

27. GEOFORUM UMHAUSEN

16. - 17. OKTOBER 2025

Geoforum  
Tirol



TAGUNGSBAND

## Grußworte von Landesrätin Astrid MAIR, BA MA

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

Es vergeht wohl kein Jahr, in dem nicht irgendwo in den Alpen größere und teils katastrophenartig auftretende Naturereignisse die Menschen ihre Siedlungen und Verkehrswege bedrohen und teilweise auch zerstören. Vermutlich vergeht auch kaum ein Tag in den Alpen, an dem nicht Lawinen, Muren, Steinschlag und Blockstürze das Leben Einzelner bedrohen.



Als Landesrätin der Tiroler Landesregierung für Sicherheit und für den Zivil- und Katastrophenschutz liegt es in meinem besonderen Interesse, dass die jährlich stattfindenden interdisziplinären Treffen internationaler Fachexpertinnen und Fachexperten beim Geoforum Umhausen stets alle wichtigen Themen im Zusammenhang mit Naturereignissen und ihren negativen Auswirkungen und geeigneten Schutzmaßnahmen und Katastropheneinsätzen ausführlich behandeln und diskutieren.

So sollen auch Notfallmaßnahmen im realen Katastropheneinsatz unter der Leitung des Tiroler Zentrums für Krisen- und Katastrophenmanagement, das von der Tiroler Landesregierung 2021 gegründet wurde, durch Schulungen, die auch auf den interdisziplinären Erkenntnissen der Experten der Geoforum-Umhausen-Tagungen aufbauen, stets folgende zentrale Aspekte berücksichtigen: die Einsätze müssen stets so durchgeführt werden, dass sie nicht nur effizient, sondern auch unter der Gewährleistung der Sicherheit der Einsatzkräfte (Rettungskräfte, Feuerwehren, Straßenmeistereien, u.a.m.) ablaufen können.

Als für die Sicherheit im Land Tirol zuständiges Regierungsmitglied ist es mir sehr wichtig, dass das Geoforum Umhausen auch zukünftig jedes Jahr vorbeugende Strategien zur Vermeidung und zur Minimierung von Schadensereignissen durch Naturereignisse bis hin zu Katastrophenszenarien entwickelt, darstellt und diskutiert.

Ich darf nun das 27. Geoforum Umhausen 2027 mit großer Freude und großem Interesse eröffnen.

Ich wünsche Ihnen allen einen interessanten und erfolgreichen Verlauf und danke den Organisatoren der Tagung und freue mich auf ein Wiedersehen beim 28. Geoforum Umhausen 2026!

Astrid Mair, BA, MA

(Landesrätin für Sicherheit, ArbeitnehmerInnen, Generationen, sowie Zivil- und Katastrophenschutz)

## Grüßworte von LA Klubobmann Bgm. Mag. Jakob Wolf, Bürgermeister von Umhausen

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

Seit das Geoforum Umhausen, das 1999 hier in unserer Gemeinde das erste Mal stattfand, ist es eine vergleichsweise eher kleine, aber jedenfalls eine elitäre interdisziplinäre und internationale Fachtagung. So bin ich besonders stolz darauf, dass die Expertentagungen des Geoforum Umhausen im In- und Ausland viel beachtet und hochgeschätzt sind.



Unsere seit 1999 jährlich stattfindenden Tagungen zeichnen sich nicht zuletzt dadurch aus, dass von Anfang an Expertinnen und Experten aus zahlreichen Fachrichtungen die Einflüsse und Auswirkungen auf den alpinen Lebens- und Freizeitraum, hervorgerufen durch Witterung und Klimaänderungen behandeln und diskutieren, sodass dadurch die Theorie mit der Praxis sinnvoll zusammengeführt wird. So ist es möglich realistische Lösungen zu erarbeiten und vorzustellen.

Das Geoforum Umhausen hat so von seinem Beginn 1999 weg den Klimawandel und die dadurch nötigen Anpassungs- und Sicherheitsstrategien ins Zentrum seiner Betrachtungen gestellt und wird dies auch beim 27. Geoforum Umhausen 2025 tun.

Dies ist für alle Menschen, die im Alpenraum leben und arbeiten, oder hier ihren Urlaub verbringen, wichtig, geht es doch um ihre Sicherheit und die Erhaltung ihres Lebensraumes. Daraus folgert natürlich, dass die Erkenntnisse, die bei den jährlichen Tagungen des Geoforums vorgestellt und diskutiert werden, auch für die politischen Entscheidungsträger in den Gemeinden und Ländern bis hin zu den Nationalstaaten des Alpenraumes wichtig sind, weil sie dadurch ihre Entscheidung auf fachlich abgesicherten Fundamenten aufbauen können.

Der heurige öffentlich zugängliche Abendvortrag behandelt die Tiroler Waldstrategien 2030, die in Tirol bereits seit Jahren erfolgreich umgesetzt werden und die unsere Wälder zum Schutz unseres Lebensraumes zukunftsfit im Hinblick auf den Klimawandel machen. Gehalten wird der Vortrag vom obersten Forstexperten Tirols, dem Vorstand der Gruppe Forst im Amt der Tiroler Landesregierung, Herrn DI Harald Oblasser, Ich finde gerade auch die öffentlichen Abendvorträge im Rahmen der Geoforum Umhausen Tagungen besonders wichtig und zielführend, weil dadurch die Bevölkerung in die Fachkompetenz der Tagungen mit einbezogen wird.

Als Bürgermeister der Gemeinde Umhausen heiße ich alle Teilnehmerinnen und Teilnehmer des 27. Geoforums 2025 herzlich willkommen. Ich danke den Vortragenden für ihre interessanten Beiträge, der Zuhörerschaft für das große Interesse und den Organisatoren des Vereins Geoforum Tirol für ihren unermüdlichen Einsatz zur Organisation der Tagung. Ich darf mit Blick in die Zukunft feststellen, dass ich mich schon sehr freue Sie alle im Jahr 2026 zum 28. Geoforum Umhausen wieder willkommen heißen zu dürfen.

Mag. Jakob Wolf (Klubobmann der Volkspartei im Tiroler Landtag und Bürgermeister von Umhausen)

## 27. Geoforum Umhausen 2025 Editorial

Wer glaubt, dass zum Beispiel die Berge oder das „ewige“ Eis der Gletscher für die Ewigkeit geschaffen sind, unterliegt einem fundamentalen Irrtum und unterschätzt die seit Milliarden von Jahren ständig ablaufenden endogenen<sup>(1)</sup> und exogenen<sup>(2)</sup> Einflüsse auf die Erdoberfläche ziemlich deutlich.

Freilich haben wir Menschen ein fundamentales Problem, wenn wir Prozesse bzw. Vorgänge, die die Oberfläche der Erde in der Vergangenheit verändert haben, hinsichtlich ihrer Auswirkungen in ihren zeitlichen Abläufen möglichst den Tatsachen entsprechend einordnen zu wollen. Wirklich vorstellen können wir uns m.E. etwa die vergangenen 100 Jahre. „Dahinter“, also je weiter zurückliegend von der Gegenwart, wird es zunehmend „abstrakt“ und wir helfen uns mit vereinfachten Vorstellungen der Zeitabläufe unter Zuhilfenahme von Hilfsmitteln, etwa durch Maßstäbe, die die Zeiträume extrem vereinfacht und verkürzt darstellen, durch das Setzen von Kommas, oder durch sprachliche Tricks: z.B. wirken eintausend Jahre (oder Euro) auf uns harmloser als 999 Jahre (oder Euro). Wenn z.B. ein Ereignis vor 1,2 bis 1,3 Millionen Jahren stattfand, beträgt die „Unschärfe“ der Angabe immerhin 100.000 Jahre! In den letzten 100.000 Jahren ist auf der Erde – und somit auch in den Alpen - unermesslich viel an geologischen Prozessen geschehen und die Klimaänderungen waren in ihrer Intensität wohl nicht geringer als die in der Gegenwart. Mit Sicherheit lässt sich heute keines der Naturereignisse, das mit solchen der letzten 60 Jahre vergleichbar wäre, aus dem Zeitraum der letzten 10.000 und erst recht der letzten 100.000 Jahre noch erkennen und herausfiltern.

So ist es erklärbar, dass die gegenwärtigen inflationär auf uns einprasselnden Meldungen, mit denen die Öffentlichkeit „gefüttert“ wird, fast täglich voll von „neuen negativen Rekorden“ noch nie dagewesener wetter- oder klimatisch bedingter Extremereignisse sind und dementsprechend Verunsicherung, Sorge und Angst erzeugen. Dabei beziehen sich diese Aussagen in Wahrheit zumeist nur auf die letzten etwa 180 Jahre.

Das führt auch dazu, dass uns der reelle Blick auf das scheinbar Ewige der Berge und der Gletscher verwehrt bleibt, Wir wollen so gar nicht akzeptieren, dass etwa die Drei Zinnen in Südtirol oder die Lailiderer Wände im Karwendel oder der Olperer Reste unzähliger Erosionsprozesse sind, die ständig ablaufen und die Berge zunehmend verändern. In der Tat zeigen uns die sogenannten „Stummen Zeugen“, die überall in der Natur anzutreffen sind (z. B. Blöcke im Wald, Schotterreisen, morphologisch erkennbare Murschuttzungen, verschüttete Vegetationshorizonte,...), dass die Gegenwart prinzipiell nicht deutlich anders abläuft als die nähere, fernere und ferne Vergangenheit. Es gab immer wieder Dürreperioden mit Jahren von Missernten, Flüsse, die kaum noch Wasser führten (siehe z.B. die Hungersteine in Rhein und Mosel). Die Ebenen waren immer wieder durch teils verheerende Hochwasserereignisse betroffen (Inn, Donau, Elbe, Mosel, Rhein,...). In den Gebirgen gab es immer schon kleine und große Felsabbrüche oder Muren, bedingt durch den Einfluss von Wasser in Kombination mit der Schwerkraft und den täglichen Temperaturschwankungen.



Man kann also schlussfolgern, dass die Landschaft, wie wir sie kennen, mit ihrem Aussehen die Summe aller abgelaufenen Erosionsereignisse widerspiegelt und dass sich ihr Aussehen meist in menschlichen Zeitdimensionen und daher rasch und nicht erst in geologischen Zeiträumen verändert.

Unsere heutigen Probleme mit dem Schwinden des Permafrosts sind nicht – wie wir immer wieder lesen - neu, sondern typisch für den Großteil der vergangenen 10.000 Jahre (und davor). Die Zeiten des Schwindens des Permafrosts wurden öfters nur für relativ kurze Zeit durch kältere Perioden immer wieder unterbrochen (z.B. in der Kleinen Eiszeit, zwischen 1550 und 1850). Das heutige Problem mit dem Schwinden des Permafrosts und dem Abschmelzen der Gletscher ist in Wahrheit erst durch die etwa seit 180 Jahren stattfindende rasante Zunahme der Anzahl der Menschen, die in den Alpen wohnen, arbeiten und intensiv ihre Freizeit im Gebirge verbringen oder hier urlauben, zum Problem geworden. Vor diesem Zeitraum der letzten 180 Jahre interessierten die meisten Naturereignisse kaum jemanden, sieht man z.B. von den katastrophalen Ausbrüchen des Gurgler- und des Venter Eissees ab. Diese Eisseen haben sich während der Kleinen Eiszeit durch die Sperrwirkung der bis in die Täler vorgedrungenen Gletscherzungen gebildet. Immer wieder sind sie gewaltsam aus dem Stauraum hinter den Gletscherzungen ausgebrochen und haben das Ötztal mehr oder weniger verheerend verwüstet. Bis Rosenheim wurden Eisschollen in großer Menge Inn-abwärts getrieben. Die Menschen haben damals in Bittprozessionen dafür gebetet, dass es endlich wieder wärmer wird und die Gletscherzungen sich zurückziehen mögen. Wir können als gesichert davon ausgehen, dass in den kälteren Perioden nach der Hauptvereisung der letzten Eiszeit derartige katastrophale Eisseerausbrüche o.ä. in den Alpen häufig stattgefunden haben. Betroffen hat dies zumeist wohl fast niemanden. Heute wären die Schadensauswirkungen für das dicht besiedelte Ötztal jedenfalls katastrophal und verheerend,

Verstärkt wird der heutige Eindruck nie dagewesener Wetterkapriolen und ihrer Auswirkungen noch dadurch, dass jedes Ereignis – und sei es noch so unbedeutend klein – in Windeseile innerhalb von Minuten und Stunden über die zur Verfügung stehenden Medien in alle Welt hinaus transportiert wird. Früher wussten die Menschen im Ötztal nicht, was im Kaunertal passiert ist.

Was zeigt uns die Vergangenheit wirklich, was können wir daraus schlussfolgern? Unsere Gegenwart ist – in den Alpen - witterungs- und klimatisch gesehen nicht derart, dass man vor Angst und Schrecken in Panik verfallen muss. Freilich ist jedes Schadenereignis um eines zu viel und für die jeweils Betroffenen oft katastrophal. Aber die Alpen „zerbröseln“, wie sich manche Medien dramatisierend ausdrücken, nicht mehr und nicht weniger als in den Zeiträumen, seit es die Alpen gibt. Wir können davon ausgehen, dass es immer wieder Jahre gab, während derer Großereignisse gehäuft auftraten und Jahre, in denen dies deutlich seltener geschah. Genauso war es auch in Tirol etwa in den Jahren von 1990 bis 2025. Wir sind nicht nur die erste Generation, die – außer in ihrer Freizeit - jammert, wenn es heiß ist (wobei niemand bestreiten kann, dass es in den letzten Jahrzehnten deutlich wärmer geworden ist), sondern wir sind auch die erste Generation, die genügend Mittel und genügend Know-How hat, um Strategien zur Minimierung und Verhinderung von negativen Auswirkungen von Naturereignissen zu entwickeln und auszuführen. Damit tun wir heute im Grunde nichts anderes, als es die Menschen seit Jahrtausenden vor uns getan haben – freilich damals mit wesentlich bescheideneren Mitteln und statt High-Tech mit kräfteaubender Muskelkraft.

Man muss bei objektiver Betrachtung auch klar feststellen, dass viele kleinere Erosionen und gar nicht so wenige große Naturereignisse vor allem durch den Menschen selbst hervorgerufen wurden oder der Mensch die Wirkung derartiger Prozesse verstärkt hat. Fehler in der Art der Landnutzung wie überbordende Versiegelung, oder die Versickerung von Niederschlagswasser in Gebieten, die dazu geologisch nicht oder nur unzureichend geeignet sind u.v.m sind hier zu nennen. Das alles betrifft uns in den Alpen mit weiterer Zunahme der Landnutzung immer mehr. Es greift viel zu einfach und zu kurz immer alles nur der Witterung und dem Klimawandel zuzuschreiben!

Seit es Menschen gibt versuchen sie die Welt zu verändern und tun dies dank ihrer immer perfekter werden Techniken auch immer erfolgreicher und rascher. Wundern wir uns also nicht, wenn wir mehr Aufwand betreiben müssen, um unseren immer intensiver genutzten Lebensraum zu schützen.

Das 27. Geoforum Umhausen bietet auch heuer wieder ein Programm an, das Strategien und Techniken, deren Planung, Entwicklung und Durchführung aufzeigt, um den Lebensraum der Menschen weiterhin lebenswert zu erhalten. Dies kann nur erfolgreich sein, wenn interdisziplinär und möglichst ganzheitlich Lösungen von Problemen gesucht und umgesetzt werden. Die Welt ist ein vernetztes System, das eine vernetzte Vorgehensweise verlangt. Das Geoforum Umhausen versucht stets nach diesen Gesichtspunkten vorzugehen.

Hofrat Dr. Gunther Heißel

(Präsident des Vereins Geoforum Tirol)

- 
- (1) Endogene Einflüsse sind solche, die vom Erdinneren heraus auf die Oberfläche einwirken (z.B. Erdbeben, Gebirgsbildung).
  - (2) Exogene Einflüsse wirken von außen auf die Erdoberfläche ein (z.B. Wind, Regen, Schnee, Eis, Temperaturschwankungen, fließendes Wasser).

## INHALTSVERZEICHNIS

Bevölkerungswarnung im Kontext steigender Naturgefahren.....	7
Bedeutung und Rolle von Expert:innen in der Kommunikation .....	9
Ingenieurgeologisches Prozessverständnis als Grundlage für die Gefahrenzonenplanung. Ein Beispiel aus der Praxis der Wildbach- und Lawinerverbauung (WLV).....	15
Gefahren- und Risikoanalyse von Stein- und Blockschlag im Oberen Wiesenttal der Fränkischen Alb .....	30
Chroniken eines Radweges - Risikomanagement .....	42
GEODATA ARGOS – Smart Impact Monitoring- Einblicke in innovative Monitoring-Technologien .....	43
Alpine Infrastruktur im Klimawandel - Intensivierte Landnutzung und erhöhter Sicherheitsanspruch versus verstärkte Gebirgsentfestigung .....	44
Historischer Kupferbergbau im UNESCO Global Geopark „Erz der Alpen“ – Geologisches Erbe und potentielle Grundwassergefahr .....	45
Der Anteil jungen Wassers am Quellabfluss.....	54
Die Großquellen Tirols – Systematische Aufnahme der strategischen Wasserressourcen.....	68
Neuartige Erkundungsbohrtechnologie mit Kernbohrlafette für exponierte Lagen .....	80
Nicht invasive, flächendeckende Herleitung der dynamisch abgeleiteten gesteinsmechanischen Elastizitätskonstanten mittels Low Cost 3D Hybridseismik .....	90
Erstellung der Allgemeinen Geologischen Legende für Österreich (EAGLe-Projekt): Fallbeispiele aus dem Ötztal-Stubai Kristallin.....	103
Geophysikalisch-rohstoffgeologische Analyse von Bergsturzmaterial für die Verwendung als Baurohstoff – Fallstudie Pustertal/Osttirol .....	112

# Bevölkerungswarnung im Kontext steigender Naturgefahren

E. Rizzoli<sup>1</sup>, T. Geiler<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Amt der Tiroler Landesregierung, Gruppe Tiroler Zentrum für Krisen- und Katastrophenmanagement

<sup>2</sup>Stv. Leiter der Abt. Leitstellenwesen und Landeswarnzentrale, Leiter des Landes-Warn- und Lagezentrums

## Kurzfassung

In Eine steigende Anzahl von Naturereignissen, eine immer rasanter werdende Mediale Berichterstattung und eine Bevölkerung, welche sich zusehends beim Staat Vollkasko versichert sieht, erfordern eine Weiterentwicklung der Bevölkerungswarnung. Die Anzahl der robusten Naturereignisse nimmt seit geraumer Zeit doch deutlich zu. Diese Entwicklung lässt aber (leider) nicht den Schluss zu, dass sich die Bevölkerung bereits an diese Entwicklung angepasst hat und bereits damit zu leben gelernt hat. Man hat manchmal eher das Gefühl, dass das Gegenteil der Fall ist und die Bürgerinnen und Bürger auch Aufklärung einfordern, was dunkle Wolken am Himmel bedeuten und ob davon eine Gefahr ausgeht. Andererseits wurde der Bevölkerung gerade um die Jahrtausendwende suggeriert, dass wir quasi im Paradies angekommen sind und uns nichts mehr passieren kann; somit jegliche Resilienz nicht mehr erforderlich ist. Dies war die (falsche) Folgerung aus dem Ende des Kalten Krieges und der politischen Neuordnung in Europa. Deutschland ging sogar soweit, dass in vielen Bundesländern die Zivilschutzsirenen abgebaut worden sind, da ja der Verteidigungsfall unmöglich erschien und offensichtlich auch Naturgefahren unterschätzt worden sind. Bei der Bevölkerungswarnung setzte man ausschließlich auf Warn-Apps. Die Flutkatastrophe im Sommer 2021 im rheinland-pfälzischen Ahrtal führte dann zum großen Erwecken. Was war passiert: ein sich sehr dynamisch entwickelndes Hochwasser zerstörte mehrere Orte und kostete 133 Menschen das Leben. Als sich die Lage zuspitzte, waren die Handynetze längst zusammengebrochen, somit eine Warnung mittels Apps unmöglich, die Sirenen wurden Jahre zuvor abgebaut, somit war die Bevölkerung auf sich alleine gestellt und konnte auf die dramatische Lageentwicklung nicht mehr zeitgerecht reagieren. Leider brauchte es dieses Ereignis, um ein Agieren hin zu einer modernen Bevölkerungswarnung zu bewirken. Sowohl in Deutschland als auch in Österreich haben die jeweiligen Parlamente mit Gesetzesänderungen den Weg für den Einsatz der Cellbroadcast-Technologie geebnet. Diese Systeme – in Österreich unter „AT-Alert“ stehen nunmehr den Katastrophenschutzbehörden für die Warnung, aber auch Information der Bevölkerung zur Verfügung. Natürlich benötigt dieses System auch ein intaktes Mobilfunknetz und kann auch nicht als Ersatz für ein Sirenensystem, sondern vielmehr als eine Ergänzung gesehen werden, welches den großen Vorteil hat, dass entgegen den Sirenen der Bevölkerung nicht nur mitgeteilt werden kann „es ist was passiert“, sondern „Was ist wo passiert und wie verhält man sich am besten“. Man spricht beim Einsatz von mehreren Systemen von einem „Warn-Mix“, welcher den Behörden verschiedene Möglichkeiten und auch Eskalationsstufen bietet. Das beste technische Warnsystem kann aber nur dann zur Wirkung kommen, wenn auch im Bevölkerungsschutz laufend ein Lagebild geführt und eine Lagebewertung durchgeführt wird. War es lange Tradition, dass im Katastrophenschutz erst dann Lagebilder erstellt worden sind, wenn eine Katastrophe eingetreten ist, so etablieren sich derzeit vermehrt Lagezentren auf Bundesländerebene, sowohl in Deutschland als auch in Österreich. Das Land Tirol hat daher in einer Novelle des Tiroler Krisen- und

Katastrophenmanagementgesetzes die „Landeswarnzentrale“ nicht nur in „Landes-Warn und Lagezentrum“ umbenannt, sondern auch deren Aufgaben deutlich erweitert. So wird seit Mai 2025 in tägliches Lagebild erstellt. Dabei wird nicht nur retrospektiv festgehalten, was die letzten 24 Stunden passiert ist, sondern wird auch u.a. die Wetterentwicklung der nächsten 24 Stunden beurteilt. Dies ist die Grundlage für die Katastrophenschutzbehörden rechtzeitig die Bevölkerung informieren und warnen zu können.

Schlussendlich ist es aber auch Aufgabe von uns allen, eine Erhöhung der Resilienz der Bevölkerung zu erreichen, da nur so können die künftigen Lagen auch erfolgreich bewältigt werden.

# Bedeutung und Rolle von Expert:innen in der Kommunikation

S. Volgger<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Calvis Kommunikationsberatung GmbH

## Kurzfassung

„Wissen stellt in unserer Gesellschaft die Grundlage des menschlichen Handelns dar. Immer wenn es seinen Entscheidungsspielraum gibt, wird das Wissen von Expert:innen herangezogen. Viele Entscheidungen basieren daher oft auf deren Expertise. Den Expert:innen sollte daher bewusst sein, dass sie große Verantwortung tragen und menschliches Handeln anregen.“

---

## 1. Einleitung

Der Klimawandel ist nicht nur eine ökologisch spürbare Erscheinung, sondern zählt auch zu den fünf größten Sorgen der Österreicher:innen. Dies zeigt die „What Worries The World Umfrage“ von IPSOS, die im September 2024 veröffentlicht wurde. Unterschiede ergeben sich hinsichtlich des Bildungsgrades. Personen mit einem höheren Abschluss zeigten sich eher besorgter um den Klimawandel als Menschen mit einem niedrigen Bildungsgrad. Die Statistik der IPSOS Umfrage sowie der dazugehörige Bericht veranschaulichen, dass der Klimawandel in einem längeren Zeitraum stets und noch immer ein großes Thema in der österreichischen Gesellschaft bildet.

Dass der Klimawandel und damit auch Naturgefahren schon längst ihren Weg in die tägliche Berichterstattung gefunden haben, ist nicht nur allbekannt, sondern auch wissenschaftlich bewiesen. Mehrere kommunikationswissenschaftliche Forschungen stellen einen nach oben hin verlaufenden Trend fest. Jährlich steigt die Berichterstattung über den Klimawandel an. Ein interessanter Aspekt ergibt sich mit Hinblick auf die Mediengattung. Qualitäts- und Onlinemedien berichten am häufigsten über den Klimawandel. Boulevardmedien wie z.B. die deutsche Bild-Zeitung bilden diesbezüglich das Schlusslicht. Häufig drehen sich die Themen um aktuelle Ereignisse oder auch um politische Entscheidungen/Treffen (Klimagipfel etc.). Ein Großteil der Berichterstattung befasst sich jedoch mit wissenschaftlichen Kernthemen und Aspekten. Somit bildet die Wissenschaft in den meisten Fällen die Basis eines Artikels. In diesem Zusammenhang fungieren vor allem Wissenschaftler:innen selbst als Hauptinformationsquelle.

Das Thema Klimawandel wird im Journalismus häufig mit anderen Aspekten wie extremen Wetterereignissen in Verbindung gebracht. Als Beispiel kann der Bergsturz in Blatten genannt werden. Das Ereignis sorgte für eine breite Resonanz in den Massenmedien sowie in den Sozialen Netzwerken. Blicke in die Postings und Kommentare veranschaulichen die zum Teil zwiespaltene Meinung. Eine in dieser Hinsicht tragende Rolle nehmen die Expert:innen ein, welche als Informant:innen und Ursachenforscher:innen in die Öffentlichkeit treten und eine Erklärung geben.

Diesbezüglich im Mittelpunkt steht vor allem die Kommunikation und Informationsvermittlung. Die Wissenschaftler Stehr und von Storch (2023) erläutern die zentrale Bedeutung wie folgt:

*„Die künftige Umsetzung wissenschaftlicher Erkenntnisse in der Klimapolitik ist Schlüssel des erfolgreichen Umgangs der Gesellschaft mit den Folgen des Klimawandels. Die Umsetzung von Wissenschaft in die Gesellschaft unterliegt ökonomischen, politischen und kulturellen Zwängen, und kann insbesondere durch den Mehrwert interdisziplinärer Zusammenarbeit von Wissenschaftlern (...) erreicht werden.“*

In diesem Zusammenhang spricht man in der Kommunikationswissenschaft von der sogenannten „Experten-Laien-Kommunikation“. Damit die Kommunikation und der Wissensaustausch mit der Öffentlichkeit gelingen, bedarf es einiger Aspekte. Allen voran müssen sich die Expert:innen ihrer Rolle bewusst werden. In erster Linie treten sie als Vermittler von Wissen in Erscheinung. Die Art der Expertise hängt vor allem von den jeweiligen Bereichen ab, indem die Expert:innen tätig sind. In der Öffentlichkeit fungieren Expert:innen auch als Ratgeber:innen und Berater:innen. Sie stehen nicht nur der Politik oder Vertretern der Wirtschaft bei ihren Entscheidungen beiseite, sondern unterstützen auch Einzelne bei ihren Vorhaben. Eine zentrale Rolle nimmt das Spektrum Wissen ein, über das die Expert:innen in großer Menge verfügen. Es basiert auf empirisch (wissenschaftlich) belegten Erkenntnissen. Wissen stellt in der Gesellschaft daher die Grundlage des menschlichen Handelns dar und unterstützt Entscheidungen. Der Satz „Wissen ist Macht“ kommt nicht von irgendwo. Immer wenn es einen Entscheidungsspielraum gibt, wird das Wissen von Expert:innen benötigt. Die Entscheidung basiert daher stets auf der Expertise. Den Expert:innen sollte daher bewusst sein, dass sie eine große Verantwortung tragen und menschliches Handeln anregen.

## 2. Ausgangslage

Der erste Aspekt, der vor den kommunikativen Prozessen beachtet werden muss, ist die unterschiedliche Wissensverteilung zwischen Expert:innen und Lai:innen. Die Expert:innen verfügen über nicht allgemein geteiltes und zugängliches Wissen. Ihren Gegenpol bilden die sogenannten Laien, die als eine Art Nicht-Experten um Wissen suchen. Grundsätzlich kann fest davon ausgegangen werden, dass Laien über wenig bis gar kein Fachwissen verfügen. Der Laie kann für die Kommunikation nur auf sein Alltagswissen und seine Betroffenheit zurückgreifen. Die beiden Personengruppen kommunizieren daher auf unterschiedlichen Ebenen. Während Expert:innen den fachlichen Austausch vorziehen, basiert die Diskussion der Lai:innen auf deren persönlichen Wissen und deren Annahmen. Zudem erfolgt die Kommunikation vonseiten der Lai:innen nicht objektiv oder sachlich, sondern meist emotional. Weitere Unterschiede können sich auch hinsichtlich der Denkstile, Sprachen, Kulturen und Konventionen ergeben. Ebenso verfolgen die jeweiligen Personen andere Ziele aufgrund ihrer verschiedenartigen Bedürfnisse. Das Ziel in der Kommunikation zwischen Expert:innen und Lai:innen sollte dennoch der Vertrauensaufbau sowie die Übermittlung existierender Wissensbestände sein, auf deren Basis Entscheidungen zur Lösung von Problemen fallen. Die unterschiedlichen Meinungen des Laien und Experten sind die Hauptursache, dass überhaupt kommuniziert wird.

### 3. Kommunikative Interaktion

Im Mittelpunkt der Kommunikation sollte stets der gegenseitige Austausch von Informationen stehen. Damit eine einwandfreie Kommunikation erfolgen kann, benötigt es eine wechselseitige Verständigung. Expert:innen sowie Lai:innen müssen auf die jeweils anderen Personen eingehen. Der Laie sollte einerseits klar seine Überzeugungen, sein subjektives Empfinden sowie seine Ziele ansprechen. Mit diesem müssen sich die Expert:innen auseinandersetzen, um die Informationen maßgeschneidert auf die Bedürfnisse des anderen kommunizieren zu können. Ihr zum Thema vorhandenes Wissen sollten Expert:innen in Nachfragen und in Abstimmungen einbinden. Lai:innen können aufgrund der situativen Lage über Kenntnisse verfügen, die bislang unentdeckt blieben und sich ausschlaggebend auf die Expertise auswirken. Ärzt:innen können ohne die Schmerzbeschreibung der Patient:innen nicht immer eine Diagnose stellen. Die Interaktion fördert somit auch das Vertrauen.

### 4. Sprache

Die Expert:innen müssen fair und offen kommunizieren. Schließlich verfügt der Laie über wenig bis kein Wissen zum jeweiligen Thema. Für eine gelungene Kommunikation bedarf es ebenfalls eindeutigen, klaren und verständlichen Formulierungen. Fachsprachen sind das Mittel für eine einwandfreie Verständigung über ein Fachgebiet unter den Fachleuten. Eine Kommunikation mit Laien kann auf dieser Ebene jedoch zu Kommunikationsstörungen führen. Dies treffe vor allem dann ein, wenn „die Fachsprache in den gesellschaftlichen Diskurs einfließt, ohne dass dabei das Laienverständnis adäquat berücksichtigt wird“, so Karin Luttermann (2017) in ihrem Artikel „Klare Sprache als Mittel für Fachkommunikation und Wissenstransfer“. Je nach Sparte weisen einzelne Begriffe eine unterschiedliche Bedeutung auf, die jedoch nicht allen Personen in dieser Form geläufig sind. Um Irrtümer zu vermeiden, sollte niemals mit Metaphern kommuniziert werden. Diese sind für Menschen anderer Kulturen oder von anderen Fachbereichen nicht klar verständlich.

Einer großen Bedeutung muß neben der Verständlichkeit auch der Transparenz zugeschrieben werden. Der Vermittlungsprozess sowie die Informationen sollten sichtbar und greifbar sein. Eine tragende Rolle spielt ebenso die Einfachheit der Sprache und somit die große Zugänglichkeit.

### 5. Art der Kommunikation

Das beste Mittel zur Kommunikation stellen die gemeinschaftlichen Diskurse dar. Persönliche Gespräche stärken ebenfalls das Vertrauen sowie die Gegenseitigkeit. Ebenfalls muß vor der Kommunikation die Zielgruppe kontextualisiert werden. Nicht alle Informationen erzeugen dieselbe Resonanz bei den jeweiligen Personengruppen. Eine gute Kommunikation ist auch die Bildsprache. Bilder bleiben besser in Erinnerung und veranschaulichen die Situationen. Die Zuhörer:innen können sich mehr unter dem Gesagten vorstellen. Die Sprache sowie der Inhalt stimmen bestenfalls mit der Mimik und Gestik der Expert:innen überein. Dies fördert nicht nur das Verständnis, sondern wirkt auch authentisch.

## 6. Herausforderungen für Expert:innen

Die größte Hürde, mit welcher die Expert:innen konfrontiert werden, stellen die unterschiedlichen Wissensverhältnisse dar. Obwohl mittels kommunikativer Prozesse die Lai:innen ausreichend und korrekt informiert werden können, ergeben sich dennoch einige Herausforderungen. In erster Linie kann in einigen Fällen die Kommunikation aufgrund von änderungsresistenten Meinungen vonseiten der Lai:innen kaum durchdringen. Die Personen stützen sich in solchen Fällen meist auf naive Theorien, die wiederum auf unvollständigem Wissen basieren. Für eine funktionierende Experten-Laien-Kommunikation müssen die Fachpersonen auch als Expert:innen anerkannt werden. Sollten die Schwierigkeiten nicht überwunden werden, könnte dies zu einem Fehlschlagen der Interaktion führen. Mit dem Aufstieg des Internets ergibt sich ein weiteres und vor allem neues Konfliktpotenzial. Vermehrt informieren sich Patient:innen fehlerhaft über Online-Plattformen oder Websites. Angespannte Beziehungen können sich zudem aufgrund der unterschiedlichen gesellschaftlichen Stellung ergeben. Mehr denn je gilt es daher, die Experten-Laien-Kommunikation sehr gezielt zu gestalten, indem sie sich stark auf die notwendigen Aspekte konzentriert.

## 7. Glaubwürdigkeit und Vertrauen

Die Forschenden heben zudem die Bedeutung von Vertrauen hervor. Dieses muss von beiden Seiten gegeben sein. Der Aufbau von Vertrauen liegt aufgrund der großen Verantwortung dennoch bei den Expert:innen. Kommunikation auf Augenhöhe und Empathie sind erforderlich. Wichtig für das Vertrauen ist auch das Vermitteln von Transparenz (Veranschaulichen der Datenherkunft und Erkenntnisgewinnung) sowie das authentische Agieren. Erst wenn das gegenseitige Vertrauen gegeben ist, kann eine konstruktive (Risiko-)Kommunikation erfolgen. In diesem Zusammenhang gilt es auch, glaubwürdig zu kommunizieren. Um überhaupt als glaubwürdig eingestuft zu werden, bedarf es mehrerer Faktoren. Der Soziologe Axel Phillips formulierte und überprüfte vier Thesen der Glaubwürdigkeit:

- die Charismathese,
- die Zivilisierungsthese,
- die Kompensationsthese und
- die Wirkmächtigkeitsthese.

Erstere besagt, dass jene Person am glaubwürdigsten erscheint, die auch am überzeugendsten agiert. Stark abhängig sind die Performance/der öffentliche Auftritt und der erläuterte Lösungsansatz. Die Zivilisierungsthese geht davon aus, dass sich die Zertifizierungen von Expert:innen positiv auf die öffentliche Glaubwürdigkeit auswirken. Von professionellen Institutionen verliehene attestierte Nachweise und Zertifikate lassen einen/eine Expert:in glaubwürdiger erscheinen. Im Mittelpunkt der Kompensationsthese stehen die Lai:innen selbst. Die Glaubwürdigkeit einer Person hängt mit der Offenheit, Bereitschaft und/oder dem Interesse vonseiten der Lai:innen zusammen. Phillips formuliert die These weiter aus: „Sie (Lai:innen) vertrauen demnach auf Expertenwissen, wo ihnen einerseits das Wissen und andererseits die Zeit, die Ressourcen oder auch nur schlicht das Interesse fehlen, drängende Probleme selbst zu lösen“. Die Möglichkeit zur Bewirkung durch Expert:innen nimmt eine tragende Rolle in

der Wirkungsmächtigkeitsthese ein. Demnach steige die Glaubwürdigkeit einer Person, wenn ihr auch die Kompetenz zugeschrieben wird, politische und wirtschaftliche Konsequenzen herbeiführen zu können.

Unsicherheiten und fehlende Informationen hingegen gefährden und beeinträchtigen das Vertrauen und die Glaubwürdigkeit.

## 8. Risiken

Abschließend stellt sich die Frage, welchen Risiken das Expertentum ausgesetzt ist. Ableitend von bereits wissenschaftlich belegten Forschungen kann davon ausgegangen werden, dass Unsicherheiten in der Wissenschaft sowie auch widersprüchliche Aussagen und Unklarheiten die Expertise gefährden. Aus einer Forschung zur Rolle von Expert:innen in der Medizin ging die Erkenntnis hervor, dass das Expert:innenwissen darunter leidet, wenn es bereits zuvor als unbefriedigend und fehlerhaft wahrgenommen wurde. Als Beispiel lässt sich die Corona-Krise und die größtenteils negativ aufgefasste Pandemiebewältigung nennen. Für die Lai:innen stellt sich daher die Frage: Wem und was soll ich glauben?

## Referenzen:

- [1] Pelikan, K., & Zinsstag, J. (2024). Sind WissenschaftlerInnen Experten oder Laien. In *Professionskommunikation* (Band 5, S. 99-122). Universitätsverlag Hildesheim. <https://doi.org/10.18442/fsk-5>
- [2] Bromme, R. & Rambow, R. (1998). Die Verständigung zwischen Experten und Laien: Das Beispiel Architektur. In *Expertenwissen* (S. 49-65). VS Verlag für Sozialwissenschaften Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-663-10021-8>
- [3] Bromme, R., & Jucks, R. (2014). Fragen Sie ihren Arzt oder Apotheker: Die Psychologie der Experten-Laien-Kommunikation. In M. Blanz, A. Florack & U. Piontkowski (Hrsg.), *Kommunikation. Eine interdisziplinäre Einführung* (S. 237-246).
- [4] Luttermann, K. (2017). Klare Sprache als Mittel für Fachkommunikation und Wissenstransfer. *Information - Wissenschaft & Praxis*, 68(4), 217-226. <https://doi.org/10.1515/iwp-2017-0043>
- [5] Felder, E. (2021). Strukturelle Dialogizität zwischen Experten und Laien: Ideal und Wirklichkeit. In T. Hoffmeister, M. Hundt & S. Naths (Hrsg.), *Laien, Wissen, Sprache: Theoretische, methodische und domänenspezifische Perspektiven* (S. 49-70). Berlin, Boston: De Gruyter. <https://doi.org/10.1515/9783110731958-003>
- [6] Jankowitsch, R.M. (2021). Die Spielregeln professioneller Kommunikation. In: *Sich besser präsentieren*. Springer, Wiesbaden. [https://doi.org/10.1007/978-3-658-33175-7\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-658-33175-7_2)
- [7] Albrecht-Birkner, V., Habscheid, S. & Schubert, C. (2023). Expert\*innen-Lai\*innen-Kommunikation im institutionellen Wandel – Beispiele aus Medizin, Kommunalpolitik und Kirche. *Z Literaturwiss Linguistik* 53, 797–812. <https://doi.org/10.1007/s41244-023-00314-1>
- [8] Haßler, J. (2017). Ergebnisse: Der Klimawandel in Medien und Politik. In: *Mediatisierung der Klimapolitik*. Springer VS, Wiesbaden. [https://doi.org/10.1007/978-3-658-15668-8\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-658-15668-8_7)
- [9] Oschatz, C. (2018). Forschungsstand der Darstellung des Klimawandels in den Medien, der klimaspezifischen Informationsnutzung und des Wissenserwerbs über den Klimawandel aus den Medien. In: *Wissen im Wandel*. Springer VS, Wiesbaden. [https://doi.org/10.1007/978-3-658-18832-0\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-658-18832-0_3)
- [10] Stehr, N., & von Storch, H. (2023). *Die Wissenschaft in der Gesellschaft: Klima, Klimawandel und Klimapolitik* (1st Aufl 2023rd edition). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-41882-3>
- [11] Philipps, A (2016). Wirkmächtige Experten und wissenschaftliche Ressorteinrichtungen. Zur Glaubwürdigkeit wissenschaftlich fundierter Kontrollen. In Jürgen Raab & Reiner Keller (Hrsg.): *Wissensforschung – Forschungswissen* (S. 223-232)

[12] Stehr, N., & Grundmann (2010). Expertenwissen

[13] Henrizi, P. (2023). Die Komplexität der Risikokommunikation. In: Basel, J., Henrizi, P. (eds) Psychologie von Risiko und Vertrauen. Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-65575-7\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-662-65575-7_6)

### Adresse der Autorin

*Mag.a Sabine Volgger*  
*clavis – communication is key*  
*sabine.volgger@clavis.at*

# Ingenieurgeologisches Prozessverständnis als Grundlage für die Gefahrenzonenplanung. Ein Beispiel aus der Praxis der Wildbach- und Lawinenverbauung (WLV)

Dr. Daniela Anna Engl<sup>1</sup> und Dr. Johannes Kammerlander<sup>2</sup>

<sup>1</sup> WLV Fachzentrum Geologie und Lawine

<sup>2</sup> WLV Gebietsbauleitung Ausserfern

## Kurzfassung

In der Gemeinde Höfen (Bezirk Reutte) wurde der Gefahrenzonenplan der Wildbach- und Lawinenverbauung überarbeitet. Ein spezieller Fokus lag auf potentiellen Felssturzscenarien im Bereich des Hornbergl.

Die Hangdeformationsprozesse rund um das Hornbergl sind bekannt und werden seit Jahrzehnten intensiv beforscht und gemessen. Moser et al. (2009) sehen den Ursprung in den geotechnischen Verhältnissen „Hart auf Weich“. Die Hangdeformationsprozesse sind einerseits maßgebend für das Geschiebepotential in den beiden Wildbacheinzugsgebieten Murenbach und Herrenbach. Andererseits können Felssturzscenarien infolge spontaner Versagensmechanismen auch Murgänge in den Bächen auslösen oder direkt als hochdynamischer Sturzstrom im Wildbachgraben abfließen. Bei einem Sturzstrom entwickelt sich aus einem größeren abstürzenden Felsvolumen eine stark fragmentierte Felsmasse, welche durch die hochdynamische Interaktion der Einzelkomponenten ein flüssigkeitsähnliches Verhalten aufweist und hochmobil ist. Solche Sturzströme gleichen vom Verhalten her Lawinen und können in Abhängigkeit von initialer Sturzkubatur, Sturzhöhe, rheologischen Eigenschaften des fragmentierten Sturzmaterials sowie den topographischen Merkmalen des Sturzkanals große Ausläuflängen erreichen.

Für die Revision des Gefahrenzonenplanes Höfen wurde die geologische Prädisposition für Sturzströme und Muren in den Einzugsgebieten des Herren- und Murenbaches neu bewertet. Im Rahmen der Untersuchungen wurden großflächige kriechende Hangbewegungen festgestellt, welche das Steinschlag- und Felssturzgeschehen im Gebiet maßgeblich mitbestimmen. Für die Gefahrenzonenplanung sind lediglich die Prozesse Muren und Felssturz relevant, die Prozessbereiche von Steinschlag und großflächigen Hangbewegungen reichen hingegen nicht bis in den Siedlungsraum.

Auf Basis von strukturgeologischen Betrachtungen wurden maximale Sturzkubaturen an drei verschiedenen Ablösebereichen ermittelt. Eine Vorabschätzung der Sturzstrom-Reichweiten mittels Fahrböschungswinkeln aus der Literatur (Brandt 1981, Preh 2016) ergab, dass bei Mobilisierung dieser Maximalkubaturen und gleichzeitigem Vorliegen einer Schneedecke im Transitbereich davon auszugehen ist, dass die Sturzmassen bis in den raumrelevanten Bereich vordringen. Um detaillierte Aussagen über die räumliche Ausbreitung im Siedlungsbereich treffen zu können, wurden anschließend numerische Simulationen mit dem AVAFRAME – Lawinensimulationsmodell durchgeführt. Obwohl ursprünglich für die Lawinensimulationen konzipiert, ist das Modell in der Lage auch sturzstromartige Massenbewegungen aus Gestein hinreichend abzubilden (z.B. Mölk et al. 2024). Die Rheologie des Sturzmaterials wird dabei mit dem Voellmy-Modell beschrieben. Für die Gefahrenzonenplanung der Gemeinde

Höfen wurden insgesamt vier Sturzstrom-Szenarien numerisch untersucht und das potentielle Gefahrengebiet als Brauner Hinweisbereich ausgewiesen.

Der Beitrag stellt die Neuerkenntnisse der geologischen Untersuchungen in den Einzugsgebieten des Herren- und Murenbaches sowie die Vorgangsweise und Ergebnisse der darauf aufbauenden Sturzstromsimulationen vor.

---

## 1. Einleitung

In der Gemeinde Höfen (Bezirk Reutte, Tirol) wurde 2024 der Gefahrenzonenplan überarbeitet. Ein spezieller Fokus lag auf potentiellen Felssturzzenarien in den Einzugsgebieten der Wildbäche Herrenbach und Murenbach. Eine Vorabschätzung von Sturzstrom-Reichweiten mittels Fahrböschungswinkeln aus der Literatur ergab, dass bei einem größeren Felssturzereignis und gleichzeitiger Schneebedeckung im Transitbereich die Sturzmassen bis zum Siedlungsraum vordringen. Um die räumliche Ausbreitung näher zu untersuchen, wurden die potentiellen Abbruchkubaturen auf Basis von Geländedaten (Geologie, Geomorphologie, Monitoringdaten) ermittelt und verschiedene Sturzstrom-Szenarien mit AVAFRAME numerisch simuliert.

## 2. Geomorphologie und Geologie

Die Geomorphologie in den Einzugsgebieten von Herrenbach und Murenbach ist von den geologischen Gegebenheiten geprägt. Das Gebiet wird von kalkalpinen Sedimentgesteinen aufgebaut, die zwei Deckensystemen zugeordnet werden können. In Liegendstellung befindet sich die Allgäudecke, welche aus jüngeren und in weiten Teilen relativ inkompetenten Gesteinen besteht. Hier überwiegen – lithologisch bedingt – sanfte Geländeformen. In Hangendstellung befindet sich die Lechtaldecke; sie baut das obere Einzugsgebiet des Murenbachs und das gesamte Einzugsgebiet des Herrenbachs auf. Die Gesteine der Lechtaldecke weisen im gegenständlichen Gebiet eine Mächtigkeit von bis zu 200 Metern auf und bilden größtenteils schroffe Geländeformen und Felswände, die zu Steinschlag und Felssturz neigen (Abb. 1).

Strukturgeologisch ist das Gebiet durch eine großmaßstäbliche Faltenstruktur geprägt. Es handelt sich um eine WSW-ENE streichende Antiklinale, deren Faltenachse mit rund 35° nach WSW abtaucht. Der Gipfel des Hornbergl (vgl. Abb. 1) liegt im Scharnier dieser Faltenstruktur; das restliche Einzugsgebiet des Murenbachs sowie das Einzugsgebiet des Herrenbachs liegen im südlichen Schenkel der Antiklinale. Die Schichten fallen hier mittelsteil bis steil nach SSE bis ESE. Eine umfassende Darstellung der geologischen und strukturgeologischen Verhältnisse findet sich in Sönser (1989).

## 3. Gravitative Prozesse

In den Einzugsgebieten des Muren- und Herrenbachs stehen bereits seit mehreren Jahrzehnten drei Teilgebiete unter näherer Beobachtung, da es dort neben regelmäßigen Steinschlägen in der Vergangenheit auch zum Absturz

größerer Felspartien gekommen ist. Es sind dies das Hornbergl und der Faule Schrofen sowie das Gebiet rund um die Abbruchnische Gundenwald (Abb. 3). Sämtliche Abbruchgebiete sind der Lechtaldecke zuzuordnen.

Das Hornbergl ist ein markanter Felskopf im Talschluss des Murenbachs, welcher nach drei Seiten steil abfällt. Während der Gipfel des Hornbergls (Höfener Kreuz) selbst als relativ stabil gilt (Dragosits 2003), zeigt die östlich vorgelagerte Felsscholle deutliche Absetzungen und Bewegungen Richtung Tal. Diese Felsscholle wird durch eine N-S-verlaufende Großkluft vom Hauptkörper des Hornbergls getrennt und ist im höheren Bereich bereits turmartig freigestellt. Bei Versagen dieser Felsscholle wird eine Kubatur von 12.000 m<sup>3</sup> freigesetzt (Ploner & Sönsler 2005). Am Hornbergl selbst ist eine weitere markante Trennfläche auffällig, welche mit rund 50° in Richtung Talschluss fällt. Bei einem Abgleiten des Gipfels entlang dieser 50° steilen Pultfläche werden weitere 41.000 m<sup>3</sup> Gestein sturzartig freigesetzt. Dies ergibt ein potentiell Abbruchvolumen von 53.000 m<sup>3</sup> (Preh 2016). Das letzte größere Ereignis am Hornbergl war ein Felssturz aus der Ostwand am 8. Juni 2002 mit einer Kubatur von 950 m<sup>3</sup> (vgl. Abb. 1).

Der sogenannte Faule Schrofen bezeichnet den NW-SE streichende Rücken zwischen Murenbach und Herrenbach (Abb. 3). Die Bankungsflächen der Kalke fallen mittelsteil nach SSE in Richtung Herrenbach (Südschenkel der Antiklinale). In Richtung Murenbach bilden die Kalke etwa 60 m hohe, nahezu vertikale und stark zergliederte Felswände (vgl. Abb. 1). Der gesamte Faule Schrofen ist von starken Bergzerreißungserscheinungen geprägt. Neben dem Herausgleiten von einzelnen Kluftkörpern und Schichtpaketen aus den Felswänden kommt es auch zum Herauskippen ganzer Felstürme (Aschenbrenner 2013). Der Faule Schrofen stellt damit ein wichtiges Liefergebiet von Geschiebe in den kesselförmigen Talschluss des Murenbachs dar. In den 70er und 80er Jahren sind eine Felsgleitung und ein größeres Steinschlagereignis in diesem Gebiet belegt (Dragosits 2003). Im Mai 1997 kam es zu einem weiteren Felssturz (Wendl 1998), dessen Ausbruchnische noch gut erkennbar ist (Tiroler Laser- und Luftbildatlas, siehe auch Abb. 1).

Der Bereich Gundenwald liegt im Einzugsgebiet des Herrenbachs. Rund 200 Höhenmeter oberhalb des Gerinnes befindet sich eine rund vier Hektar große Abbruchnische im Festgestein. Der Entstehungszeitpunkt der Nische ist unbekannt, sie ist jedoch auf den Luftbildern der Landesaufnahme von 1970-1974 bereits erkennbar. Am 10. Oktober 1976 kam es während einer herbstlichen Schönwetterperiode zum Ausbruch von weiteren 100.000 m<sup>3</sup> Gestein aus dieser Nische. Die Felsmassen stürzten in den Herrenbach und kam vor Einlaufen in die Schluchtstrecke zum Stehen; die Ablagerungsmächtigkeit im Gerinne betrug 10-15 m (interner Bericht WLV).



Abb. 1: Orographisch rechte Seite des Talschlusses des Murenbachs mit Faulem Schrofen und Hornbergl. Rot markiert: Abbruchgebiete der jüngsten Felssturzereignisse.

#### 4. Messhistorie

Die Hangdeformationsprozesse rund um das Hornbergl und den Faulen Schrofen werden seit rund 40 Jahren intensiv beobachtet und gemessen. Anlass für den Beginn umfangreicher Messkampagnen war das Mureereignis 1986 am Murenbach, das mit rund 60.000 m<sup>3</sup> Geschiebe zur Vermurung von zwei Gebäuden, Straßen und landwirtschaftlichen Flächen in der Gemeinde Höfen führte. Das Ereignis fand im Frühjahr ohne nennenswerte vorausgehende Niederschläge aber in einer Phase ausgeprägter Schneeschmelze statt. Als Auslöser für die mehrfachen Murgänge wurde eine Sackung im Kar unterhalb des Hornbergl's festgemacht. Durch die Sackung wurde teils Lockermaterial, teils stark zerlegter anstehender Fels mobilisiert. Als tieferliegende Ursache für die Murgänge wurden bereits damals die „instabilen geologischen Verhältnisse“ und die „weitläufigen Felsbewegungen“ rund um das Hornbergl und den Faulen Schrofen erkannt (Dragosits 1986). Es folgte die Installation eines Messnetzes und erste Präzisionsvermessungen durch drei Tiroler Diplomanden der Geodäsie an der TU Wien (Mairamhof 1988, Mallaun 1989, Rimml 1989). Die in diesen ersten Messepochen (Frühjahr und Herbst 1987) festgestellten Bewegungen waren beträchtlich (6-8 cm in 4 Monaten). Ergänzt wurden diese ersten Vermessungen mit einer geologischen Kartierung und geologischen Interpretation der Hangprozesse durch Sönser (1989). Spätere Messepochen 1995 und 1997 zeigten generell einen leichten Rückgang der Bewegungen (Denk 1995, Wendl 1998). In den 2000er Jahren führte die Universität Erlangen über viele Jahre Konvergenzmessungen an Spalten durch (Moser et al. 2009). Darüber hinaus wurden von der TU München und der Universität der Bundeswehr München terrestrische Messungen mit dem Tachymeter und mit GPS durchgeführt (Glabsch et al. 2009). Seitens der TU Graz wurde die gesamte Felsflanke im Jahr 2012 für drei Monate mit GB InSAR (Ground-Based Interferometric-Synthetic Aperture-Radar) flächig beobachtet (Unterberger 2013).

Die lange Messhistorie kann wie folgt zusammengefasst werden: Die absoluten Messmethoden (Tachymetrie, GPS) indizieren eine klare Bewegungstendenz in Richtung Herrenbach. Die relativen Messmethoden (Konvergenzmessungen, GB-InSAR) zeigen indes häufig ein unstetiges Bewegungsverhalten (Öffnungs- und Schließbewegungen an Klüften und Spalten). Alle hochauflösenden Messreihen – ob absolut oder relativ – belegen einheitlich saisonale Beschleunigungsphasen im Frühjahr im Zusammenhang mit der Schneeschmelze oder nach ergiebigen Niederschlagsereignissen (u.a. Wendl 1998, Moser et al. 2009, Unterberger 2013).

Den Ursprung der Bewegungen rund um das Hornbergl und den Faulen Schrofen sehen Moser et al. (2009) in den geotechnischen Verhältnissen „Hart auf Weich“ (Lechtaldecke auf Allgäudecke). Am Faulen Schrofen geben Moser et al. (2009) als maßgebenden Deformationsprozess Sackungserscheinungen mit Bewegungsraten von ca. 11 cm/Jahr an. Die Saisonalität wird von Dragosits (2003) mit rund 30% höheren Bewegungsraten nach der Schneeschmelze angegeben.

## 5. Fragestellung und Methodik

Um die Auswirkung von Felsstürzen in den Einzugsgebieten von Murenbach und Herrenbach auf den Siedlungsraum Höfen zu untersuchen, wurden verschiedene Sturzstrom-Szenarien mit dem AVAFRAME – Lawinensimulationsmodell numerisch simuliert.

Die Reichweite von Sturzströmen hängt neben der Topographie des Transitweges vor allem von der Kubatur des Sturzstromes ab. Zahlreiche Autoren weisen als unteren Grenzwert für hohe Mobilität ein Abbruchvolumen von 1 Mio. m<sup>3</sup> aus. Solche hochmobilen Felslawinen mit ihrer stark fragmentierten Felsmasse können ein flüssigkeitsähnliches Verhalten aufweisen. Aus der jüngeren Vergangenheit sind allerdings Felsstürze bekannt, die mit deutlich kleinerem Abbruchvolumen eine ähnlich hohe Mobilität erreicht haben. Preh (2016) hat hierzu die Felslawine Alpl (Wildermieming/Tirol, Abbruch am 22.03.2012) mit 100.000 m<sup>3</sup> Abbruchvolumen mit dem Simulationsprogramm DAN3D untersucht und die darunterliegende Schneedecke als mögliche Erklärung für die außergewöhnlich hohe Mobilität und Reichweite (5-14 m/s auf einer rund 10° steilen Sturzbahn) vermutet. Die Beobachtungen legen laut Preh (2016) nahe, dass die Altschneedecke während des Sturzprozesses teilweise mobilisiert wurde und der Sturzprozess sich mit zunehmender Dauer zu einem gemischten Prozess einer Fels-Schneelawine entwickelte. Dieses Verhalten konnte mittels unterstellter Voellmy-Rheologie nachsimuliert werden, indem der basale Reibungskoeffizient verringert wurde. Voraussetzung für eine solche Fels-Schneelawine ist allerdings eine ausreichend hohe und kompakte Schneedecke und vermutlich eine ausgeglichene Gleitbahn. Die Ereignisrekonstruktion des Felssturzes Stelzistobel (Dalaas/Vorarlberg, Abbruch am 15.03.2016; ebenfalls in Preh 2016) zeigte hingegen keine außergewöhnlich hohe Mobilität. Die Nachsimulation ergab einen best-fit mit den Standardparametern für kleine Felsstürze. Vermutlich war die Schneebedeckung bei diesem Ereignis zu gering bzw. zu wenig kompakt. Tabelle 1 zeigt die Best-fit-Parameterkombinationen des Voellmy-Modells nach Preh (2016), mit welchen die beiden Ereignisse Alpl 2012 und Stelzistobel 2016 hinsichtlich Reichweite rekonstruiert werden konnten.

Tabella 1: Voellmy-Parameter der rekonstruierten Ereignisse Alpl und Stelzistobl nach Preh (2016)

Voellmy Parameter >>	Reibungskoeffizient (Mü-Wert)	Turbulenzfaktor (Xi-Wert)	Bemerkung zum Verhalten
<b>Fels-Schneelawine Alpl</b>	0,1	500	sehr hohe Mobilität
<b>Felssturz Stelzistobel</b>	0,23	450	normale Mobilität

Für die Gefahrenzonenplanung Höfen wurde in Analogie zu der Arbeit von Preh (2016) die Reichweite und das Ausbreitungsverhalten von potentiellen Sturzströmen mit dem Lawinensimulationsprogramm AVAFRAME untersucht. AVAFRAME ist ein von der Wildbach- und Lawinenverbauung (WLV) und Bundesforschungszentrum für Wald (BFW) gemeinsam entwickeltes numerisches Modell zur Simulation von Fließprozessen. Obwohl ursprünglich für Lawinen konzipiert, ist das AVAFRAME-Modell auch in der Lage sturzstromartige Massenbewegungen aus Gestein hinreichend abzubilden (vgl. Mölk et al. 2024). Die Rheologie des Sturzmaterials wird dabei mit dem Voellmy-Modell beschrieben.

Den numerischen Simulationen sollten möglichst realistische Sturzkubaturen als Modellinput zugrunde gelegt werden. Für die Abschätzung dieser Kubaturen wurde die geologische Disposition für Felssturzprozesse in den Einzugsgebieten des Muren- und Herrenbachs neu bewertet. Hierfür wurde auf die umfangreiche Wissens- und Datengrundlage in diesem Gebiet zurückgegriffen. Bestehende publizierte Literatur sowie Kartier- und Messberichte wurden gesichtet und für den Zweck der Kubaturabschätzung ausgewertet. Darüber hinaus wurden historische und aktuelle Luftbilder und Höhenmodelle visuell verglichen. Ergänzend zu den Messberichten der terrestrischen Vermessungen (Messstrecken, Tachymetrie, GPS) wurden Höhendifferenzmodelle aus zwei Generationen von LIDAR-Aufnahmen des Amtes der Tiroler Landesregierung (AdTLR) sowie Daten von satellitengestützter Fernerkundung des European Ground Motion Service (EGMS 2025) für die Interpretation herangezogen. Insgesamt wurden auf diese Weise vier Sturzstrom-Szenarien definiert und numerisch untersucht.

## 6. Geologisch-geomorphologische Auswertungen

Die örtlichen geologischen Lagerungsverhältnisse (großräumig mittelsteiles Einfallen nach Südosten, mit Ausnahme des Bereichs Hornbergl) bedingen, dass die Schichten an der nördlichen Talflanke des Gudentales (Lokalbezeichnung Gundenwald) etwa parallel (von leicht flacher bis leicht steiler) zum Hang einfallen. Eine weitere persistente Schwächezone im Untergrund wird von der Deckengrenze zwischen Lechtaldecke (hangend) und Allgäu-decke (liegend) gestellt, welche in den Tiefenlinien von Muren- und Herrenbach aufgeschlossen ist. Die vorliegende Antiklinalstruktur bedingt zudem, dass im Bereich Hornbergl und im südlich daran angrenzenden Faulen Schrofen (Gratbereich zwischen Muren- und Herrenbach) neben den Bankungsflächen eine Vielzahl von primären Bruchflächen (diverse mit der Faltung in Zusammenhang stehende Diskontinuitäten, wie Radialbrüche, Diagonalbrüche, Brüche senkrecht zur Faltenachse) angelegt sind, welche nunmehr für Hangdeformationsprozesse genutzt werden. Insgesamt begünstigt die geologische Konstellation Hangdeformationsprozesse in Richtung Herrenbach. Um die Hangdeformationen der jüngeren Vergangenheit flächig sichtbar zu machen, wurden die aktuell vorliegenden Laserscan-Aufnahmen des Gebietes aus den Jahren 2006 und 2019 (Landesaufnahme AdTLR) in Form eines

(Höhen-)Differenzmodells ausgewertet. Hierbei zeigt sich im Bereich des Faulen Schrofens eine auffällig einheitliche Absenkung eines kompakten Blockes mit einer Fläche von ca. 2,5 ha. Die Setzungen haben lt. LIDAR-Aufnahmen eine Größenordnung von 1,0-1,5 m in 13 Jahren. Das homogene Bewegungsbild deutet darauf hin, dass den beobachteten Setzungen ein tiefliegender diskreter Bewegungsmechanismus in Richtung Murenbach zu Grunde liegt (en-bloc-Gleiten). Die rückwärtige Ablösefläche äußert sich im Gelände durch eine rund 250 m lange NNW-SSE streichenden Zugspalte. Bemerkenswert ist, dass die Öffnung dieser Zugspalte gemäß Analyse alter Luftbilder in den 1990-er Jahren stattgefunden hat. Abb. 2 zeigt hierzu eine Gegenüberstellung von Luftbildausschnitten aus den 1990-er Jahren bis 2010. Die Bildserie zeigt anschaulich die Öffnung und sukzessive Veränderung der Zugspalte in diesem Zeitraum. Dies lässt vermuten, dass der unterstellte tiefliegende Ablösemechanismus und die damit verbundenen Geländeverschiebungen Richtung Murenbach erst seit rund 30-40 Jahren aktiv sind.

Im Bereich Gundenwald zeigt das LIDAR-Differenzmodell ebenfalls, dass es hier in jüngerer Vergangenheit großflächig zu Geländeverschiebungen in Richtung Herrenbach gekommen ist. Darüber hinaus deuten die LIDAR-Aufnahmen an, dass sich hinter den bestehenden Scarps allmählich neue Ablöseflächen ausbilden. Der betroffene Bereich umfasst eine Fläche von rund 3,5 ha. Die Lageverschiebungsrates kann auf Basis der beiden vorhandenen LIRAR-Aufnahmen auf grob 10 cm/Jahr geschätzt werden. Die Setzungsrate beträgt lt. Satellitenradardaten rund 2,5 cm pro Jahr (European Ground Motion Service, Abfragedatum 07.10.2024).

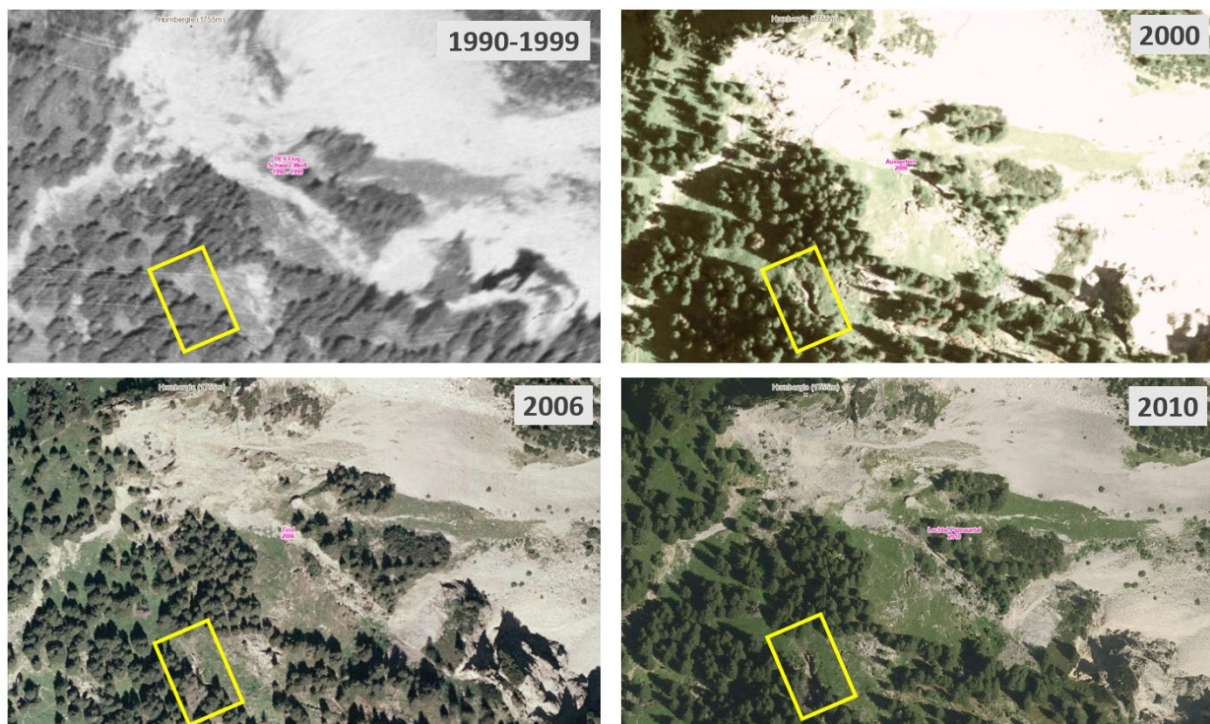


Abb 2: Bildserie aus dem Tiroler Luftbildatlas im Bereich des Faulen Schrofens. Gelb: Öffnung und sukzessive Veränderung der NNW-SSE streichenden Zugspalte, welche den homogen abgesetzten Block des Faulen Schrofens nach Südwesten begrenzt (Bildquelle: Laser- und Luftbildatlas Tirol, Abteilung Geoinformation AdTLR).

## 7. Szenarienbildung für Sturzstromereignisse

Abgeleitet von der geologischen Prädisposition (Sturzpotential und Lockergesteinsangebot) wurden in den beiden Wildbacheinzugsgebieten folgende maximal erwartbare Sturzstrom-Kubaturen festgesetzt:

**Szenario M1** geht von einem Ausgleiten jenes kompakten Blockes im Gratbereich des Faulen Schrofens aus, welcher sich durch starke Setzungen von der Umgebung abgrenzt. Es handelt sich um ein Gebiet mit 2,6 ha Fläche und einer unterstellten Kubatur von 300.000 m<sup>3</sup>. Der Abbruch führt zu einer extremen Belastung im Talkessel und zur Mobilisierung von Lockermaterial im Ausmaß von weiteren 125.000 m<sup>3</sup>. Aufgrund der großen Masse wird nicht davon ausgegangen, dass der Felssturz huckepack auf einer hohen Schneedecke abgleitet. Stattdessen wird eine erhöhte Mobilität infolge von Porenwasser unterstellt. Dies wird mit der Reduktion des Reibungskoeffizienten auf  $\mu=0,15$  berücksichtigt. Für eine Sensitivitätsanalyse wird dieses Szenario 1 auch mit  $\mu=0,2$  simuliert.

**Szenario M2** geht von einem um 50% reduzierten Felsabbruch am Faulen Schrofens aus (150.000 m<sup>3</sup>), welcher auf einer Schneedecke abgleitet. Der Reibungskoeffizient wird in Analogie zu Preh (2016) mit  $\mu=0,1$  gewählt. Im Unterschied zu Szenario M1 wird keine Erosion von Lockermaterial im Talkessel unterstellt.

**Szenario M3** betrachtet den Abbruch des Hornbergl-Gipfels mit 53.000 m<sup>3</sup> laut Studie von Ploner & Sönser (2005). Die Felsmassen gleiten – analog zu Szenario M2 – auf einer Schneeunterlage ab, was mit einem geringen basalen Reibungsbeiwert  $\mu=0,1$  berücksichtigt wird.

**Szenario H** betrachtet das Versagen einer 500.000 m<sup>3</sup> großen Felsmasse im Bereich der bestehenden Ausbruchnische Gundenwald, welche in Richtung Herrenbach abgleitet. Für die Simulation werden dieselben Parameterkombinationen wie für Szenario M1 verwendet (keine Schneedecke, aber erhöhte Porenwasserdrücke).

Für alle Szenarien wird eine Auflockerung von 20% unterstellt. Die Kennzahlen der Szenarien sind nachfolgend tabellarisch zusammengefasst.

	Volumen (aufgelockert)	Reibungs-koeffizient (Mü-Wert)	Turbulenz-faktor (Xi-Wert)	Bemerkung
<b>Szenario M1 - Murenbach:</b> Felssturz Fauler Schrofens (gesamt) sekundär Erosion Lockermaterial	360.000 m <sup>3</sup> + 125.000 m <sup>3</sup>	0,15 und 0,2	450	Hohe bis normale Mobilität
<b>Szenario M2 - Murenbach:</b> Felssturz Fauler Schrofens (50%) auf Schneeunterlage	180.000 m <sup>3</sup>	0,1	500	Sehr hohe Mobilität
<b>Szenario M3 - Murenbach:</b> Felssturz Hornbergl auf Schneeunterlage	63.000 m <sup>3</sup>	0,1	500	Sehr hohe Mobilität
<b>Szenario H - Herrenbach:</b> Felsgleitung Gundenwald	600.000 m <sup>3</sup>	0,15 und 0,2	450	Hohe bis normale Mobilität

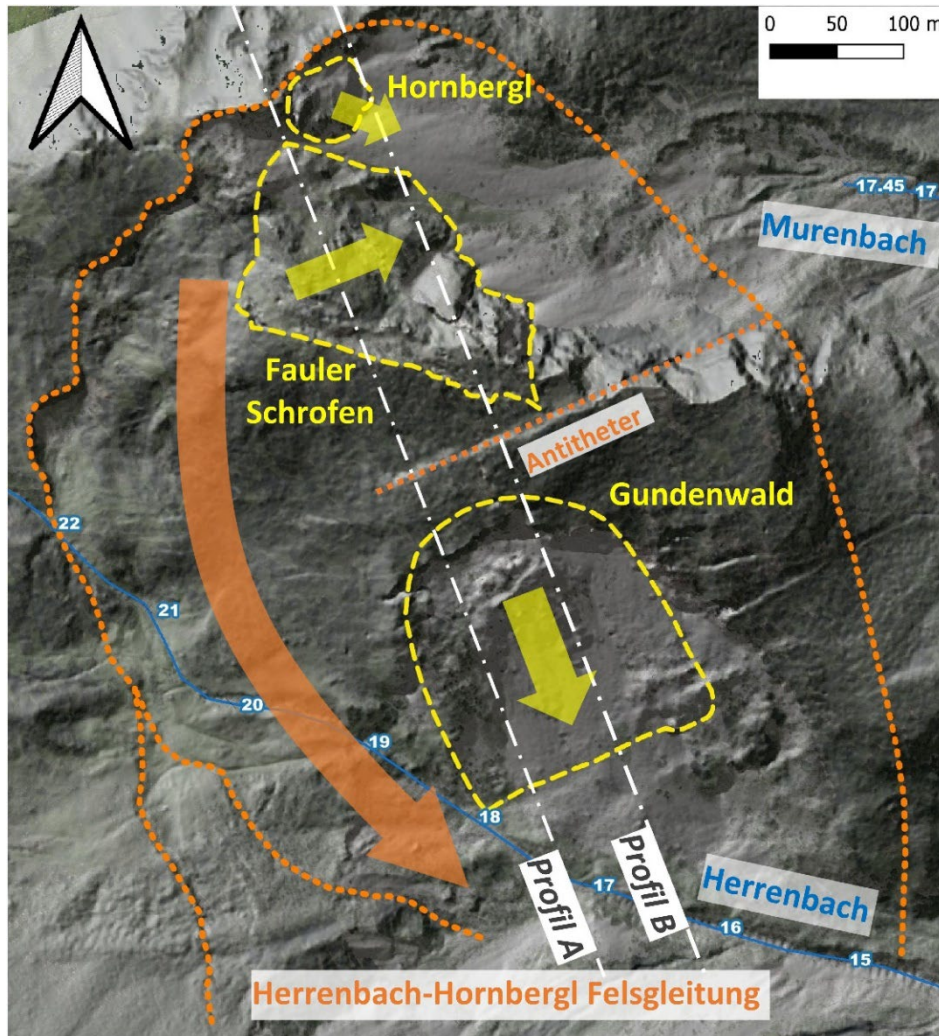


Abb. 3: Großräumige Herrenbach-Hornbergl-Felsgleitung (orange) und auflagernde sekundäre Hangbewegungen (gelb), welche potentielle Felssturzablösegebiete bilden [Kartengrundlage: Abteilung Geoinformation, AdTLR].

## 8. Simulationsergebnisse und Plausibilisierung

Allen drei Felssturzszenarien aus dem Einzugsgebiet des Murenbachs (M1, M2, M3) ist gemeinsam, dass sich der Sturzstrom im Mittellauf in zwei Äste teilt: der Hauptast geht nach Unterhornberg, ein Nebenast geht in Richtung Schollenwies. In Szenario M1 mit dem höheren Reibungskoeffizienten ( $\mu=0,2$ ) kommt der Felssturz am Fuß des bestehenden Bergsturzkegels zum Stillstand. Diese Simulation spiegelt das Prozessgeschehen der Vergangenheit im Hauptast gut wieder. Bei der Simulation mit dem geringeren Reibungskoeffizienten ( $\mu=0,15$ ) stößt vor allem der linke „Nebenast“ merkbar weiter vor. Die maximale Reichweite im Nebenast deckt sich mit dem Relikt eines historischen, fingerförmigen Ausläufers (vgl. Abb. 4a). Die Fahrböschungswinkel dieser Simulation betragen im orografisch rechten Hauptast  $22^\circ$  ( $\mu=0,15$ ) bis  $22,5^\circ$  ( $\mu=0,2$ ) und im Nebenast  $22,5^\circ$  bis  $24^\circ$ . In Szenario M2 ist die Reichweite geringfügig größer als in Szenario 1; die Fahrböschungswinkel sind mit  $21,5^\circ$  im Hauptast und  $22,5^\circ$  im Nebenast geringfügig niedriger. Szenario M3 liefert die geringsten Reichweiten, erreicht aber ebenfalls den Ortsteil Unterhornberg.

In Szenario H stürzt die unterstellte Abbruchkubatur von 600.000 m<sup>3</sup> in den Herrenbach und folgt dem Gerinneverlauf bis auf den ausgedehnten < 10° steilen Schwemmkegel am Talausgang. Während die Hauptmasse des Sturzstromes oberhalb bzw. im bestehenden Geschiebeablagerungsbecken zum Stillstand kommt, überfährt ein Teil der Masse den Damm und erreicht einen Fahrböschungswinkel von 21°. Das mögliche Dammversagen beim Überfließen durch den Sturzstrom wird in der Simulation nicht berücksichtigt. Ein weiterer Teil der Sturzmasse fließt südlich des Geschiebeablagerungsbeckens vorbei und hat eine ähnliche Reichweite (Abb. 4b).

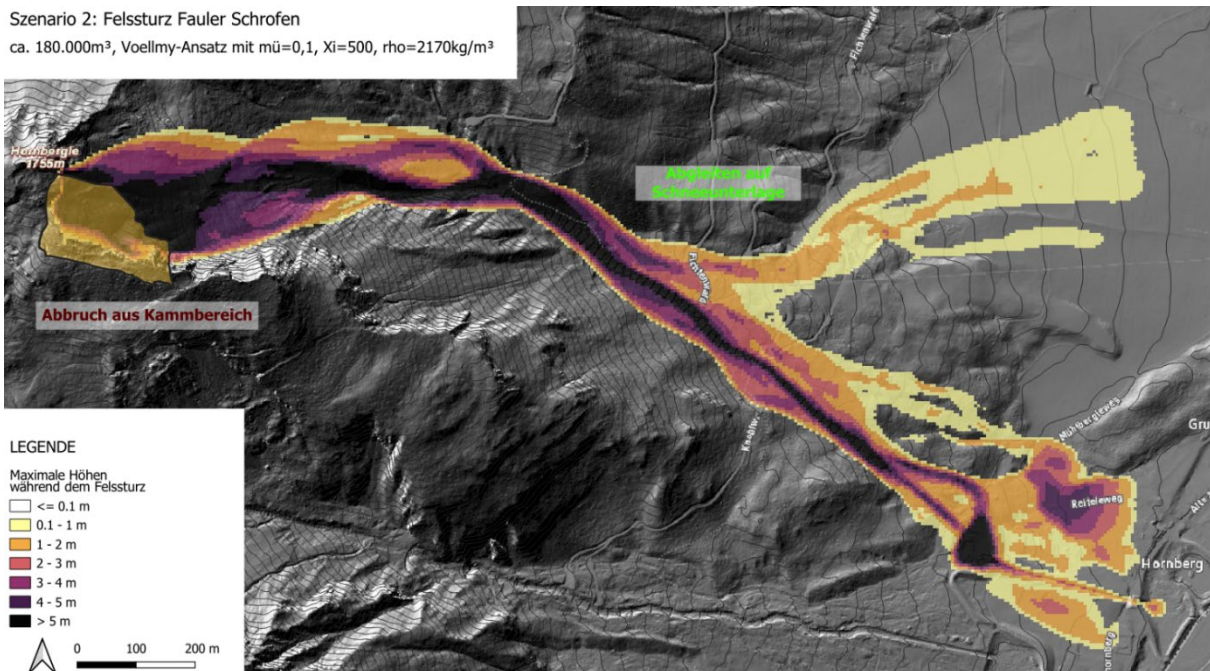


Abb. 4a: Simulationsergebnis Sturzstrom-Szenario aus dem Einzugsgebiet des Murenbachs mit den größten Reichweiten (Szenario M2). Farbabstufung: maximale Fließhöhe während des Prozesses.

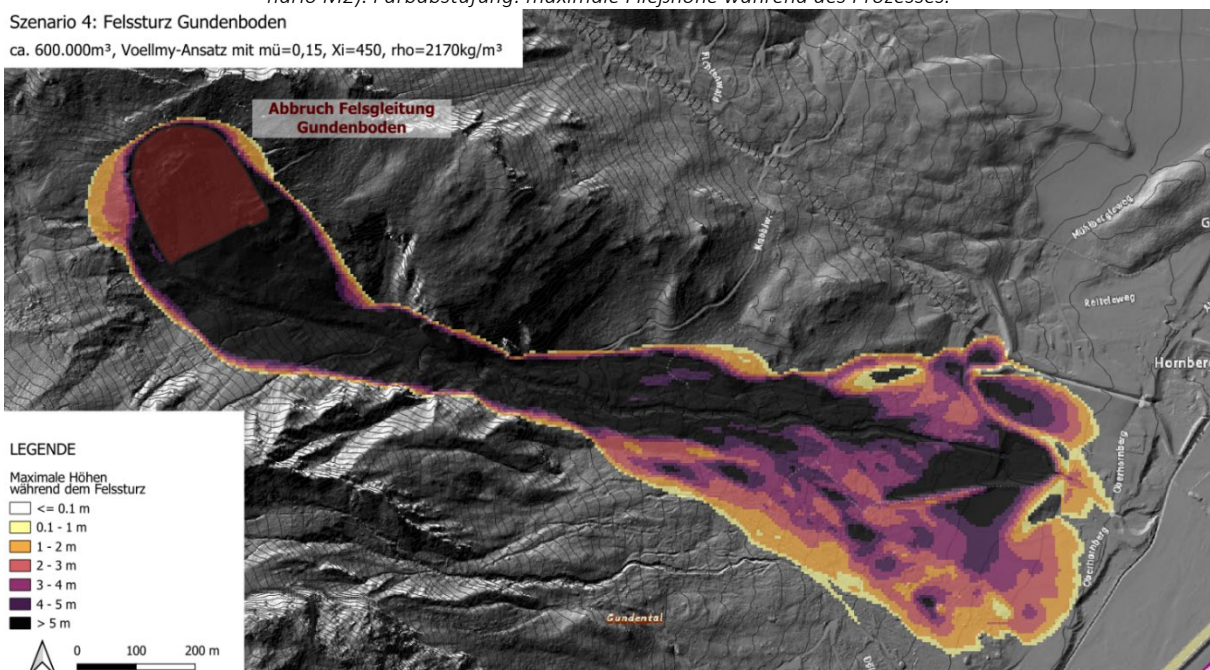


Abb. 4b: Simulationsergebnis Sturzstrom-Szenario aus dem Einzugsgebiet des Herrenbachs (Szenario H). Farbabstufung: maximale Fließhöhe während des Prozesses.

Die simulierten Felssturzzenarien ergeben hinsichtlich Ausbreitungsdynamik und Reichweite durchwegs plausible Ergebnisse. Das Felssturzzenario Fauler Schrofen auf Schneeunterlage (Szenario M2) liefert mit rund  $22^\circ$  einen Fahrböschungswinkel, der leicht unter dem Wertebereich der Korrelationsformel nach Brandt (1981) liegt; die Abweichung stimmt allerdings gut mit jener vom Bergsturzereignis am Fluchthorn im Jahr 2023 gut überein (Mölk et al. 2024). Die Simulationsergebnisse vom Felssturz Hornbergl auf Schneeunterlage (Szenario M3) stimmt sehr gut mit den DAN3D-Simulationsergebnissen von Preh (2016) überein. Ein Spontanversagen der Felsgleitung Gundenwald (Szenario H) wurde mit derselben Parameterkombination simuliert wie Szenario M1 am benachbarten Faulen Schrofen; der hier beobachtete leicht geringere Fahrböschungswinkel von  $21^\circ$  wird als Ergebnis der größeren Abbruchkubatur einerseits und der Stetigkeit der Sturzbahn entlang des Herrenbachs andererseits gedeutet.

## 9. Weiterführende geologische Interpretationen zur Sturzdisposition im Gebiet

Die Auswertung von topographischen Merkmalen und deren Veränderungen in der Zeit anhand von historischen und aktuellen Luftbildern sowie Laserscan-Aufnahmen zeigt, dass hier geomorphologische Strukturen vorliegen, die auf eine großräumige Hangbewegung in Richtung Herrenbach zurückgehen. Die nunmehr mehrere Jahrzehnte abdeckenden, geodätischen Vermessungen bestätigen diese These und deuten darauf hin, dass die Bewegungen nicht lediglich den Einhang zum Herrenbach erfassen, sondern bis in den nordöstlich angrenzenden Talkessel des Murenbachs übergreifen. Die vorhandenen geologischen, geomorphologischen und messtechnischen Evidenzen werden daher wie folgt interpretiert: Im gegenständlichen Gebiet liegt eine großräumige Massenbewegung vor, welche sowohl die gesamte orographisch linke Talflanke des Herrenbachs (Gundenwald und Kammbereich Fauler Schrofen) zwischen Hektometer 14,5 und 21,5 als auch den hinteren Talschluss des Murenbachs erfasst (siehe Abb. 3). Diese großräumige Massenbewegung wird nachfolgend als Herrenbach-Hornbergl Felsgleitung bezeichnet. Die Bewegung erfolgt nach SSE in Richtung Herrenbach. Der Tiefgang der Hangbewegungen wird aufgrund geometrischer Kriterien im Zentralbereich auf rund 140 m geschätzt, gesicherte Daten fehlen allerdings. Die flächenmäßige Ausdehnung beträgt rund 30 Hektar. Bei einem unterstellten mittleren Tiefgang von 100 m sind rund 30 Millionen  $m^3$  Gestein in Bewegung. Der (ehemalige) Kopf der Felsgleitung liegt im Talschluss des Murenbachs und ist bereits über weite Teile erodiert.

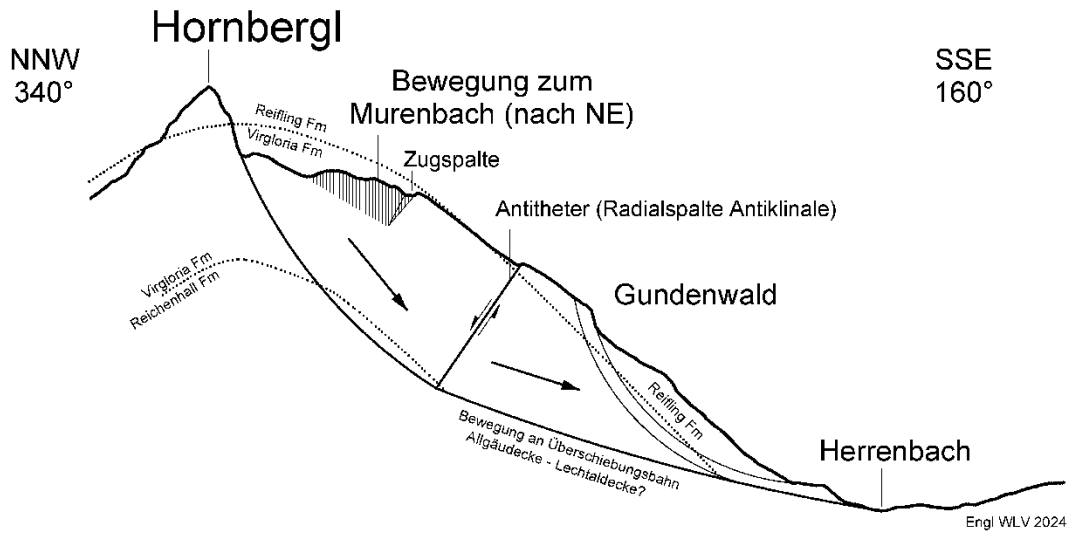
Aufgrund der vorherrschenden Lagerungsverhältnisse der Gesteine (mit dem Hang einfallende Schichtung) ist ein gleitender Bewegungsmechanismus an einer relativ diskreten Scherzone als der wahrscheinlichste anzusehen (Abb. 5). Im oberen Abschnitt der Felsgleitung werden vermutlich die steil mit dem Hang einfallenden Bankungsflächen der Virgloriakalke oder aber die unterlagernden Reichenhaller Schichten (guter Abscherhorizont infolge Gipsgehalt) für die Bewegungen Richtung Herrenbach genutzt. Im unteren Abschnitt der Felsgleitung ist denkbar, dass die basale Scherzone der Deckengrenze folgt (Grenze Allgäudecke/Lechtaldecke mit einer tektonischen Breccie aus Reichenhaller Schichten) und die Bewegungsvektoren entsprechend flacher sind. Auf eine derartige zweiteilige basale Scherzone weist ein markanter Counterscarp auf 1.590 müA im oberen Bereich des Gundenwaldes hin (siehe Abb. 3 und Abb. 5). Es handelt sich hierbei um eine mutmaßlich tektonisch angelegte Radialspalte der Antiklinalstruktur, welche in der Felsgleitung nunmehr als interne Bewegungsfläche verwendet wird. Die aufgrund des Geländeversatzes offensichtlich antithetischen Verschiebungen an dieser Fläche weisen kinematisch

darauf hin, dass das Abgleiten an einem steileren Segment im oberen Teil und einem flacheren Segment im unteren Teil erfolgt.

Während für die sekundären Hangbewegungen eine ausgeprägte Saisonalität mit erhöhten Bewegungsraten nach der Schneeschmelze nachgewiesen ist, ist für die übergeordnete tiefgründige Herrenbach-Hornbergl Felsgleitung lediglich eine Grundaktivität von bis zu mehreren cm pro Jahr aus den vorhandenen Daten abschätzbar. Dass hier ebenfalls eine ausgeprägte grundwasserbedingte Saisonalität des Bewegungsverhaltens vorliegt, ist zu erwarten aber mit der derzeitigen Datenlage nicht explizit nachweisbar. Dies ist darin begründet, dass sich der Großteil der Messpunkte in den von sekundären Hangprozessen betroffenen Bereichen befinden und sich die Deformationsbeträge nicht nach Mechanismus differenzieren lassen. Die aus dem LIDAR-Differenzmodell ableitbaren Setzungen im Kammbereich zwischen Herren- und Murenbach haben eine Größenordnung von 1,0-1,5 m in 13 Jahren (entspricht 7,5-12 cm/Jahr); dies deckt sich mit den Beobachtungen von Moser et al. 2009, die für diesen Bereich durchschnittliche Bewegungsraten von 11 cm/Jahr angeben. Das an einzelnen Messpunkten und Konvergenzstrecken beobachtete un stetiges Bewegungsbild mit wechselnder Bewegungsrichtung (abwechselnd Bewegungen in Richtung Murenbach bzw. in Richtung Herrenbach bzw. Öffnen und Schließen von Klüften und Spalten) ist auf die Überlagerung zweier gegengerichteter Bewegungsmechanismen zurückzuführen (Bewegung der tief liegenden Felsgleitung in Richtung Herrenbach, Bewegung des Faulen Schrofens in Richtung Murenbach). Hinzu kommen Bewegungskomponenten aus oberflächennahen Kipp- und Gleitbewegungen in Richtung Murenbach. Je nach Aktivität bzw. Dominanz der unterschiedlichen Mechanismen resultieren an den Oberflächenmesspunkten in Rate und Richtung variable Bewegungsvektoren.

Als langsam kriechende Massenbewegung ohne nennenswertes Beschleunigungspotential geht von der Herrenbach-Hornbergl Felsgleitung keine Gefährdung aus. Sie steuert allerdings maßgeblich das Steinschlag- und Felssturzgeschehen im Gebiet, indem die langsamen aber stetigen Hangbewegungen zu fortlaufenden topographischen Veränderungen führen. Die damit verbundenen Spannungsumlagerungen sind Ursache der beobachteten sekundären Hangdeformationsprozesse (Setzungen, Spaltenbildung, etc.) sowie der azyklischen lokalen Versagenserscheinungen (Felsstürze).

## Profil A (West)



## Profil B (Ost)

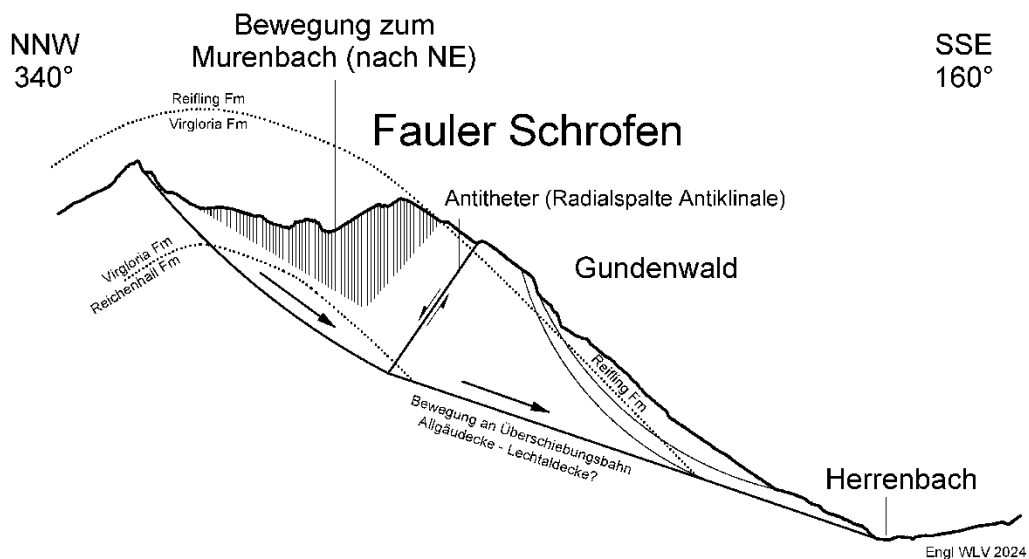


Abb. 5: Geologisch-geotechnisches Modell der Herrenbach-Hornbergl Felsgleitung. Lage der Profilsuren siehe Abb. 3.

## 10. Fazit

Im Zuge der aktuellen Gefahrenzonenplanüberarbeitung Höfen wurde die geologische Prädisposition für Sturzströme in den Einzugsgebieten des Herren- und Murenbachs neu bewertet. Hierfür wurde das strukturgeologische und geomorphologische Inventar sowie bestehende Messdaten von Hangdeformationsprozessen neu interpretiert und ein geologisch-geotechnisches Modell entwickelt. Dieses Modell geht von einer großmaßstäblichen, tiefgründigen Felsgleitung im Einzugsgebiet aus, welche die für die Aufgabenstellung maßgeblichen Prozesse Felssturz und Geschiebebildung kausal beeinflusst. Auf Grundlage des geologisch-geotechnischen Modells wurden maximale Sturzkubaturen an verschiedenen Ablöselokalitäten abgeschätzt und anschließend verschiedene Szenarien mit dem numerischen Simulationsmodell AVAFRAME simuliert. Mit Hilfe der ermittelten Reichweiten wurde der Braune Hinweisbereich im Gefahrenzonenplan Höfen neu abgegrenzt; hierbei konnte der Gefährdungsbereich für Felssturz im Vergleich zur Vorgängerversion teilweise zurückgenommen werden.

Das hier vorgestellte Fallbeispiel GZP Höfen betont die Bedeutung von ingenieurgeologischer Grundlagenarbeit, welche für die Bereitstellung von tragfähigen Eingabegrößen für Simulationen unabdingbar ist und die ermittelten Simulationsergebnisse auch für sensible Fragestellungen wie die Ausweisung von Gefährdungsbereichen verwertbar machen. Andererseits verdeutlicht das Fallbeispiel das Potential von numerischen Simulationen, die es erlauben verschiedene Szenarien mit unterschiedlichen Randbedingungen zu betrachten, zu verschneiden und daraus detaillierte und nachvollziehbare Gefährdungsbereiche abzugrenzen. Nicht zuletzt zeigt das Fallbeispiel anschaulich den Mehrwert, der erzielt werden kann, wenn die Daten verschiedenartiger Monitoringverfahren – von klassisch terrestrischen Messungen über die zyklische Landesaufnahme von Orthofotos und LIDAR bis hin zur satellitengestützten Fernerkundung – zusammengeführt und gemeinsam interpretiert werden.

## Referenzen

- [1] Angerer J. (1985): Bericht zu den geologischen Erhebungen im Murenbach und im Herrenbach. – Internes geologisches Gutachten für die Wildbach- und Lawinenverbauung Gebietsleitung Außerfern, Salzburg.
- [2] Aschenbrenner A. (2013) Mass Movement Hornbergl. – Master Thesis TU Graz. 129. S
- [3] Brandt A. (1981) Die Bergstürze an der Villacher Alpe (Dobratsch), Kärnten / Österreich – Untersuchungen zur Ursache und Mechanik der Bergstürze. – Diss. Univ. Hamburg.
- [4] Dragosits F. (1986) Ausführlicher Bericht über das Murereignis am 2., 3. Und 4.5.1986 im Murenbach, Gem. Höfen. Interner Bericht WLV, GZ 6005/10-86 vom 4.6.1986.
- [5] Dragosits, F. (2003) Interdisziplinäre Schutzmaßnahmen in den Höfener Wildbächen, Journal of Torrent, Avalanche, Landslide and Rock Fall Engineering. Forsttechnischer Dienst für Wildbach- und Lawinenverbauung Sektion Tirol, pp. 67 - 74.
- [6] EGMS (2025) European Ground Motion Service. <https://land.copernicus.eu/en/products/european-ground-motion-service>
- [7] Glabsch J., Heunecke O. and Schuhbäck S. (2009) Monitoring the Hornbergl landslide using a recently developed low cost GNSS sensor network, Journal of Applied Geodesy, pp. 179 - 192.
- [8] Kirschner H. (1996) I. Teil Stratigraphisch-tektonische Analyse in den Tannheimer Bergen (Außerfern, Tirol). II. Teil Geotechnische Kartierung des "Lainbach-Wildbachs" (Gem. Wängle) und der "Gimpelhaus-Umgebung" (Gem. Nesselwängle) im Bez. Reutte (Tirol). Unveröff. Dipl.-Arbeit. Universität Innsbruck, pp. 155.

- [9] Kirschner H. (2006) Unveröffentlichter Kartierungsbericht zur geologischgeotechnischen Untersuchung Bez. Reutte/Tirol Austria, Massenbewegung Hornbergl, Gemeinde Höfen. Forsttechnischer Dienst für Wildbach- und Lawinenverbauung, Geologische Stelle Innsbruck, pp. 21.
- [10] Marschallinger R., Mölk M. and Ihnenberger C. (2010) Geostatistische RaumZeit-Analyse der Deformationen am Hornbergl: Entscheidungsgrundlagen für die Abwehr von Schadensszenarien, COGeo 2010, Salzburg, pp. 10
- [11] Mölk M., Tollinger Ch., Österle F. (2024) Rock-Avalanche Fluchthorn: Back-calculation of the event with the Open Source Model Avaframe. – Conference Proceedings of the Interpraevent 2024, Vienna.
- [12] Moser M., Wunderlich T. A., Meier H. (2009) Kinematische Analyse der Bergzerreißung Hornbergl – Reutte (Tirol). – Jahrbuch der geologischen Bundesanstalt, Band 149, Heft 1, Wien, S.177-193.
- [13] Ploner A. & Sönser T. (2005) „Geologische Kartierung Hornbergl, Gemeinde Höfen“, Bericht der i.n.n. – Ingenieuresellschaft für Naturraummanagement mbh & Co KG, im Auftrag des Forsttechnischen Dienstes für Wildbach- und Lawinenverbauung, Sektion Tirol, Gebietesbauleitung Außerfern
- [14] Preh, A. (2016) Analyse von Sturzprozessen auf Altschnee. – Unveröffentlichter Forschungsbericht des Instituts für Geotechnik, Forschungsbereich Ingenieurgeologie, Technische Universität Wien.
- [15] Sönser, T. (1989) Tektonisch induzierte Massenbewegungen und ihre struktureologischen Hintergründe am Hahnenkamm bei Reutte in Tirol; Diplomarbeit Universität Innsbruck
- [16] Tiroler Laser- und Luftbildatlas (2025) <https://lba.tirol.gv.at/public/karte.xhtml>
- [17] Unterberger K. (2013): The application of Ground-Based InSAR to understand slope behavior at the Hornbergl in Reutte, Tyrol and the Ingelsberg in Bad Hofgastein, Salzburg; Austria Master Thesis, TU-Graz.

## Adressen der Autoren

*Dr. Daniela Anna Engl*  
*Wilhelm-Greil-Straße 9, 6020 Innsbruck*  
*Daniela.Engl@die-wildbach.at*

*Dr. Johannes Kammerlander*  
*Buchenort 2a, 6600 Lechaschau*  
*Johannes.Kammerlander@die-wildbach.at*

# Gefahren- und Risikoanalyse von Stein- und Blockschlag im Oberen Wiesental der Fränkischen Alb

T. Gebhard<sup>1</sup>, C. Schmitz<sup>1</sup>, J. Rohn<sup>2</sup>

<sup>1</sup> LGA Institut für Umweltgeologie und Altlasten GmbH, Christian-Hessel-Str. 1, 90427 Nürnberg, Deutschland;  
info@lga-geo.de

<sup>2</sup> GeoZentrum Nordbayern, FAU Erlangen-Nürnberg, Schlossgarten 5, 91054 Erlangen, Deutschland;  
joachim.rohn

## Kurzfassung

Die Landschaft der Fränkischen Alb ist durch tief eingeschnittene Flusstäler und steil emporragende Felsformationen geprägt. In Verbindung mit der intensiven Verkarstung der Karbonatgesteine und der starken Zergliederung des Gebirges in einzelne Felstürme und -schollen begünstigt dies das Auftreten von Stein- und Blockschlagereignissen. Das hohe Gefahrenpotenzial zeigt sich exemplarisch im Oberen Wiesental der Nördlichen Frankenalb. Weite Teile dieses Gebiets liegen im Bereich der Gefahrenhinweisflächen für Stein- und Blockschlag des Bayerischen Landesamts für Umwelt (LfU).

Um Gebiete mit vorrangigem Untersuchungsbedarf zu ermitteln, wurde ein GIS-basierter Ansatz zur Priorisierung der LfU-Gefahrenhinweisflächen entwickelt. Dabei wurden potenzielle Anbruch- und Prozessbereiche von Stein- und Blockschlag unter Berücksichtigung gefährdeter Schutzobjekte in eine geringe, mäßige oder hohe Priorität eingestuft. Im Oberen Wiesental der Nördlichen Frankenalb wurden 57 % der Flächen mit einer hohen Priorität eingestuft.

Zur Überprüfung der vorgenommenen Priorisierung folgten lokale Gefahren- und Risikoanalysen in ausgewählten Bereichen mit hoher Priorität. Hierfür wurde eine geomorphologisch-geotechnische Detailkartierung im Gelände durchgeführt und anschließend die Stein- und Blockschlaggefahr mithilfe von 3D-Steinschlagsimulationen modelliert. Auf Grundlage der Ergebnisse wurden Gefahrenzonen nach dem Ansatz des *Evolving Rockfall Hazard Assessment* von Ferrari *et al.* (2017) ermittelt. Die anschließende Risikoanalyse wurde anhand einer vereinfachten Risikomatrix unter Berücksichtigung der Exposition von gefährdeten Schutzobjekten durchgeführt.

Für die Siedlungs- und Verkehrsflächen unterhalb der untersuchten Felsmassive ergab sich in weiten Teilen ein mäßiges bis akutes Risiko gegenüber Stein- und Blockschlag. Dies bestätigt die zuvor ermittelte hohe Priorität der Anbruch- und Prozessbereiche in diesen Gebieten. Der GIS-basierte Ansatz erwies sich damit als nützliches Werkzeug, um Gebiete mit einem hohen Untersuchungsbedarf zu identifizieren.

## **Abstract**

*The landscape of the Franconian Alb is shaped by deep river valleys and steep rock formations. Combined with the intense karstification of the carbonate rocks and the disintegration of rock masses into individual blocks and towers, this favors the occurrence of rockfall events. The rockfall hazard is particularly evident in the Upper Wiesent Valley of the Northern Franconian Alb, where hazard indication zones published by the Bavarian State Office for the Environment (LfU) cover a large part of the area.*

*A GIS-based approach was developed to prioritize the LfU hazard indication zones in order to identify areas with a high need for investigation. Potential rockfall source and process areas were classified as low, moderate, or high*

*priority zones based on the occurrence of elements at risk. In the Upper Wiesent Valley of the Northern Franconian Alb, 57% of the areas were classified as high priority.*

*To verify prioritization, local hazard and risk analyses were conducted in selected high-priority zones. For this purpose, detailed geomorphological and geotechnical mapping was carried out in the field, and rockfall runout zones and energies were determined using 3D rockfall simulations. Based on the results, hazard zones were identified applying the Evolving Rockfall Hazard Assessment approach developed by Ferrari et al. (2017). The rockfall risk analysis was carried out using a simplified risk matrix with consideration of the exposure of elements at risk.*

*A moderate to acute risk of rockfall was identified for the settlement and transportation areas below the investigated rock slopes. This finding confirms the high priority previously assigned to these areas. The GIS-based approach proved to be a useful tool for identifying areas with a high need for investigation.*

---

## 1. Einleitung

Stein- und Blockschläge sind ein natürlicher Bestandteil von Mittel- und Hochgebirgslandschaften (Messerli und Ives 1997). Sie zeichnen sich durch eine frei fallende, springende oder rollende Bewegung von isolierten Steinen und Blöcken aus (Varnes 1978). Aufgrund ihrer geringen Vorwarnzeit und extrem hohen Geschwindigkeit zählen sie zu den gefährlichsten gravitativen Massenbewegungen. Hinzu kommt, dass das Eintreten von Stein- und Blockschlagereignissen schwierig vorhersehbar ist und oft historische Daten zu vergangenen Ereignissen unvollständig sind (Bunce *et al.* 1997; Lambert und Nicot 2011).

In Bayern hat sich das Bayerische Landesamt für Umwelt (LfU) den Gefahren und Risiken durch Stein- und Blockschlag angenommen und flächendeckend Gefahrenhinweiskarten für die Mittelgebirgsregionen und den Alpenraum erstellt. Die Gefahrenhinweiskarten geben eine Übersicht über das räumliche Auftreten von potenziellen Ereignissen auf regionaler Skala. Sie stellen Gefahrenverdachtsflächen ohne Angaben zur Intensität und Eintrittswahrscheinlichkeit eines zukünftigen Ereignisses dar. Eine Berücksichtigung von potenziellen Schutzobjekten im Gefährdungsbereich findet nicht statt (LfU 2020). Die Gefahrenhinweiskarten erlauben daher keine Priorisierung der Gefahrenbereiche hinsichtlich ihres Risikopotenzials. Da jedoch die Planung von geeigneten Schutzmaßnahmen mit einem hohen zeitlichen und finanziellen Aufwand verbunden ist, ergibt sich vor allem in großflächig gefährdeten Regionen die Notwendigkeit einer Priorisierung der Gefahrenbereiche, um Gebiete mit vorrangigen Untersuchungsbedarf identifizieren zu können.

Ein zentrales Ziel ist daher die automatisierte Priorisierung der LfU-Gefahrenhinweisflächen von Stein- und Blockschlag im Oberen Wiesental der Fränkischen Alb. Hierbei sollen insbesondere Bereiche mit einem hohen Risikopotenzial identifiziert werden. Ein weiteres Ziel ist die Validierung der vorgenommenen Priorisierung durch lokale Gefahren- und Risikoanalysen in ausgewählten Bereichen. Diese dienen gleichzeitig als Grundlage für zukünftige Risikobewertungen und die Planung von Schutzmaßnahmen durch Sachverständigenbüros.

## 2. Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet umfasst das obere Tal der Wiesent im Gemeindegebiet der Stadt Waischenfeld, Landkreis Bayreuth (Regierungsbezirk Oberfranken). Es erstreckt sich über eine Fläche von rund 13.8 km<sup>2</sup> und befindet sich ca. 20 km südwestlich von Bayreuth. Naturräumlich liegt das Untersuchungsgebiet im zentralen Bereich der Nördlichen Frankenalb, die das nordwestliche Ende der Fränkischen Alb darstellt (siehe 1).

Geologisch gesehen liegt das Untersuchungsgebiet im Bereich des nordbayerischen Deckgebirges, welches Teil der Süddeutschen Großscholle ist (Freudenberger 1996). Im Untersuchungsgebiet sind typisch für die Hochfläche der Nördlichen Frankenalb vor allem massige Kalk- und Dolomitsteine aus dem Jura verbreitet, die gebietsweise von kretazischen Gesteinen überdeckt werden (Wipperfurth 1955).

Die Gesteinsfolge gliedert sich in die geologischen Einheiten der Weißjura-Gruppe („Malm“) aus dem Oberjura und der Danubische Kreide-Gruppe aus der Oberkreide. Die Weißjura-Gruppe ist im Untersuchungsgebiet in erster Linie durch die Massenfazies der Frankenalb-Formation („Malm Alpha bis Zeta“) vertreten (Wipperfurth 1955). Diese umfassen alle überwiegend massigen Kalk- und Dolomitsteine aus Riff-Fazies und riffnahen Schillfazies (Niebuhr und Pürner 2014). Dicke Schwammrasenbänke (tafelbankiger Dolomit) sind stellenweise im „Malm-Delta“ und „Malm-Epsilon“ verbreitet (Wipperfurth 1955).

Die Landschaft ist durch tief eingeschnittene Flusstäler geprägt an deren Talflanken steile, bis zu 50 m hohe Felsformationen aus Riffdolomit emporragen. In Verbindung mit der intensiven Verkarstung und der starken Zergliederung des Gebirges in einzelne Felstürme und -schollen begünstigt dies das Auftreten von gravitativen Massenbewegungen wie Steinschlag, Blockschlag und Felsstürze (vgl. Wipperfurth 1955). Gleichzeitig konzentrieren sich wichtige Verbindungsstraßen und größere Siedlungen in den engen Talräumen. Aufgrund der räumlichen Enge liegen Siedlungs- und Verkehrsflächen meist unmittelbar am Fuß der Steilhänge. Eine weitläufige Pufferzone zwischen den Anbruchbereichen und den bedrohten Schutzobjekten fehlt dabei. Regelmäßig auftretende Ereignisse aus der Vergangenheit verdeutlichen die Bedrohung durch Stein- und Blockschläge in dieser Region (vgl. Herbst *et al.* 2013).

Das hohe Gefahrenpotenzial zeigt sich auch an den weit verbreiteten Gefahrenhinweisflächen entlang des Wiesentals (siehe Abb. 1). Insgesamt nehmen die Gefahrenhinweisflächen im Untersuchungsgebiet eine Fläche von rund 1.75 km<sup>2</sup> ein. Demnach liegt für ca. 13% der Fläche eine Gefahrenverdachtsituation für Stein- und Blockschlag vor. Besonders betroffen sind die steilen Talflanken der Wiesent und ihrer Nebentäler.

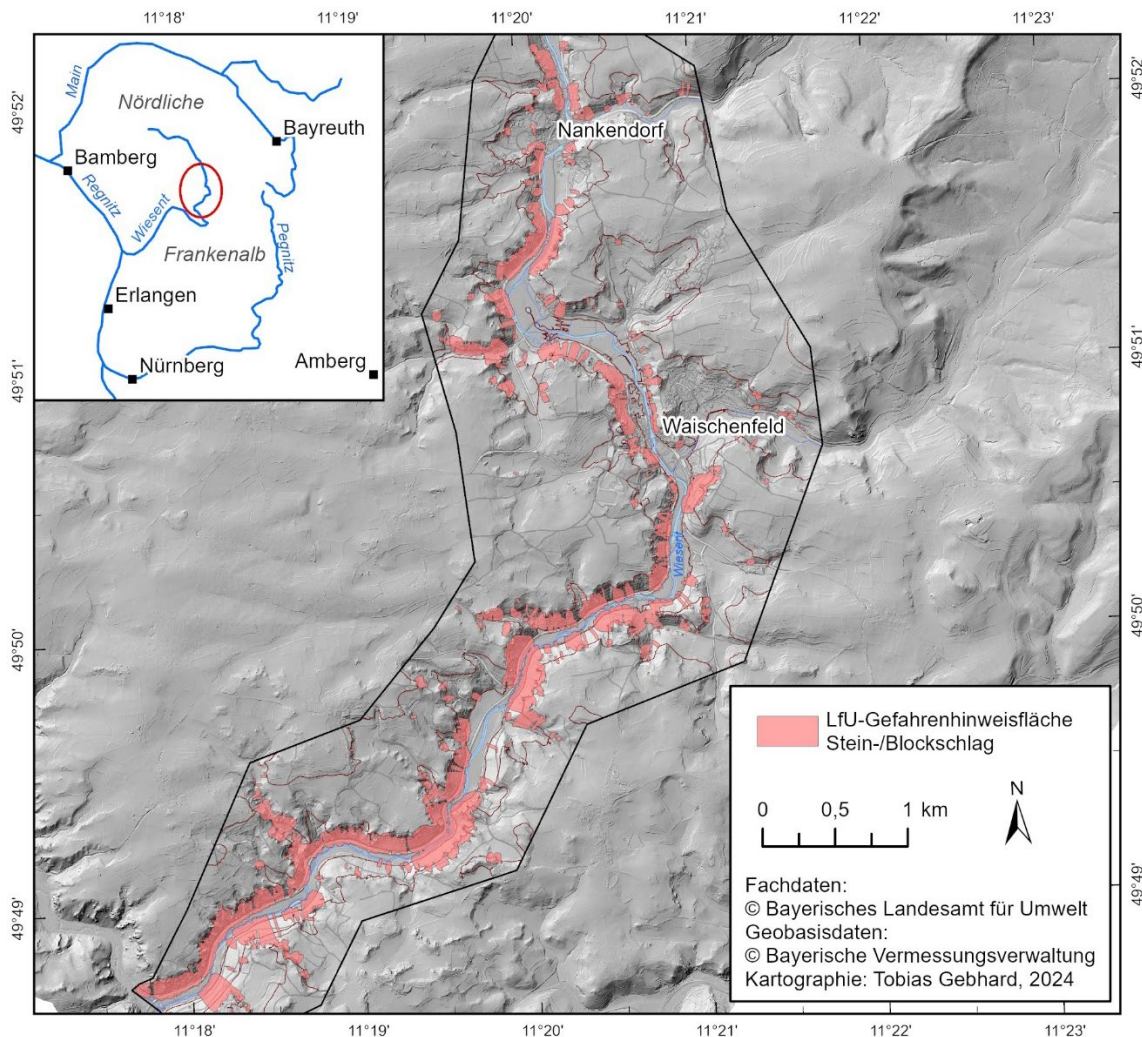


Abb. 1: Lages des Untersuchungsgebiets mit Darstellung der LfU-Gefahrenhinweisflächen für Stein- und Blockschlag.

### 3. Methoden

Die Methoden zur Ermittlung des Gefahren- und Risikopotenzials von Stein- und Blockschlag im Oberen Wiesenttal bestehen aus drei aufeinanderfolgenden Teilen:

#### 3.1. GIS-Analyse zur Priorisierung der Gefahrenhinweisflächen des LfU

Im ersten Teil wurde eine automatisierte GIS-Analyse für das gesamte Untersuchungsgebiet durchgeführt. Dabei wurden potenzielle Anbruch- und Prozessbereiche der LfU-Gefahrenhinweisflächen für Stein- und Blockschlag identifiziert und anschließend anhand von gefährdeten Schutzobjekte priorisiert. Die Identifizierung der Anbruch- und Prozessbereiche erfolgte auf Basis der modellierten Steinschlagtrajektorien, die den Gefahrenhinweisflächen zugrunde liegen und vom LfU für den Untersuchungsbereich zur Verfügung gestellt wurden. Potenziell gefährdete Schutzobjekte wurden den digitalen Landnutzungsdaten des Liegenschaftskatasters (ALKIS®) und des Digitalen Landschaftsmodells (ATKIS®-Basis-DLM) entnommen. Die Schutzobjekte wurden entsprechend ihrer Vulnerabilität sowie der Frequentierung und Aufenthaltsdauer im Gefährdungsbereich einer Expositionsklasse zugeordnet. Anhand der Expositionsklasse der Schutzobjekte erfolgte schließlich die Einstufung der Anbruch- und Prozessbereiche in eine geringe, mäßige oder hohe Priorität. Für einen automatisierten Ablauf wurden mehrere Modelle mithilfe des ModelBuilders in ArcGIS Pro (Version 3.2.2) der Firma Esri erstellt.

### 3.2. 2Geländeuntersuchungen in ausgewählten Bereichen

Zur Überprüfung der vorgenommenen Priorisierung folgten im zweiten Teil detaillierte Geländeuntersuchungen in drei ausgewählten Bereichen mit hoher Priorität innerhalb des Untersuchungsgebiets. Hierbei wurden Geländedaten für eine lokale Gefahren- und Risikoanalyse (siehe Teil 3) erhoben. Dies umfasste eine geomorphologisch-geotechnische Kartierung einschließlich der Messung von Trennflächen, der Aufnahme repräsentativer Felsobjekte (i.e. Kluftkörper) sowie der Kartierung der Bodenbedeckung und der Schutzobjekte im Gefährdungsbereich. Die Ergebnisse wurden mit ArcGIS Pro digitalisiert und in geomorphologischen Detailkarten visualisiert. Die Auswertung und Darstellung der Trennflächenmessungen erfolgte mit der Software Stereonet (Version 11.6.0) (Allmendinger *et al.* 2012).

### 3.3. Gefahren- und Risikoanalyse auf Grundlage der Geländedaten

Im dritten Teil wurde eine detaillierte Gefahren- und Risikoanalyse in den ausgewählten Bereichen auf Grundlage der erhobenen Geländedaten durchgeführt. Die (i) **Gefahrenanalyse** wurde nach dem Ansatz des *Evolving Rockfall Hazard Assessment* (ERHA) von Ferrari *et al.* (2017) und Mineo *et al.* (2018) durchgeführt. Der Grad der Gefährdung wurde dabei mithilfe der Gefahrenmatrix nach Mineo *et al.* (2018) bestimmt (siehe Abb. 2 A). Hierzu wurden der Aktivitätszustand der Anbruchbereiche sowie die Intensität potenzieller Stein- und Blockschlagereignisse ermittelt. Der Aktivitätszustand ist nach Ferrari *et al.* (2017) vor allem von den felsmechanischen Eigenschaften einer Felswand abhängig. Er ergibt sich aus dem Gefüge des Gebirges, den möglichen Versagensmechanismen instabiler Bereiche und dem allgemeinen Zustand der Felswand. Diese Parameter werden nach einem binären System eingestuft und mit einem Faktor gewichtet, der sich aus der Relevanz des Parameters für die Gefahrenbewertung ergibt. Die Intensität potenzieller Stein- und Blockschlagereignisse bezieht sich auf die Aufprallenergie der Sturzkomponenten und wird anhand der kinetischen Energie angegeben (Ferrari *et al.* 2017). Die kinetische Energie wurde mithilfe einer 3D-Steinschlagmodellierung mit der Software RocFall3 (Version 1.015) von Rocscience Inc. berechnet. Die Ausgangsdaten der Modellierung wurden für die weitere Verarbeitung und Visualisierung im GIS in rasterbasierte Daten umgewandelt. Die anschließende (ii) **Risikoanalyse** erfolgte ebenfalls auf Grundlage einer Matrix, die die Expositions-kategorie der gefährdeten Schutzobjekte und die zuvor ermittelte Gefahrenstufe berücksichtigt (siehe Abb. 2 B). Die Ergebnisse der Gefahren- und Risikoanalyse wurden schließlich in entsprechenden Karten mit unterschiedlichen Gefahren- und Risikozonen dargestellt.

In diesem Beitrag werden exemplarisch die Ergebnisse eines Untersuchungsbereichs vorgestellt.

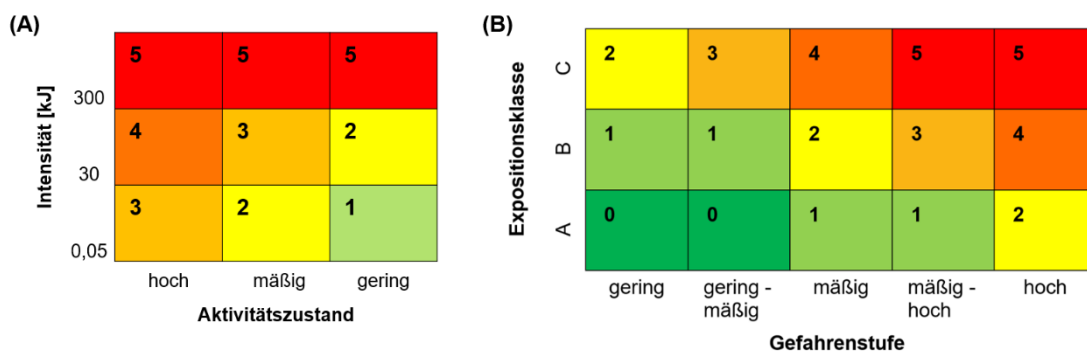


Abb. 2: (A) Gefahrenmatrix (in Anlehnung an Mineo *et al.* 2018) und (B) Risikomatrix (in Anlehnung an LGA IUA 2024) zur Ermittlung der Gefahren- bzw. Risikostufen. Gefahrenmatrix: 1 = geringe Gefährdung, 2 = gering-mäßige Gefährdung, 3 = mäßige Gefährdung, 4 = mäßig-hohe Gefährdung, 5 = hohe Gefährdung. Risikomatrix: 0 = Restrisiko, 1 = sehr geringes Risiko, 2 = latentes Risiko, 3 = mäßiges Risiko, 4 = hohes Risiko, 5 = akutes Risiko.

## 4. Ergebnisse

### 4.1. Ergebnisse der Priorisierung im GIS

Die Grundlage der Priorisierung im GIS bildeten die Gefahrenhinweisflächen für Stein- und Blockschlag des LfU sowie die entsprechenden Steinschlagtrajektorien (siehe Abb. 3 A). Um Unsicherheiten in der Modellierung zu berücksichtigen, wurde eine 15 m breite Pufferzone um die Trajektorien berechnet (siehe Abb. 3 B). Im Vergleich zu den Gefahrenhinweisflächen, die einen Sicherheitssaum von 5 m um die Trajektorien beinhalten, wurde damit ein bis zu 20 m breiterer Bereich berücksichtigt. Bereiche auf Gewässerflächen wurden unter der Annahme, dass diese Stein- und Blockschläge vollständig abbremsen, entfernt.

Der potenzielle Prozessraum wurde auf Grundlage einer geodätischen Sichtbarkeitsanalyse mit einem Schattenwinkel von  $27.5^\circ$  und einem horizontalen Streuwinkel von  $30^\circ$  ermittelt (siehe Abb. 3 C). Als Anbruchbereiche dienten die Startpunkte der modellierten LfU-Trajektorien. Der potenzielle Prozessraum wurde anschließend durch die Verschneidung von Schattenwinkelmodell und Gefahrenhinweisflächen berechnet, um auch die Gefahrenflächen zu berücksichtigen, die nicht im Schattenwinkelmodell erfasst wurden (siehe Abb. 3 D). Der berechnete Prozessraum umfasst eine Fläche von  $2.19 \text{ km}^2$  und ist damit um 25% größer als die Gefahrenhinweisflächen (siehe Abb. 4). Den gefährdeten Nutzungsflächen im potenziellen Prozessraum wurden im Anschluss eine Expositions-klasse zugewiesen (siehe Abb. 3 E).

Für die Priorisierung der Anbruch- und Prozessbereiche wurden die berechneten Pufferzonen (siehe Abb. 3 B) auf den potenziellen Prozessraum (siehe Abb. 3 D) zugeschnitten und entsprechend den Expositions-klassen der betroffenen Schutzobjekte (siehe Abb. 3 E) priorisiert. Rot spiegelt dabei eine hohe Priorität, Orange eine mäßige Priorität und Gelb eine geringe Priorität wider. Die Anbruchbereiche ergeben sich aus den Startpunkten der Trajektorien und heben sich durch eine Schraffur von den Prozessbereichen ab.

Der gesamte, priorisierte Prozessbereich von Stein- und Blockschlagereignissen nimmt eine Fläche von  $1.88 \text{ km}^2$  ein (siehe Abb. 4). Diese Fläche ist um etwa  $0.13 \text{ km}^2$  größer als die ursprünglichen Gefahrenhinweisflächen. Etwa 57% der Fläche wurde mit hoher Priorität eingestuft, gefolgt von 35% mit mäßiger Priorität und 8% mit geringer Priorität. Die Werte spiegeln sich auch in der Priorisierung der Anbruchbereiche wider.

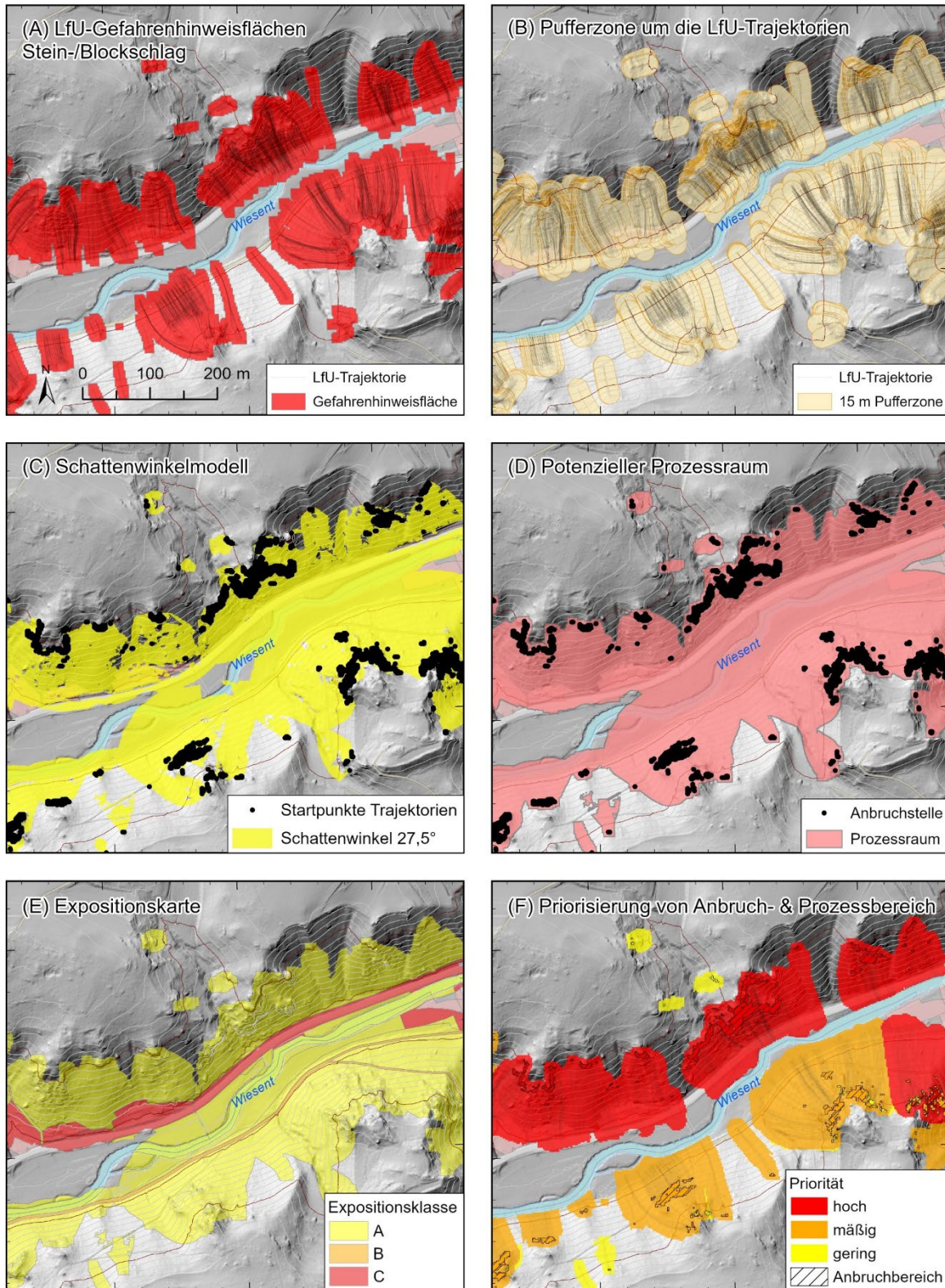


Abb. 3: Ausschnitt des Untersuchungsgebiets mit den Ergebnissen der automatisierten Priorisierung von Anbruch- und Prozessbereichen der Gefahrenhinweisflächen Stein- und Blockschlag des LfU.

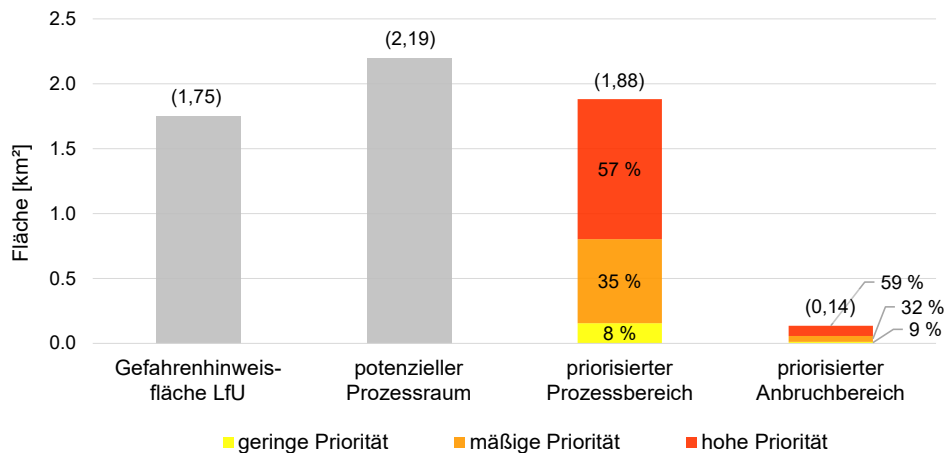


Abb. 4: Vergleich von LfU-Gefahrenhinweisflächen, potenziellen Prozessraum und priorisierte Anbruch- und Prozessbereiche.

#### 4.2. Ergebnisse der Geländeuntersuchungen

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Geländeuntersuchungen exemplarisch am Untersuchungsbereich 3 vorgestellt. Im Zentrum des Untersuchungsbereichs steht eine nahezu senkrechte und bis zu 20 m hohe Felswand an, die in Richtung Südosten exponiert ist. Die Felswand besteht aus massivem, nach oben zunehmend dickbankigem Riffdolomit. Das Gebirge wird vorherrschend von einem orthogonalen und 70° bis 90° steil stehenden Kluftsystem durchzogen (siehe Abb. 5). Die nahezu vertikal angelegten Klüfte wirken als Anlage für die Zergliederung der Massive in einzelne Felstürme und -schollen. In den tafelbankigen Dolomitfazies kommt eine horizontale Gliederung des Gebirges durch weitgehend horizontal liegende Bankfugen hinzu. Zusammen mit den meist weitständigen Kluftabständen ergeben sich daraus große quaderförmige Absturzvolumina.

Am Fuß der Felswand kam es zudem zur Bildung von größeren Blockschuttansammlungen. Daneben sind auch einzelne größere quaderförmige Sturzblöcke im Steilhang verteilt. Der Steilhang unterhalb der Felswand fällt mit etwa 30° ebenfalls in Richtung Südosten ein (siehe Abb. 5).

Als gefährdete Schutzobjekte wurden mehrere Wohngebäude mit ihren Nebengebäuden am Fuß des Steilhangs kartiert. Zudem befindet sich östlich davon ein Wirtschafts- und Gewerbegebäude mit geteertem Vorplatz. Im entfernten Gefährdungsbereich verläuft eine Kreisstraße (siehe Abb. 5).

Als Bemessungsereignisse für die Steinschlagmodellierung mit RocFall3 dienen repräsentative Felsobjekte, die für jeden Homogenbereich aufgenommen wurden. Insgesamt wurden acht Felsobjekte aufgenommen, deren Kubaturen von 0.12 bis 5.00 m<sup>3</sup> reichen (siehe Tab. 1). Das mittlere Blockvolumen beträgt ca. 2 m<sup>3</sup>. Zur Berechnung der Blockmasse wurde eine Gesteinsdichte von 2650 kg/m<sup>3</sup> nach Schön (1996) für Dolomitstein angenommen. Etwa die Hälfte der Objekte sind Sturzblöcke im Hang während die andere Hälfte Kluftkörper aus der Felswand darstellen. Um der Variabilität unterschiedlicher Blockgrößen bei Stein- und Blockschlagereignissen gerecht zu werden, wurden pro Homogenbereich vier bis fünf unterschiedliche Bemessungsblöcke definiert.

Tab. 1: Kartierte Bemessungsblöcke des Untersuchungsbereichs 3.

Block-Nr.	Kubatur [m <sup>3</sup> ]	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Masse [kg]	Homogenbereich
03-01	0.43	2650	1145	H1
03-02	2.11	2650	5597	H1, H2, H3, H4
03-03-i	0.27	2650	716	H1, H2, H3, H4
03-03-ii	3.60	2650	9540	H2, H3, H4
03-04	0.26	2650	678	H1, H2, H4
03-05	0.12	2650	318	H3
03-06	4.16	2650	11024	H3

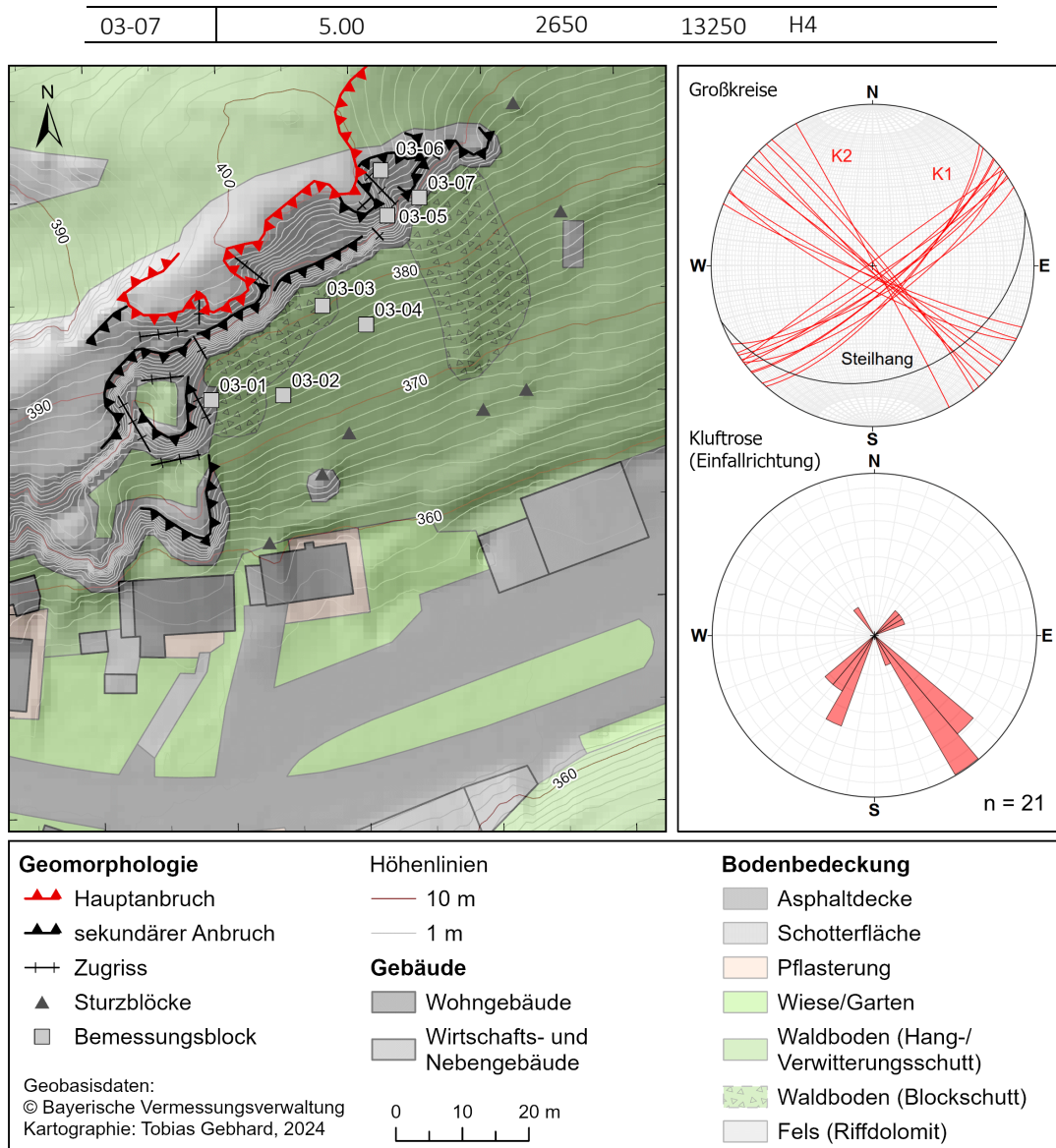


Abb. 5: Geomorphologische Detailkarte und Raumlage der Trennflächen des Untersuchungsbereichs 3. Der Außenkreis der Kluftrose entspricht 23% der Messwerte.

### 4.3. Ergebnisse der Gefahren- und Risikoanalyse

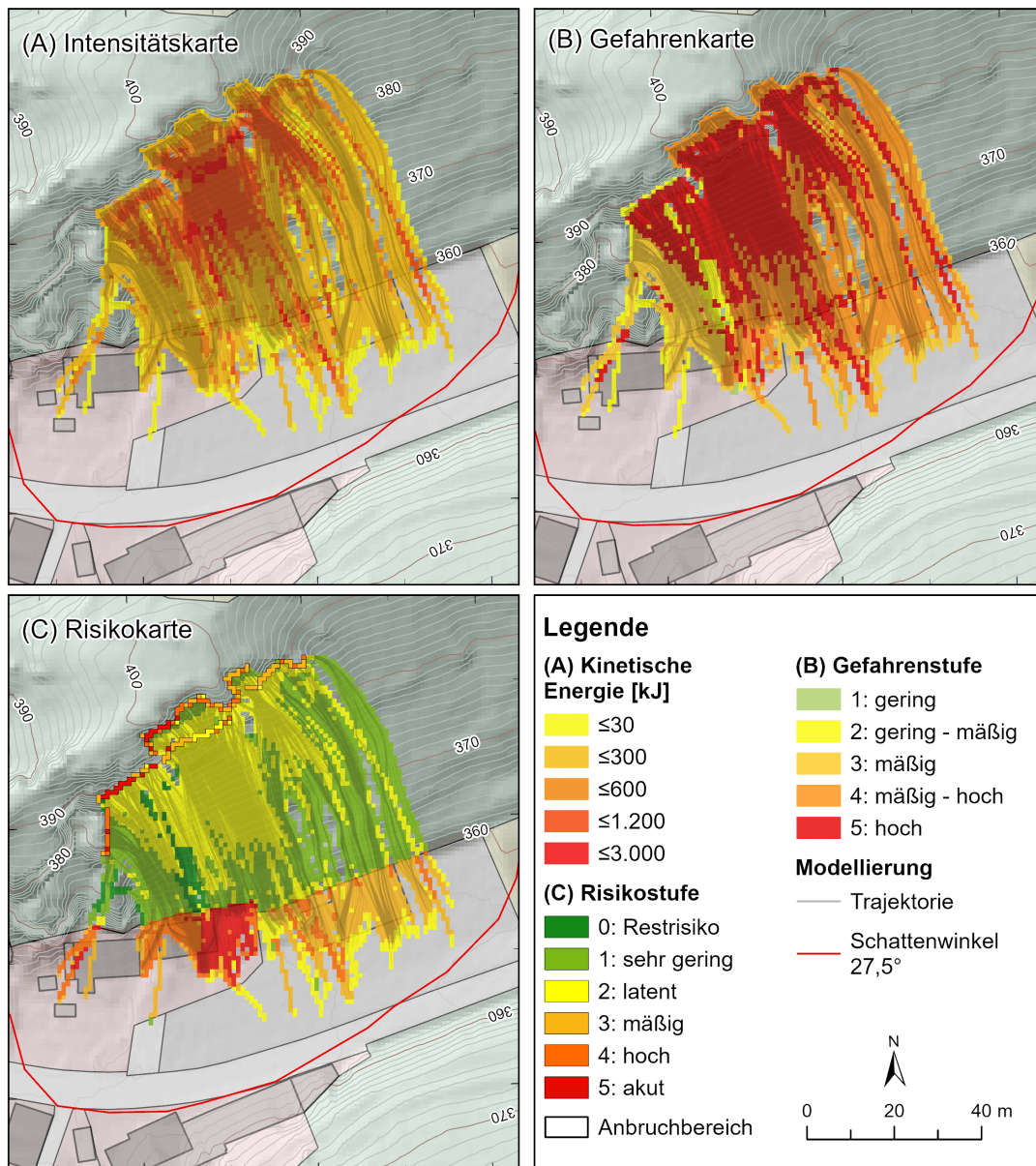
Im Zuge der Gefahren- und Risikoanalyse wurde der Aktivitätszustand pro Homogenbereich (siehe Tab. 2) und die kinetische Energie potenzieller Stein- und Blockschlagereignisse (siehe Abb. 6 A) bestimmt. Daraus wurden entsprechend der Matrizen in Abb. 2 Gefahren- und Risikostufen ermittelt und in entsprechenden Karten (siehe Abb. 6 B & C) dargestellt.

Im Untersuchungsbereich 3 wurde der Aktivitätszustand entsprechend Tab. 2 als mäßig bis hoch bewertet. Aufgrund der überwiegend sehr steil stehenden Kluftflächen und der weitgehend horizontal gelagerten Bankfugen dominieren Abstürze aus Überhängen (Fallen) als potenzieller Versagensmechanismus. Darüber hinaus kann es auch zu Gleit- oder Kippversagen kommen. Das Gesteinsgefüge wurde als massiv bis sehr blockig eingestuft. In zwei Homogenbereichen wurde der Zustand der Felswand aufgrund loser Felspartien oder stark zerlegten Bereichen als schlecht bewertet. In keinem Homogenbereich gab es Anzeichen aktueller Stein- oder Blockschlagaktivität.

Tab. 2: Ermittelter Aktivitätszustand pro Homogenbereich des Untersuchungsbereichs 3.

Homogenbereich	Gefüge	Fallen	Gleiten	Kippen	Felswand	Punkte	Aktivität	Stufe
H1	blockig	x				4	Nein	Mäßig
H2	massiv	x				2	Nein	Niedrig
H3	sehr blockig	x	x	x	-	11	Nein	Hoch
H4	blockig	x	x		-	9	Nein	Hoch

Abb. 6 (A) zeigt das 99. Perzentil der modellierten kinetischen Energie der Sturzblöcke pro 1 m breiter Rasterzelle. Die höchsten Energien von 600 bis 1'200 kJ, stellenweise auch bis zu 1'600 kJ, werden im oberen Steilhang unterhalb der Felswand erreicht. In Richtung Unterhang nehmen die Energien meist auf 30 bis 300 kJ ab. Im Bereich der Gebäude ist größtenteils mit Energien von 30 bis 300 kJ zu rechnen, wobei stellenweise auch Werte über 1'200 kJ erreicht werden.



Geobasisdaten: © Bayerische Vermessungsverwaltung, Kartographie: Tobias Gebhard, 2024

Abb. 6: Intensitäts-, Gefahren- und Risikokarte des Untersuchungsbereichs 3.

Aufgrund der hohen Energien (> 300 kJ) dominiert im oberen Steilhang unterhalb der Felswand eine hohe Gefahrenstufe. In Richtung Tal sinken die Gefahrenstufen in weiten Teilen auf mäßig bis mäßig-hoch. Die Siedlungsflächen sind überwiegend von einer mäßig bis mäßig-hohen Gefährdung betroffen, wobei stellenweise auch eine hohe Gefährdung bei Sturzblöcken mit hohen Energien (> 300 kJ) zu erwarten ist (siehe Abb. 6 B).

Damit ergeben sich für die Wohnbauflächen ein hohes bis akutes Risiko gegenüber Stein- und Blockschlag. Im Bereich der Industrie- und Gewerbefläche ist das Risiko überwiegend mäßig, stellenweise auch hoch. Ein hohes bis akutes Stein- und Blockschlagrisiko geht dabei von den westlichen Anbruchbereichen aus, die oberhalb der Wohnbebauung liegen. In den östlichen Bereichen ist das Risiko überwiegend mäßig bis hoch (siehe Abb. 6 C).

## 5. Schlussfolgerungen

Im Oberen Wiesenttal sind weite Teile von einer Gefährdung durch Stein- und Blockschlag betroffen. Für zielgerichtete Gefahren- und Risikoanalysen wurde daher eine automatisierte Priorisierung der LfU-Gefahrenhinweisflächen für Stein- und Blockschlag im GIS durchgeführt. Die Priorisierung dient als Werkzeug, um Gebiete mit hohem Untersuchungsbedarf zu identifizieren. Dabei gibt sie Aufschluss über das Risikopotenzial, basierend auf dem Vorhandensein von Schutzobjekten, ohne jedoch den tatsächlichen Zustand der Felsmassive zu bewerten. Im Untersuchungsgebiet wurden 57% der Flächen mit einer hohen Priorität eingestuft. Zukünftige Untersuchungen des Gefahren- und Risikopotenzials im Gebiet des Oberen Wiesenttals sollten sich vorrangig auf die Bereiche mit hoher Priorität konzentrieren.

Unter Berücksichtigung der Geländedaten und Steinschlagsimulationsergebnisse wurden schließlich lokale Gefahren- und Risikoanalysen durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Analysen wurden in Form von Karten allgemein verständlich aufbereitet. Die Karten eignen sich als Kommunikationsinstrument für Behörden, Planungsbüros und die Öffentlichkeit, um die Dringlichkeit von Schutzmaßnahmen aufzuzeigen. Sie liefern eine räumliche Aussage über die Gefährdung und die möglichen Konsequenzen potenzieller Stein- und Blockschlagereignisse. Für die Siedlungs- und Verkehrsflächen in den Untersuchungsbereichen wurde ein mäßiges bis akutes Stein- und Blockschlagrisiko festgestellt. Dies bestätigt die zuvor ermittelte hohe Priorität der Anbruch- und Prozessbereiche in diesen Gebieten. Der GIS-basierte Ansatz erwies sich damit als nützliches Werkzeug, um Gebiete mit einem hohen Untersuchungsbedarf zeitsparend und kostenschonend zu identifizieren.

## 6. Danksagung

Die dargelegten Forschungsergebnisse wurden im Rahmen der Masterarbeit „Gefahren- und Risikoanalyse von Stein- und Blockschlag im oberen Wiesenttal der Fränkischen Alb“ von Tobias Gebhard im Studium „Geowissenschaften“ an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg gewonnen. Ein besonderer Dank gilt Prof. Joachim Rohn und dem LGA Institut für Umweltgeologie und Altlasten für die fachliche Betreuung der Arbeit.

## Referenzen

- [1] Allmendinger, R. W., Cardozo, N. C., Fisher, D. (2012). Structural Geology Algorithms: Vectors & Tensors, Cambridge University Press: Cambridge.
- [2] Bunce, C. M., Cruden, D. M., Morgenstern, N. R. (1997). Assessment of the hazard from rock fall on a highway, Canadian Geotechnical Journal, 34(3), 344-356.
- [3] Ferrari, F., Giacomini, A., Theoni, K., Lambert, C. (2017). Qualitative evolving rockfall hazard assessment for highwalls, International Journal of Rock Mechanics & Mining Science, 98, 88-101.

- [4] Freudenberger, W. (1996). Tektonik. Deckgebirge nördlich der Donau, In: Bayerisches Geologisches Landesamt (ed.). Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:500 000, Bayerisches Geologisches Landesamt: München.
- [5] Herbst, B., Schillinger, C., Fickert, T. (2013). Gefährliche Felsböschungen im Nördlichen Frankenjura. Geologischer Rahmen, Gefährdungspotenzial und mögliche Sicherungsmaßnahmen, Mitteilungen der Fränkischen Geographischen Gesellschaft, 59, 59-73.
- [6] Lambert, S., Nicot, F. (eds.) (2011). Rockfall Engineering, John Wiley & Sons: London, Hoboken.
- [7] LfU – Bayerisches Landesamt Für Umwelt (2020). Methoden-Bericht zur Gefahrenhinweiskarte Bayern. Vorgehen und technische Details, LfU: Augsburg.
- [8] LGA IUA – Institut Für Umweltgeologie Und Altlasten GmbH (2024). Erläuterungen zur Methodik der Gefährdungsanalyse, LGA IUA: Nürnberg (unveröffentlicht).
- [9] Messerli, B., Ives, J. D. (1997). Mountains of the World. A global priority. A contribution to the chapter 13 of Agenda 21, Taylor & Francis: New York.
- [10] Mineo, S., Pappalardo, G., Mangiameli, M., Campolo, S., Mussumeci, G. (2018). Rockfall Analysis for Preliminary Hazard Assessment of the Cliff of Taormina Saracen Castle (Sicily), Sustainability, 10(2), 1-18.
- [11] Niebuhr, B., Pürner, T. (2014). Plattenkalk und Frankendolomit – Lithostratigraphie der Weißjura-Gruppe der Frankenalb (außeralpiner Oberjura, Bayern), Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, 83, 5-72.
- [12] Schön, J. H. (1996). Physical Properties of Rocks. Fundamentals and Principles of Petrophysics, In: Helbig, K., Treitel, S. (eds.). Handbook of Geophysical Exploration: Seismic Exploration, Elsevier: Amsterdam.
- [13] Varnes, D. J. (1978). Slope Movement Types and Processes, In: Schuster, R.L., Krizek, R.J. (eds.): Landslides: Analysis and Control, Transportation Research Board Special, Report 176, National Academy Press: Washington, DC.
- [14] Wippert, J. (1955). Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:25000, Blatt Nr. 6134 Waischenfeld, Bayerisches Geologisches Landesamt: München.

## Adressen der Autoren

*Tobias Gebhard, M.Sc.*  
LGA Institut für Umweltgeologie und Altlasten GmbH  
Christian-Hessel-Str. 1, 90427 Nürnberg  
tobias.gebhard@lga-geo.de

*Carina Schmitz, M.Sc.*  
LGA Institut für Umweltgeologie und Altlasten GmbH  
Christian-Hessel-Str. 1, 90427 Nürnberg  
carina.schmitz@lga-geo.de

*Prof. Dr. Joachim Rohn*  
GeoZentrum Nordbayern, FAU Erlangen-Nürnberg  
Schlossgarten 5, 91054 Erlangen  
joachim.rohn@fau.de

# Chroniken eines Radweges - Risikomanagement

L. Fegerl<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Leitung Landesgeologischer Dienst, Salzburg

## Kurzfassung

Seit 1995 wird der Radweg zwischen Weißbach und Lofer auf der alten Reichsstraße geführt. Die Straße verläuft im Naturidyll, jedoch am Fuß der mehrere hundert Meter aufragenden steilen Westabfälle des Steinernen Meers, welche Quelle von Sturzereignissen nahezu aller Größenordnungen sind. Bereits von Beginn an war das Thema Risiko für den Nutzer ein gegenwärtiges. Früh wurden Schutzmaßnahmen für die wenigen Radfahrer realisiert. Nun, 30 Jahre später, unter dem Einfluss von Zulässigkeiten, Normen, Dokumentationen und Risikoanalysen steht die Trasse erneut zur Diskussion.

---

# GEODATA ARGOS – Smart Impact Monitoring- Einblicke in innovative Monitoring-Technologien

A. Radinger<sup>1</sup> und S. Averdunk<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Geodata Survey & Monitoring Group, A-8700 Leoben

<sup>2</sup> Trumer Schutzbauten GmbH, Bad Vigaun

## Kurzfassung

Ausgehend von der zunehmenden Veränderung des Klimas steigt im Alpenraum die Gefahr für Naturgefahren. Dazu zählen Steinschlagereignisse und Hangmuren, deren plötzliches und massives Auftreten durch z. B. Starkregenereignisse und Temperaturänderungen befördert wird. Trumer Schutzbauten und GEODATA haben gemeinsam das Monitoring- und Überwachungssystem TIM entwickelt, das für den Einsatz in Steinschlagnetzen maßgeschneidert wurde. Damit ist ein vollautomatisches, robustes und langlebiges Impact-Monitoring möglich, mit dem Ziel, die Lebensdauer von Schutzbauten zu verlängern und die regelmäßige Überwachung zu vereinfachen. Im Vortrag wird auf die Motivation und die technische Ausgestaltung der Sensorik eingegangen und es werden praktische Anwendungen vorgestellt.

---

# Alpine Infrastruktur im Klimawandel - Intensivierte Landnutzung und erhöhter Sicherheitsanspruch versus verstärkte Gebirgsentfestigung

Rufus J. Bertle und Heiner Bertle<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Geognos Bertle ZT GmbH, Ziviltechnikerbüro für Technische Geologie, A-6780 Schruns

## Kurzfassung

In Fortsetzung der Erschließung, wirtschaftlichen Nutzung und Besiedelung des Alpenraumes spätestens seit der frühen Bronzezeit haben wir in den letzten Jahrzehnten auch die hintersten Täler und Berg- und Gletscherbereiche für die Gewinnung mineralischer Rohstoffe, für die Energieerzeugung, für Verkehrsverbindungen und für Tourismuseinrichtungen in Nutzung genommen. Damit sind große wirtschaftliche Werte, besonders aber viele Menschen, ja Menschenmassen, in den Bereich alpiner bis hochalpiner Gefahren gelangt. Die hohen investierten Werte und die Vielzahl an Menschenleben und deren lange Aufenthaltsdauer im Gefahrenbereich ergeben an sich das dramatisch erhöhte Risiko im Alpenraum.

Als Ausgleich für die weitestgehende Absicherung des Arbeits-, Verkehrs-, Wohn- und Erholungslebens hat der Bedarf nach Abenteuer, nach Erlebnis, nach dem „kick“ stark zugenommen. Trendsportarten mit persönlicher Grenzwertüberschreitung und Gefährdung ohne Rücksicht auf die objektiven Naturgefahren breiten sich zunehmend in bisherige Naturräume aus. Der subjektive Anspruch auf „prickelnde“ Gefährdungen ist jedoch eingebettet in die selbstverständliche Erwartung auf Rettung im Bedarfsfall, auf ärztliche Hilfe und Rehabilitation und auf Abdeckung aller Schäden durch die Allgemeinheit. Die Risikobereitschaft ist privat, die Risikoabdeckung ein Anspruch an die Gemeinschaft. Diese Grundhaltung erhöht ebenfalls an sich das Risiko im Alpenraum.

Die objektive Gefährdung für Menschenleben und Sachgüter im Alpenraum entsteht aus der Topografie, besonders dem Reliefpotential, aus den in Gebirgen besonders rasch wechselnden und extrem schwankenden Temperatur- und Niederschlagsbedingungen und aus dem Untergrund. Auch wenn wir es nicht wahr haben wollen und in einer Menschenlebenszeit kaum merken, auch Gebirge altern. Sie altern zyklisch mit längeren Zeiträumen der Verbandsentspannung, der Gefügaufweitung, der Ansammlung von Abtragsmassen und kürzeren Zeiten der Massenabbrüche, der Massengleit- und Massensackungsbewegungen sowie von Murschüben. Meist, nicht immer, decken sich die zyklischen Entlastungen mit besonderen klimatischen Ereignissen wie Starkniederschlags- und / oder Warmperioden. Eine solche Warmzeit kombiniert mit einer Entlastungsphase erleben wir sich steigernd in den letzten Jahren bzw. Jahrzehnten. Die jetzige Ereigniszeit ist nicht die erste, auch nicht (bisher) die dramatischste und wird nicht die letzte sein.

Am Beispiel der 2024 von einem Felssturz mit nachfolgendem Großmurstoß unterbrochenen Silvretta Hochalpenstraße B 188, einer privaten Straße mit öffentlichem Verkehr der illwerke vkw AG in Vorarlberg wird der im Vortragstitel angesprochene Interessenskonflikt erläutert. Ähnlich kritisch verlaufene Infrastrukturschäden an der Arlbergstraße L 197, Lechtalstraße / Flexengalerie L 198, Ötztalstraße L 186, sowie am Schitunnel Schwarze Schneid in Sölden belegen die aufgezeigte Herausforderung. Der Verweis auf die jüngsten Ereignisse in der Schweiz zeigt beispielhaft die alpenweite Verbreitung des Interessenkonfliktes.

# Historischer Kupferbergbau im UNESCO Global Geopark „Erz der Alpen“ – Geologisches Erbe und potentielle Grundwassergefährdung

S. Hilberg et al.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Environment and Biodiversity, Paris Lodron University of Salzburg

## Kurzfassung

Das zentrale Thema des UNESCO-Global Geopark „Erz der Alpen“ im Salzburger Pongau ist der prähistorische und historische Kupferbergbau in der Grauwackenzone. Im Vortrag wird eine von der Österreichischen Akademie der Wissenschaften (ÖAW) finanzierte Studie präsentiert, die untersucht hat, ob der Einfluss des historischen Bergbaus auch Jahrzehnte nach Schließung der Bergwerke noch Auswirkungen auf das Grundwasser und die Oberflächengewässer hat. Von Januar bis Juli 2024 wurden monatlich Proben von Grubenwasseraustritten entnommen und auf Feldparameter, Haupt- und Spurenelemente sowie Sulfatisotope untersucht. Die Qualität des Grubenwassers wurde mit zeitgleich beprobten Referenzstationen (Quellen und Bäche der nahen Umgebung) verglichen.

Die Messungen zeigen: pH-Werte des Grubenwassers liegen im leicht alkalischen Bereich, dementsprechend sind die Schwermetallkonzentrationen meist unbedenklich, allerdings weisen die Grubenwässer signifikant höhere Konzentrationen als die Referenzwässer auf. Der Nickelgehalt übersteigt an einer Station zeitweise den gesetzlichen Grenzwert. Die Sulfatwerte in den Grubenwässern sind im Vergleich zu den Referenzwässern immer deutlich erhöht. Isotopenanalysen bestätigen, dass die erhöhten Sulfatgehalte auf Sulfidoxidation und damit auf den Bergbau zurückzuführen sind. In einem der Bergwerke wurde ein deutlicher Zusammenhang zwischen Wasserführung und Wasserqualität festgestellt, was darauf hindeutet, dass Laugungsprozesse in permanent gefluteten Stollen bereits abklingen, während in nur temporär gefluteten Bereichen noch immer Sulfidverwitterung und damit assoziierte Lösungsprozesse stattfinden.

Es zeigt sich also, dass der historische Bergbau noch immer die Wasserqualität prägt. Da die Gangvererzungen aber an Karbonate gebunden sind, werden Auswirkungen der Sulfidverwitterung im Aquifer gepuffert, so dass das Grubenwasser pH-neutral bis basisch bleibt und damit nur geringes Lösungspotential für Schwermetalle aufweist. Eine Grundwassergefährdung, aus der sich ein Handlungsbedarf ableitet, ist damit in der Region nicht (mehr) gegeben. Die Studie gibt einen Überblick über die aktuelle Grundwassersituation im „Erz der Alpen“ UNESCO Global Geopark und trägt zu einem ganzheitlichen Verständnis dieses spezifischen Geoerbes bei.

---

## 1. Problemstellung

Aus hydrogeologischer Sicht bilden Bergwerksstollen unterirdische Fließwege, die hinsichtlich der vorherrschenden Strömungsdynamik mit Kluft- oder Karstaquiferen vergleichbar sind (Bedoya-Gonzalez et al. 2023). Es entstehen neue Strömungswege, die Verweildauer des Wassers im Gebirge verändert sich und sauerstoffgesättigtes Grundwasser gelangt in unterirdische Bereiche, die ohne anthropogenen Einfluss wasser- und sauerstofffrei wären. Neben der Strömungsdynamik wird damit auch die Qualität des Grubenwassers beeinflusst. Fragen zur Qualität von Grubenwasser sind ein wesentlicher Bestandteil der Forschung im Bereich des Nachbergbaus, wie zahlreiche Studien belegen (Kessler et al. 2020). Auch Jahrzehnte nach dem Bergbau kann die Wasserqualität

beeinträchtigt sein und erhebliche Umweltprobleme verursachen. Je nach mineralogischer Zusammensetzung des Muttergesteins tritt aus Bergwerken saures Grubenwasser oder neutral bis alkalisches Wasser aus. Saures Grubenwasser entsteht durch den Kontakt von Wasser und Sauerstoff mit Sulfiden, wenn nicht genügend Pufferminerale vorhanden sind. Neutrales oder alkalisches Grubenwasser tritt dort auf, wo Pufferminerale die hydrochemischen Prozesse dominieren. Die Qualität des Grubenwassers verbessert sich in der Regel nach dem sogenannten „First Flush“ (Younger 1997), der bei der Grubenflutung durch die Auswaschung von Sekundärmineralen und Salzen ausgelöst wird. Damit spielt also der Faktor Zeit eine wesentliche Rolle bei der Beurteilung einer potenziellen Umweltgefährdung durch aufgelassene Bergwerke.

Ein grundlegender hydrochemischer Prozess ist die Oxidation sulfidischer Erze, die in den Formeln (1) und (2) anhand des Beispiels der Pyritverwitterung dargestellt wird:



Bei der Pyritverwitterung steigt die Sulfatkonzentration im Wasser und der pH-Wert sinkt, sofern die freiwerdenden  $\text{H}^+$  Ionen nicht von im Aquifer verfügbaren Puffermineralen (vor allem Karbonaten) gebunden werden. Niedrige pH-Werte fördern die Auflösung von Metallen aus dem umgebenden Gestein, sodass austretendes Grubenwasser oft nicht nur sauer und sulfatreich ist, sondern auch mit verschiedenen umweltgefährdenden Metallen und Metalloiden wie Arsen angereichert ist.

Die Ostalpen und insbesondere die Grauwacke-Zone sind bekannt für bedeutende Erzvorkommen und die damit verbundene Bergbaugeschichte (Pernicka et al. 2016). Der UNESCO Global Geopark (UGG) „Erz der Alpen“ im Pongau widmet sich dem prähistorischen und historischen Kupferbergbau. Schaubergwerke in Mühlbach, St. Veit und Hüttau informieren die Besucher über den jahrhundertelangen Kupferbergbau in der Region (Erz der Alpen UNESCO Global Geopark 2024). Eine Studie über Bergbau- und Hüttenstandorte im Bundesland Salzburg (Feitzinger et al. 1998) umfasst auch die Standorte im UGG „Erz der Alpen“. Darin wurde die Bergbaugeologie der Lagerstätten beschrieben, der Erzabbau in der Region aus historischer Perspektive untersucht und die Standorte hinsichtlich Bodenverunreinigungen durch Abraumhalden und Rauchgasemissionen diskutiert. Das Grubenwasser wurde bis dato nicht systematisch erfasst oder bewertet. Die präsentierte Studie geht folgenden Fragen nach:

- Gibt es Jahrzehnte nach Stilllegung und damit verbundenen Flutung der Bergbaue im Pongau noch Beeinträchtigungen der austretenden Grubenwässer?
- Welche Leitparameter können hinsichtlich des Bergbaueinflusses identifiziert werden?
- Welchen Einfluss hat die Umgebungsgeologie auf die Entwicklung der Wasserqualität?

## 2. Untersuchungsgebiet

Der UGG „Erz der Alpen“ liegt im nördlichen Teil des Pongaus in Salzburg und umfasst eine Fläche von 211 km<sup>2</sup> in den vier Gemeinden Hüttau, Bischofshofen, Mühlbach am Hochkönig und St. Veit im Pongau. Es handelt sich um eine Region, in der seit dem zweiten Jahrtausend v. Chr. Bergbau betrieben wird. Insbesondere Kupfer wurde hier bis zur endgültigen Schließung des letzten aktiven Bergwerks im Jahr 1977 abgebaut. Die Kupfervorkommen befinden sich am nördlichen Rand der Grauwackenzone, nahe der Basis der Nördlichen Kalkalpen. Im ehemaligen

Bergbaugebiet dominiert eine paläozoische Abfolge von Serizitphylliten und Quarziten, die lokal mit Schwarzphylliten, Grünschiefern und Diabasen durchsetzt sind. Kleinräumig treten Kalkmarmore und Kalkschiefer auf. Sie werden als Einschlüsse in den siliziklastischen Metasedimenten beschrieben. Die Gesteine der Grauwackenzone werden in den höheren Lagen der jeweiligen Einzugsgebiete von Werfener Schichten mit Sandsteinen und Quarziten, teilweise sandigen Ton-Schiefern und in geringerem Maße Konglomeraten überlagert. Die Schichten fallen generell nach Norden ein und sind lokal verfaltet (Pestal et al. 2009). Bei den untersuchten Bergbauen handelt es sich um Ganglagerstätten. Das dominierende Erz ist Chalkopyrit ( $\text{CuFeS}_2$ ), wobei in einigen Abschnitten die Mineralisierung durch einen erhöhten Nickelgehalt in Form von Gersdorffit ( $\text{NiAsS}$ ) gekennzeichnet ist. Weitere mit den Lagerstätten assoziierte Erzminerale sind Pyrit und Arsenopyrit. Die Erzgänge sind meist in Karbonate der Magnetit-Siderit- und Dolomit-Ankerit-Reihe eingebettet (Feitzinger et al. 1998).

In der Region gibt es zahlreiche aufgelassene Bergwerke, die meist jedoch nicht mehr zugänglich sind, bzw. über deren Beschaffenheit und Ausdehnung es keine validen Informationen gibt. Für die vorliegende Studie wurden vier zugängliche Stollensysteme ausgewählt: Mitterberg mit zwei Stollen (Emilstollen und Rupertistollen) ([www.geopark-erzderalpen.at/geosite/305-prahistorischer-kupferbergbau](http://www.geopark-erzderalpen.at/geosite/305-prahistorischer-kupferbergbau)), ein Bergwerk in Hütttau im Gebiet Larzenbach (<https://www.kupferzeche.at/>) und ein weiteres in St. Veit, Sunnpau (<https://www.museumsverein-stveit.com/>). Die untersuchten Bergwerke liegen zwischen 900 und 1200 m ü.A., die Einzugsgebiete reichen von 1800 m ü.A. in Hütttau bis über 2400 m ü.A. im Gebiet Mitterberg. In Mitterberg ist die Mineralisierung in Serizitphyllite eingebettet, die mit Quarziten, Schwarzphylliten, Grünschiefern und Diabasen durchsetzt sind (Feitzinger et al. 1998). Das Bergwerk Larzenbach befindet sich nördlich von Hütttau auf einer Höhe von 700–800 m ü.A.. Die Erzgänge liegen in Wildschönauer Schiefer. Das Bergwerk wurde in den 1990er Jahren, nachdem es über 100 Jahre lang stillgelegt war, zu einem Schaubergwerk umgebaut. Das Bergwerk Sunnpau in St. Veit ist durch dolomitische Kalkphyllite gekennzeichnet. Die hier vorkommenden Fahlerze sind an silurisch-devonische Kalksteine und Dolomite gebunden. Das Bergwerk wurde Ende des 19. Jahrhunderts geschlossen und wird heute ebenfalls als Schaubergwerk betrieben.

### 3. Methodik

Im Rahmen von Stollenbegehungen wurden repräsentative Punkte für wiederholte Probenahmen von Grubenwasser und Grundwasser ausgewählt. Die Grubenwasseraustritte liegen dabei entweder direkt in einem Stollen oder an einem Stollenmundloch. Als Referenzquellen wurden Messstellen gesucht, die außerhalb des Einflussbereichs bekannter Abbaugebiete, aber im Nahbereich in einer vergleichbaren geologisch-hydrogeologischen Umgebung liegen. Die ausgewählten Messstellen wurden über einen Zeitraum von sieben Monaten (Januar bis Juli 2024) sechsmal beprobt, wobei jeweils 0,7 L Wasser in PE-Flaschen gesammelt wurden. Die Flaschen wurden vorab jeweils dreimal mit Probenwasser gespült und filtriert (0,45- $\mu\text{m}$  Maschenweite). 0,1 L Probenwasser wurde zur Stabilisierung der Kationen mit Salpetersäure auf einen pH-Wert  $< 2$  angesäuert. Die Proben wurden bis zur Analyse gekühlt aufbewahrt und im hydrogeologischen Labor der Universität Salzburg analysiert. Anionen Chlorid ( $\text{Cl}$ ), Sulfat ( $\text{SO}_4$ ), und Nitrat ( $\text{NO}_3$ ) und Hauptkationen Calcium ( $\text{Ca}$ ) Magnesium ( $\text{Mg}$ ) Natrium ( $\text{Na}$ ) und Kalium ( $\text{K}$ ) wurden mittels Ionenchromatographie (Dionex Aquion, Thermo Fisher) analysiert, Spurenelemente mittels ICP-

MS (Agilent 7.900). Die Hydrogencarbonat-Konzentration ( $\text{HCO}_3$ ) wurde jeweils spätestens einen Tag nach der Probenahme titrimetrisch (Titroline 5000) bestimmt. Einmalig wurde 1L Probe für die Sulfatisotopenanalyse an Wässern mit Sulfatkonzentrationen  $>50$  mg/L entnommen. Die Isotopenanalysen wurden von Imprint Analytics, einem akkreditierten Labor, durchgeführt (angewandte Methoden: 03.001EA-IRMS (2022-05) für  $\delta^{34}\text{S}$ , 03.002 HTO-IRMS (2018-04) für  $\delta^{18}\text{O}$ ). Die Dateninterpretation und -visualisierung erfolgte mit der Software AquaChem 12.0 (Waterloo Hydrogeologic 2022). Zur Berechnung der Sättigungsindizes (SI) wurde der hydrochemische Code PHREEQC (Parkhurst and Appelo 2013) als integriertes Tool in AquaChem 12.0 verwendet.

#### 4. Ergebnisse

In den drei Bergwerken in Mühlbach, Hütttau und St. Veit wurden generell eine geringe Wasserführung (Zutritte meist  $<1\text{L/s}$ ) festgestellt. Insgesamt wurden sieben Grubenwasseraustritte und vier Referenzstationen (Quellen und Bäche) beprobt. Im Gebiet Mitterberg sind alle Stollen entweder eingestürzt oder wurden bei der Stilllegung des Bergwerks im Jahr 1977 zugemauert. Die gesamte Entwässerung der Stollensysteme ist jedoch an den Mundlöchern des Emilstollens (Q15) und des Rupertistollens (Q14) für Probenahmen zugänglich. Zusätzlich wurden der Schrammbach (Q14.1) oberhalb des Stollens und eine nahegelegene Quelle (Q6), ebenfalls oberhalb des Stollensystems, als Referenzstellen beprobt. In Hütttau wurden drei verschiedene Quellen im tiefer gelegenen Georgstollen für die Probenahme ausgewählt (Q21, Q22, Q51). Ein nahegelegener, namenloser Bach (Q51) wurde als Referenzstation für dieses Stollensystem verwendet, da in der Umgebung keine geeigneten Quellen gefunden werden konnten. Im Mathiasstollen in St. Veit wurden ein Wasserzutritt aus einer Kluft (Q18) und ein kleines wassergefülltes Becken (Q18.1) ausgewählt.

Die elektrische Leitfähigkeit (EC) (Abb. 1a) der Wässer liegt zwischen  $200$  und  $1050$   $\mu\text{S/cm}$ , wobei die Referenzproben (Q6, Q14.1, Q19 und Q50) stets unter einem Wert von  $350$   $\mu\text{S/cm}$  liegen, während die Grubenwässer (Q14, Q15, Q18.1, Q21, Q22 und Q51) mit Werten über  $400$   $\mu\text{S/cm}$  deutlich mineralisierter sind. Eine Ausnahme bildet das Grubenwasser Q18 (Mathiasstollen, St. Veit), das nie über  $300$   $\mu\text{S/cm}$  lag. Bei Q15 wurden während des Untersuchungszeitraums erhebliche Schwankungen der elektrischen Leitfähigkeit zwischen  $300$  und mehr als  $1000$   $\mu\text{S/cm}$  beobachtet. Das Grubenwasser Q21 weist mit einem Medianwert von  $840$   $\mu\text{S/cm}$  und einem Minimalwert von über  $800$   $\mu\text{S/cm}$  die höchste Gesamtmineralisierung auf. Die pH-Werte (Abb. 1b) liegen sowohl im Referenz- als auch im Grubenwasser im alkalischen Bereich, meist zwischen  $8$  und  $8,5$ . Während des Untersuchungszeitraums schwanken die Werte an den meisten Stationen, bleiben aber immer deutlich über dem neutralen Bereich. Die stärksten Schwankungen sind wiederum in Q15 zu beobachten. Ein einzelner Wert deutlich über einem pH-Wert von  $9$  an der Messstelle Q19 wird als Messfehler angesehen und daher als Ausreißer nicht für die weitere Interpretation berücksichtigt.

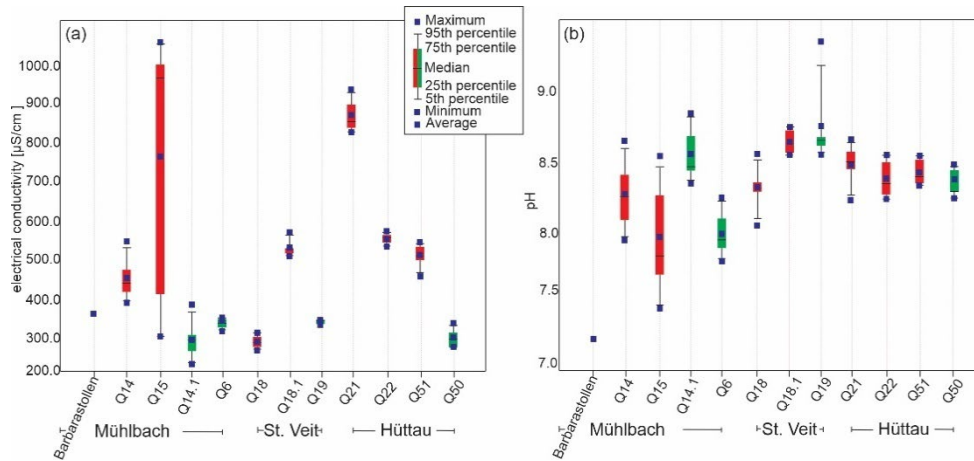


Abb. 1: a) Elektrische Leitfähigkeitswerte und b) pH-Werte und deren Bereich über den Beobachtungszeitraum. Grubenwasser ist rot dargestellt, Referenzstationen grün (Abbildung entnommen aus Hauser et al. 2025, in Begutachtung)

Aus der Beobachtung unterschiedlicher Ionenverhältnisse lassen sich interessante Schlussfolgerungen ziehen. Beispielfhaft werden in Abbildung 2 Hauptkomponentenverhältnisse verwendet, um zwischen der Auflösung von Evaporiten (oder Sulfiden) und der Verwitterung von Karbonaten (oder Silikaten) als dominantem hydrochemischem Prozess zu unterscheiden. Aus den Abbildungen 2a und b) geht hervor, dass sich Q15 und Q21 deutlich von allen anderen Messstellen unterscheiden. Während die meisten Grubenwässer und alle Referenzwässer von  $\text{HCO}_3$  dominiert werden, weisen diese beiden Stationen einen deutlichen Überschuss an  $\text{SO}_4$  bzw.  $\text{Cl}$  auf. Da die  $\text{Cl}$ -Konzentrationen der Wässer insgesamt gering sind, kann geschlossen werden, dass  $\text{SO}_4$  der dominierende Parameter ist und somit entweder die Sulfatlösung oder die Sulfidoxidation die treibenden Kräfte für die beobachtete Wasserzusammensetzung sind. Die allgemein starke positive Korrelation von  $\text{SO}_4$  mit  $\text{Ca} + \text{Mg}$  (Abb. 2b) deutet darauf hin, dass diese Parameter selben Ursprungs sind. Das niedrige Verhältnis von 1:3 ist ein Beweis dafür, dass Sulfatlösung nur ein untergeordneter Prozess in den Einzugsgebieten ist. Der größte Teil der Kationen muss aus Karbonat- oder Silikatlösungen stammen. Dies gilt für alle Stationen mit Ausnahme von Q15 und Q21. Der deutlich höhere Sulfatanteil der beiden Grubenwasseraustritte deutet auf eine zusätzliche Sulfatquelle hin, die in den Grundwassersystemen der anderen Stationen nicht vorhanden ist und gut durch die in den Formeln 1 und 2 beschriebene noch immer ablaufende Sulfidoxidation in den Bergwerken erklärt werden kann.

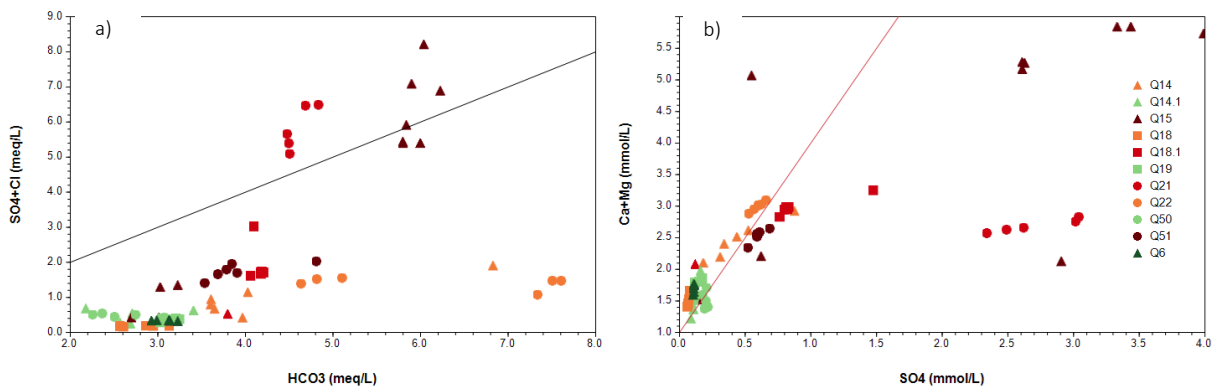


Abb. 2: Streudiagramme, die die Korrelation zwischen a)  $\text{HCO}_3/\text{SO}_4+\text{Cl}$  und b)  $\text{SO}_4/\text{Ca}+\text{Mg}$  zeigen. Die schwarze Linie stellt die 1:1-Linie, die rote die lineare Trendlinie des  $\text{Ca}+\text{Mg}/\text{SO}_4$ -Verhältnisses dar, das etwa 1:3 beträgt (Abbildung entnommen und verändert nach Hauser et al. 2025, in Begutachtung)

Um die Pufferprozesse zu verstehen, die trotz Sulfidoxidation zu einem alkalischen pH-Wert führen, wurde ein hydrochemischer Modellierungsansatz verwendet. Die wichtigsten Ionen, die beim Pufferprozess von Calcit/Dolomit im Grubenwassermillieu freigesetzt werden, sind  $\text{SO}_4$ ,  $\text{HCO}_3$ , Ca und Mg. Die Mineralien, deren Sättigungszustand durch die Produktion dieser Ionen beeinflusst wird, sind Calcit, Dolomit und Gips (respektive Anhydrit). Daher wurden für diese drei Mineralphasen Sättigungsindizes (SI) berechnet. Wie in Abbildung 3 dargestellt, sind Calcit (Abb. 3a) und Dolomit (Abb. 3b) an den Referenzstationen leicht und im Grubenwasser deutlich übersättigt, während alle Proben Gips-Untersättigung aufweisen (Abb. 3c). Darüber hinaus besteht eine klare Korrelation zwischen dem SI von Calcit und Dolomit mit der  $\text{HCO}_3$ -Konzentration und dem SI von Gips mit der  $\text{SO}_4$ -Konzentration. Das bedeutet, dass die Lösung von Calcit und noch deutlicher die Lösung von Dolomit die Hauptprozesse sind, die die pH-Werte im alkalischen Bereich halten. Die Lösung von Gips ist hingegen sowohl im Referenzwasser als auch im Grubenwasser kein relevanter Prozess. Dies ist ein weiterer Hinweis darauf, dass der größte Teil der Sulfatkonzentration im Grubenwasser nicht aus der Evaporitlösung im Grundwasserleiter stammt, sondern aus bergbaubezogenen Prozessen.

Weitere Hinweise dafür, dass die erhöhten Sulfatkonzentration und andere Anomalien in den Grubenwässern Q15 und Q21 nicht auf Evaporitlösung sondern auf Sulfidoxidation zurückzuführen sind, wurden über die Isotopensignatur der an Sulfat angereicherten Proben (>50 mg/L) aus der Probenahmekampagne vom April 2024 gewonnen. Im Allgemeinen sind schwere Sulfatisotope typisch für mesozoische Evaporite, wie es in einem Einzugsgebiet der Nördlichen Kalkalpen zu erwarten wäre, wenn die gemessenen Sulfatkonzentrationen das Ergebnis von Gipslösung wären (z. B. aus dem Haselgebirge). Im Gegensatz dazu sind, wie zahlreiche Studien zeigen, Sulfate, die aus der Oxidation von Sulfiden stammen, isotopisch deutlich leichter. Die in Abbildung 4 dargestellte Sulfatisotopensignatur stützt die Annahme, dass die gemessenen hohen Sulfatkonzentrationen in Grubenwässern auf Oxidation von Sulfiden zurückzuführen sind.

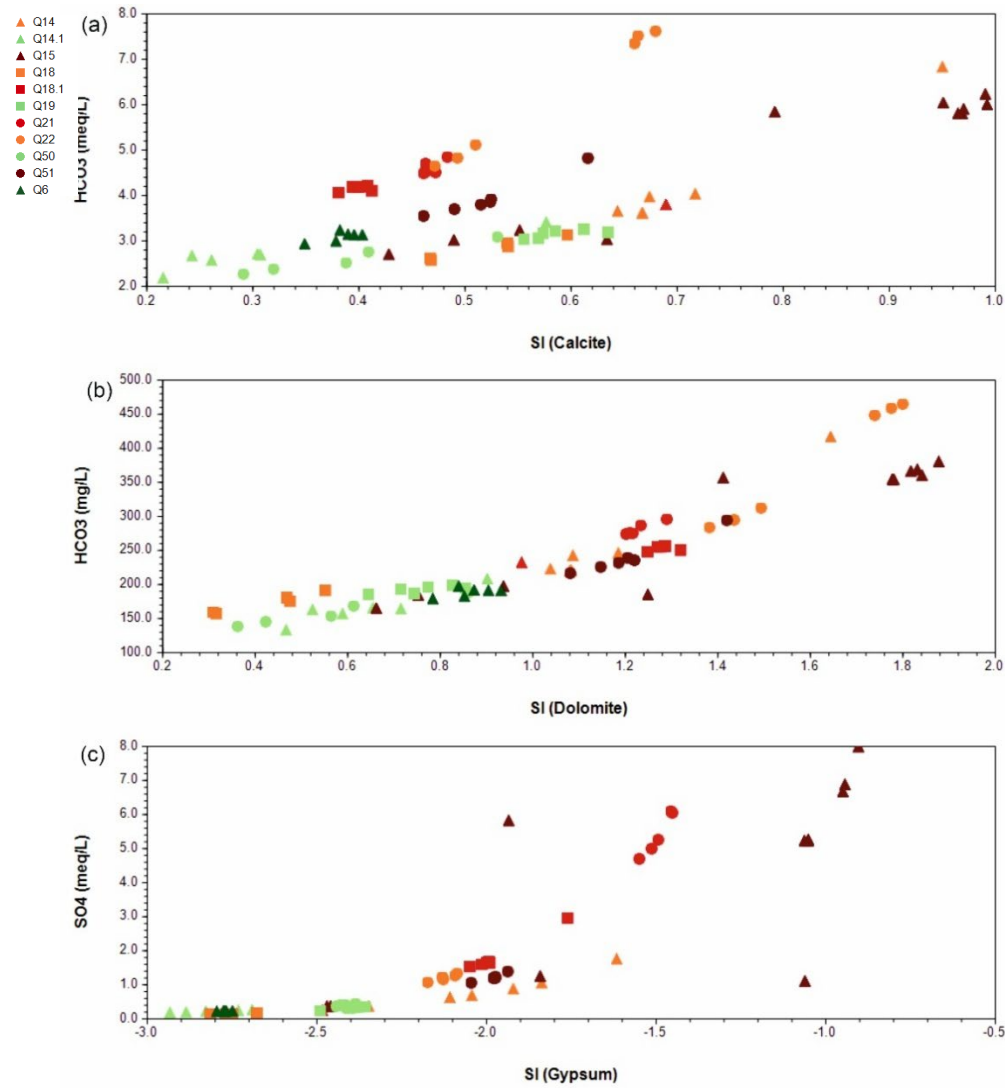


Abb. 3: Sättigungsindizes von a) Calcit, b) Dolomit und c) Gips im Vergleich zu den entsprechenden Hauptanionen a, b)  $\text{HCO}_3^-$  und c)  $\text{SO}_4$ . (Abbildung entnommen und verändert nach Hauser et al. 2025, in Begutachtung)

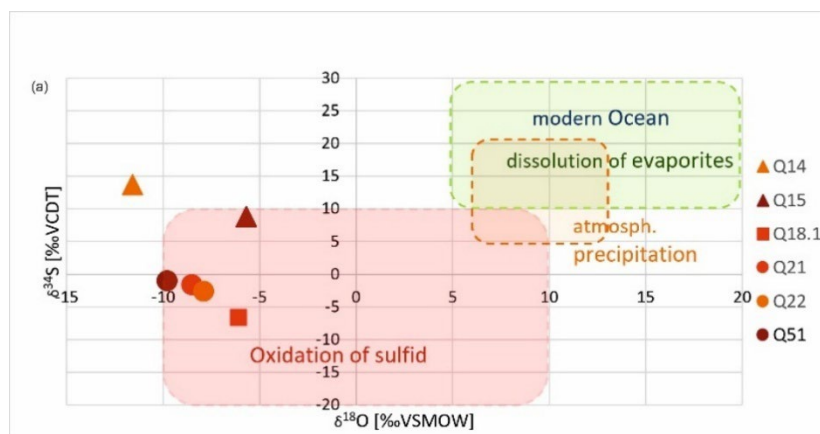


Abb. 4: Isotopensignatur von Sulfat in Grubenwässern mit  $\text{SO}_4 > 50 \text{ mg/l}$ , Probenahmeaktion April 2024. Alle Proben sind in Bezug auf  $\delta^{34}\text{S}$  und  $\delta^{18}\text{O}$  isotopisch leicht und liegen in einem Bereich, der für Sulfate aus der Sulfidoxidation typisch ist. (Abbildung entnommen aus Hauser et al. 2025, in Begutachtung)

In den Grubenwässern wurden Konzentrationen von Nickel (Ni), Kupfer (Cu), Zink (Zn), Strontium (Sr) und Barium (Ba) nachgewiesen, die im Vergleich zu den Referenzwässern als leicht angereichert bezeichnet werden können. Die höchsten Ni-Konzentrationen finden sich in Q15, die höchsten Cu-Konzentrationen in Q21. Höhere Sr-Konzentrationen finden sich ebenfalls in Q15 und Q21. Im Hinblick auf eine mögliche Umweltbelastung durch das Grubenwasser ist Q15 mit einem Mittelwert für Ni im Bereich von 40 µg/l zu beachten. Gemäß ÖNORM S-2088-1 (Österreichische Normen 2018) liegt der Maßnahmenswellenwert für Ni im Grundwasser bei 20 µg/l.

## 5. Diskussion und Schlussfolgerung

Der Vergleich der Feldparameter EC und pH zeigt erste überraschende Ergebnisse. Die Gesamtmineralisierung der Grubenwässer ist deutlich, aber nicht dramatisch höher als die der Referenzstationen während pH-Werte in allen Messstellen stets, in einigen Fällen sogar deutlich, über dem neutralen Bereich liegen. Dennoch zeigen die hydrochemischen Daten deutliche Unterschiede zwischen Grubenwasser und Referenzwasser. Dies gilt sowohl für die hydrochemische Signatur als auch für die absoluten Konzentrationen, die im Grubenwasser im Allgemeinen höher sind als an den Referenzstationen. Die insgesamt niedrigen Konzentrationen von Schwermetallen und Metalloiden stehen im Einklang mit den beobachteten alkalischen pH-Werten.

Es wurde nachgewiesen, dass an den Probenahmestellen aller drei Bergwerke Sulfidverwitterung auftritt. Die gemessenen alkalischen pH-Werte lassen sich nur durch effiziente Pufferprozesse im umgebenden Gestein erklären. Diese Hypothese wird durch die berechneten Sättigungsindizes gestützt, die eindeutig zeigen, dass Kalzit- und in noch stärkerem Maße Dolomitlösung die dominierenden Prozesse im hydrochemischen System sind.

Die Grubenwässer Q15 und Q21 mit den Wassertypen Ca-Mg-SO<sub>4</sub> und Na-SO<sub>4</sub> unterscheiden sich massiv von den für die geologische Umgebung zu erwartenden und an allen anderen Stationen beobachteten Ca-Mg-HCO<sub>3</sub>-Wässern. Die SO<sub>4</sub>-Konzentrationen in Q15 und Q21 lassen sich nicht allein durch die Lösung von Evaporiten, z. B. aus den umgebenden mesozoischen Gesteinen, erklären. Die Hauptelementzusammensetzung liefert starke Hinweise auf den Ursprung der erhöhten Sulfatkonzentration in den sulfidischen Erzen, die aufgrund von Bergbauaktivitäten einer erhöhten Verwitterung ausgesetzt waren. Diese Interpretation wird durch die Ergebnisse der Sulfatisotopenanalyse gestützt.

Die vorliegende Studie bietet einen guten Überblick über die bestehenden Grubenwasserabflüsse und die verbleibenden Auswirkungen des Bergbaus auf die Qualität von Quellen und Fließgewässern im UGG „Erz der Alpen“. Ein wichtiges Ergebnis der Studie für die Geopark-Region ist die allgemein geringe Belastung des Grubenwassers mit potenziell ökotoxischen Elementen, die andernfalls eine bisher unbeachtete Umweltgefahr darstellen könnte. Es ist dennoch offensichtlich, dass auch Jahrzehnte nach der Stilllegung der Bergwerke noch ein deutlicher Einfluss des Bergbaus auf das Grubenwasser zu erkennen ist. Während die Auslaugung weitgehend abgeschlossen ist, ist die Sulfidverwitterung im veritzten Gebirge nach wie vor ein relevanter Prozess. Der wichtigste Schlüsselparameter ist die Sulfatkonzentration.

Die Grauwackenzone, das geologische Umfeld der Bergwerke, ist hauptsächlich durch silikatische metamorphe Gesteine gekennzeichnet. Die Mineralisierung selbst ist jedoch mit Karbonatgesteinen assoziiert. Die Auflösung dieser erzgebundenen Karbonate hält den pH-Wert trotz Sulfidoxidation im alkalischen Bereich und verhindert so

die Freisetzung toxischer Metalle über das Grundwasser. Insbesondere die starke Schwankung der Konzentrationen in Q15, die offensichtlich an die Abflussmenge gebunden ist, deutet darauf hin, dass der sogenannte „First Flush“ in den meisten dauerhaft gefluteten Stollenbereichen abgeschlossen ist, während er in temporär gefluteten Stollen noch andauert.

Zu den für diese Studie verwendeten Rohdaten sowie zu weiteren vertiefenden Analysen wird auf den aktuell in Begutachtung befindlichen Artikel von Hauser et al. (2025) verwiesen.

## Referenzen

- [1] Bedoya-Gonzalez D, Kessler T, Rinder T, Hilberg S, Szabó-Krausz Z, Schafmeister M-T (2023) A Multiple Interactive Continua Model (MINC) to Simulate Reactive Mass Transport in a Post-Mining Coal Zone: A Case Study of the Ibbenbüren Westfield. *Mine Water Environ* 42(2):266–292. doi: 10.1007/s10230-023-00938-2
- [2] Erz der Alpen UNESCO Global Geopark (2024) Erz der Alpen UNESCO Global Geopark. <http://geopark-erzderalpen.at/>. Accessed 14 Aug 2024
- [3] Feitzinger G, Günther W, Brunner A (1998) Bergbau- und Hüttenaltstandorte im Bundesland Salzburg, Land Salzburg
- [4] Hauser D, Furtmüller G, Hilberg S (2025) Ore of the Alps – Magnificent geological heritage and potential groundwater hazard, (eingereicht am 04.07.2025 AJES)
- [5] Kessler T, Mugova E, Jasnowski-Peters H, Rinder T, Stemke M, Wolkersdorfer C, Hilberg S, Melchers C, Struckmeier W, Wieber G, Schafmeister M-T (2020) Grundwasser in ehemaligen deutschen Steinkohlenrevieren – ein wissenschaftlicher Blickwinkel auf Grubenflutungen. *Grundwasser - Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie* 25(4):259–272. doi: 10.1007/s00767-020-00460-0
- [6] Pernicka E, Lutz J, Stöllner T (2016) Bronze Age Copper Produced at Mitterberg, Austria, and its Distribution. *archaeologia* 1:19–56. doi: 10.1553/archaeologia100s19
- [7] Pestal G, Hejl E, Braunstingl R., Schuster R (2009) Erläuterungen zur Geologischen Karte Salzburg 1:200.000. Wien :162 S.
- [8] Younger P (1997) The longevity of minewater pollution: a basis for decision-making. *The Science of the total environment* 194-195, 457-466. doi: 10.1016/S0048-9697(96)05383-1

## Adresse der Autoren

*Assoc. Prof. Dr. Sylke Hilberg  
Universität Salzburg  
Fachbereich Umwelt und Biodiversität  
Hellbrunner Str. 34  
5020 Salzburg  
Email: sylke.hilberg@plus.ac.at*

# Der Anteil jungen Wassers am Quellabfluss

S. Seelig<sup>1</sup>, F. Thalheim<sup>2</sup>, M. Seelig<sup>1</sup>, P. Töchterle<sup>2</sup>, M. Vremec<sup>1,3</sup>, M. Masten<sup>1</sup>, H. Briemann<sup>4</sup>, J. Eybl<sup>5</sup>, G. Winkler<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institut für Erdwissenschaften, NAWI Graz Geocenter, Universität Graz, Heinrichstraße 26, AT-8010 Graz; simon.seelig@uni-graz.at

<sup>2</sup>Energieagentur Tirol GmbH, Bürgerstraße 1–3, AT-6020 Innsbruck

<sup>3</sup>Alma Mater Europaea University, Slovenska 17, SI-2000 Maribor

<sup>4</sup>Team Grundwasser, Umweltbundesamt GmbH, Spittelauer Lände 5, AT-1090 Wien

<sup>5</sup>Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Klima- und Umweltschutz, Regionen und Wasserwirtschaft, Marxergasse 2, AT-1030 Wien

## Kurzfassung

Die Verweilzeit des Wassers in alpinen Einzugsgebieten spielt eine tragende Rolle für Abflusssdynamik, Wasserdargebot und Vulnerabilität der Gewässer. Sie stellt die fundamentale Zeitskala hydrologischer und biogeochemischer Prozesse dar und wird durch Speicher-, Transport- und Rückhalteprozesse innerhalb des Einzugsgebiets bestimmt. Da sich Verweilzeitverteilungen an Quellen und Flüssen nicht direkt messen lassen, werden sie üblicherweise aus den saisonalen Schwankungen stabiler Isotope ( $\delta^2\text{H}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ) abgeleitet. Diese erscheinen im Abfluss gedämpft und phasenverschoben gegenüber Niederschlägen und spiegeln Speicher- und Mischprozesse im Einzugsgebiet wider. Ansätze auf Basis mittlerer Verweilzeiten sind jedoch fehleranfällig – insbesondere in alpinen Einzugsgebieten, die in der Regel heterogen aufgebaut sind und sehr rasch auf Niederschlags- oder Schneeschmelzereignisse reagieren. In den letzten zehn Jahren hat sich die junge Wasserkomponente Fyw, die alle Anteile mit einem Alter bis etwa 2–3 Monaten umfasst, als robuster Indikator für die mittlere Verweilzeit im Einzugsgebiet etabliert und wird systematisch in Flüssen ausgewertet. Für Quellen hingegen lagen bisher kaum entsprechende Untersuchungen vor – diese Lücke wird mit der vorliegenden Studie geschlossen.

Zu diesem Zweck wurde Fyw für 468 Quellen der österreichischen Alpen über den Zeitraum 1972–2024 quantifiziert und mit einem eigens kompilierten Datensatz von 499 Flüssen verglichen. Quellabflüsse enthalten im Mittel deutlich geringere Anteile jungen Wassers – 8 % bei gleichgewichteter Zeitbetrachtung und 13 % bei gleichgewichteter Abflussmenge –, da sie ausschließlich aus Grundwasser gespeist werden. Flüsse erhalten zusätzlich direkte Beiträge aus Niederschlag und Oberflächenabfluss, mit entsprechend höherem Fyw von 24 % (zeitgewichtet) bzw. 26 % (abflussgewichtet).

Zugleich führen alpine Flüsse und Bäche insgesamt älteres Wasser als Flüsse im Vorland, was auf die enge Wechselwirkung zwischen Fluss- und Grundwasser zurückzuführen ist. Alpine Flüsse weisen ganzjährlich einen höheren Anteil an Grundwasser auf, dadurch bedingt, dass ein hoher Anteil an Quellwässern diese speist und generell die hydraulischen Gradienten in den umliegenden Aquiferen steil auf den Vorfluter gerichtet sind. Ein erheblicher Teil der Niederschläge wird als Schnee zwischengespeichert, verzögert abgeschmolzen und infiltriert bevorzugt, wodurch die alpinen Grundwasserkörper kontinuierlich gespeist werden. Diese speisen die Quellen und auch Flüsse direkt zeitlich verzögert mit älterem Wasser. Erstmals wird diese Wechselwirkung quantitativ erfasst: Durch die systematische Bestimmung der Anteile jungen Wassers aus Niederschlag und Schneeschmelze in Quellen und

alpinen Flüssen lassen sich deren relative Beiträge präzise gegenüberstellen und die Prozesse der Wasserspeicherung und -zufuhr in Gebirgsflüssen differenziert bewerten.

Diese quantitativen Ergebnisse zeigen, wie sich die Verweilzeiten in Quellen des Gebirges zusammensetzen und warum die Zusammensetzung der Verweilzeiten in alpinen Flüssen von jenen des Alpenvorlands abweicht. Die Bewertung der Anteile jungen Wassers in Quellabflüssen bietet dabei ein einfaches, kosteneffizientes Instrument, um die Vulnerabilität einzuschätzen: Gewässer mit hohem  $F_{yw}$  reagieren empfindlich auf kurzfristige Kontamination, während solche mit geringem  $F_{yw}$  längere Verweilzeiten aufweisen, kurzfristige Belastungen puffern, aber die Persistenz von Schadstoffen verlängern können. Der Anteil jungen Wassers stellt somit eine solide Grundlage für eine nachhaltige Nutzung der Wasserressourcen sowie die Ableitung gezielter Schutzstrategien dar.

### **Abstract**

*Water residence time in alpine catchments is a key factor controlling runoff dynamics, water availability, and stream vulnerability. Because residence time distributions cannot be measured directly, they are commonly inferred from seasonal variations in stable isotopes ( $\delta^2\text{H}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ), which appear damped and phase-shifted in streamflow relative to precipitation. Approaches based on mean residence times are prone to aggregation errors, particularly in heterogeneous alpine catchments that respond rapidly to rainfall or snowmelt. Over the past decade, the young water fraction ( $F_{yw}$ ), representing water younger than ~2–3 months, has emerged as a robust indicator and is now systematically applied in rivers. In contrast, comparable studies and reference datasets for springs have been largely lacking.*

*We quantified  $F_{yw}$  for 766 isotope time series from 458 sampled springs across the Austrian Alps. The proportion of young water varies with aquifer properties and prevailing hydrological conditions and is generally low in most springs (mean 7%). Karst and talus springs tend to exhibit slightly higher  $F_{yw}$ , whereas fractured-rock and fine-grained valley-sediment springs show lower values. During periods of high discharge, the fraction of young water often increases as different flow paths within the aquifer are activated. Compared to rivers, whose  $F_{yw}$  was derived from a compiled dataset of 565 catchments, spring outflows exhibit substantially lower fractions of young water, reflecting their exclusive reliance on groundwater. Rivers additionally receive direct contributions from precipitation, surface runoff, and subsurface stormflow, resulting in correspondingly higher  $F_{yw}$  values.*

*Assessing the young water fraction in spring discharge provides a first, straightforward, and cost-efficient approximation for evaluating vulnerability: springs with high  $F_{yw}$  respond rapidly to short-term contamination, whereas springs with low  $F_{yw}$  buffer transient inputs but may prolong the persistence of pollutants. Thus, the young water fraction offers a solid basis for sustainable water resource management and the design of targeted protection strategies.*

## 1. Einleitung

Die Verweilzeit des Wassers in alpinen Einzugsgebieten spielt eine entscheidende Rolle für Abflussdynamik, Wasserdargebot und Vulnerabilität der Gewässer (Gleeson et al., 2016; Sprenger et al., 2019). Sie stellt die fundamentale Zeitskala hydrologischer und biogeochemischer Prozesse dar und wird durch Speicher-, Transport- und Rückhalteprozesse innerhalb des Einzugsgebiets bestimmt (McGuire und McDonnell, 2006; McDonnell et al., 2010). Da sich Verweilzeiten an Quellen und Flüssen nicht direkt messen lassen, werden sie üblicherweise aus den saisonalen Schwankungen stabiler Isotope ( $\delta^2\text{H}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ) abgeleitet. Diese erscheinen im Abfluss gedämpft und phasenverschoben gegenüber Niederschlägen und spiegeln Speicher- und Mischungsprozesse im Einzugsgebiet wider (Leibundgut et al., 2009; Jasechko, 2019). Längere Verweilzeiten führen dabei zu einer stärkeren Dämpfung der Jahresgänge und das Verhältnis der Schwankungsbreiten kann unter Annahme einer Verteilungsfunktion zur Abschätzung der mittleren Verweilzeit herangezogen werden (Maloszewski und Zuber, 1982; Maloszewski et al., 1996). Jüngere Untersuchungen zeigen jedoch, dass Berechnungen der mittleren Verweilzeit bei Einzugsgebieten mit realistischer räumlicher Heterogenität typischerweise um mehrere hundert Prozent vom tatsächlichen Wert abweichen können (Kirchner, 2016a,b). Dieser Aggregationsfehler resultiert aus der nichtlinearen Beziehung zwischen der Amplitude der Jahresgänge und der mittleren Verweilzeit im Einzugsgebiet. Ansätze auf Basis mittlerer Verweilzeiten sind daher fehleranfällig – insbesondere in alpinen Einzugsgebieten, die in der Regel heterogen aufgebaut sind und sehr rasch auf Niederschlags- oder Schneeschmelzereignisse reagieren.

In den letzten zehn Jahren hat sich die junge Abflusskomponente  $F_{yw}$ , welche den Wasseranteil mit einem Alter bis etwa 2–3 Monaten umfasst, als robuster Indikator für die Verweilzeit im Einzugsgebiet etabliert (Kirchner, 2016a,b). Seit der Einführung dieses Konzepts standen überwiegend Fließgewässer im Fokus der Forschung, während junge Wasseranteile in Quellwässern – trotz ihrer zentralen Bedeutung in alpinen Einzugsgebieten – bislang nur vereinzelt und ausschließlich an Karstquellen auf Basis von Fallstudien mit zwei bis acht Quellen untersucht wurden (Garvelmann et al., 2017; Rusjan et al., 2019; Çalli et al., 2023). Um erstmals eine umfassende Datenbasis für Quellwässer zu schaffen, analysiert die vorliegende Studie daher den Anteil jungen Wassers an 458 österreichischen Quellen (Abb. 1). Dieser Artikel gibt einen Auszug der wichtigsten Studienergebnisse, die vollumfänglich im Rahmen eines gegenwärtig in Begutachtung befindlichen Artikels dargelegt werden (Seelig et al., in Begutachtung).

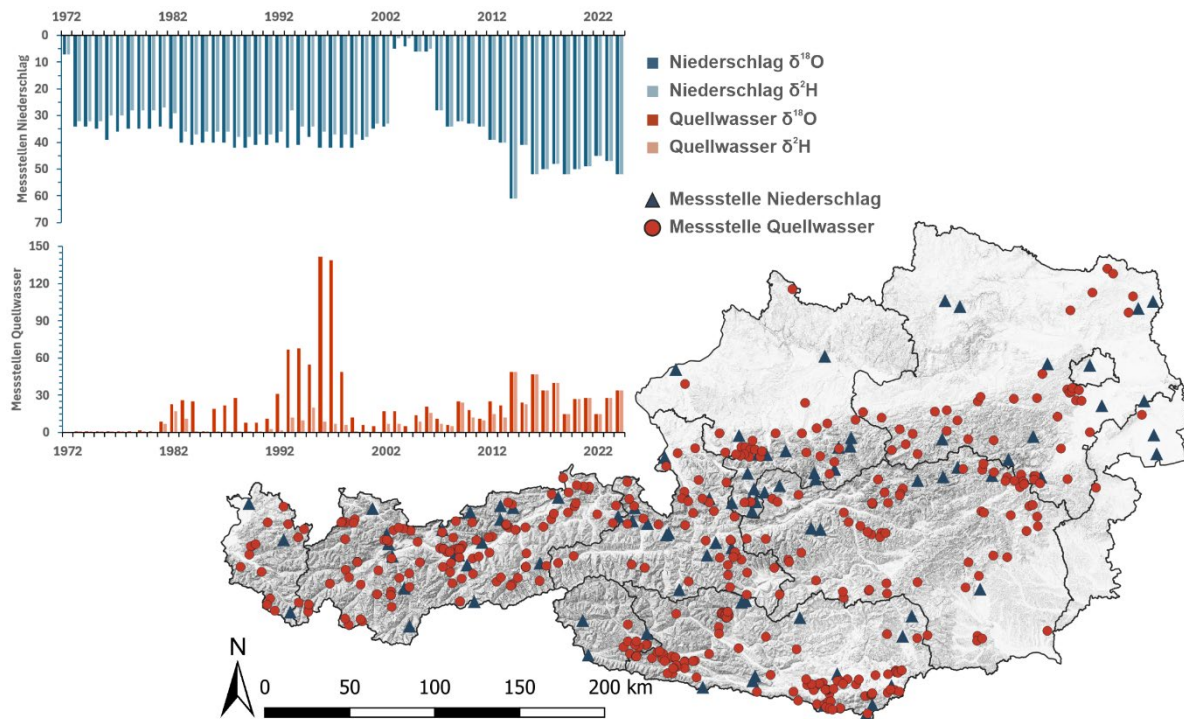


Abb. 1: Räumliche und zeitliche Verteilung der untersuchten Isotopen-Zeitreihen in Österreich. Gezeigt sind 468 Quellen (rote Punkte) und 91 Niederschlagsstationen (blaue Dreiecke). Der Untersuchungszeitraum erstreckt sich über mehr als fünf Jahrzehnte (1972–2025), wobei die Anzahl der erhobenen Zeitreihen pro Jahr variiert. Modifiziert nach Seelig et al. (in Begutachtung).

Zu diesem Zweck wurden 549  $\delta^{18}\text{O}$ - und 217  $\delta^2\text{H}$ -Messzeitreihen im Abfluss dieser Quellen kompiliert, die einen Zeitraum von über fünf Jahrzehnten umfassen (1972 – 2024). Die zusammengestellten Quellwasserdaten beinhalten 2943 Analysen von Wasserstoff- und 7848 Analysen von Sauerstoffisotopen. Die einzelnen Zeitreihen erstrecken sich über 1 – 21 Jahre, wobei die Anzahl der beprobten Quellen im Zeitverlauf sowie zwischen Wasserstoff- und Sauerstoffisotopen variiert (Abb. 1). Für einige Quellen sind mehrere Zeitreihen enthalten, um unterschiedliche Erhebungszeiträume abzubilden – daher übersteigt die Anzahl insgesamt analysierter Zeitreihen (766) jene an Quellen (458). Soweit möglich wurden die Quellen in Anlehnung an BMLFUW (2005) nach Aquifer-Eigenschaften klassifiziert, mit insgesamt 81 Karstquellen, 92 Kluftquellen, 80 Hangschuttquellen und 39 Quellen aus feinkörnigen Talsedimenten (Alluvialquellen); die verbleibenden 166 Quellen konnten nicht eindeutig klassifiziert werden. Für etwa zwei Drittel der Quellen (318) liegen Abflussdaten vor, davon 203 mit Abflussmessungen während der Beprobung und 115 mit kontinuierlichen Zeitreihen zur Ergänzung der Isotopendaten.

Die saisonale Schwankung der Isotopensignatur im Abfluss dieser Quellen wurde jener im Niederschlag gegenübergestellt. Dazu wurden insgesamt 20738 Wasserstoff- und 22549 Sauerstoffs Signaturen des Niederschlags von 91 Stationen des Österreichischen Isotopennetzwerks ausgewertet (Austrian Network for Isotopes in Precipitation, ANIP). Für eine Niederschlagsgewichtung der Isotopenzeitreihen wurden monatliche Niederschlagssummen jeder Station aus dem SPARTACUS-Datensatz (Spatiotemporal Reanalysis Dataset for Climate in Austria; Hiebl und Frei, 2018) abgeleitet.

Zum Vergleich der jungen Wasseranteile in Quell- und Fließgewässern wurde ein globaler Datensatz junger Abflusskomponenten in Flüssen erstellt. Von den 565 analysierten Flüssen liegen 151 in Gebirgsregionen (Alpen, Anden, Hengduan Shan, Pyrenäen, Rocky Mountains, Sierra Nevada und Tibetisches Plateau).

## 2. Methoden

Die Isotopensignatur von Niederschlags- und Quellwasser folgt einem saisonalen Zyklus, der sich näherungsweise beschreiben lässt durch (Maloszewski und Zuber, 1996; McGuire und McDonnell, 2006):

$$c_N(t) = A_N \sin(2\pi ft - \varphi_N) + k_N \quad [1]$$

$$c_Q(t) = A_Q \sin(2\pi ft - \varphi_Q) + k_Q \quad [2]$$

mit  $c_N$  und  $c_Q$  als Isotopensignatur des Niederschlags- bzw. Quellwassers [‰],  $A_N$  bzw.  $A_Q$  als Amplitude der saisonalen Schwankung der Isotopensignatur [‰], Frequenz  $f$  [Jahre<sup>-1</sup>], Zeit  $t$  [Jahre], Phasenverschiebung  $\varphi_N$  bzw.  $\varphi_Q$  [-] und mittlerer Isotopensignatur  $k_N$  bzw.  $k_Q$  [‰]. Die Amplituden in Gl. 1 und 2 werden mittels multipler Regression bestimmt, anhand des robusten Iteratively Re-Weighted Least Squares (IRLS) Verfahrens (Kirchner, 2016a,b). Anhand dieser Amplituden wird die junge Abflusskomponente  $F_{yw}$  [-] berechnet aus:

$$F_{yw} = \frac{A_Q}{A_N} \quad [3]$$

Dies ermöglicht die Abschätzung des Anteils an Wasser, das jünger als 2–3 Monate ist. Zu diesem Zweck wird jeder Quelle die nächstgelegene ANIP-Station zugeordnet, die höchstens 15 % fehlender Monatsdaten während des Quell-Beprobungszeitraums aufweist. Dieser Schwellenwert wurde anhand einer einfachen Sensitivitätsanalyse ermittelt. Niederschlagsisotope in der IRLS-Regression wurden nach SPARTACUS-Niederschlagsvolumen gewichtet (IAEA, 1992; Hughes und Crawford, 2012). Für Quellwasserdaten wurden Berechnungen sowohl mit als auch ohne Abfluss-Gewichtung durchgeführt, da die Abfluss-gewichtete junge Abflusskomponente ( $F_{yw}^*$ , entspricht dem Anteil des jungen Wasservolumens am Gesamtabfluss) typischerweise höher ausfällt als die ungewichtete junge Abflusskomponente ( $F_{yw}$ , entspricht dem mittleren Anteil jungen Wassers über die Zeit) (von Freyberg et al., 2018; Gallart et al., 2020).

Die Unsicherheit von  $F_{yw}$  und  $F_{yw}^*$  wurde mittels Gaußscher Fehlerfortpflanzung auf Basis der Regressionsstandardfehler quantifiziert. Die Güte der IRLS-Anpassung wurde durch den adjustierten Bestimmtheitsmaß ( $R^2_{adj}$ ) bewertet, wobei die Methode bei mittleren Werten unter 0,2 unzuverlässige Ergebnisse liefert (Stockinger et al., 2019), die in der vorliegenden Studie daher verworfen wurden. Der Einfluss unterschiedlicher Zeitreihenlänge, Stichprobengröße und saisonaler Variabilität auf die errechneten  $F_{yw}$ -Werte wurde mittels Bootstrapping-Analysen untersucht. Um mögliche langfristige Schwankungen der jungen Wasseranteile zu prüfen, wurden alle Berechnungen mit gleitenden Zeitfenstern von ein bis drei Jahren Länge wiederholt, die monatlich verschoben wurden (Stockinger et al., 2019; Stockinger und Stumpp, 2024; Xia et al., 2024). Die zeitabhängigen  $F_{yw}$  und  $F_{yw}^*$ -Werte wurden für jede Quelle mit der Unsicherheit der gesamten Zeitreihe verglichen. Quellen wurden als zeitinvariant eingestuft, wenn über 90 % der zeitvariablen  $F_{yw}$ -Werte innerhalb des Unsicherheitsbereichs der aus der gesamten Zeitreihe berechneten  $F_{yw}$ -Werte ( $\pm$  Standardfehler) lagen (Stockinger et al., 2019). Stärkere Abweichungen

deuteten hingegen auf Veränderungen der Fließpfade oder auf zeitliche Schwankungen in deren relativen Anteilen hin.

Um zu bewerten, inwiefern der Anteil jungen Wassers von den vorherrschenden Abflussbedingungen abhängt, wurde die Sensitivität  $S_Q$  [-] der jungen Abflusskomponente berechnet. In Anlehnung an von Freyberg et al. (2018) wurde eine lineare Abhängigkeit der Amplitude  $A_Q$  vom herrschenden Abfluss angenommen, Substitution in Gl. 2 ergibt:

$$c_Q(t) = (\beta_0 + \beta_1 Q') \sin(2\pi f t - \varphi_Q) + k_Q \quad [4]$$

wobei  $\beta_0$  und  $\beta_1$  Achsenabschnitt und Steigung darstellen, während  $Q'$  den Quellabfluss, normiert auf das langjährige Mittel, darstellt. Durch nichtlineare Anpassung mittels Newton–Raphson-Verfahren werden die Parameter in Gl. 4 bestimmt, die Sensitivität  $S_Q$  der jungen Abflusskomponente ergibt sich daraus (von Freyberg et al., 2018):

$$S_Q = \frac{\beta_1}{A_N} \quad [5]$$

Auf diese Weise ergibt sich  $S_Q$  als dimensionslose Kennzahl, die den prozentualen Anstieg von  $F_{yw}$  pro prozentua-lem Anstieg der Quellschüttung angibt. Hohe  $S_Q$  Werte zeigen, dass junge Wasseranteile stark zwischen Niedrig- und Hochwasser variieren, d. h. eine Verschiebung der relativen Anteile schneller und langsamer Fließpfade auftritt. Dagegen deuten niedrige  $S_Q$  Werte auf konstante Fließwege hin, die kaum von den vorherrschenden hydrologischen Bedingungen beeinflusst werden. Alle Berechnungen wurden in R 4.5.1 durchgeführt (R Core Team, 2025).

### 3. Ergebnisse

Der Anteil jungen Wassers am Quellabfluss ist tendenziell gering, mit entsprechend langen Verweilzeiten im dahinter liegenden Aquifer. Von den 549 analysierten  $\delta^{18}\text{O}$ -Zeitreihen erfüllten 431 die Kriterien für akzeptable Modellgüte. Die daraus berechneten jungen Abflusskomponenten  $F_{yw}$  weisen einen Median von 0,03 und einen Mittelwert von 0,07 auf (Abb. 2). Die Auswertung der  $\delta^2\text{H}$ -Zeitreihen bestätigt diese Ergebnisse (Unterschiede insignifikant, belegt durch Rangsummentest  $p$ -Werte  $> 0,1$ ). Die Zeitfenster- und Bootstrapanalysen belegen die Robustheit von  $F_{yw}$ , mit konsistenten Ergebnissen über alle Fensterlängen und die Gesamtzeitreihe hinweg. Zwischen 85 und 91 % der Quellen zeigen zeitinvariante Werte, was auf stabile Fließpfadanteile hinweist. Der mittlere Standardfehler beträgt  $\pm 0,02$ , der mittlere  $R^2_{adj}$  liegt bei 0,56. Betrachtet man alle Quellen zusammen, wird ihr Abfluss demnach überwiegend ( $> 90$  %) von Wasser gespeist, das älter als 2–3 Monate ist.

Die Abfluss-gewichtete junge Abflusskomponente  $F_{yw}^*$  ist ähnlich verteilt, weist jedoch tendenziell etwas höhere Anteile auf (Abb. 2; Median 0,04, Mittelwert 0,09). Die gegenüber  $F_{yw}$  erhöhten  $F_{yw}^*$  Werte zeigen einen größeren Anteil jungen Wassers an Abflussspitzen an: Unmittelbar nach Niederschlagsereignissen sowie während der Schneeschmelze führen die meisten Quellen mehr Wasser, und der Beitrag jungen Wassers an diesen Abflusser-eignissen ist überdurchschnittlich hoch. In hydraulisch stark angeregten Aquiferen verschieben sich demnach die relativen Beiträge der unterschiedlichen Fließpfade, hin zu einem höheren Beitrag rascher Pfade. Der mittlere Standardfehler beträgt  $\pm 0,03$ , der mittlere  $R^2_{adj}$  liegt bei 0,59. Die starke Korrelation ( $r = 0,85$ ,  $p$ -Wert  $= < 10^{-10}$ )

zwischen  $F_{yw}$  und  $F_{yw}^*$  zeigt, dass beide Kenngrößen ähnlich verteilt sind – die nachfolgenden Ausführungen beschränken sich daher aus Gründen der Übersichtlichkeit auf  $F_{yw}$ .

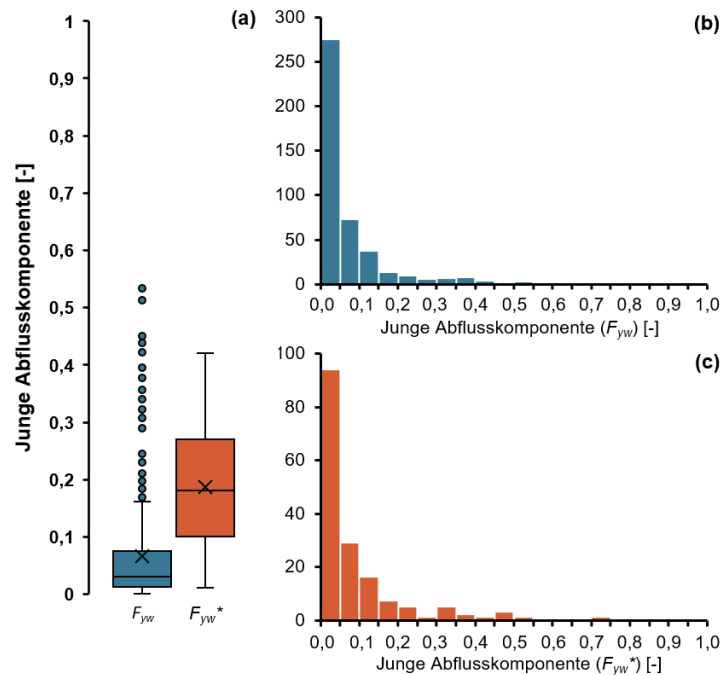


Abb. 2: Verteilung der Zeit-gewichteten jungen Abflusskomponente ( $F_{yw}$ ) des Quellabflusses (blau) gegenüber der Abfluss-gewichteten jungen Abflusskomponente ( $F_{yw}^*$ ). Boxplots zum direkten Vergleich der Verteilungen, Histogramme zur Verdeutlichung der Verteilungsstruktur. Modifiziert nach Seelig et al. (in Begutachtung).

Werden die Quellen getrennt nach Aquifer-Eigenschaften betrachtet, ergeben sich deutliche Unterschiede hinsichtlich des Beitrags jungen Wassers (Abb. 3): Am deutlichsten treten Karstquellen hervor, die sich sowohl durch insgesamt höhere Anteile jungen Wassers als auch durch starke Schwankungen derselben von Quelle zu Quelle auszeichnen ( $F_{yw}$  Mittelwert 0,14). Dies spiegelt die Struktur verkarsteter Grundwasserleiter wider, in denen bevorzugte Fließpfade entlang von Karstgängen und Höhlen ausgebildet sind, mit entsprechend höherem Anteil jungen Wassers am Quellabfluss (Ford und Williams, 2007; Lauber und Goldscheider, 2014). Zugleich stellen sie mitunter beträchtliches Speicherpotenzial in feinen Kluftnetzen und Porenräumen zur Verfügung (Maloszewski et al., 1992, 2002). Struktur und Verkarstungsgrad dieser Grundwasserleiter haben einen besonders starken Einfluss auf die Verweilzeiten im Untergrund, mit entsprechend starker Schwankung zwischen den einzelnen Quellen.

Die als Hangschuttquellen zusammengefasst Gruppe nimmt eine Mittelstellung ein (Abb. 3). Der  $F_{yw}$  Mittelwert liegt bei 0,07. Diese Quellgruppe umfasst neben Hangschutfächern im engeren Sinne auch Grundwasserleiter in Blockgletschern und Moränen, die durch ein Zusammenspiel einer schnellen und einer langsamen Fließkomponente gekennzeichnet sind (Winkler et al., 2018; Jones et al., 2019; Hayashi, 2020). Ihr Schuttmaterial bietet einerseits Porenspeicherraum, der die Verweilzeiten verlängert, während die steile Topographie und die hohen hydraulischen Gradienten eine relativ schnelle Entwässerung fördern. Die mitunter hohen

Fließgeschwindigkeiten entlang bevorzugter Fließwege bringen einen (begrenzten) Teil des Wassers daher relativ rasch zur Quelle.

Kluftquellen zeigen insgesamt niedrige  $F_{yw}$ -Werte (Abb. 3), mit einem Mittelwert von 0,04. In spärlich oder schlecht vernetzten Kluftnetzwerken dominiert die Speicherkapazität, sodass Verweilzeiten lang sind. Die effektive Durchlässigkeit einzelner Klüfte wird durch Engstellen begrenzt, während die Gebirgsdurchlässigkeit von der Vernetzung und Durchgängigkeit des gesamten Kluftsystems abhängt. Dadurch ergeben sich die insgesamt tendenziell niedrige Anteile jungen Wassers am Quellabfluss.

Die Gruppe an Quellen, die überwiegend feinkörnige Talsedimente entwässern, weist tendenziell die niedrigsten Anteile jungen Wassers auf (Abb. 3,  $F_{yw}$ -Mittelwert 0,04). Diese Grundwasserleiter bieten typischerweise größere Porenspeicher und treten unter flacheren hydraulischen Gradienten auf, was zu längeren Verweilzeiten und geringen Anteilen jungen Wassers führt.

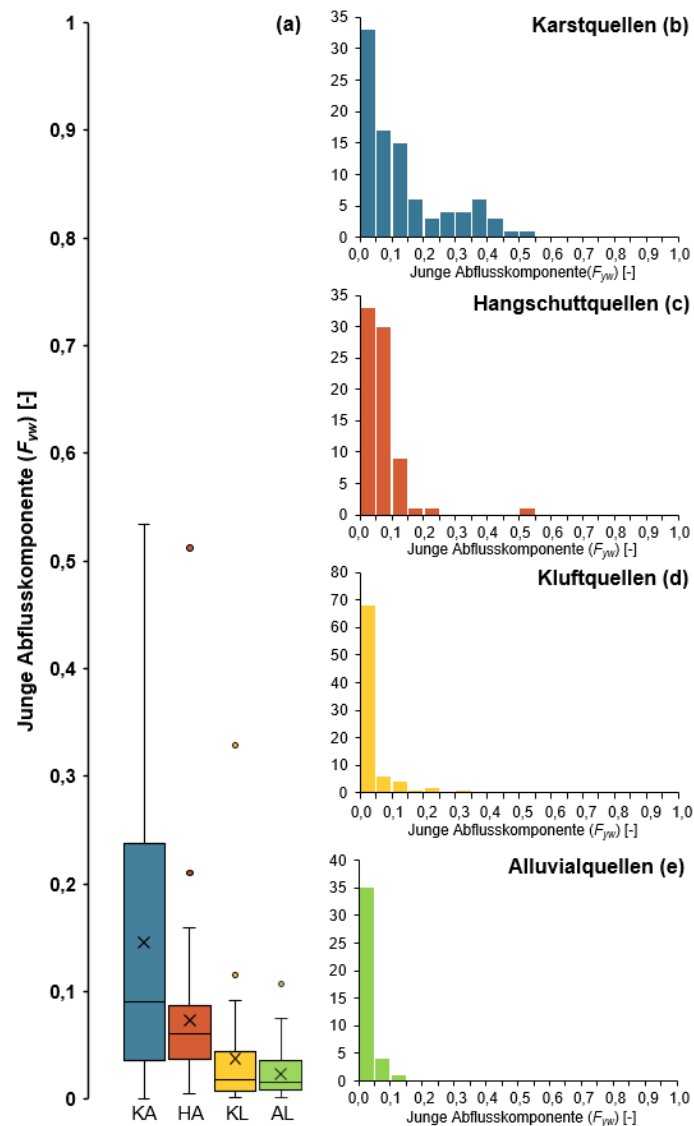


Abb. 3: Verteilung der jungen Abflusskomponente ( $F_{yw}$ ) des Quellabflusses, differenziert nach entwässertem Grundwasserleiter. Boxplots zum direkten Vergleich der Verteilungen, Histogramme zur Verdeutlichung der Verteilungsstruktur. Modifiziert nach Seelig et al. (in Begutachtung).

Die Sensitivität  $S_Q$  der jungen Abflusskomponente weist eine breite Streuung auf, bei einem Mittelwert von 0,08 (Abb. 4). Insgesamt betrachtet – über alle Quellen und Zeitreihen – bedeutet dies: Verdoppelt sich der Quellabfluss, steigt der junge Wasseranteil im Mittel um 8 %. Hohe Abflüsse enthalten mehr junges Wasser, da schnellen Fließpfaden während starker Niederschlagsereignisse oder intensiver Schneeschmelze eine besonders tragende Rolle zukommt. Wie stark sich die relativen Beiträge dieser unterschiedlichen Fließpfade bei hydraulischer Anregung verschieben, hängt jedoch von der Struktur der Grundwasserleiter ab (Abb. 4): Karstquellen weisen häufig eine hohe Sensitivität auf die vorherrschenden Abflussbedingungen auf, da in ihren zugehörigen Aquiferen bei starkem Wasserandrang sukzessive neue Karströhren und Hohlräume als Fließwege aktiviert werden können (Kübeck et al., 2013; Mayaud et al., 2014). Hangschuttquellen nehmen wiederum eine Mittelstellung ein, da auch hier bevorzugte Fließpfade eine zentrale Rolle spielen, wie etwa an Blockgletscherquellen aufgezeigt wurde (Seelig et al., 2025a,b). Kluftquellen weisen eine vergleichsweise geringe Sensitivität gegenüber den vorherrschenden Abflussbedingungen auf. Jene Quellen, die feinkörnige Talsedimente entwässern, zeigen eine breite Spanne an  $S_Q$ -Werten – die starke Heterogenität und die hydraulischen Wechselwirkungen zwischen Grund- und Oberflächenwasser in vielen alpinen Tälern führen hier zu komplexen Mustern, die stark von den lokalen Gegebenheiten abhängen (Rosenshein, 1988; Sharp, 1988; Somers und McKenzie, 2020).

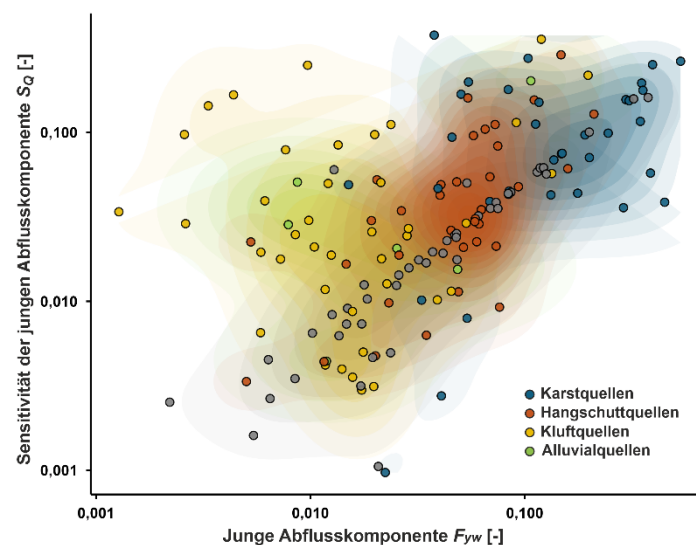


Abb. 4: Sensitivität  $S_Q$  der jungen Abflusskomponente je nach entwässertem Aquifertyp. Schwerpunkte der Verteilungen sind im Hintergrund als Kerndichteschätzer dargestellt. Modifiziert nach Seelig et al. (in Begutachtung).

Der Vergleich der jungen Abflusskomponenten von Quell- und Flusswasser zeigt deutlich geringere Anteile in Quellen (Abb. 5). Beschränkt man den Vergleich auf Gebirgsflüsse, ergibt sich ein ähnliches Bild. Auch die Verteilungsformen von  $F_{yw}$  in Quellen und Flüssen unterscheiden sich deutlich: Während viele Quellen niedrige junge Wasseranteile aufweisen und nur wenige deutlich höhere Werte erreichen, weisen Flüsse eine gleichmäßigere Verteilung an  $F_{yw}$ -Werten auf (Abb. 5). Anders als Quellen, die ausschließlich von unterirdischen Fließwegen gespeist werden, erhalten Flüsse Wasser rasch über Oberflächenabfluss, Zwischenabfluss (Hangzugswasser) oder direkten Niederschlag, was tendenziell höhere Anteile jungen Wassers bewirkt (Berghuijs und und Kirchner, 2017). Zugleich

führen alpine Flüsse und Bäche insgesamt weniger junges Wasser als Flüsse im Vorland, was auf die enge Wechselwirkung zwischen Fluss- und Grundwasser zurückzuführen ist. Alpine Flüsse weisen ganzjährlich einen höheren Anteil an Grundwasser auf, dadurch bedingt, dass ein hoher Anteil an Quellwässern diese speist und generell die hydraulischen Gradienten in den umliegenden Aquiferen steil auf den Vorfluter gerichtet sind (Jasechko et al., 2016; Somers und McKenzie, 2020; Gentile et al., 2023). Erstmals wird diese Wechselwirkung quantitativ erfasst: Durch die systematische Bestimmung junger Abflusskomponenten in Quellen und Flüssen lassen sich deren relative Beiträge gegenüberstellen und differenziert bewerten.

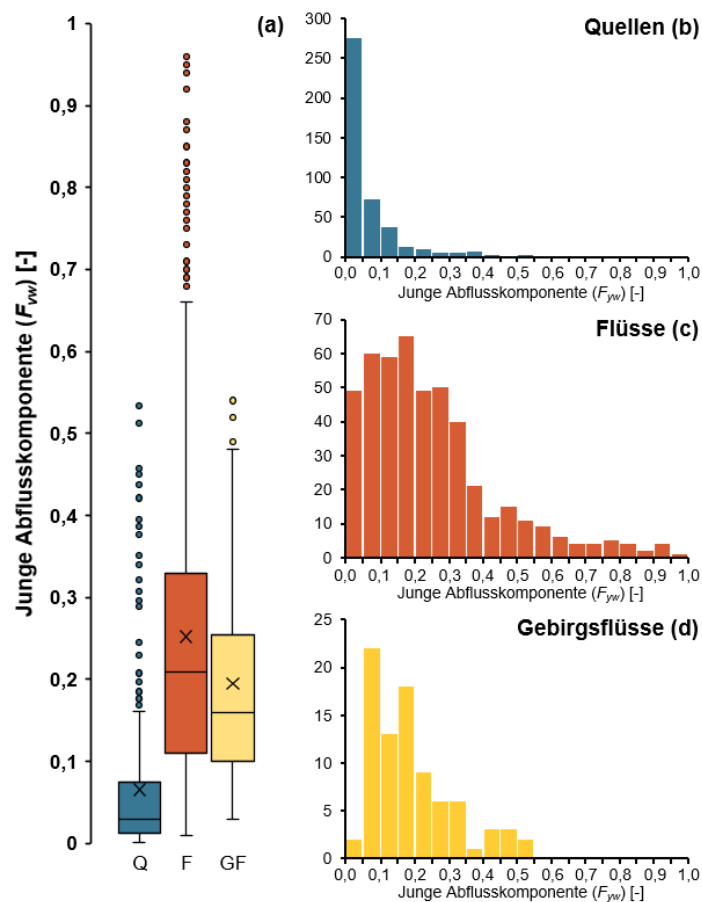


Abb. 5: Verteilung der jungen Abflusskomponente ( $F_{yw}$ ) in Quellen (blau) gegenüber Auswertungen von Flüssen weltweit (orange). Gebirgsflüsse (gelb) sind gesondert ausgewiesen. Modifiziert nach Seelig et al. (in Begutachtung).

Die Vulnerabilität von Quellen und ihre Eignung als nachhaltige Wasserressource werden wesentlich durch die Verweilzeit und den Anteil jungen Wassers bestimmt. Quellen mit hohem  $F_{yw}$  reagieren empfindlich auf Verunreinigungen im Einzugsgebiet, während solche mit geringem  $F_{yw}$  längere Verweilzeiten aufweisen, kurzfristige Belastungen puffern, aber die Persistenz von Schadstoffen verlängern können (Jasechko et al., 2016; Musgrove et al., 2023). Die Bewertung der Anteile jungen Wassers in Quellabflüssen bietet daher ein einfaches, kosteneffizientes Instrument, um die Vulnerabilität grob einzuschätzen. Der Anteil jungen Wassers stellt somit eine Grundlage für eine nachhaltige Nutzung der Wasserressourcen sowie die Ableitung gezielter Schutzstrategien dar.

#### 4. Schlussfolgerungen

Um den Anteil jungen Wassers (< 2–3 Monate) in Quellwässern der österreichischen Alpen zu untersuchen, wurde ein umfassender Datensatz von 766 Isotopen-Zeitreihen von 458 beprobten Quellen mit unterschiedlichen hydrogeologischen Bedingungen zusammengestellt und die junge Abflusskomponente ( $F_{yw}$ ) berechnet. Der genaue Anteil jungen Wassers variiert dabei in Abhängigkeit von den Eigenschaften des Aquifers und den aktuellen hydrologischen Bedingungen. Quellen zeichnen sich im Allgemeinen durch geringe Anteile jungen Wassers aus (Median 0,03; Mittelwert 0,07). Eine Abfluss-Gewichtung der Isotopendaten führt zu leicht  $F_{yw}$ -Schätzungen, da unmittelbar nach Niederschlagsereignissen und während der Schneeschmelze der Abfluss vieler Quellen steigt und der Anteil jungen Wassers bei diesen Ereignissen überdurchschnittlich hoch ist. Beide Ansätze zeigen ähnliche Verteilungen, wobei die meisten Quellen von älterem Wasser dominiert werden, während nur wenige Quellen – hauptsächlich Karstquellen – höhere Anteile an jungem Wasser aufweisen, bedingt durch den schnellen Transport über bevorzugte Fließpfade.

Der Vergleich mit Flüssen, die stärker von Oberflächenabfluss und direktem Niederschlag beeinflusst werden, zeigt, dass Quellen konsistent geringere Anteile jungen Wassers enthalten. Dieses Muster zeigt sich auch gegenüber Gebirgsflüssen, die im Allgemeinen niedrigere  $F_{yw}$ -Werte als Flüsse im Flachland aufweisen. Die in der vorliegenden Studie dargelegte Zusammenstellung von  $F_{yw}$  in Quellen mit unterschiedlichsten topographischen, klimatischen, und hydrogeologischen Gegebenheiten im gesamten Bundesgebiet und über mehr als fünf Jahrzehnte bestimmt, bildet eine Grundlage für vergleichende Bewertungen von Quellwasseraltern, deren Beitrag zu Flüssen und den zugrunde liegenden hydrologischen Prozessen.

Darüber hinaus bietet die Bestimmung von  $F_{yw}$  in Quellabflüssen ein einfaches und kostengünstiges Instrument zur ersten Einschätzung der Vulnerabilität: Quellen mit hohem  $F_{yw}$  enthalten einen großen Anteil kürzlich infiltrierten Wassers und reagieren empfindlicher auf kurzfristige Kontaminationen durch Oberflächenaktivitäten. Quellen, die von älterem Wasser dominiert werden (niedriges  $F_{yw}$ ), weisen längere Verweilzeiten auf, was kurzfristige Belastungen puffert, jedoch die Persistenz von Schadstoffen im System verlängern kann. Dementsprechend stellt die junge Abflusskomponente einen wertvollen Indikator für den gezielten Schutz und die Überwachung alpiner Grundwasserressourcen dar.

#### 5. Danksagung

Wir danken DI Markus Federspiel und DI<sup>n</sup> Sybille Glöckner (Amt der Tiroler Landesregierung) sowie Dr. Ralf Benischke für ihre Unterstützung bei der Datenkompilation und für wertvolle fachliche Anregungen.

## Referenzen

- [1] Berghuijs, W. R.; Kirchner, J. W. (2017): The relationship between contrasting ages of groundwater and streamflow. *Geophys. Res. Lett.* 44 (17), 8925–8935. DOI: 10.1002/2017GL074962.
- [2] Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW) (Hg.) (2005): Quellbeobachtung im Hydrographischen Dienst in Österreich. Mitteilungen des Hydrographischen Zentralbüros, 70. Wien.
- [3] Çalli, K. Ö.; Bittner, D.; Liu, Y.; Çalli, S. S.; Melsen, L. A.; Bense, V.; Hartmann, A. (2023): Revealing the positive influence of young water fractions derived from stable isotopes on the robustness of karst water resources predictions. *Journal of Hydrology* 621 (11), 129549. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.129549.
- [4] Ford, D.; Williams, P. W. (2007): *Karst hydrogeology and geomorphology*, Chichester, England, A Hoboken, NJ, John Wiley & Sons.
- [5] Gallart, F.; Freyberg, J. von; Valiente, M.; Kirchner, J. W.; Llorens, P.; Latron, J. (2020): Technical note. An improved discharge sensitivity metric for young water fractions. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 24 (3), 1101–1107. DOI: 10.5194/hess-24-1101-2020.
- [6] Garvelmann, J.; Warscher, M.; Leonhardt, G.; Franz, H.; Lotz, A.; Kunstmann, H. (2017): Quantification and characterization of the dynamics of spring and stream water systems in the Berchtesgaden Alps with a long-term stable isotope dataset. *Environ Earth Sci* 76 (22), 41. DOI: 10.1007/s12665-017-7107-6.
- [7] Gentile, A.; Canone, D.; Ceperley, N.; Gisolo, D.; Previati, M.; Zuecco, G.; Schaeffli, B.; Ferraris, S. (2023): Towards a conceptualization of the hydrological processes behind changes of young water fraction with elevation. A focus on mountainous alpine catchments. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 27 (12), 2301–2323. DOI: 10.5194/hess-27-2301-2023.
- [8] Gleeson, T.; Befus, K. M.; Jasechko, S.; Luijendijk, E.; Cardenas, M. B. (2016): The global volume and distribution of modern groundwater. *Nature Geosci* 9 (2), 161–167. DOI: 10.1038/ngeo2590.
- [9] Hayashi, M. (2020): Alpine Hydrogeology. The Critical Role of Groundwater in Sourcing the Headwaters of the World. *Ground Water* 58 (4), 498–510. DOI: 10.1111/gwat.12965.
- [10] Hiebl, J.; Frei, C. (2018): Daily precipitation grids for Austria since 1961—development and evaluation of a spatial dataset for hydroclimatic monitoring and modelling. *Theor Appl Climatol* 132 (1-2), 327–345. DOI: 10.1007/s00704-017-2093-x.
- [11] Hughes, C. E.; Crawford, J. (2012): A new precipitation weighted method for determining the meteoric water line for hydrological applications demonstrated using Australian and global GNIP data. *Journal of Hydrology* 464-465 (1), 344–351. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2012.07.029.
- [12] International Atomic Energy Agency (IAEA) (Hg.) (1992): *Statistical Treatment of Data on Environmental Isotopes in Precipitation*, Wien (Technical Report Series, 331).
- [13] Jasechko, S.; Kirchner, J. W.; Welker, J. M.; McDonnell, J. J. (2016): Substantial proportion of global streamflow less than three months old. *Nature Geosci* 9 (2), 126–129. DOI: 10.1038/ngeo2636.
- [14] Jasechko, S. (2019): Global Isotope Hydrogeology—Review. *Rev. Geophys.* 57 (3), 835–965. DOI: 10.1029/2018RG000627.
- [15] Jones, D. B.; Harrison, S.; Anderson, K.; Whalley, W. B. (2019): Rock glaciers and mountain hydrology. A review. *Earth-Sci. Rev.* 193, 66–90. DOI: 10.1016/j.earscirev.2019.04.001.
- [16] Kirchner, J. W. (2016): Aggregation in environmental systems – Part 1. Seasonal tracer cycles quantify young water fractions, but not mean transit times, in spatially heterogeneous catchments. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 20 (1), 279–297. DOI: 10.5194/hess-20-279-2016.
- [17] Kirchner, J. W. (2016): Aggregation in environmental systems – Part 2. Catchment mean transit times and young water fractions under hydrologic nonstationarity. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 20 (1), 299–328. DOI: 10.5194/hess-20-299-2016.
- [18] Krainer, K.; Mostler, W. (2002): Hydrology of Active Rock Glaciers. Examples from the Austrian Alps. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* 34 (2), 142–149. DOI: 10.1080/15230430.2002.12003478.

- [19] Kübeck, C.; Maloszewski, P. J.; Benischke, R. (2013): Determination of the conduit structure in a karst aquifer based on tracer data-Lurbach system, Austria. *Hydrol. Process.* 27 (2), 225–235. DOI: 10.1002/hyp.9221.
- [20] Lauber, U.; Goldscheider, N. (2014): Use of artificial and natural tracers to assess groundwater transit-time distribution and flow systems in a high-alpine karst system (Wetterstein Mountains, Germany). *Hydrogeology Journal* 22 (8), 1807–1824. DOI: 10.1007/s10040-014-1173-6.
- [21] Leibundgut, C.; Maloszewski, P.; Külls, C. (2009): *Tracers in hydrology*, Chichester, Wiley-Blackwell.
- [22] Maloszewski, P.; Zuber, A. (1982): Determining the Turnover Time of Groundwater Systems with the Aid of Environmental Tracers. 1. Models and Their Applicability. *Journal of Hydrology* 57, 207–231.
- [23] Maloszewski, P.; Rauert, W.; Trimborn, P.; Herrmann, A.; Rau, R. (1992): Isotope hydrologic study of mean transit times in an alpine basin (Wimbachtal, Germany). *Journal of Hydrology* 140 (343-360).
- [24] Maloszewski, P.; Zuber, A. (1996): Lumped Parameter Models for the Interpretation of Environmental Tracer Data. In: International Atomic Energy Agency (IAEA) (Ed.): *Manual on Mathematical Models in Isotope Hydrogeology*. IAEA Publications (IAEA TECDOC, 910), 9–58.
- [25] Maloszewski, P.; Stichler, W.; Zuber, A.; Rank, D. (2002): Identifying the flow systems in a karstic-fissured-porous aquifer, the Schneealpe, Austria, by modelling of environmental  $^{18}\text{O}$  and  $^3\text{H}$  isotopes. *Journal of Hydrology* 256 (1-2), 48–59. DOI: 10.1016/S0022-1694(01)00526-1.
- [26] Mayaud, C.; Wagner, T.; Benischke, R.; Birk, S. (2014): Single event time series analysis in a binary karst catchment evaluated using a groundwater model (Lurbach system, Austria). *Journal of Hydrology* 511 (100), 628–639. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.02.024.
- [27] McDonnell, J. J.; McGuire, K.; Aggarwal, P.; Beven, K. J.; Biondi, D.; Destouni, G.; Dunn, S.; James, A.; Kirchner, J.; Kraft, P.; Lyon, S.; Maloszewski, P.; Newman, B.; Pfister, L.; Rinaldo, A.; Rodhe, A.; Sayama, T.; Seibert, J.; Solomon, K.; Soulsby, C.; Stewart, M.; Tetzlaff, D.; Tobin, C.; Troch, P.; Weiler, M.; Western, A.; Wörman, A.; Wrede, S. (2010): How old is streamwater? Open questions in catchment transit time conceptualization, modelling and analysis. *Hydrol. Process.* 24 (12), 1745–1754. DOI: 10.1002/hyp.7796.
- [28] McGuire, K. J.; McDonnell, J. J. (2006): A review and evaluation of catchment transit time modeling. *Journal of Hydrology* 330 (3-4), 543–563. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2006.04.020.
- [29] Musgrove, M.; Jurgens, B. C.; Opsahl, S. P. (2023): Karst Groundwater Vulnerability Determined by Modeled Age and Residence Time Tracers. *Geophys. Res. Lett.* 50 (18), 1. DOI: 10.1029/2023GL102853.
- [30] R Core Team (2025): A language and environment for statistical computing, Comprehensive R Archive Network (CRAN), <https://cran.r-project.org/> (last access: 10 September 2025).
- [31] Rusjan, S.; Sapač, K.; Petrič, M.; Lojen, S.; Bezak, N. (2019): Identifying the hydrological behavior of a complex karst system using stable isotopes. *Journal of Hydrology* 577 (1), 123956. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.123956.
- [32] Rosenshein, J. S. (1988): Alluvial valleys. In: Back, W.; Rosenshein, J. S.; Seaber, P. R. (Ed.): *Hydrogeology. The Geological Society of America, Boulder (CO) (The Geology of North America, 2)*, 165–175.
- [33] Seelig, M.; Seelig, S.; Krainer, K.; Winkler, G. (2025): Hydraulics of Channelized Flow in Ice-Supersaturated Debris. 1. Rock Glacier Hydrology in Alpine Glacial-Periglacial Systems. *Water Resour. Res.* 61 (2), 159. DOI: 10.1029/2024WR037235.
- [34] Seelig, S.; Seelig, M.; Krainer, K.; Winkler, G. (2025): Mechanisms of Solute Transport in Ice-Supersaturated Debris. 2. Rock Glacier Hydrology in Alpine Glacial-Periglacial Systems. *Water Resour. Res.* 61 (2), 159. DOI: 10.1029/2024WR037236.
- [35] Seelig, S.; Thalheim, F.; Seelig, M.; Töchterle, P.; Vremec, M.; Masten, M.; Briemann, H.; Eybl, J.; Winkler, G. (in Begutachtung): Young Water Fractions in Spring Discharge. Gegenwärtig in Begutachtung bei *Journal of Hydrology*.
- [36] Sharp, J. J. M. (1988): Alluvial aquifers along major riveres. In: Back, W.; Rosenshein, J. S.; Seaber, P. R. (Ed.): *Hydrogeology. The Geological Society of America, Boulder (CO) (The Geology of North America, 2)*, 273–282.
- [37] Somers, L. D.; McKenzie, J. M. (2020): A review of groundwater in high mountain environments. *WIREs Water* 7 (6), 1. DOI: 10.1002/wat2.1475.

- [38] Sprenger, M.; Stumpp, C.; Weiler, M.; Aeschbach, W.; Allen, S. T.; Benettin, P.; Dubbert, M.; Hartmann, A.; Hrachowitz, M.; Kirchner, J. W.; McDonnell, J. J.; Orłowski, N.; Penna, D.; Pfahl, S.; Rinderer, M.; Rodriguez, N.; Schmidt, M.; Werner, C. (2019): The Demographics of Water. A Review of Water Ages in the Critical Zone. *Rev. Geophys.* 57 (3), 800–834. DOI: 10.1029/2018RG000633.
- [39] Stockinger, M. P.; Bogena, H. R.; Lücke, A.; Stumpp, C.; Vereecken, H. (2019): Time variability and uncertainty in the fraction of young water in a small headwater catchment. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 23 (10), 4333–4347. DOI: 10.5194/hess-23-4333-2019.
- [40] Stockinger, M. P.; Stumpp, C. (2024): Lessons learned from the spatiotemporal analysis of long-term and time-variable young water fractions of large central European river basins. *Hydrol. Process.* 38 (2). DOI: 10.1002/hyp.15038.
- [41] von Freyberg, J.; Allen, S. T.; Seeger, S.; Weiler, M.; Kirchner, J. W. (2018): Sensitivity of young water fractions to hydro-climatic forcing and landscape properties across 22 Swiss catchments. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 22 (7), 3841–3861. DOI: 10.5194/hess-22-3841-2018.
- [42] Winkler, G.; Wagner, T.; Krainer, K.; Ribis, M.; Hergarten, S. (2018): Hydrogeology of Rock Glaciers - Storage Capacity and Drainage Dynamics - An Overview. In: Sychev, V. G.; Mueller, L. (Ed.): *Novel methods and results of landscape research in Europe, Central Asia and Siberia. Vol II/71. FGBNU "VNII agrochimii", Moskau*, 329–334.
- [43] Xia, C.; Zuecco, G.; Marchina, C.; Penna, D.; Borga, M. (2024): Effects of Short-Term Climate Variations on Young Water Fraction in a Small Pre-Alpine Catchment. *Water Resour. Res.* 60 (10), 13. DOI: 10.1029/2023WR036245.

# Die Großquellen Tirols – Systematische Aufnahme der strategischen Wasserressourcen

F. Thalheim<sup>1</sup>, P. Töchterle<sup>1</sup>, S. Benischke<sup>1</sup>, S. Petersmann<sup>1</sup>, R. Ebenbichler<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Energieagentur Tirol GmbH, Bürgerstraße 1–3, AT-6020 Innsbruck

## Kurzfassung

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.

Die 2019/2020 begonnene Wiederaufnahme der Untersuchung der strategischen Wasserressourcen Tirols wurde in den vergangenen fünf Jahren systematisch weitergeführt und dabei die Liste an Großquellen stetig erweitert und die Datengrundlagen zusammengetragen und verbessert.

So konnte die Liste von damals 55 Großquellen mit einer Minimalschüttung von über 4.000 l/s auf knapp 100 Quellen mit über 7.000 l/s Minimalschüttung erweitert werden und dabei auch zahlreiche gänzliche neue Quellen ausgemacht werden.

Diese Publikation gibt eine Zusammenschau der wesentlichen Ergebnisse der Erhebungen der vergangenen Jahre und zeigt mögliche weitere Schritte zur systematischen Erkundung und Abklärung von Detailfragen auf.

## **Abstract**

*Water is Tyrol's most important resource and permeates all aspects of life and the economy. Ensuring the availability of local water resources to meet the region's own needs is therefore of central importance. Unlike other regions in Austria, the demand for drinking and utility water in Tyrol is predominantly met by spring water from private and public supply systems.*

*The investigation of Tyrol's strategic water resources, which was resumed in 2019/2020, has been systematically continued over the past five years. During this period, the existing list of major springs has been expanded continuously, and the foundational dataset was significantly improved. In the course of this work, numerous springs were identified that had previously received little attention and partly were not officially registered. As a result, the list of major springs with a minimum discharge of over 4,000 l/s has grown from 55 to 93 springs with a combined minimum discharge exceeding 7,000 l/s.*

*This publication provides a summary of the key findings from recent years of surveys and outlines scientific questions that arose.*

## 1. Einleitung

Tirol bezieht sein Trinkwasser fast ausschließlich aus Quellen. Im Sinne einer nachhaltigen Planung der Trinkwasserversorgung nehmen vor allem strategisch wichtige Großquellen eine wasserwirtschaftliche Sonderrolle ein. Zu diesem Zweck wurden bereits in den 1990er Jahren Untersuchungen zur Großquellen-Hydrogeologie von ausgewählten Quellgebieten durchgeführt. 2019 wurde die Energieagentur Tirol (vormals Wasser Tirol) damit betraut, aufbauend auf diesen Untersuchungen einen aktualisierten Ist-Befund der strategischen Wasserressourcen Tirols zu erstellen. Die Kernfragen in diesem Kontext sind:

Welche Großquellen gibt es?

Welche dieser Ressourcen stehen – aktuell und künftig – für eine Trinkwassernutzung zur Verfügung?

Welche Maßnahmen müssen ergriffen werden, um die relevanten Quellen nachhaltig zu schützen?

Begleitend dazu sollten wissenschaftliche Fragestellungen, die im Zuge der Bearbeitung aufkommen, adressiert werden.

In der Anfangsphase des Projekts wurde definiert, dass Quellen mit einer Minimalschüttung über 20 l/s als Großquellen bezeichnet werden. Darauf wurde eine vorläufige Liste mit 55 Quellen erstellt, für die dieses Kriterium überprüft und weitere Bewertungskriterien ermittelt werden sollen. Im Zuge der Folgeprojekte wuchs diese Liste auf über 100 potenzielle Großquellen an, die es zu überprüfen galt.

Dafür wurde in Abstimmung mit der Abteilung Wasserwirtschaft des Landes Tirol in Anlehnung an frühere Publikationen zur Quellbewertung (Steidl, 1999) und andere Wasserressourcen-Projekte ein Katalog von neun Bewertungskriterien definiert. Diese umfassen unter anderem die Ergiebigkeit und das Schüttungsverhalten einer Quelle, die Wasserqualität, die Lage und Vulnerabilität, bestehende Wasserrechte sowie mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf die Quelle.

Um die eine Quelle hinsichtlich der vereinbarten Kriterien beurteilen zu können, müssen entsprechende Daten als Entscheidungsgrundlage vorhanden sein. Hierfür wurden umfangreiche Recherchen und Datenabfragen in den Datenarchiven des hydrographischen Diensts (HD Tirol), der Gewässerzustandsüberwachung (GZÜV), dem Wasserinformationssystem (WIS) des Landes Tirol, in den Wasserbüchern der Bezirkshauptmannschaften, öffentlichen und privaten Wasserversorgern (Gemeinden bzw. Wassergenossenschaften) und diversen privaten Firmen (Planungsbüros, Energieversorger etc.) durchgeführt. Im Zuge dieser Grundlagenerhebung wurden für die 93 eingehender untersuchten Quellen diverse Daten zu Vor-Ort-Parametern (d. h. Schüttungsmenge, Wassertemperatur und elektrischer Leitfähigkeit), hydrochemischer und isotopengeochemischer Zusammensetzung und hydrogeologischer Situation der Quellen zusammengetragen und teilweise durch die Energieagentur Tirol neu erhoben.

Der daraus entstandene, inhomogene Datensatz erforderte die Entwicklung eines flexiblen Methodenkatalogs, der auf unterschiedlich strukturierte Daten anwendbar ist und dennoch vergleichbare Ergebnisse liefert. Dieser wurde an die Methodik der Studie von Seelig et al. (2024) angelehnt und bei Bedarf angepasst.

## 2. Methodik

Zur Erkennung langfristiger Veränderungen wurden Zeitreihen einer Trendanalyse unterzogen. Mithilfe des saisonalen Mann-Kendall-Tests (HELSEL et al., 2020) wurde geprüft, ob signifikante Langzeittrends vorliegen

(Signifikanzniveau  $p < 0,05$ ). Für signifikante Trends wurde die mittlere jährliche Änderung durch Theil-Sen-Regression bestimmt, die im Vergleich zur einfachen linearen Regression robuster gegenüber saisonalen Schwankungen und Ausreißern ist.

Zur Charakterisierung der Schüttungsdynamik und Saisonalität wurden – sofern ausreichende Daten vorlagen – statistische Kennzahlen (Mittelwert, Standardabweichung, Min/Max, Perzentile) der Vor-Ort-Parameter berechnet. Die sogenannte Schüttungszahl ( $Q_{\max}/Q_{\min}$ ) dient dabei als Maß für das Schüttungsverhalten: Je niedriger der Wert, desto gleichmäßiger schüttet die Quelle.

An Quellen, die im Rahmen des Projekts auch im Gelände begangen wurden, wurden Wasserproben für hydrochemische Analysen entnommen. Je nach Relevanz umfassten diese Standardchemie, Schwermetall- und bakteriologische Untersuchungen. Die Analysen erfolgten durch die Chemisch-Technische Umweltschutzanstalt (CTUA) gemäß einschlägiger EN- und DIN-Normen.

Zusätzlich wurde auf Daten der GZÜV zurückgegriffen, in deren Rahmen einige der untersuchten Quellen im laufenden Messprogramm regelmäßig beprobt werden. Die Daten wurden soweit möglich homogenisiert und plausibilisiert. Typischerweise werden hydrochemische Daten als Piper-Diagramm dargestellt. Im Zuge des Projekts wurde aber klar, dass sich die behandelten Quellen zu großen Teilen hydrochemisch sehr ähnlich sind und diese Darstellung meist keine ausreichende visuelle Differenzierung zulässt. Stattdessen wurde in Anlehnung an KASSEBAUM (2006) auf Darstellungen im Ionensystem  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  und  $\text{SO}_4^{2-}$  zurückgegriffen.

Zur Einschätzung der mittleren Einzugsgebietshöhen wurden isotopengeochemische Untersuchungen durchgeführt. Analysiert wurden die stabilen Isotope  $^2\text{H}$  und  $^{18}\text{O}$ . Referenzdaten für Niederschlag und Einzugsgebietshöhen stammen aus dem österreichischen Niederschlagsisotopennetz (ANIP) und den zugehörigen Publikationen (u. a. HUMER ET AL., 1995; BMLFUW, 2015; HAGER & FOELSCH, 2015) bzw. aus regionalen Studien für Tirol (BENISCHKE et al., 2010; LECHNER et al., 2019; THALHEIM et al., 2022) herangezogen. Die mittlere Einzugsgebietshöhe einer Quelle wurde, sofern nicht anders angegeben, als Mittelwert aller zitierten Kalibrationsgeraden berechnet.

### 3. Ergebnisse und Diskussion

Insgesamt wurden 104 Quellen einer näheren Untersuchung unterzogen. Bei einigen wurde nach Sichtung der Datengrundlage klar, dass die Schüttungsmenge deutlich unter 20 l/s abfällt und es sich somit per Definition um keine Großquelle handelt. Es blieben 93 Quellen übrig, bei denen – je nach Datenqualität – das zentrale Kriterium einer Minimalschüttung über 20 l/s belegbar ist bzw. als sehr wahrscheinlich erscheint.

Die Großquellen sind ungleichmäßig über Tirol verteilt (Abb. 1). Die Bereiche nördlich des Inntals sowie der Nordrand des Kaisergebirges weisen eine hohe räumliche Dichte an Großquellen auf. Daneben befinden sich noch weitere Gruppen im Hinteren Zillertal und den nordöstlichen Stubai Alpen.

Die Verteilung scheint im Wesentlichen durch die regionale Geologie vorgegeben zu werden. Die überwiegende Mehrheit der Quellen ist an die mächtigen triassischen Plattformkarbonate der Nördlichen Kalkalpen, des Brennermesozoikums und der Lienzer Dolomiten gebunden. Großquellen innerhalb der von kristallinen Gesteinen dominierten Deckensystemen sind häufig an quartäre Talaquifere gebunden. Ergiebige Quellen, welche sich vorwiegend aus Kluftsystemen in Metamorphiten speisen, wurden nicht angetroffen.

Aus wasserwirtschaftlicher Perspektive relevant ist vor allem die Verteilung der Trinkwasserressourcen relativ zu den Bevölkerungszentren Tirols. Hier weisen glücklicherweise die bevölkerungsreichen Bezirke Innsbruck-Land, Schwaz und Kufstein eine hohe Anzahl an Großquellen auf (Abb. 2). Auf dem Gemeindegebiet der Stadt Innsbruck befindet sich mit dem Mühlauer Quellen (bzw. dem Stollensystem, das diese Ressource erschließt) nur eine einzige Wasserressource, welche das Kriterium einer Großquelle erfüllt.

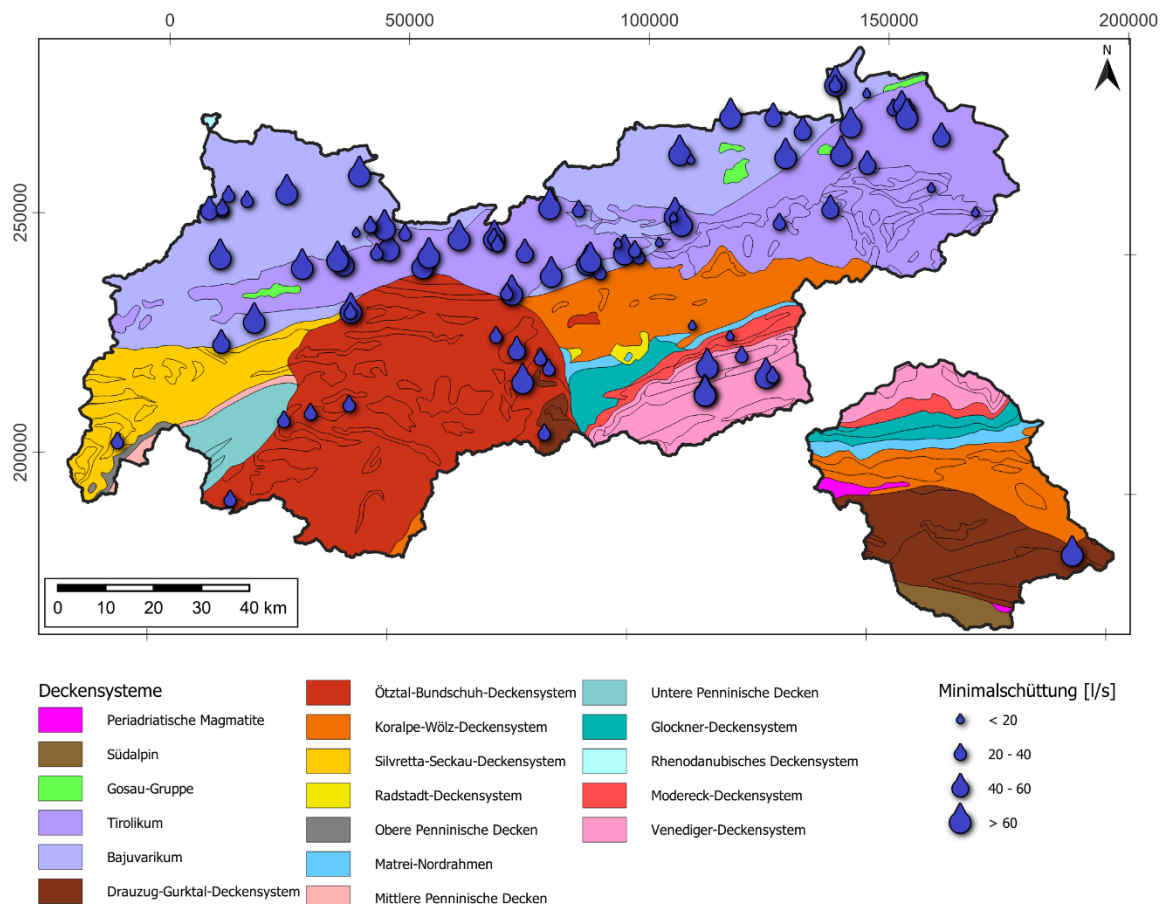


Abb. 1: Geologische Deckensysteme und räumlichen Verteilung der Großquellen Tirols. Die meisten ergiebigen Quellen befinden sich in Gebieten, die von Karbonaten dominiert werden (Nördliche Kalkalpen, Brenner Mesozoikum, Lienz Dolomiten). Großquellen innerhalb der von kristallinen Gesteinen dominierten Deckensysteme sind in der Regel an quartäre Talaquifere gebunden.

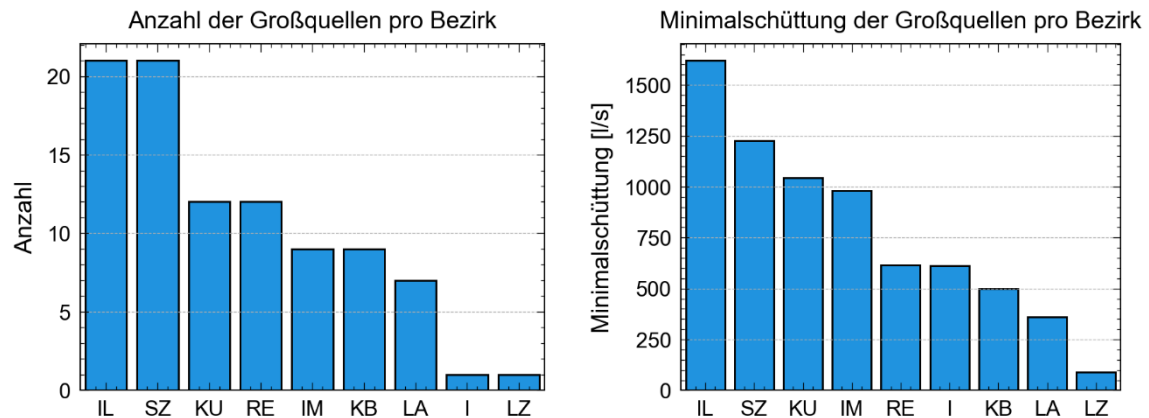


Abb. 2: Aufteilung der Großquellen nach Bezirken. Das linke Diagramm zeigt die Anzahl der Quellen, rechts ist die Summe der Minimalschüttungen dargestellt.

Die Anzahl der Quellen gibt lediglich eine grobe Orientierung über das vorhandene Dargebot an Trinkwasserressourcen. Entscheidend dafür, wie viele Menschen mit jahresdurchgängig gesichert mit Trinkwasser versorgt werden können, ist die Minimalschüttung. Insgesamt beläuft sich die Minimalschüttung aller bestätigten Großquellen auf rund 7.050 l/s bzw.  $222 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ , die sich ähnlich wie die Anzahl der Quellen auf die Tiroler Bezirke verteilt (Abb. 2). Ein Teil der Quellen wird bereits zur Trinkwasserversorgung genutzt, andere sind aufgrund ihrer abgegrenzten Lage oder sonstiger grundlegender Einschränkungen nicht oder nur eingeschränkt wasserwirtschaftlich nutzbar. Dennoch reicht das verbleibende Dargebot voraussichtlich aus, um Tirol bilanziell fast vollständig durch Wasser aus Großquellen mit Trinkwasser zu versorgen.

Im Zuge des Projekts wurde eine große Menge an Daten zu den Vor-Ort-Parametern Schüttungsmenge, Wassertemperatur und elektrischer Leitfähigkeit zu den untersuchten Quellen aus diversen Datenquellen zusammengetragen, vereinheitlicht und teilweise durch eigene Messungen im Gelände ergänzt. Auf diese Weise konnte jede Quelle – abhängig von Umfang und Qualität der vorliegenden Daten – zumindest grundlegend charakterisiert werden.

Der Medianwert der Minimalschüttung aller bestätigten Großquellen liegt bei 48 l/s mit einer Standardabweichung von 89 l/s. Die Verteilung ist rechtsschief, da es vergleichsweise wenige Quellen mit wirklich großer Minimalschüttung über 100 l/s gibt (Abb. 3). Dabei stellt nach dem kürzlich erweiterten Trinkwasserstollen Mühlauer Quellen die Mühlprungquelle bei Nassereith den größten natürlichen Quellaustritt Tirols dar.

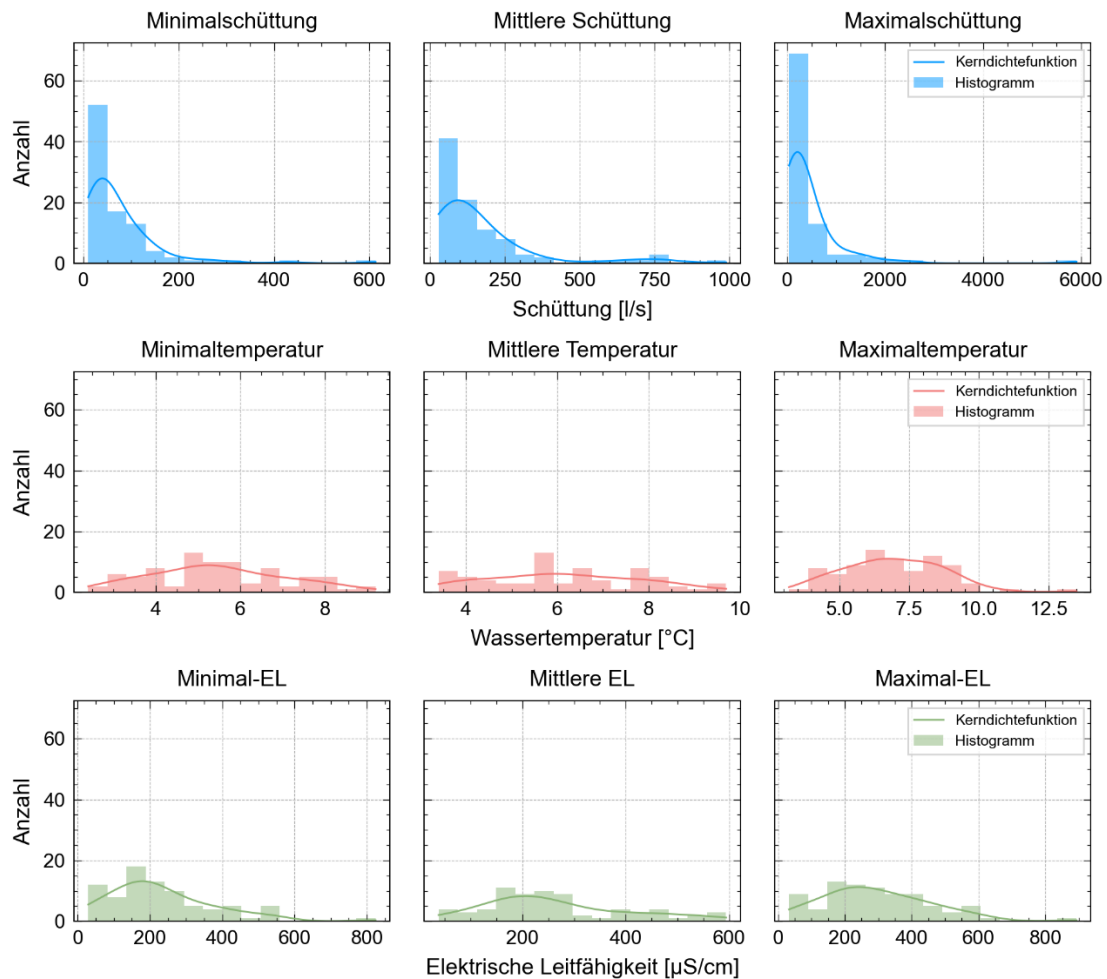


Abb. 3: Statistische Verteilung der Vor-Ort-Parameter Schüttungsmenge, Wassertemperatur und elektrische Leitfähigkeit der bestätigten Großquellen Tirols. Dargestellt sind Histogramme der Minima, Maxima und der arithmetischen Mittelwerte der Messreihen für die bestätigten Großquellen.

Für die statistische Verteilung der Maximalschüttungen ist die Rechtsschiefe noch stärker ausgeprägt und liegt bei der Mehrzahl der Quellen deutlich unter 100 l/s. Dies zeigt, dass das Schüttungsverhalten der Großquellen meist sehr ausgeglichen ist. Die Schüttungszahlen (i.e., das Verhältnis von Maximum zu Minimum  $Q_{\max}/Q_{\min}$ ) liegt mehrheitlich im Bereich  $<5$ , was gemäß der wasserwirtschaftlichen Bewertungskriterien als gutes bzw. sehr gutes Schüttungsverhalten bewertet werden kann.

Falls für eine Quelle mehrjährige Messdaten der Vor-Ort-Parameter in ausreichender zeitlicher Auflösung vorliegen, konnte eine saisonal korrigierte Trendanalyse durchgeführt werden (siehe Methodenteil; Mann-Kendall-Test). Dabei zeigt sich, dass sich bei den meisten Quellen die Schüttung nicht bzw. nicht statistisch signifikant über den jeweiligen Betrachtungszeitraum ändert (Abb. 4). Dabei muss die Änderungsrate relativ zur Minimalschüttung betrachtet werden, da beispielsweise ein Schüttungsrückgang von -1 l/s pro Jahr für eine kleine Quelle eine deutlich dramatischere Änderung darstellt als bei einer sehr großen Quelle mit einer Minimalschüttung von mehreren 100 l/s. Die Analyse zeigt, dass einige wenige Quellen starke Rückgänge von -2 bis zu -4 % pro Jahr aufweisen, was im Sinne einer nachhaltigen Ressourcenplanung entsprechenden Handlungsbedarf impliziert.

### Änderungsraten der Quellparameter

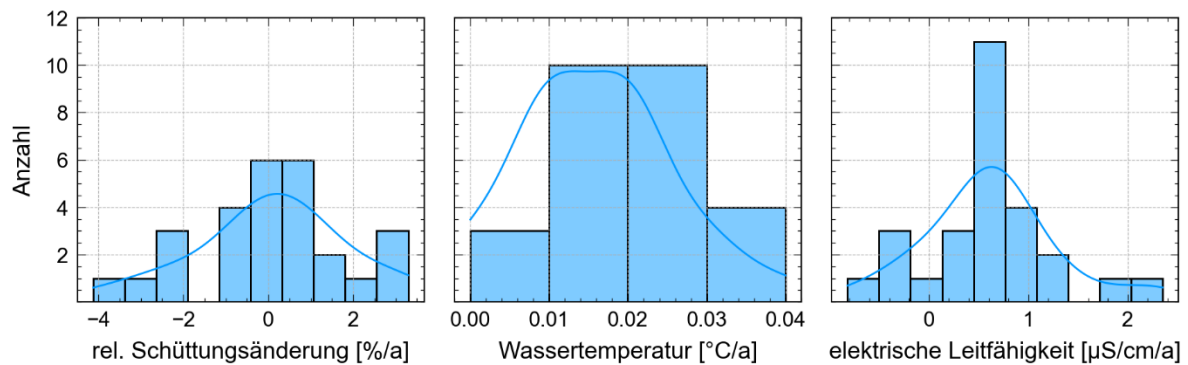


Abb. 4: Statistische Verteilung der Änderungsraten. Für die Schüttung wurde die durchschnittliche jährliche Änderung (in l/s pro Jahr) auf die jeweilige Minimalschüttung der Quelle normalisiert, um eine besser vergleichbare relative Änderungsrate (in % pro Jahr) zu erhalten. Generell konnten Änderungsraten nur für jene Großquellen bestimmt werden, für die mehrjährige Zeitreihen in ausreichender zeitlicher Auflösung zur Verfügung standen, um eine robuste Analyse mit Korrektur auf saisonale Schwankungen zu ermöglichen (beispielsweise kontinuierliche Messungen des HD Tirol).

Die elektrische Leitfähigkeit der Quellwässer bewegt sich im Mittel zwischen 180 und 300  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Je nach geologischem Kontext reichen die Mittelwerte von unter 50  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (bspw. Quellen im Bereich hinteres Zillertal/Zentralgneise) bis über 500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , häufig in Verbindung mit Evaporiten im Einzugsgebiet (z.B. Reichenhaller Schichten). Die Mineralisierung von Grund- und Quellwässern wird häufig durch sogenannte Verdünnungseffekte beeinflusst. Während (Stark-)Niederschlagsereignissen nimmt der Grundwasserleiter größere Mengen an schwach mineralisiertem Niederschlagswasser auf. Dadurch wird das bereits vorhandene Grundwasser verdünnt, was sich in einem Rückgang der elektrischen Leitfähigkeit ausdrückt. So entsteht eine negative Korrelation, da ansteigende Schüttungsmengen mit abfallender Mineralisierung der Quellwässer einhergehen.

Viele Großquellen zeigen ein hinsichtlich der Korrelation zwischen Schüttungsmengen und elektrischer Leitfähigkeit jedoch eine positive Korrelation, wie das Beispiel der Heiterwandquellen bei Tarrenz im Bezirk Imst illustriert (Abb. 5). Ein Anstieg der Quellschüttung geht bringt höher mineralisierte Wässer zum Austritt an der Quelle. Dieses Verhalten wird als hydraulisches „Auspressen“ von tief liegenden Bereichen eines größeren Bergwasserkörpers interpretiert, das durch einen entsprechenden Anstieg des Druckniveaus bedingt wird.

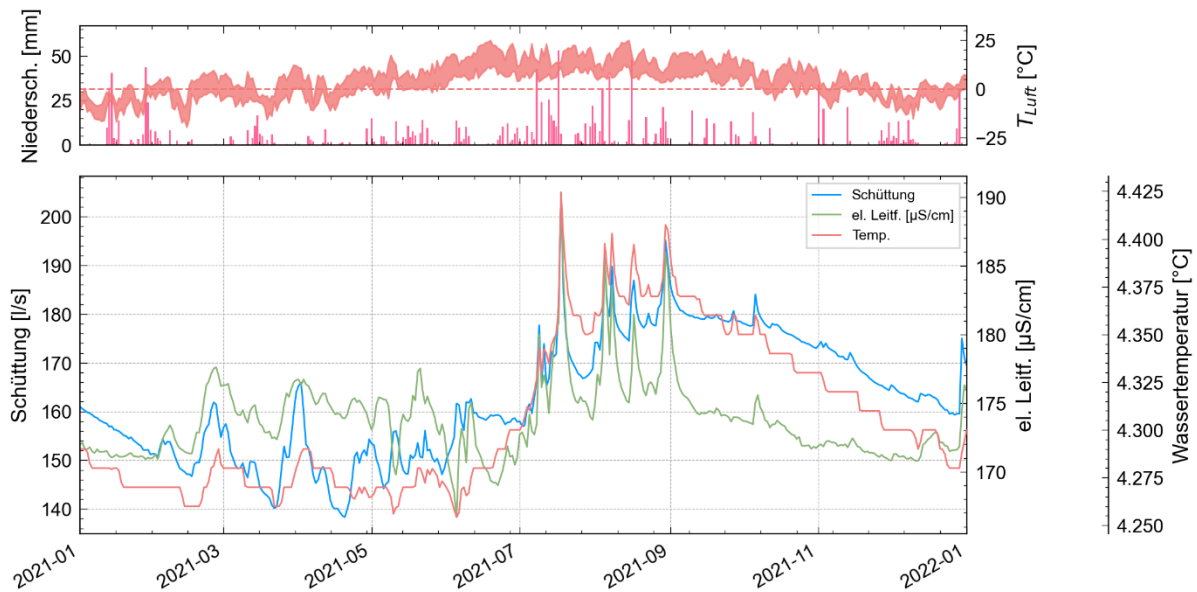


Abb. 5: Darstellung der Tagesmittelwerte für Schüttungsmenge, elektrische Leitfähigkeit und Wassertemperatur der Heiterwandquellen im Jahr 2021. Das obere Panel zeigt die hydrometeorologischen Parameter Niederschlag sowie Tageshöchst- und -tiefstwerte der Lufttemperatur am Quellaustritt (Datenquellen: HD Tirol, GeoSphere Austria – Spartacus v.2.1)

Wie auch für die Schüttungsmengen wurden Quellen mit ausreichender Datengrundlage auf langfristige Trends in der elektrischen Leitfähigkeit untersucht (Abb. 4). Hier zeigt sich, dass die elektrische Leitfähigkeit häufig mit 1 bis 2 µS/cm pro Jahr ansteigt. Derartige Trends wurden bislang in der Literatur nicht ausführlich beschrieben und über die Ursachen kann an dieser Stelle nur spekuliert werden. An einer detaillierten Auswertung in Verbindung mit hydrochemischen Analysen wird aktuell noch gearbeitet.

Um die hydrochemische Zusammensetzung der Quellwässer zu analysieren, wurde auf Bestandsdaten der GZÜV und eigene Beprobungen im Rahmen der laufenden Projekte der Energieagentur Tirol zurückgegriffen. Die Quellwässer liegen meist in einem Härtebereich zwischen 0 und 15 °dH (Abb. 6). Nur wenige Quellen zeigen eine Gesamthärte über 15 °dH. Laut Trinkwasserverordnung fallen die meisten der untersuchten Quellen somit in die Kategorien „weich bis mäßig hart“ (0-10 °dH) bzw. „ziemlich hart“ (10-16 °dH). Dabei ist auffällig, dass in der Mehrheit der Fälle die Gesamthärte fast ausschließlich durch Karbonathärte erklärbar ist. Diese Beobachtung lässt sich durch den geologischen Kontext der Quellen erklären (vgl. Abb. 1).

Die typischen hydrochemischen Darstellungsweisen (Piper-Diagramm, Schöller-Diagramm) erwiesen sich für eine Klassifikation der Quellen als ungeeignet, da die untersuchten Quellen sich hydrochemisch stark ähneln und eine etwaige Cluster-Bildung nicht aufgelöst werden kann. Stattdessen wurde auf die Systematik von KASSEBAUM (2006) zurückgegriffen, die sich ausschließlich auf das Ionensystem Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> und SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> bezieht (Abb. 7). Die Ca:Mg-Ionenverhältnisse der untersuchten Quellen liegen in der Regel zwischen 1:1 und 4:1, was im Wesentlichen auf unterschiedlich große dolomitische Komponenten in der Lösungsfracht zurückzuführen ist.

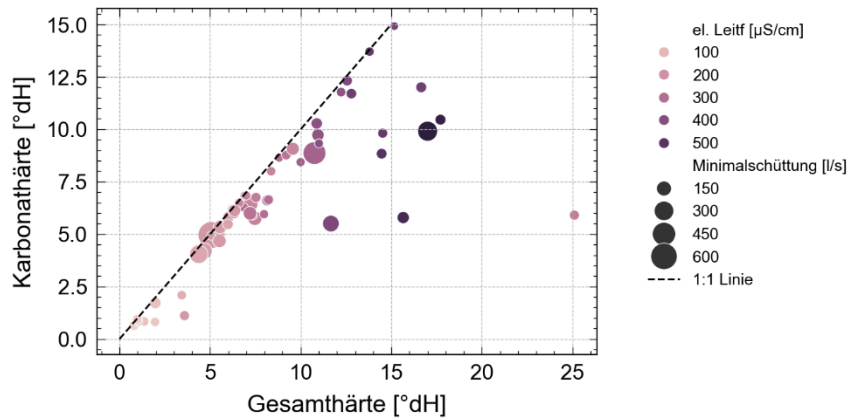


Abb. 6: Mittelwerte für Gesamthärte und Karbonathärte der bestätigten Großquellen Tirols. Die Farbgebung entspricht der mittleren elektrischen Leitfähigkeit der Quellwässer, die Größe der Punkte ist entsprechend der Minimalschüttung skaliert. Liegt eine Quelle nahe der 1:1-Linie, lässt sich die hydrochemische Lösungsfracht größtenteils durch Karbonatlösung erklären.

Betrachtet man die Verteilung der Einzelmessungen in beiden Darstellungen von Abb. 7, lässt sich eine Gruppenbildung ausmachen. Durch Verdünnungseffekte bilden einige Quellen Mischreihen aus, welche sich als linear angeordnete Cluster zeigen. Interessanterweise liegen häufig mehrere Quellen entlang solcher Linien, was auf gemeinsame hydrogeologische Einflussfaktoren hindeuten könnte. Hierzu wird aktuell noch eine Methodik entwickelt und getestet, um eine quantitative Verbindung zwischen den durchströmten Lithologien und der hydrochemischen Zusammensetzung herstellen zu können.

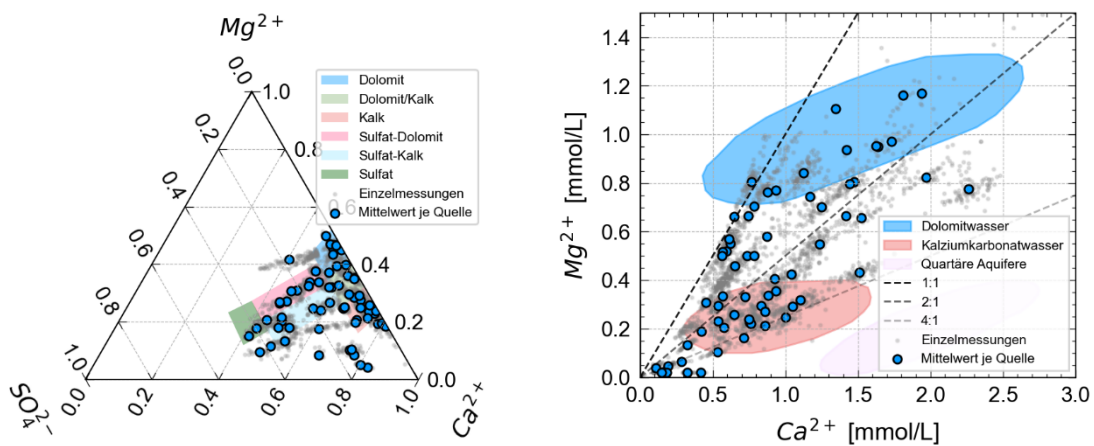


Abb. 7: Hydrochemische Zusammensetzung der Großquellen im System Ca-Mg-SO<sub>4</sub> (links) bzw. Ca-Mg (rechts) nach Kassebaum (2006). Dargestellt sind sowohl alle vorliegenden Einzelmessungen wie auch Mittelwerte für jede Quelle.

Eine umfassende Analyse der Wassertemperaturen kann weitere Aussagen über Grundwasserneubildungsprozesse, Speicherverhalten und das Einzugsgebiet der Quellen ermöglichen. Hierfür wurde ebenfalls auf dieselben Datenarchive wie bei Schüttungsmenge und elektrischer Leitfähigkeit zurückgegriffen und der Datensatz durch eigene Messungen ergänzt. Die mittleren Wassertemperaturen der analysierten Großquellen zeigen einen Mittelwert von  $6,2 \pm 1,7$  °C.

Für Quellen mit langjährigen Messreihen in hoher zeitlicher Auflösung konnten Trends der Wassertemperaturen ermittelt werden. Dabei zeigten drei Quellen keine bzw. keine statistisch signifikante Erwärmung. Bei allen

weiteren Quellen zeigten sich teils deutliche Anstiege der Wassertemperaturen von bis zu  $+0,04$  °C pro Jahr, wobei der Mittelwert bei etwa  $+0,02$  °C pro Jahr liegt (Abb. 4). Diese Spannweite deckt sich weitgehend mit der beobachteten atmosphärischen Erwärmung in alpinen Lagen weltweit ( $+0,3$  °C pro Jahrzehnt bzw.  $+0,03$  °C pro Jahr laut IPCC, 2018) und vorangegangenen Studien zu Grundwassertemperaturen in Tirol (THALHEIM et al., 2021). Vergleicht man die Anstiege der Wassertemperaturen aber im Einzelfall mit der Entwicklung der Lufttemperatur am Quellaustritt (basierend auf dem interpolierten Re-analysis Datensatz *Spartacus v2.1*), zeigt sich, dass der Anstieg der Wassertemperaturen häufig auch deutlich geringer ausfällt als der Anstieg der Lufttemperaturen im selben Zeitraum.

Grundsätzlich korrelieren Grundwassertemperaturen mit der mittleren Lufttemperatur, da der Untergrund ein thermisches Gleichgewicht zwischen Atmosphäre und dem lokalen geothermischen Gradienten anstrebt. Bei großen Quellen ist jedoch häufig zu beobachten, dass die Wassertemperatur am Quellaustritt niedriger ist als die entsprechende mittlere Lufttemperatur in dieser Höhenlage. Diese Situation kommt dann zustande, wenn das Einzugsgebiet einer Quelle deutlich höher liegt als die Austrittshöhe der Quelle. Dadurch gelangt vergleichsweise kaltes Wasser aus größerer Höhe in den Grundwasserleiter und verursacht eine thermische Anomalie im Untergrund.

Im Fall der Tiroler Großquellen kann eine deutliche Korrelation zwischen mittlerer Wassertemperatur und der Höhe des Quellaustritts nachgewiesen werden (Abb. 8). Die Wassertemperaturen liegen dabei systematisch niedriger als der atmosphärische Temperaturgradient (i.e.,  $T_{Luft}(h) = 13,13 - 0,54 * \frac{h}{100}$ ). Die Wassertemperaturen der Großquellen sind im Durchschnitt 1 bis 2 °C kühler als der Jahresmittelwert der Lufttemperatur auf derselben Höhe. In Verbindung mit dem atmosphärischen Temperaturgradienten weisen die Wassertemperaturen also darauf hin, dass die mittleren Einzugsgebietshöhen im Schnitt 200 bis 400 m über der Austrittshöhe der Großquellen liegen. Die Daten unterliegen jedoch einer starken Streuung, die unter anderem auch einige Ausreißer bedingt.

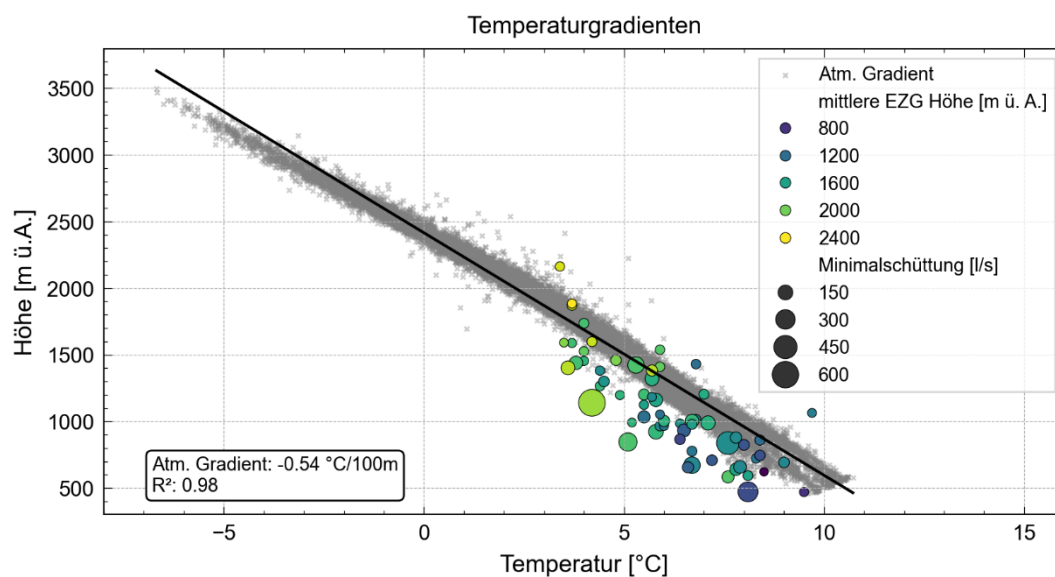
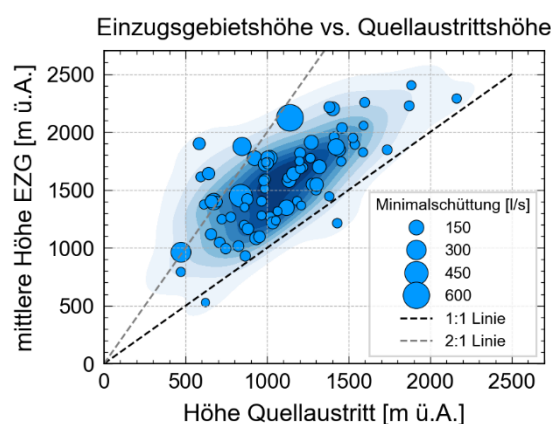


Abb. 8: Wassertemperatur der Großquellen gegen Austrittshöhe. Die Farbcodierung der Datenpunkte entspricht der mittleren Einzugsgebietshöhe basierend auf isotopengeochemischen Analysen. Die Größe der Punkte ist entsprechend der Minimalschüttungsmenge skaliert. Im Hintergrund als „x“-Markierungen sind Jahresmittelwerte der Lufttemperatur in Tirol in verschiedenen Höhenlagen dargestellt. Die schwarze Linie ist die lineare Regression dieses Datensatzes und repräsentiert den

*Jahresmittelwert des regionalen atmosphärischen Temperaturgradienten für Tirol:  $-0.54 \text{ }^\circ\text{C}/100\text{m}$  (Datenbasis: Geosphere Austria – Spartacus v2.1 saisonale Aggregation 1991-2020)*

Zusätzlich kann die mittlere Einzugsgebietshöhe über isotopengeochemische Untersuchungen eingegrenzt werden. Auch hierzu wurden Daten aus Archiven und vorangegangenen Studien zusammengetragen und soweit möglich durch eigene Messungen ergänzt. Anhand von publizierten Referenzdaten zum isotopischen Höheneffekt für Tiroler Quellen (siehe Methodenteil) konnte so für eine Vielzahl der untersuchten Großquellen eine mittlere Einzugsgebietshöhe abgeschätzt werden.

Die Ergebnisse bestätigen das generelle Muster in Abb. 8, nachdem die Einzugsgebiete tendenziell deutlich höher als die Austrittshöhen der Quellen liegen (Abb. 9). Im Schnitt liegen die Einzugsgebiete der Großquellen etwa 1,5-mal höher als die Austrittshöhe der Quelle, wobei die Daten auch hier eine breite Streuung der Werte zeigen.



*Abb. 9: Austrittshöhen der Großquellen im Vergleich zur mittleren Einzugsgebietshöhe basierend auf dem isotopischen Höheneffekt. Die mittlere Einzugsgebietshöhe liegt demnach in den meisten Fällen etwa 1,5 mal höher als der Quellaustritt der Großquellen.*

#### 4. Schlussfolgerungen

Das grundlegende Ziel des Projekts Großquellen-Hydrogeologie Tirol ist die Erkundung und nachhaltige Sicherung strategisch wichtiger Trinkwasserressourcen. Um dieses Ziel zu erreichen, wurden Quellen identifiziert, die aufgrund ihrer ergiebigen Schüttungsmengen von grundsätzlicher strategischer Bedeutung sind. Für diese Quellen wurden Daten gesammelt, um ihre wasserwirtschaftliche Relevanz zu beurteilen und ggf. Maßnahmen vorzuschlagen, die den Schutz der Quellen sicherstellen sollen.

Quasi als Nebenprodukt dieser Untersuchungen entstand ein äußerst umfangreicher Datensatz, der Zeitreihen zu Vor-Ort-Parametern, hydrochemischer und isotopengeochemischer Zusammensetzung der Quellwässer, Wasserqualität und dem hydrogeologischen Kontext der 93 Großquellen Tirols umfasst. Durch Detailanalysen der einzelnen Quellen konnten Muster identifiziert werden, die die Großquellen charakterisieren.

Die überwiegende Mehrheit der Quellen sind an Grundwasserleiter innerhalb triassischer Plattformkarbonate gebunden (Nördliche Kalkalpen, Brennermesozoikum). Dabei scheint der Wettersteinkalk meist als (Kluft-)Aquifer, die Raibler Schichten bzw. jurassische Jungschichten an Deckengrenzen als Stauer zu agieren. Hydrogeologische

Systeme nach diesem Schema wurden in der Vergangenheit bereits mehrfach beschrieben und können als grundlegendes Modell für viele Großquellen nördlich des Inntals herangezogen werden.

- Großquellen innerhalb der Kristallin-Komplexe speisen sich überwiegend aus Grundwasserleitern innerhalb der quartären Talfüllung. In einigen Fällen konnte in vorangegangenen Studien eine hydraulische Verbindung zu Oberflächengewässern nachgewiesen werden. Großquellen, die sich vorwiegend aus Klüften im kristallinen Festgestein speisen, wurden nicht gefunden.
- Nur wenige Quellen zeigen einen problematischen Rückgang der Schüttungsmengen. Im Mittel aller Quellen ist keine Änderung der Schüttungsmengen feststellbar.
- Die Wassertemperaturen der Quellen zeigen häufig Erwärmung zwischen +0,2 und +0,4 °C pro Dekade. Diese Erwärmung dürfte im anthropogenen Klimawandel begründet sein.
- Das Wasser der Tiroler Großquellen ist gering bis mäßig stark mineralisiert. Häufig ist ein Anstieg der elektrischen Leitfähigkeit zu beobachten, der mit einem Anstieg der Wassertemperatur einher geht.

## Referenzen

- [1] BMLFUW (2015): Erläuterungen zur Wasserisotopenkarte Österreichs der Niederschlags-, Oberflächen-, Grundwasser- und Tiefengrundwasserstationen. 32 S.
- [2] Benischke, R. & Harum, T. & Reszler, C. & Saccon, P. et al. (2010): Karstentwässerung im Kaisergebirge (Tirol, Österreich) - Abgrenzung hydrographischer Einzugsgebiete durch Kombination hydrogeologischer Untersuchungen mit Isotopenmethoden und hydrologischer Modellierung. In: Grundwasser - Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie, Band 01/2010. S. 1 - 16.
- [3] Hager, B. & Foelsche, U. (2015): Stable isotope composition of precipitation in Austria. In: Austrian Journal of Earth Sciences, Band 108/2. S. 2 - 13.
- [4] Helsel, D. R. & Hirsch, R. M. & Ryberg, K. R. & Archfield, S. A. et al. (2020): Statistical Methods in Water Resources: U.S. Geological Survey Techniques and Methods. Buch 4, Kapitel A3, 458 S.
- [5] Humer, G. & Rank, D. & Trimborn, P. & Stichler, W. (1995): Niederschlagsisotopenmessnetz Österreich. In: Monographien Bundesministerium für Umwelt, Band 52. S. X + 86.
- [6] IPCC (2018): Global warming of 1.5 °C. Summary for Policymakers. 34 S.
- [7] Kassebaum, C. (2006): Exploration von Trinkwasser aus geklüftetem Hauptdolomit in den Nördlichen Kalkalpen. 118 + Anlagen S.
- [8] Lechner, K. & Ribis, M. & Poscher, G. (2019): Großquellen der Kluft- und Karstgrundwasserleiter im Karwendel (Nördliche Kalkalpen, Tirol). In: Grundwasser - Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie, Band 12/2019. S. 1 - 10.
- [9] Seelig, M. & Seelig, S. & Vremec, M. & Hausleber, M. et al. (2024): Zeitreihen- und Trendanalyse der Quellmessstellen des Hydrographischen Dienstes Österreichs. 124 S.
- [10] Steidl, W. (1999): Quell- und Grundwasser als Eigentum. Der Versuch einer monetären Bewertung für das Bundesland Salzburg. Teil 1: Quellen. In: Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, Band 7/8. S. 205-212.
- [11] Thalheim, F. & Wallner, M. (2021): Land Tirol. Grundwassertemperaturen Tirols. 192 S.
- [12] Thalheim, F. & Wallner, M. (2022): Land Tirol. Großquellenhydrogeologie - Stufe 1. 109 S.

# Neuartige Erkundungsbohrtechnologie mit Kernbohrlafette für exponierte Lagen

A. Steinwender<sup>1</sup>

<sup>1</sup> HTB Baugesellschaft mbH

## Kurzfassung

Sondierungsbohrungen sind das zentrale Verfahren der Baugrunderkundung und liefern die Grundlage für eine sichere und wirtschaftliche Bauwerksgründung. Der Stand der Technik ist durch eine Vielzahl von ÖNORMEN und Qualitätsanforderungen geprägt. Die eingesetzten Bohrverfahren sind technisch ausgereift, erfordern jedoch meist schwere und aufwendige Bohrgeräte, deren Einsatz in exponierten Lagen stark eingeschränkt ist. Innovative Entwicklungen im Bereich der Bohrtechnik bieten hier neue Lösungsansätze, stehen aber noch am Anfang ihrer breiten Anwendung. Die von HTB entwickelte Kernbohrlafette stellt einen bedeutenden Fortschritt im Bereich der geotechnischen Erkundungsbohrungen dar. Durch die Kombination aus Flexibilität, Modularität, innovativer Technik und hoher Kernqualität eröffnet sie neue Möglichkeiten für die geologische und geotechnische Untersuchung selbst unter schwierigsten Bedingungen.

## **Abstract**

*Exploratory boreholes are the central method of ground investigation and provide the foundation for safe and economical structural foundations. The current state of the art is characterized by a multitude of ÖNORM standards and quality requirements. The drilling methods used are technically advanced but generally require heavy and complex drilling equipment, the use of which is severely limited in exposed locations. Innovative developments in drilling technology offer new solutions in this area, but are still at the beginning of widespread application. The core drilling rig developed by HTB represents a significant advancement in the field of geotechnical exploratory drilling. By combining flexibility, modularity, innovative technology, and high core quality, it opens up new possibilities for geological and geotechnical investigations, even under the most challenging conditions.*

---

## 1. Vorstellung der HTB Baugesellschaft m.b.H.

Die HTB Baugesellschaft m.b.H. ist ein seit 1988 bestehendes Bauunternehmen mit Hauptsitz in Arzl im Pitztal (Tirol) und Teil der Swietelsky Unternehmensgruppe. Mit über 750 Mitarbeiter: innen zählt die HTB zu den führenden Spezialisten in den Bereichen Hochgebirgsbau, Spezialtiefbau, Hängebrückenbau, Holzbau, Trockenbau, Fliesen, Hochbau, Maschinenbau, Stahlbau sowie als Generalunternehmer.

Das Unternehmen ist nach den internationalen Standards ISO 9001:2015, ISO 14001:2015 und ISO 45001:2018 zertifiziert und zeichnet sich durch technisches Know-how, Flexibilität und Innovationskraft aus.

Die HTB betreibt weitere Niederlassungen in Nüziders, Zirl, Roppen, Schwoich, Fusch, Klagenfurt und Wels, wodurch eine enge Zusammenarbeit mit lokalen Auftraggebern gewährleistet wird. Das Betätigungsgebiet erstreckt sich über den gesamten deutschsprachigen Raum und die angrenzenden Länder. Aufgrund unserer speziellen Fachkenntnisse wurden auch Projekte in Kroatien, Bulgarien, Spanien, Norwegen, Irland, Italien und Indien abgewickelt.

HTB steht für maßgeschneiderte Lösungen, eigene Patente und termingerechte Ausführungen – und genießt seit Jahrzehnten das Vertrauen von Behörden, Gemeinden, Industriebetrieben, Seilbahnbetreibern und privaten Bauherren.

## **2. Baugrunderkundung: Fundament für sicheres Bauen in herausfordernden Lagen**

Die Anforderungen an moderne Bauprojekte steigen stetig – nicht nur in Bezug auf Technik und Nachhaltigkeit, sondern auch hinsichtlich der Lage der Baustellen. Immer häufiger befinden sich Bauvorhaben in exponierten, schwer zugänglichen oder geologisch komplexen Gebieten: Steile Hänge, alpine Regionen, urbane Verdichtungs-räume oder Gebiete mit schwierigen Bodenverhältnissen. In solchen Fällen wird die gründliche Untersuchung des Baugrunds zur unverzichtbaren Voraussetzung für die Planung und Ausführung.

## **3. Baugrunderkundung in Tirol: Schlüssel zur sicheren Erschließung exponierter Lagen**

Tirol steht wie kaum ein anderes Bundesland für herausfordernde Topografie: steile Hänge, alpine Täler, instabile Moränen, hochgelegene Plateaus und enge Siedlungsräume prägen das Landschaftsbild. Gleichzeitig wächst der Bedarf an Infrastruktur, Wohnraum und touristischen Einrichtungen – oft in genau diesen exponierten Lagen. Damit rückt die Baugrunderkundung zunehmend in den Fokus von Planern, Behörden und Bauunternehmen.

## **4. Sondierungsbohrungen als Basis für sichere Bauprojekte**

Die geologischen Verhältnisse in Tirol sind komplex und regional stark unterschiedlich. Von lockerem Schotter in Talböden über Felsformationen im Hochgebirge bis hin zu Hanglagen mit Rutschgefahr – ohne präzise Kenntnis des Untergrunds ist eine sichere Planung kaum möglich. Sondierungsbohrungen liefern hier entscheidende Informationen:

- Tragfähigkeit und Zusammensetzung des Bodens
- Grundwasserverhältnisse und Drainagepotenzial
- Hinweise auf geologische Störungen oder Hohlräume
- Risiken wie Setzungen, Hangrutschungen oder Lawinen

- Diese Daten sind nicht nur für die Statik und Gründung von Bauwerken relevant, sondern auch für Umweltverträglichkeitsprüfungen und Genehmigungsverfahren.

## 5. Stand der Technik: Normen und Qualitätsanforderungen

Die Durchführung von Sondierungsbohrungen ist in Österreich durch eine Vielzahl von ÖNORMEN geregelt, insbesondere durch:

- ÖNORM B 1997-2: „Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik – Teil 2: Erkundung und Untersuchung des Baugrunds – Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1997-2 und nationale Ergänzungen“
- ÖNORM B 4401: „Geotechnik – Zusammenhang zwischen Bohrverfahren, Güteklassen von Bodenproben und Probenmengen für geotechnische Laboruntersuchungen“
- ÖNORM B 4419: „Geotechnik – Besondere Rammsondiervverfahren“

Diese Normen definieren die Anforderungen an die Probenahme, die Dokumentation und die Qualifikation des Personals.

## 6. Gängige Bohrverfahren zur Baugrunderkundung

### Übersicht der Bohrverfahren

Für die Baugrunderkundung stehen verschiedene Bohrverfahren zur Verfügung, die je nach Baugrund, Zielsetzung und Zugänglichkeit des Bauplatzes ausgewählt werden. Die wichtigsten Verfahren sind:

Trockenbohrung (Schneckenbohrung): Einsatz von Endlos- oder Hohlbohrschnecken, geeignet für nichtbindige und wenig bindige Böden.

Spülbohrung: Verwendung von Wasser oder Luft als Spülmedium, um das Bohrklein aus dem Bohrloch zu fördern; geeignet für bindige Böden und größere Tiefen.

Kernbohrung: Gewinnung von ungestörten Bohrkernen, insbesondere in Festgestein; häufig mit Doppelkernrohrsystemen.

Rammkernbohrung: Kombination aus Rammen und Bohren, insbesondere für Lockergesteine.

Seilkernbohrung: Einsatz bei großen Tiefen und zur Gewinnung langer, ungestörter Bohrkern.

Rotationsbohrung: Vielseitig einsetzbar, auch für schwierige Bodenverhältnisse und große Tiefen.

Die Auswahl des Verfahrens richtet sich nach den zu erwartenden Bodenarten, der erforderlichen Probengüte und den geplanten Feldversuchen

### Durchführung und Geräte

Die Bohrungen werden in der Regel mit schweren Bohrgeräten durchgeführt, die auf Raupenfahrwerken oder als Bohrwagen ausgeführt sind. Diese Geräte verfügen über leistungsstarke Antriebe und Hydrauliksysteme, um auch in großen Tiefen und bei schwierigen Bodenverhältnissen arbeiten zu können. Das Gewicht solcher Geräte liegt häufig bei mehreren Tonnen, was den Transport und die Mobilisierung auf der Baustelle aufwendig macht

## 7. Feldversuche und Probenahme

Während und nach der Bohrung werden verschiedene Feldversuche durchgeführt, um die Eigenschaften des Baugrunds direkt vor Ort zu bestimmen. Zu den wichtigsten Verfahren zählen

Standard Penetration Test (SPT): Bestimmung der Lagerungsdichte von Sanden und Kiesen (geregelt in ÖNORM EN ISO 22476-3).

Pressiometerversuch: Messung der Verformbarkeit und Festigkeit des Bodens (ÖNORM EN ISO 22476-4).

Flügelverscherversuch: Ermittlung der Scherfestigkeit von bindigen Böden (ÖNORM EN ISO 22476-9).

Rammsondierungen: Indirekte Ermittlung der Lagerungsdichte und Schichtgrenzen (ÖNORM B 4419).

Die Proben werden nach Güteklassen (A, B, C) eingeteilt, wobei Klasse A die höchsten Anforderungen an die Unversehrtheit und Repräsentativität stellt (geregelt in ÖNORM B 4401)

## 8. Einschränkungen und Herausforderungen in exponierten Lagen

Ein zentrales Problem bei der Durchführung von Sondierungsbohrungen ist die Zugänglichkeit des Bauplatzes. Die meisten Bohrverfahren erfordern den Einsatz schwerer Bohrgeräte, die nur auf befestigten Wegen oder ebenem Gelände transportiert und betrieben werden können. In exponierten Lagen, wie steilen Hängen, alpinen Regionen oder schwer zugänglichen Baustellen, ist der Einsatz dieser Geräte oft nur mit erheblichem logistischem Aufwand oder gar nicht möglich.

Die Mobilisierung schwerer Bohrgeräte in solche Gebiete erfordert häufig den Einsatz von Spezialtransporten und die Errichtung temporärer Zufahrten. Dies führt zu erheblichen Kostensteigerungen, Flurschäden und Zeitverzögerungen. Zudem sind die Arbeitsbedingungen für das Personal erschwert, und die Einhaltung von Arbeitsschutz- und Umweltschutzauflagen ist besonders herausfordernd.

In der Praxis bedeutet dies, dass in exponierten Lagen häufig auf indirekte Erkundungsverfahren (z. B. geophysikalische Methoden) ausgewichen werden muss, die jedoch nicht die gleiche Aussagekraft wie direkte Bohrungen besitzen.

## 9. Exponierte Tiroler Baustellen erfordern Speziallösungen

Um die genannten Einschränkungen zu überwinden war es das Ziel der HTB, zunehmend leichtere und modular aufgebaute Bohrsysteme zu entwickeln, die auf kleinere Trägergeräte montiert oder in Einzelteilen transportiert werden können. Solche Systeme ermöglichen es, auch in schwer zugänglichen Lagen hochwertige Baugrunderkundungen durchzuführen, ohne auf die Vorteile direkter Bohrungen verzichten zu müssen.

Ob es sich um den Bau einer Bergbahnstation, eines Lawinenschutzbauwerks oder eines Speicherteichs im Gebirge handelt – die Tiroler Baupraxis zeigt: Standardlösungen reichen oft nicht aus. Die Erschließung solcher Standorte verlangt nach spezialisierten Bohrtechniken, mobilen Geräten für schwer zugängliche Gelände und erfahrenen Fachleuten, die mit alpinen Bedingungen vertraut sind. In Tirol, wo Baugrund knapp und teuer ist, zahlt sich eine

frühzeitige Untersuchung doppelt aus. Sie verhindert Fehlplanungen, reduziert das Risiko von Nachträgen und Bauverzögerungen und ermöglicht eine ressourcenschonende Umsetzung. Besonders bei öffentlichen Projekten – etwa Straßenbau, Tunnelbau oder Schutzmaßnahmen – ist die Baugrunderkundung ein zentraler Bestandteil der Projektentwicklung.

## 10. Entwicklung und Anwendung einer innovativen Kernbohrlafette für geotechnische Sondierungsbohrungen am Beispiel der Baustelle Vermiel in St. Gallenkirch

### Baustellenbeschreibung

Die Baustelle diente den Erkundungsbohrungen im Bereich des geplanten Speichers Vermiel im Skigebiet Silvretta Montafon. Die Arbeiten umfassten folgende Hauptmaßnahmen:

#### 1. Baustelleneinrichtung und -räumung

- Einrichtung von Baubaracken, Büros, Werkstätten, sanitären Anlagen etc.
- Herstellung von Absperrungen, Strom-, Wasser- und Abwasseranschlüssen
- Aufstellen von Verkehrszeichen und Zufahrtsregelung über Forstwege

#### 2. Bohrarbeiten zur Untergrunderkundung

- Durchführung von Rotationskernbohrungen in Lockergestein und Festgestein bis zu Tiefen von 40 Metern.
- Einsatz von Schreitbaggern mit Kerngewinnungslafette zur Gewinnung und Bereitstellung der Bohrkerne in Kernkisten
- Dokumentation der Bohrungen gemäß ÖNORM EN ISO 22475-1:2021

#### 3. Mess- und Prüfverfahren

- Einbau von Inclinometern zur Messung von Bodenbewegungen
- Durchführung von SPT-Versuchen (Standard Penetration Test) zur Bodenklassifikation
- Laboranalysen durch das HTB-Labor zur Auswertung der Bohrkerne

### Konzept zur Realisierung der Baustelle

Die Firma HTB hat eine neuartige Kernbohrlafette konzipiert und realisiert, die es ermöglicht, geotechnische Kernbohrungen unter unterschiedlichsten topografischen und geologischen Bedingungen effizient und qualitativ hochwertig durchzuführen. Ziel dieser Entwicklung war es, die Flexibilität und Einsatzfähigkeit bei Erkundungsbohrungen signifikant zu erhöhen und gleichzeitig die Qualität der gewonnenen Bohrkerne zu optimieren.

## 11. Trägergeräte und Mobilität

Die neuartige Kernbohrlafette der HTB ist so konstruiert, dass sie auf verschiedene Trägergeräte montiert werden kann. Einerseits kann ein konventioneller Hydraulikbagger, beispielsweise ein Raupen- oder Bohrbagger mit einem Eigengewicht von etwa 27 Tonnen, als Träger dienen. Die erforderliche Hydraulikleistung für den Betrieb der Bohrlafette wird dabei direkt vom Trägergerät bereitgestellt. Andererseits besteht die Möglichkeit, einen Schreitbagger

einzusetzen, der sich insbesondere durch seine hohe Geländegängigkeit und Flexibilität in schwer zugänglichem Terrain auszeichnet. Diese Vielseitigkeit der Trägergeräte ermöglicht den Einsatz der Kernbohrlafette auch in exponierten Lagen, wie sie beispielsweise im alpinen Raum häufig anzutreffen sind.

Ein weiterer wesentlicher Vorteil des Systems ist die Möglichkeit, die Bohrlafette für den Transport in zwei oder drei Segmente zu zerlegen. Dadurch kann sie mittels Hubschrauber oder anderen Transportmitteln auch in abgelegene oder schwer erreichbare Einsatzorte verbracht werden. Diese Modularität trägt maßgeblich zur Erweiterung des Einsatzspektrums bei.

- Gewicht der Kernbohrlafette: ca. 2800 kg
- Version „flugtauglich 2-teilig“: ca. 1450 kg
- Version „flugtauglich 3-teilig“: ca. 940 kg



Abb. 1: Kernbohrlafette auf Raupenbagger



Abb.2: Kernbohrlafette auf Schreitbagger

## 12. Technischer Aufbau und Funktionsweise

Das Kernbohrsystem basiert auf einer Außenverrohrung, die sukzessive in die Tiefe eingebracht wird. Der eigentliche Kernfänger wird über ein Rückhaltegestänge geführt und ermöglicht die Entnahme von Bohrkernen in unterschiedlichen Tiefenstufen. Das System ist für Bohrungen sowohl in Lockergestein als auch in Festgestein ausgelegt. Die gewonnenen Bohrkern weisen einen Durchmesser von 120 mm auf, was eine detaillierte geologische Analyse erlaubt. Für die unterschiedlichen geologischen Bedingungen stehen spezifische Bohrkronen zur Verfügung, die einen optimalen Bohrfortschritt und eine hohe Kernqualität gewährleisten.

Bei Bohrungen in Festgestein wird Wasser als Spülmedium eingesetzt, um die Bohrkronen zu kühlen und das Bohrklein in den Kernfänger einzutragen. Im Lockermaterial hingegen wird bewusst auf den Einsatz von Spülung verzichtet, um eine Beeinträchtigung der Probe zu vermeiden. Die Auswahl des geeigneten Kernfängers erfolgt in Abhängigkeit von der jeweiligen Bodenbeschaffenheit.

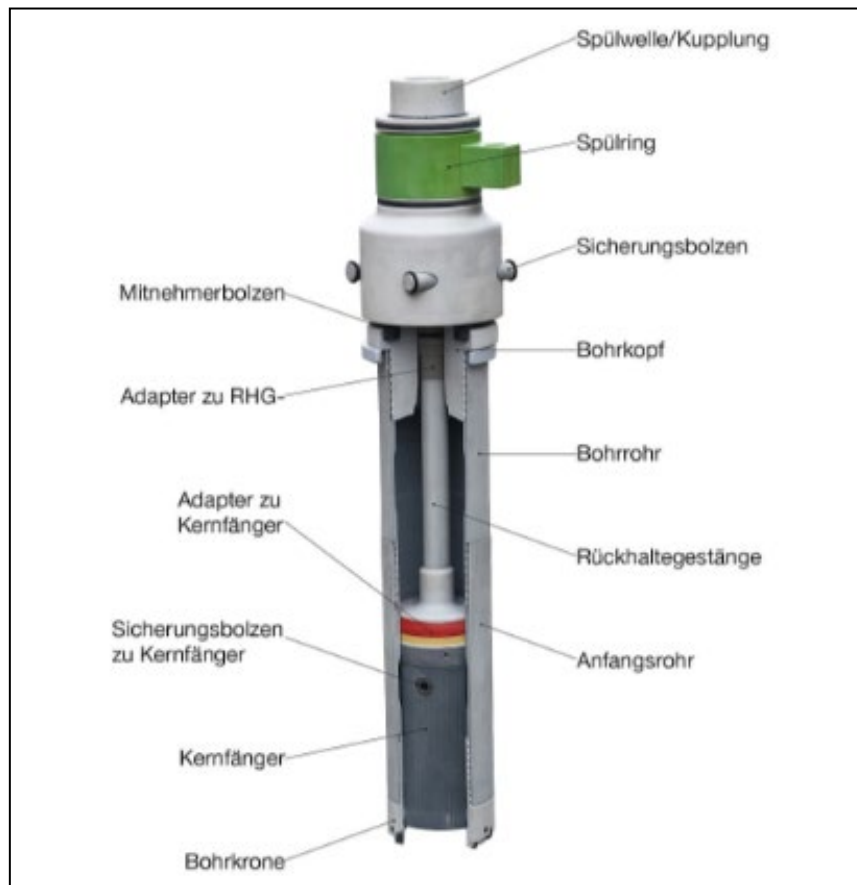


Abb.3: Schematische Darstellung des patentierten Kernfänger- und Spülsystems

### 13. Innovationen und Alleinstellungsmerkmale

Ein zentrales Alleinstellungsmerkmal des Systems ist das patentierte Adaptersystem zum Kernfänger. Dieses gewährleistet, dass das Spülmedium gezielt um den Bohrkern herumgeleitet wird, sodass der Kern während des Bohrvorgangs ungestört bleibt. Insbesondere bei Festgesteinsbohrungen dient die Spülung ausschließlich der Kühlung und wird so geführt, dass ein Eindringen in den Kern vermieden wird. Dadurch können besonders hochwertige, unverfälschte und für geotechnische Analysen aussagekräftige Bohrkern gewonnen werden.

Das Rückhaltegestänge ist leicht und handlich konstruiert (weniger als 4 kg pro Meter), was die Handhabung auf der Baustelle erleichtert und einen zügigen Bohrfortschritt ermöglicht. Die Ausbaufunktion mit einer Rollenbatterie trägt zusätzlich zur Effizienz des Systems bei. Die Dokumentation der Bohrungen erfolgt durch den Bohrmeister, der sämtliche geologischen Besonderheiten wie Hohlräume, Wasserzutritte oder Schichtwechsel detailliert

protokolliert. Hohlräume werden während des Bohrvorgangs erkannt und dokumentiert, was eine präzise geotechnische Bewertung ermöglicht.

Protokolle Erkundungsbohrungen gem. ÖNORM EN ISO 22475-1:2021 - Probeentnahmeprotokoll							
Projekt: Erkundungsbohrung Vermitt Speicher St. Gallenkirch		Kostenstelle: 01 25 11 21					
Auftraggeber: Silvestra Montafon Holding GmbH		Seite: 1					
Verfasser: Strauß A.		Datum: 04.04 - 07.04.2025					
Bohrlochnummer: KB 2 Lage: Speicherteich Vermitt Neigung der Bohrung: → Richtung der Bohrung: → Vertikal Tiefe der Bohrung: 20 m Bohrverfahren: Rotationskernbohrverfahren (RC); Rammrotationskernbohrverfahren (RRC) Bohrdurchmesser: 150 mm Bohrkronen: Schlagbohrkrone Entnahmewerkzeug: Doppelkernrohr mit Kernfangring Bohrerart: Menzi Muck S25X Bohrmmeister: Strauß Alexander							
Tiefe/Kernmarsch	Bohrverfahren	Probe		Härte			Anmerkungen
Von [m]	Bis [m]	RC oder RRC	Länge [mm]	φ [mm]	1	2	3
0	1	RRC	1000	120	x		
1	2	RRC	1000	120	x		
2	3	RRC	1000	120	x		
3	4	RRC	1000	120	x		
4	5	RRC	1000	120	x		
5	6	RRC	1000	120	x		SPT-Sondierung
6	7	RRC	1000	120	x		
7	8	RRC	1000	120	x		
8	9	RRC	1000	120	x		
9	10	RRC	1000	120	x		
10	11	RRC	1000	120	x		SPT-Sondierung
11	12	RRC	1000	120	x		
12	13	RRC	1000	120	x		
13	14	RRC	1000	120	x		
14	15	RRC	1000	120	x		
15	16	RRC	1000	120	x		SPT-Sondierung / Wasser
16	17	RRC	1000	120	x		Wasser
17	18	RRC	1000	120	x		Wasser
18	19	RRC	1000	120	x		Wasser
19	20	RRC	1000	120	x		Wasser
AN (Datum; Unterschrift)				AG/ÖBA (Datum; Unterschrift)			



Abb.4 und 5: Bohrprotokoll und Kerndokumentation

Ein weiterer Vorteil des Systems besteht darin, dass mit ein und demselben Aufbau sowohl Lockermaterial als auch Festgestein gebohrt werden kann. Ein Wechsel der Bohrkronen genügt, um sich an die veränderten geologischen Bedingungen anzupassen. Bei Bedarf kann mit einem größeren Durchmesser im Lockermaterial begonnen und anschließend mit einem kleineren Durchmesser im Festgestein weitergearbeitet werden. Durch den Einsatz dieser unterschiedlichen Bohrdurchmesser können die Bohrungen teleskopiert werden, wodurch die Böden in noch größeren Tiefen aufgeschlossen werden können.

Die neuartige Ausstoßvorrichtung zur Kernentnahme wurde ebenfalls eigens entwickelt und basiert auf einem hydraulischen Prinzip, bei dem der Kern durch die Verrohrung herausgedrückt wird. Der Kernfänger wird über eine einfache Bolzensicherung mitgeführt, wodurch die Konstruktion besonders robust und wartungsarm ist. Dies erhöht die Betriebssicherheit und minimiert das Ausfallrisiko auch unter anspruchsvollen Einsatzbedingungen.



Abb.6 und 7: Hydraulische Kernausstößvorrichtung

## 14. Praktische Anwendung und Referenzen / Projektüberblicke

### Baustelle Vermiel / St. Gallenkirch

Das System wurde bereits auf mehreren Baustellen erfolgreich eingesetzt. Besonders hervorzuheben ist dieses bereits angeführte Projekt, bei dem aufgrund von engen Zeitvorgaben und laufendem Skibetrieb die Bohrungen mit einem Schreitbagger als Trägergerät durchgeführt werden mussten. Die hohe Flexibilität und Effizienz des Systems ermöglichte eine termingerechte und qualitativ hochwertige Durchführung der Erkundungsbohrungen.

Erkundungsbohrungen (KB 01 bis KB 06), Bohrtiefen 20–27 m.

Bohrlochausbau mit Inklinometer



Abb.8: Antransport der Kernbohrungsgerätschaften zum Einsatzort



Abb.9: Einsatz der Kernbohrlafette montiert auf einem Schreitbagger

Das System wurde bereits bei weiteren Baustellen erfolgreich eingesetzt:

Erkundungsbohrungen Dornbirn ---> Bohrtiefe 20m Lockermaterial

Erkundungsbohrungen Dalaas ----> Bohrtiefe 70m Lockermaterial/Gips

Erkundungsbohrungen Zürs ---> Bohrtiefe 11m Lockermaterial/Fels

Erkundungsbohrungen Lech ---> Bohrtiefe 22m Lockermaterial/Fels

# Nicht invasive, flächendeckende Herleitung der dynamisch abgeleiteten gesteinsmechanischen Elastizitätskonstanten mittels Low Cost 3D Hybridseismik

W. Frei<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Frei Engineering Seismology Consult

## Kurzfassung

Die quantitative, nicht-intrusive 3D Bestimmung der elastischen Gesteinseigenschaften ist für geotechnische und hydrogeologische Anwendungen von zentraler Bedeutung. Von einem Datensatz bestehend aus einem Netz hochauflösender hybridseismischer Messlinien werden refraktionstomographisch die p- und s- Wellengeschwindigkeitsfelder bestimmt.

Auf dieser Grundlage lassen sich die gesteinsmechanischen Elastizitätsmoduli (z. B. Young's E-Modulus, Schermodul G, Kompressionsmodul K, und die Poisson'sche Querdehnungszahl) räumlich konsistent herleiten. Das Ergebnis ist die flächendeckende 3D-Verteilung der dynamischen Elastizitätskonstanten im Untergrund, dargestellt in Form von sog. Moduluswert - Tiefenscheiben (*modulus – depth slices*) mit Tiefenabständen von wahlweise 1 m bis 5 m.

Die Herleitung der reflexionsseismischen Tiefenprofile dient einerseits zur detailgenaueren Abbildung tektonischer Strukturen und andererseits zur Absicherung der Qualität der refraktionstomographischen Geschwindigkeitsfelder mittels reziproker Überprüfung der räumlichen Deckungsgleichheit der refraktions- und reflexionsseismisch abgebildeten Strukturelemente.

## Abstract

*The quantitative, comprehensive and non-intrusive determination of dynamic elastic rock properties is of key importance for geotechnical and hydrogeological applications. The p- and s-wave velocity fields are determined by using refraction tomography from a data set consisting of a network of high-resolution hybrid seismic lines.*

*On this basis, the dynamic rock mechanical elasticity moduli e.g.*

- *Young's modulus  $E_{dyn}$ ,*
- *Shear modulus  $\mu$ ,*
- *Compression modulus  $K$ , and*
- *Poisson's ratio  $\sigma$*

*can be derived spatially consistently as a 2D depth section. Furthermore, the comprehensive 3D distribution of the dynamic elasticity constants in the subsurface is represented in the form of so-called modulus-depth slices with depth intervals of either 1 m or 5 m.*

*The hybrid seismic joint derivation of the reflection seismic depth profiles serves, on the one hand, to map geological-tectonic structures in greater detail and, on the other hand, to verify the quality of the refraction tomographic velocity fields by means of reciprocal checking of the spatial congruence of the structural elements mapped by refraction and reflection seismics.*

---

## 1. Einleitung

Die Bestimmung gesteinsmechanischer Elastizitätskonstanten erfolgt traditionell durch laborbasierte Analysen von Bohrkernen. Zwar liefern diese Verfahren hochpräzise Einzelwerte, ihre Aussagekraft bleibt jedoch aufgrund der begrenzten räumlichen Abdeckung und möglicher Veränderungen des Gefüges während der Probenentnahme eingeschränkt.

Nicht-invasive seismische Verfahren eröffnen demgegenüber die Möglichkeit, die dynamischen Elastizitätsparameter großflächig und in situ zu erfassen. Neben wirtschaftlichen Vorteilen gegenüber konventionellen

Bohrprogrammen ermöglicht die Hybridseismik die kontinuierliche Darstellung der Resultate in zweidimensionalen Tiefenschnitten. Dies ist eine wesentliche Grundlage für eine geomechanisch differenzierte und umfassende Charakterisierung des Untergrunds.

Der vorliegende Beitrag stellt die Low-Cost-3D-Hybridseismik vor, deren Ziel es ist, diese methodischen Stärken zu bündeln und die dynamischen Elastizitätsparameter nicht-invasiv und flächendeckend abzuleiten.

## 2. Methodische Grundlage

Das Verfahren der Hybridseismik – die kombinierte Anwendung von Refraktions- und Reflexionsseismik – bildet die methodische Basis für die kontinuierliche Ableitung dynamischer Elastizitätskonstanten. Aus einem Netz hochauflösender Messlinien werden zunächst mittels Refraktionstomographie die Geschwindigkeitsfelder der P- und S-Wellen ( $V_p$  &  $V_s$ ) bestimmt. In Kombination mit der Gesteinsdichte ( $\rho$ ) lassen sich daraus die für die geotechnische Charakterisierung relevanten elastischen Parameter herleiten:

$$\text{Young's } E_{\text{dyn}} \text{ Modul} \quad E_{\text{dyn}} = \rho V_s^2 \frac{3V_p^2 - 4V_s^2}{V_p^2 - V_s^2}$$

$$\text{Schermodul} \quad \mu = \rho V_s^2$$

$$\text{Kompressionsmodul} \quad K = \rho \left( V_p^2 - \frac{4}{3} V_s^2 \right)$$

$$\text{Poisson's ratio} \quad \sigma = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)}; \quad \frac{V_p}{V_s} = \sqrt{3}, \quad \text{entspricht einem ideal elastischen Körper mit } \sigma = 0.25$$

Die seismisch abgeleiteten Elastizitätskonstanten werden kontinuierlich als 2D-Tiefenschnitte dargestellt, wie das nachfolgende Fallbeispiel einer seismischen Vorerkundung bei einem Tunnelprojekt zeigt.

Der erste methodische Schritt besteht in der refraktionstomographischen Bestimmung der Geschwindigkeitsfelder. Parallel dazu wird ein reflexionsseismisches Profil erstellt, das zwar nicht unmittelbar zur Ableitung der Elastizitätskonstanten benötigt wird, jedoch als Referenz und Stabilisierungshilfe zur Validierung der refraktionstomographischen Ergebnisse dient.

Für die tomographische Inversion der Laufzeiten können unterschiedliche Ansätze herangezogen werden: einerseits analytisch nach dem arithmetischen CDP-Verfahren (Gebrande, 19xx), andererseits numerisch über die WET-Methode (Wave Eikonal Traveltime). Die Wahl erfolgt auf Grundlage einer visuellen Prüfung der **räumlichen Deckungsgleichheit** (*spatial coherence*) zwischen der mit Refraktionstomographie abgeleiteten Geschwindigkeitsverteilung und dem Reflexionsseismik-Tiefenschnitt in Bezug auf Strukturlagen und tektonisch-geologische Elemente.

Die gemeinsame Darstellung der Elastizitätskonstanten im reflexionsseismischen Kontext – vergleichbar einem hybridseismischen Tiefenprofil – ermöglicht es schließlich, die quantitativen Materialeigenschaften direkt in den strukturellen Aufbau des Untergrundes einzubetten. Für Geologen und Geotechniker stellt dies ein besonders aussagekräftiges Instrumentarium dar, das Strukturinformation und Materialparameter in einer integrierten Form vereint.

### 3. Die 2D-Darstellung geotechnischer Elastizitätskonstanten in einem Tiefenschnitt

#### 3.1. Beschreibung der Feldarbeiten und der Datenerfassungsparameter

Im Rahmen der geologisch-geotechnischen Vorabklärung eines von der EU mitfinanzierten Projekts für einen 1 km langen Autobahntunnel in Rumänien wurde die Erstellung eines Tiefenprofils des dynamischen Elastizitätsmoduls  $E_{dyn}$  vereinbart.

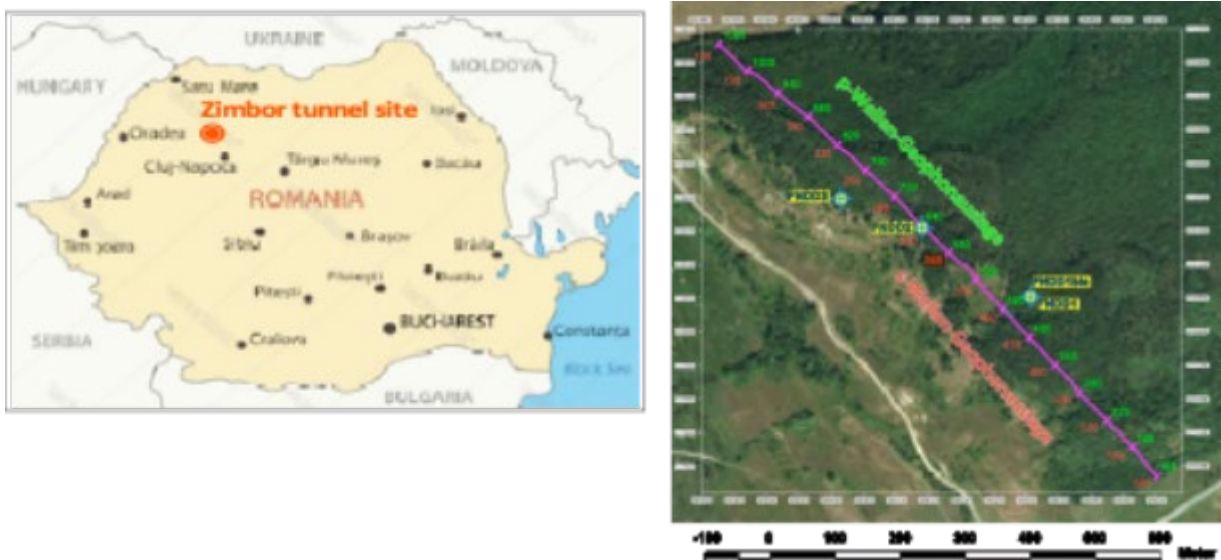



Abb. 1: Lokalität des geplanten Tunnels im nordwestlichen Rumänien (links) und Situation der seismischen Messlinie mit der P-Wellen-Geophonauslage (in grün) und der S-Wellen-Geophonauslage (in rot).

Auf dem Deckblatt (s. Abb. 2) der einzelnen Graphiken der Tiefenschnitte mit den Ergebnissen der Elastizitätskonstanten und der seismischen Profile sind jeweils die Messparameter der Datenerfassung aufgeführt.

# TEHNOSTRADE SRL

## Transsylvania Motorway Zimbor Tunnel Site



**Combined p- & s-wave seismic refraction tomography  
with reflection seismic profiling and derivation of  
dynamic rock mechanic elasticity moduli**

### Hybrid seismic line 22ZIMB-1

**Field data acquisition parameters**

Spread layout	split-spread of varying asymmetry	CDP-distance	p-wave 0.5 m / s-wave 1.0 m
Number of channels	p-wave max. 320 / s-wave 160	Coverage	50- / 25-fold (nominal)
Geophone station interval	p-wave 1.0 m / s-wave 2.0 m	Instrumentation	Seismic Instruments Inc.
Geophone type	10 Hz	Sampling rate	0.5 ms
Geophone pattern	1 geophone / station	Recording time	1024 ms
Source interval	p-wave 3.0 m / s-wave 6 m	Field filters	LC 4 Hz / HC anti-alias
Source type	8 kg hammer / shear wave beam	Recorded by	D. Martin
Seismic crew	W.Frei	Date	7. - 11. March 2022

**Reflection seismic data processing sequence**

- 1 Reformatting and gain recovery
- 2 Line geometry and survey data assignment
- 3 Data verification, editing and analysis
- 4 Trace amplitude balancing and sliding window AGC (40 - 200 ms)
- 5 Spectral whitening using 2 windows 8-25-55-70 Hz & 25-55-100-140 Hz, 150 ms AGC window
- 6 Band pass filter (25 Hz (8 db) - 140 Hz (24 db))
- 7 CDP-sort and velocity analysis (velocity field taken from refraction tomography inversion)
- 8 NMO-correction (30% automatic stretch mute) & trim statics
- 9 CDP stack
- 10 Butterworth band pass filter (30 Hz / 4 db - 140 Hz (30 db))
- 11 Automatic Gain Control 100 ms
- 12 Coherence Filter & Trace Mix
- 13 Time-Depth conversion using the velocity functions derived under point 7 and by refraction tomography
- 14 Elevation static shifts and final display

**Refraction seismic data processing sequence (diving wave tomography)**

- 1-3 dto.
- 4 Refraction arrival picking
- 5 CMP-sort of first break picks
- 6 Analytical derivation of the refraction tomography velocity field using Gebrande's arithmetic CMP method
- 7 Optional iterative Wavepath Eikonal Traveltime (WET) tomographic modeling inversion using 50 iterations
- 8 Display of velocity field

Abb. 2: Side label der seismischen Sektionen und der Tiefenschnitte der Elastizitätskonstanten mit den Angaben über die Datenerfassung und der EDV seismischer Daten

Die seismische Quelle für die p-Wellenanregung sind Schläge mit einem 8 kg schweren Hammer auf eine Stahlplatte. Die Anregung der Scherwellendaten erfolgt mit Hammerschlägen an einen mit Gewichten und Bolzen am Boden fixierten Scherwellenbalken, wie unten in Abb. 3 illustriert.



Abb. 3: Anregung von s-Wellen durch Schläge mit einem 12 kg Hammer an den mit Stahlkappen versehenen Scherwellenbalken. Dessen Unterseite ist zur besseren Haftung am Boden mit Winkelisen bestückt. Auf asphaltiertem Untergrund dient als Fixierlast ein schwereres Motorfahrzeug mit einer Auf-fahrrampe auf den Balken.

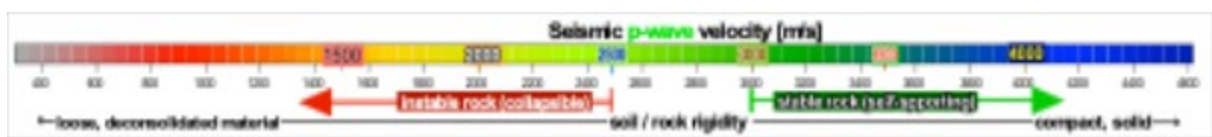
### 3.2. Die hybridseismischen Voraussetzungen zur Herleitung der Elastizitätsmoduli

Abb. 4 unten zeigt in vier Graphiken den hybridseismischen Ablauf der p-Wellendatenauswertung: In der obersten Darstellung (1) sind die Verteilung entlang des rund 950 m langen Profils der refraktionstomografisch abgeleiteten seismischen Geschwindigkeiten, und in (2) das aufgrund dieser Geschwindigkeitsverteilung hergeleitete reflexions-seismische Tiefenprofil dargestellt. (3) zeigt das nicht interpretierte und (4) das interpretierte Hybridseismikprofil.

Die Herleitung des dynamischen Elastizitätsmoduls setzt voraus, dass in Abb. 4 sich die Ergebnisse der refraktionstomografischen Geschwindigkeitsverteilung in der obersten Darstellung (1) und dem reflexionsseismischen Tiefenprofil in (2) geologisch-tektonische Strukturelemente in den Profilabschnitten A bis G hinsichtlich Ausdehnung und Tiefenage räumlich deckungsgleich abbilden müssen. Nur dann kann von einer hybridseismischen authentischen EDV gesprochen werden. Diese **räumliche Übereinstimmung** (*spatial consistency*) wird in der gemeinsamen Darstellung des Hybridseismikprofils in (3) sichtbar und ist auch für nicht fachkundige Beobachter nachvollziehbar.

Die Reflexionsseismik dient hierbei ausschließlich der Validierung des refraktionstomographischen Geschwindigkeitsfeldes. In der Regel ist jedoch nur das unmigrierte reflexionsseismische Profil dazu geeignet. Im oberflächennahen, komplex strukturiertem Tiefenbereich stören die Nebenwirkungen der Migration in Form niederfrequenter, uninterpretierbarer Artefakte zu stark.

Für die Interpretation des Hybridseismikprofils **(4)** ist zu berücksichtigen, dass einzig die schwarz-weiß markierten Bruch- und Störungszonen einen subjektiven Beitrag zur Interpretation darstellen. Dagegen beruht die rot hervorgehobene Isogeschwindigkeitskontur von 2500 m/s direkt auf dem refraktionstomographischen Feld **(1)**. Sie kennzeichnet innerhalb der Verwitterungszone eines Festgesteins die Grenze, oberhalb derer das Gestein nicht mehr als standfest einzustufen ist, vgl. Legende der Farbkodifizierung:



Bei Geschwindigkeiten von mehr als 3000 m/s ist von standfestem Fels auszugehen, der im Tunnelvortrieb mit einer TBM keine Einsturzgefahr erwarten lässt. Im Intervall zwischen 2500 m/s und 3000 m/s hängt die Standfestigkeit von der jeweiligen Lithologie sowie von Art und Ursache der Gefügestörung ab.

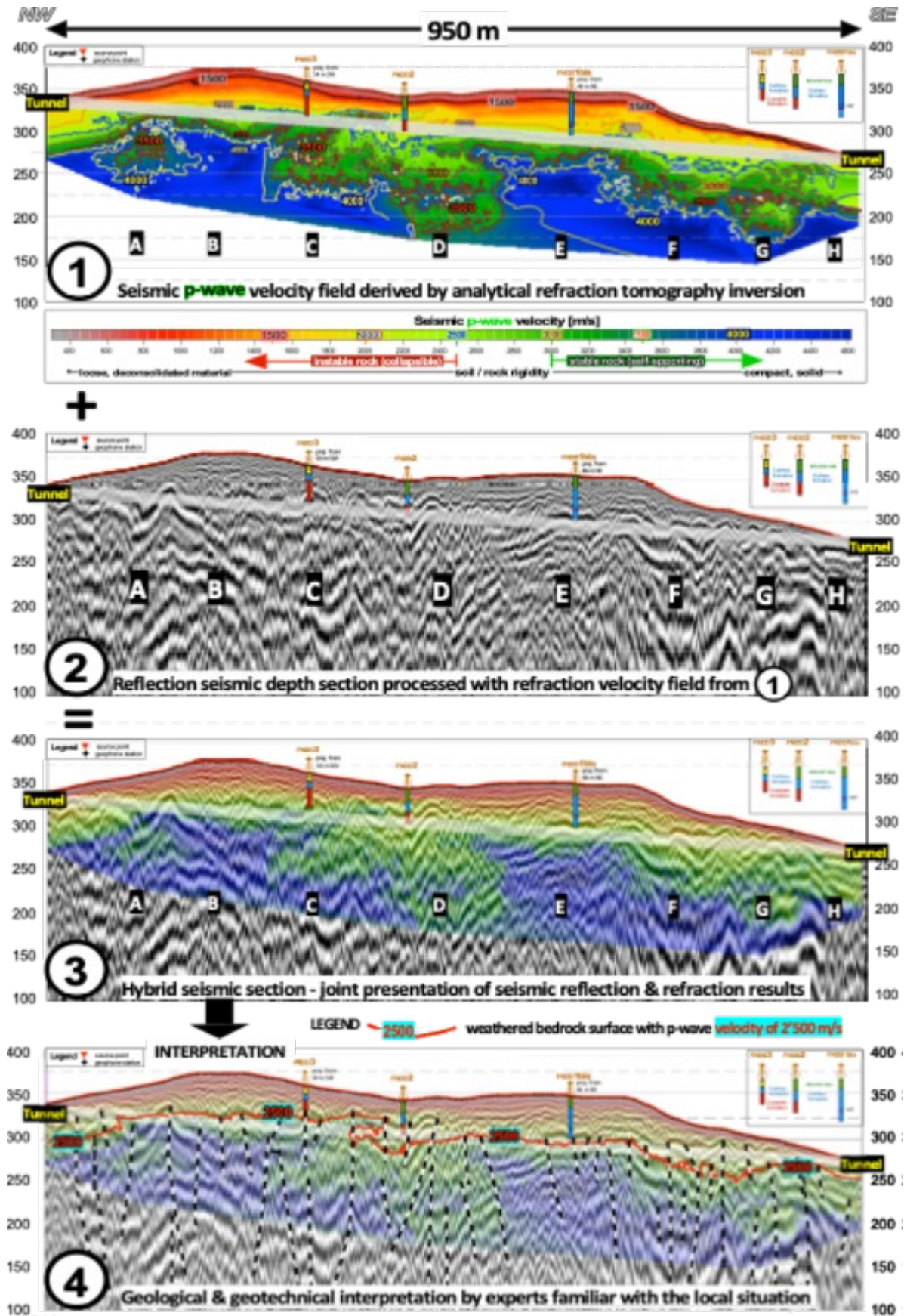


Abb. 4: Die vier Schritte der hybridseismischen Datenauswertung, bildlich dargestellter Ablauf

Praktische Hinweise für eine authentische Hybridseismik

Bei der Planung hybridseismischer Untersuchungen ist zu berücksichtigen, dass die durch refraktions-tomographische Verfahren erzielbare Erkundungstiefe unmittelbar von der Länge der aktiven Geophonauslage abhängt. Abhängig vom strukturellen Aufbau des Untergrunds muss die Auslage in der Regel das Drei- bis Vierfache der angestrebten Erkundungstiefe betragen. Verlässliche Ergebnisse werden dabei primär im zentralen Bereich, d. h. über etwa die mittlere Hälfte der Auslage, erzielt. In den Randzonen, die jeweils etwa ein Viertel der Auslage umfassen, treten infolge rechnerischer Randeffekte signifikante Ungenauigkeiten in der Erkundungstiefenverteilung auf. Durch die Anordnung von sogenannten Fernschüssen, d. h. Anregungspunkten in Verlängerung ausserhalb der Auslage, kann die Erkundungstiefe jedoch erweitert werden.

In Abb. 5 sind in den Darstellungen **(1)** und **(2)** die refraktionstomographischen Geschwindigkeitsfelder der P- und der S-Wellendaten nachträglich der analytisch-arithmetischen Herleitung als Initialmodell für eine iterative WET (**W**ave **E**ikonal **T**raveltime) Modellierung unterworfen worden. Letztere vereinfacht das Geschwindigkeitsfeld für weitere Verwendungen wie die Herleitung der dynamischen Elastizitätskonstanten  $E_{dyn}$  in der Darstellung **(3)**, wie auch die Formatwandlung der intrinsischen refraktionstomographisch abgeleiteten Geschwindigkeiten ins Format der reflexionsseismischen Stapelgeschwindigkeiten.

Die **WET-Modellierung** (*Wave Eikonal Traveltime Modelling, manchmal auch Wave-Equation Traveltime Tomography genannt*) ist ein numerisches Verfahren, das auf der Lösung der **Eikonal-Gleichung** basiert und zur Bestimmung von Wellenlaufzeiten (Traveltimes) in komplex aufgebauten Geschwindigkeitsmodellen dient. Sie verbindet Konzepte der klassischen Strahlentheorie (Ray Tracing) mit einer wellenbasierten Darstellung, wodurch eine stabilere und robustere Modellierung möglich wird.

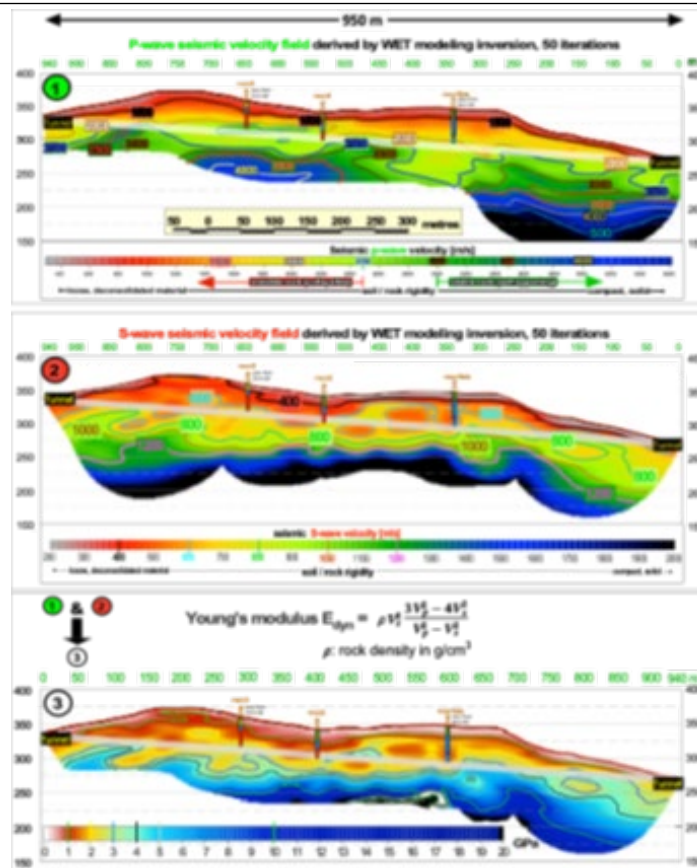


Abb.5: Herleitung des Tiefenschnitts des  $E_{dyn}$  Moduls mit den Daten der P & S- Wellengeschwindigkeitsprofile.

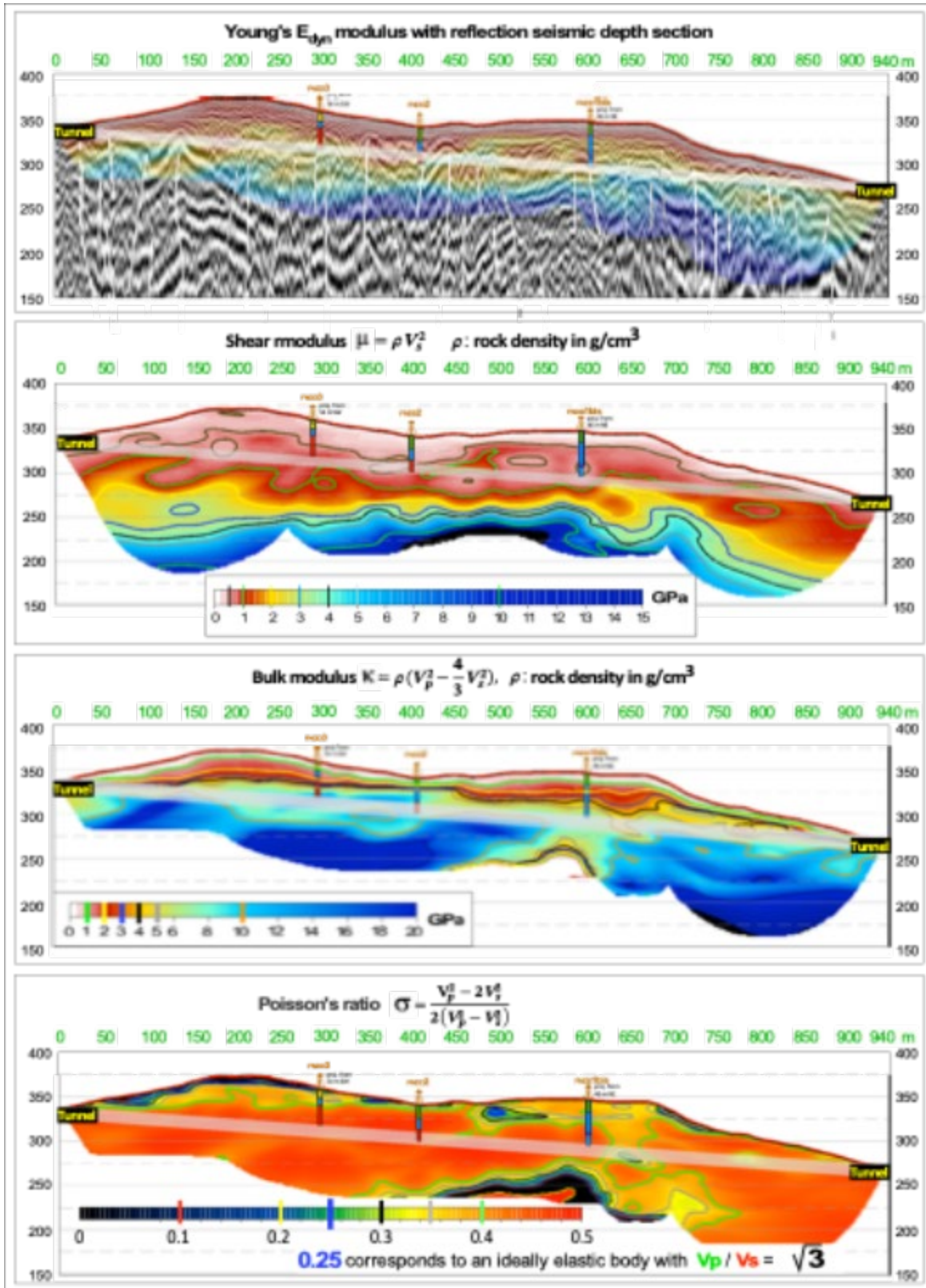


Abb. 6: Die Graphik zuoberst zeigt das in der seismisch-geotechnischen Praxis wichtigste Modul  $E_{dyn}$  zusammen mit dem interpretierten reflexionsseismischen Profil, und die anderen relevanten Elastizitätsmoduli, die von den P- und S-Wellengeschwindigkeiten und der Gesteinsdichte  $\rho$  abgeleitet werden.

#### 4. Der Übergang von 2D zur 3D-Darstellung anhand von «Messwert-Tiefen Scheiben»

Bei flächigen Baugrunduntersuchungen werden von einem Netz mehrerer sich schneidender Seismikprofile die 2D Tiefenschnitte hybridseismischer Messergebnisse gebündelt und die Messwerte in Tiefenabständen von 1 m – 5 m als 3D «Messwert – Tiefen Scheiben» dargestellt.

Beim nachstehenden praktischen Fallbeispiel wurde in einer Wohnsiedlung bei mehreren Häusern das Auftreten von Rissen im Mauerwerk festgestellt. Das Wohnquartier liegt auf einer Terrasse an deren südöstlichen Rand das Gelände rund 30 m steil abfällt.

Mit einem Netz von sieben hybridseismischen Messlinien wurde der Untergrund auf Schwäche zonen erkundet. Die Datenerfassung erfolgte hochauflösend mit einem Geophonabstand von 1 m. Die seismische Anregung geschah mit Schlägen auf eine Stahlplatte mit einem 6 kg schweren Hammer.



Abb. 7: Anordnung von sieben Messlinien für die 3D hybridseismische 3D-Erkundung zur Kartierung von Schwäche zonen im Untergrund.

Die Abbildungen 8 und 9 zeigen von jedem der sieben Messlinien das refraktionstomographische P-Wellengeschwindigkeitsfeld und das hybridseismische Profil.

Die Detektion von Anomalien der P-Wellengeschwindigkeiten ist für die Kartierung von Schwächezonen im Untergrund zur Erreichung des Messziels ausreichend. Dafür ist keine quantitative Bestimmung der gesteins-mechanischen Elastizitätsmoduli erforderlich. Aus diesem Grund wurde keine Messung mit Scherwellen-seismik durchgeführt.

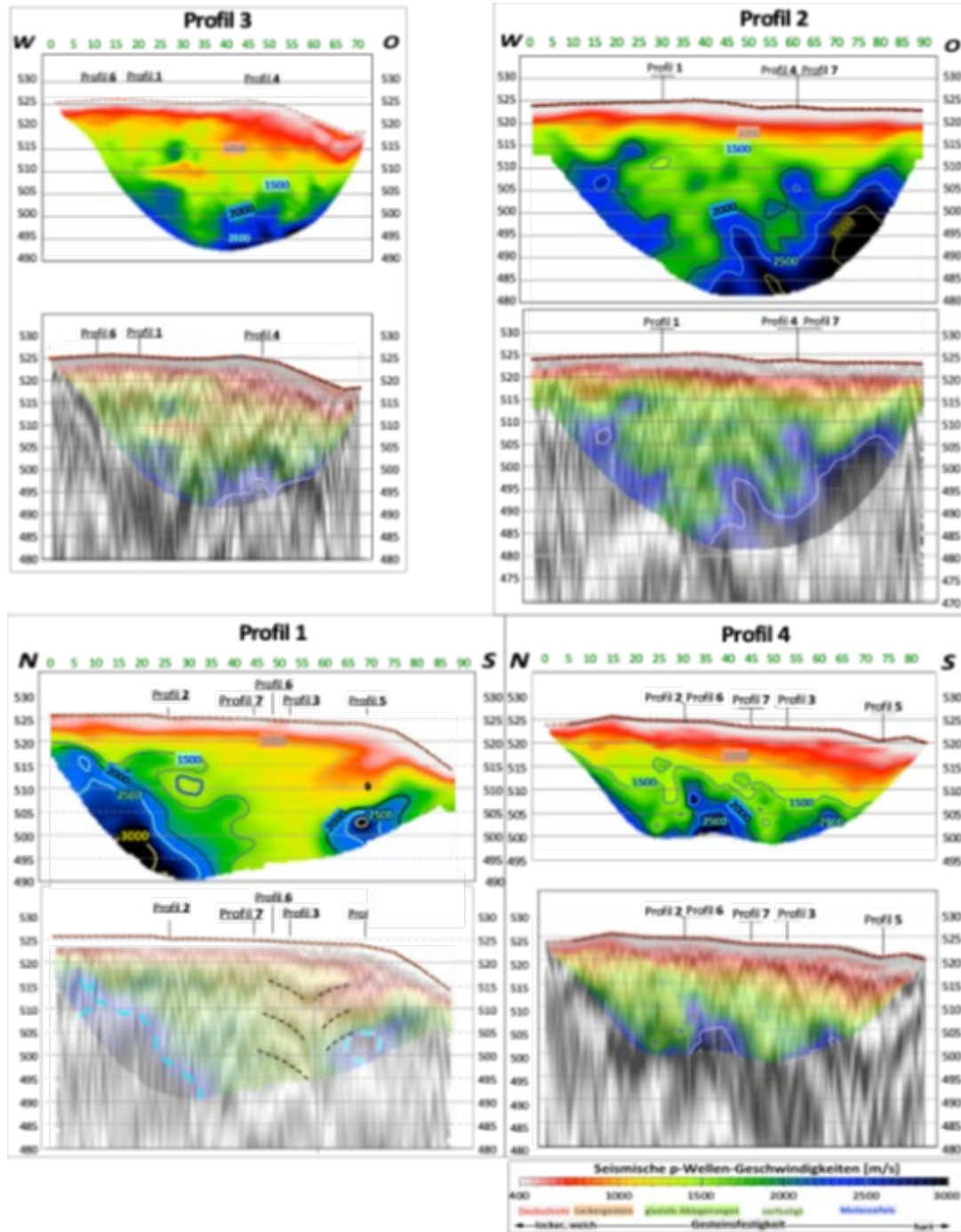


Abb. 8: Refraktionstomographische P-Wellen Geschwindigkeitsfelder und die Hybridseismikprofile der Profile 1 bis 4.

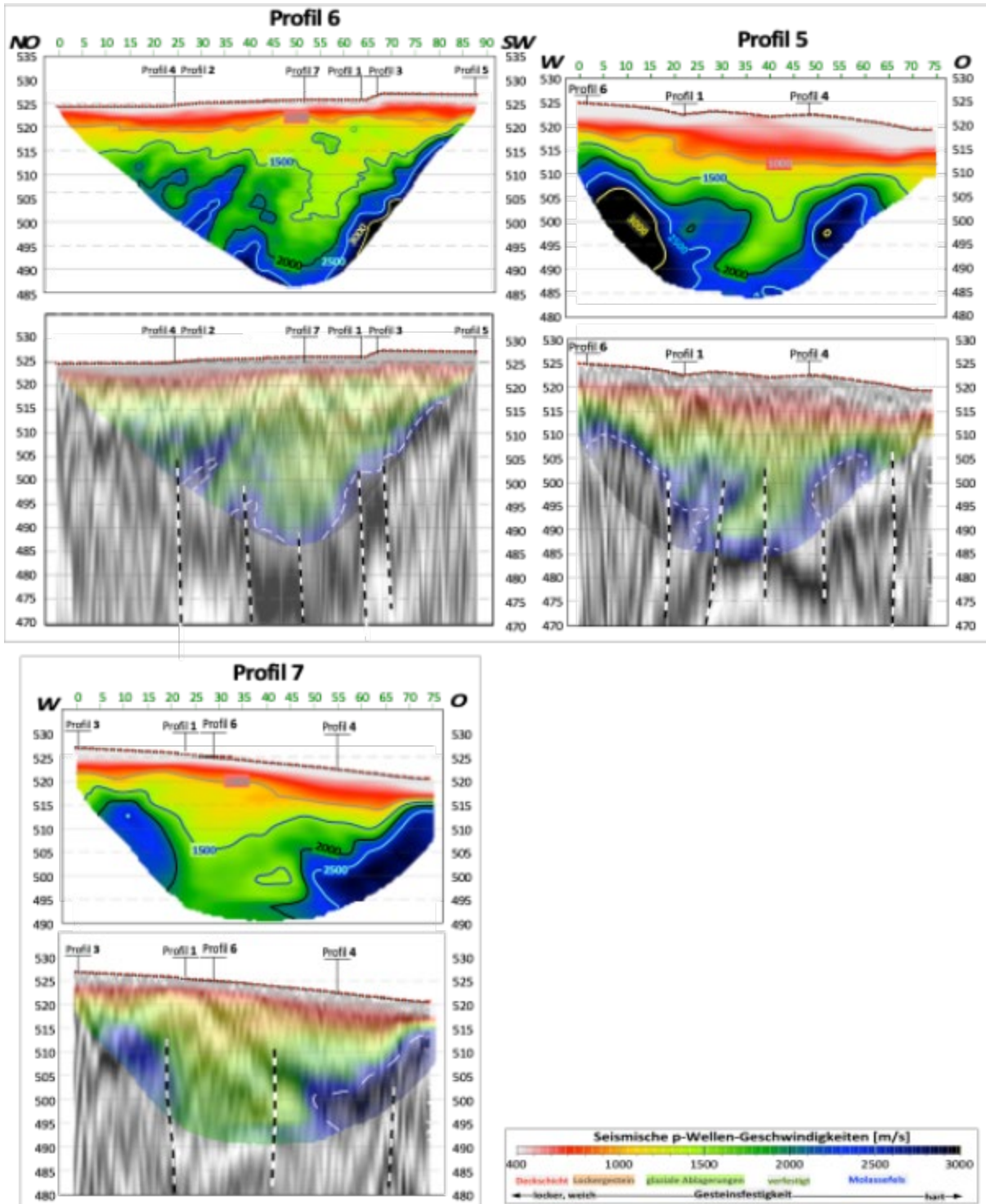


Abb. 9: Refraktionstomographische P-Wellen Geschwindigkeitsfelder und die Hybridseismikprofile der Profile 5 bis 7.

Von den sieben Messlinien werden ab der Kote 522 m ü.M. in Tiefenabständen von 2 m bis hinunter auf Kote 492 m ü.M. die  $V_p$ -Geschwindigkeitswerte im untersuchten Gebiet als  $V_p$ -Geschwindigkeit – Tiefen Scheiben ( $V$ -Z slices) aufgetragen.

Diese 16  $V$ -Z slices in Abb. 10 vermitteln anschaulich die räumliche 3D Verteilung der  $V_p$ -Messwerte und somit die Gesteinsfestigkeiten im Untergrund.

Zu beachten ist, dass falls Daten hergeleiteter Elastizitätsmoduli in einem Netz von Tiefenschnitten vorhanden sind, diese ebenfalls in 3D als „Modulwert – Tiefenscheiben“ dargestellt werden könnten. Im vorliegenden Fall fehlender Scherwellendaten lassen sich keine Elastizitätsmoduli herleiten, weshalb hier lediglich  $V_p$  – Tiefen-Scheiben abgebildet werden.

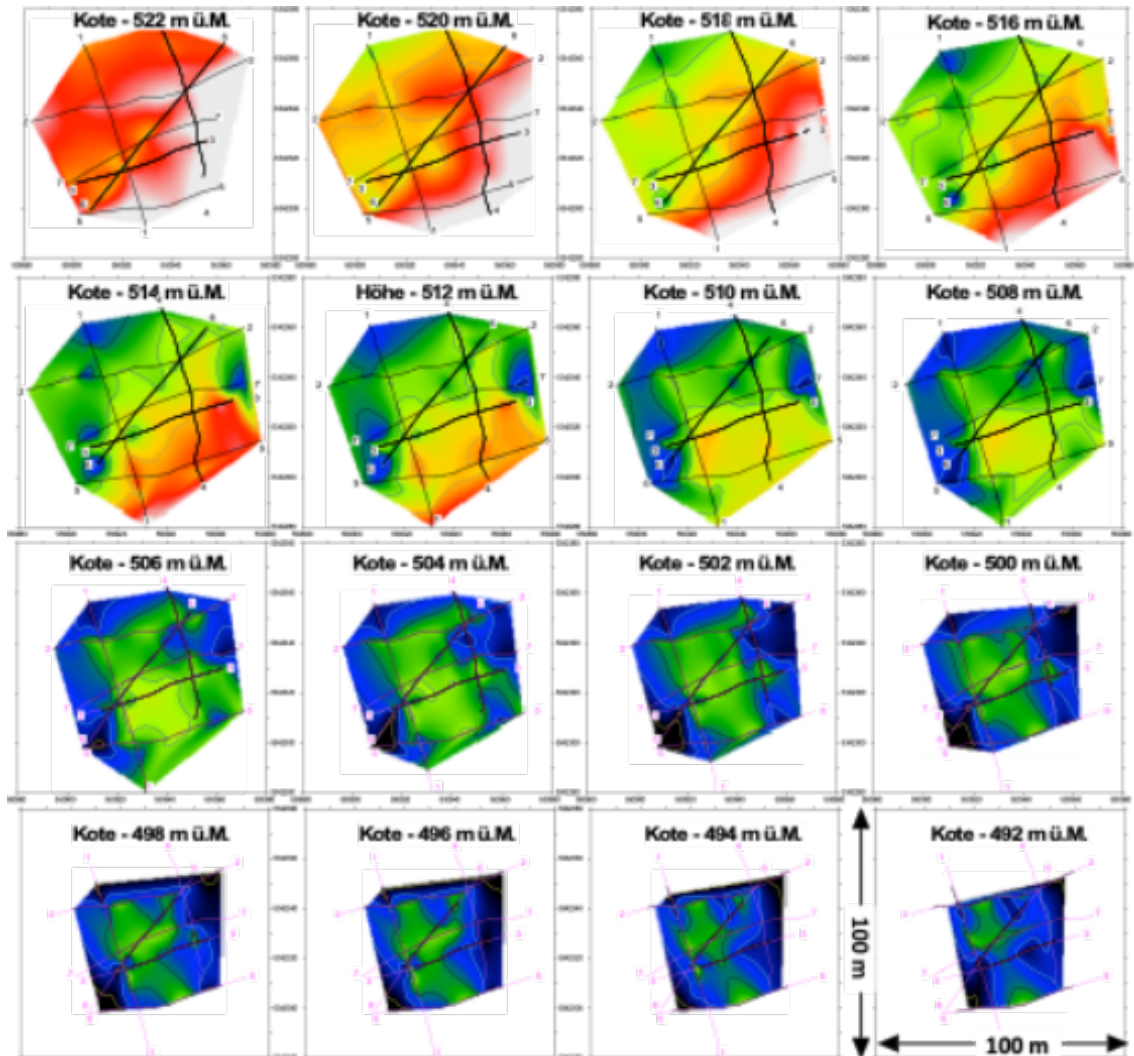


Abb.10: Low Cost 3D-Darstellung von  $V_p$ -Geschwindigkeit –Tiefen-Scheiben (V-Z slices) in Abständen von 2m bis in eine Tiefe von 30 m.

## 5. Abschliessende Bemerkungen

Die nicht-invasive Erfassung hybridseismischer Daten und deren gezielte zur Ableitung der dynamischen gesteinsmechanischen Elastizitätsmoduli bietet den Vorteil, dass die Resultate in 2D- und 3D-Darstellungen mit hoher räumlicher Auflösung und nahezu beliebiger Detailtiefe aufbereitet werden können. Maßgeblich für die Qualität der Ergebnisse sind dabei die Maschengröße des seismischen Messnetzes und auf den einzelnen Profilen, die Abstände zwischen den Geophonstationen und den seismischen Anregungspunkten.

Hervorzuheben ist, dass die Erfassung von Scherwellendaten aufgrund des höheren zeitlichen Aufwands im Allgemeinen bis doppelt so teuer ist wie die Erfassung der P-Wellendaten. Die Kosten für die EDV von Scherwellendaten sind gleich hoch wie für die EDV von P-Wellendaten.

# Erstellung der Allgemeinen Geologischen Legende für Österreich (EAGLe-Projekt): Fallbeispiele aus dem Ötztal-Stubai Kristallin

Martin Reiser<sup>1</sup>, Esther Hintersberger<sup>1</sup> & EAGLe-Team<sup>2</sup>

<sup>1</sup> GeoSphere Austria

<sup>2</sup> I. Bayer, G. Bryda, S. Coric, D. Garcia-Ramos, H. Gebhardt, G. Griesmeier, A. Gruber, M. Harbich, F. Hofmayer, M. Hölzel, B. Huet, C. Iglseder, C. Kettler, O. Kreuss, C. Költringer, M. Linner, M. Lotter, E.-M. Ranftl, J. Reitner, M. Steinbichler, M. Zerlauth

## Kurzfassung

Mit dem Abschluss des GeoFAST Projektes gibt es seit Ende 2024 eine österreichweite Flächendeckung geologischer Information im Maßstab 1:25.000/50.000 (siehe auch <https://maps.geosphere.at>). Dieser Datensatz basiert auf (gescannten) Rasterkarten und Datensätzen unterschiedlicher Quellen (GK50, GeoFAST, Gebietskarten von 1955 bis 2024) mit sehr unterschiedlichen Legendenstrukturen und ist daher sehr heterogen.

Im Zuge des 2024 initiierten EAGLe Projekts (EAGLe = Erstellung der Allgemeinen Geologischen Legende /Establishing the Austrian General Legend) soll nun die Datenstruktur vereinheitlicht und eine „Generallegende“ für die geologischen Einheiten Österreichs erstellt werden. Die Arbeit im Projekt ist auf verschiedene Teams verteilt und umfasst sowohl die technische Bereitstellung der Daten, als auch inhaltliche Themen wie Tektonik, Quartär, Neogen und Festgestein.

Die Harmonisierung des Datensatzes erfolgt auf Basis einheitlicher Auswahllisten aus Standardpublikationen, etwa zu Quartär- und Massenbewegungen (Steinbichler et al., 2019; Lotter et al., 2021) sowie zu Gesteinsbegriffen (Linner et al., 2024). Damit wird eine konsistente Nomenklatur für ganz Österreich gewährleistet, die zugleich die Anbindung an weitere Fachbereiche (z.B. Hydrogeologie, Geochemie, geotechnische Eigenschaften) und grenzüberschreitende Vergleiche mit Nachbarländern (Deutschland, Schweiz, Tschechien) ermöglicht.

Anhand des Ötztal-Stubai Kristallins - ein „klassisches“ Kristallinebiet, das im Zuge des Projekts bearbeitet wird - lässt sich die praktische Umsetzung dieses Ansatzes sehr gut veranschaulichen. Das Ötztal-Stubai Kristallin, bzw. die Ötztal-Decke wird sowohl von GeoFAST- als auch von GK50-Karten abgedeckt, zudem liegen mehrere historische Überblickskarten vor. Die Legendeneinträge der verschiedenen Kartenblätter werden zunächst miteinander abgeglichen und in einheitliche, standardisierte Gesteinsbegriffe überführt. Um dabei keine Information zu verlieren, werden die ursprünglichen Legendeneinträge mitgeführt. Die Klassifizierung, Gliederung und Benennung geologischer Einheiten erfolgt nach aktuellem Stand der Forschung und orientiert sich an den lithostratigraphischen Kriterien des North American Stratigraphic Code (NASC, 2005).

Nach eingehender Prüfung werden die Daten in einen Vektor-Gesamtdatensatz integriert, der auf den oben erwähnten Kartendaten im Maßstab 1:50.000 basiert, und anschließend über ein WebGIS veröffentlicht. Dabei soll jedoch in diesem Arbeitsschritt lediglich die inhaltliche Kompilierung (die Erstellung der Generallegende) erfolgen; eine geometrische Überarbeitung des Datensatzes, also die Anpassung von Polygonen, Linien oder Punkten ist

erst in einer späteren Projektphase vorgesehen. Ziel des mehrjährigen Projekts ist ein flächendeckend harmonisierter Geodatenatz im Maßstab 1:50.000 für ganz Österreich.

---

## 1. Einleitung

In den 176 Jahren seit der Gründung der Geologischen Reichsanstalt und besonders seit Beginn der Arbeit am GK50-Kartenwerk in den 1950er Jahren, haben sich sowohl das geologische Wissen, als auch die kartographischen Grundlagen bzw. Anforderungen grundlegend verändert. Die Kartenblätter, die über diesen langen Zeitraum erschienen sind, spiegeln dabei den jeweiligen Stand der Erkenntnisse ihrer Zeit wider. Obwohl es sich bei der GK50 um ein flächendeckendes Kartenwerk handelt, wurden die Blätter meist isoliert, als Einzelwerk, erstellt. Daher weisen die Blätter je nach Entstehungszeit und Bearbeiter uneinheitliche Legendenstrukturen und -beschreibungen auf oder beruhen zum Teil auf sehr verschiedenen tektonischen Konzepten, die oft nicht kompatibel und über Blattgrenzen teilweise nur schwer korrelierbar sind. Um der steigenden Nachfrage nach geologischen Karten nachzukommen und eine flächendeckende Informationsbasis im Maßstab 1:50'000 zu erreichen, wurde von der Geologischen Bundesanstalt im Jahr 2001 parallel zu GK50 das auf der Kompilation von Archivmaterial basierende Projekt GeoFAST initiiert. Ende 2024 wurden die letzten Kartenblätter im GeoFAST-Projekt fertiggestellt und somit liegt nun erstmals ein österreichweit flächendeckender Datensatz geologischer Informationen im Maßstab 1:25'000/1:50'000 vor (vgl. <https://maps.geosphere.at>). Diese wertvolle Datenbasis setzt sich jedoch aus einem Mosaik verschiedener Einzelwerke zusammen, deren Entstehung sich über einen Zeitraum von 1952 bis 2024 erstreckt (Abb. 1 & 2). Im Detail sind dies:

- GeoFAST-Karten, teilweise auch bereits im Mehrschichtmodell (abgedeckter Festgesteinslayer).
- neueste Kartenblätter im BMN50/UTM25-Blattschnitt im Mehrschichtmodell.
- Vektordaten gedruckter Karten des GK50-Kartenwerks.
- analoge Karten (z.T. Gebietskarten im Maßstab 1: 25'000), oder digitalisierte, eigenständige Datensätze.

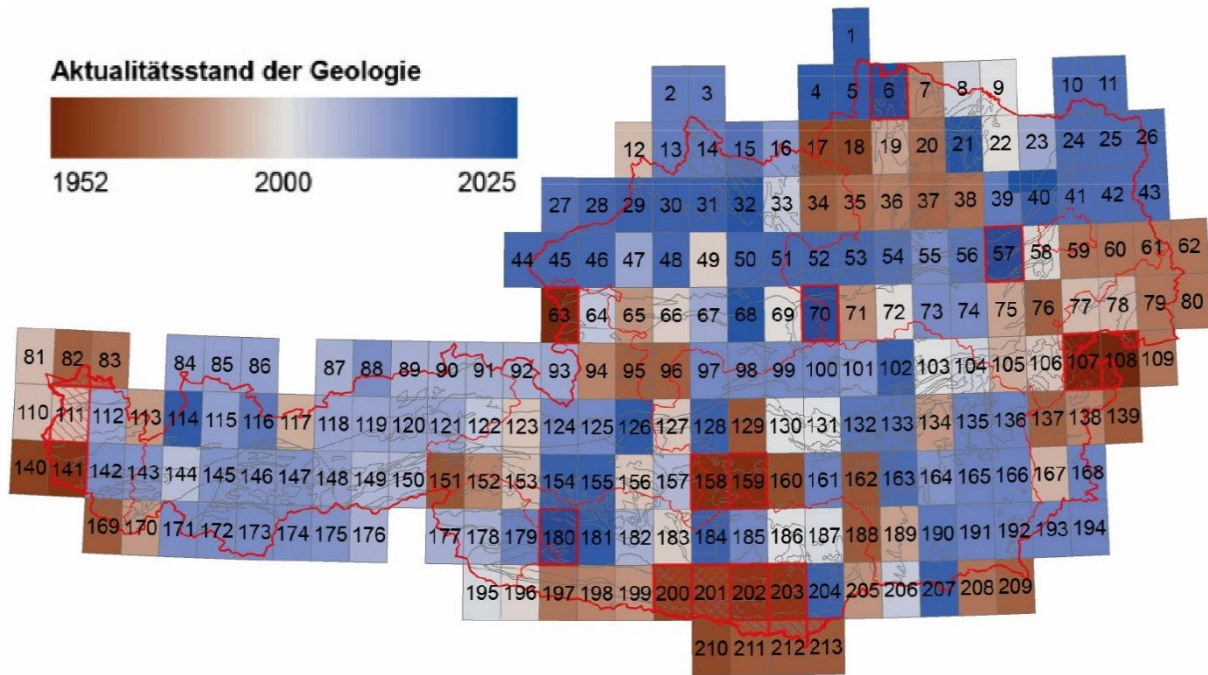


Abb. 1: Alle veröffentlichten GK50- und GeoFAST-Blätter farbcodiert nach Erscheinungsjahr

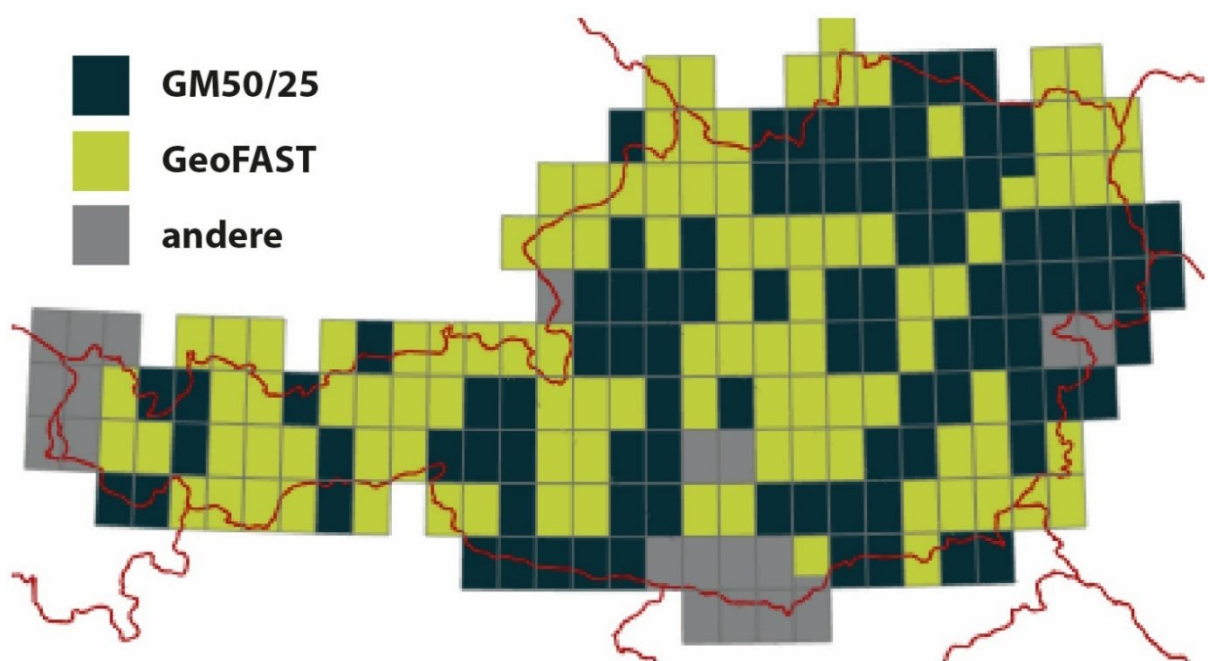


Abb. 2: Übersicht über die verwendeten Quellen des EAGLe-Datensatzes

## 2. Eine Generallegende für Österreich, das EAGLe-Projekt

Eine sogenannte «Generallegende» für Österreich ist schon seit längerem in Diskussion (siehe Krenmayr et al., 2004), bzw. wurde diese für einzelne Themenbereiche bereits umgesetzt (e.g. Krenmayr et al., 2012). Mit dem Vorliegen österreichweit flächendeckenden vorhandener geologischer Information sind die Voraussetzungen nun ideal, diese in einen gemeinsamen Datensatz mit einheitlicher Struktur und Nomenklatur zu bringen. Der Start des EAGLe-Projekts („Erstellung der Allgemeinen Geologischen Legende“) Ende 2024 stellt daher einen entscheidenden Schritt für die zukünftige Nutzung dieses umfangreichen Datenmaterials dar.

### 2.1. Zielsetzung

Ziel des Projekts ist die Harmonisierung dieses neu-generierten, österreichweiten Datensatzes im Maßstab 1:50'000 und die Entwicklung und Umsetzung einer einheitlichen und hierarchisch organisierten Legendenstruktur dafür. Diese soll alle Einträge, die bisher auf unzählige, oft inkompatible Legenden verteilt waren, zusammenfassen und beschreiben. Die hierarchische Struktur erlaubt Ausweichen auf höhere Hierarchiestufen für ungegliederte Gebiete. Dadurch wird die Zugänglichkeit, Nutzung und Vergleichbarkeit geowissenschaftlicher Daten in Österreich erleichtert und eine standardisierte Grundlage für zukünftige Produkte, Projekte und Anwendungen geschaffen.

### 2.2. Vorgehensweise

Vorbereitende Arbeiten zur Zusammenführung der Daten wurden bereits von Jänner bis April 2024 durchgeführt und bis Ende 2024 wurden noch die letzten Kartenblätter im GeoFAST-Projekt abgeschlossen. Aktuell wird vor allem an der Erstellung der Einträge und Definitionen der Generallegende in einer Arbeitsdatenbank gearbeitet, bzw. werden die einzelnen Legendeneinträge auf die Einträge in der Datenbank gemapped. Die Arbeit erfolgt in thematischen bzw. Regionalteams (Böhmische Masse, Nördliche Kalkalpen, Quartär, Flysch & Helvetikum, Neogen, Kristallin West und Kristallin Ost) und neben internen Besprechungen in den einzelnen Teams finden regelmäßig Gesamttreffen zum Austausch und Feedback statt.

Die parallel dazu verlaufende technische Umsetzung der einheitlichen Datenstruktur (Abb. 3) erfolgt auf Basis eines Vektor-Gesamtdatensatzes, der aus den bestehenden Vektordatensätzen und Rasterkarten (Abb. 2) abgeleitet wird. Arbeiten zur Aufbereitung von Datensätzen und zur Digitalisierung analoger Karten laufen parallel und werden nach Fertigstellung in den Datensatz integriert. Final werden dann die einzelnen Layer aus den Quelldatensätzen (Gesteine in Decken, Gesteine in Becken, Quartäre Einheiten, Tektonikliste) zusammengeführt. Aus dieser Tabelle wurden die Auszüge schrittweise für die jeweiligen Regionalteams abgeleitet und nach der Bearbeitung wieder zusammengeführt.

Wichtig: In dieser Projektphase soll die Zusammenführung der Daten, sowie die Erstellung und Implementierung der Generallegende erfolgen, eine geometrische Überarbeitung des Datensatzes, also die Anpassung von Polygonen, Linien oder Punkten ist erst in einer späteren Projektphase vorgesehen.

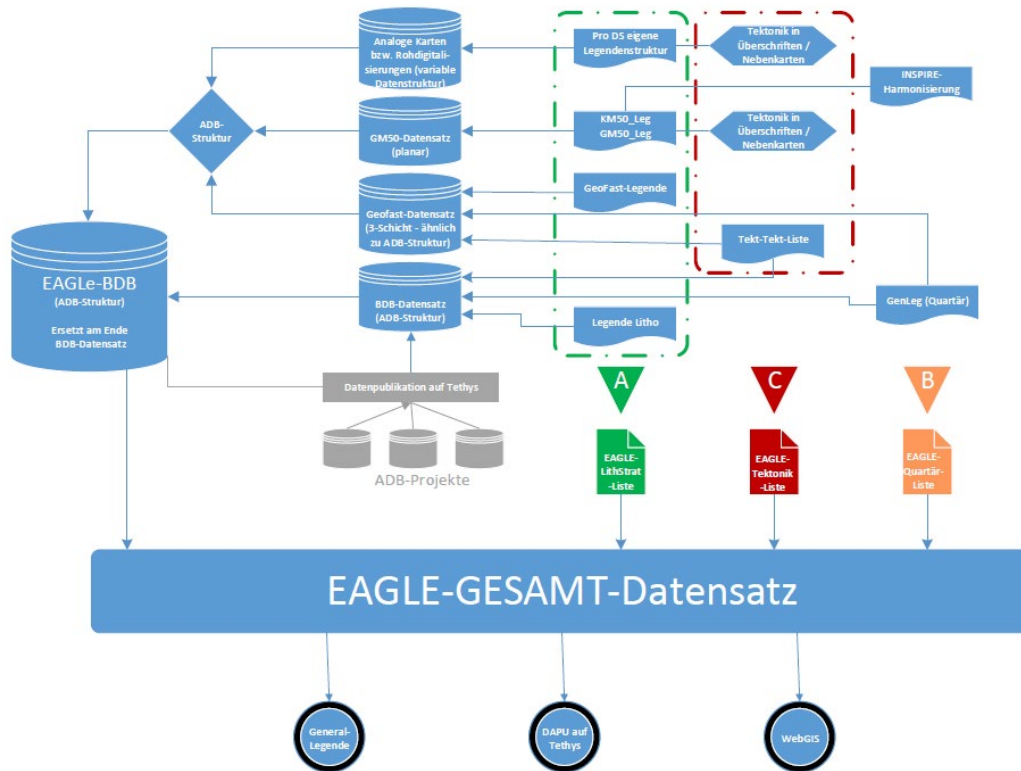


Abb. 3: Schematischer Workflow zur Erstellung des EAGLe-Gesamtdatensatzes (ADB = Arbeitsdatenbank, BDB = Bestandsdatenbank, DS = Datensatz, GM50 = Geologisches Modell 1:50'000, KM50 = Kartografisches Modell 1:50'000)

Inhaltlich stehen insbesondere die Harmonisierung tektonischer Einheiten, quartärer Sedimente, neogener Ablagerungen und des Festgesteins aus den verschiedenen Datensätzen (GeoFAST, GK50, Gebietskarten) im Fokus. Die hierarchische Gliederung erfolgt, getrennt von der Tektonik, nach lithostratigraphischen Kriterien und orientiert sich dabei an der stratigraphischen Tabelle für Österreich (Piller et al., 2004; 2022) bzw. den Empfehlungen des North American Stratigraphic Code (NASC, 2021). Um die Vergleichbarkeit von lithostratigraphischen und lithodemischen Einheiten und eine konsistente Gliederung zu gewährleisten, wird analog zu den stratigraphischen Konzepten des British Geological Surveys (BRUCS; Gillespie & Leslie, 2021) und der geologischen Dienste Kanadas (CLASS; Maxeiner et al., 2024) eine sechs-stufige hierarchische Gliederung verwendet. Dadurch kann bei unklarer Datenlage auf höhere Hierarchieebenen ausgewichen werden (siehe Beispiele in Tabelle 1).

Tab. 1: Hierarchiestufen der Generallegende. Mit # werden absichtlich freigelassene Felder oder Arbeitsbegriffe markiert.

Thema	Ebene 1	Ebene 2	Ebene 3	Ebene 4	Ebene 5	Ebene 6
<b>Lithostratigraphie</b>	Supergruppe	Gruppe	Subgruppe	Formation	Subformation	Bank
<b>Lithodemie</b>	Superkomplex/ Supersuite	Komplex/ Suite	Subkomplex/ Subsuite	Lithodem	Sublithodem/ Variation	Ausprägung
<b>Beispiele aus dem Ötztal-Stubai-Kristallin</b>	***Hierarchieebene noch nicht vergeben***	Alpeiner Granodioritgneissuite	#	#	#	#

	<i>***Hierarchieebene noch nicht vergeben***</i>	Alpeiner Granodioritgneis-Suite	#tonalitische Intrusionskörper	Klopai-Tonalitgneis	#	#
	<i>***Hierarchieebene noch nicht vergeben***</i>	Alpeiner Granodioritgneis-Suite	#tonalitische Intrusionskörper	Klopai-Tonalitgneis	#Dioritgneis-schollen	#
	<i>***Hierarchieebene noch nicht vergeben***</i>	Alpeiner Granodioritgneis-Suite	#tonalitische Intrusionskörper	Engelswand-Tonalitgneis	#	#
	<i>***Hierarchieebene noch nicht vergeben***</i>	Alpeiner Granodioritgneis-Suite	#granodioritische Intrusionskörper	Freihut-Granodioritgneis	#	#

In diesem Schritt werden auch die Einträge der Kartenlegenden in die Begriffe der aktuellen Standards der Geologischen Bundesanstalt, bzw. der GeoSphere Austria (Steinbichler et al., 2019; Lotter et al., 2021; Linner et al., 2024) übertragen, um eine konsistente Nomenklatur sicherzustellen (Biotit-Plagioklasgneis -> Paragneis; Mischgneis -> Migmatit; etc.). Dies ermöglicht nicht nur eine einheitliche Logik im Datensatz, sondern gewährleistet auch eine bessere fachübergreifende Nutzbarkeit (z. B. in Hydrogeologie, Geotechnik, Geochemie) und Vergleichbarkeit mit grenzüberschreitenden Datensätzen aus den Nachbarländern.

### 2.3. Struktur der Legendeneinträge

Die einzelnen Legendeneinträge beinhalten folgende Informationen:

- Name + Hierarchie + Kurzbeschreibung (255 Zeichen). Neu eingeführte Begriffe werden markiert.
- Indikation, ob es sich um einen tektonischen Körper, einen Olistolith oder einen kombinierten Begriff aufgrund eines zusammengefassten Legendeneintrags handelt
- Hauptlithologie + bis zu 7 Nebelithologien (jeweils mit einer Kurzbeschreibung à 255 Zeichen).
- stratigraphisches Alter (min/max) + Qualitätsmerkmal (Alter unsicher ja/nein)
- Status des Legendeneintrags (publiziert/etabliert; brauchbarer Arbeitsbegriff; Sammelbegriff)
- Zitate, Quelle + Vorkommen auf Kartenblattnummer, Typuslokalität, Synonyme, etc.

### 2.4. Diskussionsthemen

Im Zuge der Arbeiten tauchten verschiedene Themen auf, die gemeinsam oder in den einzelnen Arbeitsgruppen diskutiert wurden, z.B.: Was sind die Qualitätskriterien für Legendeneinträge? Wie sollen wir mit veralteten Begriffen umgehen? Was macht eine Definition aus? Wie sollen wir die Kurzbeschreibungen taxonomisch umsetzen?

Strategien bei fehlenden hierarchischen Begriffen? Wie implementieren wir die Vorgaben des NASC? Wie ist mit der mesozoischen Bedeckung des Kristallins umzugehen? Bei den konsensuell erarbeiteten Vorgehensweisen wurde zu einem auf eine bestmögliche Abbildung der verfügbaren Informationen, aber auch auf pragmatische und technisch umsetzbare Lösungen Wert gelegt.

### 3. Fallbeispiele aus dem Ötztal-Stubai-Kristallin und angrenzenden Gebieten

Am Beispiel des Ötztal-Stubai-Kristallins lässt sich die Vorgehensweise gut veranschaulichen. Zunächst wurden alle Legendeneinträge die die Ötztal-Decke betreffen gesammelt und mit Hilfe der Kartenansicht die geometrische Verteilung der Legendeneinträge geprüft. In den Kartenverteilern wurden die Bearbeiter der jeweiligen Gebiete festgestellt und anhand von Primärquellen die Notwendigkeit einer Abgrenzung oder Möglichkeiten zur Zusammenfassung von Gesteinseinheiten verifiziert. In diesem Schritt erfolgte auch die Übertragung der Gesteinsbegriffe in den aktuellen Standard der Gesteinsbegriffe (Linner et al., 2024). Da noch keine lithostratigraphische Gliederung des Ötztal-Stubai-Kristallins vorliegt wurde diese, aufbauend auf Grundlagendaten, sowohl aus der Literatur (e.g. Schindlmayr, 1999) bzw. auf eigenen, unpublizierten Daten nach den Kriterien des NASC (2021) erarbeitet.

- Bei unklarer Datenlage wurde auf eine höhere Hierarchieebene ausgewichen, so mussten Orthogneise und Metasedimente aus der Umgebung von Nauders aufgrund ihrer unklaren tektonischen Zuordnung (S'Charl-Decke vs. Ötztal-Decke) in die Ebene «Austroalpines Kristallin im Allgemeinen» verschoben werden.
- Die Gesteinsbezeichnung «Diabas» ist im Austroalpinen Kristallin weit verbreitet und in verschiedener Ausprägung (z.B. Diabas, Diabasporphyr, Kersantitdiabas, Labradorporphyr) auf allen Kartenblättern des Ötztal-Kristallins vertreten. Da für diesen Gesteinsbegriff verschiedene Definitionen existieren (prä-permischer Basalt vs. subvulkanisches Ganggestein vs. umgewandelter Basalt), wurde dieser in «Metabasalt, Metadolerit, Metadiorit, Metagabbro» übersetzt, aus dem Ötztal-Stubai-Komplex ausgegliedert und zusammen mit vergleichbaren Gesteinen aus dem Austroalpin (Silvretta; Steinach-Decke; Venet-Komplex; Schneeberg-Komplex) als «Permische Ganggesteine» auf dem Rang einer Suite zusammengefasst.
- Legendeneinträge sind nicht immer über Blattgrenzen hinweg miteinander korrelierbar, daher müssen für diese oft allgemeinere Begrifflichkeiten auf einer höheren Hierarchieebene geschaffen werden, z.B. «biotitführende Orthogneise».
- Im Schneeberg Komplex sind die Bezeichnungen «Monotone Serie» und «Bunte Serie» keine korrekten lithostratigraphischen Begriffe, da diese aufgrund ihrer Verwendung für andere tektonische Einheiten uneindeutig sind und nicht den Vorgaben für die korrekte Benennung entsprechen (Kombination aus Lokalität und Lithologiebegriff und Rang) darstellen. Eingehende Literaturrecherche ergab eine Ausweichmöglichkeit auf die bereits von Zanettin & Justin-Visentin (1971) eingeführten und von Tollmann (1978) aufgegriffenen Begriffe Gspell-/Saltuss-/Hochwart-Serie. Lediglich der Begriff «Serie» wurde in den hierarchischen Rang «Subkomplex» überführt.

#### 4. Fazit & Ausblick

Nach Abschluss des EAGLe-Projekts wird ein inhaltlich harmonisierter, österreichweiter Gesamtdatensatz mit einer hierarchisierten Legendenstruktur inklusive Kurzbeschreibungen und zusätzlicher Informationen (Alter, Referenzen, etc.) vorliegen. Dies stellt einen bedeutenden Mehrwert für alle Nutzer geowissenschaftlicher Information dar. Moderne, standardisierte Gesteinsbezeichnungen, Kurzbeschreibungen und eine hierarchisierte Struktur nach lithostratigraphischen Kriterien erleichtern die Zugänglichkeit und Nutzung der Daten und erlauben deren Korrelation über Blatt- oder Staatsgrenzen hinweg. Aus der lithostratigraphischen Bearbeitung lassen sich neue Fragestellungen ableiten und die hierarchische Struktur zeigt deutlich Datenlücken und Bereiche mit Bearbeitungsbedarf, die dadurch gezielt angesteuert werden können. Die Arbeit an diesem Gesamtdatensatz, dessen Pflege und Verbesserung wird in Zukunft eine wichtige Aufgabe der Landesaufnahme sein.

#### Referenzen

- [1] Gillespie, M. R., & Leslie, A. G. (2021). BRUCS: a new system for classifying and naming mappable rock units. *Journal of the Geological Society*, 178(4). Boes, R.M., Minor, H.-E. (2002). Hydraulic Design of Stepped Spillways for RCC Dams, *Hydropower & Dams*, 9(3), 87-91.
- [2] Krenmayr, H., Schuster, R., Linner, M., Nowotny, A., Pestal, G., Reitner, J. & Schnabel, W. (2004): Die Generallegende der Geologischen Bundesanstalt - eine Diskussionsgrundlage. - In: Hubmann, Bernhard, Piller, Werner E.: PANGEO Austria 2004: "Erdwissenschaften und Öffentlichkeit" Graz, 24.-26. September 2004: Beitragskurzfassungen. - 223-225, Institut für Erdwissenschaften, Karl-Franzens-Universität Graz, Graz.
- [3] Krenmayr, H., Ćorić, S., Gebhardt, H., Iglseder, C., Linner, M., Mandl, G., Reitner, J., Rockenschaub, M., Roetzel, R. & Rupp, C. (2012): Generallegende der pleistozänen bis holozänen Sedimente und Verwitterungsprodukte des Periglazialraumes auf den geologischen Spezialkarten (1:50.000, 1:25.000) der Geologischen Bundesanstalt = General Legend for the Pleistocene to Holocene Sediments and Weathered Materials of the Periglacial Areas on Detailed Scale Geological Map Sheets (1:50.000, 1:25.000) of the Geological Survey of Austria. - In: *Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt*; 152. - 57-66, Geologische Bundesanstalt, Wien.
- [4] Linner, M. et al. (2024): Hierarchische Liste der Gesteinsbegriffe der GeoSphere Austria. - *Berichte der GeoSphere Austria*, 147, 174 S., Wien.
- [5] Lotter, M., Steinbichler, M.G. & Reitner, J.M. (2021): Ergänzung und Erratum zu „Begriffskataloge der Geologischen Landesaufnahme für Quartär und Massenbewegungen in Österreich“. – *Jahrbuch der GeoSphere Austria*, 161, 157-160, Wien.
- [6] Maxeiner, R. O., Bosman, S. A., Card, C. D., Marsh, A., Morelli, R. M., Coueslan, C., ... & Ashton, K. E. (2024). Classifying intrusive and strongly metamorphosed rock units: CLASS—a cooperative lithodemic and stratigraphic system. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 61(10), 1014-1042.
- [7] Piller, W. E., Egger, H., Erhart, C. W., Gross, M., Harzhauser, M., Hubmann, B., van Husen, D., Krenmayr, H.-G., Krystyn, L., Lein, R., Lukeneder, A., Mandl, G., Rögl, F., Roetzel, R., Rupp, C., Schnabel, W., Schönlaub, H. P., Summesberger, H., Wagreich, M. & Wessely, G., 2004: Die stratigraphische Tabelle von Österreich 2004 (sedimentäre Schichtfolgen).
- [8] Piller, W.E. [Ed.] et al. (2022): The lithostratigraphic units of Austria: Cenozoic Era(them). - *Abhandlungen der Geologischen Bundesanstalt*, 76, 357 S., Wien.
- [9] Schindlmayr, A. (1999): Granitoids and plutonic evolution of the Ötztal-Stubai massif: a key for understanding the early palaeozoic history of the Austroalpine crystalline basement in the Western Eastern Alps. *Dissertation, Universität Salzburg*; 288 S., Salzburg.
- [10] Steinbichler, M.G., Reitner, J.M., Lotter, M. & Steinbichler, A. (2019): Begriffskataloge der Geologischen Landesaufnahme für Quartär und Massenbewegungen in Österreich. – *Jahrbuch der GeoSphere Austria*, 159; 5-49, Wien.

- [11] Tollmann, A. (1977): Geologie von Österreich: Band I: Die Zentralalpen. - XVI, 766, 200 Abb., 25 Tab., Franz Deuticke, Wien.
- [12] Zanettin, B., & Justin-Visentin, E. (1971): Considerazioni geologico-petrografiche sul „Tratto di Monteneve“ (Alto Adige). — Mem. Ist. Geol. Miner. Univ. Padova, Vol. XXIX , Padua.

#### **Adressen der Autoren**

*Mag. Dr. Martin Reiser*

*Organisation: GeoSphere Austria*

*Straße, Ort: Neulinggasse 38, 1030 Wien*

*E-Mail/ Kontakt: martin.reiser@geosphere.at*

*\*I. Bayer, G. Bryda, S. Coric, D. Garcia-Ramos, H. Gebhardt, G. Griesmeier, A. Gruber, M. Harbich, M. Hölzel, B. Huet, C. Iglseder, C. Kettler, C. Költringer, O. Kreuss, M. Linner, M. Lotter, E.-M. Ranftl, J. Reitner, M. Steinbichler, M. Zerlauth, F. Hofmayr*

# Geophysikalisch-rohstoffgeologische Analyse von Bergsturzmaterial für die Verwendung als Baurohstoff – Fallstudie Pustertal/Osttirol

Gerhard Bieber<sup>1</sup>, Valentina Dietrich<sup>2</sup>, Jürgen M. Reitner<sup>1</sup>

<sup>1</sup> GeoSphere Austria, <sup>2</sup> geodietrich

## Kurzfassung

Bergstürze (im Sinne von Abele (1974)) führen aufgrund ihrer inneren Dynamik zu einer starken Zertrümmerung des ehemals festen Felskörpers. Da dieser Prozess hauptsächlich in spröden Gesteinen wie Kalkgestein, Dolomitmgestein, Amphibolit, Orthogneis etc. auftritt, liegen als Endprodukt vorzertrümmerte Materialien vor, die einer Nutzung als Baurohstoff zugeführt werden können. Je nach Zertrümmerungsgrad bzw. Korngrößenverteilung ist die nötige Aufbereitung des Materials (Brechen, Sieben) mehr oder weniger aufwändig. Die Kenntnis des Zertrümmerungsgrades und der Korngröße erlaubt daher eine Abschätzung der Wirtschaftlichkeit potentieller Kiessandabbaue in Bergsturzablagerungen.

Da gerade die günstige Verfügbarkeit der Baurohstoffe essentiell für die weitere Entwicklung der inneralpinen Täler ist, sind Abbaue, die der lokalen bis regionalen Versorgung dienen können, und damit geringe Transportweiten, ganz speziell auch unter dem Aspekt von CO<sub>2</sub>-Emissionen, ein wesentlicher Faktor.

In diesem wissenschaftlichen Forschungsprojekt der GeoSphere Austria: „*UELG-095 - Potentialanalyse Bergsturzablagerungen als Kiessand-Lagerstätten - Testung einer optimierten geologischen und geophysikalischen Untersuchungsmethodik (Prospektionsmethodik)*“ erfolgt die Erarbeitung und Bewertung der Aussagemöglichkeiten bestimmter geophysikalischer Parameter und Methoden für eine Beurteilung der Quantität und Qualität von Lockersedimenten von Bergsturzablagerungen. Das Ziel liegt in einer methodischen Weiterentwicklung und Verfeinerung integrierter Prospektionsstrategien für eine rohstoffspezifische Charakterisierung ausgewählter Lockersedimentvorkommen. (<https://www.geosphere.at/de/ueber-uns/forschung-und-kooperationen/projekt-datenbank/uelg-095>)

Diese grundlegenden Überlegungen bildeten die Basis für gezielte geophysikalische und rohstoffgeologische Untersuchungen in bereits geologisch erfassten Bergsturzvorkommen, bei denen sowohl die Lagerungsverhältnisse als auch die Materialeigenschaften im Hinblick auf eine potenzielle Nutzung als Baurohstoff bewertet werden. Im Rahmen einer Fallstudie wurden dazu in Osttirol zwei ausgewählte Standorte mit Lage auf der Geologischen Karte Blatt 179 Lienz (Linner et al. 2013) detailliert untersucht: Bergsturzgebiet (Gleitung) Lienzer Klause bei Leisach sowie jenes bei Assling im Osttiroler Pustertal

Beide Vorkommen zeichnen sich durch ihre günstige Lage in unmittelbarer Nähe zu bestehenden oder potenziellen Rohstoffgewinnungsbetrieben aus und weisen hinsichtlich Volumen und Zusammensetzung ein hohes Nutzungspotenzial auf. Ziel der Erkundungen war es, durch den Einsatz geophysikalischer Methoden – insbesondere geoelektrischer und seismischer Verfahren – eine belastbare Aussage zur internen Struktur, zur

Korngrößenverteilung, sowie zur Mächtigkeit der Lockersedimente zu ermöglichen. Diese Parameter dienen in weiterer Folge als Entscheidungsgrundlage für eine rohstoffwirtschaftliche Bewertung und tragen zur Optimierung von Abbau- und Nutzungskonzepten bei.

---

## 1. Einleitung und aktueller Forschungsstand

Bergstürze (im Sinne von Abele (1974)) führen aufgrund ihrer inneren Dynamik zu einer starken Zertrümmerung des ehemals festen Felskörpers. Da dieser Prozess hauptsächlich in spröden Gesteinen wie Kalkgestein, Dolomitgestein, Amphibolit, Orthogneis etc. auftritt, liegen als Endprodukt vorzertrümmerte Materialien vor, die einer Nutzung als Baurohstoff zugeführt werden können. Je nach Zertrümmerungsgrad bzw. Korngrößenverteilung ist die nötige Aufbereitung des Materials (Brechen, Sieben) mehr oder weniger aufwändig. Die Kenntnis des Zertrümmerungsgrades und der Korngröße erlaubt daher eine Abschätzung der Wirtschaftlichkeit potentieller Kiessandabbaue in Bergsturzablagerungen.

Die Sicherung regional verfügbarer Baurohstoffe ist ein wesentlicher Bestandteil einer nachhaltigen Rohstoffstrategie. Lokal begrenzte Abbaue ermöglichen kurze Transportwege und tragen so zur Energieeinsparung und Emissionsminderung bei. Im alpinen Raum stellt die geringe Erschließbarkeit potenzieller Lagerstätten aufgrund geologischer Komplexität und topographischer Einschränkungen eine besondere Herausforderung dar, die eine präzise rohstoffgeologische Erkundung und Bewertung erfordert.

In diesem wissenschaftlichen Forschungsprojekt der GeoSphere Austria: „*UELG-095 - Potentialanalyse Bergsturzablagerungen als Kiessand-Lagerstätten - Testung einer optimierten geologischen und geophysikalischen Untersuchungsmethodik (Prospektionsmethodik)*“ erfolgt die Erarbeitung und Bewertung der Aussagemöglichkeiten bestimmter geophysikalischer Parameter und Methoden für eine Beurteilung der Quantität und Qualität von Lockersedimenten von Bergsturzablagerungen. Das Ziel liegt in einer methodischen Weiterentwicklung und Verfeinerung integrierter Prospektionsstrategien für eine rohstoffspezifische Charakterisierung ausgewählter Lockersedimentvorkommen. (<https://www.geosphere.at/de/ueber-uns/forschung-und-kooperationen/projekt-datenbank/uelg-095>)

Diese grundlegenden Überlegungen bildeten die Basis für gezielte geophysikalische und rohstoffgeologische Untersuchungen in bereits geologisch erfassten Bergsturzvorkommen, bei denen sowohl die Lagerungsverhältnisse als auch die Materialeigenschaften im Hinblick auf eine potenzielle Nutzung als Baurohstoff bewertet werden. Im Rahmen einer Fallstudie wurden dazu in Osttirol zwei ausgewählte Standorte mit Lage auf der Geologischen Karte Blatt 179 Lienz (Linner et al. 2013) [2] detailliert untersucht (Abb. 1 & 2): Bergsturzgebiet (Gleitung) Lienzer Klause bei Leisach sowie jenes bei Assling im Osttiroler Pustertal.



Abb. 1: Lage des Untersuchungsgebietes Scheibenswand-Lienzer Klause 2023, 2024&2025 und Weiße Riese 2024&2025 (Bildquelle: © AMAP, ÖK200)

## 2. Eingesetzte Methodik

Eingesetzt wurden unterschiedliche geophysikalische Methoden für unterschiedliche Ansatzpunkte, um ein breites Informationsspektrum für diverse Fragestellung zu erhalten. Mit einer geologischen Detailkartierung wurden die Interpretationen vertieft.

In den Fallstudien Lienzer Klause und Weiße Riese werden die Aussagemöglichkeiten mit der Methode der Gleichstromgeoelektrik für eine Übersichts- sowie Detailcharakterisierung hinsichtlich rohstoffrelevanter Aussagemöglichkeiten beschrieben. Ausgehend von der Übersicht einer 3D Gesamt-Ansicht der Inversionsergebnisse mit geologischer Interpretation der Geoelektrikprofile Leisach P2, P3, P5 und P8 auf Orthofoto mit Verteilung des spezifischen elektrischen Widerstandes (Ohm-m) werden anschließend Fragestellungen anhand ausgewählter Einzelprofile mit Detailinterpretationen vorgestellt.

Methodik	physik. Parameter	Messgerät	Eindringtiefe [m]	Info	Abgrenzung	beantwortbare Fragestellung
Geoelektrik	Spez. elektr. Widerstand [ $\Omega\text{m}$ ]	Geomon4D /IP	50-65	2-D vertikal	lateral vertikal	Unterscheidung geolog. Einheiten hinsichtlich Verbreitung und Mächtigkeit; Zertrümmerungsgrad von grob- zu feinklastisch; Abgrenzung der Lockergesteinsgleitung vom Anstehenden
Elektromagnetik	Spez. elektr. Widerstand [ $\Omega\text{m}$ ]	CMD-Explorer	7	1-D Info zu 2D Profil	lateral vertikal	Unterscheidung geolog. Einheiten hinsichtlich Verbreitung und Mächtigkeit Zertrümmerungsgrad von grob- zu feinklastisch, oberflächennahe Detailerkundung
Radiometrie bodengebunden	Anteile der radiometrischen Elemente in Kalium [%] Uran [ppm] Thorium [ppm]	GT-32	0.5 (max.)	1-D Info zu 2D Fläche	lateral	Oberflächennah Unterscheidung geolog. Einheiten hinsichtlich Verbreitung
Radiometrie drohnengestützt (UAV)	Anteile der radiometrischen Elemente in Kalium [%] Uran [ppm] Thorium [ppm]	Gamman (MS-700)	0.5 (max.)	1-D Info zu 2D Fläche	lateral	Oberflächennah Unterscheidung geolog. Einheiten hinsichtlich Verbreitung
Geologische Detailkartierung						Erfassung der neuen Aufschlussituation, Grundlage für Interpretation der Geophysik

Tab.1: Übersicht über die spezifischen Parameter der eingesetzten geophysikalischen Methoden

### 3. Geologie des Untersuchungsgebietes

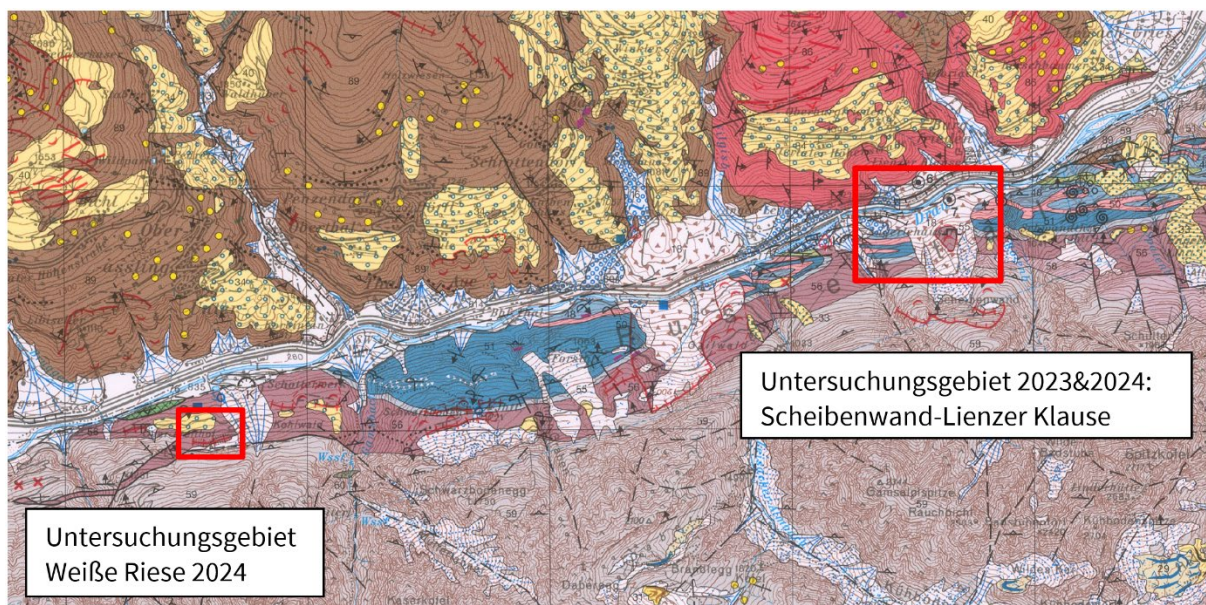


Abb. 2: Geologischer Überblick über das Untersuchungsgebiet Scheibenwand-Lienzer Klause 2023&2024, sowie Weiße Riese 2024; Auszug aus GKÖ 1:50.000, Blatt 179 - Lienz (Geologische Bundesanstalt 2014)

### 4. Fallstudie Lienzer Klause

Die Ablagerung der Scheibenwand-Lienzer Klause-Felsgleitung (Detailgebiet A; s. Abb. 3&4) [3] stellen aufgrund der Verfügbarkeit von zertrümmerten Hauptdolomit-Komponenten einen rohstoffgeologischen Testfall für das Projektziel dar. Dabei stellen sich folgende Forschungsfragen: Kann die Mächtigkeit des Hauptdolomits erfasst werden und erlaubt die Geophysik eine Differenzierung des Zertrümmerungsgrades von grob- zu feinklastisch, den internen Aufbau hinsichtlich der Nutzung als Rohstoff (Baurohstoff), sowie Aussagen über Qualität und Mächtigkeit von Bergsturzarealen zu liefern?

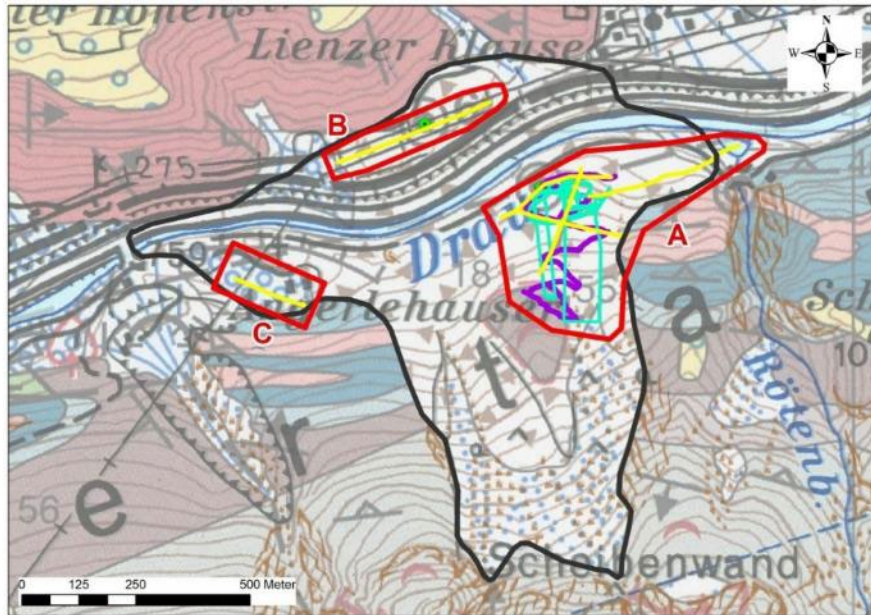


Abb. 3: Lage des Untersuchungsgebietes Scheibenwand-Lienzer Klause (schwarze Umrandung) auf GKÖ 1:50.000, Blatt 179 Lienz mit den Detailgebieten A, B, C (rote Begrenzung) und den geophysikalischen Untersuchungsmethoden. Gelbe Linien: Geoelektrik; violette Profil: Boden EM und Boden Radiometrie; türkises Profil: Drohnengeophysik-Radiometrie.

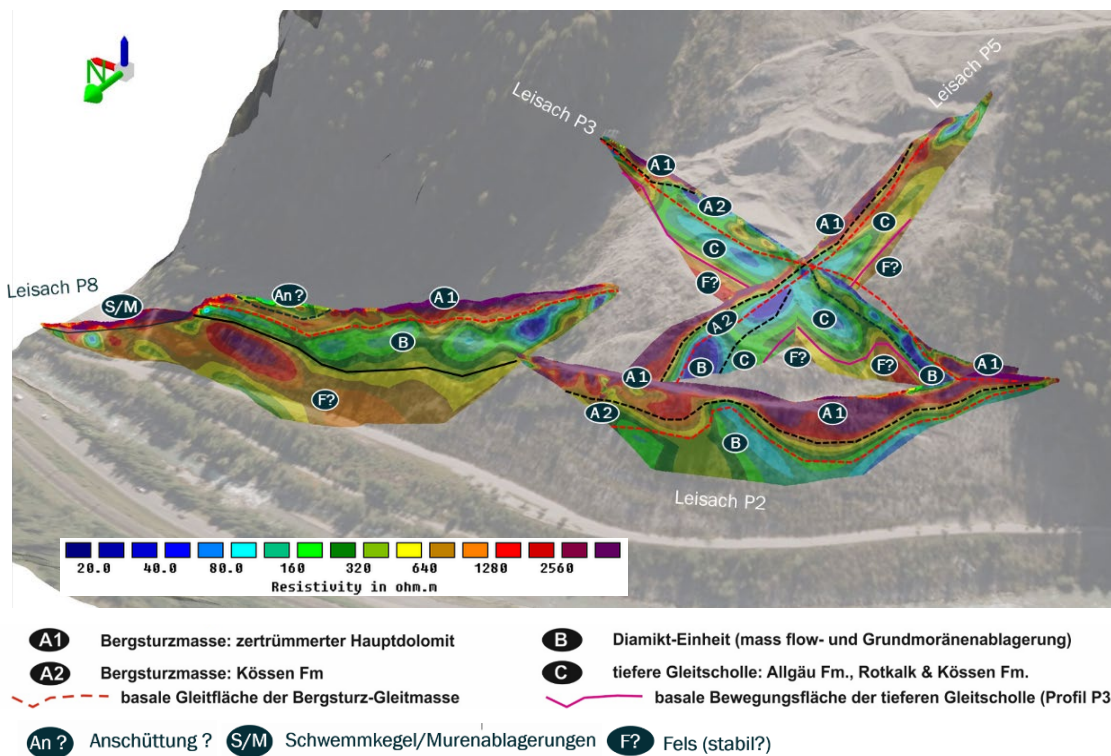


Abb. 4: 3D Gesamt-Ansicht der Inversionsergebnisse mit geologischer Interpretation der Geoelektrikprofile Leisach P2, P3, P5 und P8 auf Orthofoto; Verteilung des spezifischen elektrischen Widerstandes (Ohm-m).

Als Beispiel sind am Geoelektrikprofil Leisach P5 (Abb. 5) die geologischen Verhältnisse als Detailinterpretation ersichtlich. Hier ist zu betonen, dass im Bereich des Abbaus eine sehr komplexe Abfolge an Ablagerungen mit unterschiedlicher Genese vorliegen, deren Erläuterung den vorgegebenen Rahmen sprengen würde [4]. Deutlich ist der zertrümmerte Hauptdolomit der Bergsturzmasse als hochohmiger Körper im Hangenden zu erkennen (A1).

Die Diamikteinheit (B) und die zerscherte Kössen Formation (Fm.) bestehend aus dunklem Tonstein, Mergel, Mergelkalken (A2) weisen hier nahezu gleiche, niedrigohmige Widerstandswerte auf, die eine deutliche Abgrenzung zur Bergsturzmasse erlauben. Bei der Abgrenzung der Diamikteinheit (B) zum felsigen Teil der tieferen Gleitscholle (C) war die Interpretation von P3 prägend. Selbiges gilt auch für den vermuteten stabilen Felsbereich, der sich im Schnittpunkt in Profil P3 besser abbildet.

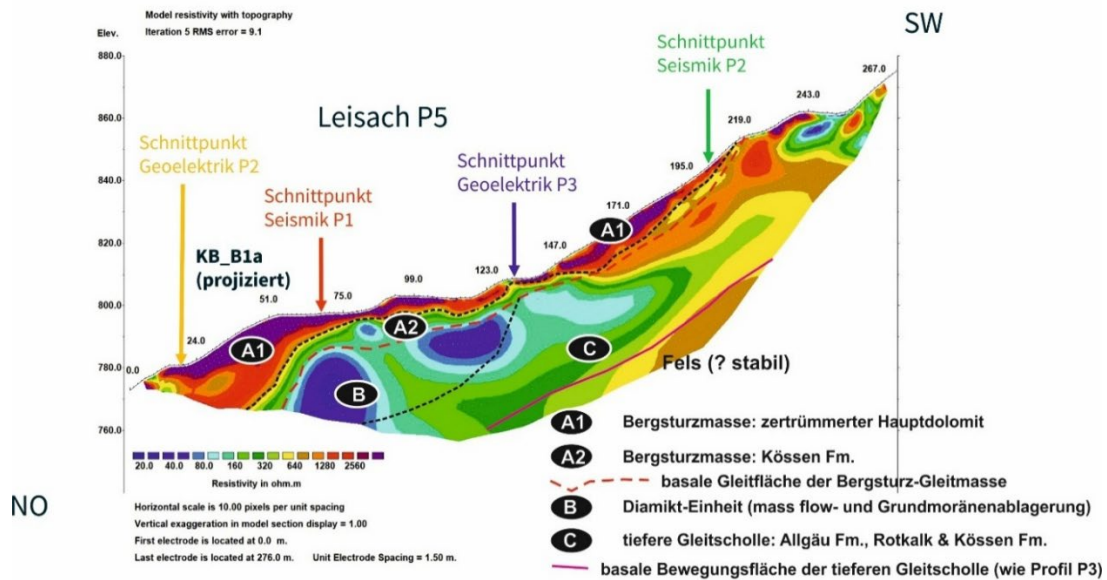


Abb. 5: Geologische Interpretation des Inversionsergebnisses von Geoelektrikprofil Leisach P5 - Verteilung des spezifischen elektrischen Widerstandes im Untergrund (Ohm-m).

In der Detailinterpretation des Geoelektrikprofils Leisach P8a (Abb. 6) sind die Möglichkeiten der Differenzierung des Zertrümmerungsgrades von grob- zu feinklastisch für die Bewertung/Nutzung als Rohstoff (Baurohstoff) beschrieben. Die Bergsturzmasse mit zertrümmerten, grobblockigen, tw. umgelagerten Hauptdolomit bildet sich als hochohmiger Widerstandskörper (A1), mit deutlich erhöhtem Feinkornanteil (Aa1) als niederohmiger Körper, ab. Diamikte im Liegenden sind deutlich niederohmiger. Diese Situation wurde durch einen Aufschluss (Abb. 7) validiert.

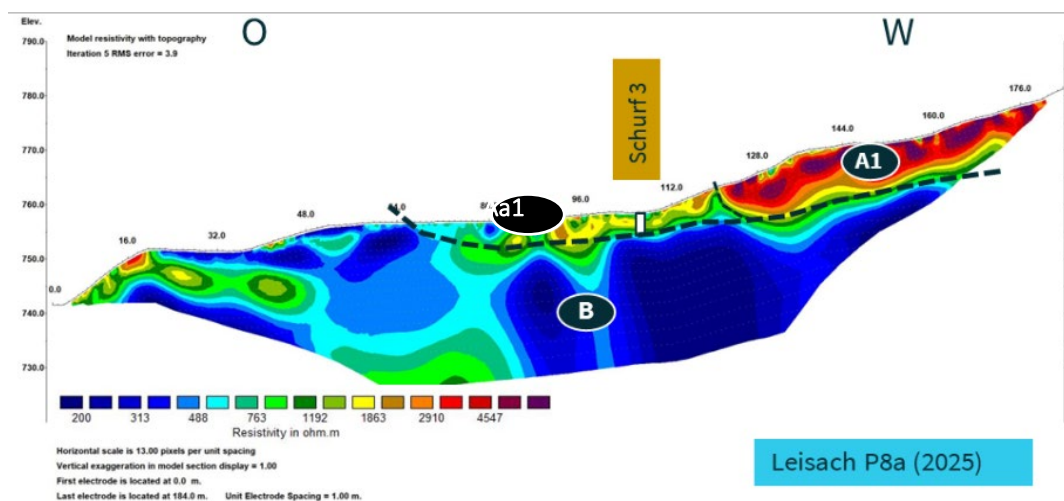


Abb. 6: Geologische Interpretation des Inversionsergebnisses von Geoelektrikprofil Leisach P5 - Verteilung des spezifischen elektrischen Widerstandes im Untergrund (Ohm-m).

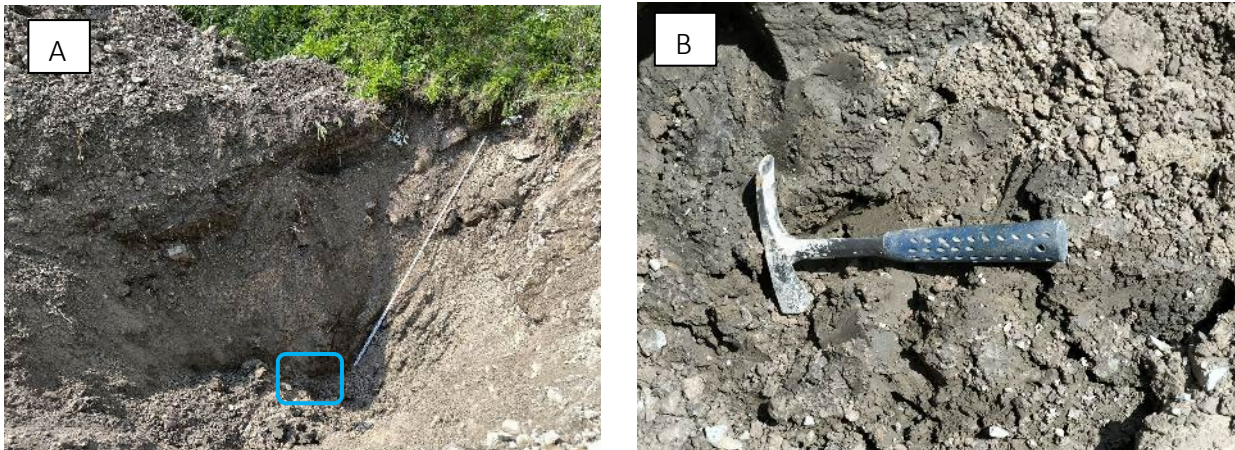


Abb. 7: Schurf 3, Bergsturzmasse aus zertrümmerten Hauptdolomit mit deutlich erhöhtem Feinkornanteil (A) und feinkörnigem Diamikt an der Basis (B).

## 5. Fallstudie Weiße Riese

Das Untersuchungsgebiet liegt im Bereich der Bergzerreißen beim Öder-Freithof (Abb. 8). Hierbei handelt es sich um eine muldenförmige Struktur, die auf eine Drautal-parallele Zerrstruktur im anstehenden Festgestein zurückzuführen ist. Dadurch ergeben sich Spaltenöffnungen, die mit Hangschutt aus Hauptdolomit (Dolomitschutt-fächer) verfüllt sind. Die unruhige Oberfläche wird mit einer Kriechbewegung der Kössener Schichten im Liegenden erklärt (Reitner 2003). Folgende Forschungsfragen sind relevant: Erlaubt die eingesetzte geophysikalische Methodik eine Feststellung der Mächtigkeit des Hangschutts in Abgrenzung zur Kössen Formation/Hauptdolomit? Ergibt sich daraus ein Ansatz der für eine Rohstoffgewinnung dienen könnte und erlaubt die Geophysik eine Differenzierung des Zertrümmerungsgrades von grob- zu feinklastisch?

Diese Muldenstruktur wurde mit zwei normal aufeinanderliegenden Geoelektrikprofilen (WR P1 & WR P2) bis zu einer Erkundungstiefe von 50 Metern erfasst. Die Auswertung als Verteilung des spezifischen elektrischen Widerstandes (Ohm-m) ist als Tiefen-Widerstandsplot samt geologischer Erstinterpretation in der Abbildung 9 ersichtlich.

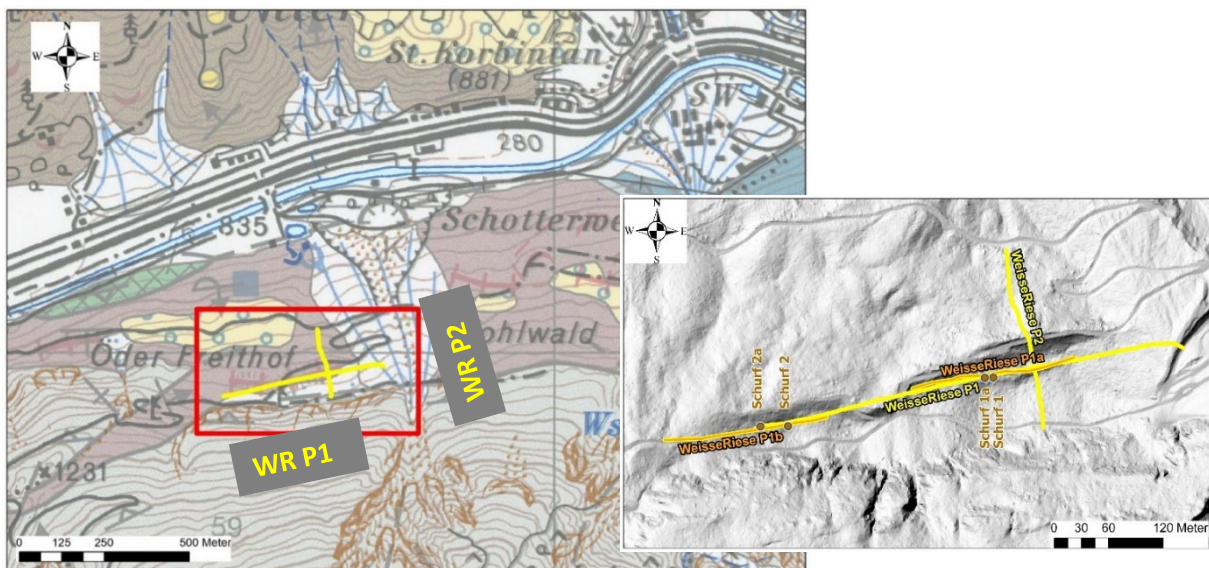
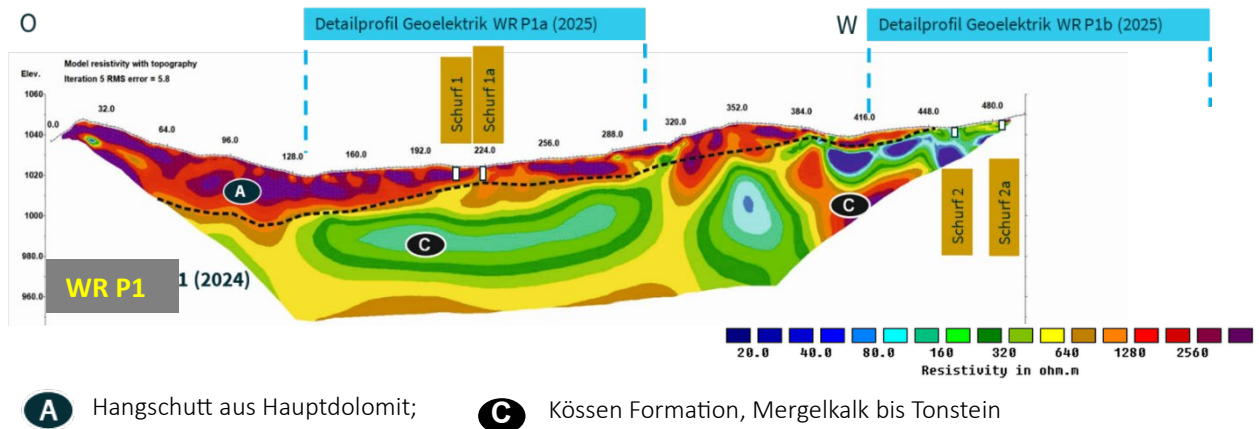


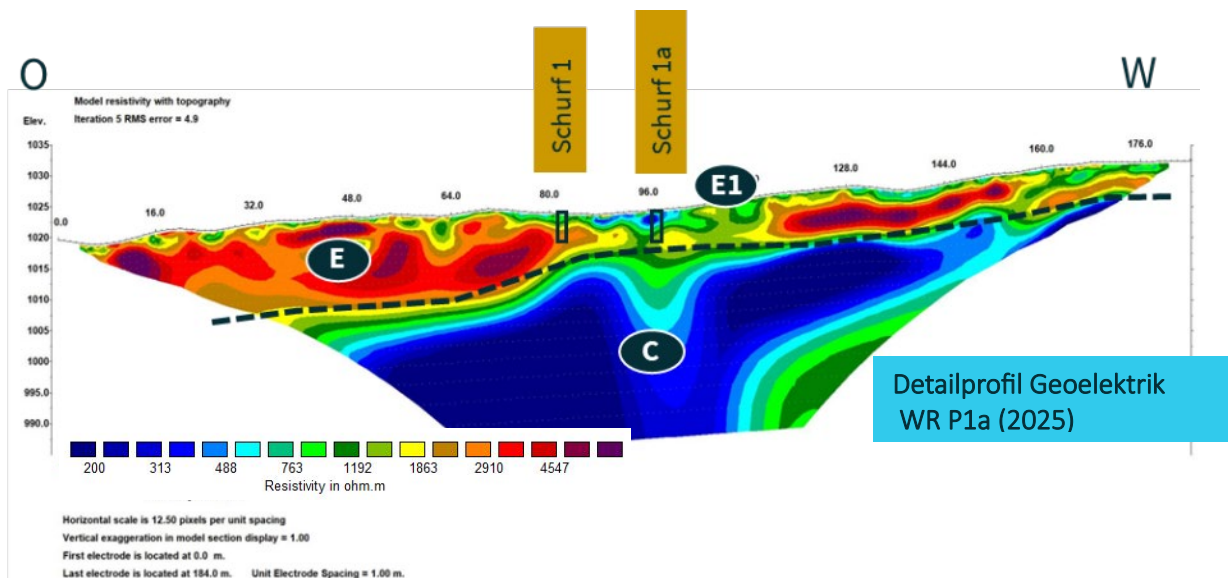
Abb. 8: Geologischer Überblick über das Untersuchungsgebiet Weiße Riese 2024; Auszug aus GKÖ 1:50.000, Blatt 179 - Lienz (Geologische Bundesanstalt 2014) auf DHM (BEV, <https://doi.org/10.48677/1b08f9aa-6e82-44ac-9131-444fb3741722>) mit Lage der Geoelektrik Profile Weiße Riese P1 (2024) und Weiße Riese P2 (2024) sowie WRP1a (2025) und WRP1b (2025)



- A** Hangschutt aus Hauptdolomit;
- C** Kössen Formation, Mergelkalk bis Tonstein

Abb. 9: Inversionsergebnis des Geoelektrikprofils Weiße Riese P1 (2024) - Verteilung des spezifischen elektrischen Widerstandes (Ohm-m) mit geologischer Erstinterpretation. Die Lage der Schürfe wurde anhand der geoelektrischen Detailprofile, WRP1a und WRP1b (siehe nächste Abbildung 10) geplant und dann endinterpretiert.

Im Vergleich zum geoelektrischen Übersichtsprofil Weiße Riese P1 (Abb. 9) zeigt das Detailprofil WRP1a (Abb.10) eine vergleichbare, aber deutlich strukturiertere Verteilung des spezifischen elektrischen Widerstands (Ohm-m). Der hochohmige Widerstandskörper, als Hangschutt aus Hauptdolomit angesprochen (Abb.9), zeigt im Detailprofil WR P1a eine heterogene Ausbildung (Abb.10) und wird entsprechend der geologischen Aufschlusssituation als Eisrandablagerung mit Felssturzlagen, tw. grobblockig (E), tw. mit höherem Feinkornanteil (E1), angesprochen.



- E** Eisrandablagerung (mit Felssturzlagen, tw. grobblockig)
- E1** Eisrandablagerung (mit Felssturzlagen, mit höherem Feinkornanteil)
- C** Kössen Formation

Abb. 10: Inversionsergebnis des Geoelektrikprofils WRP1a (2025) - Verteilung des spezifischen elektrischen Widerstandes (Ohm-m) mit geologischer Interpretation. Die Lage der Schürfe wurde anhand des geoelektrischen Detailprofile, WRP1a festgelegt und dann endinterpretiert.



Abb. 11: Schurf 1 (E: Eisrandablagerung mit Felssturzlagen, tw. grobblockig) und Schurf 1a (E1: Eisrandablagerung mit Felssturzlagen, gering grobblockig mit höherem Feinkornanteil).

## 6. Erste Schlussfolgerungen

Die bisherigen geophysikalischen Untersuchungen haben eine Abgrenzung der Bergsturzablagerungen bzw. Hangablagerungen zu anderen lithologischen Einheiten mit nachvollziehbarer Erfassung der Mächtigkeiten ermöglicht.

Eine räumliche Abgrenzung der hochohmigen Bergsturmassen sowie relevanter rohstoffgeologischer und abbaurelevanter Strukturen war selbst bei der komplexen Abfolge der Lienzer Klause möglich.

Eine interne Differenzierung von grob- zu feinklastisch konnte erfasst und mittels Aufschluss geologisch interpretiert werden.

Die bisherigen Untersuchungen zeigen die Notwendigkeit einer begleitenden geologischen Detailkartierung und ergänzender technischer Aufschlüsse (Schürfe).

Darüber hinaus verdeutlichen die Ergebnisse, dass die Kombination geophysikalischer und geologischer Methoden ein hohes Potenzial für die rohstoffspezifische Charakterisierung und Bewertung alpiner Lockersedimentvorkommen bietet.

Die gewonnenen Erkenntnisse bilden eine wesentliche Grundlage für die methodische Weiterentwicklung integrierter Prospektionsstrategien, die eine gezieltere Erkundung und Beurteilung abbauwürdiger Bereiche ermöglichen.

## Referenzen:

- [1] Pöyry, (2010): Technischer Bericht zu den Seismischen Messungen 2010, Hangrutschung Leisach. – 15. S. + Plan, 28.10.2010, Pöyry Infra GmbH, Salzburg
- [2] Linner, M., Reitner, J.M. & Pavlik, W. (2013): Geologische Karte der Republik Österreich 1:50.000, ÖK 179 Lienz. – Geologische Bundesanstalt, Wien.
- [3] Reitner, J.M. (2010): Die quartäre Landschaftsentwicklung im Raum Lienz anhand von Sedimenten und Massenbewegungen. - Vortrag an der Universität Innsbruck am 16.12.2010.
- [4] Pargger, M. (2016): Die instabilen Talflanken südlich der Lienzer Klause – Osttirol. Masterarbeit, Eingereicht an der naturwissenschaftlichen Fakultät der Leopold-Franzens-Universität Innsbruck zur Erlangung des akademischen Grades Master of Science, 200 S. + 44. S. Beil., Innsbruck.

## Danksagung 2025

Wir bedanken uns ganz besonders bei Frau Landesrätin Astrid Mair, BA MA, die das Geoforum Umhausen sehr unterstützt und mit ihrer Wertschätzung für die Tagung wesentlich zu deren erfolgreichen Ablauf beiträgt. Sie hat auch heuer wieder dankenswerter Weise die Tagung Geoforum Umhausen eröffnet.

Die Gemeinde Umhausen ist – wie bisher – auch heuer wieder mit ihrem Bürgermeister, Herrn Landtagsabgeordneten und Klubobmann Mag. Jakob Wolf, ein unverzichtbarer Partner des Geoforums. Dem Bürgermeister der Gemeinde Umhausen, möchten wir dafür sehr herzlich Danke sagen. Auch dem 1.Vizebürgermeister der Gemeinde Umhausen, Herrn Helmut Falkner gilt unser herzlicher Dank.

Die Unterstützung der Gemeinde Umhausen zeigt sich dankenswerter Weise auch in der mit großem Engagement ausgeführten Mitarbeit durch Frau Anna-Lena Müller, sowie in der Unterstützung durch weitere Mitarbeiter der Gemeinde.

Ich möchte auch dem Organisationsteam ganz besonders Danke sagen. Ohne den unermüdlichen Einsatz von Herrn Mag. Wolfram Mostler, Frau Denise Braunhofer, MSc und Herrn Filip Stuffer, Bsc (Ingenieurgeologie Mostler, IG.M) sowie Herrn Christoph Braunhofer, Msc hätte das 27. Geoforum Umhausen 2025 nicht organisiert werden können.

Die nötige Saalkontrolle wurde durch Mitarbeiter des Amtes der Tiroler Landesregierung ermöglicht. Wir danken dafür sehr Herrn HR Elmar Rizzoli (Vorstand der Abt. Krisen- und Gefahrenmanagement im Amt der Tiroler Landesregierung).

Ich darf auch ganz besonders Herrn Manfred Scheiber /Vorstand Raiffeisenbank im Ötztal und Umgebung für die hervorragende Ausgestaltung des Werbeplakats für den heurigen Öffentlichen Abendvortrag danken.

Unser Dank gilt auch unseren Sponsoren, die uns auch heuer wieder maßgeblich unterstützt haben.

Betonen möchte ich, dass die Tagungen Geoforum Umhausen jedes Jahr vom Engagement hervorragender Expertinnen und Experten und von ihren ausgezeichneten Vorträgen, aber auch vom großen Interesse der teilnehmenden Fachleute lebt. Vielen herzlichen Dank dafür.

Hofrat Dr. Gunther Heißel  
(Präsident Verein Geoforum Tirol)

Wir bedanken uns für die finanzielle Unterstützung

**B. NAGELE**

**STARKENBACH**

**KIESWERK**



**AUERBAU**

projekt-partner



koordination mediation kommunikation



**Raiffeisenbank  
im Ötztal und Umgebung**



## ORGANISATION/ KONTAKT:

HR Dr. Gunther Heißel, Rietz  
Mag. Wolfram Mostler, Innsbruck  
[www.geoforum-umhausen.at](http://www.geoforum-umhausen.at)  
[info@geoforum-umhausen.at](mailto:info@geoforum-umhausen.at)

## PARKMÖGLICHKEIT:

Parkplatz Niederthai



## VERANSTALTUNGSRAUM:

Feuerwehrgebäude Niederthai



## TAGUNGSHOTEL:

Falkner Hof  
6441 Umhausen - Niederthai  
Tel.: +43 5255 / 55 88  
[info@falknerhof.com](mailto:info@falknerhof.com)



# 27. GEOFORUM UMHAUSEN

## 16. – 17. Oktober 2025

© GEOGNOS Bertle ZT GmbH



**VERANSTALTUNG**  
im  
**Tagungssaal**  
Niederthai  
mit

**öffentlichem**  
**Abendvortrag**  
**16.10.2025**  
(Freier Eintritt)

Donnerstag		16.10.2025	
Zeit	Vortragende	Institution	Thema
07:30 - 09:00	Registrierung im Feuerwehrgebäude Niederthai		
09:00 - 09:30	Landesrätin Astrid MAIR (BA MA (Sicherheit, ArbeitnehmerInnen, Generationen, Zivi- und Katastrophenschutz) und LA Klubobmann Bürgermeister Mag. Jakob WOLF		ERÖFFNUNG
09:30 - 10:00	RIZZOLI Elmar HR*) GEILER Thomas**)	*) Leiter des Tiroler Zentrums für Krisen- und Gefahrenmanagement **) Stv. Leiter der Abt. Leitstellenwesen und Landeswarnzentrale, Leiter des Landes-Warn- und Lagezentrums	Bevölkerungswarnung im Kontext steigender Naturgefahren
10:00 - 10:30	VOLGGER Sabine	clavis Kommunikationsberatung GmbH	Bedeutung und Rolle von Expert:innen in der Kommunikation
10:30 - 11:00	PAUSE		
11:00 - 11:30	ENGL Daniela*) KAMMERLANDER Johannes**)	*) WLW Fachzentrum Geologie und Lawine **) WLW Gebietsbauleitung Ausserfern	Ingenieurgeologisches Prozessverständnis als Grundlage für die Gefahrenzonenplanung Ein Beispiel aus der Praxis der Wildbach- und Lawinenverbauung (WLW)
11:30 - 12:00	GEBHARD Tobias	LGA Umweltgeologie und Altlasten, Deutschland	Gefahren- und Risikoanalyse von Stein- und Blockschlag im Oberen Wiesental der Fränkischen Alb.
12:00 - 12:30	FEGERL Ludwig	Leitung Landesgeologischer Dienst Salzburg	Chroniken eines Radweges - Risikomanagement
12:30 - 14:30	MITTAGSPAUSE		
14:30 - 15:00	RADINGER Alexander AVERDUNK Sebastian	GEODATA	GEODATA ARGOS - Smart Impact Monitoring- Einblicke in innovative Monitoring-Technologien
15:00 - 15:30	BERTLE Rufus BERTLE Heiner	GEOGNOS Bertle ZT	Alpine Infrastruktur im Klimawandel - Intensivierte Landnutzung und erhöhter Sicherheitsanspruch versus verstärkte Gebirgsentfestigung
15:30 - 16:00	HILBERG SYLKE et al.	Department of Environment and Biodiversity, Paris Lodron University of Salzburg	Historischer Kupferbergbau im UNESCO Global Geopark „Erz der Alpen“ Geologisches Erbe und potentielle Grundwassergefahr
16:00 - 16:30	PAUSE		
16:30 - 17:00	SEELIG Simon et al.	Institut für Erdwissenschaften, NAWI Graz Geocenter, Universität Graz	Der Anteil jungen Wassers am Quellabfluss
17:00 - 17:30	THALHEIM Felix et al.	Energieagentur Tirol - Leitung Ressourcen und Technologien	Die Großquellen Tirols – Systematische Aufnahme der strategischen Wasserressourcen

# 19:00 ÖFFENTLICHER ABENDVORTRAG

im Tagungssaal Niederthai

DI Harald OBLASSER

Amt der Tiroler Landesregierung, Vorstand Gruppe Forst  
„Tiroler Waldstrategie 2030 – wie der Tiroler Wald  
zukunftsfit gemacht wird“

anschließend ABENDEMPFANG des Bürgermeisters

Freitag	17.10.2025		
Zeit	Vortragende	Institution	Thema
08:00 - 09:00	Registrierung im Feuerwehrgebäude Niederthai		
09:00 - 09:30	RAINER Stefan STEINWENDER Andreas	HTB Baugesellschaft m.b.H.	Neuartige Erkundungsbohrtechnologie mit Kernbohrlafette für exponierte Lagen
9:30 - 10:00	FREI Walter	FREI Engineering Seismology Consult	Nicht invasive, flächendeckende Herleitung der dynamisch abgeleiteten gesteinsmechanischen Elastizitätskonstanten mittels Low Cost 3D Hybridseismik
10:00 - 10:30	PAUSE		
10:30 - 11:00	REISER Martin HINTERSBERGER Esther	Geosphere Austria	Erstellung der Allgemeinen Geologischen Legende für Österreich (EAGLe-Projekt); Fallbeispiele aus dem Ötztal-Stubai Kristallin
11:00 - 11:30	DIETRICH Valentina et al.	geodietrich – Dr. mont. Dietrich, Dölsach GeoSphere Austria	Geophysikalisch-rohstoffgeologische Analyse von Bergsturzmaterial für die Verwendung als Baurohstoff – Fallstudie Pustertal/Osttirol

## TAGUNGSSAAL NIEDERTHAI (Feuerwehrgebäude)

Anfahrt siehe Homepage

### INFORMATIONEN und KONTAKT:

[www.geoforum-umhausen.at](http://www.geoforum-umhausen.at)

[info@geoforum-umhausen.at](mailto:info@geoforum-umhausen.at)



## Tagungshotel:



### FALKNERHOF

6441 Umhausen - Niederthai

Tel.: +43 5255 / 55 88

Fax.: +43 5255 / 55 88 47

E-Mail.: [info@falknerhof.com](mailto:info@falknerhof.com)



Raiffeisenbank  
im Ötztal und Umgebung



# „Tiroler Waldstrategie 2030“ des Landesforstdienstes



Öffentlicher Abendvortrag im Rahmen des  
**27. Geoforums Umhausen**

von

**DI Harald OBLASSER**



**Donnerstag, 16.10.2025**

Lärchensaal (Feuerwehrgebäude)

**Niederthai**

Beginn: 19:00 Uhr

**Eintritt frei!**