöcke: wahrnehmbar/hörbar; Blockgröße <1m)               | 84                       |
|           | Typ 2c | Murereignis (kleinräumig) und Blocksturz (Kleinblöcke)                     | 25                       |
| Bereich 2 | Typ 3a | Murereignis (mittelgroß)   | 4                        |
|           | Typ 3b | Blocksturz (mittelgroße Blöcke: wahrnehmbar/hörbar; Blockgröße: klein-PKW) | 12                       |
|           | Typ 3c | Murereignis (mittelgroß) und Blocksturz (mittelgroße Blöcke)               | 5                        |
| Bereich 3 | Typ 4a | Murereignis (groß)   | 1                        |
|           | Typ 4b | Blocksturz (große Blöcke: wahrnehmbar/hörbar; Blockgröße: Hausgröße)       | 2                        |
|           | Typ 4c | Murereignis (groß) und Blocksturz (große Blöcke)                           | 1                        |

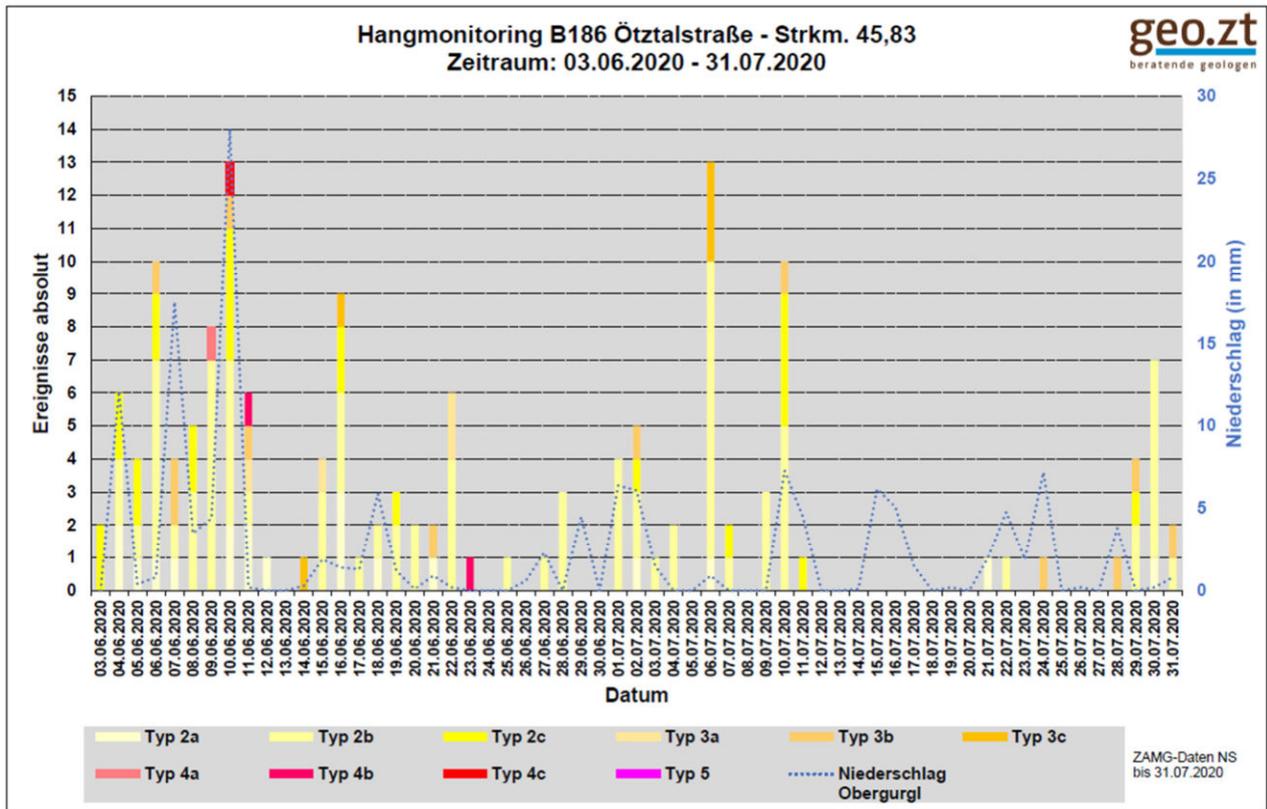
**Tab.1.** Gesamthaft dokumentierte Ereignisse von 03.06.2020 bis 31.07.2020 nach Ereignistyp.



**Abb.9.** Gesamthaft dokumentierte Ereignisse von 03.06.2020 bis 31.07.2020 nach Ereignistyp.

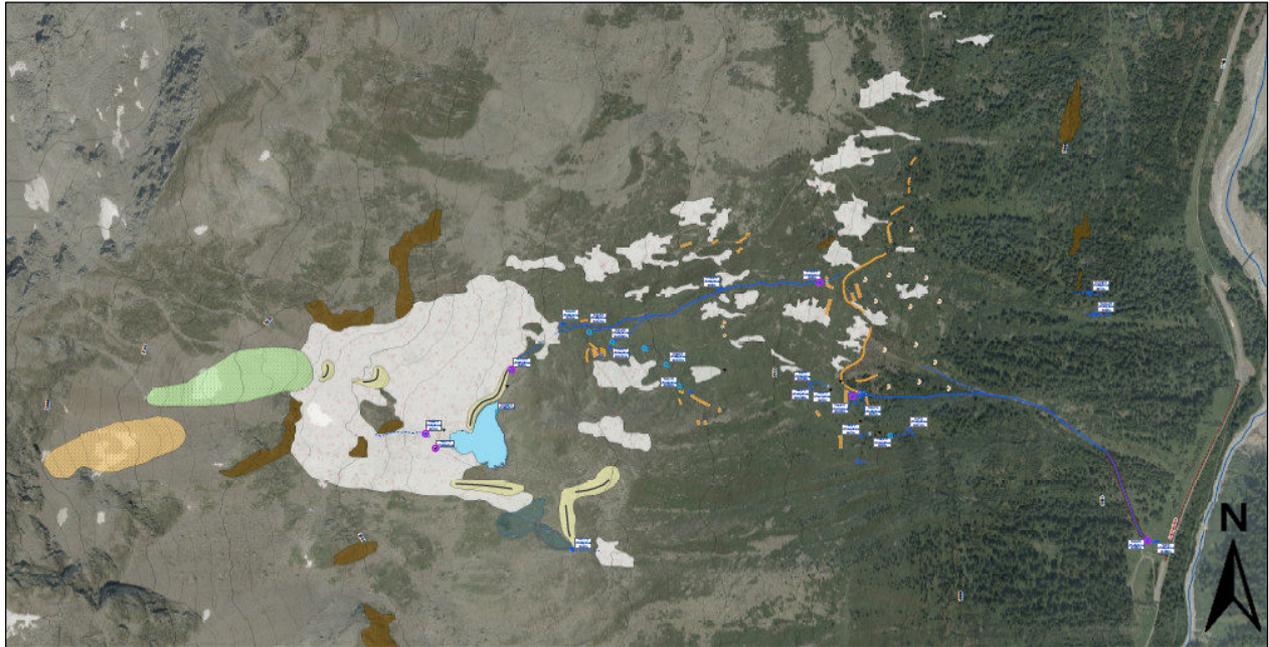
83,66 % der dokumentierten Ereignisse sind dem Bereich 1 (Typ 2a bis Typ 2c) zuzuordnen. 13,73 % sind für den Bereich 2 (Typ 3a bis Typ 3c) erfasst. Ein sehr kleiner Anteil mit 2,61 % ist dem Bereich 3 (Typ 4a bis Typ 4c) zuzuordnen.

Nachfolgende Abbildung gibt einen Überblick über die durch Beobachtungsposten täglich dokumentierten Ereignisse im Zeitraum 03.06.2020 bis 31.07.2020 nach Ereignistyp sortiert.



**Abb.10.** Täglich dokumentierte Ereignisse nach Ereignistyp von 03.06.2020 bis 31.07.2020.

Im Zuge von Kartierungen konnten zudem erste Erkenntnisse zur geomorphologischen und hydrogeologischen Situation am Einhang der Leckgalerie gewonnen werden.

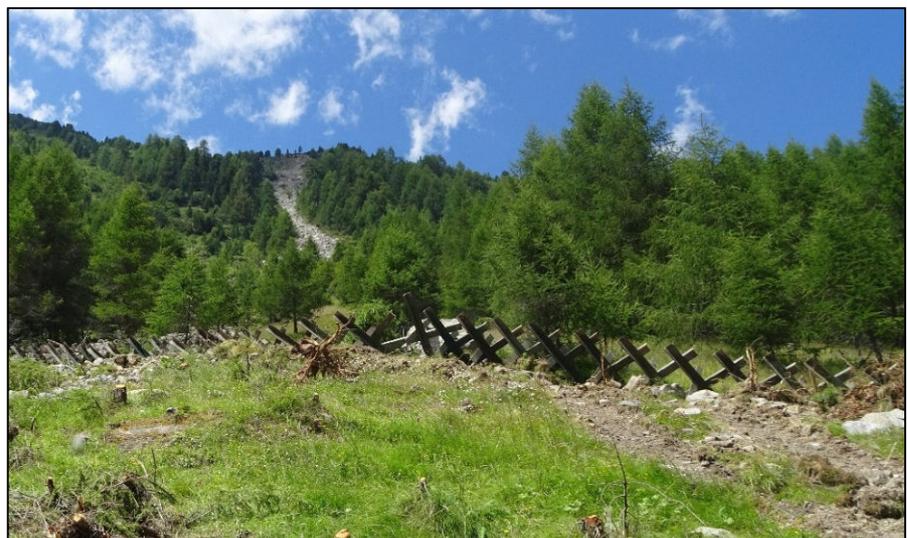


**Abb.11.** Ausschnitt aus der geomorphologisch-hydrogeologischen Karte zum Einhang der Leckgalerie.

Das Gefährdungspotential, sowie darauf aufbauend erforderliche Maßnahmen können auf Basis dieser Tätigkeiten ausreichend eingeschätzt werden. Daher konnte am 17.07.2020 die Straße wieder für den Verkehr und somit auch für die Arbeiten der auf der Leckgalerie freigegeben werden.

Da die Arbeiten im Gefährdungsbereich stattfinden, mussten Sicherungsmaßnahmen ergriffen werden. Dabei handelt es sich um Panzerigel oberhalb des Galeriedaches, Steinschlagdämme und provisorische Steinschlagschutznetze. Der Hang wird seit Beginn der Arbeiten laufend unter anderem durch die Landesgeologie überwacht und auf Basis dieser laufend gewonnenen Erkenntnisse erfolgt eine tägliche fachliche Einschätzung und Beurteilung des gegenständlichen Hanges während der Ertüchtigungsarbeiten im Bereich der Leckgalerie. Bislang wurde nur ein Block registriert, der durch die Panzerigel aufgehalten wurde.

**Abb.12.** Panzerigel mit aufgehaltenem Block



## **5. Schlussfolgerungen**

Die Ergebnisse der Beobachtungen und Messungen haben gezeigt, dass die Bewegungen im Anrissbereich und im Gesamthang seit Ende Juni 2020, ca. mit dem prognostizierten Ende der Schneeschmelze, deutlich zurückgegangen sind. Es hat sich jedoch gezeigt, dass in hochgelegenen Bereichen immer noch Schneereste vorhanden waren. Mit dem tatsächlichen Ende der Schneeschmelze ca. Mitte August 2020 sind die Bewegungen praktisch zum Stillstand gekommen. Auch nach Mitte August 2020 stattgefundenere Starkniederschlagsereignisse hatten keine Auswirkung auf die Hangstabilität und haben keine erneuten Bewegungen ausgelöst. Dadurch bestätigt sich erneut die Prognose, dass die Schmelzwässer den Hauptmotor für die Gesamthangbewegungen darstellen.

## TLS-basiertes Geomonitoring TLS-Geomonitoring an der Großbrutschung Leckgalerie, Oberurgl

Patrick Fritzmann, Johannes Anegg

*Amt der Tiroler Landesregierung, Abteilung Geoinformation, Herrengasse 1-3, 6020 Innsbruck*

### Einleitung

Die Abteilung Geoinformation wurde im Juli 2019 seitens der Landesgeologie über Spaltenbildungen oberhalb der B 186 (zwischen km 45 und km 46,2, bei Leckgalerie) informiert. Das Gebiet wurde seitdem von der Abteilung Geoinformation in regelmäßigen Abständen mittels terrestrischem Laserscanner (TLS) erfasst, ausgewertet und die detektierten flächenhaften Deformationen bzw. Bewegungen laufend in Form von Berichten an die Landesgeologie weitergegeben.

Im Mai 2020 kam es aufgrund der Schneeschmelze im Untersuchungsgebiet zu einem enormen Wasserandrang, der ca. 300 Höhenmeter oberhalb der Straße im Bereich eines unbenannten Grabens eine Hangexplosion verursachte. Dies führte zu mehreren Mureignissen, deren Material unter anderem das Dach der Leckgalerie überlagerte und eine temporäre Sperrung der B 186 unumgänglich machte.

Im Juni 2020 wurde seitens der Abteilung Geoinformation ein permanentes automatisches Geomonitoring eingerichtet. Dieses besteht aus einem fest installierten terrestrischen Laserscanner, einer Webcam und einem interferometrischem Radar (InSAR).

Dieser Bericht beschränkt sich auf die Messungen der zwei TLS-Systeme. Dabei werden die zwei verschiedenen Scan-Setups beschrieben und bisherige Ergebnisse auszugswise präsentiert.



**Abbildung 1:** Die Messhütten nahe der Mautstation Timmelsjoch. Temporäre Messhütte für TLS (links), neue Messhütte für TLS sowie Stromversorgung für Webcam und InSAR (mitte), InSAR mit Schutzhütte (rechts).

## TLS Geomonitoring Episodische Messungen mit mobilem Scan-Setup



**Abbildung 2:** Ansicht des Untersuchungsgebiets mit mobilem Scanner Riegl VZ-4000.

Die erste TLS Messkampagne fand am 01.08.2019 statt (Nullmessung). Seitdem wurden neun Folgemessungen durchgeführt. Das Gebiet wurde vom Gegenhang von 5 Scanpositionen mit einem terrestrischen Long-Range-Scanner (Riegl VZ-4000) erfasst. Als Grundlage für die Georeferenzierung wurde die klassifizierte Punktwolke des Airborne Laser Scan (ALS 2017) vom 30.08.2017 verwendet. Alle folgenden Mess-Epochen wurden auf stabile Bereiche der Nullmessung georeferenziert.

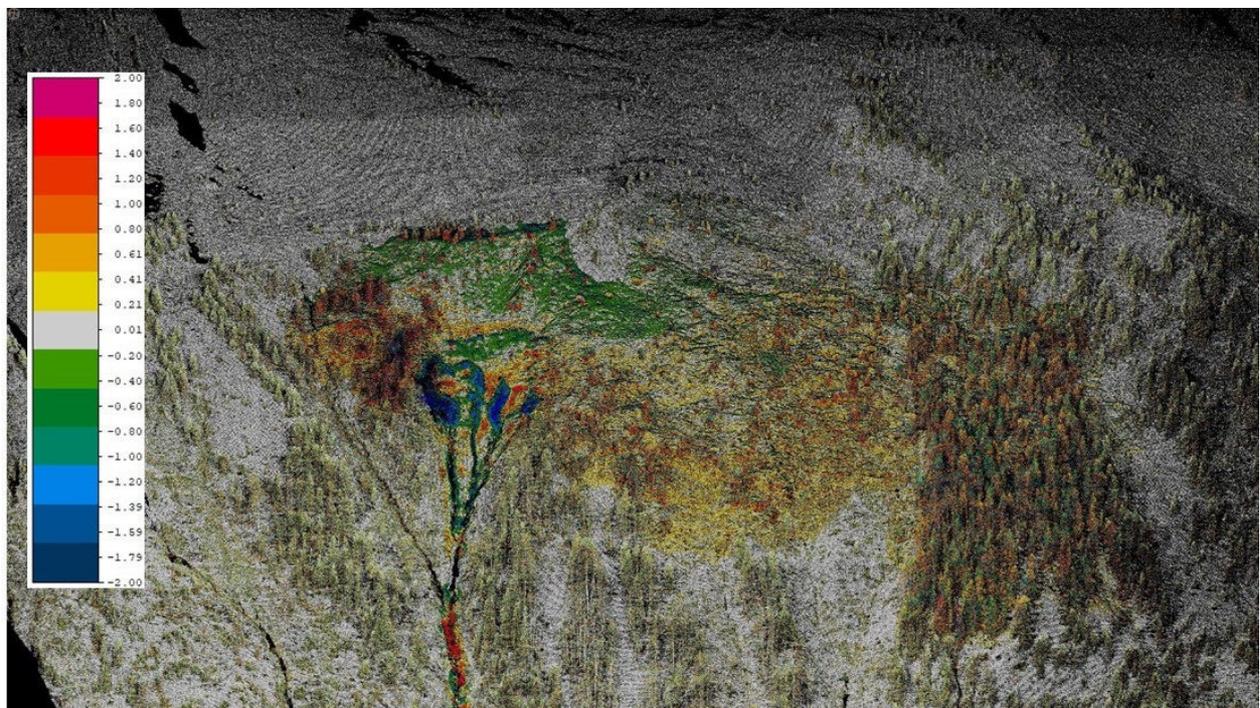
| Epoche     | Datum      | Mittlerer Punktabstand |
|------------|------------|------------------------|
| ALS_2017*  | 30.08.2017 | 12 cm                  |
| TLS 19_1** | 01.08.2019 | 7 cm                   |
| TLS 19_2   | 15.10.2019 | 9 cm                   |
| TLS 20_1   | 20.05.2020 | 8 cm                   |
| TLS 20_2   | 29.05.2020 | 7 cm                   |
| TLS 20_3   | 12.06.2020 | 7 cm                   |
| TLS 20_4   | 17.06.2020 | 8 cm                   |
| TLS 20_5   | 23.06.2020 | 10 cm                  |
| TLS 20_6   | 30.06.2020 | 8 cm                   |
| TLS 20_7   | 15.07.2020 | 9 cm                   |
| TLS 20_8   | 06.08.2020 | 9 cm                   |

**Tabelle 2:** Übersicht der bisher durchgeführten TLS Kampagnen. \* Grundlage für Georeferenzierung der Nullmessung; \*\* Grundlage für Georeferenzierung der Folgeepochen.

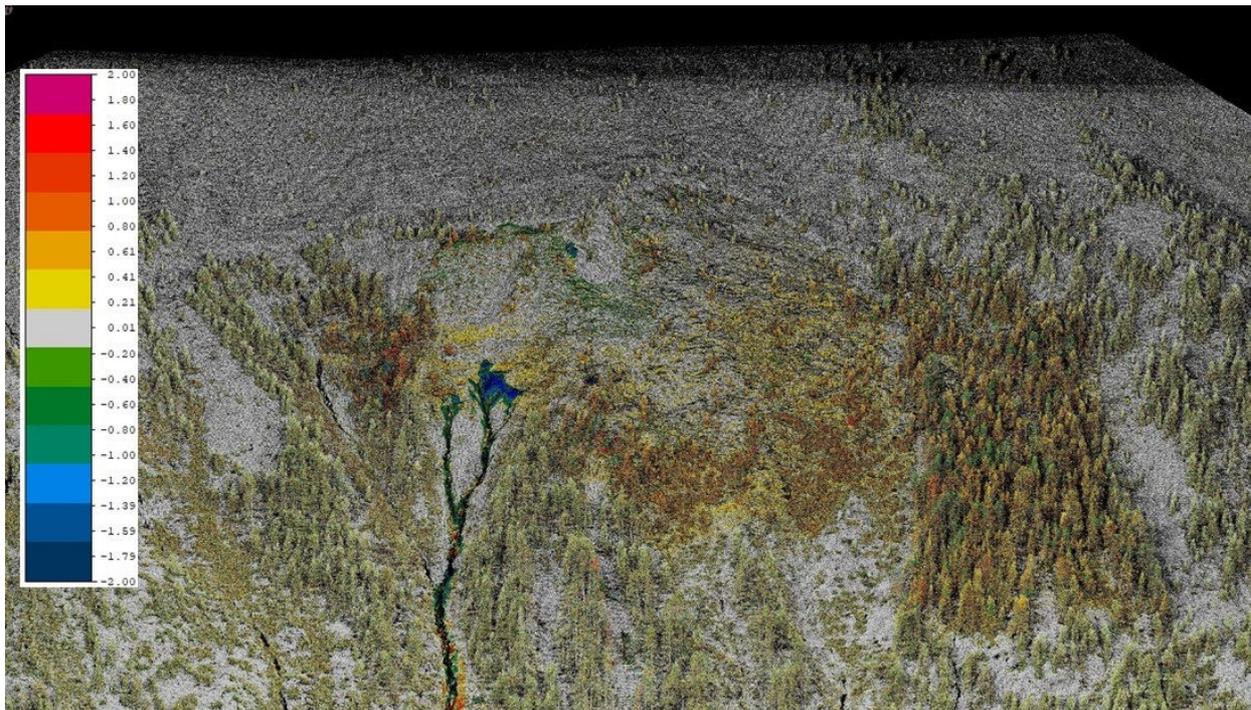
## Ergebnisse mobiles Scan-Setup



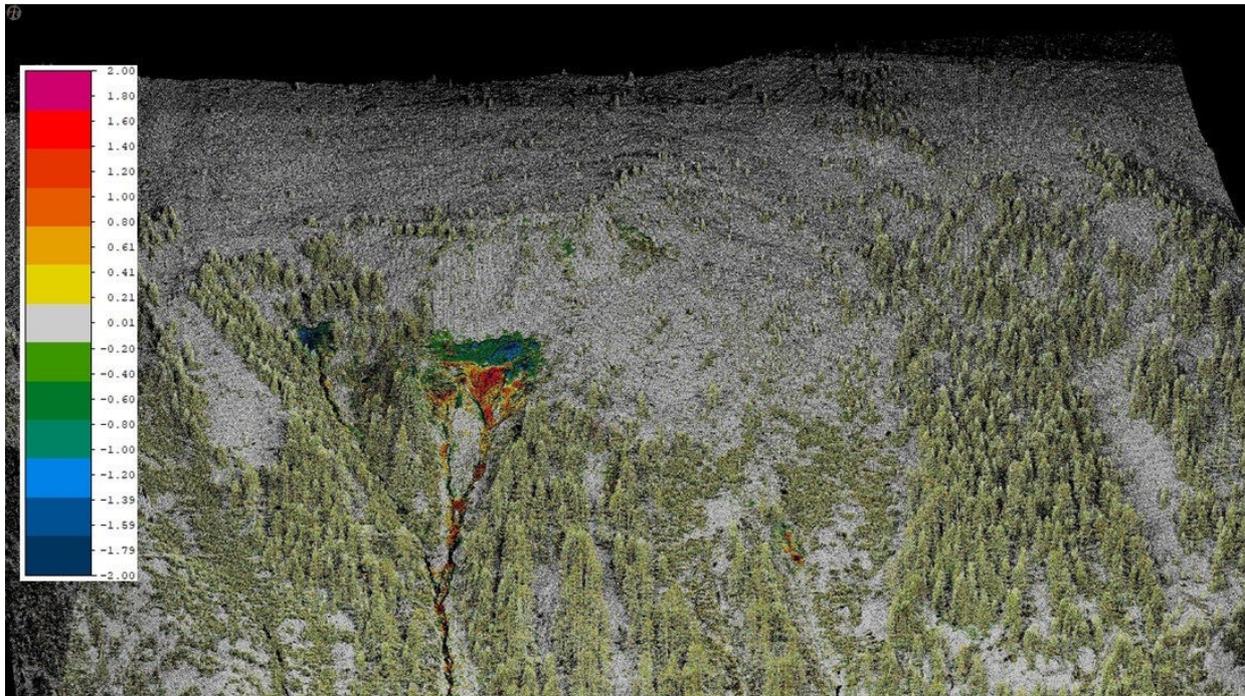
**Abbildung 3:** 3D-Ansicht der Distanzen zwischen den Punktwolken der Epochen 01.08.2019 und 15.10.2019 (mobiles Scan-Setup).



**Abbildung 4:** 3D-Ansicht der Distanzen zwischen den Punktwolken der Epochen 20.05.2020 und 29.05.2020 (mobiles Scan-Setup).



**Abbildung 5:** 3D-Ansicht der Distanzen zwischen den Punktwolken der Epochen 17.06.2020 und 23.06.2020 (mobiles Scan-Setup).



**Abbildung 6:** 3D-Ansicht der Distanzen zwischen den Punktwolken der Epochen 15.07.2020 und 06.08.2020 (mobiles Scan-Setup).

## Permanente Messungen mit automatischem Scan-Setup



**Abbildung 7:** Blick aus der Messhütte auf das Untersuchungsgebiet inkl. Scanner Riegl VZ-2000i.

Am 25.06.2020 wurde nahe der Mautstelle Timmelsjoch ein terrestrischer Long-Range-Scanner (Riegl VZ-2000i) permanent installiert.

Zur Unterstützung im Gefahrenbeurteilungsprozess für die Baustelle, wurde als erste Sofortmaßnahme der Scanner auf einem betonierten Pfeiler in einer temporären Messhütte installiert. Zeitgleich wurden neben dieser Hütte ein Betonfundament und ein Betonsockel gegossen (siehe Abbildung 8). Nach ausreichender Aushärtung des Betons, wurde das System auf den neuen Standpunkt versetzt.

Der Scanner führt alle zwei Stunden automatisiert einen Scan des gesamten Untersuchungsgebiets durch. Die mittlere Entfernung zum Untersuchungsgebiet beträgt ca. 1500 m. Bei einer horizontalen und vertikalen Winkelauflösung von  $0,009^\circ$  und einer Messrate von 50 kHz dauert ein Scan des kompletten Untersuchungsgebiets knapp 13 Minuten.

Der Scan und die gerechneten Deformations-Ergebnisse (voxelbasierte Tiefendifferenzen zu allen Messungen) sind ca. 10 Minuten nach Scanabschluss verfügbar und können abgerufen werden.

Die Deformations-Ergebnisse, welche in der WebApp dargestellt sind, werden bereits am Scanner gerechnet.

Das Scanprojekt an sich, die Punktwolke der Scans, die Berechnungen und sämtliche meteorologischen Parameter (Temperatur, Druck, Luftfeuchte) werden auf einem Server gespeichert und können für weiterführende Detailauswertungen, wie Deformationsanalysen, Differenz- und Kubaturberechnungen verwendet werden.

### Ergebnisse kontinuierliches Scan-Setup

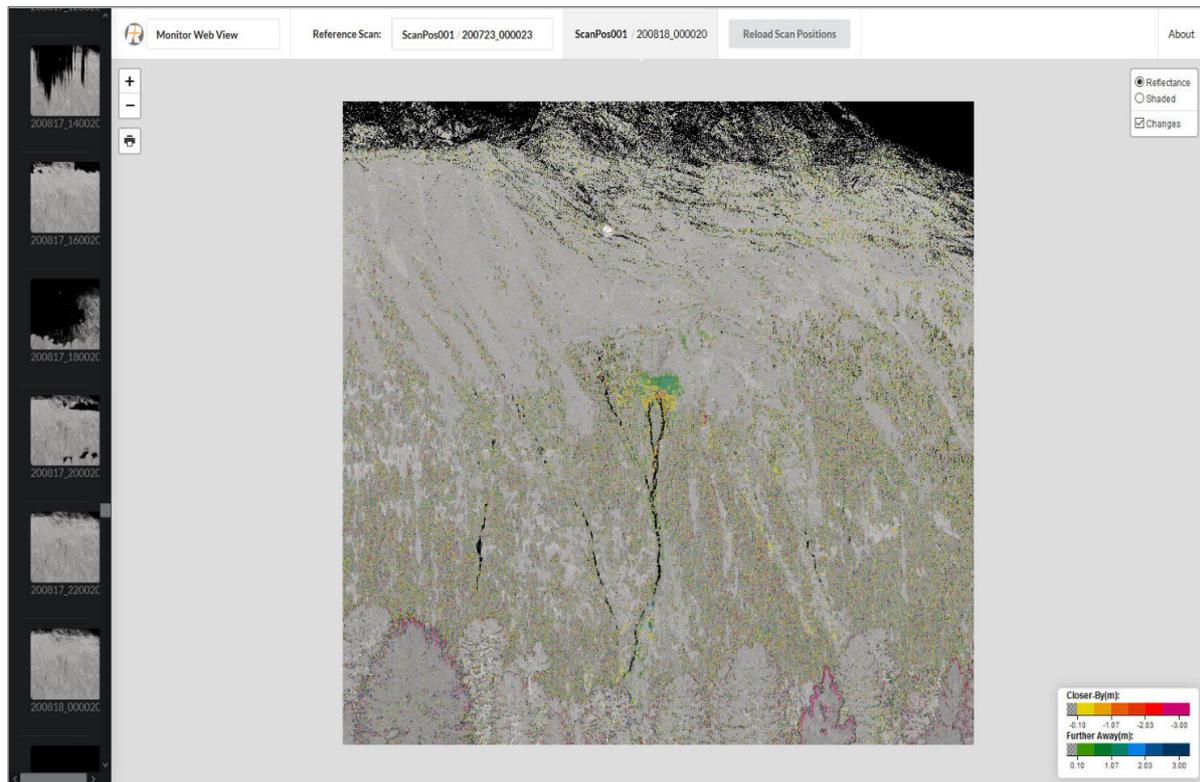


Abbildung 8: Oberfläche der WebApp, erreichbar unter <https://hangrutsch.tirol.gv.at/>

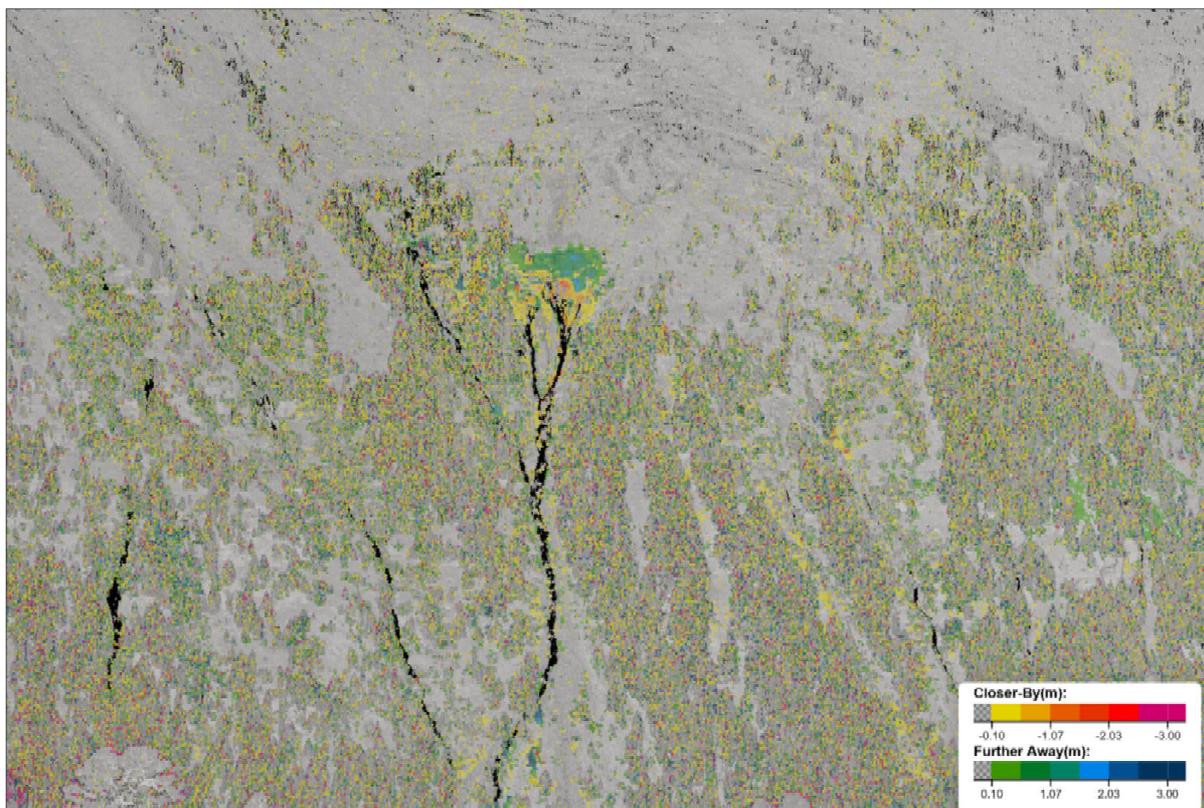
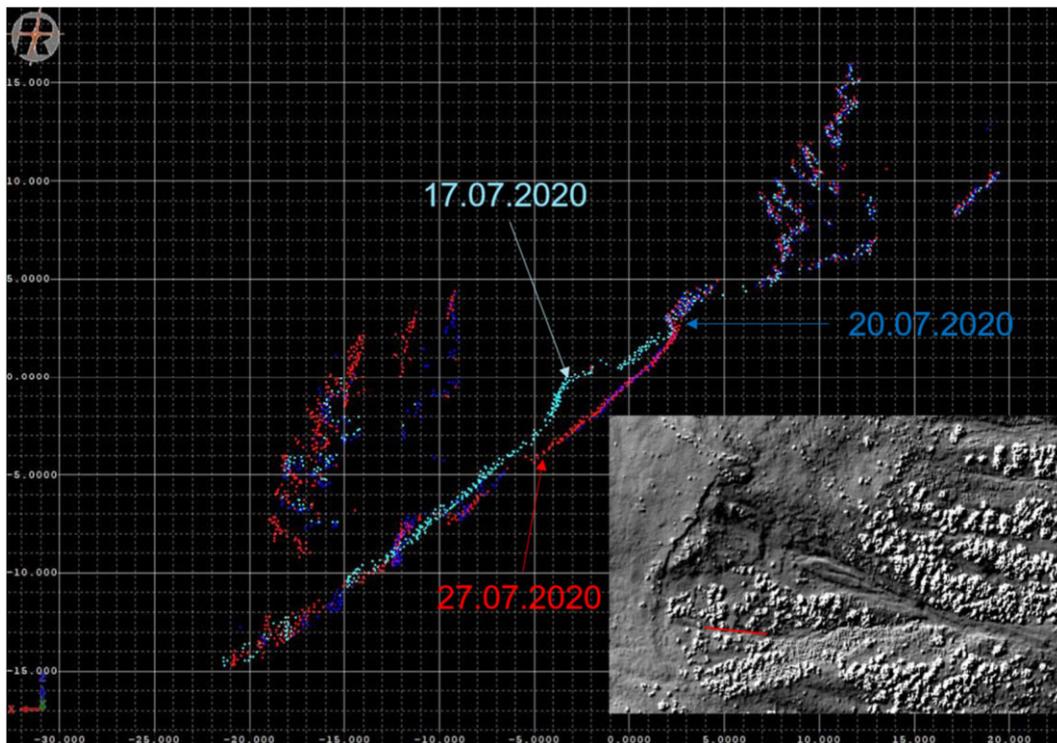
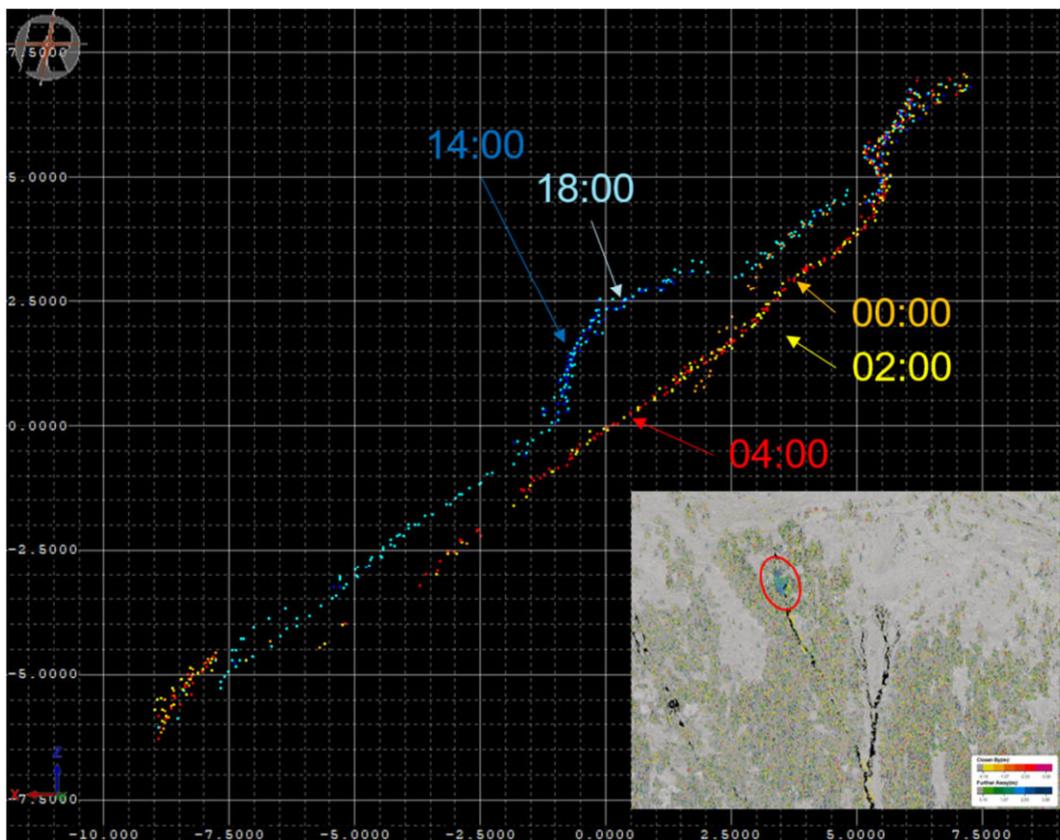


Abbildung 9: Darstellung aus der WebApp, Differenz zwischen dem 18.07.2020 und AKTUELLSTEM DATUM!!!!



**Abbildung 10:** Profilschnitt durch Punktwolken der Epochen 17.07.2020 (hellblau), 20.07.2020 (dunkelblau) und 27.07.2020 (rot) (automatisches Scan-Setup).



**Abbildung 11:** Profilschnitt durch Punktwolken der Epochen 17.07.2020 und 18.07.2020. Die Kubatur-Ermittlung ergab einen Abtrag von 515 m<sup>3</sup> auf rund 500 m<sup>2</sup> (automatisches Scan-Setup).

## B186 Ötztalstraße Ertüchtigung Leckgalerie /Klammgalerie

Günter Guglberger

*Amt der Tiroler Landesregierung, Abteilung Brücken- und Tunnelbau, Herrengasse 1-3, 6020 Innsbruck*

### 1. Allgemeines

An der westlichen Talflanke, des von den Rutschmassen der Großrutschung/Talzusub Obergurgl gefährdeten Bereiches, führt knapp oberhalb der Ötztaler Ache die B 186, die Ötztalstraße in der Gemeinde Sölden von Zwieselstein nach Untergurgl/Obergurgl bzw. auf die Timmelsjoch Hochalpenstraße.

In diesem Abschnitt wird die B 186 durch 3 Galerien vor Lawineneignissen geschützt. Die 360 m lange Leckgalerie und die rd. 45 m der Klammgalerie liegen im unmittelbaren Gefährdungsbereich der Großrutschung.



**Bild 1:** *Baulosbereich Leckgalerie/Klammgalerie*

Einzelne Murstriche, mit geringer Mächtigkeit aber starker Wasserführung, überstrichen bei den Ereignissen im Juli und August 2020 bereits die Leckgalerie. Zudem befürchtete man die Gefahr des massiven Einschlages einzelner Steinblöcke in der Größe von einigen Kubikmetern am Galeriedach, aus den wasserführenden Rinnen oberhalb der Galerien.

Als erste Sofortmaßnahme, vor dem Vorliegen der Steinschlagsimulationen der Landesgeologie Tirol, wurde die Leckgalerie präventiv mit massiven Holzunterstellungen gestützt, um im Ereignisfall „Steinschlag“ das Bauwerk vor einem Gesamtkollaps zu schützen.

Der Lastfall „Überschüttung“ durch „Mur Ereignis“ wurde als äußerst kritisch erachtet, da man mit der Hilfsunterstellung zwar die vertikale Auflast auf der Galeriedecke ableiten kann, aber der zusätzliche Erddruck immer vom bestehenden Tragwerk aufgenommen werden muss.



**Bild 2:** Baustellenübersicht

## 2. Beschreibung des Bestandes

Die beiden betroffenen Galerien wurden in den Jahren 1980 -1982 als Stahlbetonrahmenkonstruktionen mit V-Stützen und Flachdecken errichtet. Bei der Leckgalerie kam erstmals ein Schalwagen für den Galeriebau in Tirol zum Einsatz. Die bergseitig ausgerundete Rahmenecke ermöglichte einen biegesteifen Anschluss bergseitige Wand/Tragwerksdecke. Die talseitigen V-Stützen sind ebenfalls biegesteif an die Flachdecke ( $d_{\text{Feld}} = 85\text{-}60 \text{ cm}$ ) angeschlossen.

Die Klammgalerie ist mittels einer bergseitigen Spornmauer errichtet worden. Die Galeriedecke ( $d_{\text{Feld}} = 80\text{-}60 \text{ cm}$ ) liegt bergseitig gelenkig auf und ist talseitig biegesteif an die V-Stützen angeschlossen.

Die Gründung beider Galerien erfolgte bergseitig auf Streifenfundamenten auf Fels bzw. abschnittsweise auf Lockermaterial. Die talseitige Gründung der V-Stützen wurde mittels Brunnengründung bei der Leckgalerie auf Fels- bzw. abschnittsweise auch auf Lockermaterial und bei den betroffenen Abschnitten der Klammgalerie ausschließlich auf Lockermaterial hergestellt.

Der statischen Berechnung wurden folgende Eingangsparameter zugrunde gelegt:

Lawinenlast Leckgalerie:

Regellast  $p_v = 20 \text{ kN/m}^2$   
 $p_h = 5 \text{ kN/m}^2$

bzw. in einigen Blöcken erhöhte Lawinenlast

$p_v = 30 \text{ kN/m}^2$   
 $p_h = 10 \text{ kN/m}^2$

Lawinenlast Klammgalerie:

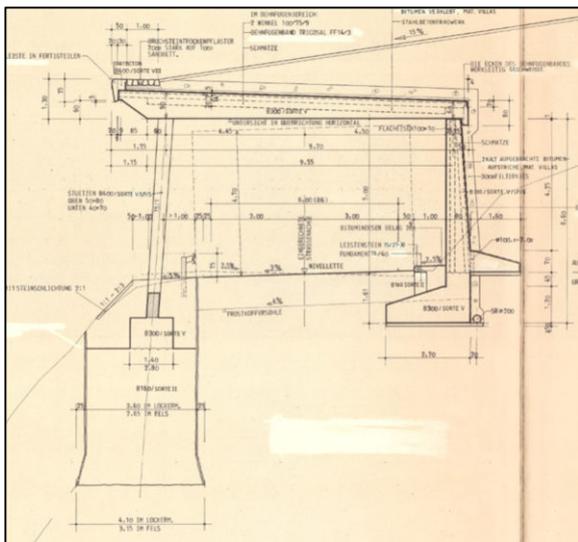
Regellast  $p_v = 30 \text{ kN/m}^2$   
 $p_h = 10 \text{ kN/m}^2$

Dabei wurde die volle Lawinenlast mit verminderter Sicherheit (1,45 Biegung bzw. 2,15 mittiger Druck) und die halbe Lawinenlast mit voller Sicherheit bei der Traglastbemessung in Rechnung gestellt.

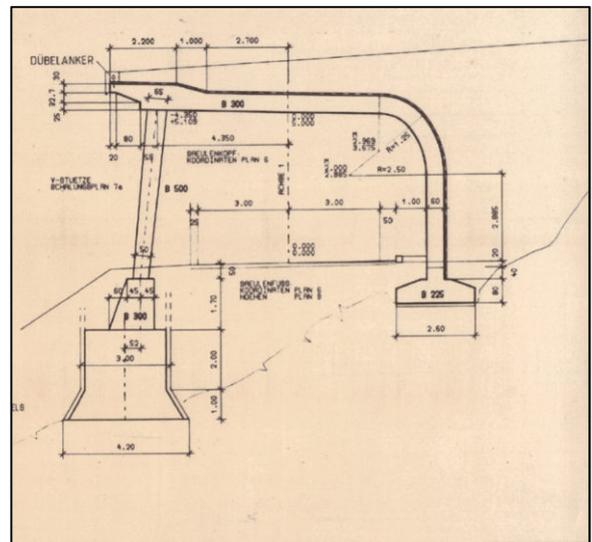
Bodenkennwerte:

|                  | geologische<br>Verhältnisse | Gründungsart  | zul.<br>Bodenpressung<br>$\sigma_{zul.} [\text{kN/m}^2]$ | Bettungsmodul<br>$k_b [\text{KN/m}^3]$ |
|------------------|-----------------------------|---------------|--|--|
| <b>BERGSEITE</b> | Lockermaterial              | Flachgründung | 450  | 30.000 - 70.000                        |
| <b>TALSEITE</b>  | Lockermaterial              | Tiefgründung  | 600  | 30.000 - 50.000                        |
| <b>BERGSEITE</b> | Fels                        | Flachgründung | 1.000  | 300.000                                |
| <b>TALSEITE</b>  | Fels                        | Tiefgründung  | 1.000  | 300.000                                |

Die Stahlbetonbemessung der Bauwerke erfolgte nach den einzelnen Teilen gemäß der damals gültigen ÖNORM B 4200.



**Bild 3:** Regelquerschnitt Klammgalerie



**Bild 4:** Regelquerschnitt Leckgalerie

### 3. Ertüchtigung der Galeriebauwerke

Eine Nachrechnung der bestehenden Tragwerke gemäß dem derzeit gültigen Normenstand und der, der Ursprungsstatik zugrunde gelegten Belastung zeigte, dass beide Galerien Bewehrungsdefizite sowohl im Bereich der Durchstanzbewehrung als auch beim Biegeanschluss der talseitigen V-Stützen mit der Galeriedecke aufweisen.

Aufgrund der geringen Überschüttung und der in der Bestandsstatik berücksichtigten Lawinenlasten, können beide Tragwerke weder einer Zusatzbelastung aus dem Lastfall Steinschlag noch aus dem Lastfall zusätzliche Auflast aus dem Lastfall „Mur Ereignis“ aufnehmen.

Der Ertüchtigung der Bauwerke wurden folgende Parameter zugrunde gelegt:

- Die Sicherheit der Arbeitnehmer muss zu jedem Zeitpunkt der Arbeiten gewährleistet sein; Arbeiten am Galeriedach bedeuten Arbeiten im größten Gefahrenbereich!
- Die Galeriedecke soll für den außergewöhnlichen Lastfall „Mur Ereignis“ auf die maximal mögliche zusätzliche Auflast ausgelegt werden.
- Die Bauleistungen müssen so erfolgen, dass eine uneingeschränkte einspurige Verkehrsführung auf der B 186 möglich ist.
- Erschwerend bei der ganzen Ertüchtigung, war dabei der Faktor Zeit. Die Arbeiten konnten erst nach Freigabe des Baufeldes Mitte August beginnen. Bis zum Einbruch des Winters – voraussichtlich Ende November/Anfang Dezember – müssen sämtliche Arbeiten, einschließlich der Überschüttung, abgeschlossen sein, da die Bauwerke in bekannten und gefährlichen Lawenstrichen entlang der B 186 liegen.

Das neue statische Konzept sieht vor, durch eine vollflächige Verdübelung der bestehenden Galeriedecken mit einer neuen Aufbetonplatte, das Traglastniveau des Bestandes erheblich anzuheben und damit größere Überschüttungshöhen der Galerien im Ereignisfall zu berücksichtigen.



Weiter sind 47 to Bewehrungsstahl in der Aufbetonplatte erforderlich, um mit der im Feld 55 cm starken und über der Stütze 65 cm starken, im Verbund mit dem Bestand stehenden, Aufbetonplatte (C 30/37/B 2), für ein ausreichendes Tragsicherheitsniveau zu sorgen.

Mit oben angeführten Maßnahmen wurde folgender Bauablauf gewählt:

- Einrichten eines Schutzwalles oberhalb der Galerie, bestehend aus Panzerigeln bzw. Erddämmen zum Schutz der Baumannschaft vor unerwarteten Ereignissen bzw. nicht erfassbaren Steinschlag



**Bild 6:** Schutzwall

- Einrichten von Fluchtkontainern am Galeriedach zum Schutz der Arbeitnehmer
- Abtrag der bestehenden Überschüttung, einschließlich der erforderlichen bergseitigen Sicherungsmaßnahmen mittels Spritzbetonnagelwand. Die Nagelwand wurde so ausgeführt, dass diese gleichzeitig als Sauberkeitsschicht für die Betonarbeiten verwendet werden konnte
- Abtrag der Isolierung, Errichtung einer Versorgungsstraße hinter dem bestehenden Galeriebauwerk



**Bild 7: Bauweg**

- Bohren und Versetzen der Verpressanker



**Bild 8: Verpressanker**

- HDW Strahlen der Galeriedecke
- Bohren und Versetzen der Schubverdübelung



**Bild 9:** Schubverdübelung

- Verlegen der Bewehrung



**Bild 10:** Bewehrung Aufbetonplatte

- Betonieren des Tragwerkes
- Abnahmeprüfung und Festlegen der Verpressanker



**Bild 11:** Spritzbetonnagelwand, Spannischen - Verpressanker

- Isolierungsarbeiten
- Herstellen der neuen Randleiste
- Überschüttung der Galerie und Rückbau der Bauwege
- Rekultivierungsarbeiten

Nach Abschluss der Arbeiten ist sichergestellt, dass die beiden Galeriebauwerke eine Überschüttung im Mur Ereignis mit einer Höhe von 6,00 m bergseitig und 1,50 m talseitig (senkrecht) ableiten können. Dies entspricht in etwa einem Einschüttungskeil mit einer Neigung von 30 Grad, welcher im Ereignisfall durch die starke Wasserführung des Materials auf der sicheren Seite liegt.

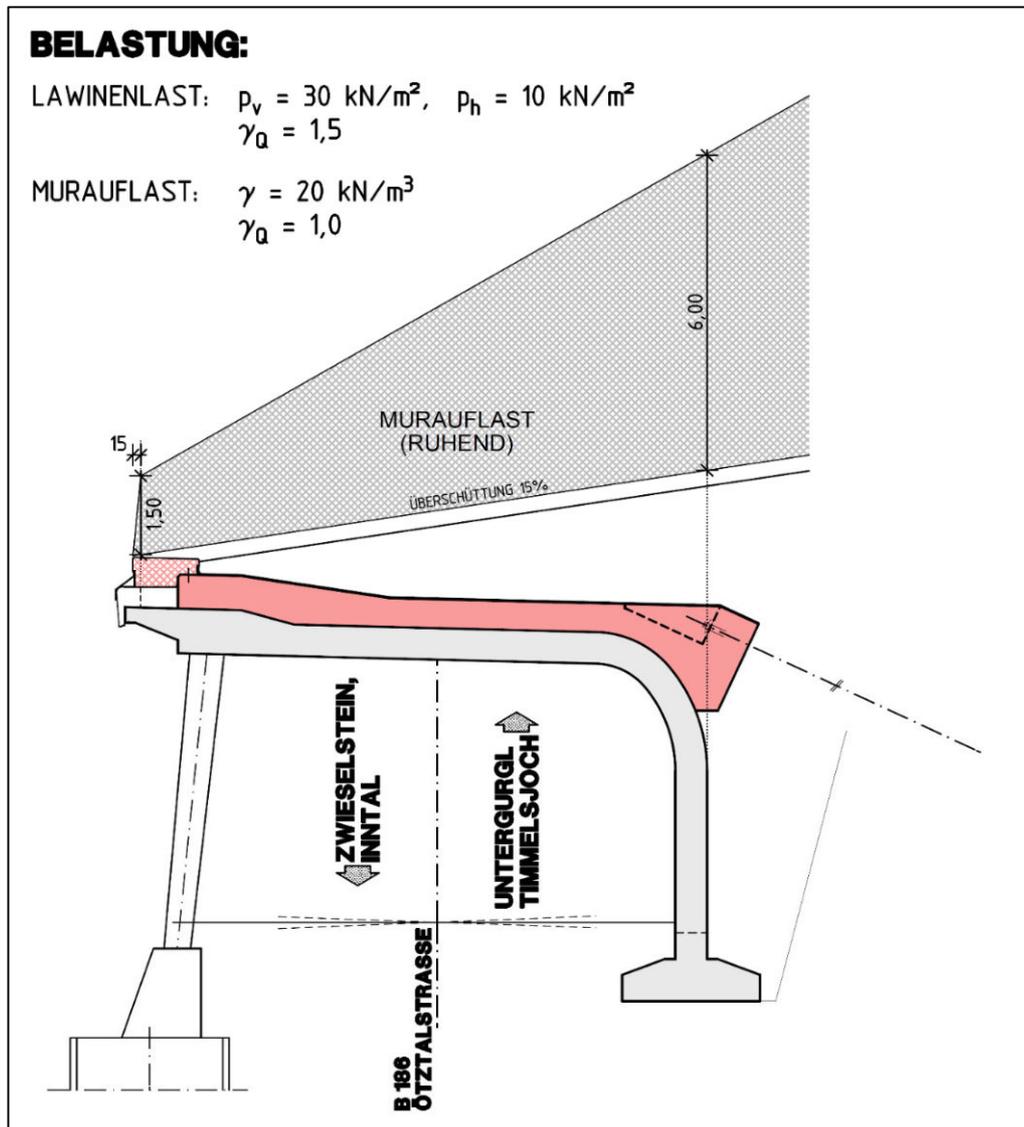


Bild 12: Lastfall "Mur Ereignis"

#### 4. Zusammenfassung

Zur Ertüchtigung der gesamten Leckgalerie und 60 m der Klammgalerie (2 Blöcke, á 30m) im Zeitraum August-November 2020 sind bzw. waren aufwendige Baumaßnahmen erforderlich. Die Sicherheit der Arbeiter war dabei das vorrangige Ziel bei einem sehr ambitionierten Bauzeitplan. Sämtliche Arbeiten müssen bis zum Winterbeginn 2020 abgeschlossen sein, um im Frühjahr 2021 bei eintretender Schneeschmelze und eventuell wiederum auftretende Hangbewegungen, die Sicherheit der Verkehrsteilnehmer auf der B 186 und die Erreichbarkeit des hinteren Ötztales gewährleisten zu können.

Der Abschluss der Arbeiten im Frühwinter 2020 ermöglicht die uneingeschränkte verkehrstechnische Erreichbarkeit des hinteren Ötztales zu jeder Jahreszeit für die gesamte Bevölkerung aber auch für die zahlreichen Gäste in den Sommer- als auch Wintermonaten.

**Fact Box:**

|                      |   |
|----------------------|---|
| 4 Monate             | Bauzeit   |
| 2.500 m <sup>2</sup> | Spritzbetonsicherung                                |
| 4.000 m <sup>1</sup> | Hohlstabanker (IBO-Anker)                           |
| 2.800 m <sup>1</sup> | Verpressanker bzw. Verpresspfähle System GEWI+ 57,5 |
| 4.000 m <sup>3</sup> | Beton C 30/37/B2                                    |
| 660 to               | Bewehrung BST 550                                   |
| 5.700 m <sup>2</sup> | Isolierung  |

|                    |   |
|--------------------|---|
| Planung            | Ingenieurbüro Thomas Sigl, Innsbruck<br>Landesbaudirektion Tirol, SG Brücken- und Tunnelbau |
| Spezialtiefbau     | Firma HTB-Imst  |
| Baumeisterarbeiten | Firma PORR Bau GmbH   |
| Herstellkosten     | € 6.200.000.-   |

## Zu Lande, Untertage und aus der Luft – Photogrammetrische Ansätze zur geologischen Trennflächenanalyse

Michael Mett<sup>1</sup>, Jérôme Steinkühler<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Dibit Messtechnik GmbH, Framsweg 16, 6020 Innsbruck

### **Abstract**

*Photogrammetric methods enable the three-dimensional measurement of geological outcrops with high accuracy and spatial / temporal resolution. Particularly in the case of temporary outcrops, the fast and relatively inexpensive methods are useful to measure geologically and geomechanically relevant structural information. These include e.g. blasts when building a new tunnel, active quarry work or acute events, such as rock falls or mudflows. Drone-based systems can also be used in poorly accessible or even dangerous conditions, which previously could only be accomplished with great expenditure of time and personnel, or incompletely.*

*The present paper describes innovative recording and analysis methods for areas of application in tunneling, civil engineering and mining. In addition to technical aspects, spatial resolutions and accuracies are described, as well as the practicability for various geological and geotechnical investigations.*

### **Zusammenfassung**

*Photogrammetrische Verfahren ermöglichen die dreidimensionale Messung geologischer Aufschlüsse mit einer hohen Genauigkeit und räumlich-/zeitlicher Auflösung. Insbesondere bei temporären Aufschlüssen bieten sich die schnellen und mit relativ geringem Aufwand anzuwendenden Methoden an, geologisch-, geomechanisch relevante Gefügeinformationen zu erheben. Dazu gehören z.B. Abschlüsse beim Tunnelneubau, aktive Steinbrucharbeiten oder akute Ereignisse, wie Felsstürze oder Muren. Drohnengestützte Systeme können überdies bei schlecht zugänglichen oder gar gefährlichen Verhältnissen eingesetzt werden, die vormals nur mit einem hohen zeitlichen und personellen Aufwand, bzw. unvollständig zu bewältigen waren.*

*Die vorliegende Arbeit beschreibt innovative Aufnahme- und Analysemethoden für Anwendungsgebiete im Tunnelbau, Bau- und Bergwesen. Neben technischen Aspekten werden räumlichen Auflösungen und Genauigkeiten beschrieben, sowie die Praktikabilität für verschiedene geologisch-, geotechnische Untersuchungen.*

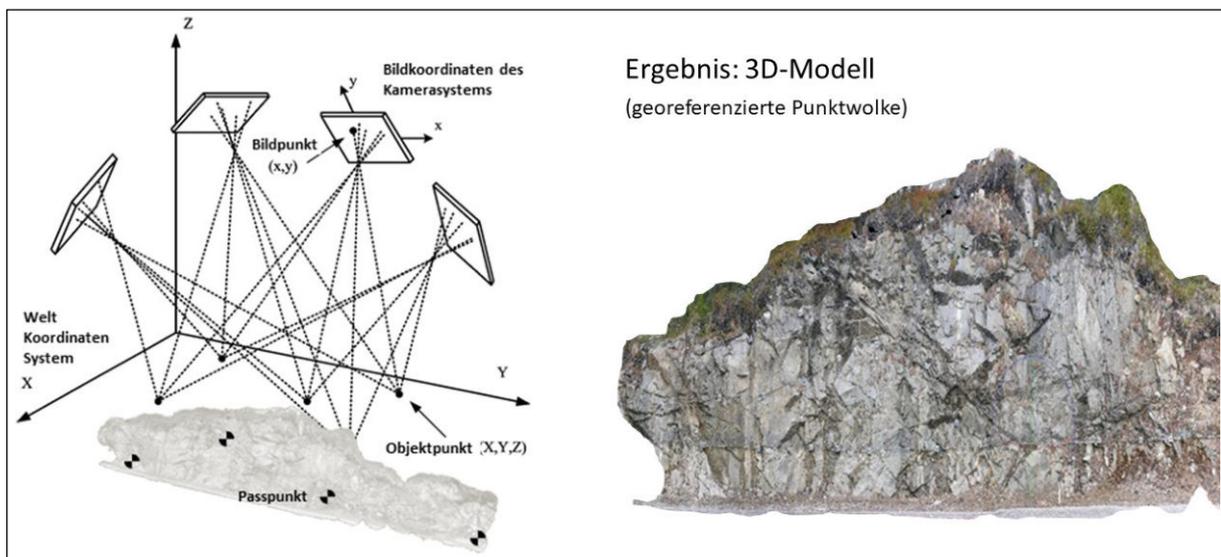
## 1. Photogrammetrie und Videogrammetrie

### 1.1 Photogrammetrie

Photogrammetrie bezeichnet die Messung geometrischer Eigenschaften von Objekten aus photographischen Aufnahmen. Der Begriff stammt aus dem Griechischen und bedeutet so viel wie „das Messen von Lichtlinien“ (Schindler, 2011).

Für die photogrammetrische 3D-Rekonstruktion wird das zu untersuchende Objekt mehrfach von unterschiedlichen Aufnahmestandorten mit sich überlappenden Messphotos aufgenommen. Neben handelsüblichen Digitalkameras werden Drohnen-basierte Aufnahmesysteme, Industriekameras und Videoaufzeichnungen verwendet.

Während der photogrammetrischen Berechnung ist es möglich, die Lage der Fotos zu rekonstruieren und mit Hilfe bekannter Aufnahmeparameter die räumlichen Koordinaten von Oberflächenpunkten zu berechnen. Der Hauptschritt zur photogrammetrischen Modellerstellung ist der sogenannte Bündelblockausgleich. In diesem werden die Bilder eines Blocks über Strahlenbündel miteinander verbunden (Abb. 01).



**Abb. 01:** Links: Schematische Darstellung einer photogrammetrischen Berechnung. Rechts zeigt das Resultat ein 3D-Modell (Punktwolke) einer etwa 10 m hohen Felswand, deren Oberfläche mit einem Schutzgitter gesichert ist.

Die Verknüpfung der Bilder untereinander erfolgt über Verknüpfungspunkte (tie points). Moderne Photogrammetrie-Softwares wie Agisoft Metashape, Photomodeler und Pix4D berechnen aus den Messphotos bereits die Aufnahmeparameter. Zu diesen gehören die (1) innere Orientierung der Kamera (Koordinaten des Bildhauptpunktes, Kammerkonstante), (2) die äußere Orientierung, d. h. lokale Position und Lage der Kamera während der Aufnahme in Relation zum aufgenommenen Objekt und (3) Verzeichnungscharakteristika des Objektivs (Mett, 2015).

Um die Genauigkeit der 3D-Rekonstruktion zu erhöhen können die Messkameras kalibriert werden, indem (1) und (3) in einem optischen Labor bestimmt werden. Die kalibrierten Kameraparameter fließen den o.g. Softwares für die 3D-Rekonstruktion zu. Die absolute Orientierung der 3D-Modelle, d.h. deren Verortung in ein übergeordnetes Koordinatensystem (=Georeferenzierung), geschieht abschließend mit Hilfe von

Passpunkten (Kalisch, 2009). Hierbei wird auf das 3D-Modell eine Rotation, Translation und Skalierung angewandt. Auf Basis der Georeferenzierung erlangen auch die einzelnen errechneten Bildpositionen globale Koordinaten.

Je nach verwendeter Prozessierungssoftware resultieren die 3D-Daten in Punktwolken und/oder Gitternetzmodellen. Punktwolken bestehen aus Einzelpunkten mit X-, Y- und Z-Koordinaten, denen zumeist RGB-Farbwerte zugeordnet sind. Gängige Formate sind z.B. LAS, ASCII, PLY oder e57. Gitternetzmodelle sind hingegen aus Netzelementen aufgebaut denen eine Fototextur als zusätzliche Information beigelegt ist.

## 1.2 Videogrammetrie

Videogrammetrische Messsysteme erfassen das Objekt nicht mit räumlich / (zeitlich) unterschiedlichen Einzelaufnahmen, sondern in Form einer (konstanten) Videoaufnahme. Dabei bewegt sich die Aufnahmeeinheit relativ zur aufzunehmenden Oberfläche. Aus dem Video werden einzelne Foto-Frames extrahiert, die im Anschluss photogrammetrisch ausgewertet werden. Die derzeit eingesetzten Videokameras besitzen eine geringere Pixel-Auflösung als gängige Fotokameras. So können in HD (High Definition) 1280 × 720 Pixel, in Full-HD 1920 × 1080 Pixel und in Ultra-HD (4K) 3840 × 2160 Pixel aufgenommen werden. Aufgrund der Aufnahmefrequenzen zwischen >100 (HD) und 30 Bildern pro Sekunde in 4K (GoPro5, 2020) werden hohe Bildüberlappungen erreicht, die eine detaillierte 3D-Rekonstruktion ermöglichen.

Neben vereinzelt Anwendungen in der 3D-Rekonstruktion von Kulturdenkmälern (Torresani & Remondino, 2019) und der Geländeaufnahme durch Drohnen, zeigt die Videogrammetrie insbesondere bei der Vermessung von TBM Ortsbrüsten Potential (s. 2.4).

## **2. Photogrammetrische Methoden für geologisch- / geotechnische Untersuchungen**

### 2.1 Terrestrische Photogrammetrie

Die terrestrische, d.h. vom Boden ausgeführte, Photogrammetrie eignet sich besonders für Objekte mit einer wenig komplexen Geometrie, die umfänglich vom Aufnahmestandort einzusehen sind (Abb.02). Wie auch beim Laserscannen entstehen Datenlücken prinzipiell dort im 3D-Modell, wo der Sensor die zu messende Oberfläche nicht direkt einsehen kann, bzw. die Aufnahme in einem flachen Winkel zur Oberfläche erfolgt.



**Abb. 02:** Screenshot vom Ausschnitt eines 3D-Modells einer terrestrisch aufgenommenen Kiesgrube mit naturgetreuer Fototextur (die untere Seite misst etwa 40 m Länge). Es sind fluvatile Ablagerungsstrukturen zu erkennen, die in ihrer Mächtigkeit und Raumlage aus dem Modell herausgemessen werden können.

## 2.2 Photogrammetrie im zyklischen Tunnelbau

Im Tunnelneubau sind photogrammetrische Messsysteme vor allem aufgrund der rauen Betriebsbedingungen mit Schmutz, Feuchtigkeit, Staub und Aerosolen kaum vertreten. Es werden standardmäßig Laserscanner für die Vermessung von Ortsbrüsten und Laibungen eingesetzt. Diese generieren Graustufen-(Intensitäts)-Modelle der Oberfläche und sind daher nur eingeschränkt für die visuelle geologische Auswertung verwendbar. Die Dibit Messtechnik GmbH hat mit dem „Handheld“ ein robustes, auf die o.g. Bedingungen optimiertes photogrammetrisches Messsystem für den Tunnelneubau entwickelt (Abb. 03).

Als monoskopisches System enthält es eine einzelne hochauflösende Digitalkamera. Das Fischaugenobjektiv ermöglicht die Aufnahme großer Oberflächenbereiche um die Anzahl der Fotos (und damit die Aufnahmezeit) auf ein Minimum zu reduzieren. Das autark agierende, in einem robusten Aluminiumgehäuse verbaute System wird bei der Aufnahme vor Ort auf einem Stativ befestigt (Dibit, 2020). Während der Messung wird die Blickrichtung der Kamera von einer motorisierten Einheit gedreht. Es werden insgesamt 8 (oder 6 Fotos) für die photogrammetrische Rekonstruktion der Tunnellaibung benötigt (Eder et al., 2019). Für die zusätzliche Erfassung der Ortsbrust werden 2 weitere Fotos erstellt.

Die Prozessierung der Fotos und die Georeferenzierung der 3D-Modelle geschehen in der Software Dibit. Mit dem Handheld sind farbechte, hochauflösende 3D-Modelle mit einer Bildauflösung von 1 mm und einer geometrischen Genauigkeit von +/- 5 mm zu erstellen (Abb. 04). Die Aufnahmedauer beträgt maximal 2 min, wodurch der Baubetrieb nur sehr geringfügig beeinträchtigt wird.



**Abb. 03:** Handheld Tunnelscanner.



**Abb. 04:** 3D-Ortsbrustmodell aus Handheld-Scan.

## 2.3 Photogrammetrie - Drohne / UAV

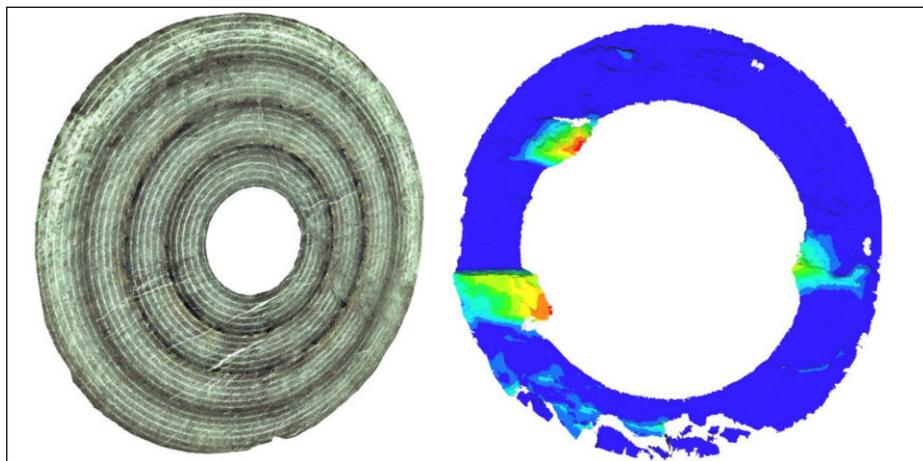
Die luftbasierte Photogrammetrie mittels Drohnen bzw. UAVs (Unmanned Aerial Vehicles) ist zu einem etablierten und sehr vielseitig einsetzbaren Instrument im Vermessungswesen und bei der Bearbeitung geotechnischer Fragestellungen geworden. Der Vorteil von UAVs liegt vor allem darin, große und geometrisch komplexe Objekte mit einem geringen zeitlichen, personellen und finanziellen Aufwand vermessen zu können. Dabei lassen sich hohe geometrische Auflösungen, Genauigkeiten und zeitliche Wiederholraten bei den Messungen erreichen. Bei flächigen Vermessungen mit relativ geringen

Höhenunterschieden (z.B. Schütthalden, Baustellen, etc.) können UAVs mittels spezieller Softwares zur Drohnenflugplanung automatisch betrieben werden.

Bei den Softwares werden die Flugbereiche, Flughöhen und gewünschten Bildüberlappungen vorgegeben. Flug und Fotoerstellung geschehen daraufhin automatisch auf einer rasterförmigen, streckenoptimierten Bahn über dem Objekt. Bei Objekten mit hoher vertikaler Erstreckung und bei geometrisch komplexen, schwer einsehbaren Körpern muss der UAV-Pilot manuell fliegen. Dabei obliegt es seiner Erfahrung, die richtigen Abstände zum Objekt und damit resultierenden Bildüberlappungen zu wählen. Je nach Fluggebiet, Art des UAV und max. Flughöhe sind entsprechende Flugerlaubnisse bei den zuständigen Flugbehörden einzuholen.

#### 2.4 Videogrammetrie für den TBM Vortrieb

Die Firma 3GSM (Graz, Österreich) besitzt mit ShapeMetriX TBM ein System zur 3D-Dokumentation von Ortsbrüsten bei Vortrieben im Hartgestein mit einer TBM (Tunnel Bohr Maschine). Die Aufnahmeeinheit basiert im Wesentlichen auf der Kamera GoPro 5 (3GSM, 2020a) in Kombination mit einer aktiven Ausleuchtung der Ortsbrust. Das System wird in ein Mannloch der TBM eingespannt und nimmt während einer 360 Grad Drehung des Schneidkopfes die Ortsbrust auf (3GSM, 2020b). Dazu muss die TBM von der Ortsbrust zurückgefahren werden, was zumeist während der Wartungsschicht geschieht. Aufgrund des geringen Abstands zwischen Aufnahmeeinheit und Ortsbrust kann nicht die gesamte Fläche der Ortsbrust erfasst werden. Es entstehen ringförmige 3D Bilder (Abb. 05). Beim Vorhandensein mehrerer Mannlöcher können die aufnehmbaren Bereiche entsprechend ausgeweitet werden.



**Abb. 05:** Ringförmige 3D-Aufnahmen einer TBM Ortsbrust (3GSM, 2020b). Links: Zusammengefügtes 3D-Modell mit Fototextur. Rechts: Falschfarbendarstellung von geologisch bedingten Ausbrüchen (3GSM, 2020b).

### **3. Softwares zur Analyse geologisch relevanter Geometrieausprägungen**

Auf dem Markt befinden sich diverse Softwareprodukte, mit denen geologische Gefüge analysiert werden können. Im Folgenden ist eine beschränkte Auswahl an gängigen Produkten genannt:

### 3.1 Photogrammetrie-Softwares

Photogrammetrie-Softwares wie Pix4D, Photomodeler und Agisoft Metashape berechnen vorrangig aus Einzelfotos, wie in 1.1 beschrieben, 3D-Modelle in Form von Punktwolken und (texturierten) Gitternetzmodellen. Sie bieten zusätzlich im geringen Umfang die Möglichkeiten zur Berechnung von geometrischen Eigenschaften, wie die Koordinaten von Einzelpunkten (X, Y, Z), Längen, Flächen und Volumen.

*Beurteilung:* Messung von Eingangsparametern für weitergehende Gefügeuntersuchungen (z.B. Erstellung von Stereoplots, s. 4.1). Einfache Strecken-, Volumen- und Flächenabschätzungen. Beschränkte Eignung für Ingenieursanwendungen.

### 3.2 Dibit

Die Software „Dibit“ der Firma Dibit Messtechnik GmbH ist eine Spezialsoftware für linienhafte (röhrenförmige) Bauwerke, besonders für den Tunnelbau und weitere Ingenieursanwendungen. Die photogrammetrische Prozessierungs- und Analysesoftware besitzt einen leistungsfähigen 3D-Viewer für die Darstellung (praktisch unendlich langer) Bauwerke und großer Punktwolken. Die Software besitzt umfangreiche Möglichkeiten zur Messung geometrischer Eigenschaften (Profilkontrolle, Schadstellen, Lichtraumanalyse, etc.) und geologischer Merkmale (Einfallen von Trennflächen, Kubaturen, etc.). Die vermessenen und annotierten Details werden in der zentralen Datenbank TIS (Tunnel Information System) strukturiert erfasst und für die weitere Verwendung in Ingenieursoftwares (CAD, GIS, BIM) bereitgestellt (Mett et al., 2019). Darüber hinaus sind Analyseergebnisse in Form von Falschfarbendarstellungen, annotierten (Orthophoto)-Plots, etc. auszuspielen und eine Betrachtung hochauflösender 3D-Modelle in Virtual Reality möglich.

*Beurteilung:* Umfängliche Möglichkeiten zur präzisen Analyse von geologischen Merkmalen für Ingenieursanwendungen.

### 3.3 CloudCompare

Die Freeware CloudCompare ist eine Darstellungs- und Analysesoftware für unterschiedliche 3D-Datenformate. Sie ist konzipiert für den Umgang mit großen Punktwolken (bis zu mehreren 100 Millionen Punkten), speziell für den geometrischen Vergleich von Punktwolken zueinander. Die open source Software besitzt eine Fülle von Plugins, die Toolsets für geologische Untersuchungen enthalten. Unter den Funktionen befinden sich Punkt-, Linien- und Flächenmessungen, sowie virtuelle Kompass zur Ermittlung der Orientierung geologischer Flächen im Raum. Mit den „Facets“-Tools ist eine leistungsfähige Methode zur Segmentierung und statistischen Analyse von Flächenlagen gegeben, deren Ergebnisse auch in Form von Stereoplots ausgegeben werden können.

*Beurteilung:* Unkomplizierte Auswertung geologischer Trennflächen. Beschränkte Eignung für Ingenieursanwendungen. Da CloudCompare eine open source Software ist, ist sie nicht für den kommerziellen Gebrauch bestimmt.

### 3.4 CAD-Softwares

Gängige CAD-Softwares wie AutoCAD, SketchUP, Rhinoceros und ArchiCAD können zumeist Punktwolken und/ oder Gitternetzmodelle mit einer überschaubaren Größe (zumeist wenige tausend Punkte, bzw. Netzelemente) handhaben. Zu den Analysemöglichkeiten zählen die Ableitung von Profilen, Raumschnitten, Höhenschichtlinien, etc. und die präzise Berechnung von Flächen und Volumen. Weiterhin können geometrische Details vermessen, bzw. als skalierte Raumelemente gezeichnet werden. Die Softwares sind nicht darauf optimiert, die 3D-Modelle performant zu visualisieren und zu annotieren.

*Beurteilung:* Bereitstellung von präzisen Messungen und Zeichnungen für Bauingenieursanwendungen. Eingeschränkte Möglichkeiten zur 3D-Visualisierung.

### 3.5 GIS-Softwares

GIS-Softwares wie ArcGIS, AutoCAD Map3D, QGIS und SAGA GIS sind für die Analyse unterschiedlichster Fernerkundungs- und Geodaten konzipiert. Sie benutzen umfangreiche Toolsets zur Kartierung, Messung und Visualisierung geometrischer und thematischer Informationen. Die Bedienung der Programme benötigt zumeist ausgewiesener Fachkenntnisse, wobei die Ergebnisse sehr spezifisch editierbar und aussagekräftig darstellbar sind.

*Beurteilung:* Präzise und universell gestaltbare Möglichkeiten für 3D-Messungen und deren Ergebnisdarstellungen. Eingeschränkte Möglichkeiten zur 3D-Visualisierung.

## **4. Gefügemessungen aus 3D-Modellen**

### 4.1 Messung von geologischen Trennflächen und Linearen

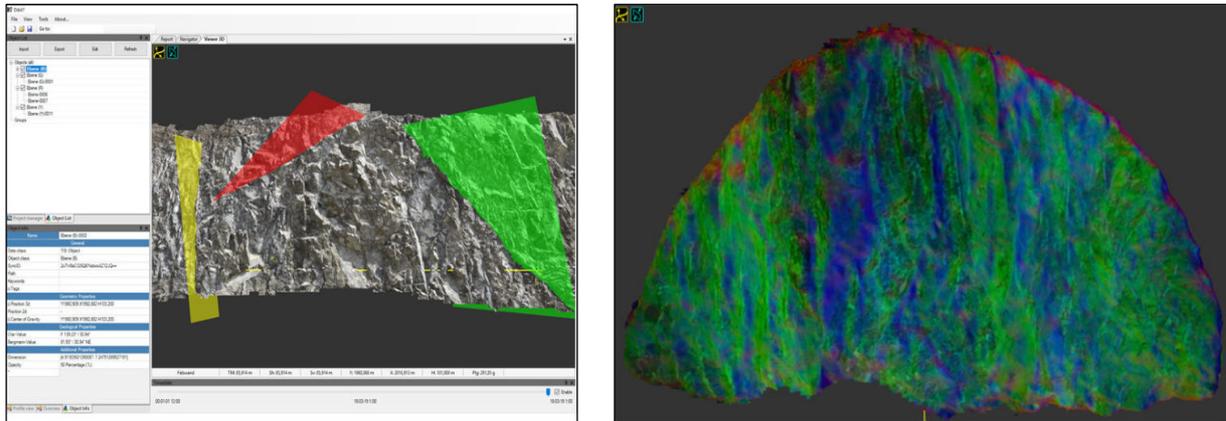
*Geologische Trennflächen* umfassen Klufflächen ( $K$ ), Störungsflächen ( $S_t$ ), Schichtflächen ( $S_s$ ) und Schieferungsflächen ( $S_f$ ). Sind diese eindeutig in der Geometrie eines 3D-Modells identifizierbar, so sind diese auch mit den vorher beschriebenen Softwares auszumessen. Dafür müssen die vorhandenen Punkte der Punktwolke eine Ebene bilden, auf der man Punkte manuell definieren kann, um eine „Messfläche“ aufzuspannen, auf deren Basis Streich- und Fallwerte berechnet werden.

*Geologische Lineare* beinhalten z.B. Faltenachsen, Verschnittlineare, Scherungslinien, Gleitstriemen und sedimentäre Strömungsmarken. Bei einem vorteilhaften Ausstreichen dieser Strukturen an der Gebirgsoberfläche und einer genügenden Identifizierbarkeit im 3D-Modell können sie durch Definieren einer Geraden (= Achse) eingemessen werden.

Ein Einmessen der o.g. Gefüge ermöglicht die Software Dibat (s. 3.2) in Punktwolken und texturierten 3D-Modellen (Abb. 06). Dafür werden manuell auf der zu messenden Oberfläche mehrere Punkte definiert (mindestens 3), zwischen denen eine Messfläche aufgespannt wird. Lineare sind durch das Definieren eines Linien-Polygons durch Anklicken eines Anfangs- und Endpunktes zu berechnen. Die gelabelten und klassifizierten Messergebnisse sind auszuspielen, bzw. virtuell zu betrachten (3D-Viewer, VR-Brillen).

Im Dibat-Viewer kann weiterhin die Richtung des Einfallens mit Hilfe von Falschfarbendarstellungen kenntlich verdeutlicht werden. Flächen gleicher Farben geben dem bearbeitenden Geologen anschauliche

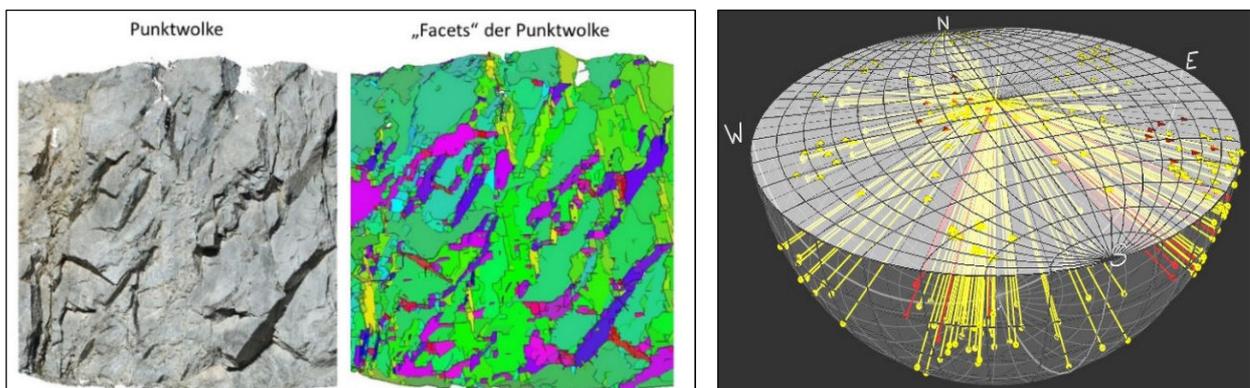
Informationen zu vorherrschenden Trennflächengefügen, z.B. dominanten Kluft- oder Harnischfläschen. Eine Beurteilung und Annotierung der Trennflächen kann im virtuellen Raum erfolgen (Abb. 07).



**Abb. 06:** Links. Auswertung von Kluftflächen ( $K_1$ - $K_3$ ) in einem terrestrisch vermessenen 3D-Modell (s. 2.1) mit der Software DIBIT (s. 3.2). Die farbigen Messflächen entsprechen einer spezifischen Kluft-Klasse. Sie wurden durch das manuelle Anwählen mehrerer Oberflächenpunkte aufgespannt. Die Streich-/Fallwerte jeder einzelnen Messung können aus der zentralen Datenbank exportiert werden und als Eingangsgrößen bei Stereoplots verwendet werden. **Abb. 07:** Rechts. Visualisierung von Flächenorientierungen am Beispiel einer Ortsbrust in der Software DIBIT. Die Falschfarbendarstellungen basieren auf der Lage der Normalen der Flächen. Die blauen Flächen fallen nach Nordosten, wohingegen die grünen Flächen etwa nach Südosten ausgerichtet sind.

Die Software CloudCompare (s. 3.3) ist mit einem Kompass-Tool ausgestattet. Mit diesem werden per Mausklick Messflächen auf den einzumessenden Strukturen generiert und deren Raumwerte ermittelt. Die Größe der Messflächen ist variabel anpassbar. Lineationen können ebenso leicht durch zwei Punkte oder das linienhafte Nachfahren von Strukturen vermessen werden.

Ein Haupt-Funktionalität der Software ist die automatische Ermittlung und Abgrenzung von Flächen mit ähnlicher Raumlage. Das Tool „detect planar facets“ basiert auf den Flächennormalen des 3D-Modells (Dewez et al., 2016). Mit Filtern können diese sog. „Facetten“, eingegrenzt auf gewünschte Raumlagenbereiche, visualisiert, exportiert und in Form von Stereoplots analysiert werden (Abb. 08, 09).



**Abb. 08:** Links. Analyse eines 3D-Modells mit der „Facets“-Funktion von CloudCompare (s. 3.3). **Abb. 09:** Rechts. Darstellung der Trennflächenorientierungen der Facets in Form eines Stereoplots aus der Software „Stereonet“.

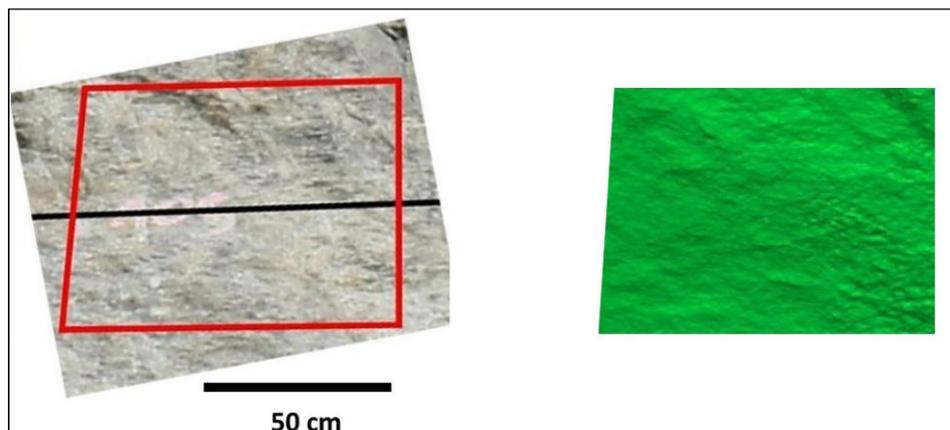
#### 4.2 Mächtigkeiten und weitere Entfernungsmessungen

Die Messung von Distanzen aus 3D-Modellen kann für eine Vielzahl geologischer Untersuchungen wertvolle Informationen liefern. Zu den Messgrößen zählen u.a. Mächtigkeiten (Gesteinsschichten, Bankungen, Ablagerungsstrukturen) und Entfernungsbeträge (Öffnungsweiten von Klüften, Versatzbeträge bei Verwerfungen, u.v.m.). Die Messungen sind zumeist durch Klicken von zwei Punkten durchzuführen, zwischen denen der Abstand im skalierten 3D-Modell berechnet wird. Werden X, Y und Z-Koordinaten von Einzelpunkten bestimmt, so sind die Entfernungen mit geeigneten Koordinatentransformationen zu berechnen.

#### 4.3 Rauigkeiten

Die Oberflächenrauigkeit beschreibt den Grad der Unregelmäßigkeit auf einer geologischen Trennfläche, der die Scherfestigkeit und Durchlässigkeit eines Gesteins charakterisiert (Fernandez-Steeger, 2011). Die Quantifizierung der Oberflächenrauigkeit ist ein wichtiges Werkzeug in der Geologie. Sie hilft bei der Analyse der Gesteinsstabilität, der Wasserdurchlässigkeit, der Entwicklung des Kluftwasserdrucks und des Verwitterungsverhaltens des Gesteins (Steinkühler, 2019). Für die Beurteilung von Störungsaktivitäten in paläoseismologischen Untersuchungen oder die Beurteilung der seismischen Gefährdung können das Verwitterungsverhalten und der Verwitterungszustand von Oberflächen wichtige Informationen über den Exhumierungsgrad aktiver Störungen liefern. Die Rauigkeitscharakterisierung dient direkt der Bewertung der geologischen Gefährdung.

Hochauflösende 3D-Modelle werden verwendet, um Oberflächenrauigkeiten mittels geschlossenen 3D-Meshes zu rekonstruieren. Rauigkeitsanalysen basierend auf photogrammetrischen 3D-Modellen liefern die genauesten Ergebnisse, wenn die Distanz zwischen Kamera und Oberfläche während der Aufnahme so gering wie möglich ist (Steinkühler, 2019). Die Rauigkeitsgenauigkeiten von 3D-Modellen können bis in den mm-Bereich reichen. Softwares wie CloudCompare bieten die Möglichkeit aus hochauflösenden 3D-Punktwolken dichte Meshes zu erzeugen aus denen man qualifizierte Aussagen bezüglich Oberflächenbeschaffenheiten treffen kann (Abb. 10).



**Abb.10:** Links: Referenzoberfläche zur Rauigkeitsbestimmung im Rahmen der Masterarbeit von Steinkühler (2019). Rechts: 3-D Punktwolke zur Ableitung der Oberflächenrauheit, prozessiert in CloudCompare. Die grüne Fläche ist äquivalent zum roten Rahmen im Foto links.

#### 4.4 Messgenauigkeiten:

Bei den zuvor genannten Methoden erreichen die Messgenauigkeiten für Flächenorientierungen  $< 10$  Grad für Streich- und Fallwinkel. Dies zeigten vergleichende Untersuchungen zwischen händischen Messungen (Ground Truth per Geologenkompass), photogrammetrischen- und LiDAR-basierten 3D-Modellen (Steinkühler, 2019).

Geometrische Genauigkeiten von Punktmessungen können mit bis zu 2 mm veranschlagt werden (Steinkühler, 2019). Somit sind bei der Messung von Weiten und Entfernungen (Schichtmächtigkeiten, Kluftöffnungsweiten, Versätze) Genauigkeiten von  $< 10$  mm zu erreichen.

### **5. Resümee**

Photogrammetrische Messverfahren haben sich in den letzten Jahren stark weiterentwickelt und erweisen sich (bei geeigneten Aufnahmebedingungen) in Punkto Messgenauigkeit als ebenbürtig zu den etablierten Laserscan-Verfahren. Aufgrund der technischen Schlichtheit und Unempfindlichkeit kann die Photogrammetrie vielseitig, schnell und kostengünstig als flächenhaftes Messverfahren eingesetzt werden.

Photogrammetrische 3D-Modelle mit Fototextur ermöglichen eine geologische Kartierung und permanente Dokumentation der Gebirgsverhältnisse. Damit ist eine Auswertung der Trennflächen ungebunden von Ort und Zeit vom Bestehen des Aufschlusses möglich und somit auch eine retrospektive Betrachtung und ggf. (Neu-)Beurteilung von geologischen Auswertungen. Ein fundiertes Vor-Ort-Wissen eines Geologen (= ground truth) ist für die Erhebung und Interpretation der Ergebnisse jedoch obligatorisch und unersetzbar.

Zum heutigen Stand der Technik kann bereits eine Vielzahl von geologischen Trennflächenparametern aus photogrammetrisch gewonnenen 3D-Modellen abgeleitet werden. Mit einer sich rasant weiterentwickelnden Kamera- und Softwaretechnik ist davon auszugehen, dass zukünftig höher auflösende geometrische Informationen mit einem geringeren Analyseaufwand zur Verfügung stehen werden.

### **6. Literaturquellen**

3GSM (2020a): Zweite Generation von TBM-Kameras eingeführt! 3GSM Information02.06.2017. [https://3gsm.at/wp-content/uploads/2017/06/3GSM\\_TBM\\_Camera\\_2017\\_de.pdf](https://3gsm.at/wp-content/uploads/2017/06/3GSM_TBM_Camera_2017_de.pdf). Abgerufen: 19.06.2020.

3GSM (2020b): 3D Bilder für TBM Vortriebe. <https://3gsm.at/de/produkte/shape-matrix-tbm/>. Abgerufen: 03.07.2020.

Dewez, T., Girardeau-Montaut, D., Allanic, C., Rohmer, J. (2016): FACETS: A CLOUDCOMPARE PLUGIN TO EXTRACT GEOLOGICAL PLANES FROM UNSTRUCTURED 3D POINT CLOUDS. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLI-B5, 2016 XXIII ISPRS Congress, 12–19 July 2016. 799-804. Prague.

Dibit (2020): Dibit - Handheld System - Excavation Scan - On Site Scanning. Video: <https://www.dibit.at/videos/>. Abgerufen: 01.06.2020.

- Eder, S., Mett, M., Kontrus, H., Müller, N. (2019): Geological 3D analysis of tunnel faces performed using Dibit software and hardware tools. 10 S. Proceedings of the 14th International Conference on Shotcrete for Underground Support (ECI SUS XIV), Nong Nooch Gardens – Pattaya, November 17-20, 2019. Thailand.
- Fernandez-Steeger, T. M. (2011): Quantification of spatial joint roughness from LIDAR data, 18. Conference for Engineering Geology and Forum "Young Engineering Geologists", p. 1–7. Berlin.
- GoPro5 (2020): Hero 5 Black – Benutzerhandbuch. 95 S. 130-18420-000 REVD. [https://de.gopro.com/content/dam/help/hero5-black/manuals/HERO5Black\\_UM\\_DE\\_REVD\\_Web.pdf](https://de.gopro.com/content/dam/help/hero5-black/manuals/HERO5Black_UM_DE_REVD_Web.pdf).
- Kalisch, A. (2009): Ableitung und Analyse von Erosionsrinnen-Netzwerken aus digitalen Geländemodellen mittels großmaßstäbiger Photogrammetrie und GIS – Südwest-Marokko. 124 S. Diplomarbeit. Johann Wolfgang-Goethe-Universität Frankfurt. Institut für Physische Geographie. Frankfurt.
- Mett, M. (2015): Geo-Photogrammetrie - Verwendung photogrammetrischer Messmethoden in der Beurteilung von Georisiken im Wasserbau und der Forensik. Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen, Heft 55. 9 S. 17. JuWi-Treffen (26.-28.08.2015), Technische Universität Dresden – Fakultät Bauingenieurwesen, Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik, Dresden.
- Mett, M., Kontrus, H., Holzer, S. (2019): Dibit TIS - Das "Proto"-BIM für den Tunnelbau. 10 S. Tagungsband zur 20. Internationale Geodätische Woche Obergurgl 2019. Arbeitsbereich für Vermessung und GEOinformation, Leopold-Franzens-Universität Innsbruck. [https://www.uibk.ac.at/geometrie-vermessung/gruppe\\_vermessung\\_und\\_geoinformation/geodaetische\\_wochen/obergurgl\\_2019/beitraege/vo\\_mett.pdf](https://www.uibk.ac.at/geometrie-vermessung/gruppe_vermessung_und_geoinformation/geodaetische_wochen/obergurgl_2019/beitraege/vo_mett.pdf).
- Schindler, K. (2011): Einführung in die Photogrammetrie. Vorlesungsskriptum. ETH, Inst. f. Geodäsie und Photogrammetrie. <http://www.igp.ethz.ch/photogrammetry/education/lehrveranstaltungen/PhotogrammetryFS11/coursematerial/Photo-FS2011-02-intro.pdf>.
- Steinkühler, J. (2019): 3D point clouds: Comparison between terrestrial LiDAR and terrestrial & aerial photogrammetry. 101 S. Masterarbeit. Ruhr University of Bochum, Institute of Geology, Mineralogy and Geophysics, Structural Geology. Bochum.
- Torresani, A., Remondino, F. (2019): Videogrammetry vs. photogrammetry for heritage 3D reconstruction. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-2/W15, 2019. 27th CIPA International Symposium "Documenting the past for a better future", 1–5 September 2019. 1157-1162. Ávila.

## Seegeologische Untersuchungen im Fernsteinsee und Blindsee (Fernpass, Tirol)

Johanna Pöll (1), Patrick Oswald (1), Petra Nittel-Gärtner (2), Thomas Figl (2), Markus Aufleger (3) Markus Erhardt (4), Michael Strasser (1)

(1) Institut für Geologie, Universität Innsbruck

(2) Landesgeologie Tirol

(3) Arbeitsbereich Wasserbau, Institut für Infrastruktur, Universität Innsbruck,

(4) Departement Radiologie, Medizinisch Universität Innsbruck & Tirol Kliniken

### 1. Abstract

*In 2019, the sedimentary archives of Fernsteinsee and Blindsee were investigated for the first time using state-of-the-art limno-geological methods. The goal of this study was to use multibeam bathymetry and reflection seismic data, and ~ 1.5m long sediment cores from the lake sediments to get a better understanding of how and when the lakes formed and how they relate to the complex morphology of the Fernpass region. The new bathymetric data reveal the lake geomorphology to mimic the surrounding complex morphology. The deepest basin in the Fernsteinsee contains up to 6m sedimentary infill characterized by intercalated bodies typical for gravitational mass-movement deposits. Sediment cores that reached the top of a prominent Megaturbidite were macroscopically described and analyzed for their physical and chemical parameters, main components and dated at specific core position using <sup>14</sup>C dating. Strikingly, both lakes have a very similar evolution. At the base of the cores, clastic turbidites date to ~4100cal yr BP and likely link to the Fernpass rock slide event described in scientific literature. Yet, seismic stratigraphy below the cored and dated event-deposit linked to this Fernpass rock slide, may suggest (i) potential older lacustrine stratigraphy, or, alternatively may record (ii) complex multiphase rockslide and landscape recovery processes. Future longcoring will recover and date this deeper succession to test for these two interpretations, as, in particular (i) would imply that the Fernpass morphology (at least for the Fernsteinsee) was not formed by the 4.1ka Fernpass rockslide, but might be much older and possible of different origin.*

### 2. Einleitung / Motivation

Seen stellen ein wichtiges Archiv dar, um einen Blick in die Vergangenheit zu erlangen. Es sind dynamische Systeme, die auf äußere Umwelteinflüsse reagieren und diese in ihren Sedimenten speichern. Sie stellen ein kontinuierliches, gut datierbares geologisches System dar, das Umwelteinflüsse sehr hochauflösend aufzeichnet, wodurch Seesedimente wichtige Rückschlüsse auf vergangene Umweltzustände und -veränderungen liefern (Strasser et al., 2013; Gilli et al., 2013).

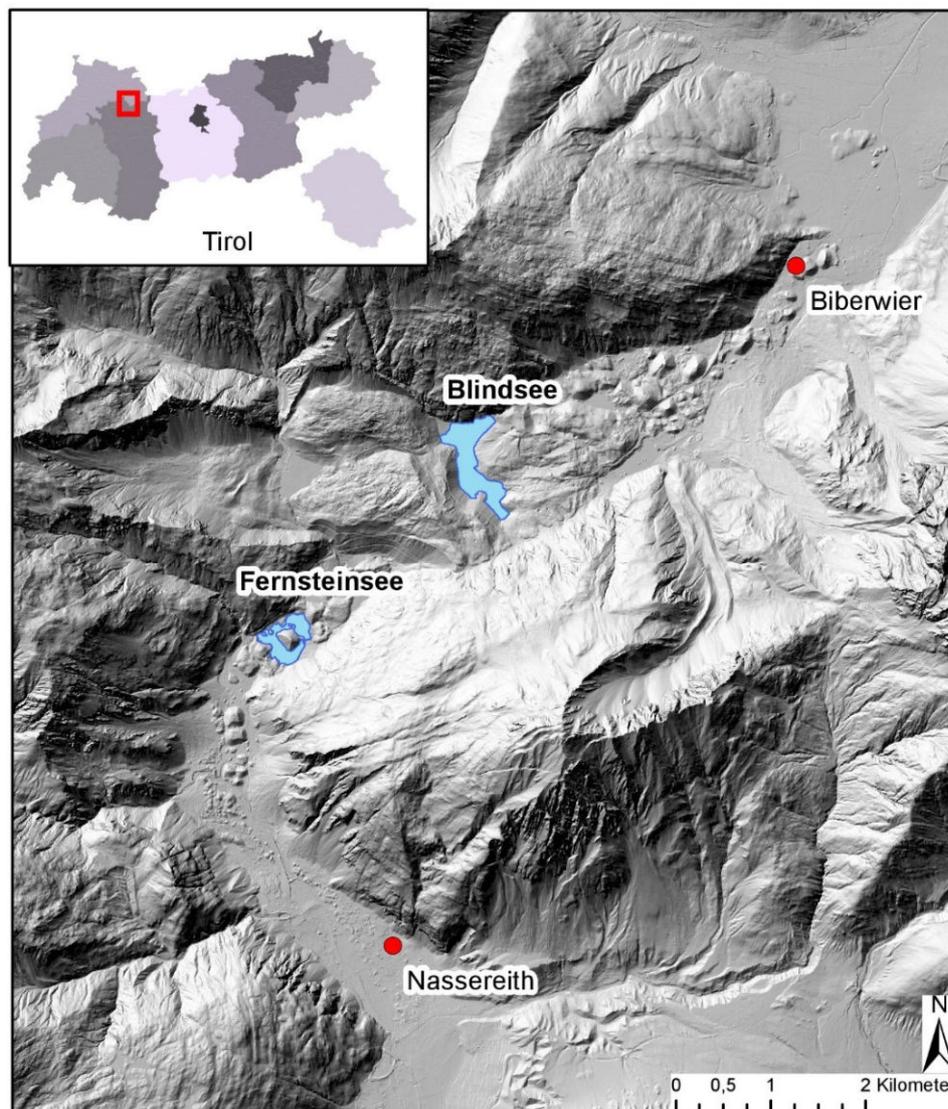
Die beiden größten Seen der Fernpass Region (Fernsteinsee und Blindsee) wurden erstmals in einem 2019 durchgeführten Projekt der Tiroler Landesgeologie in Kooperation mit der Universität Innsbruck limnogeologisch untersucht, mit dem Ziel den Seeuntergrund im Detail geomorphologisch und geologisch

zu charakterisieren, und um das Seearchiv zu nutzen, damit Rückschlüsse auf die Seentstehung und damit die Entstehung der außergewöhnlichen Morphologie am Fernpass nachverfolgbar sind.

Mit der neuen Seevermessung und Sedimentbohrkernanalyse-Infrastruktur an der Universität Innsbruck (vgl. Strasser et al., 2017) stehen neue moderne Untersuchungsmethoden zur Verfügung, welche solche Fragestellungen bearbeiten können.

## 2.1. Geographischer Überblick

Der Fernsteinsee (948 m ü.A.) und Blindsee (1092 m ü.A.) befinden sich in der Fernpass Region in den Tiroler Bezirken Reutte und Imst und stellen die zwei größten Seen dieser Region dar (siehe Abbildung 1). Nordöstlich der beiden Seen befindet sich die Ortschaft Biberwier und südlich liegt die Ortschaft Nassereith. Mit 22ha ist der Blindsee flächenmäßig größer als der Fernsteinsee mit 18,22ha. Der Fernsteinsee weist eine maximale Tiefe von 14m auf, der Blindsee hingegen hat eine maximale Tiefe von 23m.



**Abbildung 1:** Geographische Lage von Fernsteinsee und Blindsee in der Fernpass-Region. Datenquelle Schummerung des Digitalen Gelände Model Land Tirol ([data.tirol.gv.at](http://data.tirol.gv.at))

## 2.2. Geologisch-geomorphologische Übersicht

Die Fernpass Region befindet sich im westlichen Teil der Nördlichen Kalkalpen. Im Westen wird der Fernpass von den Lechtaler Alpen und im Osten von der Mieminger Kette begrenzt. Größtenteils ist die Region aus Hauptdolomit (Norium) aufgebaut, der eine Mächtigkeit bis zu 2000m erreichen kann. Die Seefeld Formation stellt die jüngere Abfolge (Oberes Norium) dar, die mit der Plattenkalk Formation (Oberes Norium) verzahnt. Darauf folgt die Kössen Formation, die dem Rhät zu zuordnen ist (Prager et al., 2009; Fruth und Scherreiks, 1975). Die Talflanken um den Blindsee und Fernsteinsee sind aus Hauptdolomit und Plattenkalk aufgebaut. Raibler Schichten im Liegenden des Hauptdolomit sind mit Ausnahme einer kleinen Linse südlich des Fernsteinsees im Untersuchungsgebiet nicht aufgeschlossen (Ostermann et al., 2007; GBA, 2009; Mostler 2013; GBA, 2016;).

Geomorphologisch gesehen, besitzt der Fernpass eine außergewöhnliche Morphologie mit Erdfallstrukturen und Toma-Hügeln, die im Norden bis ~Biberwier und im Süden bis ~Nassereith reichen. Zudem kommen längliche bis rundliche Depressionen vor, die teilweise durch Seen aufgefüllt wurden (Ostermann et al., 2007).

## 2.3. Stand der Wissenschaft im Forschungsgebiet

Bereits Abele (1974) und darin zitierte ältere Arbeiten beschrieben die Fernpassmorphologie im Detail und interpretierten sie als Folge eines möglichen Bergsturzereignisses. Ostermann et al. (2007) und Prager et al. (2009) befassten sich mit der Bergsturzhypothese und nutzen U-Th Isochronen Datierung an Aragonit Zement, welcher, deren Interpretation folgend, nach der Ablagerung des Bergsturzereignisses durch eine Wechselwirkung von Regenwasser und Gestein ausgefällt wurde. Datierungen der Zemente ergaben ein Alter von  $4150 \pm 100$  Jahren, was als Minimal Alter der Bergstürze interpretiert wurde. Prager et al. (2009) verwendet auch Expositionsalter Datierungen in der interpretierten Anrissfläche zum Eingrenzen eines maximal möglichen Alters eines Bergsturzereignisses. Alle Ergebnisse der unterschiedlichen Datierungsmethoden stimmen gut überein und weisen auf ein Subboreales Alter hin. Außerdem nutzen die Autoren die nun detailliert aufgenommenen morphologischen Feldkriterien, um frühere Annahmen bezüglich einer glazial geprägten Morphologie, zu dementieren. Die Autoren deuteten die charakteristische Morphologie (wie in 2.2. bereits erwähnt) als eine primäre Bergsturz Morphologie und nicht als eine glazial geprägte Landschaft (z.B. Moränen), wie ursprünglich oft angenommen wurde (Prager et al., 2009).

Die Arbeit von Mostler (2013) erforschte die Entstehung der außergewöhnlichen Morphologie des Fernpasses, allerdings nicht, wie von Ostermann et al. (2007) und Prager et al. (2009) angenommen, hinsichtlich des Bergsturzes, sondern bezüglich des Einflusses von Gipskarst. Mithilfe von Laserscans und Geländeaufnahmen konnten einige Dolinen/Erdfallstrukturen im Fernpass Gebiet festgestellt werden. Die Entstehung dieser auffälligen Strukturen ist auf Zerbrechungserscheinungen im Untergrund zurückzuführen. Grund für diese Prozesse sind Karsterscheinungen von Gipsen und Rauwacken der Raibler Schichten. Diese neuen Beobachtungen gaben Anlass die Morphologie der Fernpass Region und deren Entstehung zu überdenken. Es wurde angenommen, dass die bisher als Bergsturzablagerungen angesprochenen Körper als anstehendes Festgestein bzw. alte Talfüllung zu sehen sind.

Wolkersdorfer (2019) bezieht sich auf die oben beschriebene Arbeit von Mostler (2013). Der Autor verwendet drei verschiedene hydrogeologische Methoden, um die Hypothese von Mostler (2013) zu überprüfen. Es wurde angenommen, dass sich die Sulfatgesteine, die für die Zerbrechungserscheinungen verantwortlich sind, als hydrochemische Signaturen in Quell- und Oberflächenwässern nachweisen lassen. Es konnten allerdings keine von Gips oder Anhydrit gesättigten Werte gemessen werden. Dadurch postulierte der Autor, dass die Auflösung von Gips oder Anhydrit kein dominierender Prozess war und somit auch kein Gipskarst im engeren Sinne vorliegt, wodurch die Morphologie der Region nicht durch Gipskarst beeinflusst wurde.

Aus dem heutigen Stand der Wissenschaft im Forschungsgebiet geht somit nicht eindeutig hervor, welcher Prozess, bzw. welche Prozesskombinationen der ausgeprägten Fernpass Morphologie zu Grund liegt. Fokus des hier vorgestellten Projektes sind die Seen, welche integrativer Bestandteil dieser Landschaft sind, und deren Genese mit der Entstehung der Morphologie zusammenhängen dürfte. Daher untersuchten wir den Seeuntergrund mit modernen limnogeologischen Methoden, um aus der Seebodenmorphologie, der Sedimentationsabfolge in den Seen und im Idealfall von Sediment und/oder Gesteinsproben unterhalb der Seebasis, Rückschlüsse auf die Seeentstehung und damit die Entstehung der außergewöhnlichen Morphologie am Fernpass ziehen zu können.

### **3. Methoden**

#### **3.1. Feldarbeit**

##### *Bathymetrie*

Hochauflösende bathymetrische Daten wurden mit einem Kongsberg GeoSwath Plus Echolot aufgezeichnet. Die aus dem vermessenen Tiefenmodell resultierende Seebodenkarte hat eine horizontale Auflösung von 1m und eine vertikale Auflösung von wenigen cm.

##### *Reflexionsseismik*

Für die reflexionsseismischen Vermessungen der Sedimenteinfüllung der Seen wurde ein 3.5kHz „subbottom profiler“ (Geopulse Pinger) verwendet, mit einer theoretischen vertikalen Auflösung von 10cm. Für die Umrechnung der Eindringtiefe der Reflexionsseismik (gemessen in Zweiweg-Laufzeit des seismischen Signals) in die Tiefe, wird eine konstante P-Wellen Ausbreitungsgeschwindigkeit von 1500m/s angenommen. Für die Visualisierung und Analyse der Daten wurde die Software IHS Kingdom verwendet. Weiterführende Erläuterungen zur Methodik sind z.B. bei Daxer et al., 2018 gegeben.

##### *Kurzkernentnahme*

Hierfür wurde ein Gravitationskerngerät verwendet, das mit einem zusätzlichen Gleithammer (~10kg) ausgerüstet ist. Damit war es möglich bis 1,4m lange Sedimentproben zu entnehmen.

### **3.2. Laborarbeit**

#### *Multi-Sensor Core Logger (MSCL) der Firma Geotek*

Sedimentpetrophysikalische Messungen wurden an allen entnommenen Sedimentkernen mittels dem Multi-Sensor Core Logger durchgeführt. Das MSCL misst Parameter wie Dichte, die magnetische Suszeptibilität und die P-Wellen Geschwindigkeit des Sediments. Weiterführende Erläuterungen sind z.B. bei Daxer et al., 2018 gegeben.

#### *Makroskopische Kernbeschreibung*

Die initiale Kernbeschreibung wurde anhand des Klassifikationsschemas von Schnurrenberger et al., 2003 durchgeführt. Für die Bestimmung der Sedimentfarbe wurde die „Munsell Soil Color Chart“, sowie mikroskopische Beschreibung von Smear Slides verwendet. Die Sedimente wurden hinsichtlich Farbe, Korngröße, makroskopische Organikreste, Lamination, lithologische Übergänge und anderen Auffälligkeiten beschrieben, charakterisiert und in Lithotypen untergliedert.

#### *Altersbestimmung mit <sup>14</sup>C-Methode*

Altersbestimmungen wurden an der ETH Zürich (Labor für Ionenphysik) an Makro-Pflanzenresten in jeweils drei Horizonten pro See durchgeführt. Dabei wurde darauf geachtet ausschließlich Landpflanzen in ungestörten/nicht remobilisierten Sediment zu datieren, um die Alter nicht zu verfälschen wie z.B. durch einen „Hartwasser-Effekt“ bei der Datierung von Wasserpflanzen. Die <sup>14</sup>C Alter wurden anhand der Intercal13 Kalibrationskurve kalibriert (Reimer et al., 2013) und werden in dieser Publikation als kalibrierte Jahre vor 1950 (cal yr BP) präsentiert. Diese Alter wurden dann als kontinuierliche Alter-Tiefe-Modell erstellt unter Verwendung von bayesischer Statistik mittels der Software Bacon (Blaauw & Christen, 2011).

#### *Computertomographie*

An der Medizinischen Universität Innsbruck wurden mit einem Siemens SOMATOM Definition AS computertomographische Messungen durchgeführt. Für die Visualisierung und Analyse der Daten wurde die Software VGSTUDIO und FIJI verwendet.

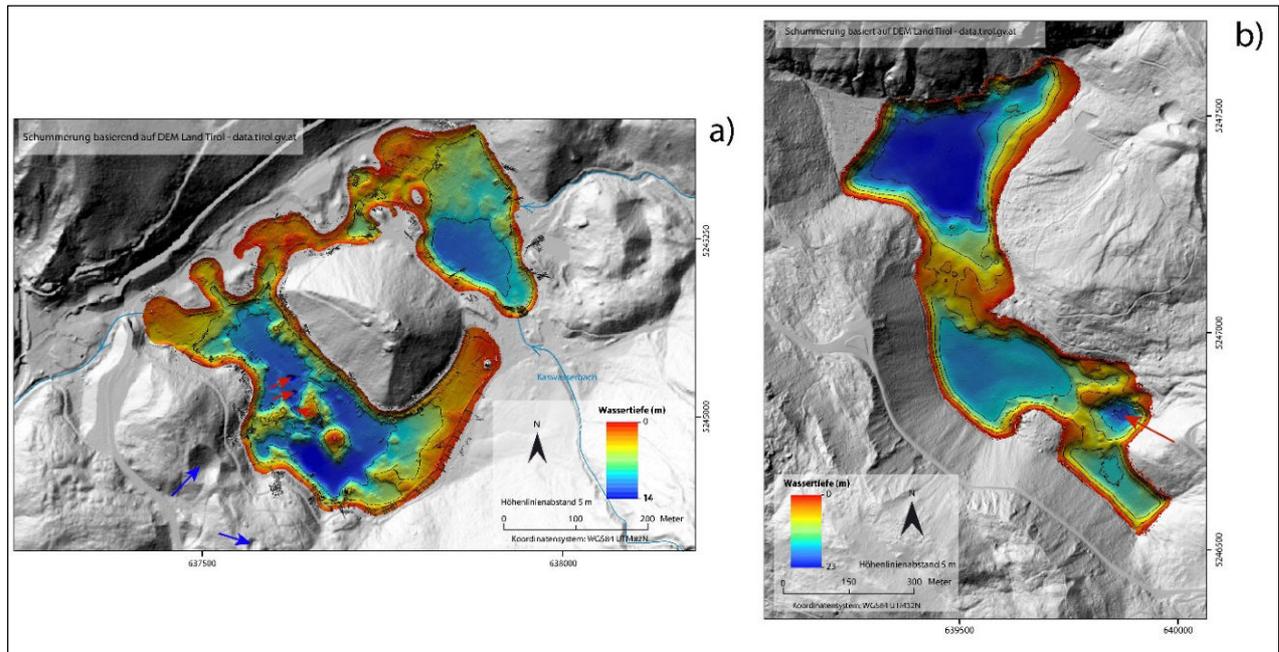
## **4. Resultate**

### **4.1. Seemorphologie**

An beiden Seen konnte erfolgreich die hochauflösende Bathymetrie vermessen werden (Abbildung 2). Der Fernsteinsee (Abbildung 2a) kann im Wesentlichen in zwei sehr unregelmäßige Becken (Ostbecken und Westbecken) gegliedert werden, die von einer seichten Hochzone im Nordwesten (< 5m Wassertiefe) getrennt sind. Im östlichen Teil hat der kleine Zufluss (Kaswasserbach) den See bereits aufgeschüttet, und mündet heute, wie auch ein weiterer kleiner Zufluss ins Nordostbecken. Im Westbecken unterteilen rundliche unterseeische Erhebungen von einigen 10-er Meter Durchmesser weitere kleinere Subbecken. Diese

Erhebungen reichen bis knapp unter die Wasseroberfläche (< 2m Tiefe) und kommen bei niedrigen Wasserständen als Inseln hervor.

Im Westbecken treten kegelförmige Depressionen im Seeboden auf (1-2m im Durchmesser, bis zu 1m tief; rote Pfeile in Abb. 2) mit ähnlichen Geometrien wie die südlich und südöstlich des Sees an Land erkennbaren morphologischen Depressionen (Blaue Pfeile in Abb. 2a)



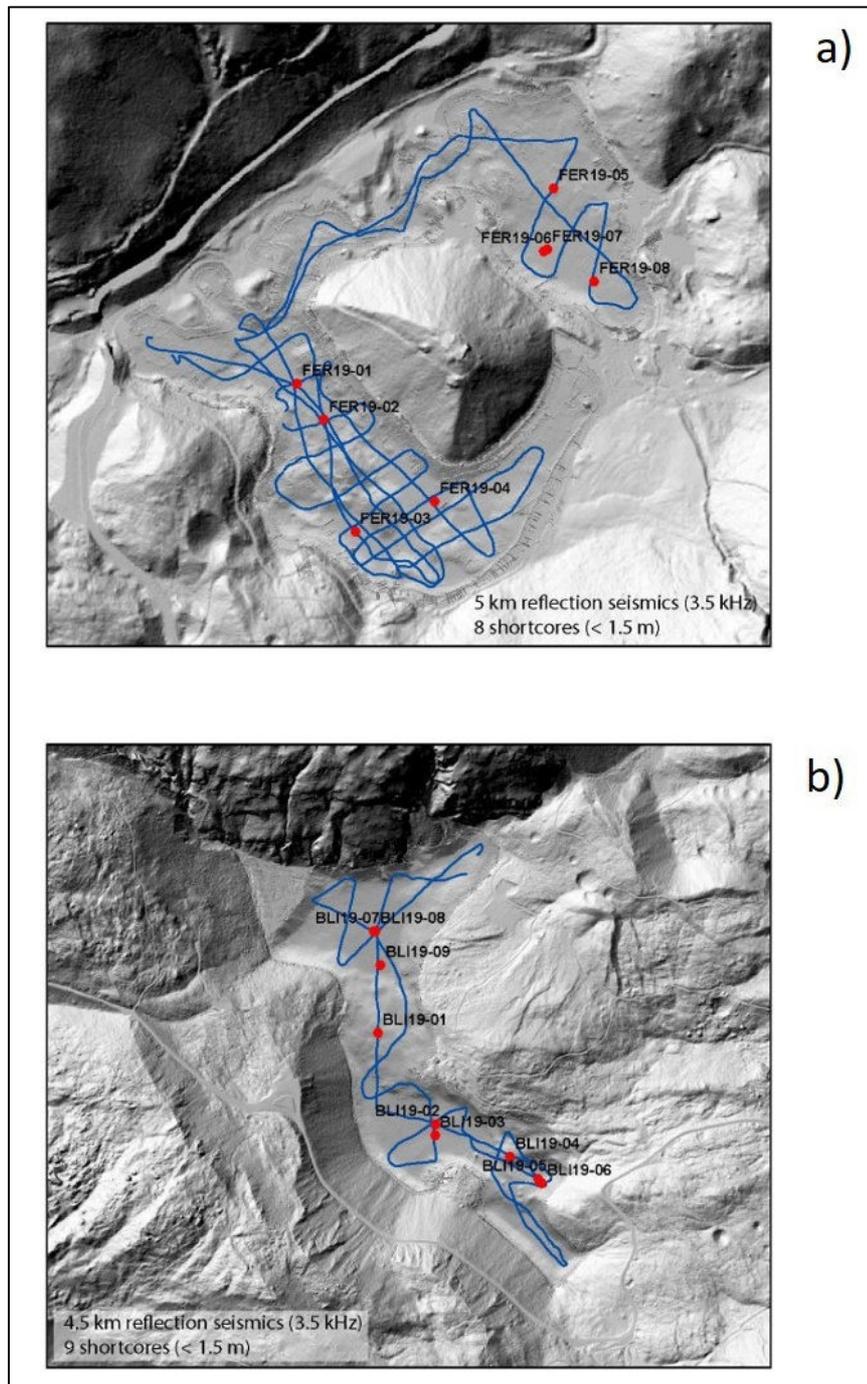
**Abbildung 2:** Bathymetrische Karten von Fernsteinsee (a) und Blindsee (b), eingebettet in die Schummerung des Digitalen Gelände Model Land Tirol (data.tirol.gv.at)

Der Blindsee kann anhand der Bathymetrischen Karte in 2 Hauptbecken unterteilt werden, die von einer seichteren Hochzonen (< 5m Wassertiefe) getrennt sind (Abbildung 2b). Im südöstlichsten Teil untergliedert sich das Südbecken in weitere Subbecken, wobei das mittlere einer rundlichen kegelförmigen Depressionen entspricht (roter Pfeil in Abbildung 2b). Die Uferlinien sind meist steil (> 15°). Im Norden wird die Uferlinie durch einen steilen felsdurchsetzten Hang aufgebaut.

Die subaquatische Geomorphologie der beiden bathymetrisch neu-vermessenen Fernpass-Seen zeigt somit die gleichen Charakteristiken wie die umliegende regionale Morphologie. Durch ein Fehlen von subaerischer Erosion und aufgrund einer langsamen subaquatischen Sedimentation bleiben die Strukturen über geologische Zeiträume gut erhalten.

#### 4.2. Seismik

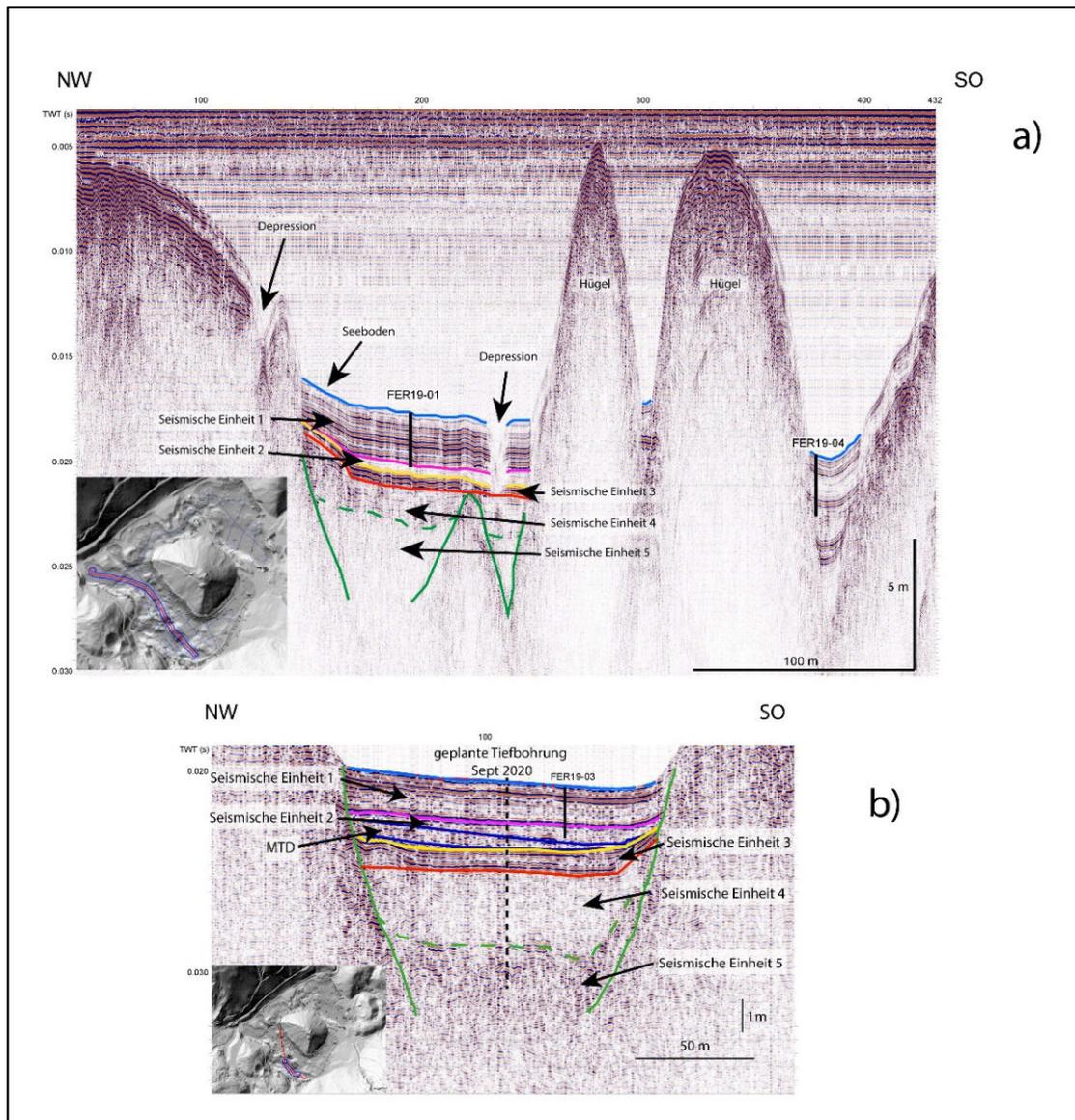
Um die sedimentäre Füllung der Seebecken durchleuchten zu können, wurde am Fernsteinsee eine 5km lange Reflexionsseismik gemessen und am Blindsee eine 4,5km lange Reflexionsseismik (siehe Abbildung 3). In den Bereichen, in denen eine gute seismische Penetration möglich war, wurde ein engmaschigeres Netz gemessen, um die sedimentäre Füllung räumlich bestmöglich abzubilden.



**Abbildung 3:** Spur der Reflexionsseismik und die Lokation der entnommenen Kerne für Fernsteinsee (a) und Blindsee (b) (Datenquelle, siehe Abbildung 2)

Beim Fernsteinsee konnte vorwiegend im Westbecken ein guter Einblick in die Sedimentfüllung gewonnen werden (siehe Abbildung 4a), während im Ostbecken keine seismische Penetration vorliegt, vermutlich aufgrund eines leicht erhöhten Gasgehalts im Sedimentporenraum, welcher durch die Zersetzung eingetragener Organik durch die Zuflüsse entstanden ist und zur Absorption der Schallwellenenergie führt („gas blanking“; z.B. Thot et al., 2014).

Im Westbecken liegt eine durchschnittliche seismische Eindringtiefe von 4 m vor, teilweise sogar bis zu 6 m. Dort wo das akustische Basement ersichtlich ist (grüner Horizont in Abbildung 4a), wird ebenfalls eine unregelmäßige Morphologie mit tiefen Depressionen (> 6m) und zusedimentierten Erhebungen ersichtlich. Die obersten 1-2m der Beckenfüllung sind durch parallel-geschichtete Ablagerungen charakterisiert (Seismische Einheit (SE) 1; Abbildung 4a). Die in Abbildung 4a beschriebenen Depressionen zeigen sich auch in der Seismik deutlich, und deren Genese scheint während der Ablagerung der obersten Einheit aktiv zu sein (z.B. Reusch et al., 2015).

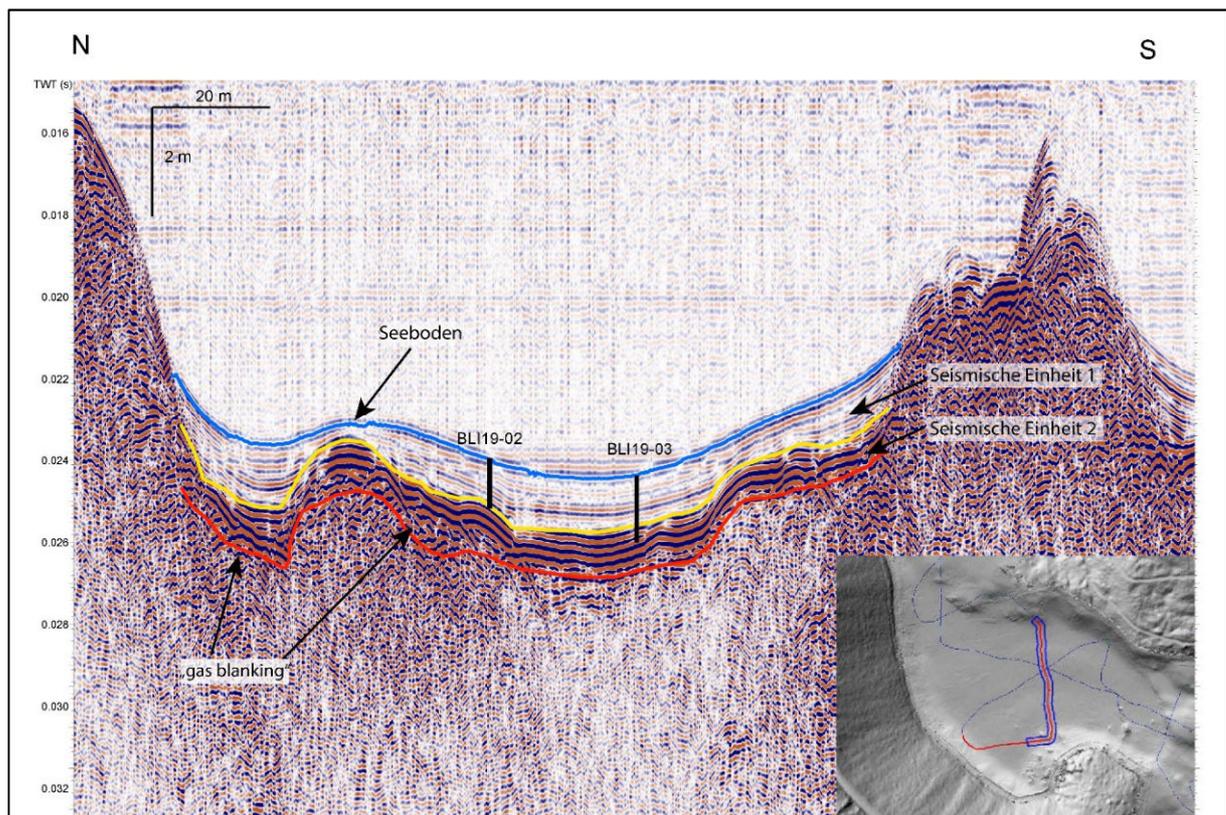


**Abbildung 4:** Reflexionsseismische Profile im Westbecken des Fernsteinsees (a), mit interpretierter seismischer Stratigraphie (siehe Text) und Lokation der Kurzkerne, sowie ein Detailausschnitt (b) mit der geplanten Tiefbohrung im September 2020.

Darunter bilden die reflexionsseismischen Daten einen ca. 0,5m mächtigen Körper (SE-2) ab, der intern geringere Amplituden (homogene akustische Fazies) und lateral onlaps an eine basale Reflexion erhöhter Amplitude aufweist. In der Literatur werden solche seismischen Einheiten als Megaturbidite bezeichnet und

repräsentieren die gravitative Ablagerung eines Trübestrom nach einem Massenbewegungsereignis (z.B. Sammartini et al., 2019). Im südwestlichsten Teil bilden die seismischen Daten auch einen solchen keilförmigen Massenbewegungskörper (mass-transport deposit (MTD)) mit intern-chaotischer akustischer Fazies ab (blauer MTD in Abbildung 4b). Darunter erscheint eine ca. 1m mächtige Einheit (SU3), welche wiederum durch parallel- bis teilweise diskontinuierliche Reflektionsmuster unterschiedlicher Amplituden charakterisiert ist. Die tieferliegende SU 4 ist eine mehr als 2 m mächtige reflexionsseismische Einheit, die durch sehr niedrige Amplituden und eher durch homogene akustische Eigenschaften charakterisiert ist, deren interne Geometrie kaum erkennbar ist. Die reflexionsseismischen Daten im tiefsten Südbecken bilden im untersten Abschnitt weitere, eher chaotische Reflexionen mit leicht erhöhter Amplitude ab (SU-5), welche nur schwer vom akustischen Basement abgrenzbar sind.

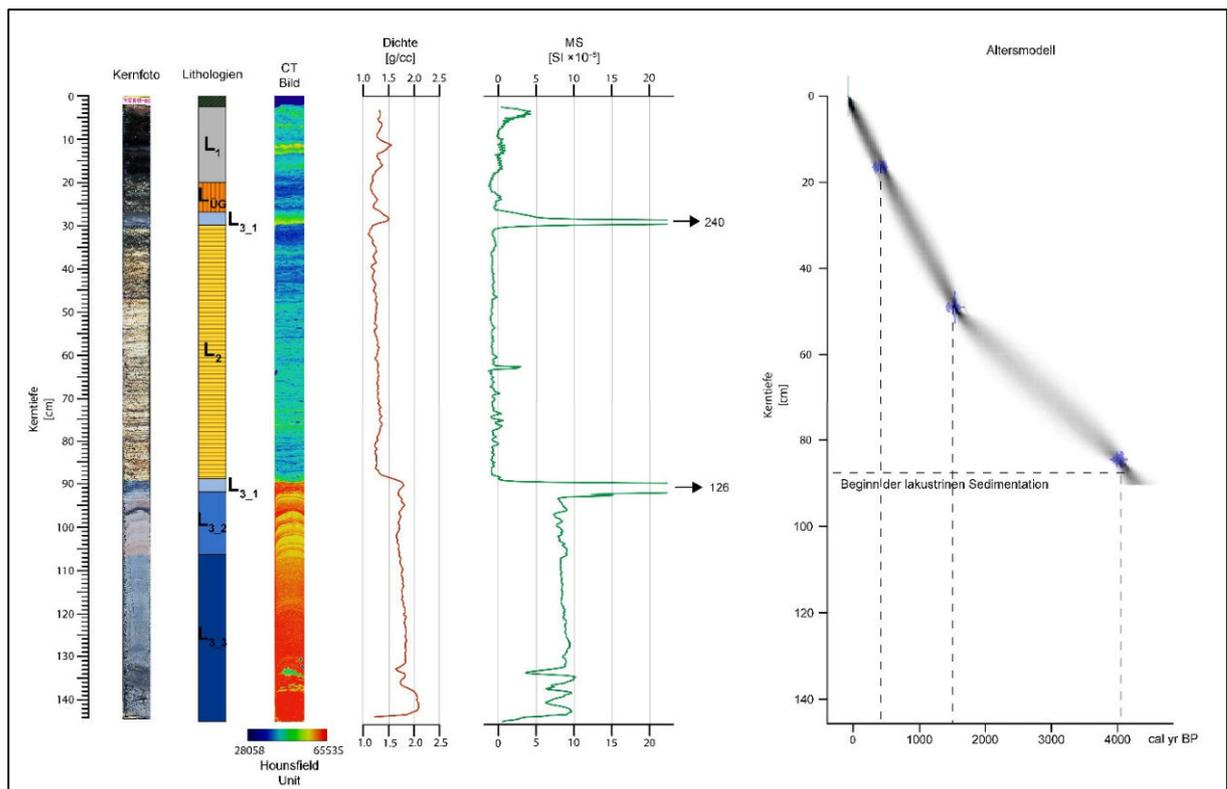
Beim Blindsee tritt auch wieder das Problem des erhöhten Gasgehaltes auf („gas blanking“), wodurch sich nur Eindringtiefen von etwa 1,5 m ergeben. Diese 1,5 m mächtige Sedimentabfolge zeigt horizontal geschichtet bis leicht linsenförmige Geometrien und ist durch geringe interne seismische Reflektivität charakterisiert (SE-1; Abbildung 5). Die SE-1 zu SE-2 Grenze (pinker Horizont in Abbildung 5) zeigt ein Übergang zu sehr starken Amplituden, welche kaum ein tieferes Eindringen erlauben (gas-blanking?)



**Abbildung 5:** Reflexionsseismisches Profil durch den Blindsee

### 4.3 Kurzkerne

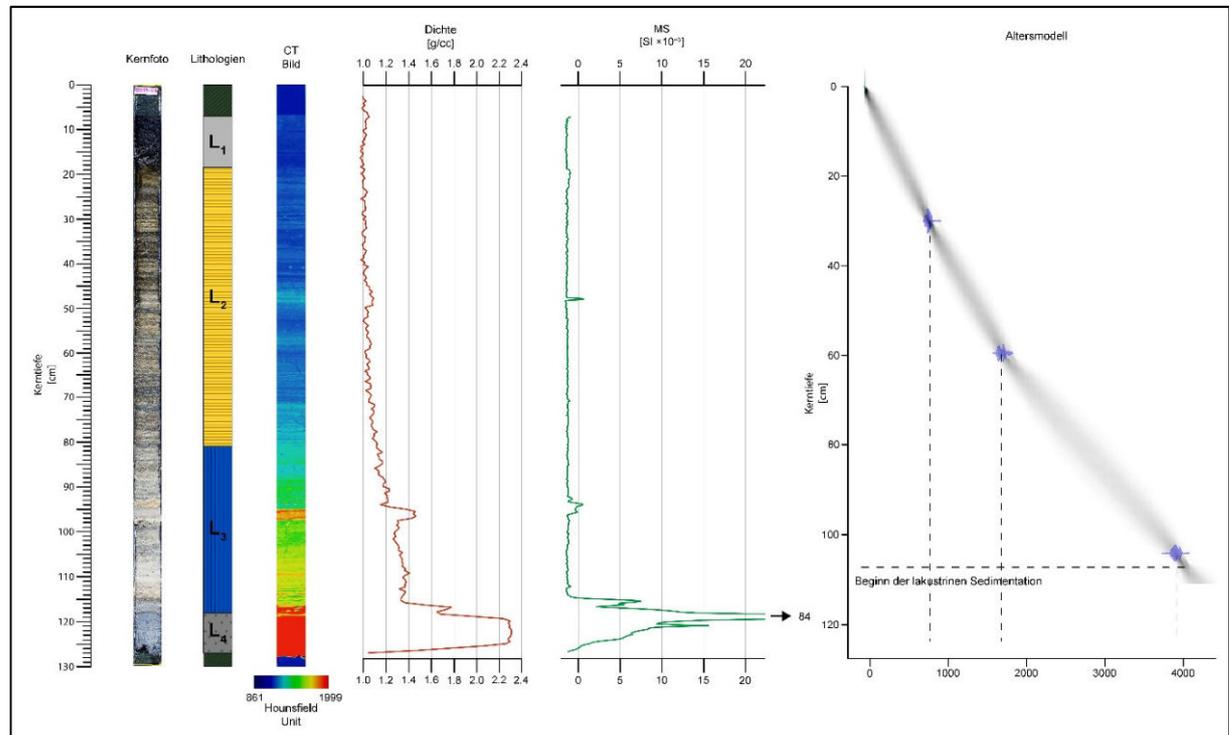
Im Rahmen der seegeologischen Untersuchungen 2019 wurden im Fernsteinsee 8 Sedimentkerne entnommen und im Blindsee wurden 9 Sedimentkerne entnommen. In Abbildung 3 sind die Lokationen der Sedimentkerne dargestellt. Für den Fernsteinsee wurde für die hier vorliegende Publikation der Kern FER19-03 als Hauptkern herangezogen, da er einerseits im südlichen Westbecken entnommen worden ist, welches die größte Eindringtiefe der Reflexionsseismik enthält und andererseits da der Kern selbst am meisten Stratigraphie beinhaltet. Für den Blindsee wurde der Kern BLI19-03 gewählt, aufgrund seiner Stratigraphie und da er im, von der Reflexionsseismik als vielversprechend gedeuteten, Südbecken gezogen worden ist.



**Abbildung 6:** Kompilierte Daten des Kerns FER19-03 bestehend aus (v.l.n.r) Histogramm-equalisiertes Kernfoto, interpretierten Lithotypen, CT Bild, MSCL Daten (Dichte, magnetische Suszeptibilität), und dem aus den radiokarbon-Altern (diskrete blaue Datenpunkte in cal yr BP mit 95% Wahrscheinlichkeitsintervall (Reimer et al., 2013) modellierten Altersmodell.

Im gekernten Intervall der stratigraphischen Abfolge im Fernsteinsee ist ein deutlicher Übergang von einer klastischen Sedimentation an der Basis (Lithotypen L<sub>3</sub>) zu einer darüberliegenden lakustrinen/organischen Sedimentation (L<sub>2</sub> und L<sub>1</sub>) erkennbar: L<sub>3</sub> hat erhöhte Dichte und Magnetische Suszeptibilität Werte (mit sehr hohen Peak im Sublithothyp L3-1). Die Lithologie besteht aus gradierten, feinstkörnigen (Ton -bis- Feinsilt Fraktion) bis sandigen Sedimenten, welche mehrheitlich aus karbonatischen Mineralbruchstücken besteht und keine biogene/limnische Sedimentpartikel enthält. Diese Charakteristika deuten auf ereignisbezogenen gravitative klastische Sedimentationsprozesse hin. L<sub>2</sub> hingegen besteht aus Organik-reichen laminierten

tonigen-bis-siltigen Sedimenten, die zwar ebenfalls karbonatische Mineralbruchstücken, aber auch viele Diatomeen und Pflanzenreste enthalten. L1 ist auffällig dunkel, sehr Organik-reich, feinkörniger als L2, aber auch mit Diatomeen, so dass sowohl L2 als auch L1 der kontinuierlichen lakustrinen Sedimentationsphase entsprechen.



**Abbildung 7:** Kompilierte Daten des Kerns BLI19-03 bestehend aus (v.l.n.r) Histogramm-equilibriertes Kernfoto, interpretierten Lithotypen, CT Bild, MSCL Daten (Dichte, magnetische Suszeptibilität), und dem aus den radiokarbon-Altern (diskrete blaue Datenpunkte in cal yr BP mit 95% Wahrscheinlichkeitsintervall (Reimer et al., 2013) modellierten Altersmodell.

Beim Blindsee findet sich am Top auch wieder eine sehr Organik-reiches Intervall, ähnlich dem Lithotyp 1 beim Fernsteinsee (beim Blindsee auch als Lithotyp 1 bezeichnet). Auf Lithotyp 1 folgt mit Lithotyp 2 eine laminierte, homogene Sedimentabfolge mit relativ unauffälligen MSCL Daten. Beide Lithotypen enthalten Diatomeen. Bei Lithotyp 3 lassen sich schon deutliche Anstiege in der Dichte vermerken, was auch im CT Bild gut ersichtlich ist, Lithotyp 4 besitzt die höchsten Werte in Dichte und magnetischer Suszeptibilität, und zeigt die gleichen textuellen und mineralogischen Charakteristika wie die im Fernsteinsee identifizierte ereignisbezogenen gravitative klastische Sedimentationsabfolge (vgl. Lithotyp 3 im Fernsteinsee).

#### 4.4 Altersmodell

Pro See wurden 3 Proben aus dem stratigraphischen Intervall der lakustrinen Sedimentationsphase für die  $^{14}\text{C}$  Altersbestimmung entnommen, mit dem Ziel das Alter des prominenten Übergangs von der gravitativen

Ereignissedimentation zum Beginn der lakustrinen Sedimentation zu bestimmen. In beiden Kernen konnte ein gutes Alter-Tiefenmodell für die letzten ca. 4000 Jahre erstellt werden (vgl. Abbildung 6 und 7). Im Fernsteinsee ergab sich eine Sedimentationsrate von durchschnittlich 0,021 cm/a. Im Blindsee ergab sich eine durchschnittliche Sedimentationsrate von 0,26 cm/a. Die basale Ereignissedimentation, bzw. der Beginn der lakustrinen Sedimentationsphase beginnt in beiden Seen innerhalb der Radiokarbon Unsicherheit gleichzeitig vor ca. 4000 +/- 200 Jahren.

## 5. Diskussion

Der interpretierte Übergang von einer klastischen Ereignissedimentation zur kontinuierlichen lakustrinen Sedimentation im Bohrkern FER19-03 korreliert gut mit dem Megaturbidit der seismischen Einheit 2, und bestätigt somit diese seismische Interpretation eines Massenbewegungsereignisses (Abb. 4b). Im Blindsee war die seismische Interpretation der SE-2 nicht eindeutig, die Kern-Korrelation und die vergleichbare Sedimentäre Abfolge des Bohrkern BLI19-03 deuten aber darauf hin, dass auch der Ursprung dieser Einheit einem gravitativem Massenbewegungsereignis zuzuschreiben ist.

Unsere neue Altersdatierung der auf dieses Massenbewegungsereignis einsetzenden lakustrinen Sedimentation in den beiden Fernpasseen (4000 +/- 200 Jahren Alter) stimmt mit dem von Ostermann et al. (2007) und Prager et al. (2009) datieren Bergsturz (4150 ± 100 Jahre) überein, was auf einen kausalen Zusammenhang schließen lässt.

Die reflexionsseismischen Daten, und die darauf basierende Seismik-stratigraphische Interpretation im tiefsten Südbecken des Fernsteinsees zeigt aber deutlich, dass sich unterhalb der SE-2 und dem gekernten ~4100.BP Megaturbidit, noch tiefere, geschichtet Sedimentablagerungen (SE 3) befinden. Worum es sich bei diesen Ablagerungen handelt ist noch unklar, basierend auf ihrem akustischen Charakter, kann es sich aber nicht um grobkörnige, blockige Ablagerungen eines größeren Bergsturzereignisses handeln.

Somit lässt sich aus den vorhandenen Daten nicht eindeutig schlussfolgern, ob das von Prager et al., 2009 datierte Bergsturzereignis, welches in unseren Daten mit dem Massenbewegungsereignis der SE 2 korreliert, auch mit der Genese der Toma-Morphologie in direktem Zusammenhang steht. Möglicherweise könnten unterhalb des ~ 4100 Jahren BP Bergsturzhorizontes (SE-2) ältere Seesedimente auftreten. Dies würde zeigen, dass es sich beim 4100 Jahre BP Ereignis nur um einen eher kleineren Bergsturz handelte, der im vorher bereits bestehenden Fernsteinsee lediglich eine distale, geringmächtige Ereignislage darstellt. Ein alternative Interpretation der seismischen Abfolge unterhalb der gekernten SE 2, wäre hingegen, dass keine kontinuierlich-abgelagerten Seesedimente auftreten, sondern die ganze Abfolge über dem akustischen Basement einer mehrphasigen Abfolge gravitativer Ablagerungsprozesse entspricht, welche sich innerhalb relative kurzer Zeit unmittelbar nach einem großen - Morphologieformenden Bergsturz ergaben (vgl. z.B. Deplazes et al., 2007 )

## 6. Ausblick

Um die gesamte Sedimenteinfüllung, die bei der reflexionsseismischen Vermessung beobachtet werden kann, zu beproben, ist eine weitere Tiefbohrung im Fernsteinsee im September geplant. Ziel ist es die tieferen Sedimente mit Langkernen zu beproben, um dadurch Einblick in die komplette Sedimentfüllung des Fernsteinsees und möglicherweise auch Einblicke in die regionale morphologische Entstehung zu erhalten. Geplant sind auch weitere <sup>14</sup>C Datierungen, die das Altersmodell verfeinern sollen und nach Möglichkeit das gesamte Sedimentpaket zeitlich einordnen sollen.

## Literatur

Abele, G. (1974): Bergstürze in den Alpen: ihre Verbreitung, Morphologie und Folgeerscheinungen. – Wissenschaftliche Alpenvereinshefte, Nr. 25, München

Blaauw, M., Christen, J. (2011): Flexible paleoclimate age-depth models using an autoregressive gamma process. *Bayesian analysis*, 6(3), 457-474

Daxer, C., Moernaut, J., Taylor, T., Haas J.N., Strasser, M., (2018) Late Glacial and Holocene sedimentary infill of Lake Mondsee (Eastern Alps, Austria) and historical rockfall activity revealed by reflection seismics and sediment core analysis. *Austrian Journal of Earth Sciences*, 111:1, 111-134

Deplazes, G., Anselmetti, F. S., Hajdas, I. (2007): Lake sediments deposited on the Flims rockslide mass: the key to date the largest mass movement of the Alps. – *Terra Nova*, Nr. 19, S. 252-258

Fruth, I., Scherreiks, R., 1975. Facies and geochemical correlations in the Upper Hauptdolomit (Norian) of the eastern Lechtaler Alps. *Sediment. Geol.* 13, 27–45.

GBA (Geologische Bundesanstalt) (2009): Geofast 115 Reutte. 1 : 50 000, Wien

GBA (Geologische Bundesanstalt) (2016): Geofast 116 Telfs. 1: 50 000, Wien

Gilli, A., Anselmetti, F. S., Glur, L., Wirth, S. B. (2013): Lake Sediments as Archives of Recurrence Rates and Intensities of Past Flood Events. – *Advances in Global Change Research*, Nr. 47, S. 225-242

Mostler, W. (2013): Der Fernpassbergsturz in völlig neuem Lichte. – Tagungsband 15. Geoforum Umhausen 2013

Ostermann, M., Sanders, D., Prager, C., Kramers, J. (2007): Aragonite and calcite cementation in “boulder-controlled” meteoric environments on the Fern Pass rockslide (Austria): implications for radiometric age dating of catastrophic mass movements. – *Facies*, 53, S. 189-208, Springer

Prager, C., Ostermann, M., Ivy-Ochs, S., Synal, H.-A. (2009): Geology and radiometric <sup>14</sup>C-, <sup>36</sup>Cl- and Th-/U-dating of the Fernpass rockslide (Tyrol, Austria). – *Geomorphology*

Regents of the University of Minnesota (2011): Tool for Microscopic Identification (TMI). – <https://tmi.laccor.umn.edu/>

Reimer, P. J., Bard, E. et al. (2013): IntCal13 and Marine13 Radiocarbon Age Calibration Curves 0-50,000 Years cal BP. – *Radiocarbon*, Nr. 55, S. 869-1887

Reusch, A., Loher, M., Bouffard, D., Moernaut, J., Hellmich, F., Anselmetti, F. S., Bernasconi, S. M., Hilbe, M., Kopf, A. J., Lilley, M. D., Meinecke, G., Strasser, M. (2015): Giant lacustrine pockmarks with subaqueous groundwater discharge and subsurface sediment mobilization. – *Geophysical Research Letters*, Nr. 42, S. 3465-3473

Sammartini, M., Moernaut, J., Anselmetti, F. S., Hilbe, M., Lindhorst, K., Praet, N., Strasser, M. (2019): An Atlas of Mass-Transport Deposits in Lakes. - Submarine Landslides: Subaqueous Mass Transport Deposits from Outcrops to Seismic Profiles, Geophysical Monograph 246, S. 201-226

Schmid, S., Fügenschuh, B., Kissling, E., Schuster, R. (2004): Tectonic map and overall architecture of the Alpine orogen. – *Eclogae Geologicae Helveticae* 97, S. 93 – 117, Birkhäuser Verlag, Basel

Schnurrenberger, D., Russel, J., Kelts, K. (2003): Classification of lacustrine sediments based on sedimentary components. *Journal of Paleolimnology*, 29(2), 141-154

Strasser, M., Aufleger, M., Erhardt, M., Innerhofer, D., Moernaut, J., Schellhorn, M., Recheis, W. (2017): Seesedimente als geologische Zeugen prähistorischer Erdbeben in den Alpen. – Tagungsband 19. Geoforum Umhausen 2017

Strasser, M., Monecke, K., Schnellmann, M., Anselmetti, F. S. (2013): Lake sediments as natural seismographs: A compiled record of Late Quaternary earthquakes in Central Switzerland and its implication for Alpine deformation. – *Sedimentology*, Nr. 60, S. 319-341

Tóth, Z., Spieß, V., Jensen, J. (2014): Seismo-acoustic signatures of shallow free gas in the Bornholm Basin, Baltic Sea. – *Continental Shelf Research*, Nr. 88, S. 228-239

Wolkersdorfer, C. (2019): Gibt es hydrogeologische Hinweise auf einen Gipskarst am Fernpass?. – Tagungsband 21. Geoforum Umhausen 2019

## “Geo-Wetter”: geologisch relevante meteorologische Extreme und Trends

### Zusammenfassung des Abendvortrags

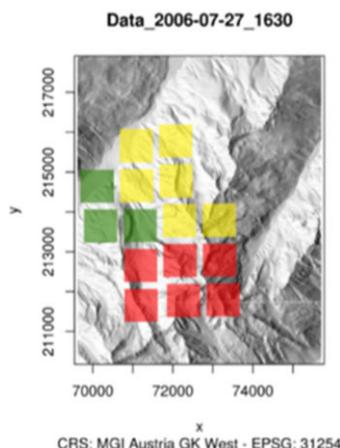
Michael Winkler<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Fürstenweg 180, 6020 Innsbruck, Austria. michael.winkler@zamg.ac.at

Für den Abendvortrag des 22. Geoforums Umhausen wurde der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) die Möglichkeit eingeräumt, ihr Engagement am Schnittpunkt zwischen Geologie bzw. Ingenieurgeologie und Meteorologie bzw. Klimatologie darzustellen. Michael Winkler von der ZAMG Kundenservicestelle für Tirol und Vorarlberg präsentierte einige Bereiche, in denen Meteorologen und Klimatologinnen mit ihren Analysen, Gutachten und Prognosen als “Dienstleister” für Geologinnen und Georingenieure tätig sind. Der Fokus wurde dabei auf den alpinen Raum gelegt.

### Lokaler Starkregen

Der Vortrag thematisierte lokale Starkregen kurzer Dauerstufen. Sie sind als Auslöser mitverantwortlich für Massenbewegungen wie z.B. Muren. Einerseits erstellt die ZAMG nach Schadensereignissen Gutachten zu Regenmenge und dem zeitlichen Ablauf, und ordnet die meteorologische Seite der Ereignisse extremwertstatistisch ein. In enger Zusammenarbeit mit der Wildbach und Lawinenverbauung (WLV) und dem Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft (BFW) wurde und wird andererseits auch an besseren Warnungen vor solchen Extrema gearbeitet. In den letzten Jahren wurde z.B. ein Vorwarnsystem entwickelt, das Kurzfristprognosen von einzelnen Gewitter- und Schauerzellen, topographische und geomorphologische Parameter, wie Geländesteilheit und Bodenrauigkeit, sowie die “Vorbefeuchtung” des Bodens durch vorangegangene Regenereignisse kombiniert. Daten von Wetterradaren und Blitzortungssystemen werden verwendet um Starkregenzellen zu erkennen und ihre Zugbahnen vorherzusagen. Abbildung 1 zeigt ein Anwendungsbeispiel, bei dem eine potentiell hohe Gefahr für Murenabgänge bereits ca. zwei Stunden im Voraus prognostiziert werden konnte.



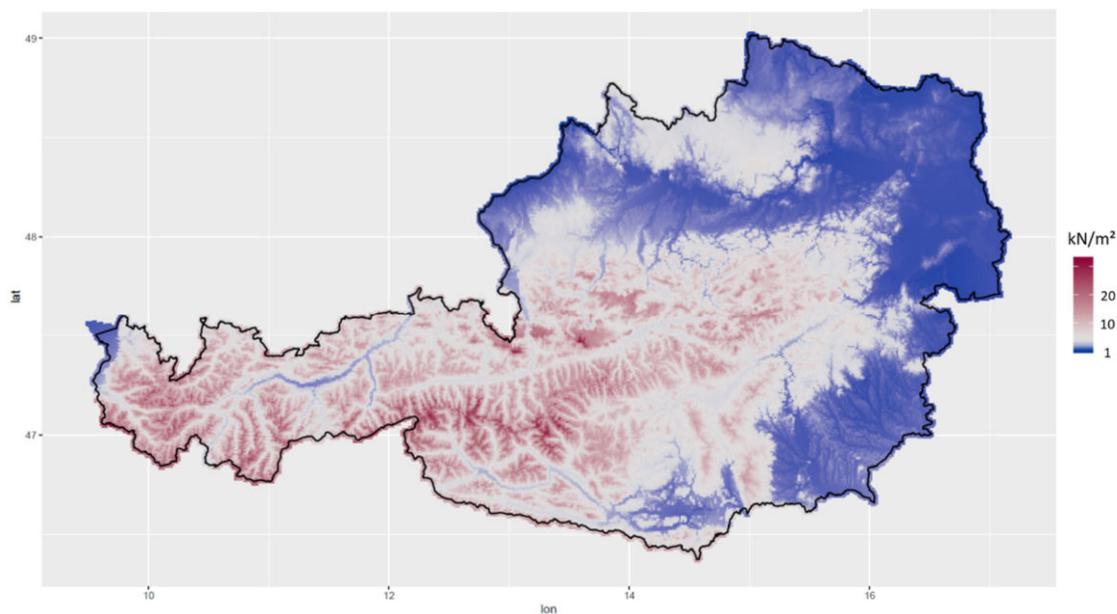
**Figure 1:** Anwendungsbeispiel am Grablasbach (Stubaital, Tirol). Für den Zeitpunkt des Murenabgangs (16:30 Uhr) konnte das Warnsystem ein hohes “Murgangspotential” in der entsprechenden Region prognostizieren (rote Färbung). (c) BFW, ZAMG.

In einem 2020 im Auftrag der Projektgesellschaft Brennerbasistunnel (BBT) durchgeführten Projekt für die Baustelle Steinach/Padastertal wurde das Starkregen-Warnsystem erweitert und mit Informationen zu Jährlichkeiten verschnitten.

### Extrema der Schneelast bzw. des Schneewasserwerts

Bei Bauten im Allgemeinen, nicht zuletzt aber auch bei ingenieurgeologisch aufwendigen Konstruktionen im Hochgebirge, wie etwa Lawinerverbauungen usw., spielt die Bemessung extremer Schneelasten eine große Rolle. Die ZAMG steht hierbei Ingenieurbüros und Behörden zur Seite und begutachtet hochalpine Standorte hinsichtlich der zu erwartenden Schneelasten.

In mehreren Projekten der letzten Jahre wurden u.a. die Voraussetzungen für die Normgebung in diesen Bereichen verbessert. Abbildung 2 stellt ein vorläufiges Ergebnis einer möglichen neuen Schneelast-Karte für Österreich dar, die im Rahmen des Projekts "Schneelast.Reform" derzeit entwickelt wird. Es kommen hierbei aktuelle Schneedaten, das neuartige Schneemodell  $\Delta$ SNOW.MODEL (Winkler, Schellander, und Gruber 2020) und moderne extremwertstatistische Methoden zum Einsatz. Ergebnisse sind bis Ende 2020 zu erwarten und nicht zuletzt durch das  $\Delta$ SNOW.MODEL sind für die Zukunft weitere Entwicklungen am Schnittpunkt von Meteorologie, Hydrologie und Geologie zu erwarten.

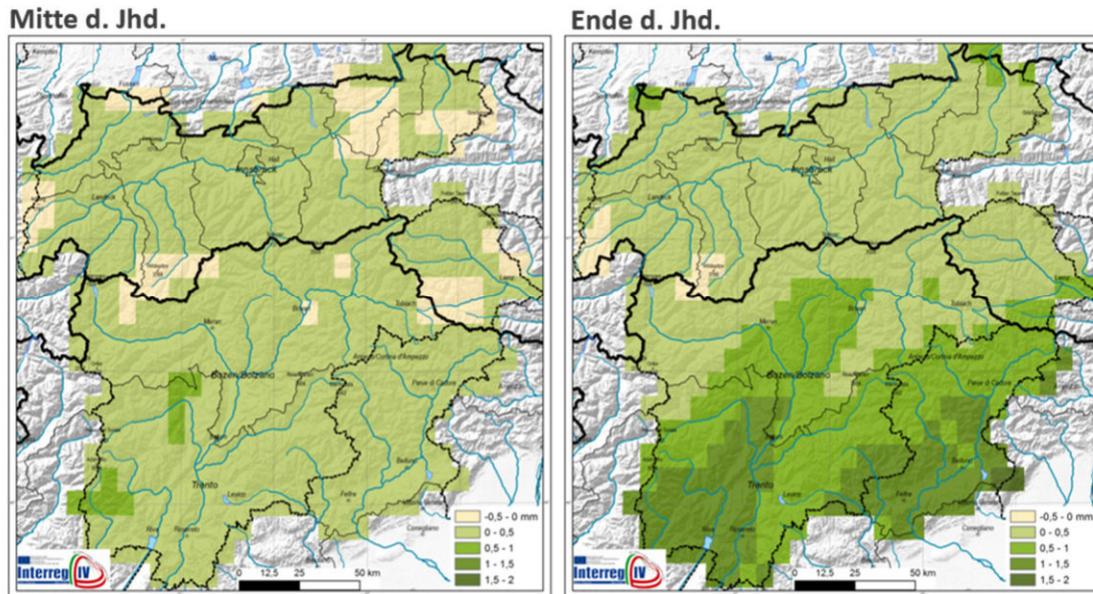


**Figure 2:** Vorläufiges Resultat aus dem Projekt "Schneelast.Reform" für die Neubemessung der charakteristischen Schneelast in Österreich. (c) ZAMG.

### Klimatische Aspekte und Trends

Auch die Beobachtung von Klimatrends und die Erstellung von Klimagutachten gehören zu den Aufgaben der ZAMG. Geologisch interessant, weil relevant für Muren usw., sind hierbei wohl insbesondere die möglichen Entwicklungen hinsichtlich des Niederschlags, insbesondere des Starkniederschlags. Nicht

zuletzt das 2015 abgeschlossene Projekt "3PCLIM" ([www.alpenklima.eu](http://www.alpenklima.eu), Adler u. a. (2015)) konnte hier für die Region Tirol-Südtirol-Belluno wertvolle Ergebnisse liefern.



**Figure 3:** Zunahme der Intensität von Tages-Niederschlägen (mm/d) in der Region Tirol-Südtirol-Belluno nach dem wahrscheinlichsten Klimaszenario für die Zeiträume 2026-2055 (links) und 2071-2100 (rechts), jeweils im Vergleich zu 1981-2010. Quelle: [www.alpenklima.eu](http://www.alpenklima.eu)

Abbildung 3 zeigt beispielhaft die zu erwartende Änderung der Niederschlagsintensität. Bis Ende des 21. Jahrhunderts ist in der gesamten Region eine Zunahme zu erwarten, die südlich des Alpenhauptkamms am intensivsten ausfällt. Daher besteht Grund zur Annahme, dass kurze, lokale, geologisch-meteorologische Schadensereignisse wie Muren künftig häufiger werden, wobei diese Aussage derzeit nur von geringer bis mittlerer Vertrauenswürdigkeit ist.

### Wetter- und klimabedingte Veränderungen im hochalpinen Gelände

Die Erwärmung schreitet auch in hochgelegenen Regionen voran, insbesondere im Sommer. Die damit einhergehenden Veränderungen der Gletscher und des Permafrosts sind nicht nur bereits deutlich sichtbar, sondern werden voraussichtlich zumindest in dieser Geschwindigkeit weitergehen (z.B. Harris u. a. 2009). Auch die Glaziologen der ZAMG beschäftigen sich schon lange mit diesen Entwicklungen und möglichen Zukunftsszenarien. Das Sonnblick-Observatorium (Abbildung 4), das bezeichnenderweise einerseits als Stützpunkt und Forschungsstation einen wichtigen Beitrag zum besseren Verständnis dieser Prozesse liefert und andererseits selbst stark vom Abtauen des Permafrosts betroffen ist (z.B. Kellerer-Pirklbauer u. a. 2015), wurden im Vortrag angesprochen. Aber auch der Einfluss eines wärmeren Klimas auf touristische Infrastruktur im Hochgebirge, wie z.B. Steiganlagen und Übergänge, wurde thematisiert.



**Figure 4:** Sonnblick Observatorium mit Stützverbauungen. (c) ZAMG.

### Literaturverzeichnis

Adler, Silke, Barbara Chimani, Susanne Drechsel, Klaus Haslinger, Johann Hiebl, Vera Meyer, Gernot Resch, u. a. 2015. Das Klima von Tirol - Südtirol - Belluno: Vergangenheit - Gegenwart - Zukunft. Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG), Abteilung Brand- und Zivilschutz - Autonome Provinz Bozen, Agenzia Regionale per la Prevenzione e Protezione Ambientale del Veneto (ARPAV).

Harris, Charles, Lukas U. Arenson, Hanne H. Christiansen, Bernd Etzelmüller, Regula Frauenfelder, Stephan Gruber, Wilfried Haeberli, u. a. 2009. „Permafrost and climate in Europe: Monitoring and modelling thermal, geomorphological and geotechnical responses“. *Earth-Science Reviews* 92 (3-4): 117–71. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2008.12.002>.

Kellerer-Pirklbauer, A., A. Bartsch, C. Gitschthaler, S. Reisenhofer, G. Weyss, C. Riedl, und M. Avian. 2015. „permAT - Langzeitmonitoring von Permafrost und periglazialen Prozessen und ihre Bedeutung für die Prävention von Naturgefahren: Mögliche Strategien für Österreich“. Endbericht von StartClim2014.F. [http://www.startclim.at/fileadmin/user\\_upload/StartClim2014\\_reports/StCl2014F\\_lang.pdf](http://www.startclim.at/fileadmin/user_upload/StartClim2014_reports/StCl2014F_lang.pdf).

Winkler, Michael, Harald Schellander, und Stefanie Gruber. 2020. „Snow Water Equivalents exclusively from Snow Heights and their temporal Changes: The DeltaSNOW.MODEL“. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, April. <https://doi.org/10.5194/hess-2020-152>.

## Die Großquellen Tirols – Bestandsaufnahme und Detailuntersuchungen

Felix Thalheim, Rupert Ebenbichler<sup>1</sup>

<sup>1</sup>) Wasser Tirol – Wasserdienstleistungs-GmbH, Leopoldstraße 3, 6020 Innsbruck

### **Abstract**

*High-discharge springs can be of massive importance for regional water supply solutions and are assumed to act as indicators for the impact of climate change on large-scale subsurface water reservoirs in bedrock. However, the list of relevant high-discharge springs in Tyrol was incomplete and lacked substantial updates since its initial compilation in the early 90s. Thus, a multi-stage project to update this list and collect and evaluate all available data was devised and is currently in its second implementation phase.*

*A list of 55 springs with an accumulated minimum discharge of more than 4 000 litres per second was compiled and a data base from a variety of high to low-quality sources as well as existing publications was assembled.*

*The available data for each spring, including discharge, water temperature, electric conductivity, hydrochemistry as well as bacteriology, were visualised and put together in an extensive report.*

*The discharge of 4 out of the 24 springs that are being continuously monitored by the hydrological survey of Tyrol showed a decrease, while one even increased, and another 13 exhibit irregularities over the multi-annual periods. With respect to the water temperatures, 14 springs exhibit significant rises similar to observed changes in groundwater temperatures.*

*Further investigations are being carried out and a broad variety of work packages to understand the impact of climate change on high-discharge springs and to safeguard the strategical water resources of alpine spring catchments was proposed.*

### **Einleitung**

*Wasser ist Tirols wichtigste Ressource und durchdringt alle Lebens- und Wirtschaftsbereiche. Daher ist die Sicherstellung der eigenen Wasserressourcen für die Deckung der eigenen Bedürfnisse von zentraler Bedeutung. Im Gegensatz zu vielen anderen Regionen kommt dabei den Quellwässern eine wesentliche Rolle – aus ihnen wird im überwiegenden Ausmaß der Bedarf an Trink- und Nutzwasser über die privaten und öffentlichen Wasserversorgungen gedeckt.*

*In den 1990er Jahren wurden vom Land Tirol in Kooperation mit dem Energieversorger TIWAG innovative Großquellenhydrogeologie(GQH)-Untersuchungen zur Abschätzung und Erforschung der strategischen Wasserressourcen des Landes durchgeführt. Im Laufe der letzten 20-25 Jahre waren jedoch auch manche dieser Großquellen etlichen Veränderungen z. B. durch Bautätigkeiten und allgemeine Änderungen von Land- und Raumnutzung unterworfen.*

*Zudem ergeben sich nach dem aktuellen Stand der Wissenschaft aufgrund des Klimawandels – je nach Szenario und Region – wesentliche Änderungen der Niederschlags- und damit der Entwässerungs-,*

*Hochwasser- und Grundwasserneubildungssituation (z. B. BLÖSCHL et al., 2018; BMLFUW, 2016; WAGNER et al., 2017). Dies könnte sich in Tirol u. a. teilweise durch gehäufte Starkniederschlagsereignisse (BMLFUW, 2017; VERGEINER et al., 2016), länger andauernde Trockenperioden, verstärkte Oberflächenabflüsse (BMLFUW, 2017) und Erosion (AdTLR, 2015) und eine daraus resultierende Verringerung der Wasserspeicherung mit erhöhtem Kontaminationsrisiko zeigen. Allerdings fallen diese Auswirkungen u. a. aufgrund der Topographie Tirols regional sehr unterschiedlich aus.*

*In jedem Falle stellt sich zunehmend die Frage nach einer zukunftssicheren Trinkwasserversorgung. Wie wirken sich welche Änderungen regional und vor allem lokal auf die bereits genutzten Quellen aus und stehen uns auch zukünftig unsere strategischen Wasserressourcen z. B. in Form der Großquellen zur Verfügung?*

## **Methodik**

Zur Abklärung u.a. dieser Fragen führte die Wasser Tirol im Auftrag des Landes Tirol Vorehebungen zu den strategischen Wasserressourcen durch. Zunächst wurde eine Erhebung der Bestandsdaten durchgeführt, eine Liste von Großquellen zusammengestellt bzw. aktualisiert und nachfolgend die Zeitreihen ausgewählter, repräsentativer Quellen einer genaueren Untersuchung hinsichtlich Schüttungsdynamik, Wassertemperaturen und anderer Charakteristika unterzogen.

Dabei wurde zunächst versucht zu klären, welche Quellen überhaupt unter den Begriff „**Großquellen**“ fallen, und eine vorläufige Liste erstellt. Bei diesen Quellen wurde – basierend auf den Ergebnissen eines Startworkshops mit dem Auftraggeber – darauf geachtet, dass sie Mindestschüttungen von etwa **20 l/s** aufweisen und zudem eine gewisse Nutzungsrelevanz auf regionaler Ebene besitzen (könnten). Danach wurden die zu diesen Quellen vorliegenden Daten erhoben, zusammengetragen, aufbereitet und letztlich einer *Erst- sowie Detailuntersuchung* unterzogen.

## **Ergebnisse**

### **Überblick**

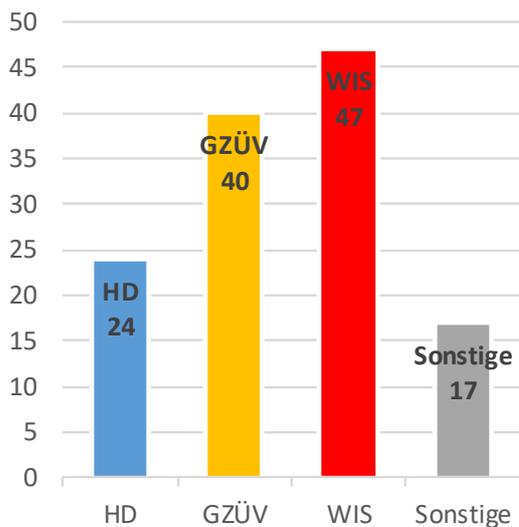
**Tab. 1** gibt die aus den Erhebungen hervorgegangene Liste der Großquellen Tirols wieder. Bei einigen Quellen stellte sich im Laufe der Untersuchung heraus, dass sie Schüttungsminima  $<20$  l/s aufweisen. Diese wurden dennoch in der Liste belassen, zumal auch bei etlichen Quellen die Datenqualität fragwürdig ist.

Da bestimmte Quellen im Karwendel aus verschiedenen Gründen nicht für die Wasserversorgung von mehr als Einzel-WVAs in Frage kommen dürften, finden sie sich nicht in der Liste wieder. Einen Überblick über die Großquellen im Karwendel geben LECHNER ET AL., 2019.

Tab. 1: Bearbeitete Liste der Großquellen

| Name                              | Nr.        | Gemeinde                | Bezirk         | Schüttung [l/s] |       |       | SZ | Quelle genutzt? | SG? | Hydrog. Unters. | Hy-Vor-Ort | GZÜV | WIS | GQH |
|-----------------------------------|------------|-------------------------|----------------|-----------------|-------|-------|----|-----------------|-----|-----------------|------------|------|-----|-----|
|                                   |            |                         |                | Min             | Mitt  | Max   |    |                 |     |                 |            |      |     |     |
| Brunauquelle                      | QU70202001 | Haiming                 | Imst           | 27              | 57    | 118   | 4  | j               | j   | j               | j          | j    | j   | j   |
| Heiterwandquelle (ost+west)       | QU70222002 | Tarrenz                 | Imst           | 112             | 151   | 206   | 2  | j               | j   | n               | j          | n    | j   | n   |
| Mühlsprungquelle                  | QU70212004 | Nassereith              | Imst           | 200             | 757   | 1 050 | 5  | n               | j   | j               | n          | n    | j   | n   |
| Ochsenbrunnquelle                 | QU70217014 | St. Leonhard im Pitztal | Imst           | 30              | 94    | 222   | 7  | n               | n   | j               | j          | j    | n   | j   |
| Schwarzbach - Moosquelle          | QU70209504 | Mieming                 | Imst           | 30              | 89    | 398   | 13 | n               | n   | j               | j          | j    | j   | n   |
| Stöttlbach Ursprung (Quellgebiet) | QU70209005 | Mieming                 | Imst           | 80              |       | 670   | 8  | j               | n   | j               | n          | n    | j   | n   |
| Ursprungquelle (Lehnberg)         | QU70213002 | Obsteig                 | Imst           | 13              | 113   | 494   | 38 | j               | n   | j               | j          | j    | j   | n   |
| Wendelinstollen-Quelle            | QU70212005 | Nassereith              | Imst           | 148             |       | 210   | 1  | n               | n   | n               | n          | j    | j   | n   |
| Mühlauer Quellen                  | QU70101004 | Innsbruck               | Innsbruck      | 613             | 1 002 | 1 606 | 3  | j               | j   | j               | j          | j    | j   | n   |
| Aalbrunnenquelle                  | QU70336007 | Obernberg am Brenner    | Innsbruck-Land | 30              | 152   | 437   | 15 | n               | n   | j               | n          | j    | n   | n   |
| Eibachquelle                      | QU70334006 | Neustift im Stubaital   | Innsbruck-Land | 123             | 397   | 935   | 8  | j               | j   | n               | j          | j    | j   | n   |
| Eppzirler Quellen 1-4             | QU70351001 | Seefeld in Tirol        | Innsbruck-Land | 127             |       | 300   | 2  | j               | n   | n               | n          | j    | j   | n   |
| Eppzirler-Quelle                  | QU70348002 | Scharnitz               | Innsbruck-Land | 25              |       | 25    | 1  | j               | j   | n               | n          | n    | j   | n   |
| Frontalquellen                    | QU70341001 | Pfons                   | Innsbruck-Land | 23              | 67    | 173   | 7  | j               | j   | n               | n          | j    | j   | n   |
| Neissquellen                      | QU70329002 | Mils                    | Innsbruck-Land | 30              | 41    | 52    | 2  | j               | j   | n               | n          | j    | j   | n   |
| Stollenquelle                     | QU70358003 | Thaur                   | Innsbruck-Land | 20              | 28    | 41    | 2  | j               | j   | n               | n          | j    | j   | n   |
| Weierquellen                      | QU70357013 | Telfs                   | Innsbruck-Land | 117             | 176   | 245   | 2  | n               | n   | n               | n          | j    | n   | n   |
| Meilquellen                       | QU70369007 | Zirl                    | Innsbruck-Land | 50              |       | 300   | 6  | n               | n   | n               | n          | j    | j   | j   |
| TW-Stollen Bettelwurf             | QU70301022 | Absam                   | Innsbruck-Land | 207             | 292   | 495   | 2  | j               | j   | n               | j          | j    | j   | n   |
| Mühlbachquellen 1-7               | QU70418004 | Schwendt                | Kitzbühel      | 219             | 267   | 360   | 2  | n               | n   | n               | j          | j    | j   | n   |
| Reintalquellen                    | QU70416005 | St. Johann in Tirol     | Kitzbühel      | 20              | 30    | 50    | 3  | j               | n   | n               | j          | j    | j   | n   |
| (S)awinkelquellen (1-8)           | QU70509002 | Ellmau                  | Kufstein       | 47              | 75    | 109   | 2  | j               | j   | n               | j          | n    | j   | n   |
| Blaue Quelle                      | QU70510001 | Erl                     | Kufstein       | 386             | 732   | 2 515 | 7  | n               | n   | j               | j          | j    | j   | j   |
| Dihlmannquelle                    | QU70412002 | Kössen                  | Kufstein       | 41              | 57    | 74    | 2  | j               | n   | n               | n          | j    | j   | n   |
| Hofinger Quelle                   | QU70508005 | Ebbs                    | Kufstein       | 55              |       | 800   | 15 | j               | j   | j               | n          | j    | j   | n   |
| Sägewerksquellen                  | QU70527005 | Thiersee                | Kufstein       | 40              |       | 60    | 2  | j               | n   | n               | n          | j    | j   | n   |
| Alfutzquelle ( I )                | QU70630001 | Zams                    | Landeck        | 75              | 136   | 242   | 3  | j               | n   | n               | j          | j    | j   | n   |
| Ganderbildquelle                  | QU70615002 | Nauders                 | Landeck        | 40              |       | 200   | 5  | j               | j   | n               | j          | n    | j   | n   |
| Lärchquellen                      | QU70607507 | Grins                   | Landeck        | 30              |       |       |    | n               | n   | n               | n          | n    | j   | n   |
| Lareinsontagspleisquellen         | QU70606004 | Galtür                  | Landeck        | 36              | 67    | 122   | 3  | n               | n   | n               | j          | j    | n   | n   |
| Stalanzquelle                     | QU70620516 | Ried i.O.               | Landeck        | 20              |       | 100   | 5  | n               | n   | j               | n          | j    | j   | n   |
| Verpeilquellen                    | QU70611008 | Kaunertal               | Landeck        | 43              |       | 160   | 4  | j               | n   | n               | n          | j    | j   | n   |
| Gitterbachquelle                  | QU70711504 | Iselsberg-Stronach      | Lienz          | 20              |       |       |    | n               | n   | n               | n          | n    | n   | n   |
| Moosbrunnquelle                   | QU70714002 | Lavant                  | Lienz          | 89              | 208   | 627   | 7  | n               | n   | j               | j          | j    | n   | n   |
| Schwarzbodenquelle                | QU70705036 | Assling                 | Lienz          | 22              | 34    | 75    | 3  | j               | n   | j               | j          | j    | j   | n   |
| Doserfall                         | QU70813002 | Häselgehr               | Reutte         | 55              | 748   | 2 850 | 52 | n               | n   | n               | j          | j    | n   | n   |
| Immenquelle                       | QU70807001 | Ehrwald                 | Reutte         | 60              |       | 140   | 2  | j               | j   | j               | n          | j    | j   | n   |
| Lehnbachquellen                   | QU70836504 | Weißbach am Lech        | Reutte         | 22              | 59    | 427   | 19 | n               | n   | n               | j          | j    | j   | n   |
| Steinkarquellen 1-11              | QU70836510 | Weißbach am Lech        | Reutte         | 35              |       | 35    | 1  | n               | n   | n               | n          | n    | j   | n   |
| Untere Schmittequelle ( III )     | QU70803004 | Biberwier               | Reutte         | 59              | 105   | 216   | 4  | j               | j   | n               | j          | j    | j   | n   |
| Auquelle                          | QU70903002 | Brandberg               | Schwaz         | 28              | 48    | 81    | 3  | j               | j   | n               | n          | j    | j   | n   |
| Birnerastenquelle                 | QU70920003 | Mayrhofen               | Schwaz         | 54              |       | 170   | 3  | j               | n   | n               | n          | n    | j   | n   |
| Bollenbachquelle                  | QU70936004 | Vomp                    | Schwaz         | 258             | 307   | 413   | 2  | n               | n   | j               | j          | j    | j   | j   |
| Gartalmquelle                     | QU70910002 | Fügenberg               | Schwaz         | 18              |       | 35    | 2  | n               | n   | n               | n          | n    | n   | n   |
| Katzensteigquelle (Kasbach)       | QU70907005 | Eben am Achensee        | Schwaz         | 65              | 145   | 257   | 4  | n               | n   | j               | n          | j    | n   | j   |
| Klausbrunnenquelle                | QU70903004 | Brandberg               | Schwaz         | 40              |       | 200   | 5  | n               | n   | n               | n          | n    | j   | n   |
| Kotahornquellen                   | QU70922004 | Ramsau                  | Schwaz         | 16              | 39    | 81    | 5  | j               | j   | n               | n          | j    | j   | n   |
| Kressauquellen                    | QU70903507 | Brandberg               | Schwaz         | 30              |       | 161   | 5  | n               | n   | n               | n          | n    | j   | n   |
| Lacknerbrunnenquelle              | QU70920010 | Mayrhofen               | Schwaz         | 78              | 99    | 127   | 2  | n               | n   | n               | j          | j    | j   | n   |
| Lacknerquelle - Dengg             | QU70903510 | Brandberg               | Schwaz         | 109             |       | 489   | 4  | n               | n   | n               | n          | n    | j   | n   |
| Obere Bergalmquelle               | QU70929507 | Steinberg am Rofan      | Schwaz         | 84              | 192   | 589   | 7  | j               | j   | n               | n          | j    | n   | n   |
| Pulverermühlquelle                | QU70929002 | Steinberg am Rofan      | Schwaz         | 19              | 81    | 701   | 37 | j               | n   | n               | j          | j    | j   | n   |
| Pulzer- und Lachtalquellen        | QU70916008 | Hippach                 | Schwaz         | 16              | 59    | 107   | 7  | j               | n   | n               | n          | j    | j   | n   |
| Quellbach-Ahüttenalm              | QU70903517 | Brandberg               | Schwaz         | 34              |       | 280   | 8  | n               | n   | n               | n          | n    | j   | n   |
| Stubbachquelle                    | QU70936007 | Vomp                    | Schwaz         | 39              | 91    | 149   | 4  | j               | j   | j               | j          | j    | j   | j   |

Die 55 in der Liste enthaltenen Quellen weisen eine Minimalschüttung von über 4 000 l/s auf – womit sich theoretisch bei einem durchschnittlichen jährlichen Wasserbedarf von 1 l/s für 500 Menschen die Versorgung von mehr als 2 000 000 Menschen bewerkstelligen ließe.

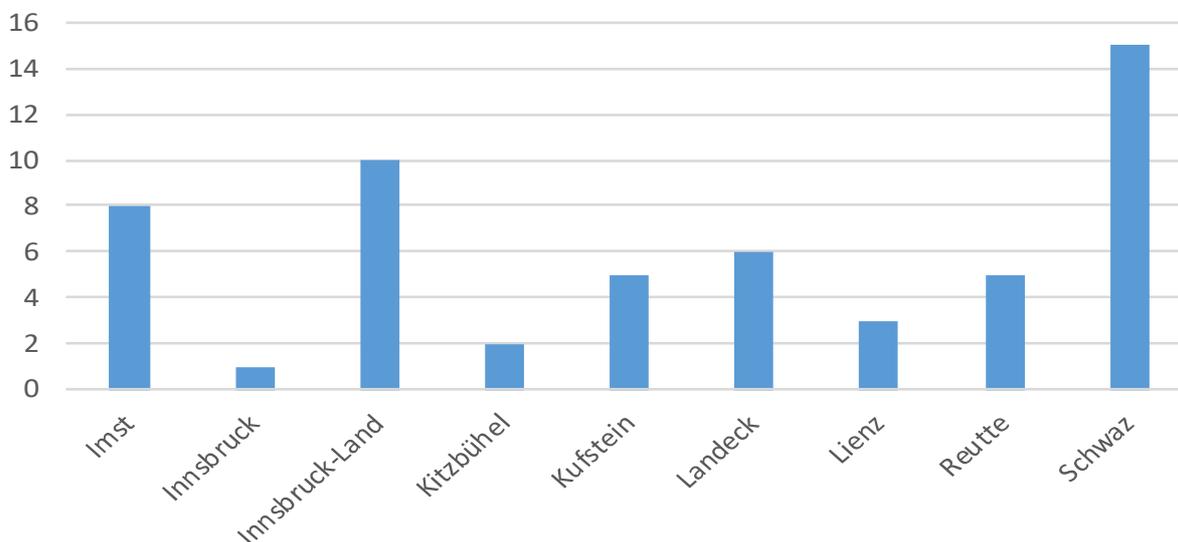


**Abb. 1:** Übersicht zu den herangezogenen Datenquellen

In **Abb. 1** sind die verwendeten Datenquellen dargestellt. Von 24 der Quellen liegen kont. Aufzeichnungen des HD Tirol vor, 40 der 55 Quellen werden nach GZÜV beprobt, zusätzliche Informationen aus dem WIS gab es bei 47. Bei 17 wurden sonstige Datenquellen wie die GQH verwendet. Dabei sind die Daten des HD naturgemäß am verlässlichsten. Die Daten nach GZÜV sind unterschiedlicher Qualität, was vor allem an den örtlichen Gegebenheiten zur Schüttungserfassung liegt. Die Daten aus dem WIS sind von sehr unterschiedlicher Qualität, die Daten von GZÜV und HD finden sich dort nur bedingt wieder. Teilweise finden sich dort noch Werte vom

Beginn der 90er Jahre aus der GQH, die oftmals nur auf Einzelmessungen und Schätzungen basierten. Bei der Oberen Bergalmquelle zum Beispiel ist gar eine Minimalschüttung von 0,5 l/s angeführt – was aber eher dem Konsens für die Einzelwasserversorgung entsprechen dürfte.

**Abb. 2** zeigt, wie sich die Großquellen auf die einzelnen Bezirke Tirols verteilen. Dabei dominiert der Bezirk Schwaz klar (15), gefolgt von Innsbruck Land (10) und Imst (8). In Lienz (3), Kitzbühel (2) und Innsbruck (1) gibt es die wenigsten im ggst. Projekt erfassten Großquellen.



**Abb. 2:** Verteilung der Großquellen auf die einzelnen Bezirke

Von den 55 Großquellen werden etwas über die Hälfte bereits zur Trinkwasserversorgung genutzt (**Abb. 3**). Dennoch besitzen nur 19 Großquellen ein Schutz- oder Schongebiet (**Abb. 4**).

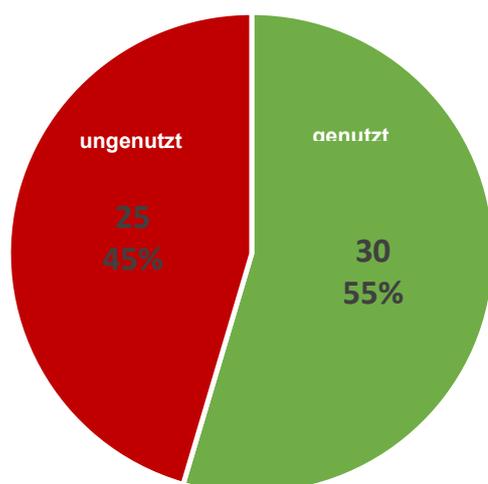


Abb. 3: Darstellung der Nutzungssituation

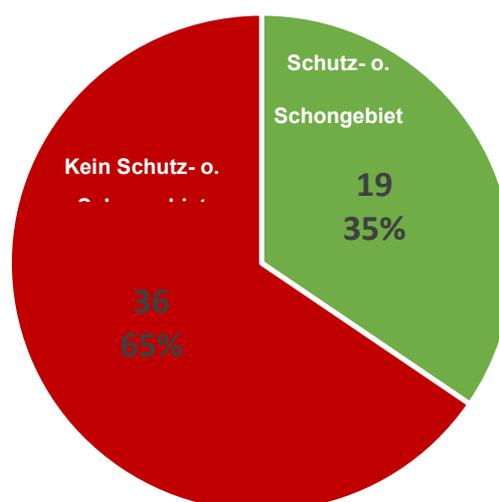


Abb. 4: Darstellung zum Quellschutz

Über 17 der 55 Quellen liegen hydrogeologische Untersuchungen vor, davon werden allein 10 durch die Projekte GQH und Ressourcenschutz Mieminger Gebirge (PLIESSNIG ET AL., 2010) abgedeckt. Bei einigen Quellen sollen laut WIS zusätzliche Untersuchungen vorliegen (insbesondere Hinteres Zillertal und Lechtal).

Auf 4 Quellen mit kont. Aufzeichnung der Vor-Ort-Parameter wird im Folgenden genauer eingegangen.

### Bettelwurfstollen – QU70301022

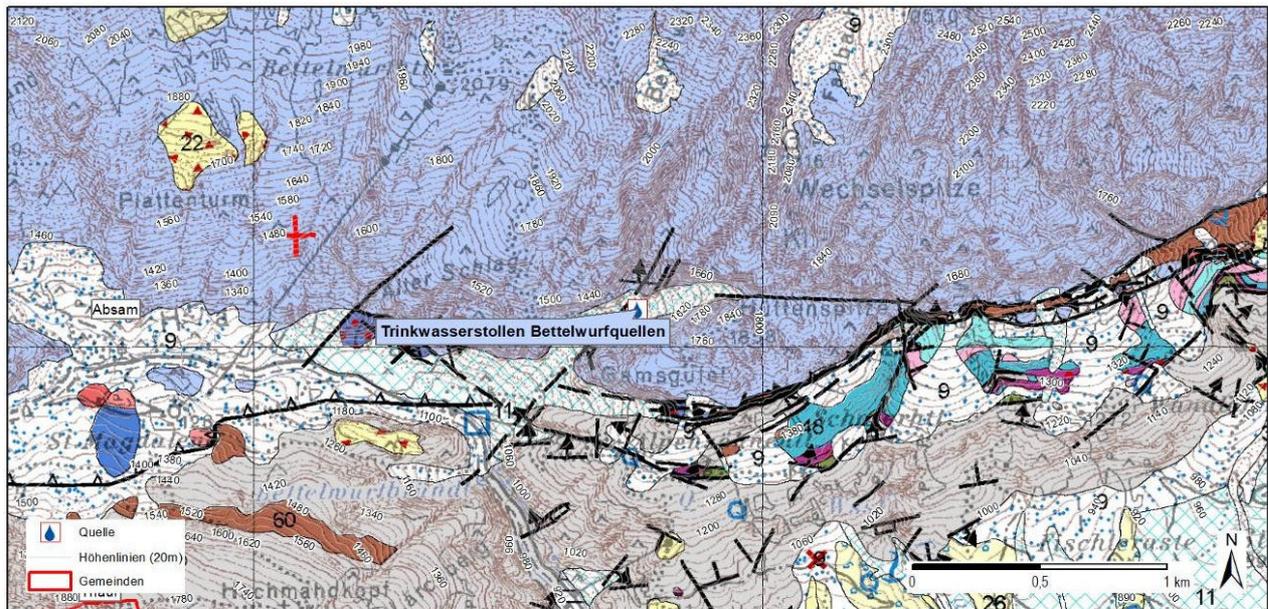
Der Bettelwurfstollen, genauer gesagt der Trinkwasserstollen Bettelwurfquellen (**Tab. 2**), befindet sich im Halltal (Gemeinde Absam) am Bettelwurfeck unterhalb der Bettelwurfreife. Der Stollen liegt auf etwa 1.010 m Seehöhe und wurde von 1995 bis 2002 errichtet.

**Tab. 2:** Stammdaten des Trinkwasserstollens Bettelwurfquellen

|                      |   |                      |   |
|----------------------|---|----------------------|---|
| Name der Messstelle: | <b>Trinkwasserstollen Bettelwurfquellen</b> | RW:                  | <b>89.512,19</b>                          |
|                      |   | HW:                  | <b>244.150,49</b>                         |
| HZB-Nummer:          | <b>396200/-218/-226</b>                     | Höhe [m ü. A.]:      | <b>1.008,70</b>                           |
| Gemeinde:            | <b>Absam</b>                                | Bezirk:              | <b>Innsbruck-Land</b>                     |
| Quellkatasternummer: | <b>QU70301022</b>                           | Grundstück (Nr./KG): | <b>2183/1</b>                             |
| Postzahl:            |   | Schutz-/Schongebiet: | <b>ja</b>                                 |
| Nutzung:             | <b>ja</b>                                   | Nutzungsart:         | <b>Trinkwasserversorgung, Wasserkraft</b> |

Die Stollenwässer werden einerseits zur Wasserversorgung u. a. der Gemeinden Absam und Hall verwendet, andererseits mehrfach wasserkrafttechnisch genutzt. Der Stollen besitzt ein Schongebiet, das zum Wasserschongebiet Inntaldecke – Karwendel gehört.

Nach dem GEOFAST-Kartenblatt 118 Innsbruck (GBA, 2013) fährt der Stollen Bergwässer im Wettersteinkalk der Inntal-Decke an, welche hier an Raibler Schichten und an Hauptdolomit der Lechtal-Decke grenzen (**Abb. 5**), wobei die Raibler Schichten als Stauer wirken.



**Abb. 5:** Geologische Übersicht zum Trinkwasserstollen (Datenquelle: GBA, 2013, GF 118 Innsbruck, GIS-Online)

In **Abb. 6** werden die Vor-Ort-Parameter des Trinkwasserstollens dargestellt. Dabei wurden die Schüttungen der drei Messstationen einzeln sowie in Summe dargestellt, WT und LF werden nur beim mittleren Stollen gemessen. Die Schüttungen weisen gewisse jahreszeitliche Schwankungen mit höheren Schüttungen zu Beginn der 2. Jahreshälfte auf (207 bis 495 l/s, Schüttungszahl von 2,4), dabei weisen alle drei Stollen eine hohe Synchronität auf. Die WT und LF sind ausgesprochen konstant (siehe auch *Tab. 3*), wobei die WT zu geringfügigen Maxima im Sommer tendiert und die LF Maxima bei hohen Schüttungen zeigt. Die WT zeigt zudem einen leicht ansteigenden Trend. Von besonderer Auffälligkeit ist das Schüttungsverhalten, da hier eine recht kontinuierliche Abnahme der Minima und Maxima zu verzeichnen ist. So liegen die Extrema etwa 100 l/s niedriger als noch zu Beginn der 2000er Jahre. Die GZÜV-Messungen bestätigen diesen Trend.

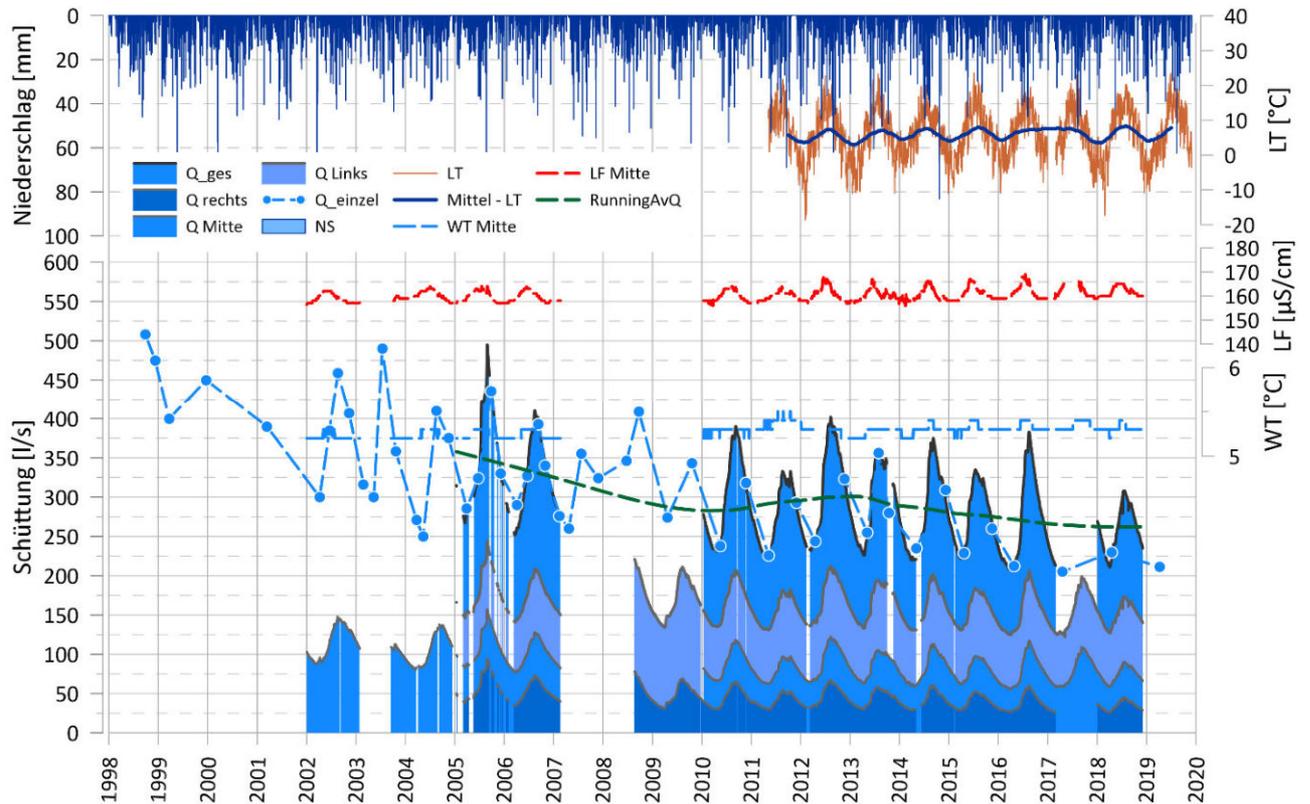


Abb. 6: Vor-Ort-Parameter Bettelwurfquellen, NS und LT der Messstation St. Martin i. G. (Datenquelle: HD Tirol)

Tab. 3: Zusammenfassung der Vor-Ort-Parameter des Trinkwasserstollens (WT und LF: Stollen Mitte)

| Parameter                         | Minimum | Mittel | Maximum | Quotient |
|-----------------------------------|---------|--------|---------|----------|
| Schüttung [l/s]                   | 207     | 292    | 495     | 2,4      |
| Wassertemperatur [°C]             | 5,2     | 5,3    | 5,5     | 1,1      |
| Elektrische Leitfähigkeit [µS/cm] | 156     | 160    | 169     | 1,1      |

### Mühlbachquellen 1-7 – QU70418004

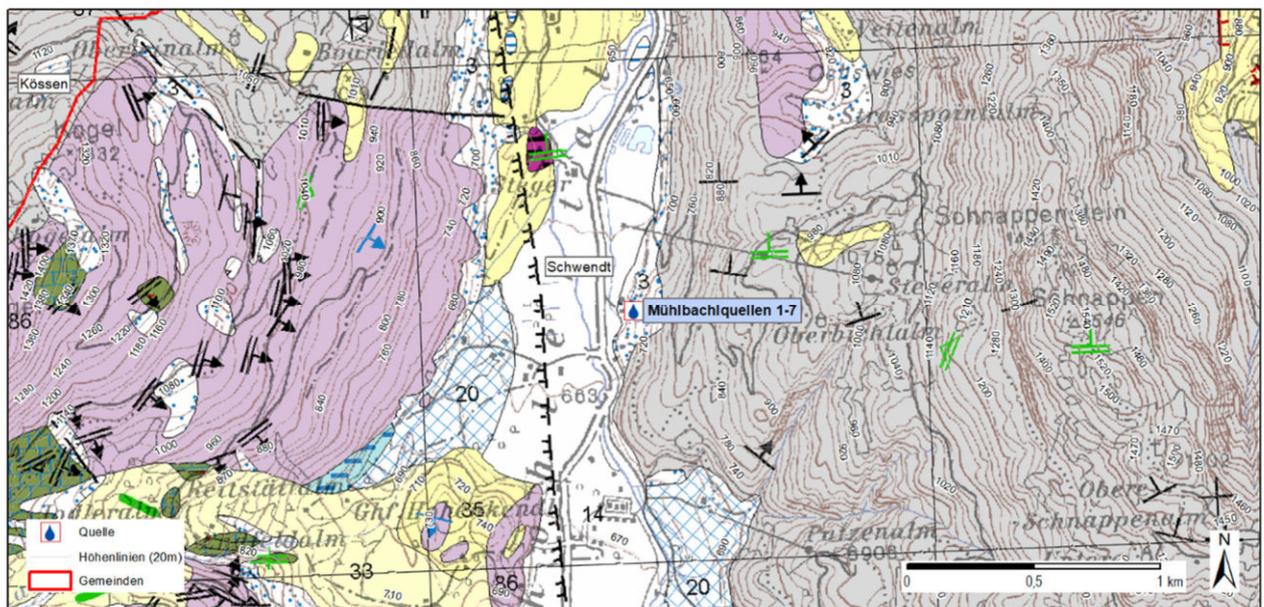
Die Mühlbachquellen (Tab. 4) befinden sich in der Gemeinde Schwendt im Bezirk Kitzbühel auf etwa 673 m Seehöhe im sogenannten Kohlental, welches sich zwischen Zahmem Kaiser und Unterberghorn in NS-Richtung erstreckt.

Tab. 4: Stammdaten der Mühlbachquellen

|                      |                            |     |                   |
|----------------------|----------------------------|-----|-------------------|
| Name der Messstelle: | <b>Mühlbachquellen 1-7</b> | RW: | <b>-71.154,82</b> |
| HZB-Nummer:          | <b>395376</b>              | HW: | <b>275.000,46</b> |
|                      |                            |     | <b>673,37</b>     |

|                      |                   |                      |                    |
|----------------------|-------------------|----------------------|--------------------|
|                      |                   | Höhe [m ü. A.]:      |                    |
| Gemeinde:            | <b>Schwendt</b>   | Bezirk:              | <b>Kitzbühel</b>   |
| Quellkatasternummer: | <b>QU70418004</b> | Grundstück (Nr./KG): | <b>850/1</b>       |
| Postzahl:            | <b>4/2181</b>     | Schutz-/Schongebiet: | <b>nein</b>        |
| Nutzung:             | <b>ja</b>         | Nutzungsart:         | <b>Wasserkraft</b> |

Die Mühlbachquellen entspringen einem isolierten Stock des Kaisergebirges (Unterberghorn), der nach der Geologischen Karte Blatt 91 St. Johann in Tirol (GBA, 2008) primär aus Hauptdolomit aufgebaut ist (**Abb. 7**). Sie befinden sie sich am orographisch rechten Talrand, wo sie aus dem Hangschutt austreten. Es handelt sich damit nicht um einen Austritt aus dem Talgrundwasser, sondern um in einem Quellhorizont austretendes Schichtwasser (gemäß WIS). Der Großteil des vermuteten EZG ist demnach aus Hauptdolomit aufgebaut.



**Abb. 7:** Geologische Übersicht der Mühlbachquellen (Datenquelle: GBA, 2008, GK 91 St. Johann in Tirol)

In **Abb. 8** werden die Vor-Ort-Parameter der Mühlbachquellen dargestellt. Die Schüttung weist zwar eine klare Saisonalität mit höheren Werten von Frühjahr (Schneesmelze) bis Herbst auf, jedoch sind die Schwankungen recht gering (219 bis 360 l/s, Schüttungszahl von 1,6). Die WT ist von allen Quellen am konstantesten – sie veränderte sich in 16 Jahren Messreihe nur um maximal 0,1 °C – was für einen äußerst geringen Oberflächeneinfluss spricht (siehe auch Tab. 5). Umso auffälliger ist die starke Saisonalität der LF, die im Jahresverlauf um mehr als 250 µS/cm schwankt, einen sehr geglätteten Kurvenverlauf zeigt und mit den ersten Schüttungmaxima des Jahres ihr Maximum erreicht (bzw. den Maxima etwas voraus ist). Auffällig ist auch die Schüttung, da sie nach HD Tirol zuletzt einen steigenden Trend aufwies, jedoch die

Messungen nach GZÜV häufig signifikante Abweichungen zeigen. Auch scheinen die GZÜV-Messungen vor 2003 auf einem höheren Niveau.

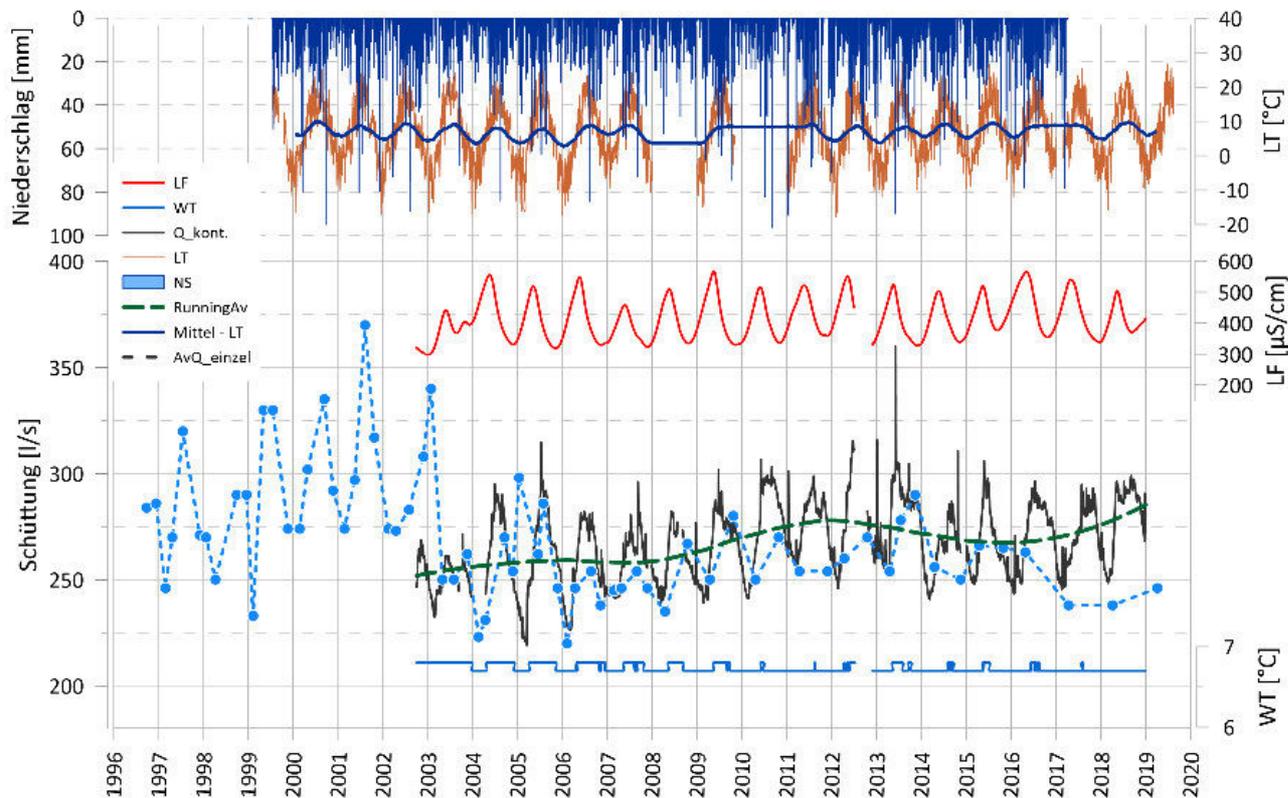


Abb. 8: Vor-Ort-Parameter der Mühlbachquellen, NS und LT der Station Griesner Alm (Datenquelle: HD Tirol)

Tab. 5: Zusammenfassung der Vor-Ort-Parameter der Mühlbachquellen

| Parameter                         | Minimum | Mittel | Maximum | Quotient |
|-----------------------------------|---------|--------|---------|----------|
| Schüttung [l/s]                   | 219     | 267    | 360     | 1,6      |
| Wassertemperatur [°C]             | 6,7     | 6,7    | 6,8     | 1,0      |
| Elektrische Leitfähigkeit [µS/cm] | 298     | 414    | 568     | 1,9      |

### Katzensteigquelle – QU70907005

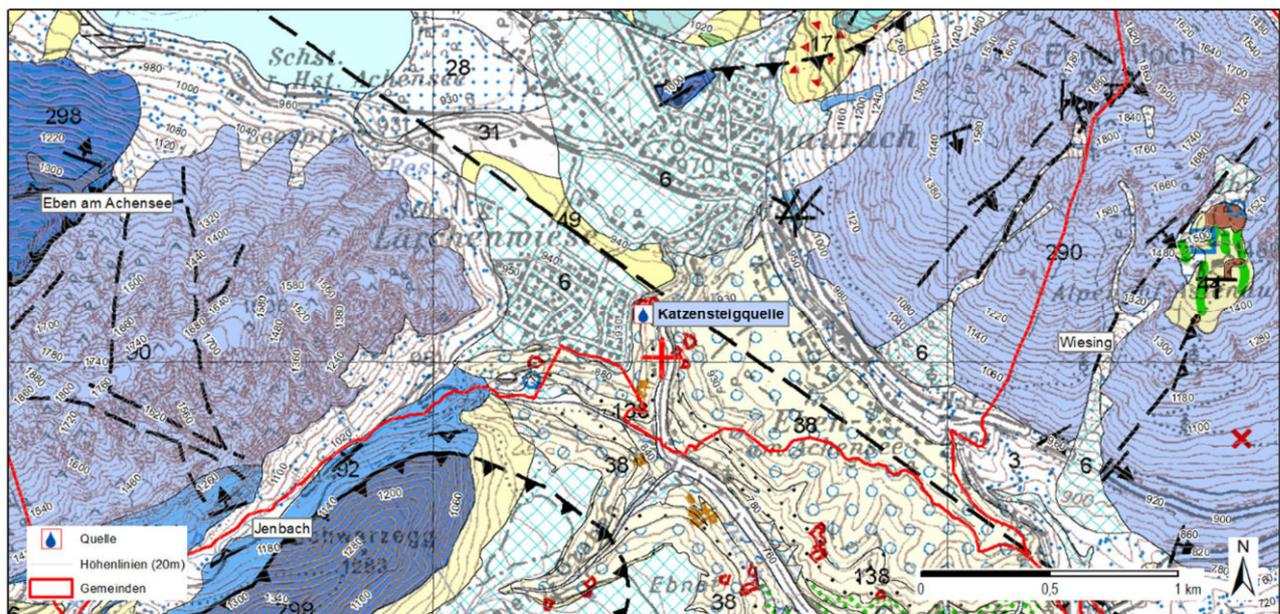
Die Katzensteigquelle (vormals Kasbachquellen, Tab. 6) befindet sich im Süden der Gemeinde Eben am Achensee im Kasbachgraben orographisch rechts des gleichnamigen Baches. Sie befindet sich in etwa 878 m Seehöhe, in ihrem Umfeld treten noch eine Vielzahl weiterer Quellen aus.

Tab. 6: Stammdaten zur Katzensteigquelle

|                      |                          |     |                   |
|----------------------|--------------------------|-----|-------------------|
| Name der Messstelle: | <b>Katzensteigquelle</b> | RW: | <b>106.822,18</b> |
|----------------------|--------------------------|-----|-------------------|

|                      |                         |                      |                   |
|----------------------|-------------------------|----------------------|-------------------|
| HZB-Nummer:          | <b>395418</b>           | HW:                  | <b>254.185,64</b> |
|                      |                         | Höhe [m ü. A.]:      | <b>877,61</b>     |
| Gemeinde:            | <b>Eben am Achensee</b> | Bezirk:              | <b>Schwaz</b>     |
| Quellkatasternummer: | <b>QU70907005</b>       | Grundstück (Nr./KG): | -                 |
| Postzahl:            |                         | Schutz-/Schongebiet: | <b>nein</b>       |
| Nutzung:             | <b>nein</b>             | Nutzungsart:         | -                 |

Die Katzensteigquelle tritt an einem steilen Hang aus, der nach GEOFAST-Kartenblatt 119 Schwaz (GBA, 2008) aus postglazialen Schottern aufgebaut ist (**Abb. 9**). Darüber befindet sich ein Schwemmfächer. Nach den Ergebnissen der GQH Jenbach (WVT, 1994) kommt das Wasser der Kasbachquellen entweder primär aus Karstwässern des Rofan und/oder mineralisch angereicherten Wässern des Achensees. Weitere Informationen finden sich im Endbericht zur Großquellenhydrogeologie Jenbach (u.a. WVT, 1994).



**Abb. 9:** Geologische Übersicht zur Katzensteigquelle (Datenquelle: GBA, 2008, GF 119 Schwaz, GIS-Online)

In **Abb. 10** werden die Vor-Ort-Parameter der Katzensteigquelle dargestellt. Die Schüttung weist eine ausgeprägte Saisonalität mit Maxima in der zweiten Jahreshälfte und Minima im Winter/Frühjahr auf. Sie schwankt mäßig stark (65 bis 257 l/s) und hat eine Schüttungszahl von 4 (siehe auch **Tab. 7**). Die LF zeigt eine ausgeprägte Saisonalität mit Maxima bei hoher Schüttung, die WT verhält sich gleichermaßen, schwankt im Jahresverlauf aber nur um max. 0,4 °C. Sowohl LF als auch insbesondere WT zeigen einen steigenden Trend. Die WT liegt mittlerweile 0,7-0,8 °C höher als noch 2004. Die Minima der Schüttung variieren ausgesprochen stark (zwischen 125 und 65 l/s), wobei kein klarer Trend erkennbar ist, aber zumindest ist das Schüttungsniveau etwas niedriger als vor 2003.

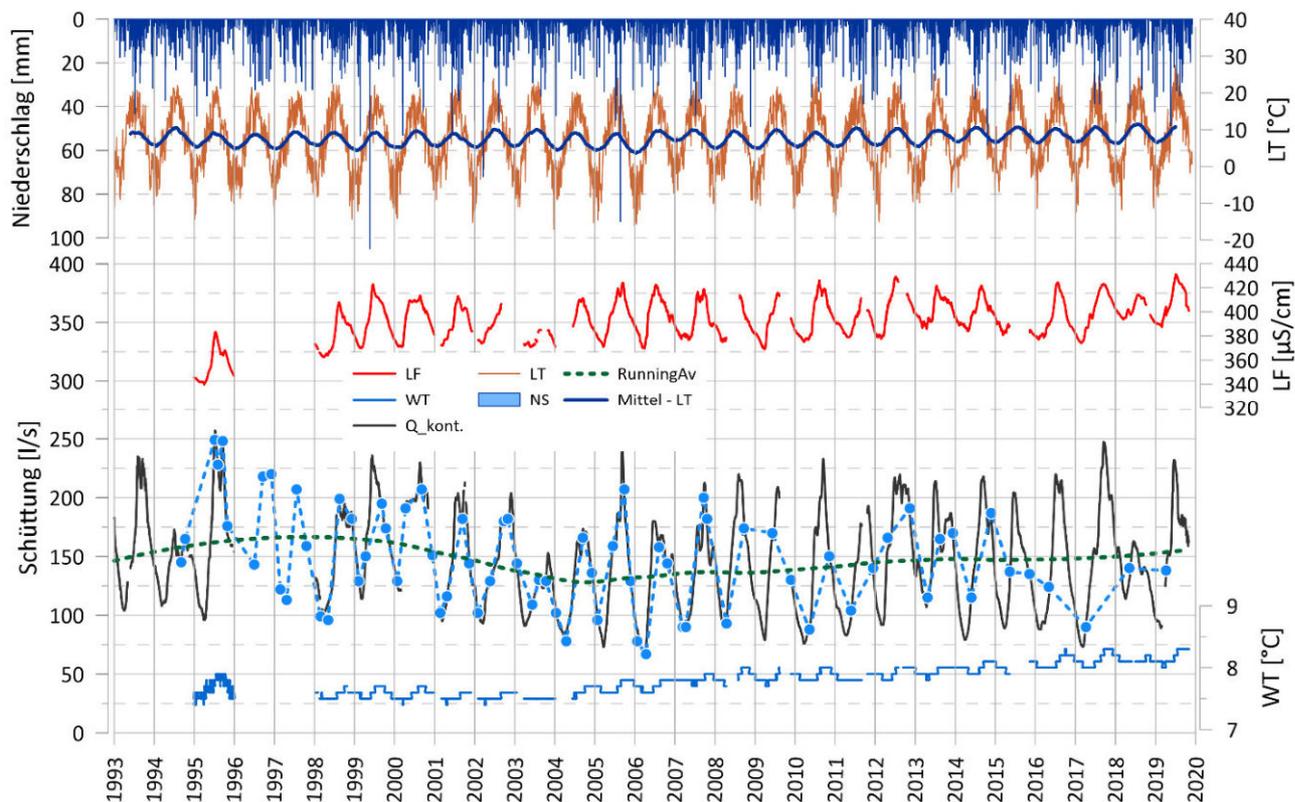


Abb. 10: Vor-Ort-Parameter der Katzensteigquelle, NS und LT der Station Schwaz (Datenquelle: HD Tirol)

Tab. 7: Zusammenfassung der Vor-Ort-Parameter der Katzensteigquelle

| Parameter                         | Minimum | Mittel | Maximum | Quotient |
|-----------------------------------|---------|--------|---------|----------|
| Schüttung [l/s]                   | 65      | 146    | 257     | 4,0      |
| Wassertemperatur [°C]             | 7,4     | 7,8    | 8,3     | 1,1      |
| Elektrische Leitfähigkeit [µS/cm] | 340     | 393    | 431     | 1,3      |

**Bollenbachquelle – QU70936004**

Die Bollenbachquelle (Tab. 8) befindet sich im „Vomper Loch“ auf dem Gemeindegebiet von Vomp orographisch links des Vomperbaches unterhalb des Wehrs der Oberstufe WK-Vomperbach.

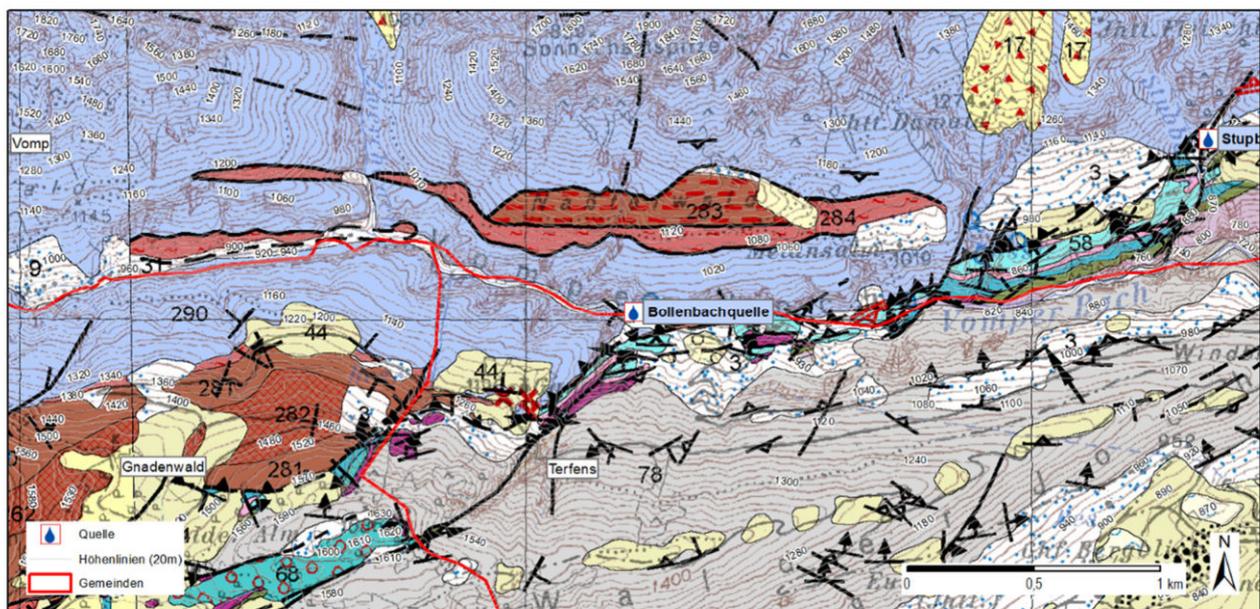
Tab. 8: Stammdaten der Bollenbachquelle

|                      |                         |                 |                |
|----------------------|-------------------------|-----------------|----------------|
| Name der Messstelle: | <b>Bollenbachquelle</b> | RW:             | <b>96.430</b>  |
| HZB-Nummer:          | <b>395459</b>           | HW:             | <b>246.030</b> |
|                      |                         | Höhe [m ü. A.]: | <b>852</b>     |

|                      |                   |                      |                    |
|----------------------|-------------------|----------------------|--------------------|
| Gemeinde:            | <b>Vomp</b>       | Bezirk:              | <b>Schwaz</b>      |
| Quellkatasternummer: | <b>QU70936004</b> | Grundstück (Nr./KG): | <b>2659</b>        |
| Postzahl:            |                   | Schutz-/Schongebiet: | <b>nein</b>        |
| Nutzung:             | <b>ja</b>         | Nutzungsart:         | <b>Wasserkraft</b> |

Die Quelle ist laut WIS bislang ungenutzt, wird aber laut GQH Vomp (WVT, 1994) dem Kraftwerksstollen zugeführt, das E-Werk soll ein Wasserbezugsrecht bis 17.09.26 haben (WIS bestätigt dies).

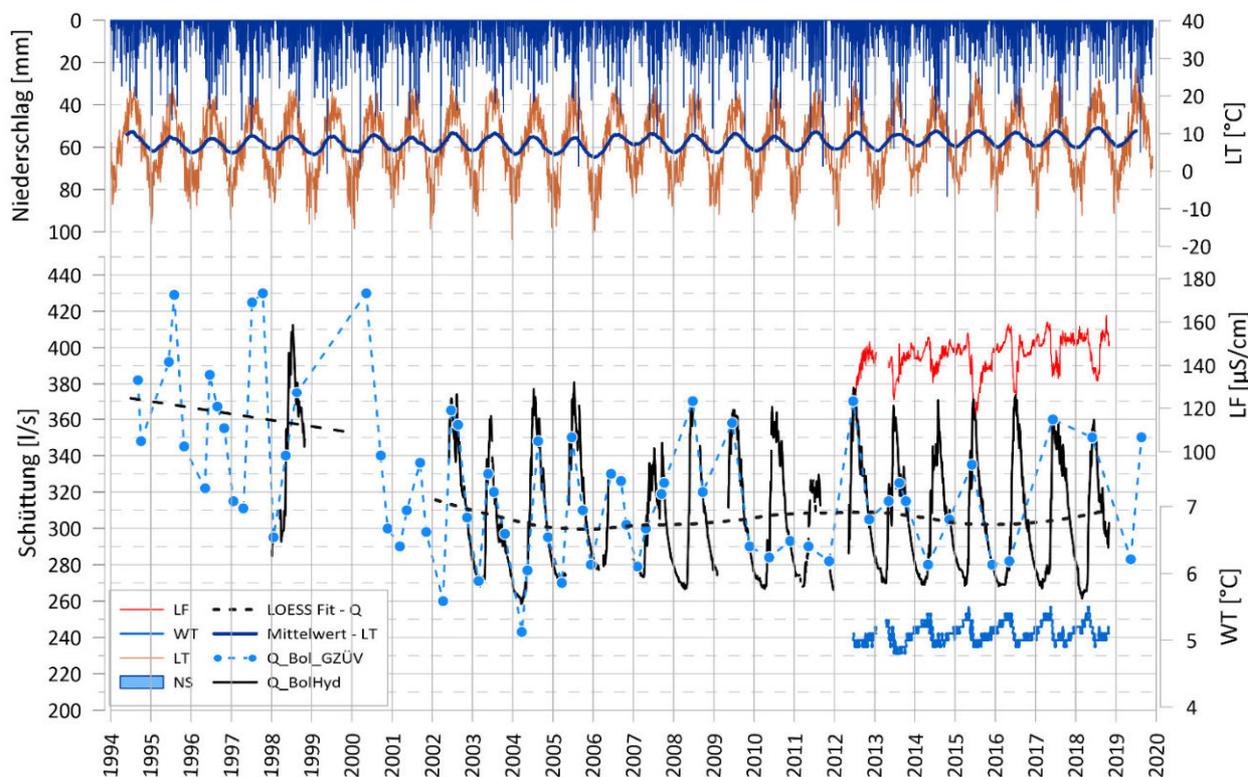
Die Bollenbachquelle befindet sich wie z.B. auch der Trinkwasserstollen Bettelwurfquellen an der Grenze von Inntal- und Lechtal-Decke, wo die Raibler Schichten im Liegenden die vielzitierte „Badewanne Karwendel“ abdichten. Unmittelbar südlich schließt sich hier Hauptdolomit der Lechtal-Decke an. Das EZG ist etwa 15 km<sup>2</sup> groß und erstreckt sich über den Hochnissl bis westlich des Vomper Lochs (WVT, 1994). Weitere Informationen finden sich in den umfassenden Untersuchungen der Großquellenhydrogeologie Vomp aus den 90er Jahren (u.a. WVT, 1994).



**Abb. 11:** Geologische Übersicht zur Bollenbachquelle (Datenquelle: GBA, 2008, GF 119 Schwaz, GIS-Online)

In **Abb. 12** werden die Vor-Ort-Parameter der Bollenbachquelle dargestellt. Die Schüttung weist eine ausgeprägte Saisonalität mit Maxima im Sommer und Minima im Winter/Frühjahr. Sie schwankt allerdings nur gering zwischen 258 und 413 l/s und hat somit eine Schüttungszahl von 1,6 (siehe auch **Tab. 9**). Die LF zeigt eine gewisse Saisonalität mit Minima bei hoher Schüttung, die WT zeigt ebenfalls eine Saisonalität, allerdings mit Maxima bei Niederwasser im Winter und Minima bei starker Schüttung im Sommer, schwankt allgemein nur sehr geringfügig. Die LF und WT zeigen einen steigenden Trend.

Die Schüttung zeigt gewisse Auffälligkeiten. Die Datenlücke zwischen dem Beginn der kont. Aufzeichnung 1998 der Zeitreihe ab 2002 entstand aufgrund von Vermurungen und anderen Mess-Störungen. In diesem Zeitraum liegt eine wesentliche Änderung im EZG vor, da die Schüttung eine klare Abnahme sowohl der Minima als auch Maxima zeigt. Das ist ebenfalls aus den GZÜV-Daten ersichtlich, welche auch während der Datenlücke vorliegen und eine Verringerung der Maxima um 50-60 l/s und der Minima um 30-40 l/s anzeigen. Bei genauer Betrachtung der Daten fällt auf, dass hier eine recht plötzliche Veränderung eingetreten ist, da zumindest die Messung 1/2000 wohl noch das „alte“ Maximalniveau anzeigt, Messung 1/2002 dann spätestens ein neues Minimalniveau. Schon die Messwerte aus 2001 sind auffällig niedrig. Ein auslösendes Ereignis wäre demzufolge Mitte 2000 bis Ende 2001 zu suchen.



**Abb. 12:** Vor-Ort-Parameter der Bollenbachquelle, NS, LT der Station Schwaz (Datenquellen: HD Tirol)

**Tab. 9:** Zusammenfassung der Vor-Ort-Parameter der Bollenbachquelle

| Parameter                         | Minimum | Mittel | Maximum | Quotient |
|-----------------------------------|---------|--------|---------|----------|
| Schüttung [l/s]                   | 258     | 307    | 413     | 1,6      |
| Wassertemperatur [°C]             | 4,8     | 5,1    | 5,5     | 1,1      |
| Elektrische Leitfähigkeit [µS/cm] | 115     | 145    | 163     | 1,4      |

## **Zusammenfassung**

### **Bettelwurfstollen**

Der Trinkwasserstollen Bettelwurfquellen zeigt eine klare Abnahme der zuströmenden Wassermenge. So ist die Minimalschüttung der drei Stollen seit Anfang der Messreihe um wenigstens 1/3 zurückgegangen (von etwa 300 auf 200 l/s). Zeitgleich gibt es zumindest bei der WT einen leicht ansteigenden Trend.

### **Mühlbachquellen**

Bei den Mühlbachquellen zeigen alle drei Vor-Ort-Parameter besondere Auffälligkeiten. Die Quelle hat von allen betrachteten die vierthöchste Minimalschüttung, zudem halten die Maxima im Sommer erstaunlich lange an – als gäbe es ein Sommer- und ein Winterniveau. Die WT ist von allen Quellen am gleichförmigsten, schwankt in 16 Jahren nur um 0,1 °C, was für quasi nicht vorhandenen Oberflächeneinfluss und Tiefenzirkulation sowie lange Verweilzeiten spricht. Die LF hingegen weist eine ausgesprochen starke Saisonalität auf und ist positiv an die Schüttung gekoppelt. Die Unterschiede der LF werden wohl durch Gipslösung verursacht, die bei höherer Schüttung (höherem Bergwasserspiegel) verstärkt auftritt. Trends lassen sich bei WT und LF nicht erkennen, die Schüttung weist auffällige Schwankungen und Abweichungen zwischen GZÜV- und HD-Werten, was auch an der Messsituation vor Ort liegen könnte.

### **Katzensteigquelle**

Die Katzensteigquelle zeigt in Hinblick auf die Schüttung ein von Jahr zu Jahr verschiedenes Niveau der Mindestschüttung, die um bis zu 60 l/s variiert, und zudem bis 2004 einen abnehmenden, dann einen eher ansteigenden Trend. Die LF steigt leicht, die WT hingegen signifikant. Die Ursachen dafür sind unklar, dazu müsste abschließend geklärt werden, aus welcher Richtung und wie die Quelle angeströmt wird, was laut Endbericht der GQH Jenbach von 1994 noch offen war.

### **Bollenbachquelle**

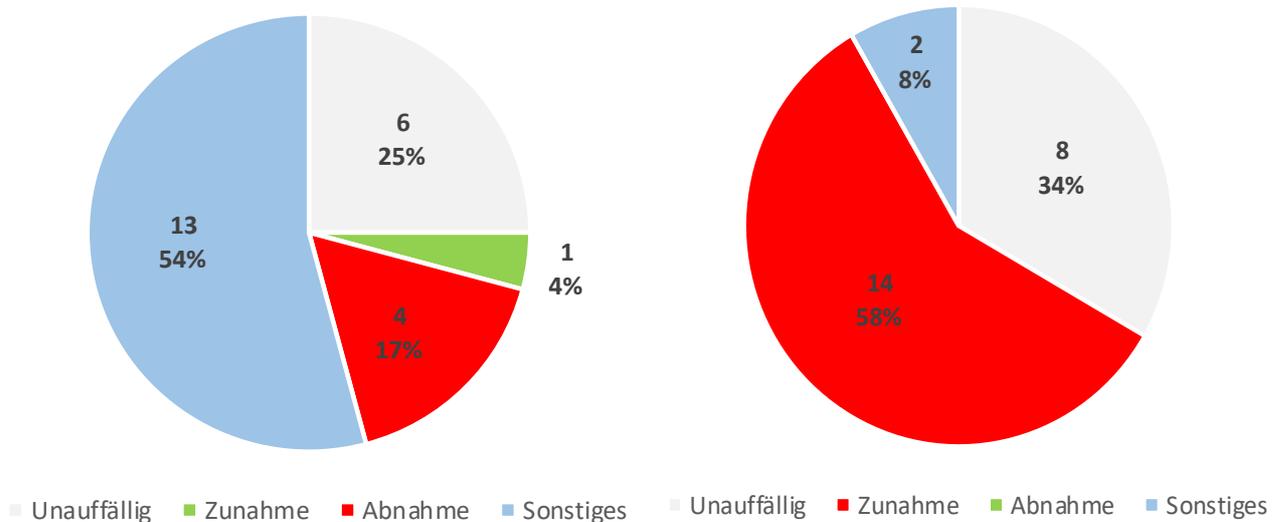
Die Bollenbachquelle zeigt in Hinblick auf die Schüttung eine klare Abnahme, die wohl eher als Einzelereignis denn als kont. Trend zwischen 2000 und 2002 stattgefunden hat. Infolgedessen fehlen der Bollenbachquelle etwa 30-40 l/s ihrer Mindestschüttung, es ist keine Regeneration erkennbar. Obgleich bereits damals Ursachenforschung betrieben wurde, scheint der Sachverhalt nicht zur Gänze abgeklärt worden zu sein. Dessen ungeachtet stellt die Bollenbachquelle eine ausgesprochen wertvolle Wasserressource dar, was sich auch in der Konstanz von WT und LF zeigt, die auf einen geringen Oberflächeneinfluss hinweisen. Mit ihrer Mindestschüttung von 258 l/s liegt die Quelle an dritter Stelle der Großquellen Tirols.

## **Trends**

In **Abb. 13** wird die Schüttungsentwicklung der 24 vom HD kontinuierlich gemessenen Quellen zusammengefasst. Dabei (und auch im Folgenden bei WT und LF) wird einmal in „auffällig“ und „unauffällig“ untergliedert, wobei bei „auffällig“ noch genauer in „Zunahme“, „Abnahme“ und „Sonstiges“ unterschieden wird. Zunahme und Abnahme wurden nur dann ausgewiesen, wenn klare Trends erkennbar waren. Eine

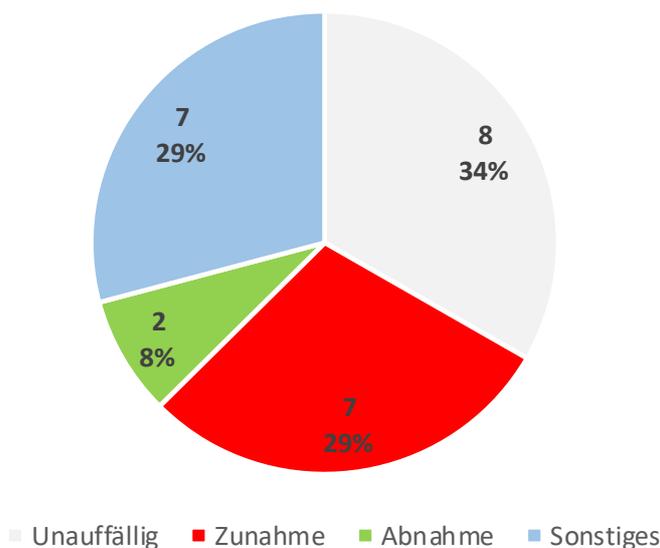
Zunahme ließ sich lediglich bei den Lareinsonntagspleisquellen feststellen, Abnahmen bei den Brunauer Quellen, dem Trinkwasserstollen Bettelwurf, den Sauwinkelquellen und der Bollenbachquelle. Unter „Sonstiges“ wurden Auffälligkeiten wie starke Schwankungen, mögliche mehrjährige Zyklizitäten, Unklarheiten etc. zusammengefasst.

**Abb. 14** zeigt die zusammengefasste Temperaturentwicklung der vom HD Tirol gemessenen Quellen. 14 von 24 Quellen zeigen eine klar steigende Tendenz, zwei weisen sonstige Auffälligkeiten auf. Der Anstieg ist dabei geringer als z.B. zuletzt bei Grundwassermessstellen beobachtet und beträgt maximal 0,04 °C pro Jahr bei den Sauwinkelquellen bzw. 0,03 °C pro Jahr bei der Katzensteigquelle.



**Abb. 13:** Schüttungsentwicklung

**Abb. 14:** Temperaturentwicklung



**Abb. 15:** Entwicklung der Leitfähigkeit

In **Abb. 15** wird abschließend die Entwicklung der elektrischen Leitfähigkeit der 24 Quellen mit kontinuierlicher Messung dargestellt. Dabei weisen zwei Quellen eine klare Abnahme und sieben eine klare Zunahme auf. Weitere sieben Quellen zeigen sonstige Auffälligkeiten wie starke Saisonalität, mehrjährige Zyklen und anderweitige Abweichungen.

## **Schlussfolgerungen/Diskussion**

Auf Basis der gegenständlichen Datenerhebungen lässt sich festhalten, dass sich ein aufgrund verminderter Grundwasserneubildung durch Klimawandel häufig befürchteter Rückgang von Quellschüttungen bis dato nur bei sehr wenigen Quellen klar abzeichnen könnte. Und auch bei diesen können direkte anthropogene Einflüsse aufgrund von Infrastrukturmaßnahmen anstelle von Einflüssen des Klimawandels nicht ausgeschlossen werden.

Bei der elektrischen Leitfähigkeit (als ein Sammelparameter für die Hydrochemie) und insbesondere bei der Wassertemperatur sind klimatische Einflüsse hingegen bei einer Vielzahl an Quellen klar erkennbar – damit bestätigen sich auch bei den Quelltemperaturen Trends, welche bei Luft-, Oberflächenwasser- und Grundwassertemperatur schon vielfach wissenschaftlich behandelt wurden (z. B. RODIONOV, 2004; NORTH et al., 2013; MENBERG et al., 2014; BENZ et al., 2017; BENZ et al., 2018). Wieso allerdings nur bestimmte Quellen bereits seit längerer Zeit diese Trends aufweisen, andere jedoch nicht, lässt sich zumindest auf Basis dieser Grundlagendatenerhebung noch nicht ersehen. Den im Alpenen Raum signifikanten mikroklimatischen Effekten kommt wahrscheinlich auch hierbei eine gewichtige Rolle zu.

Auch wenn sich bei den Schüttungsmengen noch keine durchgängigen Trends ergeben, so zeigen doch jeweilige Auffälligkeiten und insbesondere auch die Trends bei WT und LF, dass sich Änderungen der atmosphärischen Gegebenheiten bereits deutlich niederschlagen. Damit ist auch nicht ausgeschlossen, dass in manchen Gebieten zukünftig Änderungen des Schüttungsverhaltens auftreten können. Um diese Prozesse genauer zu verstehen und idealerweise prognostizieren zu können, sind Detailanalysen notwendig.

Vor dem Hintergrund steigenden Nutzungsdrucks auf die vorhandenen Wasserressourcen, der sich aus dem Bevölkerungswachstum, steigendem Tourismus, zunehmendem Bedarf an Wasser für die Landwirtschaft etc. ergibt, sowie den Prognosemodellen in Bezug auf die klimatische Entwicklung, kommt der genauen Kenntnis und der Sicherung strategisch wichtiger Wasserressourcen als Grundlage einer gesicherten zukünftigen Wasserversorgung in jedem Fall eine essenzielle Stellung zu.

Um für diese Entwicklungen gerüstet zu sein und auch in Notsituationen über wirksame Instrumente einer gesicherten Wasserversorgung zu verfügen und damit bestmöglich agieren und nicht nur reagieren zu können, erscheinen längerfristige, vorausschauende Maßnahmen erforderlich.

Die detaillierten Maßnahmen können aus Ansicht der Autoren Aus diesen und weiteren Detailerwägungen werden folgende Maßnahmenpakete vorgeschlagen:

- **VERTIEFTE RESSOURCENERKUNDUNG (Dargebot)**
- **ABSCHÄTZUNG DER LANGFRISTIGEN BEDARFSENTWICKLUNG (Bedarf)**
- **ENTWICKLUNG NACHHALTIGER NUTZUNGSKONZEPTE (Bedarfsdeckung)**
- **SCHUTZ UND SICHERUNG DER STRATEGISCH WICHTIGEN WASSERRESSOURCEN (Schutz)**
- **VERNETZUNG UND ÖFFENTLICHKEITSARBEIT (Bewusstsein)**

## Literaturverzeichnis

- AdTLR (2015): Sachstandsbericht Klimawandel in Tirol.
- Benz, S. A., Bayer, P., & Blum, P.: Global patterns of shallow groundwater temperatures, *Environmental Research Letters*, 12, 034005, 2017a
- Benz, S. A., Bayer, P., Winkler, G., & Blum, P.: Recent trends of groundwater temperatures in Austria, *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, <https://doi.org/10.5194/hess-2017-663>, in review, 2017b
- Blöschl, G., Blaschke, A. P., Haslinger, K., Hofstätter, M., Parajka, J., Salinas, J., & Schöner, W. (2018). Auswirkungen der Klimaänderung auf Österreichs Wasserwirtschaft – ein aktualisierter Statusbericht. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft. <https://doi.org/10.1007/s00506-018-0498-0>
- Chimani B., Heinrich G., Hofstätter M., Kerschbaumer M., Kienberger S., Leuprecht A., Lexer A., Peßenteiner S., Poetsch M.S., Salzmann M., Spiekermann R., Switanek M. und H.Truhetz (2016). ÖKS15 – Klimaszenarien für Österreich. Daten, Methoden und Klimaanalyse. Projektendbericht, Wien.
- Geologische Bundesanstalt (2007): GF-Kartenblatt 91 St. Johann in Tirol
- Geologische Bundesanstalt (2013): GF-Kartenblatt 118 Innsbruck
- Geologische Bundesanstalt (2008): GF-Kartenblatt 119 Schwaz
- Hiebl, J., & Frei, C. (2018). Daily precipitation grids for Austria since 1961—development and evaluation of a spatial dataset for hydroclimatic monitoring and modelling. *Theoretical and Applied Climatology*, 132(1–2), 327–345. <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2093-x>
- Lechner, K., Ribis, M. & Poscher, G. (2019): Großquellen der Kluft- und Karstgrundwasserleiter im Karwendel (Nördliche Kalkalpen, Tirol). *Grundwasser - Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie* **25**, 71–80 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00767-019-00440-z>
- Menberg, K., Blum, P., Kurylyk, B. L., and Bayer, P. (2014): Observed groundwater temperature response to recent climate change, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 18, 4453–4466, <https://doi.org/10.5194/hess-18-4453-2014>, 2014.
- North, R.P., Livingstone, D.M., Hari, R.E. et al. (2013): The physical impact of the late 1980s climate regime shift on Swiss rivers and lakes. *Int Waters* 3:341–350. <https://doi.org/10.5268/IW-3.3.560>
- Pliessnig, H., Spiegelhalter, K., Stubenböck, E., Waldner, A. (2010): Ressourcenschutz Mieminger Gebirge – Endbericht
- Rodionov, S.N., 2004: [A sequential algorithm for testing climate regime shifts](#). *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L09204, doi:10.1029/2004GL019448
- Vergeiner, J., Drechsel, S., Haslinger, K (2016): Klimatrends im Alpenen Raum – Was wir über die Vergangenheit wissen und wie wir uns die Zukunft vorstellen. Geoforum Umhausen 2016, Tagungsband
- Wagner, T., Themeßl, M., Schüppel, A., Gobiet, A., Stigler, H., Birk, S. (2017): Impacts of climate change on stream flow and hydro power generation in the Alpine region
- WVT (1993): WVT-Projekt Großquellenhydrogeologie Haiming – 1. Zwischenbericht März 1993
- WVT (1994a): WVT-Projekt Großquellenhydrogeologie Jenbach, Endbericht Phase 1
- WVT (1994b): WVT-Projekt Großquellenhydrogeologie Vomper Loch, Endbericht
- WVT (1994c): WVT-Projekt Großquellenhydrogeologie Erl, Endbericht

## Temporäre Entwicklung der Dichteschichtung in einem gefluteten Bergwerksschacht eines Gold-Kleinbergbaus in Biberwier/Tirol

Christian Wolkersdorfer<sup>1,2</sup>, Elke Mugova<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Environmental, Water and Earth Sciences, Tshwane University of Technology, Private Bag X680, Pretoria, 0001, Südafrika; <sup>2</sup>Weidach 16, 6632 Ehrwald/Tirol; christian@wolkersdorfer.info, ORCID: 0000-0003-2035-1863

<sup>3</sup>Technische Hochschule Georg Agricola (THGA), Forschungszentrum Nachbergbau, Herner Straße 45, 44787 Bochum, Deutschland, elke.mugova@thga.de, ORCID: 0000-0001-6019-9945

### Zusammenfassung

Zur Untersuchung von Dichteschichtung in gefluteten Untertagebergwerken wurde der 10 m tiefe Nikolaus-Bader-Schacht in Biberwier/Tirol ausgepumpt und der darauffolgende Flutungsverlauf beobachtet. Nach kurzer Zeit bildete sich eine Dichteschichtung aus, welche im Herbst zusammenbrach und sich im Frühjahr erneut ausbildete. Datenlogger für Druck, Temperatur und elektrische Leitfähigkeit in vier verschiedenen Teufen des gefluteten Schachtes erlauben eine Langzeitüberwachung des Wasserkörpers, woraus Rückschlüsse über zeitliche Faktoren zur Ausbildung und Zusammenbruch von Dichteschichtung gewonnen werden können.

### Abstract

To investigate density stratification in flooded underground mines, the 10 m deep Nikolaus-Bader shaft in Biberwier/Tyrol was pumped out and the subsequent flooding process was observed. After a short time, a density stratification formed, which collapsed in autumn and built up again in spring. By means of data loggers for pressure, temperature and electrical conductivity in four different depths of the flooded shaft, a long-term monitoring of the water body is possible, from which conclusions can be drawn about temporal factors for the formation and collapse of density stratification.

### Einleitung

In den 1920er bis 1940er Jahre suchte der Lermooser Nikolaus Bader im Moränenmaterial des Fernpassbergsturzes nach Gold und teufte im Rahmen dieses Vorhabens einen 10 m tiefen Schacht nahe der Loisachquellen bei Biberwier ab. Da es nie zu einem großmaßstäblichen Goldabbau kam, geriet der abgeworfene und geflutete Schacht in Vergessenheit und wurde erst 1999 durch Recherchen im Archiv der ehemaligen Berghauptmannschaft in Innsbruck durch Armin Hanneberg wiederentdeckt (Wolkersdorfer et al. 2007). Seit 2004 finden regelmäßige Untersuchungen der Wasserqualität, sowie Tiefenprofilmessungen im Schacht statt. Dabei zeigte sich, dass es in verschiedenen Teufen zur zeitlich abhängigen Ausbildung und Zusammenbruch von Dichteschichtung kommt, deren Ursachen nicht bekannt sind. Schichtung von Grubenwasser ist für weltweite Grubenflutungen von Interesse, da stabile Schichtung den Aufwand bei der Grubenwasserreinigung vermindern kann (Wolkersdorfer 2008; 2017). Hochmineralisiertes und folglich meist stärker kontaminiertes Grubenwasser verbleibt in der Regel in tieferen Bereichen des Bergwerkes und relativ gesehen weniger mineralisiertes Grubenwasser tritt oberflächennah aus (Mugova und Wolkersdorfer 2019). Da die Prozesse zur Entstehung, Langzeitstabilität und Zusammenbruch von Schichtung in einem mehrere hundert bis tausend Meter tiefen Bergwerk nur unter schwierigen Bedingungen zu erforschen sind, wurde 2019 der Nikolaus-Bader-Schacht als Untersuchungsschacht für eine Langzeitbeobachtung ausgewählt.

## Untersuchungen

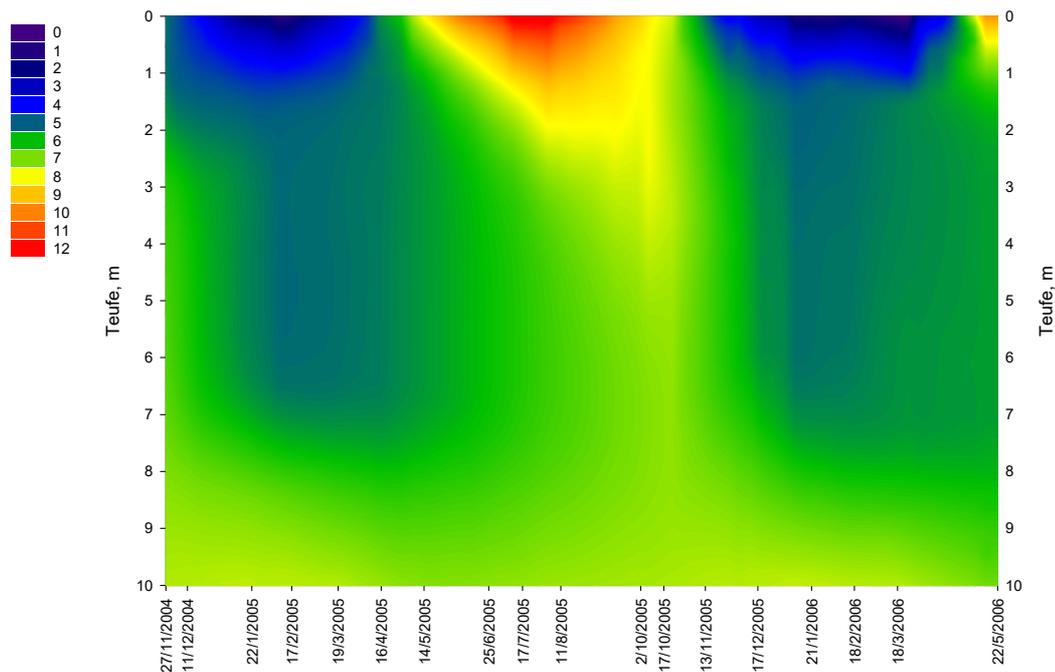
### **Beschreibung des Schachtes und vorangegangene Forschung**

Der nach dem Pharmazeuten, Bergmann und Geschäftsmann Nikolaus Bader benannte 2 × 2 m breite, 10 m tiefe und seit den 1930 Jahren geflutete Schacht befindet sich nahe der Loisachquellen bei Biberwier im Bezirk Reutte (Außerfern, Tirol) und wird durch anströmendes Grundwasser gespeist. Ein Wasseraustritt an der Tagesoberfläche ist nicht zu beobachten, sodass davon auszugehen ist, dass das Schachtwasser mit dem Grundwasser kommuniziert. Im Laufe des Versuchs zeigte sich, dass nur im Schachttiefsten Grundwasser einströmt und der alte Schachtausbau aus Holz hydraulisch weitgehend dicht ist. Im Bereich von Biberwier sind die mesozoischen Gesteine der Fernpassmulde von Material des Fernpassbergsturzes und Moränen (Till) bedeckt. Diese Moränen gehörten zu einem Gletscher, dessen Ursprung im Bereich der Schweitzer Alpen zu suchen ist, wodurch sich die Goldführung im Till erklärt (Eichhorn et al. 2017). Insgesamt liegen die Goldkonzentrationen jedoch unter der Bauwürdigkeitsgrenze, wie die Kommunikation von Nikolaus Bader mit den Behörden zeigt. Das Wasser aus dem Nikolaus-Bader-Schacht ist durch seine größere Verweil- und Kontaktzeit mit dem Geröll der Tomahügel und des Tills geringfügig höher mineralisiert als das der Loisach (Tabelle 1). Dies macht sich vor allem beim Calcium und beim Hydrogenkarbonat bemerkbar. Potenziell toxische Metalle sind im Wasser des Schachts nicht in erhöhter Konzentration enthalten; interessanterweise wies eine Wasserprobe aus dem Schachttiefsten Goldkonzentrationen über der Nachweisgrenze auf.

Teufentmessungen der elektrischen Leitfähigkeit und Temperatur, die hauptsächlich zwischen 2004 und 2006 in verschiedenen Teufen des Schachts durchgeführt wurden, zeigten eine Dichteschichtung, welche einer jahreszeitlichen Lageänderung unterliegt und teilweise ganz verschwindet (Abbildung 1). Im Mai 2019, direkt vor Beginn des Abpumpexperiments, konnte diese Dichteschichtung bestätigt werden.

**Tabelle 1:** Wasseranalysen aus dem Nikolaus-Bader-Schacht, der Loisach und der Trinkwasserfassung (2005 – 2020); EL: elektrische Leitfähigkeit; Redox: Redoxspannung korrigiert auf Standardwasserstoffelektrode

| Parameter                   | Auslauf<br>Trinkwasserversorgung<br>Biberwier | Nikolaus-Bader-<br>Schacht | Loisach ca. 300 m<br>abstromig des<br>Schachtes |
|-----------------------------|---|----------------------------|---|
| pH, –                       | 7,3 – 8,3                                     | 7,1 – 7,2                  | 7,7 – 7,9                                       |
| Redox, mV                   | 62 – 436                                      | 64 – 383                   | 62 – 426  |
| EL, $\mu\text{S}/\text{cm}$ | 365 – 406                                     | 381 – 477                  | 367 – 401                                       |
| Temp, °C                    | 7,5 – 8,7                                     | 5,7 – 9,2                  | 7,6 – 9,1                                       |
| Ca, mg/L                    | 33 – 49                                       | 64 – 68                    | 47  |
| Mg, mg/L                    | 23  | 16                         | 24  |
| Na, mg/L                    | 0,6 – 1,3                                     | 0,4                        | 1,3   |
| K, mg/L                     | 0,5   | 0,7                        | < 1   |
| Cl, mg/L                    | 4,7 – 7,4                                     | 1,1 – 3,9                  | 7,4   |
| HCO <sub>3</sub> , mg/L     | 174 – 210                                     | 240 – 255                  | 220   |
| SO <sub>4</sub> , mg/L      | 25 – 29                                       | 17 – 22                    | 30  |
| NO <sub>3</sub> , mg/L      | 1,2 – 1,4                                     | 1,0                        | 1,2   |
| U, $\mu\text{g}/\text{L}$   | 5,8 – 6,4                                     | 0,2 – 2,2                  | 5,9   |



**Abbildung 1:** Temperatur-Teufen-Diagramm im Nikolaus-Bader-Schachte mit 18 teufenabhängigen Messungen zwischen November 2004 und Mai 2006.

### **Zweck des Experiments und Durchführung**

Um den Aufbau, Zusammenbruch und vor allem die Langzeitstabilität von Schichtung in gefluteten Bergwerksschächten zu verstehen, begann im Juni 2019 im Nikolaus-Bader-Schacht eine Langzeitbeobachtung des Wasserkörpers. Zunächst wurde mittels einer Tauchpumpe der Schacht in weniger als 3 Stunden bis auf wenige Zentimeter entwässert, wobei das abgepumpte Schachtwasser in die nahe gelegene Loisach eingeleitet wurde. Wie sich zeigte, wies die im Wasser konservierte historische Schachtverbauung einen sehr guten Zustand auf, was eine Sichtkontrolle und eine Befahrung mittels Kanalkamera ermöglichte. Seitlich strömte fast kein Wasser in den Schacht ein, sondern fast ausschließlich vom nicht verbauten Bereich im Schachttiefsten, der jedoch für die Schachtkamera nicht einsehbar war. Vor Beginn des Abpumpens wurden in vier verschiedenen Teufen (0,8 m, 2,5 m, 7 m und 8 m sowie für kurze Zeit auf 9,4 m) von Essen CTD-Diver Datenlogger eingebracht, deren Lage sich an den zuvor bestimmten Schichtgrenzen innerhalb des Wasserkörpers orientierten. In 15-Minuten-Intervallen werden die Messwerte elektrische Leitfähigkeit, Wassertemperatur und Druck aufgezeichnet und mittels Datenfernübertragung bereitgestellt. Zusätzlich werden die stündlichen Daten des ca. 5 km entfernten teilautomatischen Wettererfassungssystems (TAWES) in Ehrwald ausgewertet.

### **Ergebnisse und Diskussion**

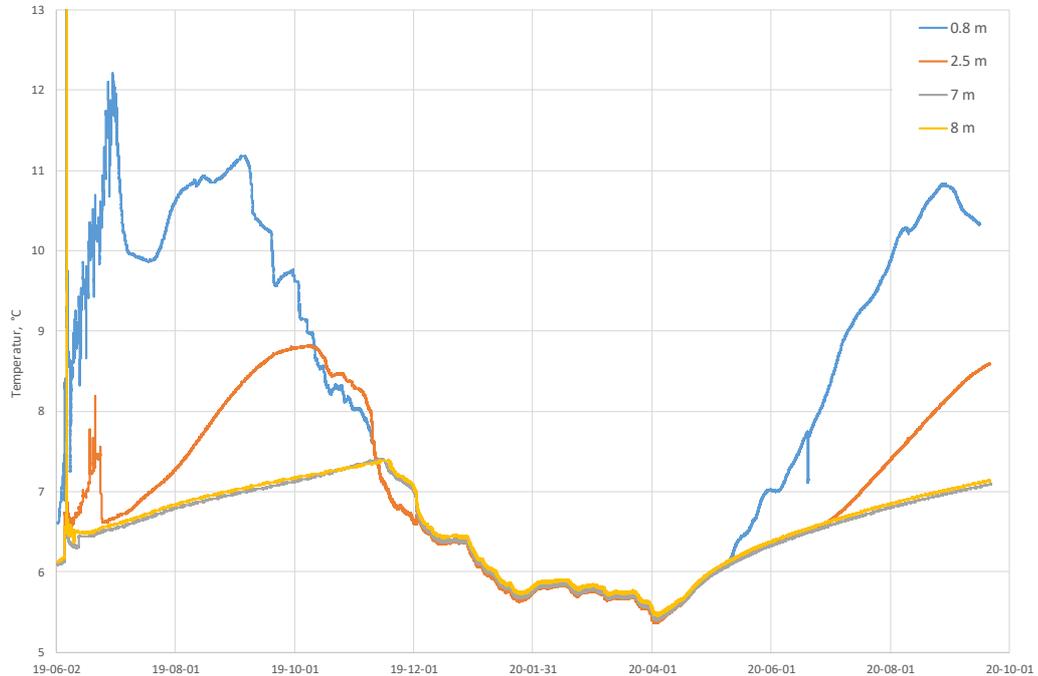
Nach Abstellen der Pumpen begann die sofortige Flutung des Schachtes in erster Linie durch Zuströme von Grundwasser im Schachttiefsten. Durch Extrapolation des Anstiegsvorganges ließ sich die Gesamtteufe des Schachts auf 9,6 bis 9,7 m schätzen. Vom ersten Datenlogger, der zunächst in 9,4 m Teufe installiert war, bis zum oberflächennahen Datenlogger in 0,8 m Teufe dauerte die natürliche Flutung ca. 25 Tage. Werden die Werte extrapoliert (10 m bis 0 m), ergibt sich eine Zeitspanne von 36 Tagen für die vollständige Flutung des Schachtes. Daraus können mittlere Anstiegsgeschwindigkeiten von 0,4 m/d (9,4 m bis 0,8 m) bzw.

0,3 m/d (10 m bis 0 m) errechnet werden, was mit den visuellen Beobachtungen am Flutungsbeginn übereinstimmt. Die Anstiegsgeschwindigkeiten variieren teufenabhängig, wobei größere Geschwindigkeiten bis 0,9 m/d in tieferen Bereichen auftreten, nahe der Tagesoberfläche aber bis auf weniger als 0,1 m/d zurückgeht. Eine mögliche Erklärung für diese Unterschiede ist im Flutungsprozess selbst und dem damit zuströmenden Wasser zu finden. Vermutlich besteht im Bereich zwischen 8,0 und 9,0 m ein verstärkter Wasserzufluss, womit das im Schacht ansteigende Wasser gespeist wird. Die Wassersäule im Schacht baut sich dadurch bis zu einer Teufe von ca. 2 m auf, jedoch wird ein weiteres schnelles Ansteigen des Wassers durch den Druck der Wassersäule verhindert. Im oberflächennahen Bereich strömt mit wesentlich geringeren Geschwindigkeiten Niederschlags- bzw. Infiltrationswasser seitlich in den Schacht, weshalb im oberen Schachtbereich die Anstiegsgeschwindigkeiten geringer sind. Anhand der berechneten Anstiegsgeschwindigkeiten wurden für den Zuflussbereich mittels  $k_f$ -Wert-Bestimmung für instationäre Pumptests  $k_f$ -Werte um  $1 \cdot 10^{-7}$  m/s ermittelt, welche im Bereich von schwach durchlässigem Material liegen (Schluff bis schluffiger Sand). Dies bestätigt, dass der Bereich des zufließenden Grundwassers in Moränenmaterial liegt, was mit den historischen Angaben von Nikolaus Bader an die Bergbehörde und dem hydrogeologischen Gutachten von Schuch (1981) entspricht.

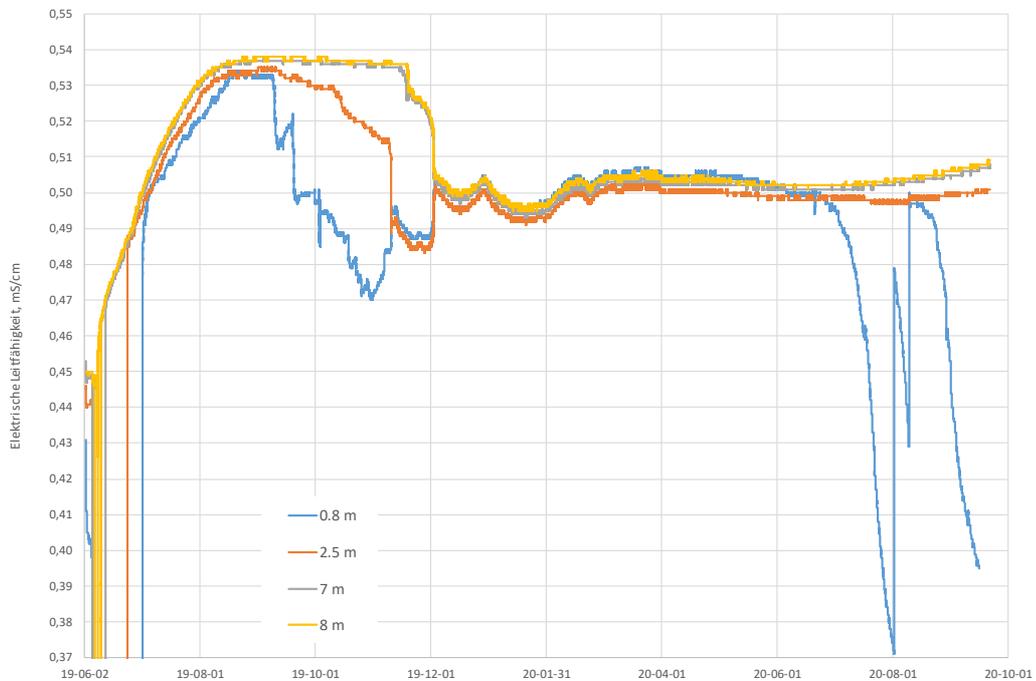
Ziel des Pumpversuch und der Flutung des Schachtes war zu überprüfen, ob sich die in früheren Untersuchungen angetroffenen Schichtgrenzen zwischen verschiedenen Wasserkörpern in 0,8 m, 2,5 m, 7,0 m und 8,0 m wieder ausbilden würden und ob diese stabil bleiben. Im zeitlichen Verlauf von Temperatur und elektrischer Leitfähigkeit für die verschiedenen Teufen (Abbildung 2, Abbildung 3) ist vor allem bei 7,0 m und 8,0 m ein deutlich horizontaler Kurvenverlauf und eine Angleichung der beiden Kurven ca. 73 Tage nach Flutungsbeginn sichtbar. Für 16 Wochen ist die Schichtung stabil und weist im Bereich zwischen 7,0 und 8,0 m, sowie vermutlich darüber und darunter auf die Ausbildung eines homogenen Wasserkörpers hin. Deutliche Schwankungen der Temperatur und elektrischen Leitfähigkeit sind im oberflächennahem Wasserkörper (Datenlogger auf 0,8 m) erkennbar da der Kurvenverlauf bei 2,5 m, 7,0 m und 8,0 m gleichmäßiger ist. Am 12.10.2019 bricht die oberflächennahe Schichtung zusammen, ca. einen Monat später, ab dem 10.11.2019, existiert im Schacht keine Schichtung mehr, sondern nur noch ein homogener Wasserkörper mit gleicher Temperatur und elektrischer Leitfähigkeit. Ab Mitte Mai 2020 ist im Temperaturverlauf, sowie weniger deutlich im zeitlichen Verlauf der elektrischen Leitfähigkeit die erneute Ausbildung eines oberen, abgegrenzten Wasserkörpers erkennbar. Der mittlere Wasserkörper im Bereich des Datenloggers bei 2,5 m bildet sich Anfang Juli 2020 wieder aus; eine zweifache Schichtung im Schacht stellt sich ein. Folglich ließ sich die seit 2004 beobachtete Schichtung und deren Zusammenbruch bestätigen. Zudem konnte nachgewiesen werden, dass es zum Zusammenbruch aber auch wieder zur Neuausbildung von Schichtung innerhalb eines Jahres im Wasserkörper des Nikolaus-Bader-Schachtes kommt.

Nach Auswertung der Wetterdaten des TAWES am Standort Ehrwald scheint es einen Zusammenhang zwischen eintretendem Frost und dem Zusammenbruch der Schichtung zu geben. Anfang November 2019 brach die oberste Schichtung nach mehreren Stunden anhaltender Minusgraden ein, ein kompletter Zusammenbruch der Schichtung Anfang Dezember steht vermutlich ebenfalls in Verbindung mit anhalten Minusgraden und somit Frost. Eine mögliche Erklärung ist, dass durch niedrige Lufttemperaturen das infiltrierende und dem Schacht zuströmende Oberflächenwasser eine niedrige Temperatur aufweist und die

Dichteunterschiede im Schacht so gering sind, dass eine stabile Schichtung nicht aufrechterhalten werden kann. Um genauere Aussagen über Wasserwegsamkeiten im Anstehenden zu treffen, sollen geophysikalische Messungen im Umfeld des Schachtes durchgeführt werden.



**Abbildung 2:** Zeitlicher Verlauf der Temperatur im Nikolaus-Bader-Schacht in 0,8 m, 2,5 m, 7,0 m und 8,0 m (Ausschlag am 20.6.2020 ist auf einen Umbau des Loggers zurückzuführen)



**Abbildung 3:** Zeitlicher Verlauf der elektrischen Leitfähigkeit im Nikolaus-Bader-Schacht in 0,8 m, 2,5 m, 7,0 m und 8,0 m Teufe.

## Schlussfolgerung

Aus den Langzeituntersuchungen am Nikolaus-Bader-Schacht sollen der Zusammenbruch und die Ausbildung von Dichteschichtungen näher untersucht werden, damit diese als in-situ Maßnahme für zukünftige Bergwerke, im Rückbau befindliche Bergwerke oder bereits geflutete Bergwerke verwendet werden kann. Nach dem Abpumpen des 10 m tiefe Nikolaus-Bader-Schachts bei Biberwier war dieser innerhalb eines Monats vollständig geflutet. Zwei Monate danach war wieder eine Dichteschichtung vorhanden. Vermutlich sind die niedrigen Temperaturen des zum Schacht zuströmenden Wassers nach einsetzendem Frost ursächlich für den Zusammenbruch der Schichtung. Mit Beginn der Frühlings- und Sommermonate bildet sich diese wieder aus. Wie die ersten Ergebnisse der Langzeitbeobachtung am Nikolaus-Bader-Schacht zeigen, lassen sich die Erkenntnisse auf tiefere Bergwerke übertragen, die im oberflächennahen Bereich ebenfalls von zuströmenden Oberflächenwasser beeinflusst sind und wo es ebenfalls zur Ausbildung und zum Zusammenbruch von Dichteschichtung kommt.

## Danksagung

Wir danken unseren Forschungseinrichtungen, vor allem dem Forum Bergbau und Wasser, für deren finanzielle Unterstützung. Außerdem gilt großer Dank an Armin Hanneberg, Jana Göbel, Werner Luttinger, Sabine Luttinger, Ulrike Wolkersdorfer, Erich Müller, Andreas Wolkersdorfer, Karoline Wolkersdorfer, Franziska Wolkersdorfer, Jochen Wolkersdorfer, Katrin Wolkersdorfer, Christian Eichinger, Marlen Scheibe, Christiane Neumann, Ellimaria Huusari, Petra Müller, Ana-Sophie Hensler, Daniela Riepl, Andreas Simmerl, Daniel Schreil, Daniel Bischof, Hendrik Klar, Christine Böhmer, Florian Heimann, Fabian Henkel, Constanze Putz und Felice Vogdt, welche über die Jahre zum Erkenntnisgewinn am Nikolaus-Bader-Schachtes beigetragen haben. Den lokalen Behörden und den Bürgermeistern von Biberwier sei für die langjährige ideelle Unterstützung und die zügige Genehmigung des Experiments in einem Trinkwasserschutzgebiet gedankt.

## Literatur

- EICHHORN, R., LEHRBERGER, G., LOTH, G., LOTH, R., PLASS, D., PÜRNER, T. & ROHRMÜLLER, J. (2017): Auf den Spuren des bayerischen Goldes – 20 Goldene Geotope. – 172 p., München (Bayerisches Landesamt für Umwelt).
- MUGOVA, E. & WOLKERSDORFER, C. (2019): Stratification in Flooded Underground Mines – State of Knowledge and Further Research Ideas. Paper presented at the Mine Water – Technological and Ecological Challenges (IMWA 2019), Perm, Russia. – p. 40–44; Perm, Russia (Perm State University).
- SCHUCH, M. F. (1981): Bericht über die Ergebnisse der Hydrogeologischen Untersuchungen im Bereiche des Weißen-, Mitter- u. Finstersees. – 14 p., 1 Abb., 8 Beil.; Innsbruck (Michael F. Schuch).
- WOLKERSDORFER, C. (2008): Water Management at Abandoned Flooded Underground Mines – Fundamentals, Tracer Tests, Modelling, Water Treatment. – 465 p., 126 Abb., 34 Tab.; Heidelberg (Springer).
- WOLKERSDORFER, C. (2017): Mine Water Hydrodynamics, Stratification and Geochemistry for Mine Closure – The Metsämonttu Zn-Cu-Pb-Au-Ag-Mine, Finland. Paper presented at the IMWA 2017 – Mine Water & Circular Economy, Lappeenranta. – p. 132-139, 3 Abb., 1 Tab.; (Lappeenranta University of Technology).
- WOLKERSDORFER, C., GÖBEL, J., HASCHE-BERGER, A. & HANNEBERG, A. (2007): Führer zum Montan-Wanderweg Silberleithe. – 79 p., 128 Abb.; Biberwier (Bergwerksverein Silberleithe Tirol).

## **Schutz und Wasseralter einer komplexen Karstquelle: Hydrogeologie, Isotopen- ( $^{18}\text{O}/^{2}\text{H}$ , $^3\text{H}$ , $^{14}\text{C}$ ) und Gastracermessungen ( $^3\text{He}$ , FCKW11,-12,-113, SF6)**

Thomas Zwack<sup>1</sup> & Martin Kralik<sup>2</sup>

1) mjp Ziviltechniker GmbH, Bachwinkl 126, A-5760 Saalfelden am Steinernen Meer

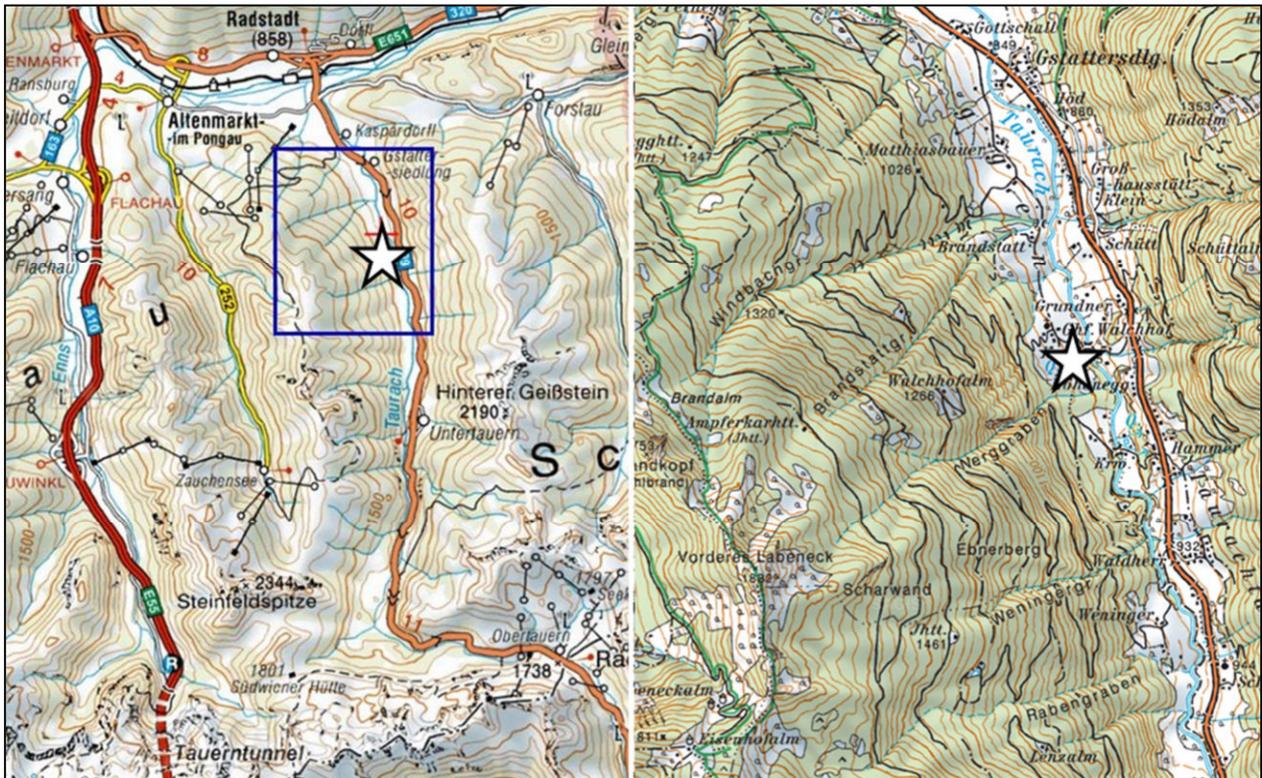
2) Dept. f. Umweltgeowissenschaften, Universität Wien, Althanstr. 14, A-1090 Wien

### **Zusammenfassung**

*Zur Absicherung der Wasserversorgung der Gemeinde Radstadt wurde 2010 die Walchhof-Hauptquelle gefasst und in das Versorgungsnetz eingebunden. Um den Schutz der neuen Fassungsanlage sicherzustellen, wurde bereits ein zweistufiges Schutzgebiet, unter anderem auf Basis von Tracerversuchen im unmittelbaren Einzugsbereich des Wasserspenders, ausgewiesen. Zum weiteren Schutz der Walchhofquelle, die auch eine überregionale Bedeutung als Notwasserversorgung hat, sollte schließlich ein Schongebietsvorschlag ausgearbeitet werden. Eine Abgrenzung des Schongebiets rein anhand des orographischen Einzugsgebietes war im gegenständlichen Fall nicht zielführend, da der erschrotete Karstwasserkörper auf Basis der vorliegenden Schüttungsmengen ein weiträumiges ober- und unterirdisches Einzugsgebiet aufweisen muss. Es wurde daher zunächst versucht, eine Abgrenzung auch unter Berücksichtigung des geologisch und hydrologisch abgrenzbaren Karstwasserkörpers durchzuführen. Wegen des komplizierten tektonischen Baus des Untersuchungsraumes sowie mangels Markierungsversuchen auf regionaler Ebene, existieren, bezogen auf die Ausdehnung eines im Untergrund zusammenhängenden Karstwasserkörpers, erhebliche Unsicherheiten. Mit Hilfe von Isotopen- und Gastracermessungen wurden daher das Alter der erschroteten Wässer sowie die mittlere Höhenlage des Einzugsgebietes ermittelt, um das hydrogeologische Einzugsgebiet der Quellen besser eingrenzen zu können und die Erfordernis eines weiträumigeren Schongebietes abzuklären. Die neuen Untersuchungsergebnisse bestätigen das hydrogeologische Untergrundmodell, wonach ein Großteil der erschroteten Wässer einem weiträumigen und vor allem hochgelegenen Einzugsgebiet zuzuordnen ist, mit einer Mischung aus einem jüngeren 10 - 20 Jahren Anteil und einem sehr alten Anteil von bis zu mehreren 1000 Jahren. Kurzfristige Starkregenereignisse oder Schneeschmelzen können jedoch eine geringe Menge (< 10%) an sehr jungen Wasser zumischen. In Kombination mit Wasserbilanzierungen in den potentiellen Einzugsgebieten in Form von verkarsteten Karbonatvorkommen – denn diese bilden den Hauptwasserspender der Walchhofquellen – konnte das hydrogeologische Einzugsgebiet schließlich eingegrenzt und somit das geplante Schongebiet deutlich verkleinert werden.*

## Einführung

Die Walchhof-Karstquellen (ca. 910 m ü.A.) befinden sich rd. 4 km südlich der Gemeinde Radstadt (858 m ü.A.) im Taurachtal (Abbildung ). Dort treten auf dem Schwemmfächer des Nerggrabens, der die nach Osten abfallende Talflanke unterhalb des Vorderen Labenecks (1.832 m ü.A.) entwässert, mehrere Einzelquellen bis rd. 35 m oberhalb des rezenten Talbodens zu Tage. Die Quellgruppe weist eine Gesamtschüttung von etwa 500 l/s auf, die gefasste Einzelquelle schüttet in etwa 120 l/s.



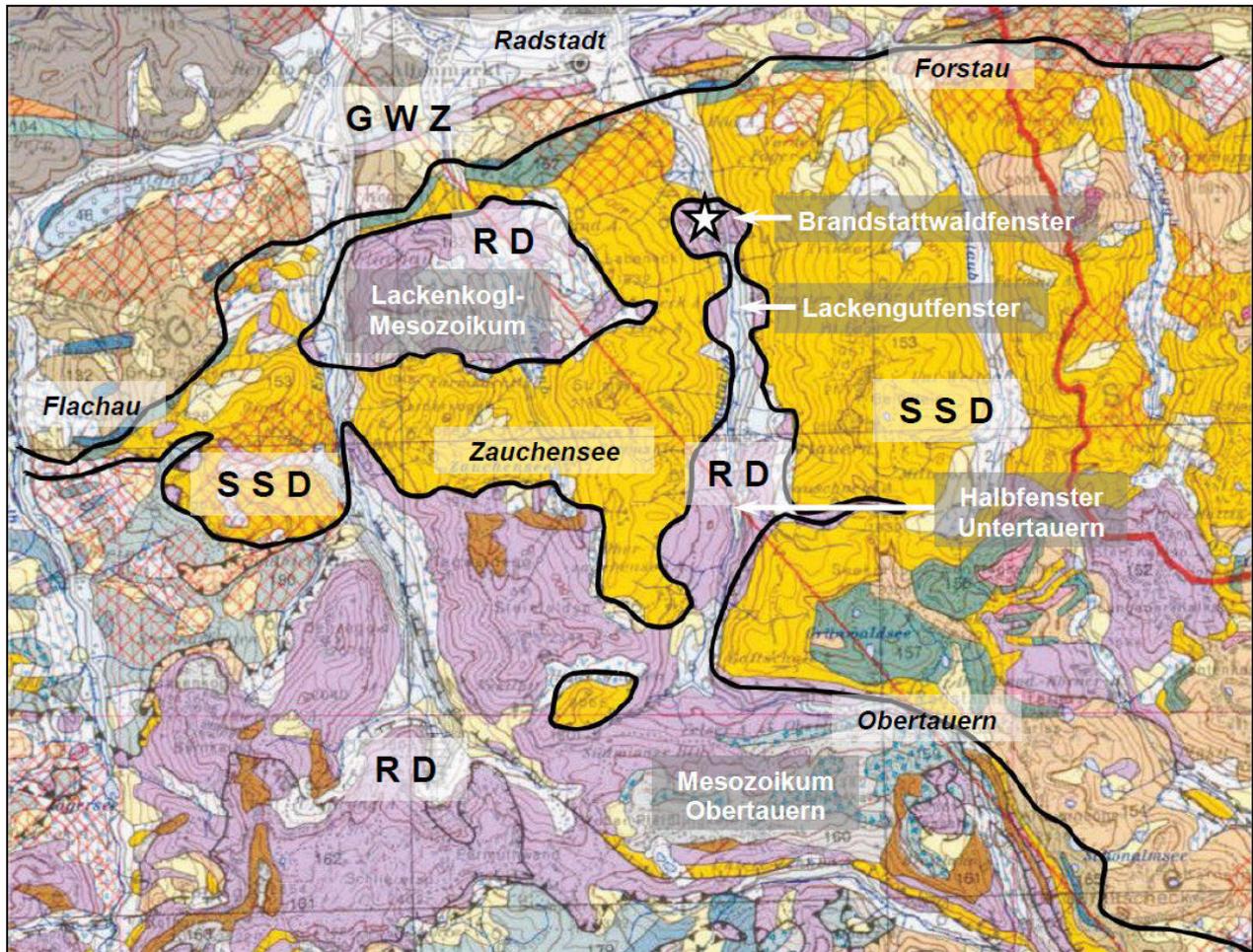
**Abbildung 1:** Geographischer Überblick mit den Walchhofquellen (Stern) auf der Österreichischen Karte 1:50.000.

## Geologie

Großtektonisch können im Einzugsgebiet der Walchhofquellen zwei Deckensysteme unterschieden werden (Abbildung ). Das liegende (untere) Stockwerk bildet das unterostalpine Radstädter Deckensystem (RD), welches im Wesentlichen aus triassischen Karbonaten gebildet wird. Darüber liegt das oberostalpine Schladming-Seckau-Deckensystem (SSD), welches durch Quarzphyllite und untergeordnet Quarzite vertreten wird. Als Übergang von quarzitären Gesteinen zu karbonatischen Gesteinen tritt häufig eine gelbbraune poly- und monomikte Rauwacke zu Tage. Rauwacken können jedoch auch innerhalb der Karbonathorizonte auftreten, wenn sie durch starke tektonische Prozesse entstanden sind [14].

In der Tiefenlinie des Taurachtales treten die unterlagernden Karbonate in Form zweier tektonischer Fenster zu Tage, wobei große Areale des Festgesteins von quartären Sedimenten überdeckt werden. Das nördliche dieser beiden Fenster wird als Brandstattwaldfenster bezeichnet. An dessen N' Rand treten die Walchhofquellen zu Tage. Ein zweites Fenster von etwa derselben Größe liegt unmittelbar südlich und wird als Lackengutfenster bezeichnet. Im orographischen Einzugsgebiet der Walchhofquellen bzw. in den unmittelbar angrenzenden Nachbartälern sind noch weitere Karbonatvorkommen des Radstädter

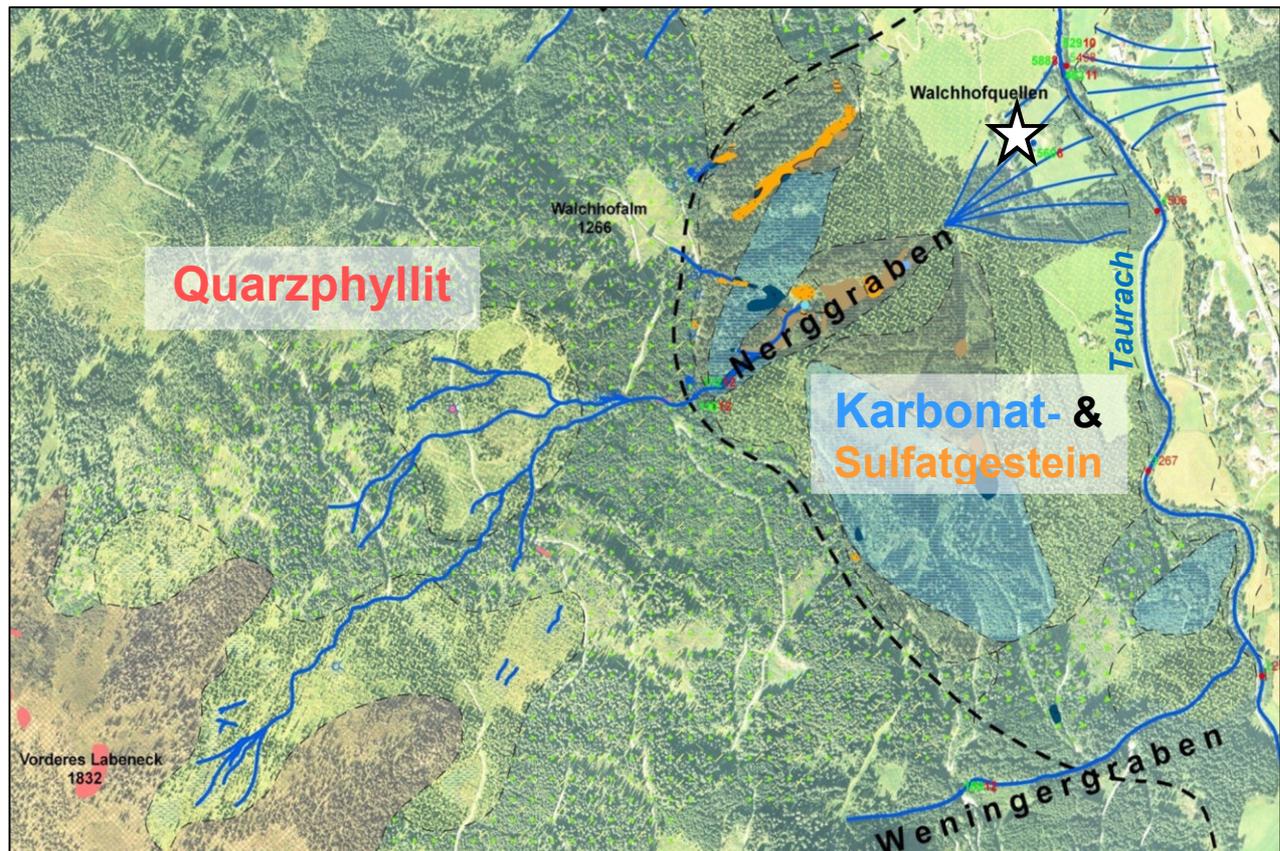
Deckensystems bekannt, die räumlich und geomorphologisch voneinander abgegrenzt werden können (Abbildung 2 & Abbildung 12).



**Abbildung 2:** Geologischer Überblick mit den Walchhofquellen (Stern) anhand eines Ausschnittes aus der Geologischen Karte von Salzburg (1:200.000) [2]. Legende: Großtektonische Einheiten - GWZ = Grauwackenzone, SSD = Schladming-Seckau-Deckensystem, RD = Radstädter Deckensystem, Gesteinsformationen - gelb-orange: Alpiner Verrucano und Lantschfeldquazit, violett: Triassische Karbonate, grau: Hauptdolomit und Kössen-Formation. Weiße Beschriftung: Maßgebliche Karbonatvorkommen innerhalb des Radstädter Deckensystems.

Die gefasste Walchhof-Hauptquelle liegt auf dem ausgedehnten Schwemmfächer am Ausgang des Nerggrabens, der aus grob-, untergeordnet gemischtkörnigen Wildbachablagerungen sowie Murstoßsedimenten aufgebaut wird. Die angrenzenden Wiesenflächen werden von Grundmoränenablagerungen eingenommen, die vermutlich älteren quartären Ablagerungen und/oder dem anstehenden Festgestein auflagern (Abbildung 3).

Das anstehende Festgestein in Form unterschiedlichster, teils intensiv verkarsteter Karbonat-Abfolgen und Rauwacken des Radstädter Deckensystems tritt erst im Bereich der Schwemmfächerwurzel offen zutage. Ab dort hat der Nerggraben eine klammartige Schluchtstrecke in den Karbonaten geschaffen, die bis auf rd. 1.260 m Seehöhe reicht. Oberhalb ist das Gerinne nur noch flach eingetieft und der Untergrund wird bis in die Gipfelregion des Vorderen Labenecks (1.832 m ü.A.) im Wesentlichen von Quarzphylliten aufgebaut.

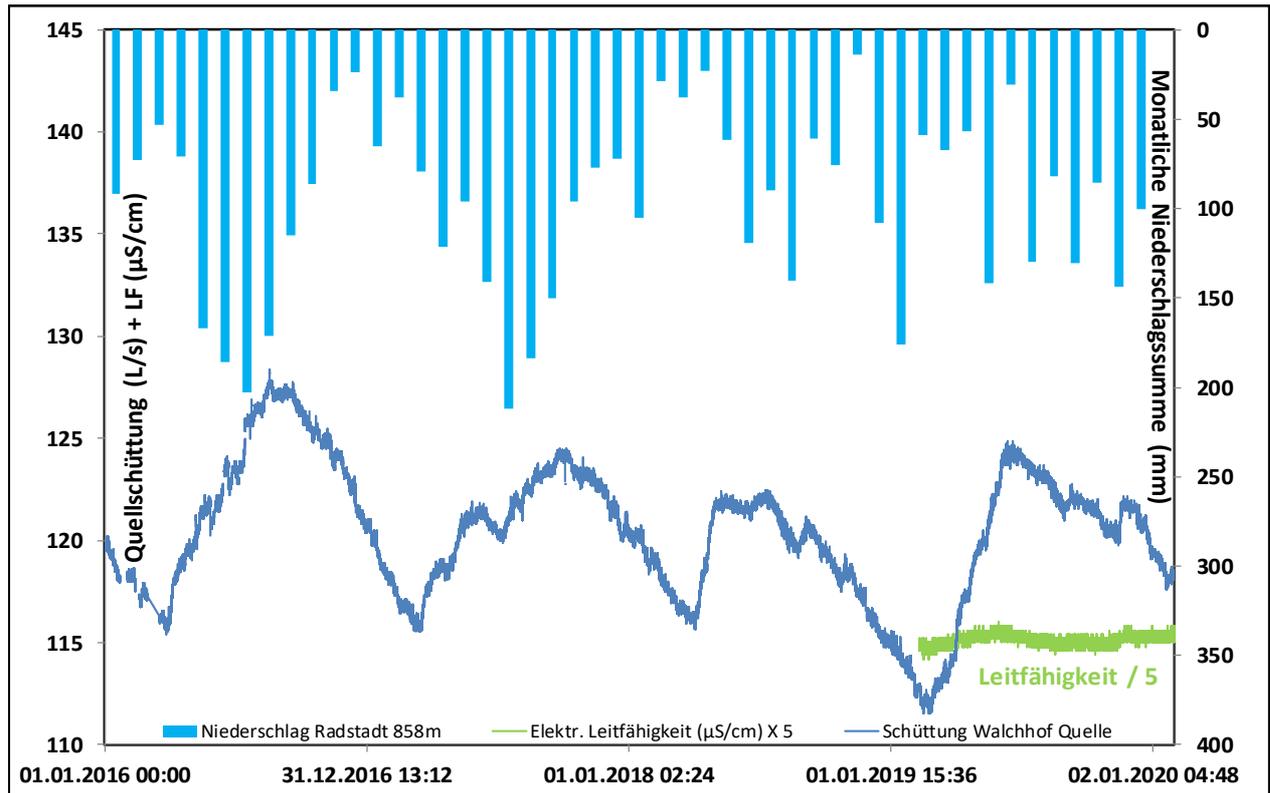


**Abbildung 3:** Geologische Karte des Nerggrabens, der das unmittelbare orographische Einzugsgebiet westlich der Walchhofquellen (Stern) bildet mit der tektonischen Grenze (schwarz strichliert) zwischen dem RD und dem SSD.

### Schüttung und Chemismus der gefassten Walchhof-Hauptquelle

Die Schüttung der gefassten Walchhof-Hauptquelle steigt im aktuellen Beobachtungszeitraum von 2016 bis 2019 jeweils im März-April von 112-116 l/s um 5-10 % auf 122-127 l/s zwischen Mai bis September an (Abbildung). Dieser Anstieg ist wahrscheinlich auf die Erhöhung des hydrostatischen Drucks im Reservoir und/oder auf den Zufluss jüngerer Wässer über den Nerggraben bzw. dessen Schwemmfächer im Zuge der Schneeschmelze zu erklären. Hinweise für einen Direktzufluss liefern positive bakteriologische Befunde während der Schneeschmelze im Zeitraum zwischen März und Mai sowie die Ergebnisse zweier Tracer-Versuche mit Eosin und Uranin zur Ermittlung des Einflusses von versickernden Oberflächenwässern des Nerggrabens. Bei der Einspeisung im Bereich einer Versickerungsstelle in den Karbonaten während einer Niedrigwasserphase wurde auch nach 4 Wochen kein Durchgang in der Hauptquelle festgestellt, wohingegen bereits 5 Stunden nach der Einspeisung innerhalb der Lockergesteine auf dem Schwemmfächer ein Signal gemessen wurde, jedoch sehr stark verdünnt [11].

Interessant ist eine geringfügige Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit von 571  $\mu\text{S}/\text{cm}$  auf 580  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , die gleichzeitig mit der Schüttungserhöhung im Jahre 2019 auftrat, während die Wassertemperatur mit 6,85-6,88°C nahezu konstant bleibt. Die hohe Mineralisation ist auf Sulfat (193 mg/l) und Hydrogencarbonat (154 mg/l) zurück zu führen sowie die Kationen Magnesium (28 mg/l) und Calcium (84 mg/l). Der pH-Wert von 7,41 und gelöster Sauerstoff von 5,51 mg/l wurde nur einmal gemessen und entspricht einem Grundwasser mit längerer Verweilzeit. Diese Ergebnisse entsprechen den sehr konstanten Werten, die im Median seit 1995 mit 6,90°C, 599  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , 7,8 und 6,33 mg/l bis 2018 in engen Grenzen gleich geblieben sind [4].



**Abbildung 4:** Monatliche Niederschlagssummen Radstadt (blaue Säulen; ZAMG und Hydrographischer Dienst), Quellschüttung (Gemeinde Radstadt) und der Leitfähigkeit der gefassten Walchhof-Hauptquelle [10].

### Hydrogeologisches Modell

Aus den bisherigen Untersuchungsergebnissen sind folgende Schlussfolgerungen als Basis für das hydrogeologische Modell für die Walchhofquellen maßgeblich:

- Die Wasseraustritte der Quellgruppe treten auf einem ausgedehnten Schwemmfächer an der orographisch linken Talflanke des Taurachtales zutage.
- Die Walchhofquellen liegen im orographischen Einzugsgebiet eines Karbonatfensters des RD. Die dort auftretenden Dolomite, Rauwacken, Kalke und Kalkschiefer weisen aufgrund ihrer teils hohen Verkarstungsfähigkeit eine, im Vergleich zu den im oberen Hangabschnitt des Nerggrabens auftretenden Quarzphylliten, deutlich höhere Gebirgsdurchlässigkeit auf.
- Im oberen Hangabschnitt des Nerggrabens (Quarzphyllite und deren Verwitterungsprodukte) dominiert der Oberflächenabfluss gegenüber der Versickerung. Im mittleren Hangabschnitt überfließt der Nerggraben Gesteine des RD (Kalke, Rauwacken und Dolomite), die aufgrund ihrer Verkarstungsfähigkeit eine höhere Gebirgsdurchlässigkeit aufweisen und der Nerggraben bei Niedrigwasser (geschätzt bis zu 10 l/s Abflussfracht) in den Karbonaten vollständig versickert. Nur bei Mittel- und Hochwasser kann der Nerggraben bis zum Schwemmfächer – die Karbonate überfließend – abfließen, wobei er aufgrund der hohen Durchlässigkeit des Schwemmfächermaterials nur bei außergewöhnlichen Hochwasserführungen bis zur Taurach vorstoßen kann.

- Das Karbonatfenster im unteren Teil des Nerggrabens ist Teil weiterer tektonischer Fenster, die einerseits am Hangfuß taleinwärts des Taurachtales bis nach Obertauern auftreten, zum anderen auch westlich des Projektstandortes außerhalb des orographischen Einzugsgebietes im sog. Lackenkogel-Mesozoikum beschrieben sind.
- Nördlich des Projektstandortes treten keine Karbonatfenster im Taurachtal auf. Dort reicht der Quarzphyllit bis in den Talboden.
- Stichtagsmessungen der elektrischen Leitfähigkeit (el. LF) entlang der Taurach von Untertauern bis unterhalb der Walchhofquellen sowie an den seitlichen Zubringern und Quellaustritten [6] zeigen, dass ein Zufluss von hochmineralisierten Quellwässern (el. LF > 500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) konzentriert auf einen Flussabschnitt von rd. 600 m Länge, der sich ausgehend von den Walchhofquellen taleinwärts erstreckt, erfolgt. Hierdurch erhöht sich die Leitfähigkeit der Taurach von konstanten Werten um rd. 280  $\mu\text{S}/\text{cm}$  ausgehend von Untertauern bis auf über 530  $\mu\text{S}/\text{cm}$  unmittelbar flussabwärts der Walchhofquellen.

Aus den oben beschriebenen Punkten wurde das folgende Hydrogeologische Modell abgeleitet:

- Der Wasserträger für die Walchhofquellen sind Karbonate des RD (Kalke, Dolomite und Rauwacken), die am Hangfuß im Taurachtal auftreten und über weite Strecken von eiszeitlichen und nacheiszeitlichen Lockergesteinen überlagert werden.
- Der hohe Sulfatgehalt des Quellwassers wird auf gelösten Gips, welcher ursprünglich in den Rauwacken vorhanden war bzw. noch vorhanden ist, zurückgeführt.
- Die Karbonate im Nerggraben sind nicht der Hauptwasserträger für das Wasser der Walchhofquellen. Demzufolge liegt das Einzugsgebiet des Wasserträgers südlich der Fassungsanlage im Taurachtal.
- In den Karbonaten des Radstädter Deckensystems ist ein mächtiges, ergiebiges Bergwasservorkommen vorhanden. Dies resultiert aufgrund der hohen Gebirgsdurchlässigkeit der verkarstungsfähigen Ausgangsgesteine und deren großer oberflächlicher Verbreitung taleinwärts der Taurach bis in den Großraum der Gnadenalm bzw. Obertauern.
- Aufgrund der Tatsache, dass talauswärts der Walchhofquellen der Bergwasserleiter in Form der Karbonate von gering durchlässigen Gesteinen der Radstädter Quarzphyllite abgeriegelt wird, ist das Bergwasser gezwungen, vergleichbar einer Überlaufquelle, dem hydraulischen Gradienten folgend, an die Oberfläche auszutreten.
- Dass dies punktförmig passiert, wird auf eine zum Teil lückenhafte Grundmoränenbedeckung am Hangfuß zurückgeführt, die aufgrund ihrer sehr geringen Wasserdurchlässigkeit das Bergwasser in den unterliegenden Karbonaten abdämmt und gleichsam gespannte Bergwasserverhältnisse verursacht.
- An den Schwemmfächer des Nerggrabens ist ein weiteres Grundwasservorkommen („interflow“) gebunden, welches auf die Walchhofquellen einen geringen Einfluss hat. Dieses Grundwasservorkommen, welches vom versickernden Nerggraben gespeist wird, fließt vermutlich auf der unterhalb der Schwemmfächerablagerungen stauenden Grundmoräne ab.

## Isotopen und Gastracer

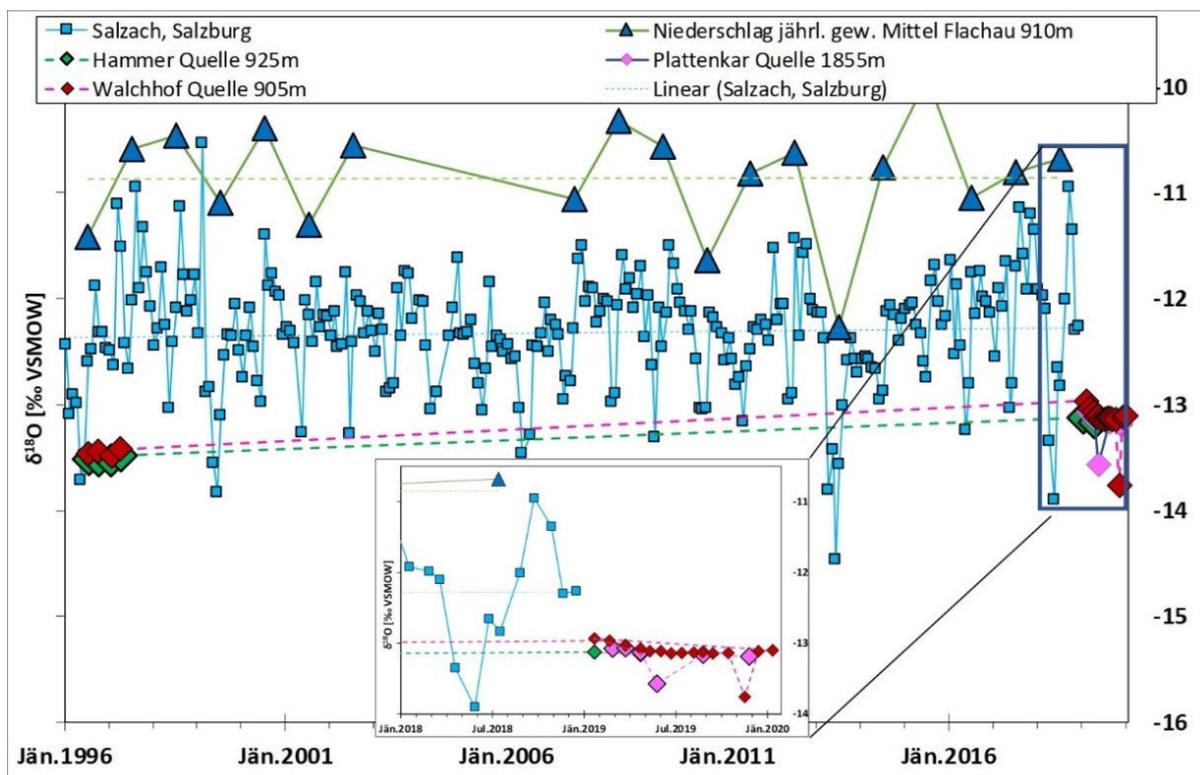
### 5.1 Probenahme

Das Quellwasser der gefassten Walchhof-Hauptquelle wurde über ein Jahr (Feb. 2019-Feb. 2020) wöchentlich beprobt und davon wurden monatlich 15 Proben auf Sauerstoff-18 und Wasserstoff-2 Isotope ( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $^2\text{H}$ ) analysiert. Tritium/Helium-3, Kohlenstoff-13, Radiokarbon ( $^{14}\text{C}$ ) Isotope und FCKWs wurden von den Proben im April und Oktober 2019 untersucht. Ebenso wurden die im Brandstattwaldfenster liegenden Hammerquellen an der östlichen Taurachtalflanke einmalig beprobt sowie 6 Mal, die auf 1.850 m über Obertauern liegende Plattenkarquelle, zur Höhen-Kalibrierung beprobt und analysiert [7]

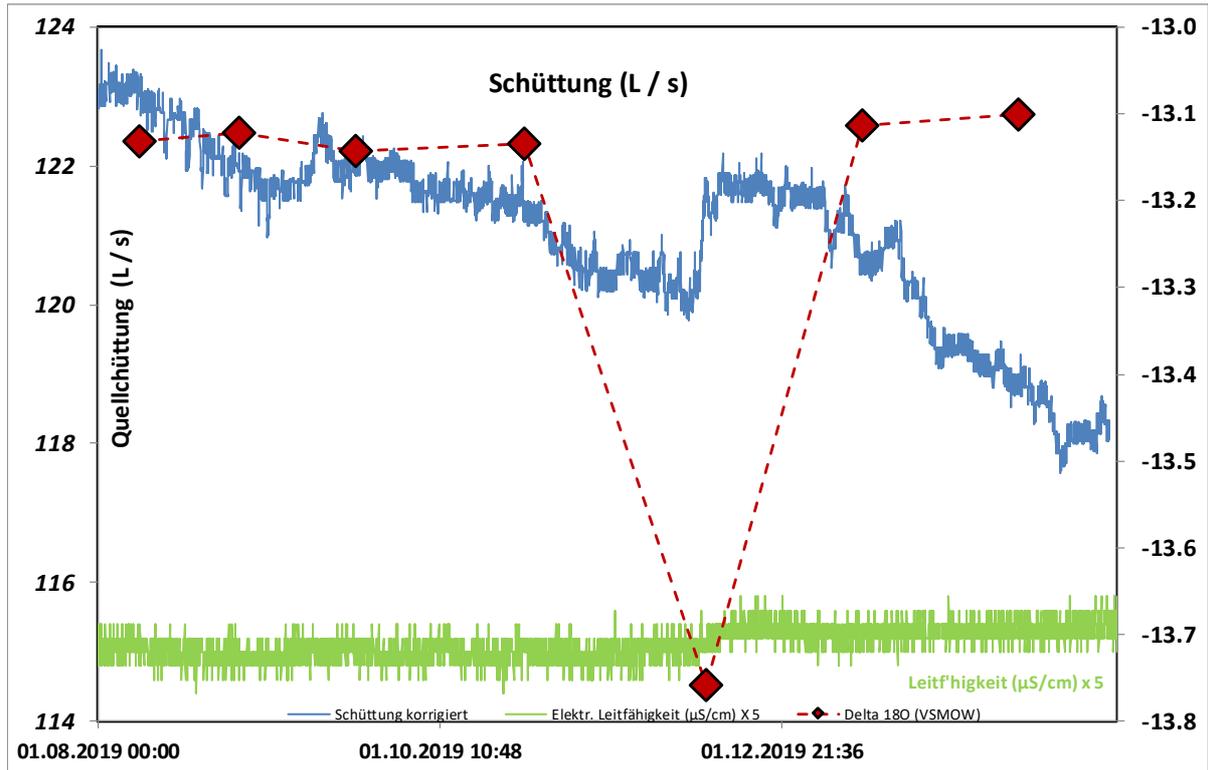
### 5.2 Sauerstoff-18/Wasserstoff-2 ( $\delta^{18}\text{O}/^2\text{H}$ )-Messungen

Die Sauerstoff-18 ( $\delta^{18}\text{O}$ ) Werte der Walchhof Quelle stiegen über die letzten 23 Jahre (1996-2019) im Mittel um 0,3 ‰ an. Das ist häufig in österreichischen Quellen und auf den Klimawandel zurückzuführen.

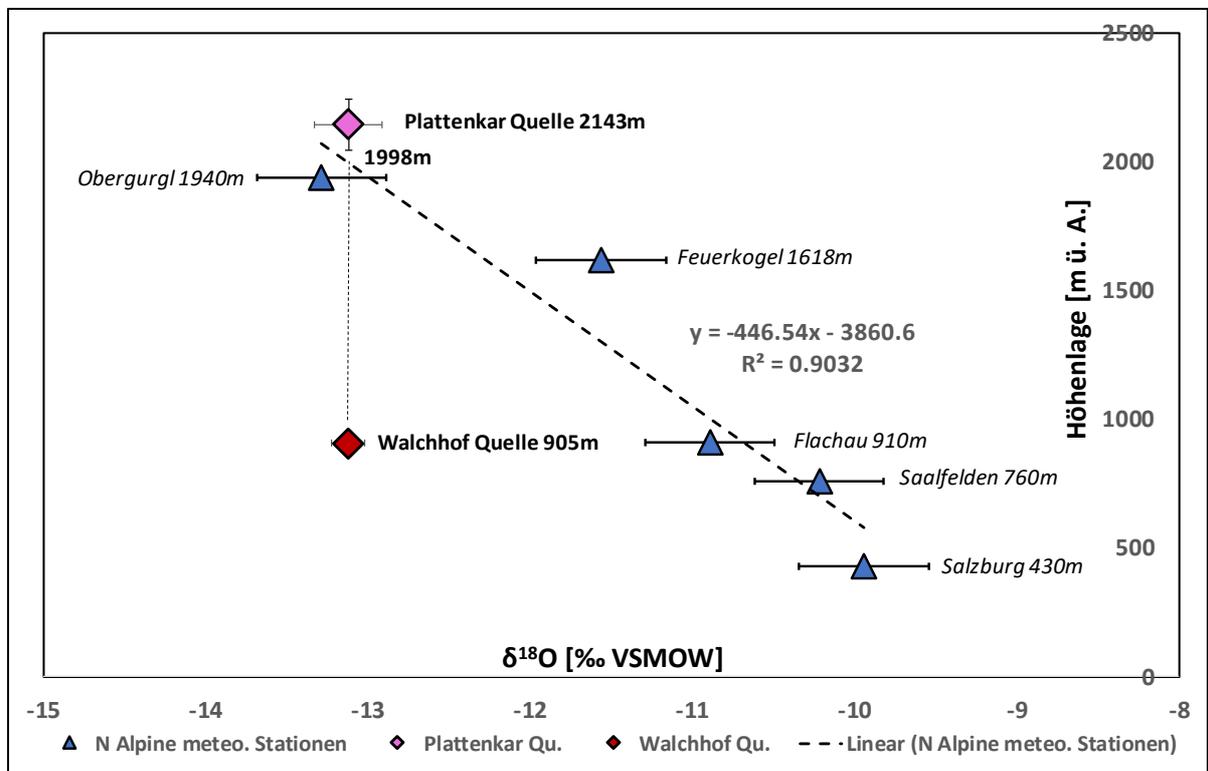
Im Jahre 2019 sinken vom Februar bis Juli die  $\delta^{18}\text{O}$ -Werte von -12,96 auf -13,14 ‰ (Abbildung 5 & Abbildung ). Abhängig von der Zusammensetzung der Winterniederschläge bzw. des Schneeschmelzwassers ( $\delta^{18}\text{O}$  -15 bis -20 ‰) bedeutet das eine **Zumischung von 3-10%**.



**Abbildung 5:**  $\delta^{18}\text{O}$ -Messwerte der untersuchten Quellen im Vergleich zu den Jahresmittelwerten der Niederschlagsstation Flachau und den Monatswerten der Salzach [1] von 1996-2018. Die Messwerte der Walchhof- und Hammer Quelle von 1996-1997 stammen von [8].



**Abbildung 6:**  $\delta^{18}\text{O}$ -Messwerte im Vergleich zu den Schüttungs- und Leitfähigkeitsdaten der Walchhof Quelle im Zeitraum von August 2019 – Jänner 2020. Am 18.11.2019 war der  $\delta^{18}\text{O}$ -Messwert signifikant abgereichert, während gleichzeitig die Schüttung kurzfristig von 120 auf 122 l/s (2 %) und die elektrische Leitfähigkeit geringfügig (575 auf 577  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) anstieg.



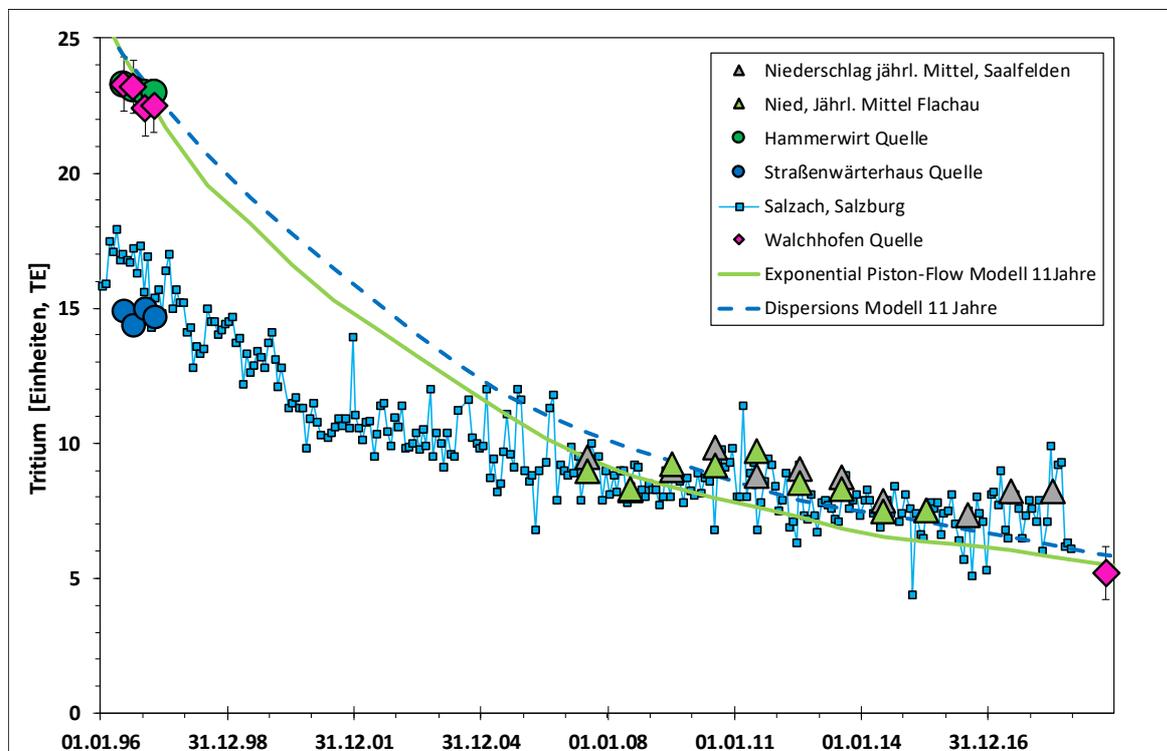
**Abbildung 7:**  $\delta^{18}\text{O}$ - vs. Höhenlage von meteorologischen Stationen im Raum Salzburg, Oberösterreich und Tirol in guter Übereinstimmung mit den mittleren Daten der Plattenkar Quelle (Obertauern). Daraus lässt sich die mittlere Höhenlage des Einzugsgebietes der Walchhofquellen ( $2000 \pm 200$  m) abschätzen.

Der mittlere jährliche  $\delta^{18}\text{O}$ -Wert der Walchhof Quelle von  $-13,12 \pm 0,18 \text{ ‰}$  erlaubt es, die mittlere Höhenlage des Einzugsgebietes des Quellwassers abzuschätzen. Die hier untersuchte Plattenkar Quelle (Obertauern) mit enger definierter Einzugsgebietshöhe sowie die zehnjährigen Mittel von 5 meteorologischen Stationen [1] erlauben es, eine Korrelation zwischen  $\delta^{18}\text{O}$ -Wert und Niederschlagshöhe zu erstellen. Daraus lässt sich die mittlere **Höhenlage des Einzugsgebietes** der Walchhofquellen mit **2000  $\pm$  200 m** ableiten (Abbildung 7).

Die 650 m weiter südöstlich liegenden Hammer Quellen haben ähnliche  $\delta^{18}\text{O}$ -Werte und daher vermutlich ähnliche Einzugsgebietshöhen. Bloß deuten die erheblich erhöhten Leitfähigkeits- und Sulfatwerte [4] der Hammer Quellen auf längere oder intensivere Kontakte mit gipsführenden Karstformationen hin.

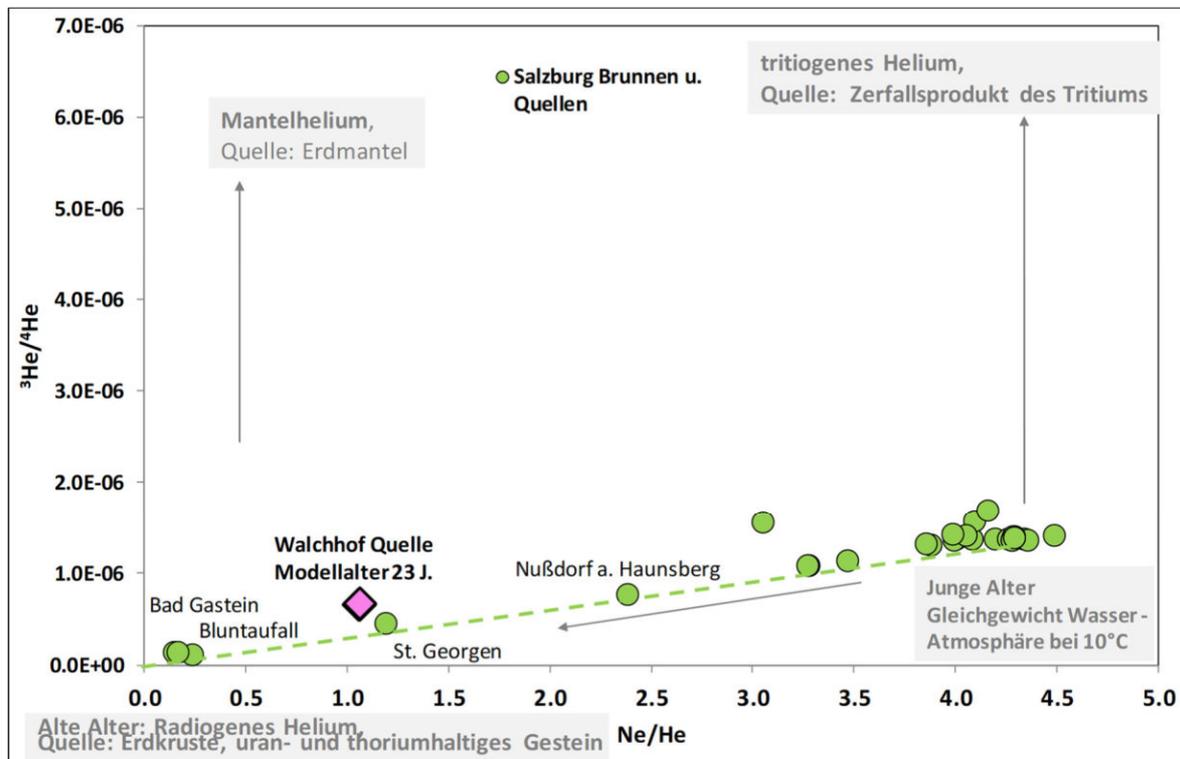
### 5.3 Tritium- und Helium-3/Helium-4 Messungen

Der Tritiumgehalt der Walchhof-Hauptquelle mit 5,2 Tritiumeinheiten (TE) ist geringer als der gegenwärtige Niederschlag in den meteorologischen Stationen Flachau und Saalfelden bzw. im Flusswasser der Salzach. Die Abnahme der hohen Tritiumwerte in den Jahren 1996/97 sowohl der Walchhof- als auch der Hammer Quelle ist durch den radioaktiven Zerfall (Halbwertszeit von 12,32 Jahren) und den komplexen Mischungsverhältnissen im Einzugsgebiet zu erklären. Dank dieser alten Tritiumdaten lässt sich mittels „lumped parameter“ Modellen wie dem Exponential Piston-flow (EPM) und dem Dispersions Modell (DM) [7], wenigstens für den jüngeren tritiumhaltigen Anteil, eine „mittlere Verweilzeit“ im Untergrund von 11 Jahren berechnen (Abbildung 8).



**Abbildung 8:** Tritium ( $^3\text{H}$ )-Messwerte der untersuchten Quellen im Vergleich zu den Jahresmittelwerten und den mittleren Jahreswerten der Niederschlagsstationen Flachau und Saalfelden [1] von 2007-2018. Die Messwerte der Quellen der Jahre 1996-1997 stammen von [8]. Die Linien zeigen die Altersentwicklung (11 Jahre mittlere Verweilzeit) des Exponential Piston-flow Modells (EPM in grün) und des Dispersion Modells (DM in blau).

Da Tritium zu dem Edelgas Helium-3 zerfällt, kann man bei der gleichzeitigen Messung beider mit den gleichen „lumped parameter“ Modellen für den jüngeren tritiumhaltigen Anteil eine mittlere Verweilzeit berechnen. Dies ergibt jedoch ein signifikant höheres Modellalter von 23 Jahren (Abbildung 9). Daher ist die beste Schätzung des **jüngeren Anteils des Walchhof Quellwassers 10 bis 20 Jahre**.



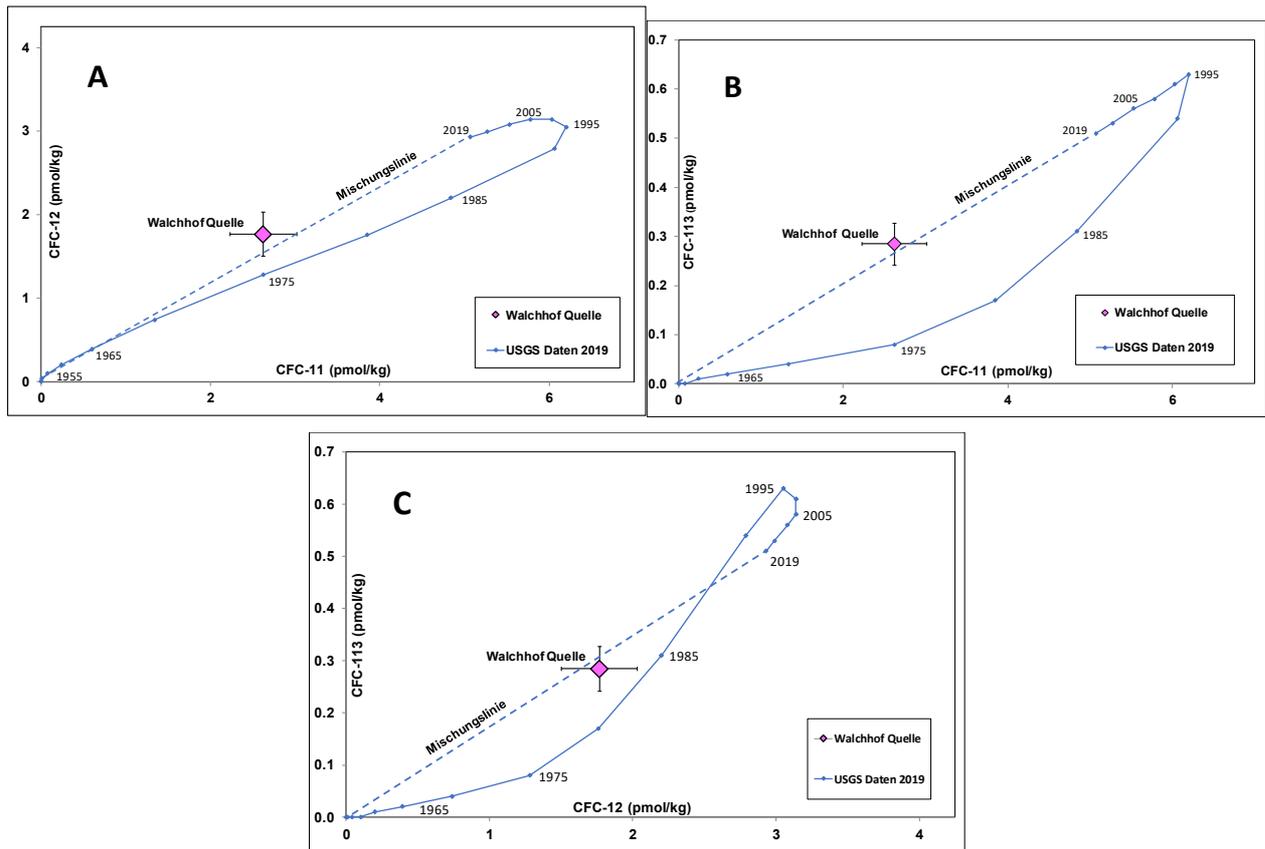
**Abbildung 9:** Neon/Helium vs. Helium-3/Helium-4-Verhältnisse in Salzburger Brunnen- und Quellwässern. Identische hohe Helium-4-Gehalte im April und Oktober 2019 in den Walchhof Quellwässern bestätigen einen konstanten hohen Anteil an sehr alten Wässern. Das Modellalter des jüngeren, tritiumhaltigen Anteils beträgt 23 Jahre.

#### 5.4 CFC-11, CFC-12, CFC-113 und SF<sub>6</sub> Messungen

Die Abschätzung der mittleren Verweilzeit des Quellwassers beruht darauf, dass sich die jeweilige Fluorchlorkohlenwasserstoff (FCKW = CFC)-konzentrationen in der Atmosphäre in dem versickernden Niederschlagswasser entsprechend der Temperatur und Höhenlage lösen. Bei Kenntnis der Konzentrationsentwicklung (USGS 2019) kann der Zeitpunkt der Einleitung ins Quellwasser abgeschätzt werden. Wenn die gemessenen Konzentrationen nicht nahe der Konzentrationsentwicklung liegen, dann gab es nahe dem Einzugsgebiet eine anthropogene Kontamination oder es kam zur Mischung verschieden alter Quellwässer.

Im Fall der Walchhofquellen liegen die CFC-(=FCKW) Messwerte nahe einer Mischungsline zwischen einem alten CFC-freien (>80 Jahren) und einem jungen CFC-haltigen Anteil (Abbildung 10 A-C). Je nachdem bei welcher Konzentration man den jungen Anteil (1995-2019) annimmt, so lässt sich ein Anteil von **40-58% an altem CFC-freien (>80 Jahren) Quellwasser** berechnen.

Die Analyse der Schwefelhexafluorid (SF<sub>6</sub>)-konzentration von 39,7 (fmol/kg) bezeugt nur einen signifikanten Überschuss, dessen Daten zur Alterseinschätzung nicht genutzt werden können. Vermutlich sind Kristallingesteine im Einzugsgebiet eine natürliche Quelle dieses SF<sub>6</sub>-Überschusses.



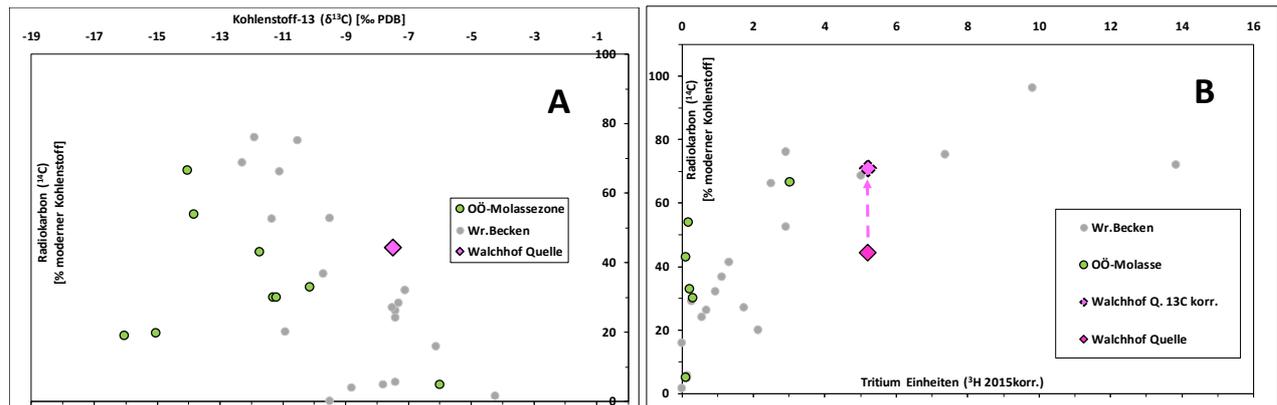
**Abbildung 10:** FCKW = CFC-11, CFC12 und CFC113 gelöst in Wasser (pmol/kg) bei 4 °C und 2000m Höhe berechnet nach den Konzentrationsmessungen des USGS (2019) über die Jahre 1940 – 2019 und die Konzentration im Walchhof Quellwasser. Mischungslinie zwischen CFC-freien alten und jungen Wässern. A) CFC-11 vs. CFC-12, B) CFC-11 vs. CFC-113, C) CFC-12 vs. CFC-113.

### 5.5 Kohlenstoff-13 ( $\delta^{13}\text{C}$ ) und Radiokarbon ( $^{14}\text{C}$ ) –Messungen

Der Kohlenstoff-13 des anorganischen gelösten Kohlenstoffs (DIC) wird gemessen, um abschätzen zu können wie viel von dem ursprünglich infiltrierten Kohlenstoff durch die Lösung mit  $^{14}\text{C}$ -freien Karbonatgesteinen verdünnt wird. Die Werte der Grundwässer des Wr. Beckens und der Oberösterreichischen Molassezone deuten darauf hin, dass, je länger die Wässer unterwegs sind (geringere  $^{14}\text{C}$ -Gehalte), desto mehr  $^{14}\text{C}$ -freier Kohlenstoff wird aus den Karbonaten gelöst und die  $\delta^{13}\text{C}$ -Werten verschieben sich mehr zu den für marine Karbonate typischen Wert von 0 ‰.

Das hier untersuchte Walchhof Quellwasser liegt auf einem ähnlichen Trend (Abbildung 11 A).

Die Darstellung der Tritiumwerte gegen die Radiokarbonwerte (Prozent modernen Kohlenstoffs), zeigt, dass viele der hier untersuchten Grundwässer des Wr. Beckens und der Oberösterreichischen Molasse eine Mischung aus „jüngeren“ tritiumhaltigen Wässern (jünger als 70 Jahre) und einem sehr altem tritiumfreien Grundwasser sind. Nach der  $\delta^{13}\text{C}$ -Korrektur des Radiokarbonmesswerts von 44,4 % modernen Kohlenstoffs wird eine Verschiebung auf 71 % berechnet. Der korrigierte Wert passt gut zu den Trends der oben erwähnten Grundwassergebiete (Abbildung 11 B).



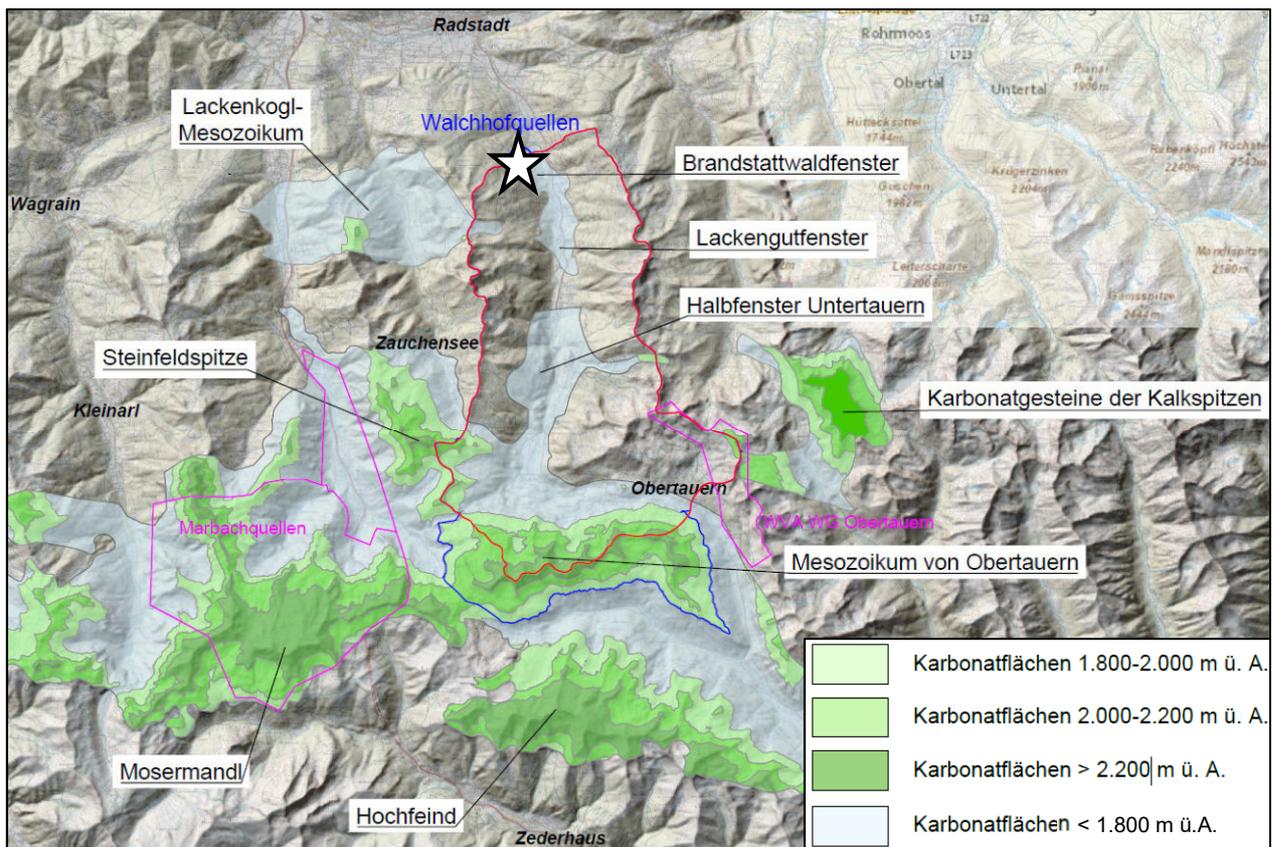
**Abbildung 11:** A) Kohlenstoff-13 ( $\delta^{13}\text{C}$ ) gegen Radiokarbon ( $^{14}\text{C}$ )-Messungen und B) Tritium ( $^3\text{H}$ ) gegen Radiokarbon ( $^{14}\text{C}$ )-Messungen des gelösten anorganischen Kohlenstoffs der Walchhofquelle. Zum Vergleich werden Werte von Grundwässern des Wiener Beckens und der Oberösterreichischen Molassezone dargestellt. Die Tritiumwerte wurden zu Vergleichszwecken auf das Jahr 2015 zerfallskorrigiert.

Berechnet man eine mittlere Verweilzeit mit einem **Radiokarbonwert von 71 % modernen Kohlenstoffs so kommt man auf 1500 bis 3000 Jahre**. Berücksichtigt man jedoch die Erkenntnisse der FCKW Untersuchungen, nämlich, dass der alte Anteil der Quellwassermischung zwischen 40 – 58 % betragen könne, dann muss man davon ausgehen, dass dieser alte Anteil eine Verweilzeit von mehr als 10000 Jahren haben kann.

### Wasserbilanz und hydrogeologisches Einzugsgebiet

Mit Hilfe der neuen Erkenntnisse aus den Isotopen- und Gastraceruntersuchungen (Punkt 5) sowie den durchgeführten Wasserbilanzierungen konnte das potentielle Einzugsgebiet des Wasserspenders nach hydrogeologischen Kriterien eingegrenzt werden. Demnach sind Flächen zwischen rd. 2.000 +/- 200 m ü.A. (Abbildung 7) mit verkarstungsfähigen Gesteinen (i.W. Karbonate) des RD maßgeblich für die Grundwasserneubildung bzw. die Alimentation der Walchhofquellen.

In einem GIS-Projekt wurden daher Karbonatflächen des RD im potentiellen Einzugsgebiet der Walchhofquellen mit dem Geländemodell bzw. dem Höhenbereich über 1.800 m verschnitten, wobei drei Höhenstufen ausgeschieden wurden (Abbildung 12). Aufgrund der strukturellen und tektonischen Rahmenbedingungen, den hydrographischen bzw. morphologischen Gegebenheiten (Entwässerungsstrukturen mit abflusslosen Senken, Dolinen, Uvalas, etc.) sowie den durchgeführten Wasserbilanzierungen wurde das potentielle hydrogeologische Einzugsgebiet der Walchhofquellen im Bereich des Mesozoikums von Obertauern schließlich nach Süden, über den Hauptkamm von Pleißling im Westen bis zur Kesselspitze im Osten, erweitert (Abbildung 12). Beispielsweise stellt das Wildseekar und der Pleißlingkessel eine teils Seen erfüllte Aneinanderreihung von Großdolin ohne oberirdischen Abfluss dar [13]. Eine maßgebliche Alimentation aus dem Lackenkogl-Mesozoikum im Westen der Walchhofquellen kann aufgrund der ausgeglichenen Wasserbilanz für das Zauchbachtal ausgeschlossen werden.



**Abbildung 12:** Karbonatvorkommen im Umfeld der Walchhofquellen (Stern) untergliedert nach Höhenstufen mit dem orographischen EZG der Taurach auf Höhe der Walchhofquellen (rot), dem nach Süden erweiterten hydrogeologischen EZG (blau) und bestehenden Schongebieten (pink).

Das bedeutet, dass auch Niederschlagswässer, die auf die verkarsteten Regionen südlich des orographischen Einzugsgebiets fallen und unterirdisch entsprechend dem dominierenden N' Schichteinfallen in das Taurachtal abfließen, berücksichtigt werden. In jenen Abschnitten, die in den entsprechenden Höhenstufen über 1.800 m nicht von Karbonaten aufgebaut werden, wurde das hydrogeologische Einzugsgebiet mit dem orographischen Einzugsgebiet ident festgelegt.

Somit ist das maßgebliche Einzugsgebiet südlich der Walchhofquellen in mindestens 10 bis 11 km Entfernung im Raum Obertauern anzusiedeln, was wiederum mit den teils (sehr) hohen Wasseraltern korreliert. Eine mögliche Erklärung für die Zweiteilung in einen relativ jungen Anteil und einen (sehr) alten Anteil der Wässer, ist möglicherweise auf die Struktur des Karstaquifers zurück zu führen, mit Hauptfließwegen in Form von verkarstungsbedingt aufgeweiteten, höhlen- und röhrenförmigen Hohlräumen sowie untergeordneten Fließwegen, die an Trennflächen mit geringen Öffnungsweiten gebunden sind. Entstammen die Wässer also demselben Haupteinzugsgebiet im Raum Obertauern, so kann für die jüngeren Wässer (10-20 Jahre) eine mittlere Mindestfließgeschwindigkeit in der Größenordnung von wenigen Metern pro Tag (rd. 1,4 bis 2,7 m/Tag) und für den (sehr) alten Wasseranteil (1.500 bis 3.000 Jahre) von wenigen Zentimetern am Tag (rd. 1 bis 2 cm/Tag), angenommen werden.

Auch der Einfluss sehr junger Wässer konnte in den neueren Untersuchungen erneut bestätigt werden, was für eine Beeinflussung, durch im Nerggraben bzw. auf dem Schwemmfächer periodisch versickernde Oberflächenwässer im Zuge der Schneeschmelze bzw. Starkniederschlägen, spricht.

### **Schongebiet**

Durch die gewonnenen Erkenntnisse konnte das bestehende hydrogeologische Modell wie unter Punkt 4 beschrieben, im Hinblick auf die Vulnerabilität der Walchhof-Hauptquelle, im Wesentlichen bestätigt werden.

Die älteren Wasseranteile (junge bis sehr alte Wässer), die den Großteil der Quellschüttung ausmachen, sind aufgrund des hohen Alters und der langen Verweilzeiten bereits gut geschützt gegen Verunreinigungen bzw. anthropogene Beeinflussungen. Dabei sind auch die geringe Besiedlung sowie die Ursprünglichkeit im Haupteinzugsgebiet hervorzuheben, weshalb eine Ausdehnung des Schongebietes bis in den Raum Obertauern aus fachlicher Sicht nicht erforderlich ist.

Da die mittlere Einzugsgebietshöhe in (hoch-) alpinen Höhenlagen ermittelt wurde, ist eine maßgebliche Alimentation des Karstaquifers im Bereich der beiden Karbonatfenster im Talbodenbereich nicht gegeben. Zum einen werden die beiden Karbonatfenster über weite Strecken von eiszeitlichen und nacheiszeitlichen Lockergesteinen überlagert, in denen zumindest im Taltiefsten ein Begleitgrundwasserkörper der Taurach gebunden ist, wodurch der gegenständliche Karstaquifer gut geschützt ist, gegenüber Einträgen und Verunreinigungen von der Oberfläche. Zum anderen beginnt das Lackengutfenster in mehr als 1 km Entfernung zu den Walchhofquellen und sind entsprechend lange Verweilzeiten gegeben bis zu den Walchhofquellen. Daher besteht im Talbodenbereich der beiden Karbonatfenster ein (Rest-) Risiko in quantitativer Hinsicht bei tiefreichenden, bis in den Karstwasserkörper reichenden Bohrungen, da hierdurch theoretisch ein Überlauf bzw. Auslass (artesisch gespannt) geschaffen werden kann.

An den nicht besiedelten und nur durch überwiegend nicht öffentlich zugängliche Forstwege erschlossenen Hangflanken im Bereich der beiden Karbonatfenster (Brandstattwald- und Lackengutfenster) sollte nach Möglichkeit der derzeitige Ist-Zustand mit extensiver Weidenutzung sowie moderater Waldbewirtschaftung weitestgehend erhalten werden, wobei die Gefährdung für die Walchhofquellen außerhalb des engeren Schongebiets (s.o.) als gering beurteilt wird.

Ein „engeres“ Schongebiet, welches den Nerggraben und das Brandstattwaldfenster W' der Taurach samt dem orographischen Einzugsgebiet bis in die Kammregion W' davon einschließt, wurde durch die Erkenntnisse aus den Isotopenuntersuchungen, aus denen die Zumischung von Wässern aus einem sehr nahe gelegenen Einzugsgebiet mit kurzen Verweilzeiten von wenigen Tagen bis Wochen hervorgeht, bestätigt. Diese sehr jungen Wässer stellen für das Quellwasser das größte Gefahrenpotential in qualitativer Hinsicht dar, wobei hier im Wesentlichen Störfälle mit mineralölbetriebenen Maschinen und Fahrzeugen im Bereich der Forstwege sowie im Zuge der Waldbewirtschaftung anzuführen sind.

## Schlussfolgerungen

Sorgfältige geologische Kartierungen, hydrogeologische Aufnahmen (Abflüsse, Temperatur- und Leitfähigkeitsmessungen), hydrologische Wasserbilanzen sowie eine Kombination von Wasser-Isotopen- und Gastracerversuchen ermöglichen ein plausibles hydrogeologisches Modell auch für komplexe alpine Karstquellen zu erstellen. Bezüglich der zeitweisen Zumischung von geringen Anteilen sehr junger, potentiell mikrobiologisch belasteter Wässer erwiesen sich die kleinräumigen Fluoreszenz-Tracerversuche sowie die kontinuierliche Aufzeichnung der Quellschüttung und deren Leitfähigkeit in Kombination mit regelmäßiger Isotopenuntersuchungen als erfolgreich.

## Referenzen

- [1] ANIP (2019): Austrian Network of Isotopes ( $^{18}\text{O}$ ,  $^2\text{H}$ ,  $^3\text{H}$ ) in Precipitation and Surface waters. Ministry of Agriculture, Forestry, Environments and Water management, offices of provincial governments, Austrian Institute of Technology and Environmental Agency Austria, Vienna. <http://www.umweltbundesamt.at>.
- [2] GEOLOGISCHE BUNDESANSTALT (2005): Geologische Karte von Salzburg, 1:200.000, Wien.
- [3] GEWÄSSERZUSTANDSÜBERWACHUNGSVERORDNUNG (GZÜV; BGBl. II Nr. 479/2006): Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über die Überwachung des Zustandes von Gewässern.
- [4] H<sub>2</sub>O FACHDATENBANK (2019): Gewässerzustandsüberwachungsverordnung (GZÜV) BGBl. Nr. 479/2006 i.d.g.F.; BMLFUW, Sektion VIII/Abteilung 1 Nationale Wasserwirtschaft; Ämter der Landesregierungen; (<http://www5.umweltbundesamt.at/h2ogispub/>).
- [5] HYDROGRAPHISCHER DIENST (2019): Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Abteilung IV/4 - Wasserhaushalt (HZB), Marxergasse 2, 1030 Wien, Österreich. (<http://ehyd.gv.at/>).
- [6] JAKOB, C. (2011): Hydrogeologische Verhältnisse der Walchhofquellen im Taurachtal (Salzburger Land).- 82 S., unveröff. Masterarbeit, Technische Universität; München.
- [7] JURGENS, B. (2019): TracerLPM (<https://github.com/bcjurgens>)
- [8] KRALIK M, BENISCHKE R, LEIS A, HEISS G, WYHLIDAL S, GRATH J, HADRBOLEC M, ZIERITZ I, PHILIPPITSCH R, (2015). Wasserisotopenkarte Österreichs. Bundesministerium für Land und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien. <https://secure.umweltbundesamt.at/webgis-portal/isotopen/map.xhtml>.
- [9] KRALIK, M. (2020): Bestimmung der Einzugsgebietshöhe und des Wasseralters (Mittlere Verweilzeiten) der Walchhof Quelle mittels Isotopenmessungen ( $^{18}\text{O}/^2\text{H}$ ,  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ) und Gastracern ( $^3\text{He}$ , FCKW11,-12,-113, SF6) – 29 S., unveröff. Bericht; Wien.
- [10] MJP ZIVILTECHNIKER GMBH (2020): Ergänzung Schongebietsvorschlag (GZ 1101007).- 21 S., unveröff. Bericht, Saalfelden.
- [11] MOSER-JARITZ ZT-GMBH (2012): Schutzgebietsvorschlag Walchhofquellen. – 41 S., unveröff. Bericht, Saalfelden.
- [12] MOSER-JARITZ ZT-GMBH (2016): Schongebietsvorschlag Walchhofquellen. – 52 S., unveröff. Bericht, Saalfelden.
- [13] NAGL, H.(1974): Hydrologische Untersuchungen im oberen Ennsgebiet. –Mitteilungen naturwissenschaftlicher Verein Steiermark, Band 104: S. 39-56; Graz.
- [14] ROSSNER, R. (1979): Gebirgsba **Freitag 16.10.2020** **11:15-11:45** Tauernfensters (Nördliche Radstädter Tauern, Österreich).- Jb. Geol. B.-A.: 122: 251-387, Wien.

## **Erfassung und polygonbasierte flächendeckende Ausweisung hydraulischer Substrateigenschaften als Basis für eine Charakterisierung der Pedosphäre, FORSITE – Dynamische Waldtypisierung Steiermark**

Brandstätter, J.<sup>1</sup>, Englisch, M.<sup>2</sup>, Katzensteiner, K.<sup>3</sup>, Klebinder, K.<sup>4</sup>, Klosterhuber, R.<sup>5</sup>, Proske, H.<sup>6</sup>, Vacik, H.<sup>7</sup>, Wagner, T.<sup>1</sup>, Wilhelmy, M.<sup>8</sup>, Winkler, G.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institut für Erdwissenschaften, Nawi Graz Geozentrum, Karl-Franzens-Universität Graz

<sup>2</sup>Institut für Waldökologie und Boden, BFW Wien

<sup>3</sup>Institut für Waldökologie, Universität für Bodenkultur Wien

<sup>4</sup>Institut für Naturgefahren, BFW Innsbruck

<sup>5</sup>WLM Büro für Vegetationsökologie und Umweltplanung Klosterhuber & Partner OG, Innsbruck

<sup>6</sup>Institut für Informations- und Kommunikationstechnologien, JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft mbH Graz

<sup>7</sup>Institut für Waldbau, Universität für Bodenkultur Wien

<sup>8</sup>ALPECON Wilhelmy Geowissenschaften GmbH, Telfes i. Stubai

### **Abstract**

*The project “Dynamische Waldtypisierung Steiermark (FORSITE)” aims to characterize the suitability of tree species mixtures for forest sites considering future conditions due to climate change in Styria. The potentials and risks of endemic and non-endemic tree species are to be described and the adaptation of forest management related to climate change will be derived. Therefore, the generation of an areal data set related to soil properties including water, heat and nutrient balances is essential to characterize the resources for tree growth. A comprehensive information on unconsolidated rock substrate and the subjacent lithologies is essential for the interpretation of the genesis of the pedosphere. Based on in situ characterization of the substrate at more than 1800 sites and laboratory analyses of 240 substrate samples (grain size, total mineral and clay mineral components, and petrographical description) an areal substrate distribution (map) was derived. These data were used for the regionalization of hydraulic and nutrient substrate properties. The herein presented research focus on the regionalization of the porosity and saturated hydraulic conductivity based on the grain size distribution and bulk density of the substrate. These values are important for the areal modelling of the soil water balance and in further consequence for the modelling of tree growth.*

### **Einleitung**

Wälder unterliegen in Zeiten rascher Klimaänderung und immer häufiger vorkommenden Klimaextremen hohen Belastungen. Bedingt durch biotische und abiotische Störungen erhöht sich die Mortalität der Baumarten, die geregelte Forstwirtschaft muss immer öfter auf die veränderten Rahmenbedingungen in der Waldbehandlung reagieren. Kenngrößen zum Wärme-, Wasser- und Nährstoffhaushalt, welche bisher als konstant angenommen wurden, verändern sich für die einzelnen Waldstandorte aufgrund des Klimawandels, und die Planungsinstrumente sind daher entsprechend anzupassen. Aufgrund des Fehlens von Standortkarten in weiten Teilen Österreichs können Waldbesitzer derzeit auf eine wesentliche Planungsgrundlage für die Auswahl von Baumarten nicht zurückgreifen. Gerade in Hinblick auf die Klimaänderung sind allerdings verlässliche Informationen über die aktuellen und zukünftigen Standortsbedingungen für die Bewirtschaftung entscheidend (z.B. Vacik et al., 2019).

Um eine flächendeckende Modellierung der Bodeneigenschaften Wasser- und Nährstoffhaushalt unter dem Blickwinkel Klimawandel durchführen zu können, sind eine flächendeckende Klassifizierung des Substrats und seiner Eigenschaften sowie die Berücksichtigung der darunterliegenden Gesteine essentiell. Dabei bilden die durch Verwitterung entstandenen Lockersedimente mit der Zeit Lockergesteinsschichten, die ohne große Umlagerungsprozesse in situ entstehen oder durch unterschiedliche Transportprozesse in weiter Entfernung zum Ausgangsgestein abgelagert und mit anderen Gesteinseinheiten vermischt werden können. Diese Lockergesteinsschichten, vornehmlich in einer Tiefe von 1 bis 1,5 m unter der Geländeoberfläche bzw. unter dem eigentlichen Boden, werden als Substrat (Wilhelmy et al., akzeptiert) bezeichnet und stellen neben der Streu eine wichtige Grundlage für die Bodenbildung dar. Die mineralchemischen und physikalischen Eigenschaften des Substrats sind für die Bodenbildung relevant. Das Ausgangsgestein mit seinen Mineralen bestimmt die mineralchemische Zusammensetzung des Substrats, z.B. ein karbonatisches Gestein besteht aus den Mineralen Kalzit und/oder Dolomit und schafft eine ganz andere Grundlage für die Bodenbildung als ein quarzreiches saures Gestein. Je nach Korngrößenspektrum und Feinanteil (Komponenten kleiner 2 mm), variieren die hydraulischen Eigenschaften wie gesättigte hydraulische Leitfähigkeit und Porosität, welche einen direkten Einfluss auf den Wasserhaushalt der Waldstandorte haben.

In den letzten beiden Jahren wurde eine nahezu flächendeckende Ausweisung des Substrats für die gesamte Steiermark durchgeführt. Die hier näher beschriebene flächenhafte Substrat-Ausweisung ist in Österreich die erste ihrer Art für ein so großes Untersuchungsgebiet und kann als wichtige Grundlage für weitere Schritte in der forstlichen Planung angesehen werden. Mit diesem Beitrag soll die Klassifizierung und Ausweisung des Substrats über konkrete Aufnahmepunkte und v.a. die darauf aufbauende flächenhafte Umsetzung der physikalischen Parameter hydraulische Leitfähigkeit und Porosität als Grundlage für die Wasserhaushaltsmodellierung der Waldstandorte beschrieben werden.

### **Untersuchungsgebiet und Methodik**

Im Zuge des Projekts FORSITE fanden 2019 Geländeerhebungen des Substrats entlang des Forststraßennetzes in der gesamten Steiermark statt. Das Arbeitsgebiet umfasste ca. 1.000.000 ha Waldfläche und reichte bis in die höheren Regionen in ca. 1900 m Seehöhe. Dabei wurden entlang des Forststraßennetzes Lockergesteinsschichten, welche das Substrat für die Bodenbildung darstellen, aufgenommen.

Für die Erstellung der Substratkarte der Steiermark wurden sowohl Punktinformationen der 2962 Substrat-Aufnahmepunkte im Gelände und zusätzlicher parallel aufgenommener bodenkundlicher Ansprachen als auch flächenhafte Informationen aus der Lockergesteinskarte der GBA, Laserscandaten, Orthofotos, geologische Grundlagendaten und die digitale Bodenkarte berücksichtigt. An 353 der 2962 Aufnahmepunkten wurde eine Probe entnommen, wovon 240 repräsentative Substratproben im Labor physikalisch (Sieb- und Schlämmanalysen), (ton-) mineralogisch (Röntgendiffraktometer) und petrographisch analysiert wurden.

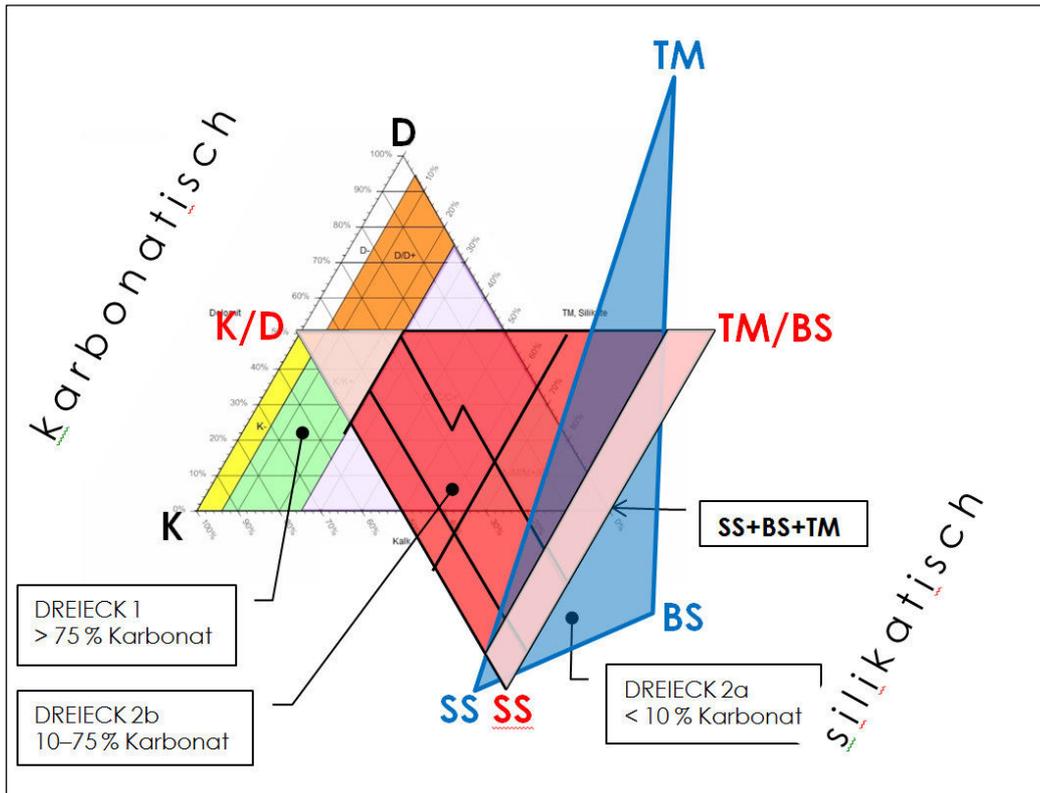
Die Substratbeschaffenheit der Lockergesteinsflächen wurde genetisch, mineralchemisch und bodenphysikalisch klassifiziert und nach einem einheitlichen Aufnahmeschema (entwickelt in Tirol) digital im Gelände aufgenommen. Die dabei ausgewiesenen Parameter umfassen die genetische Klassifikation des

Substrats (Gentyp), die Substratgesellschaft (SGes) und die Matrix (Fraktion < 2mm), die Parameter sind im nachstehenden Unterkapitel „Klassifikation“ näher erläutert. Weitere Aufnahmeparameter im Gelände waren die Deckmächtigkeit und der Deckzustand (unterteilt in die Klassen Streu, Schleier, lückig, voll <1 m, voll > 1m), wie auch die Lagerungsdichte (Ld, „locker“, „dicht“ und „überkonsolidiert“) des Substrats. Die maximale Aufnahmetiefe betrug 1,5 m, eine eventuell vorhandene 2. Schicht innerhalb der 1,5 m Profiltiefe wurde getrennt betrachtet.

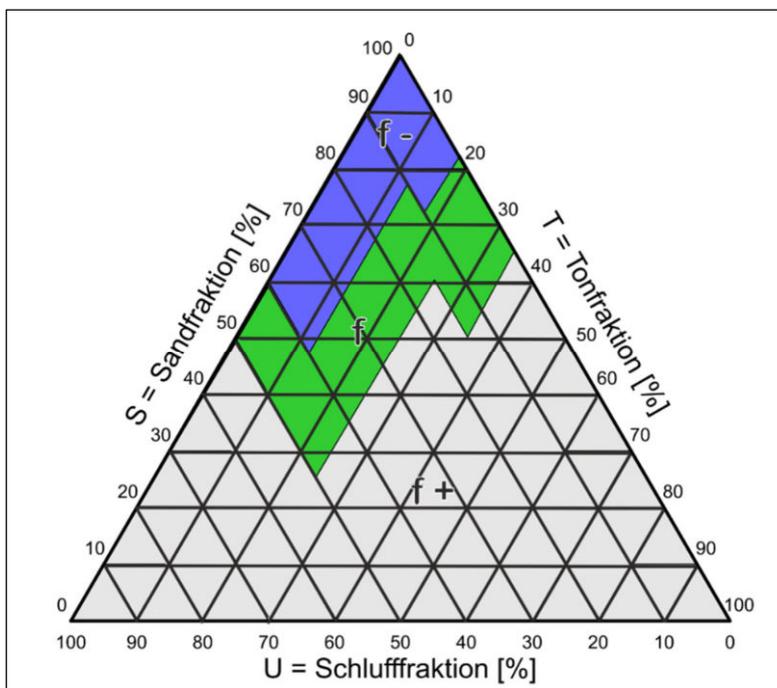
### Klassifikation

- Die *genetische Klassifizierung* des Substrats (Gentyp) erfolgte im Gelände anhand makroskopisch unterscheidbarer Prozesse, die im Vorfeld in insgesamt 43 unterscheidbare „Typen“ (Tabelle im Anhang) klassifiziert worden sind. Diese Unterteilung ist zurückzuführen auf die Vielzahl an Ab- und Umlagerungsprozessen in alpinen Faziesräumen und Sedimentationsprozessen im Steirischen Neogenbecken, welche zu sehr unterschiedlichen Lockergesteinen und damit Substraten führen können.
- Die *mineralchemische Zusammensetzung* des Substrats (SGes) wurde durch drei mineralchemische Dreiecke bestimmt (Abbildung 1). Von Dreieck 1 über Dreieck 2b zu Dreieck 2a wird von Karbonat dominierten hin zu „rein“ silikatischen Substraten die Klassifikation entwickelt. Das **„Karbonat“-Dreieck 1, für Substrate mit über 75 % Karbonatanteil**, differenziert Karbonat in Dolomit und Kalk und fasst alle silikatischen Bestandteile zusammen. Auf die Unterscheidung zwischen Tonmineralen und dem praktisch inerten Quarz wird hier verzichtet. Das **„Karbonat-Silikat“-Dreieck 2b, für Substrate mit einem Karbonatanteil von 10 bis einschließlich 75 %**, fasst die Karbonate zusammen und unterscheidet zwischen den sauren Silikaten und den übrigen Silikaten (Tonminerale + basische Silikate).
  - a) Im **„Silikat“-Dreieck 2a, für Substrate mit weniger als 10 % Karbonatanteil**, ist durch die Differenzierung die Wichtigkeit der Tonminerale und basischen Silikate gegenüber den meist sehr hohen Anteilen an skelettbildenden „sauren“ Quarz- und Alkali-Feldspat-bestimmten Silikaten ausgedrückt. Ein bis zu 10 % betragender Anteil an Karbonat wird den basischen Silikaten zugerechnet.
  - b) Durch Abschätzung der *Korngrößenzusammensetzung* des Substrats wurde die Matrixfraktion (= Feinanteil < 2mm) mit Hilfe eines Matrix-Dreiecks klassifiziert, welche in drei Klassen (f-, f und f+) gegliedert wird (Abbildung 2). Dieses Matrix-Dreieck ist angelehnt an das Dreieck der Bodenarten für die Bodenkunde. Ein Substrat mit > 80% Grobanteil (≥ 2mm) wurde als korngestützt (g) klassifiziert. Die analytisch bestimmte Korngrößenzusammensetzung der 240 Proben und die Abschätzungen des Verhältnisses von Grob- und Feinfraktion im Gelände wurden für weitere Berechnungen zum Wasserhaushalt verwendet.

Auf Basis dieser Ergebnisse wurde das Substrat analog dem Schemaablauf in Abbildung 1 und 2 klassifiziert und eine SGes bzw. ein entsprechender Feinanteil (Matrix) zugewiesen.



**Abbildung 1:** Zusammenhang der drei mineralchemischen Dreiecke, in welchen die 5 Komponentengruppen K = Kalk, D = Dolomit, SS = saure Silikate, BS = basische Silikate, TM = Tonminerale, Chlorit + übrige Silikatanteile und Akzessorien, dargestellt werden.



**Abbildung 2:** Dreieck der Matrixfraktionen f-, f und f+.

Unter Einbindung all dieser punktuellen Informationen und der flächenhaften Informationen (Lockergesteinskarte der GBA, Laserscandaten, Orthofotos, geologische Grundlagendaten und die digitale

Bodenkarte) wurden für die gesamte Steiermark (16.400,6 km<sup>2</sup>) 32.050 Polygone ausgewiesen, die jeweils einen Homogenbereich in Bezug auf Substrat darstellen.

### Wasserhaushalt

Auf Basis der physikalischen Laborergebnisse sowie der Substrateigenschaften Lagerungsdichte, Matrix- und Grobfraction, die im Gelände zugewiesen wurden, wurden die gesättigte hydraulische Durchlässigkeit (Ks-Wert) und die Porosität berechnet.

Der **Ks-Wert** der Substratschicht wurde auf Basis der Korngrößenverteilung sowie der Geländeansprache der Lagerungsdichte in zwei Berechnungsschritten quantifiziert.

In einem ersten Schritt wird Ks der Feinfraktion (< 2mm) anhand von Pedotransferfunktionen zweier verschiedener Ansätze berechnet.

- a) Über die Datenbank Rosetta (Version 1.1 sowie 3, Schaap et al., 2001)
- b) Über Zuordnung anhand des DWA-A 920-1 Regelblattes (2017). Die Grundlage für die Berechnung von Ks hierbei ist die Zuweisung der Bodenart auf Basis der Korngrößenverteilung und der Lagerungsdichte (Ld). Für die Quantifizierung der Lagerungsdichte wurden die im Gelände angesprochenen Lagerungsdichteklassen „locker“, „dicht“ und „überkonsolidiert“ herangezogen. Daraus wurden für „locker“ die für die DWA relevanten Ld-Werte 1,1/1,3/1,5 (Min/Mean/Max), für „dicht“ die Ld-Werte 1,55/1,75/1,95 (Min/Mean/Max) und für „überkonsolidiert“ die Ld-Werte 1,95/2,00/2,03 (Min/Mean/Max) angenommen.

Berücksichtigung der Grobfraction als 2. Schritt:

- c) Die gesättigte hydraulische Durchlässigkeit für das gesamte Kornspektrum (Fein- und Grobfraction) wird über das gewichtete Mittel der Ks-Werte der Feinfraktion und der drei Korngrößenklassen Fein-, Mittel- und Grobkies inkl. Steine berechnet. Die Berücksichtigung des Verhältnisses Grob- zu Feinfraktion entstammt der Geländeansprache und nicht der Laboranalyse. Der Ks-Wert der Grobfraction wird im Mittel auf die von mG mit  $5 \times 10^{-03}$  m/s festgesetzt (da im Gelände eine Aufteilung in fG, mG, gG und X nicht immer gegeben war).

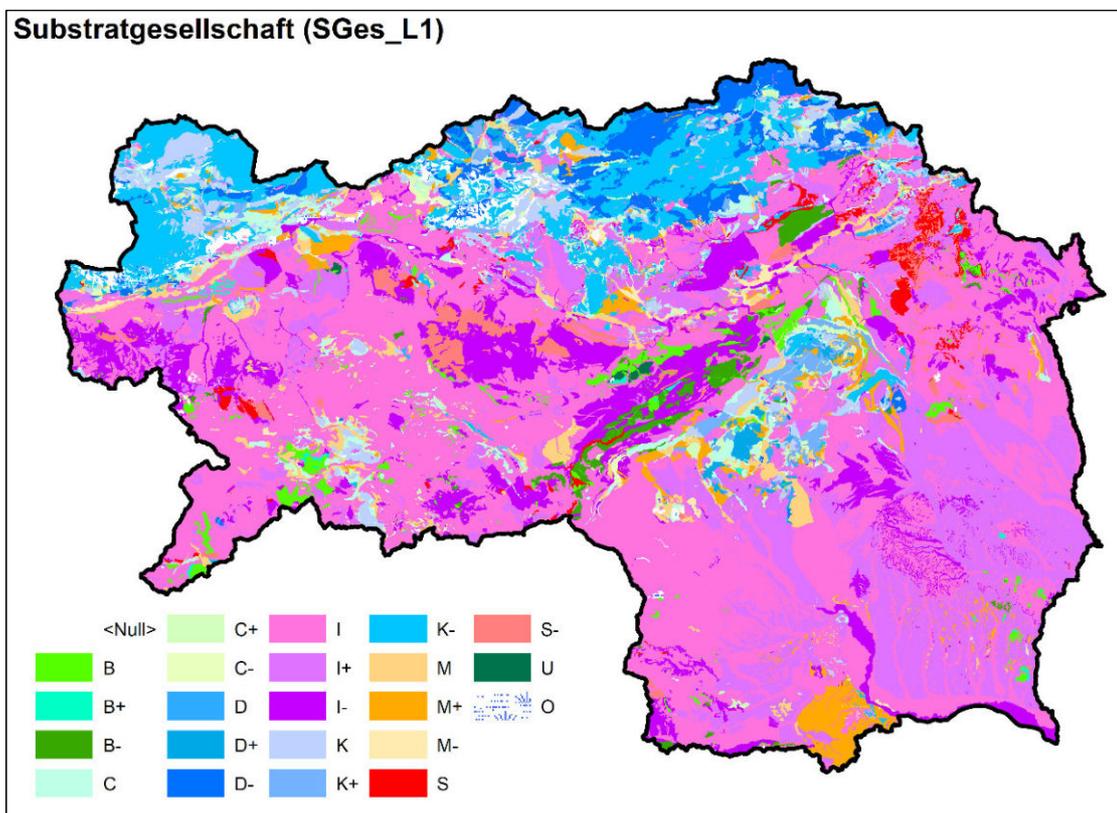
Die **Porosität** wurde über die Formel von Helmbold (2002) (siehe hierzu Fuchs et al., 2017) berechnet, welche eine Beziehung zwischen Gesamtporosität und Durchlässigkeitsbeiwert angibt, welcher aus der wie zuvor beschriebenen Ks-Berechnung abgeleitet wurde.

Um anhand der 240 Laborproben und daraus errechneten Ks- und Porositätswerten der jeweiligen Aufnahmepunkte eine flächenhafte Übertragung zu den Polygonen (Homogenbereichen) der Substratkarte zu erhalten, wurden die berechneten Ks-Werte der Aufnahmepunkte für jede zugewiesene Klasse „g/f-/f/+“ statistisch ausgewertet und der Medianwert (basierend auf DWA, siehe Abbildung 4) der jeweiligen Klasse schlussendlich auf die Polygone übertragen.

## Ergebnisse

### Substratkarte

Für die Erstellung der Substratkarte wurde eine Fläche von 16.400,6 km<sup>2</sup> mit 32.050 Polygonen gefüllt. 99 % dieser Polygone beinhalten Informationen zu Substratgesellschaft, Gentyt, Korngrößenzusammensetzung (Matrixfraktion), Deckmächtigkeit und Deckzustand.



**Abbildung 3:** Substratkarte der Steiermark mit den Substratgesellschaften der Lockergesteinsschicht 1 (L1).

Die dominierende Substratgesellschaft der Lockergesteinsschicht in der Steiermark ist

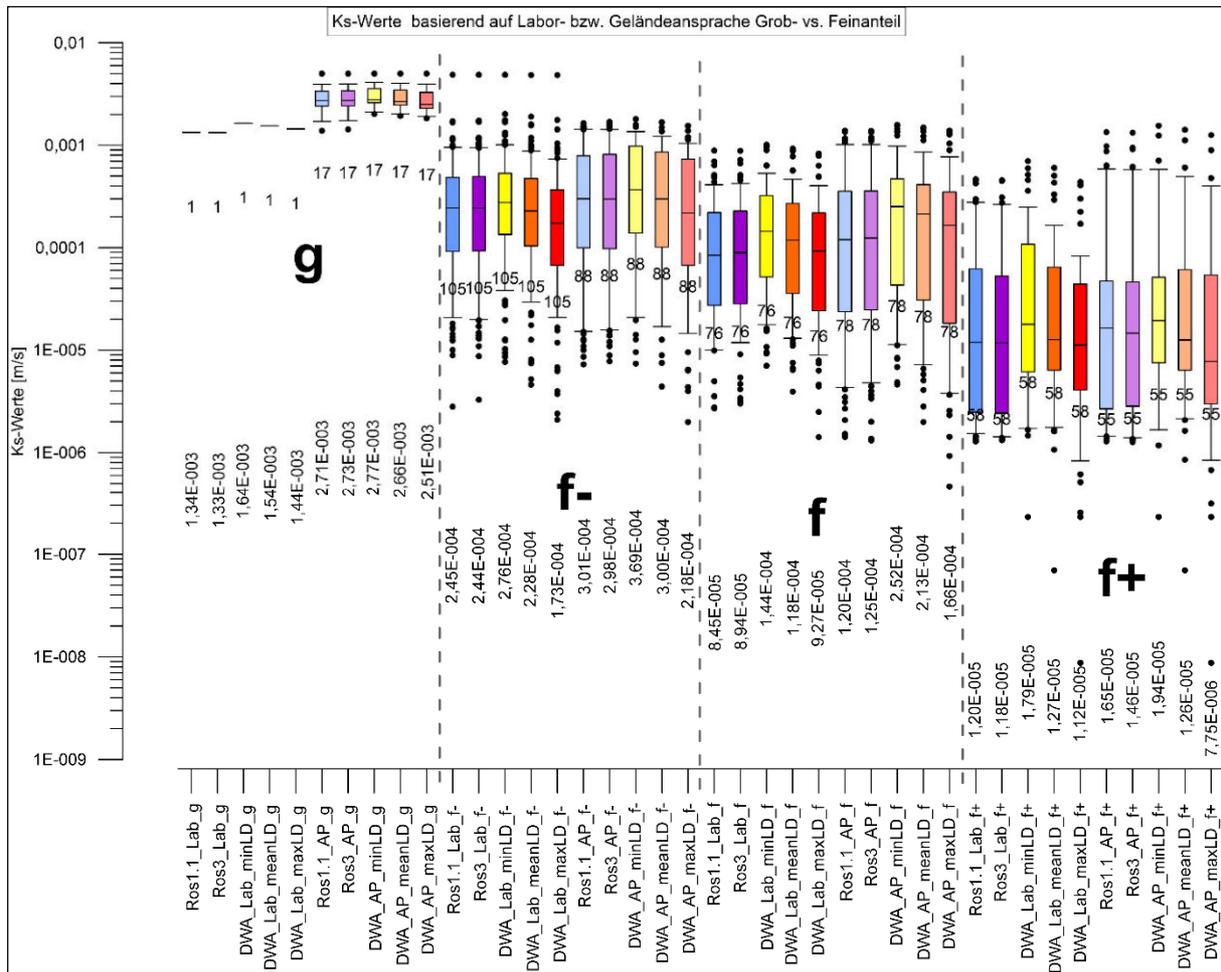
- d) I (intermediäre Silikatgesteine) mit einer Fläche von 6.537 km<sup>2</sup>,
- e) gefolgt von I+ (intermediäre Tongesteine) mit 2.705 km<sup>2</sup> und
- f) I- (intermediäre Silikatgesteine rückstandsarm/ feinmaterialarm) mit 1.627 km<sup>2</sup>.

Die Substratgesellschaft I+ tritt vor allem im Neogenbecken der Weststeiermark auf. Im Norden der Steiermark dominieren aufgrund der Nördlichen Kalkalpen karbonatische Substratgesellschaften wie Dolomit (D+, D, D-) und Kalk (K+, K, K-), wie auch nördlich von Graz, im Grazer Paläozoikum, vermehrt karbonatische Substratgesellschaften das Substrat bilden (Abbildung 3).

### Wasserhaushalt

Der Ks-Wert wurde mit zwei unterschiedlichen Methoden berechnet, wie im Kapitel Methodik bereits beschrieben. Die Basis der Berechnung stellte die Geländeansprache (\_AP in Abbildung 4), sowie die Laborergebnisse (\_Lab in Abbildung 4) dar. Der Vergleich der Resultate und folglich der Wertebereiche ist in Abbildung 4 mittels Box-Whisker Plots dargestellt. Es zeigt sich generell eine Korrelation zwischen Korngrößenverteilung und hydraulischer Durchlässigkeit, je grobkörniger das Substrat desto höhere

Leitfähigkeitswerte liegen vor. Unter Berücksichtigung der DWA zeigt sich auch, dass die hydraulische Durchlässigkeit mit höherer Lagerungsdichte abnimmt (minLD-> meanLD-> maxLD).



**Abbildung 4:** Box-Whisker Plots der berechneten Ks-Werte unterteilt in die einzelnen Klassen „g/f-ff/f+“. Ein Vergleich der unterschiedlichen Methoden (Rosetta, Version 1.1. und 3.0 der Datenbank sowie Anwendung des DWA Regelblattes mit den jeweiligen Bereichen (min, mean, max) an Lagerungsdichten (Ld). Einmal (\_Lab) werden die Grob- zu Feinanteile mittels reiner Laboransprache dargestellt, das andere Mal (\_AP) anhand des Verhältnisses der Geländeansprache. Zahlen in der Box zeigen die Anzahl der Proben pro Klasse; die Ks-Werte unter den jeweiligen Box-Whiskers sind die Medianwerte. Schwarze Punkte stellen Ausreißer dar; Whisker zeigen die 10/90 Perzentile.

### Schlussfolgerungen und Ausblick

Das Substrat weist sehr oft einen recht hohen Anteil an Grobfraktion auf, weshalb die klassische Berechnung mittels Pedotransferfunktionen nur ein unteres Limit der gesättigten hydraulischen Durchlässigkeit darstellt. Die Koppelung von Fein- und Grobfraktion und Einbindung der Lagerungsdichte über die DWA-Berechnung ermöglicht eine gute Abschätzung der physikalischen Eigenschaften dieser Lockermaterialschichten. Für die Ks-Wert-Berechnung ist die Anwendung des DWA Regelblattes u.U. die bevorzugte Methode, da die Lagerungsdichte mitberücksichtigt wird, welche hier in die jeweiligen Bereiche min/mean/max gegliedert werden kann. Die unterschiedlichen Methoden zur Berechnung der hydraulischen Durchlässigkeit zeigen

deutlich eine Unterteilung in die vier verschiedenen Klassen „g/f-/f/f+“, welche eine gute Basis für die Übertragung in die Fläche darstellt.

Die Ergebnisse dienen in Kombination mit den getrennt erhobenen Bodeneigenschaften und Klimainformationen der Ableitung des Geländewasserhaushalts als ein wesentlicher durch Klimaänderungen stark beeinflussbare Standortsfaktor für das Waldwachstum.

### **Danksagung**

Der Auftraggeber für FORSITE ist das Land Steiermark, die Finanzierung erfolgt über das österreichische Programm zur ländlichen Entwicklung (LE 14-20). Das Projekt wird durch acht nationale Institutionen bearbeitet (Universität für Bodenkultur; BFW Bundesforschungszentrum für Wald; Universität Graz; WLM Büro für Vegetationsökologie und Umweltplanung; ZAMG Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik; ALPECON Techn. Büro für Geowissenschaften; Joanneum Research; JR-AquaConSol). FORSITE wurde im Sommer 2018 gestartet, der Projektabschluss ist im Jahr 2021 geplant.

### **Referenzen**

DWA-A-920-1 (2017): Bodenfunktionsansprache, Teil 1: Ableitung von Kennwerten des Wasserhaushalts, S.67.

Fuchs, S., Ziesche, M., Nillert, P. (2017): Empirische Verfahren zur Ableitung verschiedener Porositätsarten aus Durchlässigkeitsbeiwerte und Ungleichkörnigkeitszahl – ein Überblick. –Grundwasser, 22, 83-101.

Helmbold, F. (2002): Beschreibung des Rechenprogrammes GWDREI, Programm zur Simulation der dreidimensionalen gesättigten Grundwassermengen-und Güteströmung, RWE Rheinbraun AG, unveröffentlicht.

Schaap, M.G., Leij F.J., Van Genuchten M. TH. (2001): Rosetta: A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. – Journal of Hydrology, 251, 163-176.

Vacik, H., Formayer, H., Katzensteiner, K., Grabner. M., Wilhelmy, M., Englisch, M., Klebinder, K., Proske, H., Poltnig, W., Winkler, G., Klosterhuber, R., Podesser, A. (2019): FORSITE - a dynamic forest site classification to support adaptive forest management. XXV IUFRO World Congress - Forest Research and Cooperation for Sustainable Development, Curitiba, Sep 29 - Oct 5, 2019, Pesquisa Florestal Brasileira, 39 e201902043, 386-386.

Wilhelmy, M., Hotter, M., Klosterhuber, R., Simon, A., Winkler, G., Klebinder, K., Katzensteiner, K., Englisch, M., Vacik, H., Proske, H., Poltnig, W., Hopf, S., Gruber, J. (akzeptiert): Classification of subsolum geological substrates (SGS) as basis for soil formation and area covering data about nutrient potential and water balance. EUROSIL2020CONT-2143, Geneva.

## Anhang: Tabelle der Gentyp-Klassen

| Gentyp                                      | txt | Subgentyp                        | Beispiele / Erklärungen   |
|---|-----|----------------------------------|---|
| <b>Anthropogen – HUMAN</b>                  | Hx  | undifferenziert                  | Geländeform anthropogen, unspezifiziert   |
|   | Hgr | dominante Korngröße Kies         | Abraumhalden v on Bergbauarealen  |
|   | Hsa | dominante Korngröße Sand         | Abraumhalde, Bodenaushub fein   |
|   | Hsi | dominante Korngröße Schluff/Lehm | Anschüttungen in Senken   |
|   | Hcl | dominante Korngröße Ton          | Anschüttungen in Senken   |
|   | Ho  | organisch                        | Kulturboden stark humos, Planie   |
| <b>Äolisch – EOLIC</b>                      | Ex  | undifferenziert                  | Löss  |
|   | Ef  | äolische Schluffe und Tone       | Löss  |
|   | Esa | äolische Sande                   | Löss  |
| <b>Lakustrine – LACUSTRINE</b>              | Lx  | undifferenziert                  | Sedimentationsraum v ermutet lakustrin, Senken  |
|   | Li  | glazigen                         | glazilakustrine Feinsande, Schluffe und Tone  |
| <b>Fluvial – FLUVIAL</b>                    | Fx  | undifferenziert                  | Sedimentationsraum v ermutet fluvial  |
|   | Fa  | Alluvion                         | Talablagerungen ± auf Niveau Vorflut  |
|   | Fj  | Schwemmfächer                    | Oberflächengefälle ca. < 5°; oft perennierendes Gerinne   |
|   | Fc  | Murkegel                         | Oberflächengefälle ca. > 5°, Sortierung gering, Gerinne meist nur episodisch                    |
|   | Fs  | Auswaschung, Suspensionsaustrag  | kolluviale Ablagerungen an Unterhang/Senke  |
|   | Ft  | Terrasse allgemein               |   |
|   | Fff | Terrasse feinkörnig              |   |
|   | Ftg | Terrasse grobkörnig              |   |
| <b>Moräne – TILL</b>                        | Tx  | Moräne undifferenziert           | glaziale Ablagerungen, keine Spezifizierung   |
|   | Tz  | Grundmoräne                      | Überkonsolidierte Diamikte mit v ergleichsw. hohem Feinanteil; häufig mit gekritzten Geschieben |
|   | Ty  | Seiten- und Endmoräne            | Meist mit erkennbaren Wallformen, v ergleichsw. hoher Grobanteil                                |
|   | Tb  | Obermoräne und Blockgletscher    |   |
| <b>Gravitative Bildung – GRAVIT</b>         | Gx  | undifferenziert                  | Überwiegend gravitativ er Transport angenommen  |
|   | Gb  | Blockwerk                        | Fels- und Bergsturzablagerungen, Blockschutt am Unterhang v on Sturzhalden                      |
|   | Gd  | Schutt                           | weites Korngrößenspektrum Sande bis Steine  |
|   | Gr  | Rutschmasse                      | Lockergesteinsrutschmassen, Fließerden, Solifluktsdecken  |
| <b>Paläoboden – PALEO</b>                   | Px  | Paläoboden, undifferenziert      |   |
|   | Pw  | Residuum                         |   |
| <b>Organisches Material, Torf – ORGANIC</b> | Ox  | Moor undifferenziert             |   |
|   | Oh  | Hochmoortorf, Regenwassermoor    |   |
|   | Ou  | Übergangsmoortorf                |   |
|   | Oi  | Niedermoortorf                   |   |
|   | Ov  | Vernässungen                     |   |
| <b>Marine – MARINE</b>                      | Mx  | undifferenziert                  |   |
|   | Mf  | Sediment feinklastisch           |   |
|   | Mg  | Sediment grobklastisch           |   |
|   | Mk  | Sediment karbonatisch            |   |
| <b>Unbekannte Gruppe - X</b>                | Xgr | dominante Korngröße Kies         |   |
|   | Xsa | dominante Korngröße Sand         |   |
|   | Xsi | dominante Korngröße Schluff/Lehm |   |
|   | Xcl | dominante Korngröße Ton          |   |

## **Großflächige Regionalisierung der Pedosphäre im Rahmen des Projektes FORSITE – Dynamische Waldtypisierung Steiermark**

Klebinder Klaus<sup>1</sup>, Katzensteiner Klaus<sup>2</sup>, Englisch Michael<sup>3</sup>, Winkler Gerfried<sup>4</sup>, Klosterhuber Ralf<sup>5</sup>, Färber Vanessa<sup>1</sup>, Fromm Reinhard<sup>1</sup>, Huber Tobias<sup>1</sup>, Gadermaier Josef<sup>2</sup>, Keßler David<sup>3</sup>, Vacik Harald<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Institut für Naturgefahren, BFW Innsbruck

<sup>2</sup> Institut für Waldökologie, Universität für Bodenkultur Wien

<sup>3</sup> Institut für Waldökologie und Boden, BFW Wien

<sup>4</sup> Institut für Erdwissenschaften, Nawi Graz Geozentrum, Karl-Franzens-Universität Graz

<sup>5</sup> WLM Büro für Vegetationsökologie und Umweltplanung Klosterhuber & Partner OG, Innsbruck

<sup>6</sup> Institut für Waldbau, Universität für Bodenkultur Wien

### **Zusammenfassung**

*Auf Grund der forstwirtschaftlichen Folgen des Klimawandels werden in der Waldbewirtschaftung neue dynamische Planungsinstrumente benötigt, um die Baumarteneignung unter zukünftigen klimatischen Bedingungen abzuschätzen. Der Boden nimmt in der Charakterisierung eines Standortes als Wasser- und Nährstoffspeicher eine zentrale Rolle ein. In Österreich existieren für Waldflächen keine flächendeckenden standardisierten Bodeninformationen. Im Projekt FORSITE werden moderne Ansätze entwickelt, um diese Grundlagen aus hochwertigen terrestrischen Standortaufnahmen in die Fläche zu modellieren (Regionalisierung). Neben physikalischen Parametern (z.B. Bodentextur, Skelettgehalt, Lagerungsdichte, ...) werden bodenchemische (z.B. organische Substanz, Basensättigung, pH-Wert,..) und bodenhydrologische Kennwerte (z.B. nutzbare Wasserspeicherkapazität, Durchlässigkeit,...) flächendeckend für die gesamte Waldfläche der Steiermark (> 1 Mio ha) abgeleitet. In diesem Beitrag werden die methodischen Ansätze und erste Ergebnisse zur Regionalisierung ausgewählter Parameter der Pedosphäre diskutiert.*

### **Abstract**

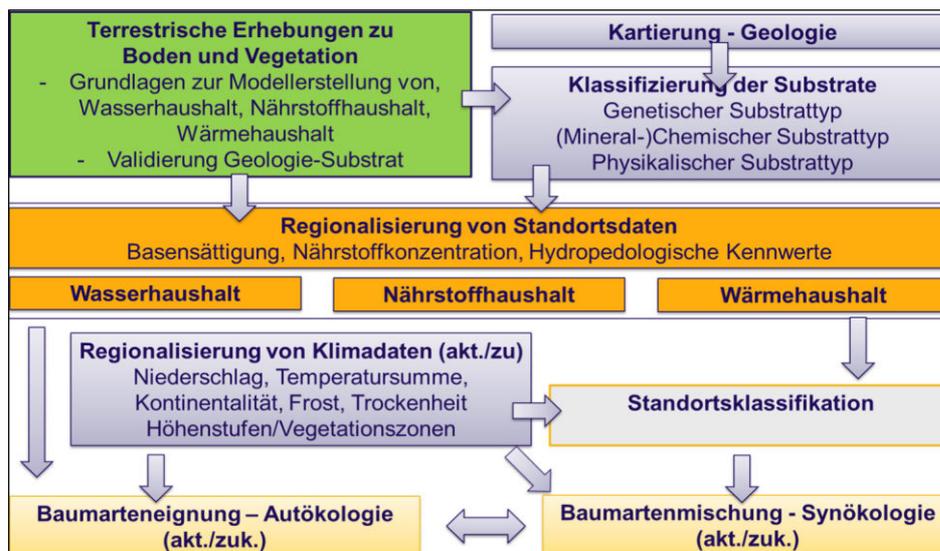
*Due to the impact of climate change on forests new dynamic planning instruments are needed to assess the future suitability of tree species. The pedosphere takes a major role in characterisation of water storage and nutrient supply. For forests there are no standardized soil maps in Austria. Thus, in the current project FORSITE modern methods will be developed to generate such information based on a sufficient number of high-quality terrestrial field surveys. It will be mapped for the forest area in Styria (more than 1 Mio. ha) values like physical (soil texture (grain distribution), content of coarse material, bulk density, ...) as well as chemical (organic matter, base saturation, pH-value, ...) and hydropedological (useable water capacity, hydraulic conductivity, ...). In this article our concept for digital soil mapping and first results will be discussed.*

### **Einleitung**

Wälder unterliegen in Zeiten rascher Klimaänderung hohen Belastungen, da aktuell stockende Baumarten zunehmend in Randbereiche ihrer ökophysiologischen Ansprüche gedrängt werden. Bisher konnten, abgesehen von den natürlichen jährlichen Schwankungen, Kenngrößen zum Wärme-, Wasser- und

Nährstoffhaushalte die sogenannten Standortfaktoren und -merkmale als konstant angenommen werden. Mit dem Klimawandel muss diese Annahme allerdings korrigiert werden. Waldschäden in Folge von Trockenheit, Hitze oder Sturm, welche in weiterer Folge Kalamitäten hervorrufen, bestimmen zunehmend den forstwirtschaftlichen Alltag und erfordern deshalb moderne klimasensitive Planungsinstrumente.

Das Projekt „dynamische Waldtypisierung Steiermark“ (FORSITE, Abb.1, Vacik et al., 2019) hat zum Ziel, flächendeckend für die gesamte Waldfläche der Steiermark (> 1 Mio. ha) Datengrundlagen zu den geologischen Gegebenheiten und dem daraus entstandenen Substrat (Brandstätter et al., 2020), dem Boden sowie den Haushaltsgrößen Wasser, Wärme und Nährstoffe als Grundlage für die Baumartenwahl zu generieren. Basierend auf diesen Grundlagen wird eine Standortklassifizierung durchgeführt, bei der neben den aktuell-historischen klimatischen Bedingungen auch zukünftige Klimaszenarien in der Ausscheidung und Beschreibung der Waldstandorte berücksichtigt werden. Das Projekt setzt sich in weiterer Folge mit der aktuellen und auch zukünftigen Eignung unterschiedlicher Baumarten für die jeweiligen Standortseinheiten auseinander, aber auch mit der Veränderung der Standortseinheiten unter dem Einfluss des Klimawandels. Dabei werden Chancen und Risiken beschrieben und Empfehlungen für eine adaptierte Waldbewirtschaftung gegeben. Als Basis jeglicher Ableitungen und Bewertungen wurden im Sommer 2019 umfangreiche terrestrische Erhebungen zu Geologie, Substrat, Boden, Vegetation und Bestand durchgeführt.



**Abb. 1:** Struktur des Projekts FORSITE

Der Boden stellt in Bezug auf die Eignung von Baumarten eine zentrale Rolle dar, da durch diesen sowohl der Wasserhaushalt als auch der Nährstoffhaushalt maßgeblich beeinflusst wird. Zum Waldboden existieren in Österreich aktuell keine flächendeckenden Datengrundlagen in waldbaulich relevantem Maßstab - im Besonderen fehlen Kennwerte zu bodenphysikalischen, -hydrologischen und -chemischen Charakteristika. Es besteht daher die Notwendigkeit, die Pedosphäre aus punktuellen Erhebungen unter Einbeziehung geologischer, klimatischer, topographischer Indikatoren sowie Bestandes- und Landnutzungsdaten zu modellieren.

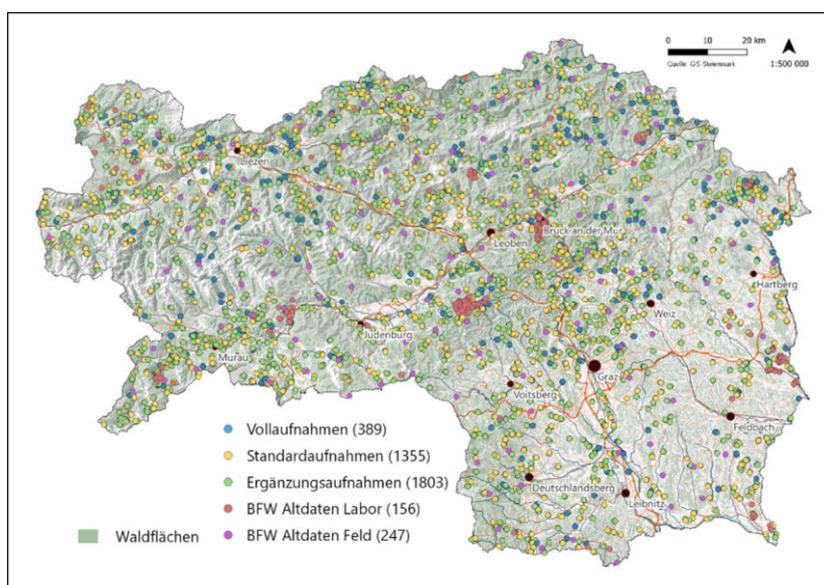
Der Auftraggeber für FORSITE ist das Land Steiermark, die Finanzierung erfolgt über das österreichische Programm zur ländlichen Entwicklung (LE 14-20). Das Projekt wird durch acht nationale Institutionen

bearbeitet (Universität für Bodenkultur; BFW Bundesforschungszentrum für Wald; Universität Graz; WLM Büro für Vegetationsökologie und Umweltplanung; ZAMG Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik; ALPECON Techn. Büro für Geowissenschaften; Joanneum Research; JR-AquaConSol). Das auf drei Jahre anberaumte Projekt wird 2021 abgeschlossen werden.

## Methodik

Bei der Regionalisierung werden die Ergebnisse kleinflächiger bzw. punktueller Erhebungen an Einzelstandorten auf die gesamte Waldfläche der Steiermark ausgerollt. Als Datenbasis zur Regionalisierung dienen Bodenaufnahmen aus unterschiedlichen Quellen, die sich sowohl in qualitativer als auch inhaltlicher Weise unterscheiden (Abb. 2).

- 1) FORSITE Vollaufnahmen: Innerhalb des Projektes FORSITE konnten im Sommer 2019 flächenverteilt über die gesamte Steiermark an 389 Standorten Bodenansprachen an Profilgruben bis 80cm Tiefe durchgeführt werden. Dabei wurden über Feldmethoden (z.B. Fingerprobe zur Feststellung der Bodentextur) wichtige Bodencharakteristika (Bodenart, Skelettgehalt, Lagerungsdichte, Durchwurzelung etc.) erhoben. Ergänzend wurde an diesen Standorten in fünf definierten Tiefenstufen Material geworben und bzgl. bodenphysikalischen (Sand, Schluff, Ton, Skelett, Feststoffdichte) und bodenchemischen (u.a. pH, Corg, Ntot, Mg, Ca, K, P,...) Kennwerten analysiert. An ausgewählten Standorten (24) wurden weiters bodenhydrologische Kennwerte (nutzbare Feldkapazität, hydraulische Leitfähigkeit) ermittelt.
- 2) FORSITE Standardaufnahmen: 1355 Standorte wie 1 jedoch ohne Laboranalysen.
- 3) FORSITE Ergänzungsaufnahme: 1803 Standorte als Ergänzung zu 1 und 2 mit einer stark reduzierten Bodenansprache (Bohrstock).
- 4) BFW „Altdaten“: 403 Standorte aus alten Aufnahmen des BFW bzw. bestehenden Inventurprogrammen (z.B. Waldbodenzustandsinventur) mit und 5) ohne Laboranalysen.



**Abb. 2:** Aufnahmestandorte

Als Prädiktoren (Inputdaten) zur Regionalisierung werden herangezogen:

- Topographische Indizes (ca. 15), abgeleitet aus dem digitalen Höhenmodell, U.a. Höhenlage, Topographic Position Index, Wetness Index, Reliefklasse, Convergenz Index, ...
- Indizes zu Geologie und Substrat (ca. 10), aus dem FORSITE AP Geologie (Brandstätter et al. 2020)
- Klimatische Indizes (ca. 20), aus dem FORSITE Task Klimadaten. U.a. Niederschlagssumme Jahr/Vegetationsperiode, Mitteltemperatur Jahr/Vegetationsperiode, mittlere Globalstrahlung,
- Indizes zur Vegetation aus Fernerkundungsdaten (5). U.a. Biomasse, NDVI, Baumarten.

Die Regionalisierung (Abb. 3) erfolgt mittels künstlicher neuronaler Netzwerke (NN). Diese haben den Vorteil, dass unterschiedliche Datenformate verwendet werden können und dass die Ergebnisse am Ende in einem korrekten Datenbereich vorliegen. Die Herausforderung in der Modellierung besteht darin, dass mehrere Datenquellen zur Verfügung (flächen- und punktbezogene) stehen (Abb. 3), welche verschiedene Parameter enthalten und an unterschiedlichen Punkten erhoben wurden oder in Flächeninformationen eingeflossen sind. Durch die Heterogenität der Eingangsdaten können diese nicht in einem gemeinsamen Datensatz vereint werden. Als Lösung werden daher für jeden in-sich-einheitlichen Datensatz ein Neuronales Netz entwickelt, gefittet und danach mehrere Neuronale Netze kombiniert. Somit wird für alle Punkte der jeweils anderen Datensätze eine Schätzung berechnet. Das hat den Vorteil, dass neben den im FORSITE Projekt erhobenen Daten auch andere Datensätze verwendet werden können. Am Ende werden alle Teilnetze mit einem nachgestellten Netz vereint (Merging NN).

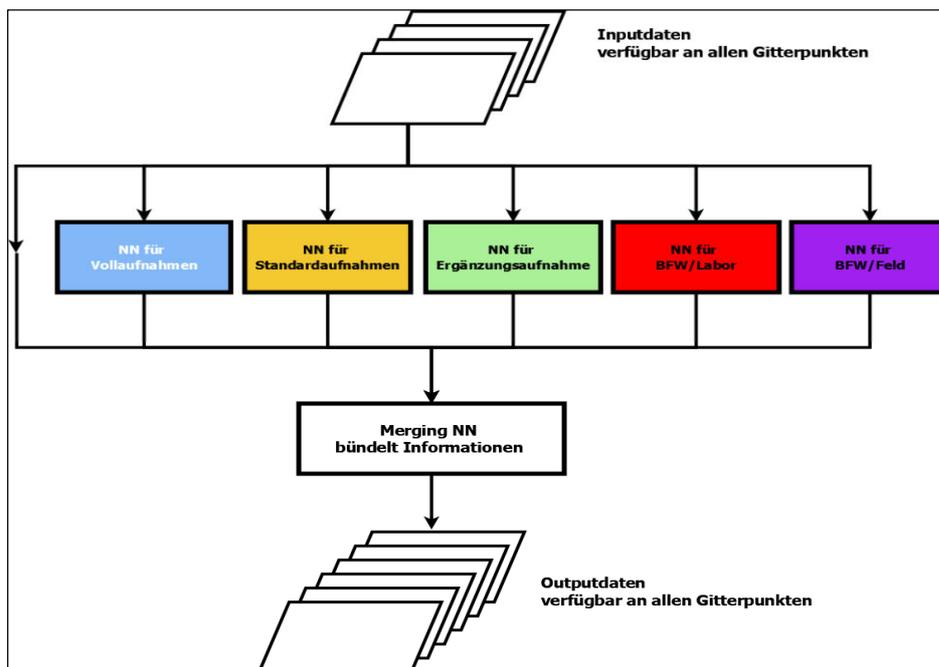


Abb. 3: Prozessablauf der Regionalisierung

## Ergebnisse

Im Zuge der Regionalisierung werden zahlreiche Parameter bearbeitet, welche für die weitere Standortsklassifikation bzw. die Modellierung der Baumarteneignung benötigt werden.

- Boden allgemein: Auflagehumusform und -mächtigkeit, Bodenmächtigkeit inklusive Substratanteil

- Bodenphysikalische Kennwerte: Sand-, Schluff-, Tongehalt, Lagerungsdichte, Skelettgehalt
- Bodenhydrologische Kennwerte: nutzbare Feldkapazität, gesättigte Leitfähigkeit, Gesamtwasserspeicher
- Bodenchemische Kennwerte: organischer Kohlenstoffgehalt, Basensättigung, pH-Wert, totaler Stickstoffanteil, Kationen-Austausch-Kapazität

Erste Modellläufe stimmen zuversichtlich, dass die komplexen Zusammenhänge, welchen die Pedosphäre unterworfen ist, mit modernen Regionalisierungsverfahren zufriedenstellend erklärt werden können. Bei der Diskussion der Ergebnisse ist auch immer zu beachten, dass trotz der verhältnismäßig sehr guten Datenlage in der Steiermark die Anzahl der vorhandenen Boden-Stützpunkte im Verhältnis zur Heterogenität und Größe der Wald(boden)fläche "überschaubar" ist.

### **Schlussfolgerungen und Ausblick**

Das österreichweite Fehlen einer einheitlichen Waldbodenkarte in geeignetem Maßstab (zumindest 1:25.000) stellt bei der Umsetzung regionaler Planungsinstrumente für forstwirtschaftliche Fragestellungen ein relevantes Problem dar. Um flächige Karten in der Planung berücksichtigen zu können, welche den Einfluss des Bodens auf das Baumwachstum berücksichtigen, muss daher auf Methoden der Modellierung zurückgegriffen werden (Digital soil mapping). Auf Grund der Komplexität der Bodenbildung, die über Jahrtausende unter Einfluss von Geologie, Geomorphologie, Relief, Klima und menschlicher Nutzung geprägt wird, müssen aufwendige Modellverfahren angewandt werden, um die kleinräumigen Unterschiede gut fassen zu können. Erste Versuche mit modernen Verfahren wie neuronale Netze zeigen dabei gute Erfolge. Die Modellierung der Pedosphäre innerhalb des Projektes FORSITE befindet sich in der Optimierungsphase und sollte bis zum Herbst 2020 abgeschlossen werden.

Im Generellen ist der Bedarf an flächigen Bodenkenntnissen über den Sektor der Forstwirtschaft hinausgehend groß. Beispiele sind Fragestellungen der Grundwasserneubildung, der Abflussprognose oder der Disposition für flachgründige Massenbewegungen. Durch die Fortschritte, die im Rahmen von FORSITE erzielt werden, können auch für diese Themenbereiche nachvollziehbare Datengrundlagen erarbeitet werden.

### **Literatur**

Brandstätter, J.; Englisch, M.; Katzensteiner, K.; Klebinder, K.; Klosterhuber, R.; Proske, H.; Vacik, H.; Wagner, T.; Wilhelmy, M.; Winkler, G. (2020): Erfassung und polygonbasierte flächendeckende Ausweisung hydraulischer Substrateigenschaften als Basis für eine Charakterisierung der Pedosphäre, FORSITE – Dynamische Waldtypisierung Steiermark. 22. GEOFORUM UMHAUSEN 15. UND 16. OKTOBER 2020.

Vacik, H; Formayer, H; Katzensteiner, K; Grabner, M; Wilhelmy, M; Englisch, M; Klebinder, K; Proske, H; Poltnig, W; Winkler, G; Klosterhuber, R; Podesser, A (2019): FORSITE - a dynamic forest site classification to support adaptive forest management. [XXV IUFRO World Congress - Forest Research and Cooperation for Sustainable Development, Curitiba, Sep 29 - Oct 5, 2019], Pesquisa Florestal Brasileira, 39 e201902043, 386-386.

**Danksagung Geoforum 2020:**

*Unser besonderer Dank gilt Herrn Landeshauptmann-Stellvertreter ÖR Josef Geisler, der – wie schon in den vergangenen Jahren – auch heuer das Geoforum Umhausen sehr unterstützt und mit seiner Wertschätzung für die Tagung wesentlich zu deren erfolgreichen Ablauf beiträgt.*

*Seit der ersten Tagung Geoforum Umhausen im Jahr 1999 ist die Gemeinde Umhausen ein unverzichtbarer Partner des Geoforums. Dem Bürgermeister der Gemeinde Umhausen, Herrn Landtagsabgeordneten und Klubobmann Mag. Jakob Wolf möchten wir angesichts der Covid-19 Pandemie besonders danken, da eine Planung und Durchführung der Tagung heuer ohne die Unterstützung durch die Gemeinde wohl nicht möglich gewesen wäre.*

*Die Unterstützung der Gemeinde zeigt sich dankenswerter Weise auch in der mit großem Engagement ausgeführten Mitarbeit durch Frau Lisa Falkner und andere Mitarbeiter der Gemeinde.*

*Ich möchte auch dem Organisationsteam – allen voran und ganz besonders Frau Mag. Petra Nittel-Gärtner und Herrn Mag. Wolfram Mostler sehr für ihr großes und unverzichtbares Engagement Danke sagen. Weiters gilt mein Dank Herrn Mag. Thomas Figl und seinen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Landesgeologie. Danke auch an Mag. Denise Braunhofer (ig.m).*

*Ohne dieses kleine, aber dafür umso tatkräftigere Team wäre die Organisation der Tagung nicht möglich.*

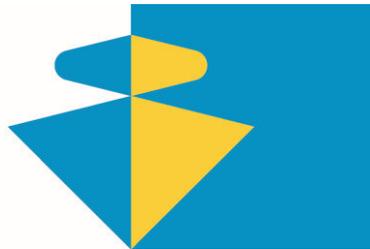
*Dr. Gunther Heißel*



projekt-partner



koordination mediation kommunikation



**FRÖSCHL BAU**



**PLATTNER & CO**



**Baugesellschaft m.b.H.**

