Bundesministerium
Land- und Forstwirtschaft,
Klima- und Umweltschutz,
Regionen und Wasserwirtschaft

DaFNE

Blockgletscher als Grundwasserspeicher in alpinen Einzugsgebieten und ihr Einfluss auf übergeordnete Flusssysteme unter dem Aspekt des Klimawandels (RGAlpCatch)

Kurzbericht

UNI GRAZ

NAWI Graz
Natural Sciences

Impressum

Projektnehmerin: Universität Graz, NAWI Graz Geozentrum, Institut für Erdwissenschaften
Adresse: Heinrichstraße 26, 8010 Graz
Projektleiter: Assoz. Prof. Dr. Gerfried Winkler
Tel.: +43 316 380 5585
E-Mail: gerfried.winkler@uni-graz.at
Kooperationspartner:in: GeoSphere Austria; Universität Innsbruck, Institut für Geologie und Paläontologie; JR-AquaConsol GmbH; Geo-Zt GmbH; Umweltbundesamt; Universität für Bodenkultur
Finanzierungsstelle(n): Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Klima- und Umweltschutz, Regionen und Wasserwirtschaft; Amt der Kärntner Landesregierung; Amt der Salzburger Landesregierung; Amt der Steiermärkischen Landesregierung; Amt der Tiroler Landesregierung; Amt der Vorarlberger Landesregierung
Projektlaufzeit: 2020–2024
Autor:innen: Gerfried Winkler, Simon Seelig, Magdalena Seelig, Matevž Vremec, Thomas Wagner, Karl Krainer, Rudolf Philippitsch, Michael Avian, Klaus Haslinger, Heike Brielmann, Lisa Fischer, Albrecht Leis, Markus Ribis, Stephan Hann, Richild Mauthner-Weber

Fotonachweis: Gerfried Winkler: Cover – Gampesee im Radurschltal, Tirol; Abbildung 4a, Abbildung 14b, Abbildung 24a; Simon Seelig: Abbildung 4b+d, Abbildung 13, Abbildung 20a+b, Abbildung 24b+c+d, Abbildung 29c+d, Abbildung 30; Thomas Wagner: Abbildung 4c, Abbildung 6a+b,Abbildung 29a+b; Rudolf Philippitsch: Seite 9, Seite 14, Abbildung 9, Abbildung 10, Abbildung 14a; Melina Frießenbichler Abbildung 47 (09/2025); Google Earth Abbildung 46 (12/2007, 10/2019), Abbildung 47 (6/2025);

Wien, 2025. Stand: 31. Oktober 2025

Danksagung

Die dargelegten Erkenntnisse wurden im Rahmen des Forschungsprojektes „RGAlpCatch: Blockgletscher als Grundwasserspeicher in alpinen Einzugsgebieten und ihr Einfluss auf übergeordnete Flusssysteme unter dem Aspekt des Klimawandels“ (DaFNE 101561) gewonnen, das aus Mitteln des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Klima- und Umweltschutz, Regionen und Wasserwirtschaft sowie dem Amt der Kärntner Landesregierung, dem Amt der Salzburger Landesregierung, dem Amt der Steiermärkischen Landesregierung, dem Amt der Tiroler Landesregierung und dem Amt der Vorarlberger Landesregierung finanziert wurde. Die Autorinnen und Autoren bedanken sich bei der TIWAG-Tiroler Wasserkraft AG, der illwerke vkw, der Stadtgemeinde Spittal an der Drau, sowie den Hydrographischen Diensten der Bundesländer Kärnten, Salzburg, Steiermark, Tirol und Vorarlberg für die Bereitstellung ergänzender Daten und ihre Unterstützung im Gelände. Darüber hinaus gilt ihr besonderer Dank Michael Ferstl, Martin Schröttner, Peter Rauch, Barbara Stromberger, Jochen Schlamberger, Hans Wiesenegger, Harald Huemer, Clemens Mathis, Jutta Eybl, Thomas Nester, Johannes Schöber, Michaela Arnhof, Maria Obwegs, Matthias Hausleber, Christian Reszler, Lukas Kohlmaier, Josef Waldner, Bertram Netzer, Andreas Pilz, Andreas Brandstätter, Andrina Janicke, Michael Fritz, Günter Bichler, Bertold Uggowitzer, Claudia Puschenjak, Maria Brandmayr, Thomas Aigner und Josef Wieland für fachliche Ratschläge und ihre Unterstützung bei Geländearbeiten. Die Autor:innen danken Vanessa Arrighi herzlich für das Zeichnen und Digitalisieren der schematischen Darstellung in Abbildung 1.

Inhalt

Danksagung **3**

1 Zusammenfassung **5**

2 Fachliches Vorwort: Grundlagenforschung zu Blockgletschern im BMLUK **9**

3 Einleitung und Zielsetzung **15**

4 Grundlagen **18**

5 Untersuchungsgebiete **23**

5.1 Ingering- und Gaalgraben, Schöneben (Steiermark) 27

5.2 Lantschfeld und Taurachtal (Salzburg) 32

5.3 Hintereggengraben (Kärnten) 36

5.4 Radurschltal (Tirol) 40

5.5 Vergalda- und Valzifenztal (Vorarlberg) 44

6 Wasserwirtschaftliche Bedeutung **48**

6.1 Blockgletscher als Grundwasserspeicher 48

6.2 Blockgletscher im alpinen Abflussgeschehen 55

6.2.1 Niederschlags-Abfluss-Modellierung 56

6.2.2 Isotope – Validierung 72

6.3 Wasserqualität 86

6.3.1 Hydrochemie 86

6.3.2 Persistente organische Schadstoffe 98

7 Klimawandel **101**

8 Schlussfolgerungen **117**

Tabellenverzeichnis **122**

Abbildungsverzeichnis **124**

Literaturverzeichnis **131**

1 Zusammenfassung

Die Alpen sind besonders stark vom Klimawandel betroffen. Steigende Temperaturen, schmelzende Gletscher, veränderte Schneedeckendynamik, auftauendes Permafrosteis und häufiger auftretende Extremwetterereignisse verändern das Abflussverhalten von Quellen und Flüssen maßgeblich. Zugleich sind alpine Einzugsgebiete für die Wasserversorgung unverzichtbar, da sie überproportional viel Wasser in das darunterliegende Alpenvorland liefern. Ein besseres Verständnis dieser Prozesse ist daher entscheidend für eine nachhaltige Nutzung alpiner Wasserressourcen.

Blockgletscher bilden wichtige Porengrundwasserleiter in Österreichs Gebirgsregionen, an die sehr häufig Quellen mit hohen Schüttungen (Schüttungsspitzen von mehreren hundert Litern pro Sekunde) gebunden sind. Diese Landschaftsformen aus Schutt und Eis werden unter Permafrost-Bedingungen gebildet und können große Mengen an Wasser speichern, welches zeitverzögert wieder abgegeben wird. So puffern sie Starkniederschläge und Schneeschmelze ab und sichern den Basisabfluss von Bächen und Flüssen während des Winters sowie während sommerlicher Trockenperioden. Im Projekt RGAlpCatch wurden Blockgletscherquellen in fünf Testgebieten untersucht, ihre Bedeutung für das alpine Gewässernetz erfasst und ihr Abflussverhalten mittels Klimaszenarien (RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5) bis zum Ende des 21. Jahrhunderts simuliert. Parallel dazu wurde ein umfassendes Mess- und Probenahmeprogramm zur isotopenhydrologischen Charakterisierung der Wässer durchgeführt. Dazu richtete das Forschungsteam ein Monitoringnetzwerk mit 14 Pegeln an Blockgletscherquellen ein und ergänzte es mit vier langfristig bestehenden Pegelstationen des Hydrographischen Dienstes Österreichs, der TIWAG-Tiroler Wasserkraft AG und der illwerke vkw, die die übergeordneten Einzugsgebiete (bis 200 km²) erfassen. Zusätzlich erfolgte eine Probenahme zur Ermittlung anorganischer Spurenstoffe sowie der Belastung durch persistente organische Schadstoffe. Durch Kombination dieser Ansätze wird eine evidenzbasierte Grundlage für die quantitative und qualitative wasserwirtschaftliche Planung im hochalpinen Raum geschaffen. Das Projekt dient somit der Charakterisierung dieser hochalpinen Porengrundwasserkörper und ihres Einflusses auf übergeordnete Flusssysteme im Sinne des Nationalen Gewässerbewirtschaftungsplans gemäß EU-Wasserrahmenrichtlinie 2000/60/EG.

Als Grundlage für die überregionale wasserwirtschaftliche Planung wurden die in Blockgletschern gespeicherten **Wasserressourcen** für den österreichischen Alpenraum abgeschätzt – einerseits hinsichtlich der gegenwärtig in Form von Permafrosteis gebundenen Ressourcen, andererseits hinsichtlich des zur Grundwasserspeicherung verfügbaren Porenraums. Österreichweit sind Blockgletscher in der Lage, ein Grundwasservolumen von bis zu 0,6 km³ zu speichern und erst mit mehrmonatiger Verzögerung an die darunter liegenden Bäche und Flüsse abzugeben. Dies entspricht in etwa dem 1,4-fachen des jährlichen Trinkwasserbedarfs Österreichs und gewährleistet den Basisabfluss während der langen, Schmelz- und Regenwasser armen Winterperiode im Hochgebirge. Darüber hinaus speichern sie langfristig ein Wasseräquivalent von etwa 0,9 km³ in Form von Permafrosteis. Dieses verändert sich im Vergleich zu den Gletschern nur sehr langsam im Zuge des Klimawandels: Das Permafrosteis ist durch die auflagernde Sedimentschicht gut geschützt und schmilzt nur langsam ab, wodurch dann weiterer Porenraum für die Grundwasserspeicherung frei wird und in Zukunft als zusätzlicher Speicher zur Verfügung stehen wird.

Die Ergebnisse der Forschungsarbeiten verdeutlichen auch die zentrale Rolle von Blockgletschern für die **hochalpine Entwässerungsdynamik**, insbesondere in Gebieten mit kristallinem Festgesteinsuntergrund. Aufgrund ihrer internen Struktur zeigen sie eine hydrogeologische Speicher- und Pufferfunktion, die sich in mehrfacher Hinsicht ausdrückt: (1) Ihre grobblockige Oberfläche bedingt eine hohe Infiltrationskapazität, sodass große Wassermengen – beispielsweise während Starkniederschlägen oder Regenereignisse während der Schneeschmelze – aufgenommen werden können. (2) Zugleich ist ihre feinkörnige, ungefrorene Basisschicht in der Regel bis zu mehrere Meter mächtig und in der Lage, Grundwasser über Monate (> 2–3 Monate, mitunter deutlich länger) hinweg zu speichern und an den Quellen verzögert wieder abzugeben.

Der **Einfluss der Blockgletscher-Einzugsgebiete auf übergeordnete Gewässer** kann je nach Ausdehnung und Verteilung saisonal beträchtlich ausfallen. Insbesondere in kristallinen Gebieten kann der Blockgletscher-Abfluss nahezu den gesamten Basisabfluss (> 90 %) von Flüssen erster Ordnung bereitstellen. In größeren Einzugsgebieten (bis 200 km²) weist der Blockgletscher-Abfluss typischerweise eines von zwei Mustern auf: (1) „Schmelzwasser-dominiert“, mit starkem Einfluss im späten Frühjahr auf die Abflussdynamik übergeordneter Gewässer, insbesondere in Einzugsgebieten mit Karstaquiferen und/oder großvolumigen Sedimentfüllungen in den Tallagen; (2) „Grundwasser-dominiert“ bei starkem Einfluss unter Basisabflussbedingungen,

insbesondere in jenen Einzugsgebieten, in denen Blockgletscher die quantitativ wichtigsten Grundwasserspeicher darstellen.

Durch ihre hohe, entlegene Lage sind Blockgletscher als Grundwasserleiter vor anthropogenen Verunreinigungen in der Regel gut geschützt. Negative Einflüsse auf die **Wasserqualität** ergeben sich jedoch lokal durch geogene Ursachen – etwa in Form erhöhter Schwermetallbelastungen im Umfeld von Vererzungen im Gestein: Die fortdauernde Bewegung intakter Blockgletscher produziert stets neue, frische Mineralbruchflächen, die eine Lösung und Anreicherung der Metalle im Grundwasser begünstigen. Des Weiteren konnten auch vereinzelte Verunreinigungen durch persistente organische Schadstoffe, wie beispielsweise per- und polyfluorierte Alkylverbindungen (PFAS), durch atmosphärischen Eintrag nachgewiesen werden. Insofern ist stets eine lokale Risikobewertung von Entnahmestellen für Trinkwasserversorgungen vorzunehmen, da eine geringfügige Hintergrundbelastung vorliegen kann.

Die **prognostizierten Abflussveränderungen im Zuge des Klimawandels** zeigen, dass sich die Abflussmenge in den meisten Fällen lediglich um einige Prozentpunkte verändern wird, es kommt zu einer Zunahme im Osten und einer Abnahme im Westen. Auffallend ist eine deutliche, saisonale Verschiebung der Abflussdynamik. In allen Untersuchungsgebieten werden deutlich erhöhte Abflüsse im Frühjahr und Frühsommer erwartet, gestaffelt nach Höhenlage und zukünftigem Zeitpunkt der Schneeschmelze. Die Spitzenabflüsse treten entsprechend 1–2 Monate früher auf. In tiefer gelegenen Gebieten können häufigere Wärmeperioden während der Wintermonate den Basisabfluss zusätzlich deutlich erhöhen. Die alpinen Grundwasserspeicher werden somit früher gefüllt und beginnen früher auszulaufen, in Kombination mit einer verstärkten Verdunstung während der Sommermonate (höhere Lufttemperatur) ergibt sich ein ausgeprägtes Abflussdefizit in dieser Zeit. Zeitpunkt und Ausprägung dieser Veränderungen hängen dabei maßgeblich von den hydrogeologischen Gegebenheiten der Einzugsgebiete ab, insbesondere von den verfügbaren Grundwasserleitern und ihrer räumlichen Verteilung. Diese können die saisonalen Veränderungen teilweise abschwächen jedoch nicht ausgleichen. Die Ergebnisse legen auch nahe, dass der sich ändernden Schneedeckendynamik eine Schlüsselrolle hinsichtlich der zukünftigen Verfügbarkeit alpiner Wasserressourcen zukommt.

Aus **wasserwirtschaftlicher Perspektive** ermöglichen die gewonnen Erkenntnisse eine planbare, nachhaltige Nutzung der von Blockgletschern zur Verfügung gestellten Wasserressourcen. Die zukünftigen Veränderungen der Abflussdynamik sind durch kombinierte Auswertung von Klimaszenarien und Niederschlags-Abfluss-Modellen prognostizierbar und ermöglichen eine langfristige Planung durch die öffentliche Hand. Auf dieser Grundlage können frühzeitig Maßnahmen ergriffen werden, um möglichen Schwierigkeiten und Nutzungskonflikten – beispielsweise infolge des sommerlichen Abflussrückgangs – zu begegnen und im Spannungsfeld zwischen steigender Nutzung des Alpenraums durch beispielsweise Tourismus und erforderlichem Schutz seiner Wasserressourcen zu vermitteln. Da insbesondere der Einfluss der veränderten Grundwasserneubildung durch Schnee die zukünftige Verfügbarkeit alpiner Wasserressourcen bestimmen wird, ist ein verbessertes Verständnis dieser Prozesse anzustreben. Das vorliegende Projekt trägt dazu bei, eine Grundlage für die dauerhafte Versorgungssicherheit in den alpinen und hochalpinen Räumen der österreichischen Alpen zu schaffen, aus denen Perspektiven für ihre künftige Entwicklung abgeleitet werden können.

2 Fachliches Vorwort: Grundlagenforschung zu Blockgletschern im BMLUK

Rudolf Philippitsch; Eissee in der Venedigergruppe

Praxisorientierte Grundlagenforschung ist für das Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Klima- und Umweltschutz, Regionen und Wasserwirtschaft (BMLUK) seit jeher eine wichtige Aufgabe.

In Umsetzung der gesetzlichen Vorgaben kann nur durch eine stetige Wissenserweiterung auf die immer rasanter verlaufenden naturbedingten und zum Großteil vom Menschen verursachten Veränderungen der Umwelt reagiert werden. Dabei bestimmen sehr komplexe Ursachen die sich immer stärker auswirkenden Folgen auf Mensch und Natur. Daraus resultieren zahlreiche Aufgaben und Herausforderungen, die zu unser aller Wohl bewältigt werden sollen.

Die **Grundlagenforschung** hilft dabei, völlig neue Erkenntnisse zu erarbeiten, Entwicklungsmethoden abzuleiten und zu etablieren. Mit der angestrebten Praxistauglichkeit ist es möglich, Einzelergebnisse auch auf größere Flächen des

Bundesgebiets zu übertragen. Grundsätzlich stellt diese Art der Forschung eine besondere wissenschaftliche Herausforderung für alle Beteiligten dar, die große Ausdauer und entsprechende Budgetmittel erfordert. Das BMLUK setzt sich darüber hinaus zum Ziel, sein Engagement in der praxisorientierten Forschung über einen offenen Zugang bekannter zu machen und auch komplexe Inhalte einzelner Forschungsprojekte einer breiteren Bevölkerungsschicht in verständlicher Form zugänglich zu machen. Die eigens eingerichtete Forschungsplattform „DaFNE" (Datenbank für Forschung zur Nachhaltigen Entwicklung) ermöglicht eine strukturierte Abwicklung von Projekten und informiert über Forschungsaktivitäten. Abgeschlossene Forschungsprojekte und auch zugrundeliegenden Daten werden dort in der Folge veröffentlicht. Zahlreiche Projekte werden auch in Zusammenarbeit mit den Bundesländern administrativ und finanziell abgewickelt. Die Beauftragungen erfolgen sowohl an staatliche Forschungsinstitutionen als auch an universitäre und private Forschungseinrichtungen.

Die wasserwirtschaftliche **Trink- und Nutzwasserbedeutung von Blockgletschern** in Verbindung mit dem **Schutz vor Naturgefahren** hat in den letzten Jahrzehnten auch in Österreich immens an Stellenwert gewonnen. Dies vor allem durch die alpinen, touristischen Erschließungen im Hochgebirge und der gleichzeitigen, stetigen Zunahme der Auswirkungen des Klimawandels mit den bekannt negativen Folgen.

Blockgletscher sind in der Regel Landschaftsformen im Gebirge, die aus Eis- und Gesteinsschuttmassen mit zungenförmiger Ausbildung bestehen. In der Zwischenzeit sind sie auch als wichtige Grundwasserspeicher und maßgebliche Indikatoren für den Rückgang des Permafrostes durch Temperaturerhöhung erkannt worden. Häufig werden die Blockgletscher, gerade in tieferen Hochgebirgslagen, in der Landschaft als solche nicht wahrgenommen, weil sie schon meist bewachsen sind.

Seit Jahren werden vermehrt Forschungsaktivitäten über die gesamten Ost- und Westalpen vor allem in der Schweiz, aber auch in Italien und Südtirol sowie in Frankreich zur Blockgletscher- und Permafrostthematik vorangetrieben. Ein vorrangiges Ziel ist, das generelle Gefahrenpotential der Gesteinsschuttmassen, die sich in Bewegung befinden, für die darunterliegenden Tallandschaften im Auge zu behalten. In Verbindung mit dem Permafrostrückzug im Hochgebirge, der zu verstärkten Gesteinsabbrüchen der immer instabiler werdenden Gebirgsmassive führt, sowie mit Murenabgängen durch Starkniederschlagsereignisse, besteht bereits dringender Handlungsbedarf. Auf Basis der verschiedenen Forschungsarbeiten können rechtzeitig geeignete Schutzmaßnahmen für die darunterliegenden Tallandschaften und Siedlungsräume eingeleitet werden. Diese sind

gerade im Hochgebirge äußerst kostenintensiv, aber naturgemäß alternativlos. Trotz aller Anstrengungen muss festgehalten werden, dass es dabei Grenzen gibt und ein 100%iger Schutz nicht möglich ist.

Bei wissenschaftlichen Grundlagenprojekten erfolgt in der Regel eine stufenweise Bearbeitung, um die vorab formulierten Ziele zu erreichen. Zwischenergebnisse werden getestet und evaluiert, um im Laufe der Projektarbeiten erforderliche Anpassungen der weiteren Arbeitsschritte durchzuführen. Diese Herangehensweise wurde auch bei den bisherigen Forschungsaktivitäten des BMLUK zu den Blockgletschern in Österreich ab dem Jahr 2016 angewendet. **Die gegenständliche Veröffentlichung soll einen zusammenfassenden Überblick zu den umfangreichen Inhalten der beiden abgeschlossenen Gundlagenforschungsprojekte über die Blockgletscher geben.**

Auf Basis der angeführten stufenweisen Vorgangsweise konnte im Auftrag des BMLUK und unter Mitbeteiligung der Bundesländer Vorarlberg, Tirol, Salzburg, Steiermark und Kärnten in einer ersten Stufe im Jahr 2019 das DaFNE-Blockgletscher-Forschungsprojekt **„Wasserwirtschaftliche Aspekte von Blockgletschern in Kristallingebieten der Ostalpen“** (RGHeavyMetal) unter Federführung der Universität Graz, Institut für Erdwissenschaften, erfolgreich abgeschlossen werden.

Dabei ist es in eindrucksvoller Weise gelungen, ein **einheitliches Blockgletscherinventar** für die österreichischen Ostalpen auf Basis moderner Laserscanning-Daten zu etablieren. Darüber hinaus wurde der bisherige Wissensstand betreffend die charakteristischen Eigenschaften von Blockgletschern zur Hydrologie über das **Abfluss- und Speicherverhalten**, die **hydrogeologischen Charakteristika** der Geschiebemassen sowie deren spezielle **geochemische Wasseranalytik** (Isotopen, Spurenelemente) entscheidend erweitert. Damit wurden in den untersuchten Regionen vor allem auch für die künftige **Trink- und Nutzwasserwirtschaft** essentielle Planungsgrundlagen geschaffen.

Auf diesen Grundlagen aufbauend wurde im Anschluss die zweite Stufe des Forschungsprogramms zu den Blockgletschern vom BMLUK und den Bundesländern im Jahr 2020 beauftragt, dessen Ergebnisse nunmehr unter dem Titel „**Blockgletscher als Grundwasserspeicher in alpinen Einzugsgebieten und ihr Einfluss auf übergeordnete Flusssysteme unter dem Aspekt des Klimawandels**“ (RGAlpCatch) vorliegen.

Die weiterführenden Forschungsarbeiten erstreckten sich über mehrere naturwissenschaftliche Spezialgebiete und konzentrierten sich auf die Analyse der

Grundwasserspeicherkapazitäten ausgewählter Blockgletscherareale. Weiters wurde die **Grundwasserverfügbarkeit über den jahreszeitlichen Verlauf**, d.h. die jahreszeitliche Abflussdynamik der Blockgletscherwässer in ausgewählten Regionen mitberücksichtigt. Über **Abfluss- und Klimamodellierungen** wurden zu erwartende veränderte Klimaverhältnisse und wechselnde meteorologische Ereignisse untersucht. Da der Abfluss maßgeblichen Einfluss und **Auswirkungen auf die von Blockgletschern gespeisten Bach- und Flusssysteme** hat, erlaubt dieser Forschungsteil mit Modellierungsergebnissen planerische Prognosen sowohl für die Wildbach- und Lawinenverbauung bzw. den Schutz vor Naturgefahren, als auch für die Energiegewinnung und Speicherteiche für die Schiinfrastruktur. Gleichzeitig wurden auch wichtige ökologische Aspekte im sensiblen Umfeld des alpinen Raums berücksichtigt. Regelmäßige Probenahmen im Hochgebirge, meist unter sehr schwierigen und gefahrvollen Bedingungen, waren und sind der Grundpfeiler für die vorliegenden Ergebnisse.

Besonders hervorzuheben ist, dass es bei diesem Forschungsprojekt erstmals gelang, die bundesweit **gespeicherten Wasservolumina**, die in Form von **Permafrosteis und Grundwasser** vorliegen, mit einer Größenordnung von **ca. 0,9 km³ bzw. 0,6 km³** abzuschätzen. Die angegebenen Mengen entsprechen **ca. dem 2,2-fachen bzw. 1,4-fachen des jährlichen Trinkwasserbedarfs Österreichs**.

Großes Augenmerk wurde gleichermaßen der **Wasserqualität der Blockgletscherressourcen** geschenkt. Mit einer hochauflösenden Technik der Massenspektrometrie (ICP-SFMS) wurden an ausgewählten Quellmessstellen die Wasserinhaltsstoffe auf bis zu 70 Elemente und Verbindungen untersucht. Dabei treten Schwermetallbelastungen (z. B. Arsen, Nickel oder Uran) lediglich lokal auf, die naturbedingt auf Erz führende Gesteinsschichten zurückzuführen sind. Darüber hinaus wurden aber auch bekannte organische Schadstoffe wie PFAS (per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen), TFA (Trifluoressigsäure) und PAK (polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe) über mögliche atmosphärische Einträge mit gesonderten analytischen Verfahren untersucht. Trinkwasser-Grenzwertüberschreitungen wurden dabei nicht festgestellt. **Zusammenfassend handelt es sich bei den untersuchten Blockgletscherquellen ganz generell um qualitativ hochwertige Wässer.**

Die Erkenntnisse aus den Forschungsprojekten sind für Bund und Länder von besonderer **Bedeutung**, weil sich von diesen **Planungsschritte für künftige Aufgaben in der Wasserwirtschaft** ableiten lassen. Sie stellen wichtige Entscheidungsgrundlagen für die zukünftige wasserwirtschaftliche **Maßnahmensetzung** dar, weil die Porengrundwässer der

Blockgletscher, die bislang nur bereichsweise genutzt werden, als wichtige Reserve für z.B. die Trinkwassernotversorgung mitberücksichtigt werden können. So ergänzen diese die bereits bekannten und genutzten Wasserressourcen der Nördlichen und Südlichen Kalkalpen sowie der großen Porengrundwasservorräte in den Tal- und Beckenlagen.

Der **Erhalt der Wasserressourcen in Österreich** – auch vor dem Hintergrund des Klimawandels – wird dadurch wesentlich unterstützt. Die bisher gewonnen wissenschaftlichen Erkenntnisse über die Blockgletscher in Österreich sind zudem wesentliche Basis für die Vollziehung bestehender Wasserrechtsmaterien zum Schutz des Wassers wie z. B. die EU-Wasserrahmenrichtlinie 2000/60/EG, das Österreichische Wasserrechtsgesetz 1959 idgF, den Qualitätszielverordnungen sowie des Nationalen Gewässerbewirtschaftungsplans (NGP). Weiters beantworten die Ergebnisse zahlreiche Fragen zu den Wasserressourcen in Blockgletschern und ergänzen damit die Erkenntnisse aus der Studie „Wasserschatz Österreichs“ (BMLRT, 2021a) sowie zur aktualisierten „Hydrogeologische Karte Österreichs 1:500.000 mit Erläuterungen“ (GeoSphere Austria, Wien 2025, in prep.).

Der Projektleitung am Institut für Erdwissenschaften der Universität Graz, sowie den Kooperationspartnern und allen Mitarbeitern und Mitarbeiterinnen von GeoSphere Austria, der Universität Innsbruck , Institut für Geologie und Paläontologie, der JR-AquaConsol GmbH, der Geo-Zt GmbH, der Umweltbundesamt GmbH Wien und der Universität für Bodenkultur, Institut für Analytische Chemie, darf zur erfolgreichen Umsetzung des Forschungsauftrages zu den Blockgletschern in Österreich von Seiten des Bundesministeriums und der beteiligten Bundesländer herzlicher Dank ausgesprochen werden. Zum Verständnis der komplexen Themen haben die durchgeführten Workshops und Geländeexkursionen mit den Diskussionsmöglichkeiten wesentlich beigetragen.

Es ist zudem begrüßenswert, dass im Zuge dieser Forschungsarbeiten auch die Universitätslehre gleich für mehrere Studentinnen und Studenten mit einem erfolgreichen Abschluss von Masterarbeiten und einer Dissertation zum Zug gekommen ist. Ihnen allen wünschen wir auch für Ihre weitere berufliche Laufbahn viel Erfolg.

Wie aus den Schlussfolgerungen des Forschungsberichtes zu entnehmen ist, bedarf es natürlich noch weiterer Arbeitsschritte für eine abschließende Gesamtzusammenschau der Trink- und Nutzwasserversorgung von Blockgletschern im Bundesgebiet. Dazu gehören tiefergehende Analysen der Grundwasserneubildungskomponente Schnee und vor allem die noch unbearbeiteten Blockgletscherareale in den Nördlichen und Südlichen Kalkalpen.

Im Hinblick auf die notwendige und auch allseits gewünschte nachhaltige, zukunftsorientierte wasserwirtschaftliche Planung sowie den Schutz und die Sicherung der heimischen Wasserressourcen werden sich auch diese ausständigen Projektziele künftig erfolgreich umsetzen lassen.

Das Projektteam beim Abschlussworkshop in Pfunds, Tirol im September 2023. © Rudi Philippitsch

Dr. Rudolf Philippitsch
Ministerialrat i.R. im Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Klima- und Umweltschutz, Regionen und Wasserwirtschaft

3 Einleitung und Zielsetzung

Alpine und hochalpine Einzugsgebiete nehmen eine Schlüsselrolle für die Wasserversorgung im österreichischen Alpenraum ein. In hochalpinen Regionen sind Gletscher und Permafrost tiefgreifenden Veränderungen durch verstärktes Abschmelzen bzw. Auftauen ausgesetzt. Die Klimaänderungen betreffen auch die Schneedeckendynamik und generell zeigt sich ein Anstieg von Extremereignissen wie Starkniederschläge aber auch Dürreperiode (Haslinger et al., 2025), was in weiterer Folge die Grundwasserneubildungsverhältnisse und das Abflussverhalten in alpinen Einzugsgebieten verändert.

In den letzten Jahrzehnten wurde das rasant fortschreitende Abschmelzen der Gletscher und dessen Einfluss auf tieferliegende Flusssysteme in Bezug auf wasserwirtschaftliche Fragestellungen intensiv untersucht. Es lagen bis vor wenigen Jahren jedoch kaum Kenntnisse vor, wie sich die im periglazialen und glazialen Umfeld vorhandenen Schuttmassen (wie z.B. Blockgletscher als die prominentesten periglazialen Landschaftsformen) als Grundwasserleiter auf das ober- und unterirdische Abflussverhalten alpiner Regionen auswirken. Das Grundwasserdargebot wird in (hoch-) alpinen Einzugsgebieten mit kristallinem Festgesteinsuntergrund im Wesentlichen von Sedimentakkumulationen, wie Schuttfächern, Moränenablagerungen und/oder Blockgletschern bestimmt (Hayashi, 2020). Ihre Speicher- und Puffereigenschaften sind entscheidend für die Schüttungsdynamik der Quellen, die diese Aquifere entwässern und übergeordnet damit den Abfluss des alpinen Gewässernetzes prägen. Blockgletscher zählen zu den häufigsten Sedimentakkumulationen im Hochgebirge. Intakte Blockgletscher bestehen aus einem gefrorenen Eis-Schutt-Gemisch (Berthling, 2011). Sofern der Eisgehalt ausreichend hoch ist, ausreichend Schuttmaterial und genug Hangneigung gegeben sind, können sie sich gravitativ mit bis zu mehreren Metern pro Jahr hangabwärts bewegen (z. B. Kellerer-Pirklbauer et al., 2024). Im österreichischen Alpenraum wurden 5769 Blockgletscher identifiziert, von denen 40 % intakt sind und Permafrost- sowie Gletschereis enthalten (Wagner et al., 2020a). Die verbleibenden 60 % werden als reliktische Blockgletscher bezeichnet und enthalten kein Eis mehr. Insgesamt bedecken Blockgletscher in Österreich eine Fläche von 303 km² und entwässern eine Gesamtfläche von 1280 km² (hydrologisches Einzugsgebiet; Wagner et al., 2020a). Diese Zahlen zeigen, dass in hochalpinen Regionen periglaziale Landschaftsformen wie Blockgletscher bedeutende seichte Porengrundwasserleiter mit einer teilweise hohen Speicherfähigkeit darstellen. Sehr oft sind daran Quellen mit für alpine, kristalline

Regionen hohen Ergiebigkeiten (mittlere Jahresschüttungsmengen >10 l/s mit Spitzen von mehreren 100 l/s) gebunden. Diese Quellen werden vereinzelt bereits für die Trinkwasserversorgung genutzt (Wagner et al., 2016, 2019) und stellen vor allem eine wichtige Wasserressource für zahlreiche wasserwirtschaftliche Nutzungen der tieferliegenden Gebirgsbäche zur Energiegewinnung von Kleinkraftwerken oder für bereits unverzichtbare Beschneiungsanlagen dar. Bisherige Untersuchungen haben gezeigt, dass wesentliche Fragestellungen v.a. in Bezug auf die Auswirkungen der Blockgletscher als Grundwasserspeicher auf darunterliegende Fließgewässer nur unzureichend beantwortet werden können. Daraus resultieren nachstehenden wasserwirtschaftlich relevante Forschungsfragen.

„Wie groß sind die als Permafrosteis gespeicherten Wasserreserven in intakten Blockgletschern?“

„Wie hoch ist das Speicherpotential intakter und reliktischer Blockgletscher für das Grundwasser?“

„Wie beeinflusst das Retentionsverhalten der Blockgletscher das Abflussverhalten darunterliegender Flusssysteme?“

„Wie wirken sich unterschiedliche meteorologische Gegebenheiten im österreichischen Alpenraum auf das Abflussverhalten aus?“

„Wie wirken sich potentielle Klimaänderungen auf das Abflussverhalten im alpinen Raum aus?“

Ein umfassendes Verständnis der Prozesse ist daher entscheidend für ein nachhaltiges Wasserressourcenmanagement im Alpenraum, woraus sich nachstehende Ziele des Projekts ergaben.

- Es gilt Grundlagen zu schaffen, die Aussagen über die zeitliche Verfügbarkeit des in Blockgletschern gespeicherten Wassers für eine nachhaltige Nutzung ermöglichen. Somit sollen die potentiellen Speichervolumina für Grundwasser aber auch Wasseräquivalente von Permafrosteis abgeschätzt werden.

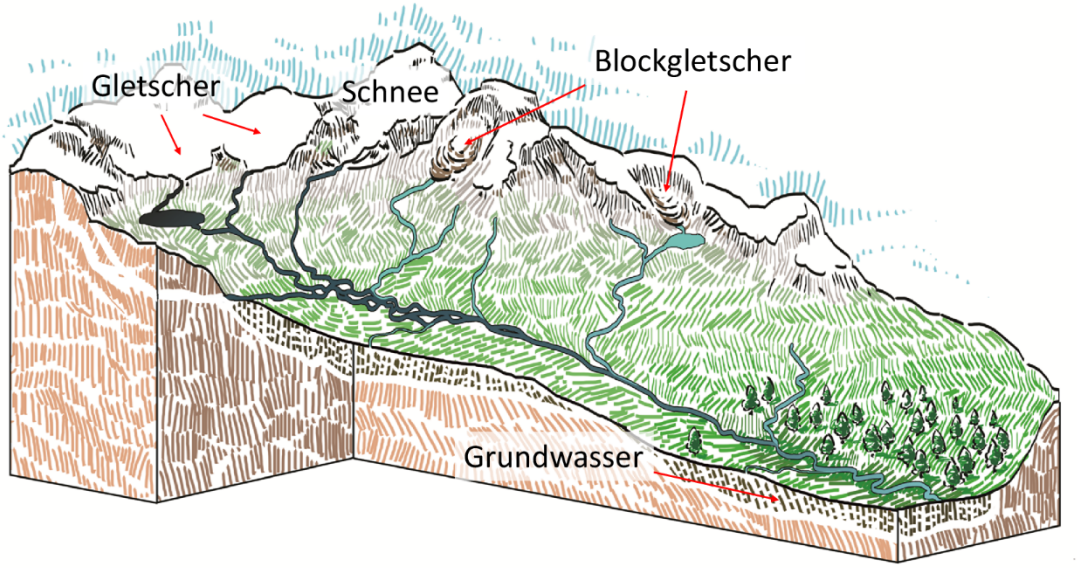
- Die Hauptzielsetzung war ein verbessertes Grundverständnis über den Einfluss dieser (hoch-)alpinen Grundwasserspeicher auf darunterliegende Fließgewässer. Es galt die

unterschiedlichen meteorologischen Bedingungen im österreichischen Alpenraum zu berücksichtigen, weshalb fünf Untersuchungsgebiete von Vorarlberg bis in die Steiermark ausgewählt wurden. Auf diese Weise konnten die alpinen Nord- und Südstaulagen sowie deren Wechselwirkung in Verbindung mit dem großräumigen Klimaeinfluss abgebildet werden. In weiterer Folge wurde der Einfluss des fortschreitenden Klimawandels auf das Abflussverhalten der Blockgletscher und der darunterliegenden Fließgewässer bis 2099 quantifiziert.

4 Grundlagen

Das Abflussverhalten alpiner Einzugsgebiete wird durch das zeitliche und räumliche Zusammenspiel von Niederschlag (Regen, Schnee), Verdunstung, Schmelzwässern von Schnee und Eis sowie temporär gespeicherten Grundwässern geprägt (Abbildung 1). Somit setzt sich der Abfluss aus Oberflächenabfluss, der bspw. unmittelbar nach Niederschlagsereignissen oder Schneeschmelze entsteht, und aus Grundwasser, welches aus Grundwasserleiter zeitlich verzögert wieder abgegeben wird, zusammen. Die Grundwasserneubildung erfolgt in (hoch-)alpinen Regionen vor allem durch infiltrierenden Regen und Schneeschmelzwässern. Lockergesteinsablagerungen wie Moränen, Hangschuttfächer und Blockgletscher bilden Grundwasserleiter, die unterschiedliche hydraulische Eigenschaften aufweisen und daher die infiltrierenden Wässer unterschiedlich lange speichern können. Eine gesonderte Rolle als „Speicher“ im (hoch-)alpinen Raum nimmt Schnee ein, da dieser im Winter akkumuliert und zeitlich verzögert sowohl Oberflächenabfluss als auch Grundwasserneubildung ermöglicht.

Abbildung 1: Schematische Darstellung eines alpinen Einzugsgebiets mit Schneebedeckung, Gletscher, und Blockgletscher bis hin zu Talgrundwasserkörper. All diese „Speicher“ tragen dazu bei, dass Niederschlag in alpinen Einzugsgebieten mit einer gewissen Verzögerung in den Flüssen abströmig ankommen. Modifiziert nach Brighenti et al. (2019)



Als wichtige alpine Porengrundwasserleiter nehmen Blockgletscher mit ihrer Speicherkapazität neben Moränenablagerungen und Schuttfächern eine Schlüsselrolle in der Hydrologie alpiner Einzugsgebiete ein und beeinflussen das Abflussregime der daraus gespeisten Flusssysteme. Die hydraulischen Eigenschaften von Blockgletschern sind eng mit ihrer Entstehung und Entwicklung als langsam talwärts kriechende Eis-Schutt-Gemenge verknüpft. Die daraus resultierende heterogene Internstruktur prägt diese periglazialen Landschaftsformen auch nach vollständigem oder teilweisem Abschmelzen des Permafrosteises infolge geänderter klimatischer Bedingungen.

Aufgrund ihrer weiten Verbreitung und komplexen Internstruktur prägen Blockgletscher maßgeblich das Abflussverhalten (hoch-)alpiner Gebiete. Je nachdem, ob Permafrosteis im Schuttkörper vorhanden ist oder nicht, unterscheiden sich reliktische und intakte Blockgletscher hydrogeologisch (Abbildung 2) (Winkler et al., 2018). Die hydrogeologischen Charakteristika intakter Blockgletscher werden im Anschluss beschrieben:

- Intakte Blockgletscher speichern ein bedeutendes Wasservolumen in Form von Permafrosteis und selten auch Gletschereis. Im Vergleich zu den hohen Abschmelzraten alpiner Gletscher wird das Permafrosteis in Blockgletschern von einer mehrere Meter mächtigen Auflage aus Blockwerk geschützt, sodass von einem verzögerten Abschmelzprozess ausgegangen wird (z. B. Jones et al., 2019a; Wagner et al., 2019b). Während der jährliche Massenverlust von Gletschern etwa in der Größenordnung von 1000 kg Eis pro Quadratmeter Gletscherfläche liegt, wird als grobe Faustregel im Fall von Permafrosteis von einem um ein bis zwei Größenordnungen langsameren Abschmelzprozess ausgegangen (Haeberli et al., 2017; IPCC, 2019).

- Im gefrorenen Kern aktiver Blockgletscher nimmt Permafrosteis einen großen Teil des Porenraums ein. Aufgrund der damit einhergehenden Reduzierung der hydraulischen Durchlässigkeit fließt ein erheblicher Anteil des infiltrierenden Wassers an der Oberfläche des Permafrostkörpers oder entlang ins Eis erodierter/geschmolzener Kanäle ab und bildet dabei eine schnelle Fließkomponente (Abbildung 1a; Giardino et al., 1992; Burger et al., 1999; Krainer und Mostler, 2002; Winkler et al., 2018; Jones et al., 2019a; Wagner et al., 2021a; Seelig et al., 2025a,b). Daher treten an den Blockgletscherquellen deutliche Abflussspitzen nach Niederschlagsereignissen auf (Krainer und Mostler, 2002; Wagner et al., 2020b). Die eisfreie, gut durchlässige Struktur reliktischer Blockgletscher erlaubt es infiltrierendem Wasser dagegen, tief in den Schuttkörper einzudringen (Winkler et al., 2016b; Pauritsch et al., 2017). Die zugehörigen Quellen reagieren entsprechend gedämpfter auf Niederschlagsereignisse. Inaktive Blockgletscher nehmen je nach (noch) vorhandenem Eisgehalt eine Zwischenstellung ein (Harrington et al., 2018).

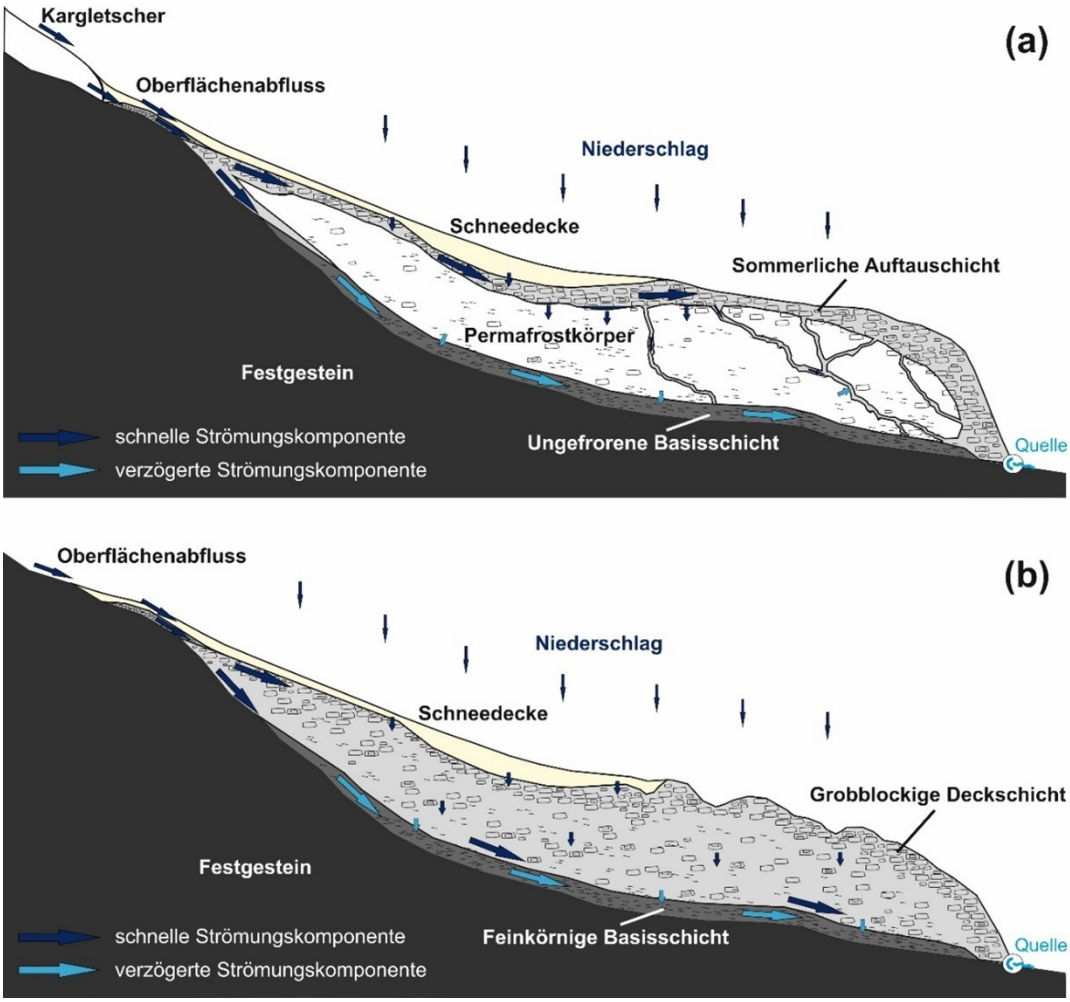
- Die stärker ausgeprägte hydraulische Reaktion der an intakte Blockgletscher gebundenen Quellen auf Niederschlagsereignisse geht mit einem vergleichsweise hohen Beitrag von Niederschlagswasser (Ereigniswasser) einher. Das gilt in ähnlicher Weise bei hohem Schmelzwasserandrang (Schneedecke oder Kargletscher im Einzugsgebiet; Abbildung 2a), sodass dieses „Ereigniswasser“ einen erheblichen Anteil am Abfluss intakter Blockgletscher während der Sommermonate ausmacht. Während der Wintermonate wird der Abfluss dagegen von im Blockgletscher gespeicherten Grundwasser dominiert. Die Abflussdynamik reliktischer Blockgletscher ist im Prinzip ähnlich, sie zeigen jedoch insgesamt einen höheren Anteil länger gespeicherten Grundwassers. In reliktischen Blockgletschern fließt die schnelle Komponente entlang des Durchlässigkeitskontrastes zwischen unterschiedlich durchlässigen Schichten rasch

zur Quelle ab oder folgt bevorzugten Fließpfaden im Blockgletscher (Winkler et al., 2016b; Pauritsch et al., 2017). Das zunehmende Abschmelzen von Permafrosteis in intakten Blockgletschern bedingt eine Modifizierung der Fließpfade im Inneren der Schuttkörper, während der Gletscherrückzug gegebenenfalls die im Einzugsgebiet anfallende Wassermenge beeinflusst (Abbildung 2a), was die Abflussdynamik der unterhalb gelegenen Blockgletscherquellen und Flusssysteme beeinflusst (Wagner et al., 2021a).

- Die Speicherkapazität intakter Blockgletscher für Grundwasser ist gegenüber reliktischen Blockgletschern geringer, da der von Eis eingenommene Teil des Porenraums nicht als Grundwasserspeicher zur Verfügung steht. In Abhängigkeit ihrer Größe und internen Struktur bilden jedoch sowohl intakte als auch reliktische Blockgletscher wichtige Grundwasserspeicher in hochalpinen Einzugsgebieten (Wagner et al., 2020a). Mit fortschreitendem Abschmelzen des Permafrosteises besteht die Möglichkeit einer Erhöhung der Speicherkapazität intakter Blockgletscher (Rogger et al., 2017; Wagner et al., 2021a), deren genauer Umfang jedoch aufgrund der noch zu geringen Datenlage zurzeit nicht zuverlässig abgeschätzt werden kann.

In alpinen Einzugsgebieten stellen Porengrundwasserleiter wie Blockgletscher einen wichtigen Speicher zur Verfügung, der infiltrierendes Wasser temporär aufnimmt, Hochwasserwellen verzögert und den Basisabfluss während trockener Perioden und häufig auch während der Wintermonate gewährleistet (Winkler et al., 2018; Hayashi, 2020; Wagner et al., 2020a, 2021b). Diese Speicherkapazität ist in intakten wie in reliktischen Blockgletschern zum großen Teil an deren feinkörnige, ungefrorene Basislage gebunden (Winkler et al., 2016b, 2018; Pauritsch et al., 2017; Wagner et al., 2020a, 2021a). Im Unterschied zu den durch Permafrosteis gebundenen Wasserressourcen stellt diese einen dynamischen Speicher dar, der sich in Abhängigkeit der hydrologischen Randbedingungen füllt oder leert.

Abbildung 2: Konzeptionelle Vorstellung der Fließwege durch einen (a) intakten und (b) reliktischen Blockgletscher (verändert nach Seelig, 2024)



Das Abflussverhalten der an Blockgletscher gebundenen, wasserwirtschaftlich häufig bedeutenden Quellen gestaltet sich entsprechend komplex. In der Regel setzt sich ihre Schüttung aus einer schnellen und einer verzögerten Abflusskomponente zusammen. Erstere ist an die grobblockige Deckschicht am Permafrosteiskörper (active layer) und an zusammenhängende grobkörnige Partien im Grundwasserleiter gebunden, soweit deren Porenraum nicht von Eis eingenommen wird. Letztere wird mit einer typischerweise an der Blockgletscherbasis auftretenden, ungefrorenen, feinkörnigen Schicht in Zusammenhang gebracht, die eine Mächtigkeit von mehreren Metern erreichen kann (Winkler et al., 2016b, Wagner et al., 2020a).

5 Untersuchungsgebiete

In jedem der am Projekt beteiligten Bundesländer (Kärnten, Salzburg, Steiermark, Tirol und Vorarlberg) werden die Entwässerungsdynamik eines (hoch-)alpinen Einzugsgebiets sowie mehrerer Teil-Einzugsgebiete innerhalb desselben analysiert. Die Lage dieser fünf Untersuchungsgebiete ist in Abbildung 3 dargestellt.

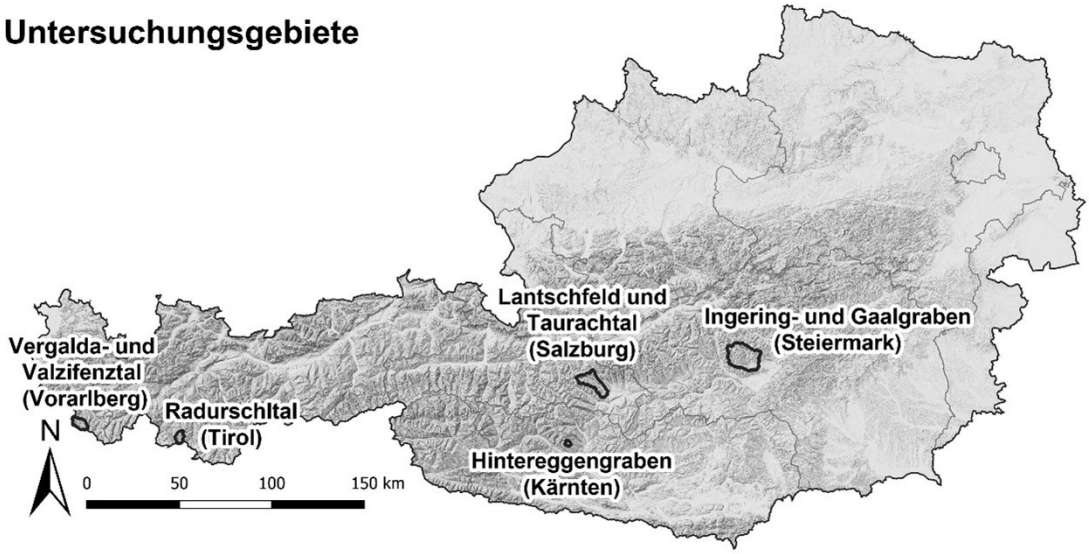
Die unterschiedlichen klimatischen Kennwerte innerhalb der österreichischen Alpen werden in Tabelle 1 anhand der langjährigen Mittelwerte für Lufttemperatur, Jahresniederschlag und potenzielle Evapotranspiration im Referenzzeitraum 1980–2009 aufgelistet. Die Berechnungen basieren auf den Rasterdatensätzen „Spatiotemporal Reanalysis Dataset for Climate in Austria“ (SPARTACUS) und „Austrian Reference Evapotranspiration Dataset“ (ARET) (Haslinger und Bartsch, 2016; Hiebl und Frei, 2016, 2018).

Die Untersuchungsgebiete wurden gezielt ausgewählt, um ein möglichst breites Spektrum hydrologischer, hydrochemischer, meteorologischer, geologischer und topografischer Eigenschaften alpiner Einzugsgebiete abzubilden. Dabei standen folgende Aspekte im Fokus:

- **Repräsentativität** für unterschiedliche alpine und meteorologischer Bedingungen
- **Lokal angepasste Auswahl**, um den größtmöglichen Erkenntnisgewinn für die nachhaltige Wasserversorgung zu erzielen
- **Optimale Verdichtung des Messnetzes** des Hydrographischen Dienstes Österreichs, um regionale und länderspezifische wasserwirtschaftliche Fragestellungen bestmöglich zu berücksichtigen

Zur Festlegung der Untersuchungsgebiete wurden der Hydrographische Dienst Österreichs, die fachlich zuständigen Fachabteilungen der jeweiligen Landesregierungen sowie die hydrographischen Dienste der Bundesländer in den Entscheidungsprozess einbezogen.

Abbildung 3: Lage der Untersuchungsgebiete auf der Reliefkarte Österreichs



Datengrundlage: Open Government Data Österreich (www.data.gv.at)

Tabelle 1 fasst die wichtigsten Kenngrößen der fünf Untersuchungsgebiete zusammen. Ihre mittlere Seehöhe entspricht grob der alpinen Topographie Österreichs, mit höher gelegenen Gebieten im Westen und niedriger gelegenen im Osten. Die Flächenausdehnung der Gebiete und ihrer Teil-Einzugsgebiete variiert von unter 1 km² bis knapp 200 km². Ebenso zeigt sich eine hohe Variabilität des durch Blockgletscher entwässerten Flächenanteils, der zwischen 0 % und nahezu 100 % liegt.

In den fünf Untersuchungsgebieten wurden 14 temporäre Pegel eingerichtet, die Wasserstand, Wassertemperatur und elektrische Leitfähigkeit im 30-Minuten-Intervall aufzeichneten (Abbildung 4; Dipper-PTEC, SEBA Hydrometrie GmbH & Co. KG). Die Pegel verteilten sich auf Quellbereiche von Blockgletschern sowie stromabwärts gelegene Standorte zur Charakterisierung des Gesamtgebiets. Das Monitoring lief von September/Oktober 2020 bis November 2022, wobei an vier Standorten Messungen bis Sommer 2024 fortgesetzt wurden (Kettentörlbach, Lantschfeldquelle, Rotbühel, Arzkarquelle). Die Arzkarquelle und Kettentörlquelle bleiben als Referenzquellen für hochalpine Forschungsarbeiten erhalten, die übrigen Pegel wurden nach Messende abgebaut.

Für alle Pegel wurden Wasserstands-Abfluss-Beziehungen (Schlüsselkurven) erstellt, basierend auf 207 Abflussmessungen unter verschiedenen hydrologischen Bedingungen bzw. Abflussmengen (Abbildung 4). Die Erstellung war herausfordernd, da hochalpine

Gerinne starke Gefälle, hohe Sedimentfracht und veränderliche Querschnitte aufweisen können, und die Witterung im Hochgebirge extreme Anforderungen an Material und Wartung stellte. Die gewonnenen Daten liefern eine kontinuierliche Abflusszeitreihe und bilden die Grundlage für weitere hydrologische Analysen.

In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Untersuchungsgebiete von Ost nach West näher charakterisiert (Details siehe Abschlussbericht; Seelig et al., 2024).

Tabelle 1: Kenngrößen der fünf Untersuchungsgebiete. Mittlere Seehöhe MSH [m ü. A.], Einzugsgebietsfläche A [km²], durch Blockgletscher entwässernder Flächenanteil ABG [%], langjährige (1980–2009) mittlere Lufttemperatur T [°C], langjähriger mittlerer Jahresniederschlag P [mm], langjährige mittlere potenzielle Evapotranspiration PET [mm], langjährige klimatische Wasserbilanz KWB [mm]. Berechnung basierend auf Haslinger und Bartsch (2016), Hiebl und Frei (2016, 2018) sowie Wagner et al. (2020c)

Untersuchungs-gebiet	MSH [m ü. A.]	A [km²]	ABG [%]	T [°C]	P [mm]	PET [mm]	KWB [mm]
Ingering- und Gaalgraben (Steiermark)	1522	198,9	14,0	4,3	1094	479	615
Lantschfeld und Taurachtal (Salzburg)	1801	102,2	17,6	2,9	1157	491	666
Hintereggengraben (Kärnten)	2176	7,5	66,7	1,0	1323	514	809
Radurschltal (Tirol)	2598	24,4	55,6	-1.6	974	479	495
Vergalda- und Valzifenztal (Vorarlberg)	2166	39,2	12,1	0,7	1571	537	1034

Abbildung 4: Temporär installierte Pegel und Abflussmessungen zur Erstellung der zugehörigen Schlüsselkurven. (a) Pegel Kettentörlquelle in der Steiermark. Der Torstahl dient der Stabilisierung des Pegelrohrs. (b) Abflussmessung mittels Salztracermethode am Pegel Ochsenhütte in Kärnten. (c) Am Pegel Arzkarquelle in Tirol werden die Aufzeichnungen weiter fortgeführt. (d) Pegel Ruppalm in Kärnten, befestigt an nebenstehendem Felsblock

Fotos: (a) Gerfried Winkler, (b) Simon Seelig, (c) Thomas Wagner, (d) Simon Seelig

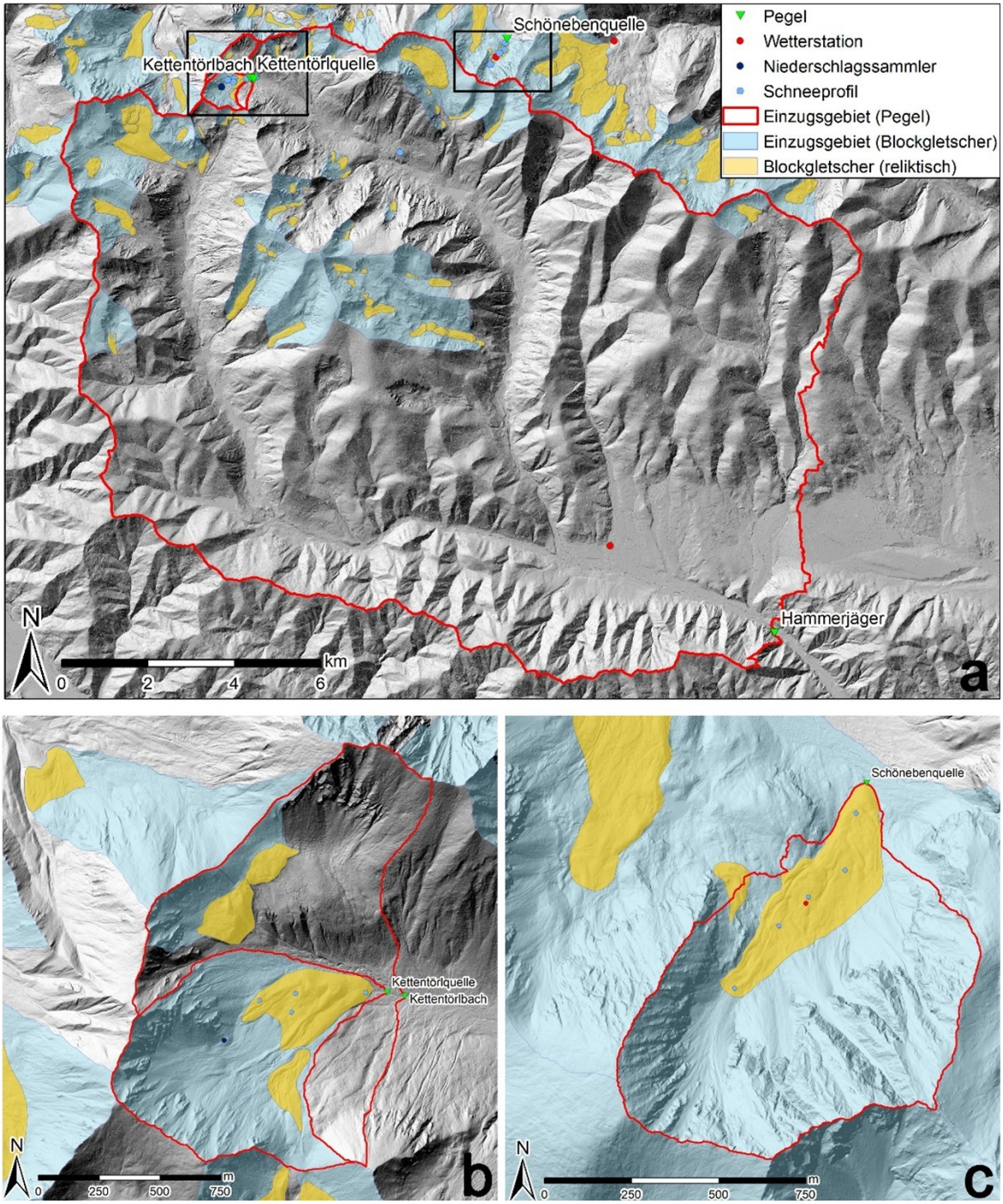
5.1 Ingering- und Gaalgraben, Schöneben (Steiermark)

Das östlichste Untersuchungsgebiet liegt in der Steiermark und umfasst die Täler Ingeringgraben und Gaalgraben in den Seckauer Tauern (Abbildung 5). Zusätzlich wurde der Blockgletscher Schöneben mit seinem hydrologischen Einzugsgebiet als Referenzgebiet genutzt, da hier bereits langjährige Daten vorliegen und umfangreiche Untersuchungen durchgeführt wurden. Dieses Referenzgebiet befindet sich östlich des Ingeringgrabens.

Aus hydrologischer Sicht entspricht das Untersuchungsgebiet Ingering- und Gaalgraben dem Einzugsgebiet des Ingeringbaches. Der Abfluss wird an der Messstation Hammerjäger des Hydrographischen Dienstes Steiermark erfasst. Das gesamte Untersuchungsgebiet gehört zum Grundwasserkörper GK100116 Niedere Tauern einschließlich Seckauer Tauern [MUR] (laut Nationalem Gewässerbewirtschaftungsplan, BMLRT 2021).

Der höchste Punkt des Gebiets ist der Gipfel des Geierhaupts mit 2417 m. Dies ist zugleich der höchste Berg der Seckauer Tauern. Der tiefste Punkt befindet sich an der Messstation Hammerjäger auf 749 m. Die mittlere Seehöhe des Gebiets beträgt 1522 m. Administrativ liegt das Untersuchungsgebiet größtenteils in der Gemeinde Gaal im Bezirk Murtal. Ein kleiner Abschnitt entlang der östlichen Grenze gehört zur Gemeinde Seckau.

Abbildung 5: Untersuchungsgebiet Ingering- und Gaalgraben (Steiermark). (a) Lage der Pegel und zugehöriger Einzugsgebiete sowie der Blockgletscher und ihrer Einzugsgebiete basierend auf Wagner et al. (2020c). Die in (b) und (c) dargestellten Detailkarten für das Einzugsgebiet der Kettentörlquelle, des Kettentörlbaches und der Schönebenquelle sind durch schwarze Umrahmungen ausgewiesen



Das Untersuchungsgebiet erstreckt sich über eine Fläche von 198,9 km². Davon werden 27,9 km² (etwa 14 %) über Blockgletscher entwässert (Abbildung 5). Insgesamt befinden sich 61 reliktische Blockgletscher in diesem Gebiet. Die ausgeprägte Bildung dieser periglazialen Schuttformen lässt sich darauf zurückführen, dass es während des letzten Hochglazials vor etwa 17.000 bis 21.000 Jahren keine durchgehende Bedeckung aus zusammenhängenden Gletschern gab (van Husen, 1997; Untersweg & Schwendt, 1995, 1996). Da die kleineren Kargletscher nach der Eiszeit schnell abschmolzen, waren die Höhenlagen des Gebiets bereits zu Beginn des Spätglazials dauerhaft gefroren. Gleichzeitig stand viel Lockermaterial, bestehend aus Moränenablagerungen und periglazialem Frostschutt, für die Bildung von Blockgletschern zur Verfügung (Untersweg & Schwendt, 1995, 1996).

Die durchschnittliche Jahrestemperatur des Einzugsgebietes lag im Zeitraum von 1980 bis 2009 bei 4,3°C (historischer Referenzzeitraum). Dieser Wert ist deutlich höher als in den vier anderen Untersuchungsgebieten, was die vergleichsweise geringe durchschnittliche Seehöhe dieses Gebiets widerspiegelt. Aufgrund der höheren Temperaturen tritt Permafrost nur in sehr kleinen, schattigen Bereichen an nordseitigen Gipfelhängen auf. In der Region gibt es ausschließlich reliktische Blockgletscher.

Der durchschnittliche jährliche Niederschlag beträgt 1094 mm und entspricht damit ungefähr dem österreichweiten Durchschnitt (basierend auf Hiebl & Frei, 2016, 2018). Die mittlere potenzielle Verdunstung (Evapotranspiration) liegt bei 479 mm pro Jahr (basierend auf Haslinger & Bartsch, 2016).

Geologisch besteht das Untersuchungsgebiet überwiegend aus metamorphen Gesteinen des Silvretta-Seckau-Deckensystems. Der südwestliche Bereich gehört zum Koralpe-Wölz-Deckensystem (Schmid et al., 2004). Die häufigsten Festgesteine sind verschiedene Gneise und Glimmerschiefer, in geringerem Ausmaß kommen auch Amphibolite vor (Mandl et al., 2018, 2022). Die vorherrschenden Festgesteine sind allgemein nur wenig wasserdurchlässig, es gibt daher kaum größere Grundwasservorkommen. Wasser sammelt sich hauptsächlich in dem aufliegenden Gesteinsschutt oder in oberflächennahen Kluftsystemen, die nur lokal vorkommen (Untersweg & Schwendt, 1995, 1996; Schubert, 2003, 2006; Hilberg, 2016). Die wichtigsten Quellen sind deshalb an die zahlreichen Blockgletschern der Region gebunden (Untersweg & Schwendt, 1995; Winkler et al., 2016b).

Der generelle hydrochemische Charakter der Wässer für die gesamte Gebirgsgruppe weist einen für Kristallingesteine typisch erdalkalisch – karbonatisch (Ca, Mg) betonten Charakter auf.

Innerhalb des Untersuchungsgebiets werden drei kleinere Teil-Einzugsgebiete detailliert untersucht (Abbildung 5b,c und Abbildung 6):

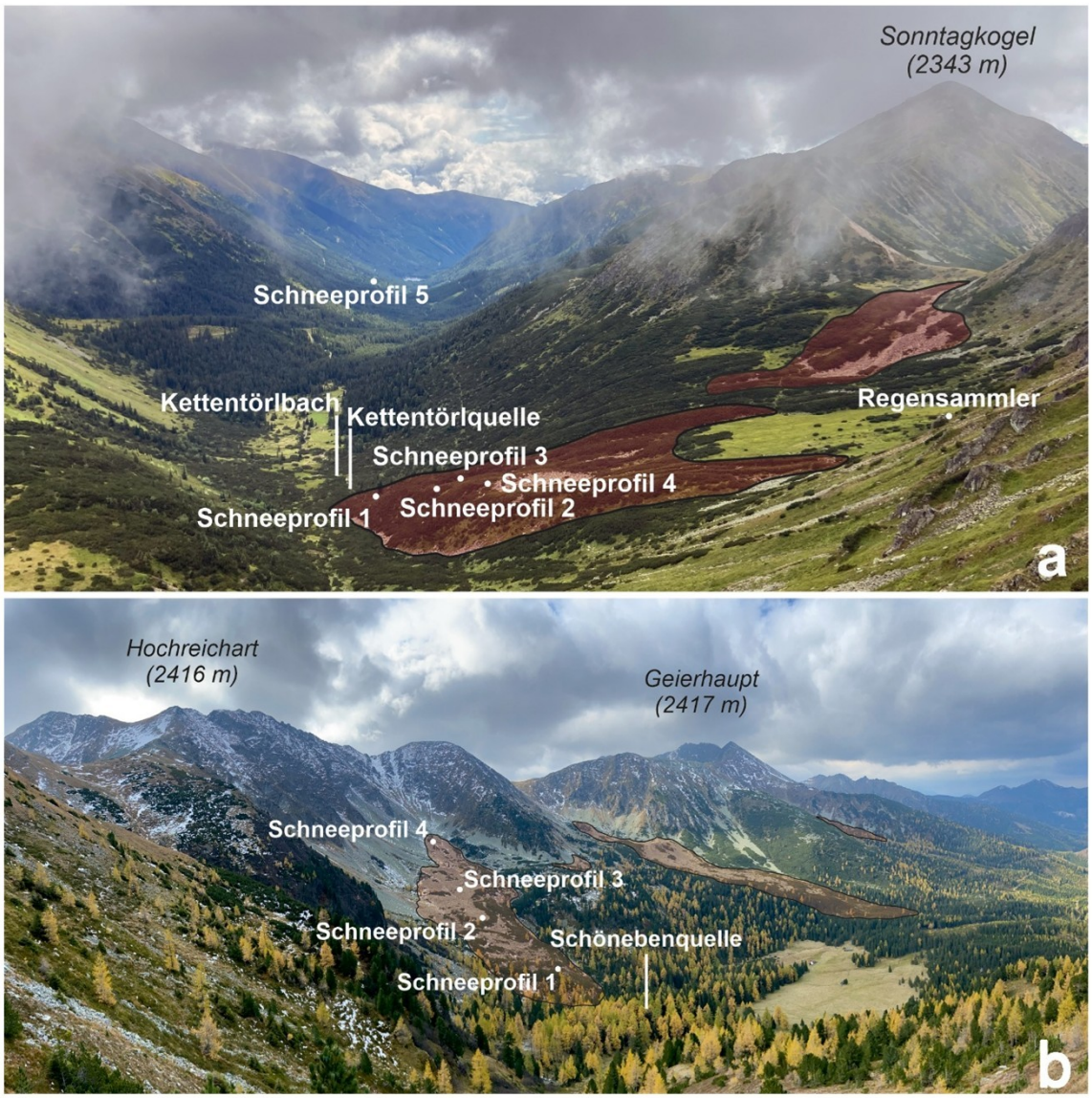
- **Einzugsgebiet der Kettentörlquelle (0,63 km²):**
  Dieses Gebiet umfasst zwei reliktische Blockgletscher am Osthang des Speikleitenbergs (2124 m), zwischen dem Kettentörl (1864 m) und dem Gaaler Törl (1897 m). Die durchschnittliche Seehöhe des Einzugsgebiets beträgt 1870 m. Während der untere Bereich von dichtem Legföhrenbewuchs geprägt ist, dominieren in höheren Lagen alpine Matten und Felsflanken (Abbildung 6a). Das Gebiet ist vorwiegend nach Osten bis Nordosten ausgerichtet und wird fast vollständig (99 %) über Blockgletscher entwässert (Abbildung 5b).

- **Einzugsgebiet des Kettentörlbaches (1,48 km²):**
  Dieses Gebiet umfasst neben der Kettentörlquelle und ihrem Einzugsgebiet auch die Schönleiten, die sich direkt unterhalb des Kettentörls befindet, sowie die Südflanke des Kettentalkogels (2152 m). Die mittlere Seehöhe liegt bei 1855 m. Hier sind alpine Wiesen und steile Flanken besonders ausgeprägt. Insgesamt gibt es vier reliktische Blockgletscher, die etwa 54 % der Gesamtfläche entwässern (Abbildung 5b).

- **Einzugsgebiet des Schöneben-Blockgletschers (0,67 km²):**
  In unmittelbarer Nähe des Untersuchungsgebiets befindet sich der intensiv erforschte Blockgletscher Schöneben (Abbildung 5c, Abbildung 6b). Dieses Einzugsgebiet erstreckt sich bis auf eine Seehöhe von 2295 m. Der zungenförmige Blockgletscher wird an seiner rechten Seite von Schuttfächern überlagert und weist eine Fläche von 0,11 km² auf. Am Fuße der Blockgletscherstirn entspringt die Schönebenquelle (SEQ), die das Einzugsgebiet entwässert. Diese Quelle wurde vom Hydrographischen Dienst Steiermark als Messstelle ausgebaut und ist seitdem Teil des hydrographischen Messstellennetzes („Schönebenquelle“, HZB-Nummer 396762). Seit 2002 werden hier kontinuierlich Wasserstand und Wassertemperatur gemessen. Ab 2008 kamen zusätzlich Messungen der elektrischen Leitfähigkeit direkt am Quellaustritt hinzu (Winkler et al., 2016a).

Eine Übersicht der wichtigsten Merkmale dieser drei Teil-Einzugsgebiete findet sich in Tabelle 2.

Abbildung 6: (a) Talschluss des Ingeringgrabens in den zentralen Seckauer Tauern. Reliktische Blockgletscher sind farblich hervorgehoben, die Positionen der Pegel Kettentörlbach und Kettentörlquelle, der Niederschlags-Sammelprobe (N) sowie der Schneeprofile (S1-S5) verzeichnet. Ingeringgraben vom Kettentörl (1864 m), Blickrichtung Südwesten. (b) Schöneben



Fotos: Thomas Wagner

Tabelle 2: Einzugsgebietscharakterisierung im Untersuchungsgebiet Ingering- und Gaalgraben sowie der Schöneben im Liesinggraben (Steiermark). Mittlere Seehöhe des Einzugsgebiets in MSH [m ü.A.], Einzugsgebietsfläche A [km²], durch Blockgletscher entwässernde Fläche ABG [%], Blockgletscher-Anzahl im Einzugsgebiet # BG (intakte Blockgletscher # INT, reliktische Blockgletscher # REL), langjährige (1980–2009) mittlere Lufttemperatur T [°C], langjähriger mittlerer Jahresniederschlag P [mm], langjährige mittlere potenzielle Evapotranspiration PET [mm], langjährige klimatische Wasserbilanz KWB [mm]. Auswertung basierend auf Wagner et al. (2020c)

Einzugsgebiet	MSH [m ü. A.]	A [km²]	ABG [%]	# BG	# INT	# REL	T [°C]	P [mm]	PET [mm]	KWB [mm]
Hammerjäger	1522	198,93	14,01	61	0	61	4,3	1094	479	615
Kettentörlbach	1855	1,48	53,76	4	0	4	2,6	1250	462	788
Kettentörlquelle	1870	0,63	98,77	2	0	2	2,4	1251	460	791
Schönebenquelle	2022	0,67	100,00	1	0	1	1,5	1356	503	853

5.2 Lantschfeld und Taurachtal (Salzburg)

Das Untersuchungsgebiet Lantschfeld und Taurachtal liegt im Bundesland Salzburg (Abbildung 7). Der westliche Teil gehört zu den Radstädter Tauern, während der östliche Bereich den Schladminger Tauern zugeordnet wird. Hydrologisch umfasst das Gebiet das Einzugsgebiet der Lungauer Taurach, die am Pegel Mauterndorf auf 1108 m Seehöhe vom Hydrographischen Dienst Salzburg beobachtet wird.

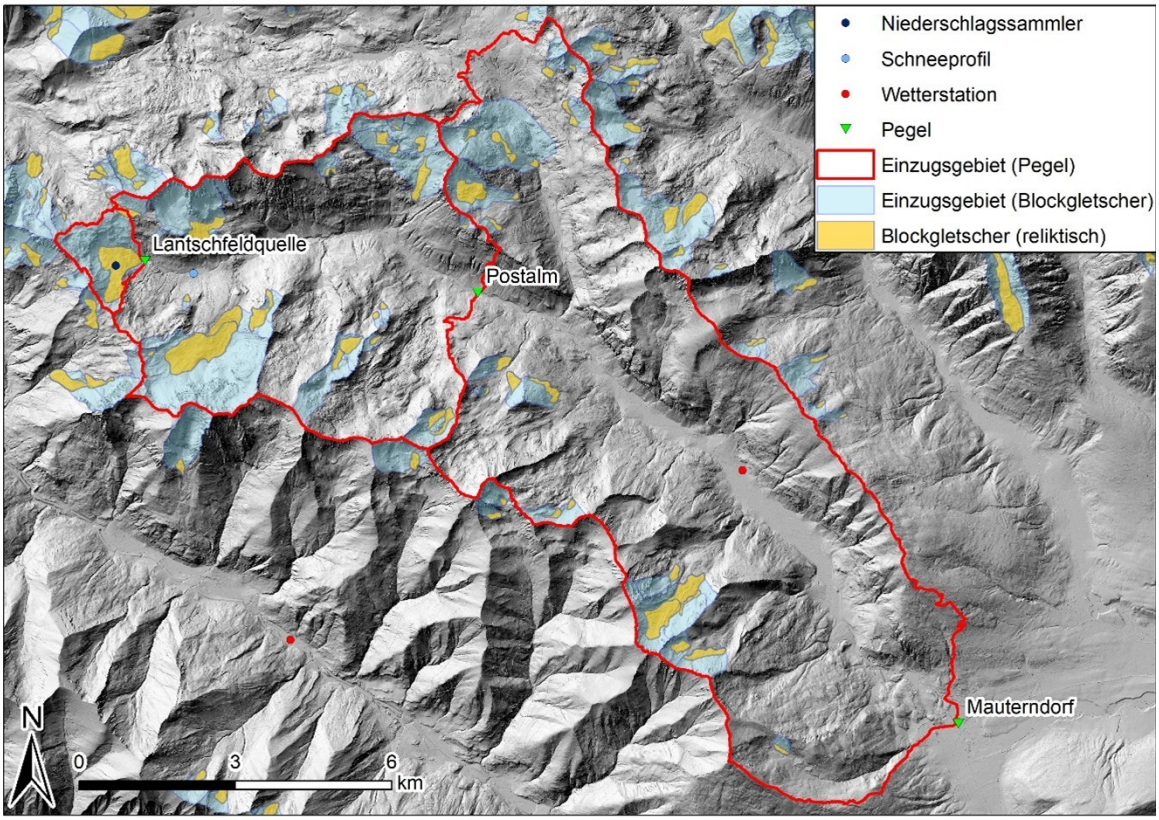
Der höchste Punkt des Gebiets ist der Gipfel des Hochfeind mit 2687 m ü.A. in den Radstädter Tauern. Die durchschnittliche Seehöhe des gesamten Untersuchungsgebietes beträgt 1801 m. Administrativ liegt das Gebiet im Bezirk Tamsweg. Der nördliche Teil gehört zur Gemeinde Tweng, der südliche zur Gemeinde Mauterndorf. Das gesamte Untersuchungsgebiet ist dem Grundwasserkörper GK100185 Salzburger Hohe Tauern [MUR] zugeordnet (Nationaler Gewässerbewirtschaftungsplan, BMLRT 2021).

Mit einer Fläche von 102 km² ist dieses Untersuchungsgebiet das zweitgrößte des Projekts. Im Gebiet gibt es 50 Blockgletscher, die alle als reliktisch eingestuft werden. Es gibt keine nennenswerten zusammenhängenden Permafrost-Bereiche – nur an den nordseitigen Gipfelhängen des Hochfeindzuges und des Alpenhauptkammes gibt es noch kleinere dauerhaft gefrorene Zonen.

Die durchschnittliche Jahrestemperatur des Untersuchungsgebietes lag im historischen Referenzzeitraum 1980–2009 bei 2,9 °C, während der mittlere Jahresniederschlag 1157 mm betrug (Hiebl & Frei, 2016, 2018). Die mittlere potenzielle Evapotranspiration belief sich auf 491 mm pro Jahr (Haslinger & Bartsch, 2016).

Das Untersuchungsgebiet ist größtenteils bewaldet. In den Tallagen wird die Fläche landwirtschaftlich als Grünland genutzt. Die höheren Lagen sind geprägt von steilen, teils hunderte Meter hohen Felswänden, die von alpinen Matten, Schuttfächern, Moränenablagerungen und zahlreichen Blockgletschern unterbrochen werden.

Abbildung 7: Untersuchungsgebiet Lantschfeld und Taurachtal (Salzburg). Lage der Pegel und zugehöriger Einzugsgebiete sowie der Blockgletscher und deren Einzugsgebiete basierend auf Wagner et al. (2020c)



Datengrundlage: Open Data Österreich (www.data.gv.at).

Innerhalb des Untersuchungsgebietes werden verschiedene kleinere Teil-Einzugsgebiete untersucht, die sich entlang der Lungauer Taurach und des Lantschfeldbaches erstrecken (Abbildung 7):

- Im gesamten 102 km² großen Einzugsgebiet des Pegels **Mauterndorf** entwässern 18 % über Blockgletscher.

- Beim Pegel **Postalm** sind es 32 % des 35 km² großen Einzugsgebiets.

- Besonders hoch ist der Anteil im 1,8 km² großen Einzugsgebiet der **Lantschfeldquelle**, wo 98 % der Fläche über Blockgletscher entwässert werden.

Eine Übersicht der wichtigsten Kennzahlen der Teil-Einzugsgebiete findet sich in Tabelle 3.

Das Lantschfeld wird überwiegend von niedrig metamorphen Karbonatgesteinen des unterostalpinen Radstädter Deckensystems aufgebaut, während im Westen und Süden höher metamorphe Metasedimente der unterlagernden Nordrahmenzone (Penninikum des Tauernfensters) auftreten, die zur Bündnerschiefer-Gruppe gezählt werden. Das Taurachtal wird im Osten vorwiegend von metamorphen Karbonatgesteinen des Radstädter Deckensystems gebildet, während im Westen kristalline Gesteine des Schladming-Seckau-Deckensystems dominieren (Exner, 1989; Häusler, 1995a,b; Mandl & Matura, 1995; Schmid et al., 2004; Exner et al., 2005; Hejl, 2005).

Die mächtigen Karbonatgesteinseinheiten (Kalk- und Dolomitmarmor), die weite Teile des Untersuchungsgebietes einnehmen, sind teilweise intensiv verkarstet und bilden bedeutende Grundwasserleiter (Schubert, 1992, 2003, 2006). Sandsteine und Tonschiefer stellen sowohl die geringdurchlässige Basis dieser Grundwasserleiter als auch Stauhorizonte in höheren Lagen dar, welche die Richtung des unterirdischen Abflusses steuern und lokale Quellhorizonte ausbilden (Schubert, 2006).

Der generelle hydrochemische Charakter dieser Wässer spiegelt den Karbonateinfluss durch das Vorkommen der Marmoreinschaltungen im Gebirgsverband deutlich wider und ist als erdalkalisch-karbonatisch einzustufen. Detailliertere Untersuchungen an Quellen im Bereich des Lantschfelds erlauben eine weitere Eingrenzung auf den dolomitisch – karbonatischen Subtyp (Arnhof, 2022).

Im Westen des Lantschfeldes, am Fuß der Stampferwand (2342 m ü.A.), befindet sich ein 0,5 km² großer, reliktischer Blockgletscher, an dessen Stirn die bedeutendste Quelle des Lantschfeldes entspringt (Lantschfeldquelle). Die Blöcke des Blockgletschers bestehen aus Dolomitmarmor der ostalpinen Lantschfelddecke, während dieser selbst zumindest teilweise Phyllite der penninischen Nordrahmenzone überdeckt. Die genaue Lage der Deckengrenze unterhalb des Blockgletschers ist nicht bekannt.

Das hochaufgelöste Monitoring der Lantschfeldquelle ermöglicht einen direkten Vergleich dieses karbonatisch geprägten, reliktischen Blockgletschers mit Blockgletschern in kristallinen Gebieten, etwa im Einzugsgebiet der Schönebenquelle oder der Kettentörlquelle. Eine Analyse der Quellschüttungsdynamik und Wasserchemie sowie ein Vergleich mit den umliegenden Quellen und einer nördlich gelegenen Karstquelle (Marbachquelle, HZB-Nr. 395244, Hydrographischer Dienst) mit Schüttungsspitzen über 2000 l/s wird in Arnhof (2022) vorgestellt.

Tabelle 3: Einzugsgebietscharakterisierung im Untersuchungsgebiet Lantschfeld und Taurachtal (Salzburg). Mittlere Seehöhe MSH [m ü. A.], Einzugsgebietsfläche A [km²], durch Blockgletscher entwässernde Fläche ABG [%], Blockgletscher-Anzahl im Einzugsgebiet # BG (intakte Blockgletscher # INT, reliktische Blockgletscher # REL). langjährige (1980–2009) mittlere Lufttemperatur T [°C], langjähriger mittlerer Jahresniederschlag P [mm], langjährige mittlere potenzielle Evapotranspiration PET [mm], langjährige klimatische Wasserbilanz KWB [mm]. Auswertung basierend auf Wagner et al. (2020c).)

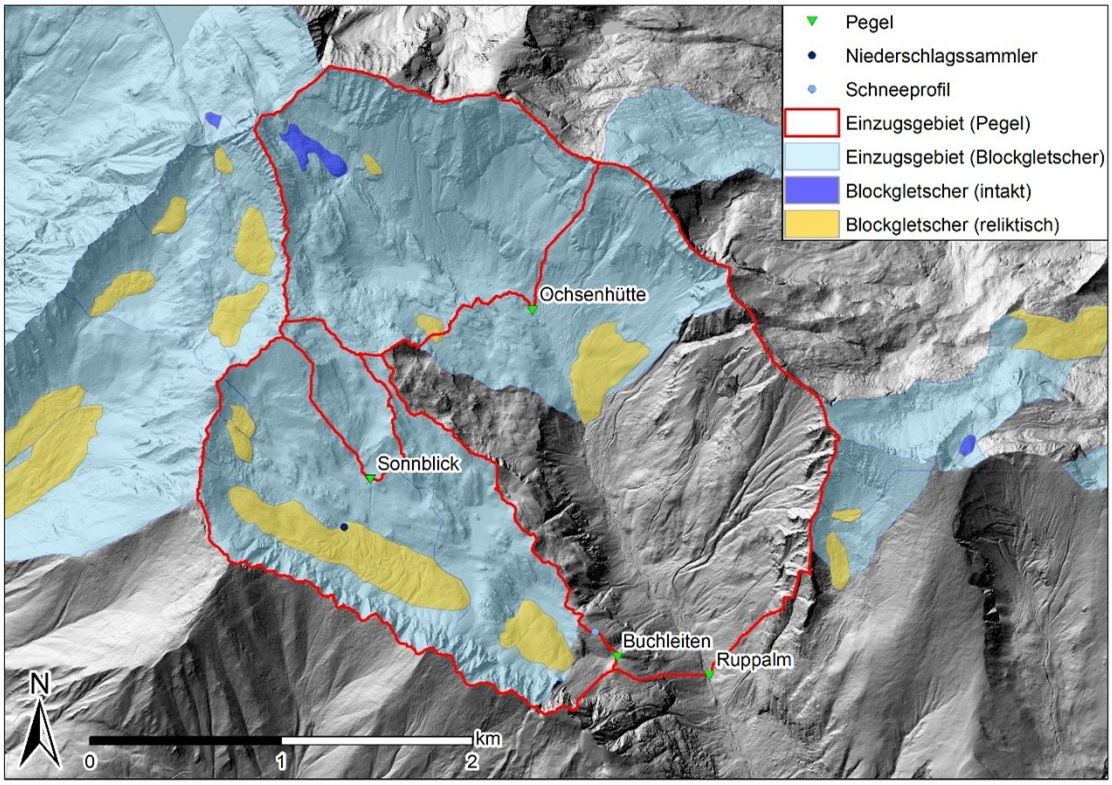
Einzugsgebiet	MSH [m ü. A.]	A [km²]	ABG [%]	# BG	# INT	# REL	T [°C]	P [mm]	PET [mm]	KWB [mm]
Lantschfeldquelle	2060	1,81	97,64	2	0	2	1,8	1361	501	860
Mauterndorf	1801	102,22	17,55	50	0	50	2,9	1157	491	666
Postalm	1934	34,57	31,49	25	0	25	2,3	1274	484	790

5.3 Hintereggengraben (Kärnten)

Das Untersuchungsgebiet Hintereggengraben liegt in der Reißeckgruppe und umfasst das Einzugsgebiet des Reinitzbaches oberhalb der Ruppalm (Abbildung 8). Der höchste Punkt des Untersuchungsgebietes wird von der Hohen Leier (2774 m ü.A.) gebildet, während der tiefste Punkt am Pegel Ruppalm auf 1625 m ü.A. liegt. Die mittlere Seehöhe beträgt 2355 m ü.A.. Administrativ gehört das Gebiet zur Gemeinde Lendorf im Bezirk Spittal an der Drau. Hydrologisch wird es dem Grundwasserkörper GK100186 Zentralzone [DRA] zugeordnet (Nationaler Gewässerbewirtschaftungsplan, BMLRT 2021).

Das Einzugsgebiet erstreckt sich über eine Fläche von 7,5 km², davon werden 67 % (5,0 km²) über Blockgletscher entwässert (Abbildung 8). In sieben der acht Blockgletscher im Untersuchungsgebiet ist der Permafrost bereits vollständig abgetaut, sodass sie als reliktisch klassifiziert werden. Der höchstgelegene Blockgletscher am Fuß der steilen Nordostflanke der Kleinen Leier wird hingegen als intakt eingestuft.

Abbildung 8: Untersuchungsgebiet Hintereggengraben (Kärnten). (a) Lage der Pegel und zugehöriger Einzugsgebiete sowie der Blockgletscher und ihrer Einzugsgebiete basierend auf Wagner et al. (2020c)



Aufgrund der Höhenlage weist das Gebiet im langjährigen Mittel (1980–2009) eine niedrige mittlere Jahrestemperatur von 1,0 °C sowie einen hohen Jahresniederschlag von 1323 mm auf (Hiebl & Frei, 2016, 2018). Die mittlere potenzielle Evapotranspiration beträgt 514 mm pro Jahr (Haslinger & Bartsch, 2016).

Geologisch gehört das Untersuchungsgebiet zum Tauernfenster und wird vollständig vom subpenninischen Venediger-Deckensystem aufgebaut (Schmid et al., 2004). Die Gipfelregionen bestehen vorwiegend aus Zentralgneisen des Hochalmkerns, während Amphibolite, Paragneise und Glimmerschiefer des Reißeck-, Draxel- und Storz-Komplexes (Altes Dach, Subpenninikum) die mittleren und tieferen Bereiche dominieren (Cliff et al., 1971; Exner, 1980, 1984; Pestal et al., 2006; Schuster et al., 2006). Im Bereich der Roßalm sowie am Roßkopf treten zusätzlich Serpentinit, Talkschiefer und Tremolit-Chloritfels als weitere Komponenten des Storz-Komplexes auf (Exner, 1980; Schuster et al., 2006).

Von hydrogeologischer Bedeutung ist eine markante, junge Störungszone mit NW-SE-Streichrichtung, die das Untersuchungsgebiet durchzieht. Sie verläuft durch das Reinitztal, über die Roßalmscharte bis zu den Mühldorfer Seen (Exner, 1980). Die starke tektonische Zerrüttung entlang dieser Störung führt zu einer verstärkten Verwitterung und einer Anhäufung von Lockergestein, das heute als Hangschuttfächer und Ablagerungen diverser Massenbewegungen vorliegt (Schuster et al., 2006). Gemeinsam mit den ausgedehnten Blockgletschern und Moränen bilden diese Ablagerungen bedeutende Porengrundwasserleiter. Die an sie gebundenen Quellen speisen die Trinkwasserversorgung von Spittal an der Drau (Schuster et al., 2006).

Der generelle hydrochemische Charakter der Quellwässer der gesamten Gebirgsgruppe ist für deren Kristallingesteine typisch und im Wesentlichen durch die Calcium- und Magnesiumdominanz als erdalkalisch-karbonatisch bis erdalkalisch-alkalisch-karbonatisch einzustufen.

Abbildung 9: Untersuchungsgebiet Hintereggengraben, Lage der Pegel Sonnblick und Buchleiten, des Schneeprofils und des Regensammlers. Blockgletscher sind rot hervorgehoben. Die Roßalm, im Hintergrund der Höhenzug Gurglitzen (2352 m ü.A.) – Hocheck (2432 m ü.-A.)

Foto: Rudolf Philippitsch

Morphologisch gliedert sich das Untersuchungsgebiet in mehrere Abschnitte: die kleinräumig strukturierte Hochfläche der Roßalm, den von Karen und Geländestufen geprägten Bereich zwischen Roßalmscharte (2521 m ü.A.) und Ochsenhütte (2086 m ü.A.) sowie den tief eingeschnittenen Hintereggengraben im Osten. Während entlang des Reinitzbaches mächtige Lockergesteinsakkumulationen die Talflanken dominieren, weist die Roßalm eine kleingegliederte Struktur mit mehreren abflusslosen Senken auf, in denen sich Moore und Tümpel gebildet haben. Der Reinitzer Sonnblick (2515 m ü.A.) überragt die Almlandschaft im Nordwesten mit steilen, grasbewachsenen Flanken, während die Roßalm im Südwesten durch die markante Wandflucht des Höhenzugs Gurglitzen (2352 m ü.A.) – Hocheck (2432 m ü.A.) begrenzt wird. Am Fuß dieser Wände befindet sich ein reliktischer Blockgletscher, dessen Blockwerk teilweise von querstehenden Felsrippen eingeengt oder unterbrochen wird (Abbildung 9). An den bergseitigen Flanken dieser Felsrippen haben sich ebenfalls kleine Tümpel und Moore gebildet, die in einigen Fällen vom vorrückenden Blockwerk überfahren wurden.

Innerhalb des Untersuchungsgebiets wurden drei Teil-Einzugsgebiete im Rahmen des Projekts detailliert untersucht (Abbildung 8):

- **Einzugsgebiet Reinitzbach am Pegel Ochsenhütte (1,79 km²):**
  Dieses Gebiet umfasst die höchstgelegenen Teile des Untersuchungsgebiets, darunter die steilen Südflanken der Hohen Leier (2774 m ü.A.). Neben drei reliktischen Blockgletschern liegt hier der einzige intakte Blockgletscher des Untersuchungsgebietes. Die mittlere Seehöhe beträgt 2355 m ü.A., der Anteil der Blockgletscherentwässerung liegt bei 15 %.

- **Einzugsgebiet Pegel Sonnblick (0,24 km²):**
  Dieses Teilgebiet wird von der Südflanke des Sonnblicks (2515 m ü.A.) und den höchsten Bereichen der Roßalm dominiert. Die Landschaft ist von alpinen Rasen geprägt, die nur vereinzelt durch kleinere Felsflächen unterbrochen werden. In diesem Einzugsgebiet existieren keine Blockgletscher.

- **Einzugsgebiet Buchleitenquelle (2,25 km²):**
  Es umfasst weitgehend die Roßalm mit ihren ausgedehnten alpinen Rasenflächen und sumpfigen, abflusslosen Vertiefungen. Der Höhenzug Sonnblick (2515 m ü.A.) – Hocheck (2432 m ü.A.) – Gurglitzen (2352 m ü.A.) – Böse Nase begrenzt das Gebiet nach Westen und Süden. Am Fuß dieses Höhenzugs befinden sich zwei mächtige, reliktische Blockgletscher, die durch eine Felsstufe voneinander getrennt sind (Abbildung 9). Im obersten Bereich des Einzugsgebiets liegen zwei weitere, kleinere reliktische Blockgletscher.

Eine Übersicht der Kennzahlen der untersuchten Teil-Einzugsgebiete findet sich in Tabelle 4.

Tabelle 4: Einzugsgebietscharakterisierung im Untersuchungsgebiet Hintereggengraben (Kärnten). Mittlere Seehöhe MSH [m ü. A.], Einzugsgebietsfläche A [km²], durch Blockgletscher entwässernde Fläche ABG [%], Blockgletscher-Anzahl im Einzugsgebiet # BG (intakte Blockgletscher # INT, reliktische Blockgletscher # REL), langjährige (1980–2009) mittlere Lufttemperatur T [°C], langjähriger mittlerer Jahresniederschlag P [mm], langjährige mittlere potenzielle Evapotranspiration PET [mm], langjährige klimatische Wasserbilanz KWB [mm]. Auswertung basierend auf Wagner et al. (2020c)

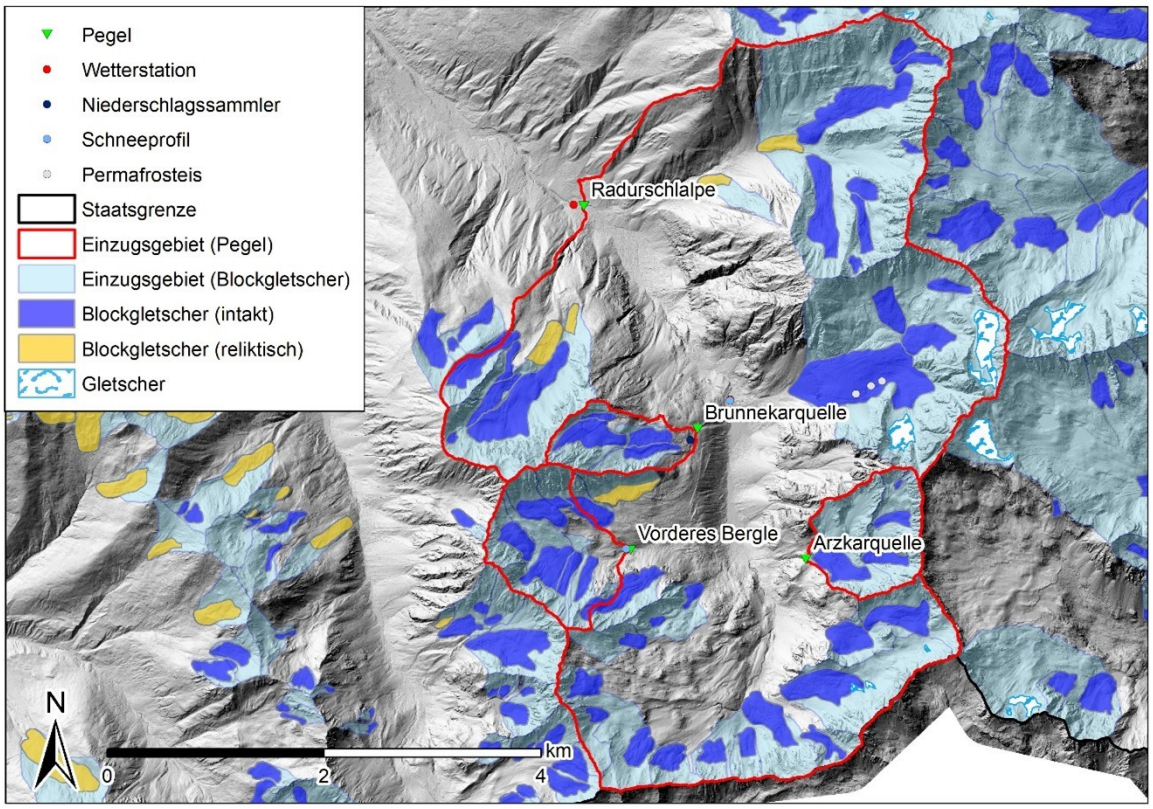
Einzugsgebiet	MSH [m ü. A.]	A [km²]	ABG [%]	# BG	# INT	# REL	T [°C]	P [mm]	PET [mm]	KBW [mm]
Buchleiten	2185	2,25	96,44	4	0	4	1,1	1251	522	729
Ochsenhütte	2355	1,79	14,84	3	1	2	-0,1	1362	505	857
Ruppalm	2176	7,50	66,72	8	1	7	1,0	1323	514	809
Sonnblick	2309	0,24	0,00	0	0	0	0,9	1287	528	759

5.4 Radurschltal (Tirol)

Das Radurschltal in den westlichen Ötztaler Alpen stellt das höchstgelegene Untersuchungsgebiet des Projekts dar. Es umfasst das Einzugsgebiet des Radurschlbaches oberhalb der Radurschlalpe (1794 m ü.A.), an der die TIWAG einen Pegel an der Ableitung zum Speicher Gepatsch betreibt (Inntalüberleitung Süd, WB PZ 6/540). Der höchste Punkt des Untersuchungsgebiets ist der Glockturm (3353 m ü.A.), die mittlere Seehöhe liegt bei 2598 m ü.A.. Das Gebiet gehört zur Gemeinde Pfunds im Bezirk Landeck und ist dem Grundwasserkörper GK100010 Zentralzone [DBJ] zugeordnet (Nationaler Gewässerbewirtschaftungsplan, BMLRT 2021).

Große Teile des Untersuchungsgebiets sind von Permafrost geprägt (oberhalb von 2400–2600 m ü.A.) und weisen eine hohe Blockgletscherdichte auf (Abbildung 10). Von den 24,4 km² Einzugsgebietsfläche der Radurschlalpe entwässern 56 % über Blockgletscher. Insgesamt befinden sich 51 Blockgletscher in der Region, von denen 46 als intakt und somit als eisführend eingestuft werden.

Abbildung 10: Untersuchungsgebiet Radurschltal (Tirol). (a) Lage der Pegel und zugehöriger Einzugsgebiete, der Blockgletscher und ihrer Einzugsgebiete basierend auf Wagner et al. (2020c) sowie der Gletscher basierend auf Buckel und Otto (2018)



Aufgrund der hohen Lage liegt die mittlere jährliche Lufttemperatur im Untersuchungsgebiet (1980–2009) bei -1,6 °C (Hiebl & Frei, 2016). Der mittlere Jahresniederschlag beträgt 974 mm und ist aufgrund der inneralpinen Trockenzone vergleichsweise niedrig (Hiebl & Frei, 2018). Von den fünf Untersuchungsgebieten weist dieses den geringsten mittlere Jahresniederschlag auf (Tabelle 1) auf. Die mittlere jährliche potenzielle Evapotranspiration wird mit 479 mm angegeben (Haslinger & Bartsch, 2016).

Geologisch gehört das gesamte Untersuchungsgebiet zum Ötztal-Bundschuh-Deckensystem (Schmid et al., 2004). Ortho- und Paragneise dominieren das Gebiet, mit untergeordneten Vorkommen von Glimmerschiefer und Amphibolit (Hoinkes & Thöni, 1993; Moser, 2012). Diese Gesteine sind Teil des Ötztal-Stubai-Komplexes, der das kristalline Grundgebirge der Ötztal-Decke bildet (Hoinkes & Thöni, 1993; Tropper & Recheis, 2003; Sölva et al., 2005; Hoinkes et al., 2021).

Das trockene, inneralpine Klima und die topografische Gliederung begünstigen die Bildung von Blockgletschern (Kerschner, 1982). Die einzigen Gletscher im Gebiet, Hüttekarferner und Glockturmferner, befinden sich an der schattigen Nordflanke des Glockturm-Massivs und bedecken zusammen 0,16 km² (0,7 % der Untersuchungsgebietsfläche). Im Gegensatz dazu nehmen Blockgletscher 4,10 km² (16,8 % der Gesamtfläche) ein (Abbildung 11).

Abbildung 11: Untersuchungsgebiet Radurschltal, Lage der Pegel Arzkarquelle, Brunnekarquelle und Vorderes Bergle, der Schneeprofile und des Regensammlers. Blockgletscher sind rot hervorgehoben. Panorama vom Wildnörderer nach Osten gegen Hüttekar, Arzkar und Hinteres Bergle

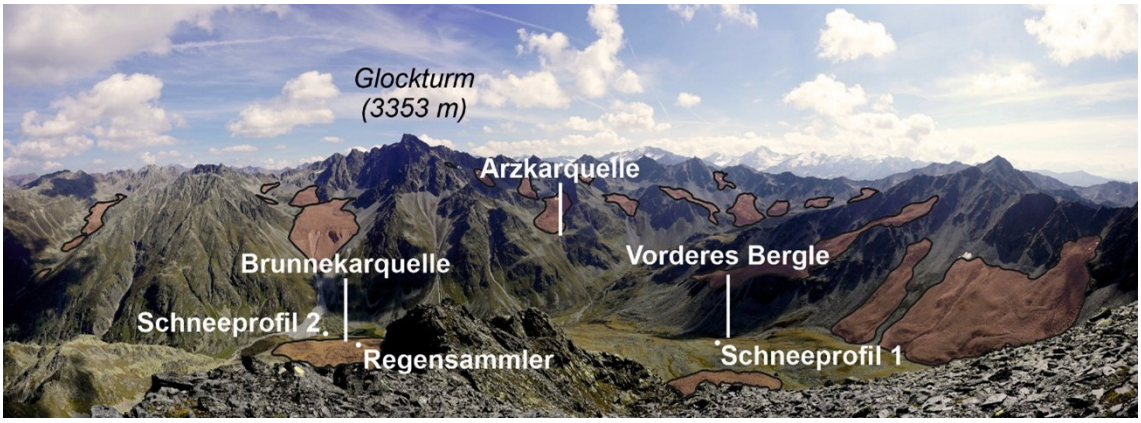


Foto: Rudolf Philippitsch

Drei Teil-Einzugsgebiete wurden untersucht (Abbildung 10):

- **Arzkarquelle (0,95 km²):**
  Das Einzugsgebiet liegt in der Südflanke des Glockturms (3353 m ü.A.), südlich des Matternturms (3146 m ü.A.). Mit einer mittleren Seehöhe von 2843 m ist es das höchstgelegene Einzugsgebiet des Projekts. Vier intakte Blockgletscher sind gestaffelt im Arzkar angeordnet, und 99,5 % der Einzugsgebietsfläche entwässern durch Blockgletscher.

- **Brunnekarquelle (0,64 km²):**
  Das Einzugsgebiet befindet sich in der Ostflanke des Wildnörderers (3011 m ü.A.) und hat eine mittlere Seehöhe von 2605 m. Vier intakte Blockgletscher nehmen den Großteil des Brunnekars ein, wodurch 81 % der Einzugsgebietsfläche durch Blockgletscher entwässert werden.

- **Vorderes Bergle (1,24 km²):**
  Das Einzugsgebiet am Pegel Vorderes Bergle liegt zwischen Wildnörderer (3011 m ü.A.), Brunnewandspitze (2981 m ü.A.) und Nördlichem Seekarkopf (3000 m ü.A.) und hat eine mittlere Seehöhe von 2733 m. Sieben intakte Blockgletscher befinden sich im Vorderen Bergle, und 85 % der Einzugsgebietsfläche entwässern durch Blockgletscher.

Die Kennzahlen aller Teil-Einzugsgebiete sind in Tabelle 5 zusammengefasst.

Tabelle 5: Einzugsgebietscharakterisierung im Untersuchungsgebiet Radurschltal (Tirol). Mittlere Einzugsgebietshöhe MSH [m ü. A.], Einzugsgebietsfläche A [km²], durch Blockgletscher entwässernde Fläche ABG [%], Blockgletscher-Anzahl im Einzugsgebiet # BG (intakte Blockgletscher # INT, reliktische Blockgletscher # REL), langjährige (1980–2009) mittlere Lufttemperatur T [°C], langjähriger mittlerer Jahresniederschlag P [mm], langjährige mittlere potenzielle Evapotranspiration PET [mm], langjährige klimatische Wasserbilanz KWB [mm]. Auswertung basierend auf Wagner et al. (2020c)

Einzugsgebiet	MSH [m ü. A.]	A [km²]	ABG [%]	# BG	# INT	# REL	T [°C]	P [mm]	PET [mm]	KWB [mm]
Arzkarquelle	2843	0,95	99,54	4	4	0	-3,2	1036	498	538
Brunnekarquelle	2605	0,64	81,48	4	4	0	-2,6	938	474	464
Radurschlalpe	2598	24,38	55,55	51	46	5	-1,6	974	479	495
Vorderes Bergle	2733	1,24	84,63	7	7	0	-2,4	941	485	456

Der generelle hydrochemische Charakter der kristallinen Quellwässer in den Ötztaler Alpen bietet aufgrund der unterschiedlichen hydrogeologischen Gegebenheiten ein weites Spektrum, welches von erdalkalisch-karbonatisch bis erdalkalisch-sulfatisch bis erdalkalisch-alkalisch-sulfatisch reicht. Im Bereich des Radurschltals dominieren erdalkalisch-karbonatische Wässer, teils im Grenzbereich zu erdalkalisch – karbonatisch - sulfatischen Wässern (Ribis, 2017). Metallkonzentrationen sind durchwegs natürlichen Ursprungs und stammen aus vererzten Gesteinshorizonten, welche im Kristallin der Ötztaler Alpen nicht ungewöhnlich sind und früher z. T. auch bergmännisch abgebaut wurden.

5.5 Vergalda- und Valzifenztal (Vorarlberg)

Vergalda- und Valzifenztal in der Silvretta-Gruppe bilden das Untersuchungsgebiet im Bundesland Vorarlberg (Abbildung 12). Hydrologisch umfasst es das Einzugsgebiet des Suggadinbachs, gemessen am gleichnamigen Pegel (1402 m ü.A.) in Gargellen, der von der illwerke vkw betrieben wird. Der höchste Punkt des Untersuchungsgebiets ist die Eisentälispitze (2875 m ü.A.), während die mittlere Seehöhe bei 2166 m liegt. Administrativ gehört das Gebiet zur Gemeinde St. Gallenkirch im Bezirk Bludenz. Es befindet sich innerhalb des Grundwasserkörpers GK100152 Kristallin [RHE] (Nationaler Gewässerbewirtschaftungsplan, BMLRT 2021).

Das Untersuchungsgebiet erstreckt sich über 39,2 km², von denen 12 % durch Blockgletscher entwässern (Abbildung 12). Insgesamt sind 26 Blockgletscher im Gebiet verzeichnet, von denen 14 als intakt gelten. Der zentrale und östliche Teil des Untersuchungsgebiets besteht überwiegend aus Gneisen und Amphiboliten sowie untergeordnet aus Glimmerschiefern der Silvretta-Decke (Silvretta-Seckau-Deckensystem, Oberostalpin; Schmid et al., 2004). Im Bereich der Ortschaft Gargellen hingegen treten Brekzien, Sandsteine, Tonschiefer, Kalksteine und Mergel des Penninikums zutage (Fenster von Gargellen). Strukturgeologisch gehören diese Gesteine zum Prättigau-Flysch, zur Sulzfluh-Decke und zur Falknis-Decke. Während diese Einheiten in der Schweiz großflächig verbreitet sind, werden sie im Tal des Suggadinbachs größtenteils von der Silvretta-Decke überlagert (Fuchs und Pirkl, 1980; Fuchs, 1984; Schmid et al., 2004).

Besonders die intensiv verkarsteten Kalksteine der Sulzfluh-Decke spielen eine wichtige hydrogeologische Rolle, da sie mehrere große Quellen in der Umgebung von Gargellen speisen. Zwei dieser Quellen, die ~2 km nördlich des Untersuchungsgebiets gelegene Fidelisquelle sowie die Obwaldquelle (Abbildung 12), werden vom Hydrographischen Dienst beobachtet. Im Bereich des Sarotlamassivs (Grenzgebiet zur Schweiz) sind diese Kalksteine größtenteils von den geringdurchlässigen Gesteinen der Silvretta-Decke überdeckt. Der Suggadinbach schneidet sie jedoch im Gargellental an und schafft damit einen bedeutenden Quellhorizont (Mathis, 2005). Ein Markierungsversuch belegt, dass das Einzugsgebiet der Fidelisquelle teilweise auf Schweizer Staatsgebiet liegt und somit über das orographische Einzugsgebiet hinausgeht (vgl. Mathis, 2005). Eine ähnliche Situation wird für weiter südlich gelegene Quellen vermutet. Dadurch könnte das tatsächliche Einzugsgebiet des Pegels Suggadinbach größer sein als in Abbildung 12 dargestellt.

Der generelle hydrochemische Charakter der kristallinen Quellwässer für den gesamten Grundwasserkörper der Zentralzone ist je nach vorherrschender Gesteinszusammensetzung erdalkalisch – karbonatisch, erdalkalisch-alkalisch – karbonatisch mit bereichsweiser sulfatischer Komponente. Nennenswerte Schwermetallkonzentrationen wurden nicht festgestellt.

Das langjährige (1980–2009) mittlere Jahresmittel der Lufttemperatur im Untersuchungsgebiet beträgt 0,7°C, während der mittlere Jahresniederschlag 1571 mm beträgt (basierend auf Hiebl und Frei, 2016, 2018). Die mittlere jährliche potenzielle Evapotranspiration beläuft sich auf 537 mm (basierend auf Haslinger und Bartsch, 2016).

Abbildung 12: Untersuchungsgebiet Vergalda- und Valzifenztal (Vorarlberg). Lage der Pegel und zugehöriger Einzugsgebiete sowie der Blockgletscher und ihrer Einzugsgebiete basierend auf Wagner et al. (2020c)

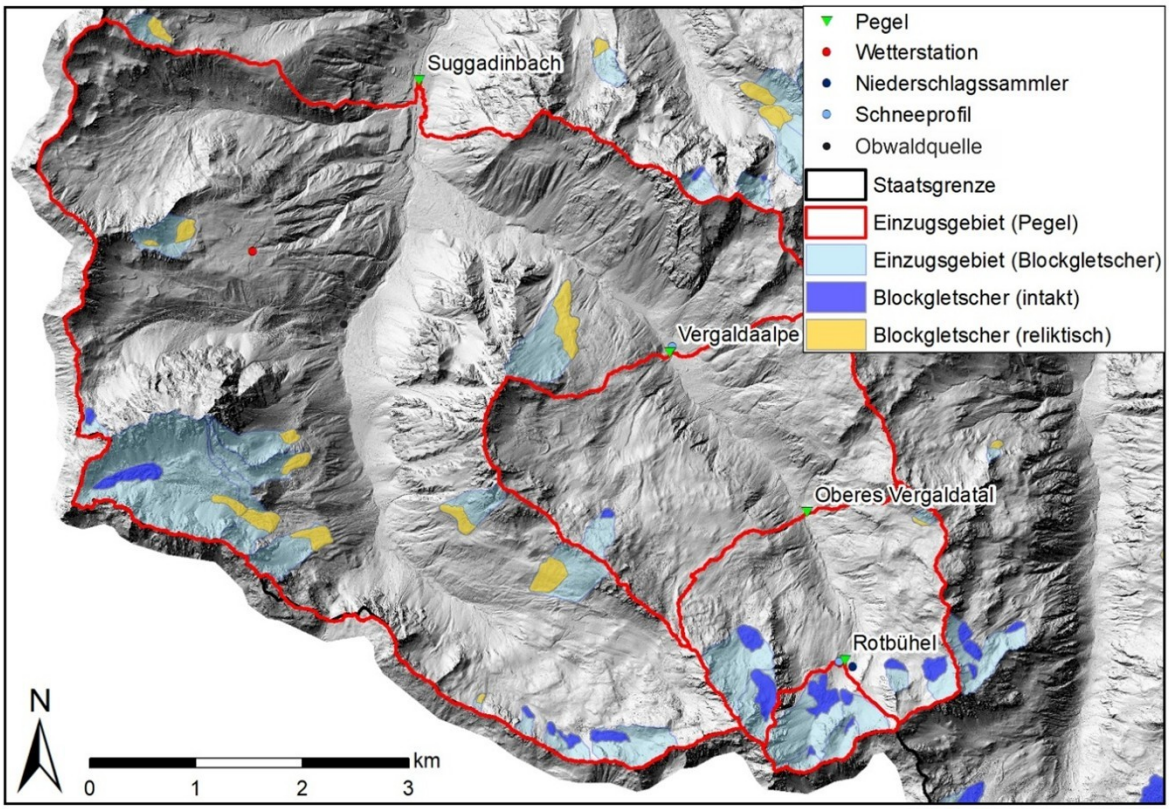


Abbildung 13: Das Vergaldatal im Vorarlberger Untersuchungsgebiet. Die Lage des Pegels Rotbühel, des Schneeprofils sowie des Regensammlers ist angegeben, Blockgletscher sind rot hervorgehoben. Rotbühel und Eisentäli im Talschluss des Vergaldatales, Blickrichtung Osten.

Foto: Simon Seelig

Zur detaillierten Untersuchung der Entwässerungsdynamik im Vergaldatal wurden drei aufeinanderfolgende Teil-Einzugsgebiete analysiert (Tabelle 6):

- **Rotbühelquelle (0,75 km²):**
  Dieses Einzugsgebiet liegt am Talschluss des Vergaldatals zwischen der Rotbühelspitze (2852 m ü.A.), der Eisentälispitze (2875 m ü.A.) und dem Hinterberg (2682 m ü.A.) und hat eine mittlere Seehöhe von 2525 m (Abbildung 12). Es umfasst vier intakte Blockgletscher, durch die 82 % der Fläche entwässern.

- **Vergaldabach – Pegel Oberes Vergaldatal (4,83 km²):**
  Dieses Einzugsgebiet liegt auf einer mittleren Seehöhe von 2376 m und enthält acht intakte sowie einen reliktischen Blockgletscher. Insgesamt entwässern 27 % der Fläche durch Blockgletscher.

- **Vergaldabach – Pegel Vergaldaalpe (11,25 km²):**
  Mit einer mittleren Seehöhe von 2283 m umfasst dieses Einzugsgebiet neun intakte und einen reliktischen Blockgletscher. Hier entwässern 12 % der Fläche durch Blockgletscher.

Die Kennzahlen der einzelnen Teil-Einzugsgebiete sind in Tabelle 6 zusammengefasst.

Tabelle 6: Einzugsgebietscharakterisierung im Untersuchungsgebiet Vergalda- und Valzifenztal (Vorarlberg). Mittlere Seehöhe MSH [m ü. A.], Einzugsgebietsfläche A [km²], durch Blockgletscher entwässernde Fläche ABG [%], Blockgletscher-Anzahl im Einzugsgebiet # BG (intakte Blockgletscher # INT, reliktische Blockgletscher # REL), langjährige (1980–2009) mittlere Lufttemperatur T [°C], langjähriger mittlerer Jahresniederschlag P [mm], langjährige mittlere potenzielle Evapotranspiration PET [mm], langjährige klimatische Wasserbilanz KWB [mm]. Auswertung basierend auf Wagner et al. (2020c)

Einzugsgebiet	MSH [m ü. A.]	A [km²]	ABG [%]	# BG	# INT	# REL	T [°C]	P [mm]	PET [mm]	KWB [mm]
Oberes Vergaldatal	2376	4,83	27,06	9	8	9	-0,8	1592	532	1060
Rotbühelquelle	2525	0,75	82,03	4	4	4	-2,0	1588	536	1052
Suggadinbach	2166	39,20	12,14	26	14	12	0,7	1571	537	1034
Vergaldaalpe	2283	11,25	12,48	10	9	1	-0,2	1578	538	1039

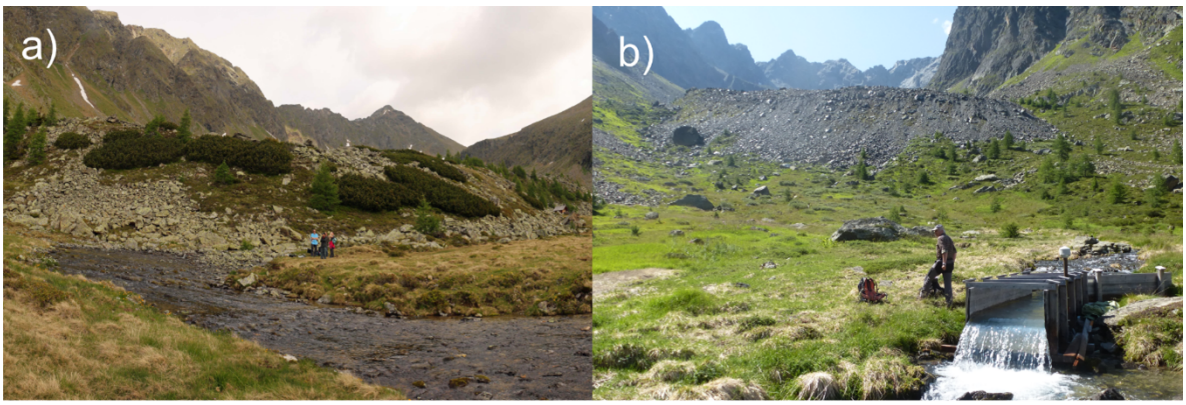
6 Wasserwirtschaftliche Bedeutung

In diesem Kapitel soll ein Überblick über den derzeitigen Wissensstand in Bezug auf Blockgletscher als (hoch-)alpine Wasserspeicher und ihre Bedeutung im alpinen Wasserkreislauf in Österreich gegeben werden. Dies stellt die Grundlage dar, um die wasserwirtschaftlich nachhaltige Nutzung unserer lebenswichtigsten Ressource zu ermöglichen.

6.1 Blockgletscher als Grundwasserspeicher

Der überwiegende Anteil österreichischer Blockgletscher (91%) liegt in Gebieten, die aus kristallinen Gesteinen aufgebaut sind (Wagner et al., 2020a). Im Allgemeinen sind kristalline Gebiete hydrogeologisch durch eine Vielzahl kleiner Quellaustritte gekennzeichnet, deren Schüttung häufig unter 1 l/s liegt und während der Wintermonate oder längerer Trockenperioden gänzlich versiegt. Blockgletscherquellen durchbrechen dieses Muster und können auch in Seehöhen weit über 1700 m noch ganzjährig schüttende Quellen (Untersweg & Schwendt, 1995, 1996; Winkler et al., 2016b, Wagner et al., 2020a) bilden (Abbildung 14). Blockgletscher stellen oberflächennahe Porengrundwasserleiter dar, die in der Regel durch eine Quelle oder Quellgruppe im Bereich der Blockgletscherstirn entwässert werden (z.B. Hayashi, 2020).

Abbildung 14: Beispiele von Blockgletscherquellen und daran installierten Pegelmessstellen: a) Preberkessel (Schladminger Tauern), b) Berglerlochquelle (HZB-Nummer 395525, Ötztaler Alpen);



Fotos: a) R. Philippitsch, b) G. Winkler

Die starke und ganzjährige Schüttung der Blockgletscherquellen (oft wird eine mittlere jährliche Schüttung von mehr als 10 l/s beobachtet) ergibt sich aus der hohen Speicherfähigkeit dieser alpinen Grundwasserleiter. Entsprechend wurden an einigen Blockgletscherquellen Messstellen für das offizielle Monitoringnetz des Hydrographischen Dienstes Österreichs installiert (z.B. Berglerlochquelle (HZB-Nr. 395525) in Abbildung 14b) Das Speicher- und Abflussverhalten von Blockgletschern wird von ihrem internen Aufbau, durch die Geometrie der einzelnen Schichten, die Korngrößenverteilung sowie Struktur des Korngerüsts, den Eisgehalt und die Morphologie der bedeutendsten Schichtgrenzen bestimmt (Kapitel 4).

„Wie funktioniert die Entwässerung und Speicherung in den Blockgletschern?“

Einerseits zeigen starke Abflussschwankungen der Blockgletscherquellen eine rasche hydraulische Reaktion auf Grundwasserneubildungsereignisse durch Niederschläge, Schneeschmelze oder Gletscherschmelzwässer im Einzugsgebiet während der Sommermonate an (**schnelle Abflusskomponente**). Mehrere Markierungsversuche an intakten wie reliktischen Blockgletschern zeigen Abstandsgeschwindigkeiten in der Größenordnung von mehreren cm/s (Wagner et al., 2021a; Seelig, 2022; Seelig et al., 2023), ähnlich jenen von Karstgrundwasserleitern. Dementsprechend ist die schnelle Strömungskomponente an bevorzugte Fließpfade mit hoher hydraulischer Durchlässigkeit gebunden (Pauritsch et al., 2017). Bei intakten Blockgletschern sind dies häufig Fließkanäle an der Oberfläche des Permafrostkörpers oder auch im Permafrostkörper selbst (Seelig et al., 2023; Seelig et al., 2025a; Seelig et al., 2025b), bei reliktischen Blockgletschern ermöglichen grobkörnige/-blockige Zonen eine sehr hohe Durchlässigkeit (Winkler et al., 2016). In diesen Zeiten können Schüttungsmengen von mehreren hundert Litern pro Sekunde auftreten.

Andererseits sind die Wintermonate durch kontinuierlich anhaltenden Basisabfluss an Blockgletscherquellen gekennzeichnet, der trotz monatelang fehlender / vernachlässigbarer Grundwasserneubildung nicht versiegt (**verzögerte Abflusskomponente**). Dieses Verhalten zeichnet sowohl die intakten Blockgletscher mit Permafrosteiskörper als auch die eisfreien, reliktischen Blockgletscher aus (Wagner et al., 2020a). Die Auswertung der Trockenwetterfalllinien an den fünf Blockgletscherquellen des Projekts ist in Abbildung 15 dargestellt. Die Größenordnung der Auslaufkoeffizienten (Exponent α) entspricht jenen von Wagner et al. (2020b) an weiteren Blockgletscherquellen der österreichischen Alpen (Tabelle 7). Der frühe Abschnitt der Trockenwetterfalllinie bildet jedoch nicht nur Aquifereigenschaften ab, sondern wird auch

stark von der Dynamik der Grundwasserneubildung vor Beginn der Rezessionsphase beeinflusst (z. B. Winkler et al., 2016) und wird daher hier nicht näher betrachtet. Abbildung 15f stellt die Verteilung der Exponenten in den drei Gruppen als Boxplots dar. Das Hauptaugenmerk liegt dabei an dem für den Basisabfluss bedeutenden Exponenten α_3 (Tabelle 7).

Infobox – Speicherverhalten von Quellen

Das Auslaufverhalten der beobachteten Blockgletscherquellen wurde detailliert analysiert. Zu diesem Zweck wurde zunächst für jede der Quellen (Kettentörlquelle, Lantschfeldquelle, Buchleitenquelle, Arzkarquelle, Rotbühelquelle) eine Trockenwetterfalllinie erstellt. Dies erfolgte mit dem Master Recession Curve (MRC) Tool von Posavec et al. (2010, 2017), unter Verwendung des trigonometrischen Ansatzes. Hierbei wurden Teilbereiche der Trockenwetterfalllinie durch eine Exponentialfunktion angenähert, basierend auf dem linearen Speichermodell von Maillet (1905):

$$Q(t)=Q0\ e^{(-\alpha t)}$$

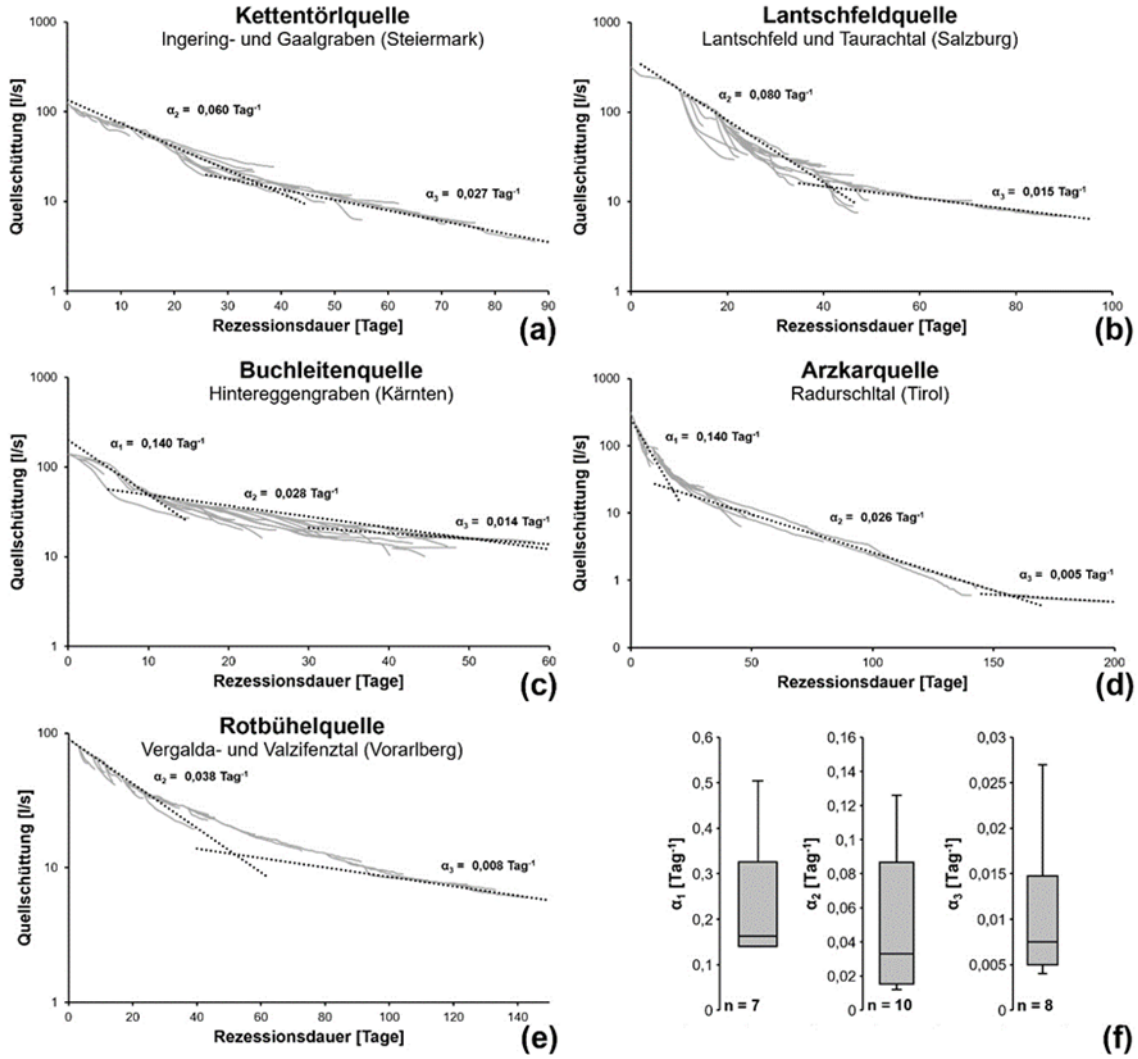
(Quellschüttung Q(t) [l/s] zur Zeit t nach dem Beginn der Rezessionsphase, Quellschüttung zu Beginn der Rezessionsperiode Q0 [l/s], Zeit t [Tage], Auslaufexponent α [1/Tag]). Während das frühe Auslaufverhalten von Quellen sowohl die Grundwasserneubildungsdynamik als auch Aquifereigenschaften widerspiegelt, bildet der Basisabfluss die Aquifereigenschaften ab (Hergarten und Birk, 2007; Birk und Hergarten, 2010). Anhand des an den Basisabfluss angepassten Auslaufexponenten α wurde anschließend das zu Beginn der Basisabfluss-Periode im Blockgletscher gespeicherte Grundwasservolumen abgeschätzt. Dazu wurde die Beziehung zwischen dem im Grundwasserleiter gespeicherten, dynamischen Wasservolumen (V(t)) und der Quellschüttung Q(t) ausgewertet, basierend auf der Annahme eines linearen Speichers, gemäß:

$$V(t)=(Q(t))/\alpha$$

Das zu Beginn der Quellschüttungs-Rezession unter Basisabflussbedingungen im Blockgletscher gespeicherte Grundwasservolumen lässt sich damit aus Q0 und α ermitteln. Dieses Wasservolumen ist in der Regel in der feinkörnigen, ungefrorenen Basisschicht der Blockgletscher gespeichert (Wagner et al., 2020b).

Unter Annahme einer effektiven Porosität von 0,2 (Winkler et al., 2016) wurde daraus die gesättigte Mächtigkeit abgeschätzt.

Abbildung 15: Auswertung der Trockenwetterfalllinien an Blockgletscherquellen. (a) Trockenwetterfalllinie der Kettentörlquelle im Untersuchungsgebiet Ingering- und Gaalgraben (Steiermark). (b) Trockenwetterfalllinie der Lantschfeldquelle im Untersuchungsgebiet Lantschfeld und Taurachtal (Salzburg). (c) Trockenwetterfalllinie der Buchleitenquelle im Untersuchungsgebiet Hintereggengraben (Kärnten). (d) Trockenwetterfalllinie der Arzkarquelle im Untersuchungsgebiet Radurschltal (Tirol). (e) Trockenwetterfalllinie der Rotbühelquelle im Untersuchungsgebiet Vergalda- und Valzifenztal (Vorarlberg). (f) Boxplots der Exponenten in diesem Projekt sowie der von Wagner et al. (2020b) an fünf weiteren Blockgletscherquellen ermittelten Exponenten



Basierend auf den α_3-Werten wurden gesättigte Mächtigkeiten der Grundwasserleiter abgeschätzt und diese liegen zwischen 1,6 und 14,2 m (Tabelle 7), was grob der Spannweite bei Wagner et al. (2020b) entspricht. Dies lässt darauf schließen, dass für die (ungefrorene) Basisschicht von Blockgletschern, die den Grundwasserleiter für den Basisabfluss in den Wintermonaten darstellt, eine durchschnittliche Mächtigkeit von mehreren Metern angenommen werden kann. Diese wird von feinkörnigem, ungefrorenem Sediment gebildet, welches einen Teil der Grundwasserneubildung während der Sommermonate aufnimmt und während der Wintermonate verzögert wieder abgibt.

Tabelle 7: Exponenten aus Trockenwetterfalllinien an 8 Blockgletscherquellen der österreichischen Alpen. Exponent der an den Basisabfluss angepassten Exponentialfunktionen α_3 [Tag^{-1}], gesättigte Mächtigkeit zu Beginn der Basisabfluss-Periode (B) bei effektiver Porosität von 0,2 [m].

Blockgletscher	Gebirgsgruppe	α_3 [Tag^{-1}]	B [m]
Kettentörlquelle	Seckauer Tauern	0,027	6,4
Lantschfeldquelle	Radstädter Tauern	0,015	1,6
Buchleitenquelle	Reißeckgruppe	0,014	11,7
Arzkarquelle	Ötztaler Alpen	0,005	1,1
Rotbühelquelle	Silvretta	0,008	14,2
Inneres Reichenkar[(1)]	Stubaier Alpen	0,004	1,8–6,6
Innere Ölgrube[(1)]	Ötztaler Alpen	0,005	4,7–11,2
Schöneben[(1)]	Seckauer Tauern	0,007	4,5–23,9

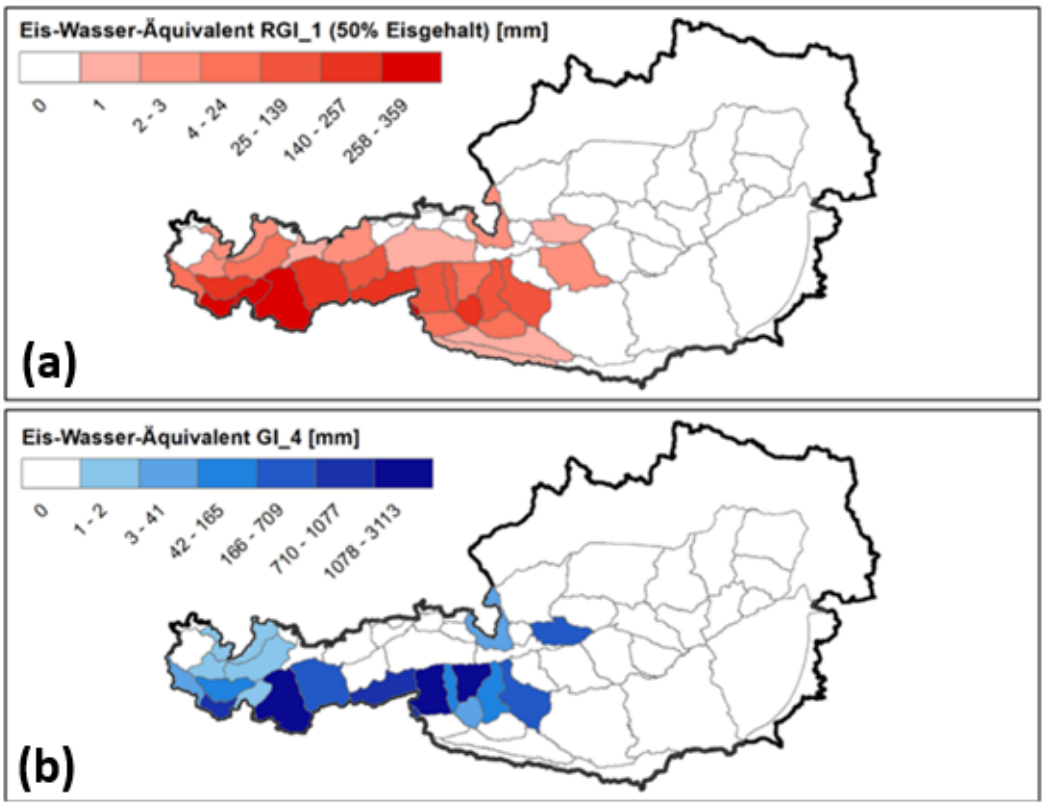
[(1)] Wagner et al. (2020b)

„Wie viel Wasser können Blockgletscher speichern?“

Mit Hilfe des hydrogeologischen Wissenstands und dem vorliegenden Blockgletscher-inventar konnte eine Berechnung der potentiell speicherbaren Wasserressourcen in den über 5700 Blockgletschern im Vergleich zu den im Gletschereis gespeichertem Süßwasser-reserven für den österreichischen Alpenraum vorgenommen werden (Abbildung 16a,b und 17a). Wasser liegt sowohl in fester Form als Permafrosteis in intakten BGs (Abbildung 16a) als auch in flüssiger Form in den seichten Grundwasserkörpern aller BGs vor (Abbildung 17a). Während das in flüssiger Form gespeicherte Wasser eine mittlere

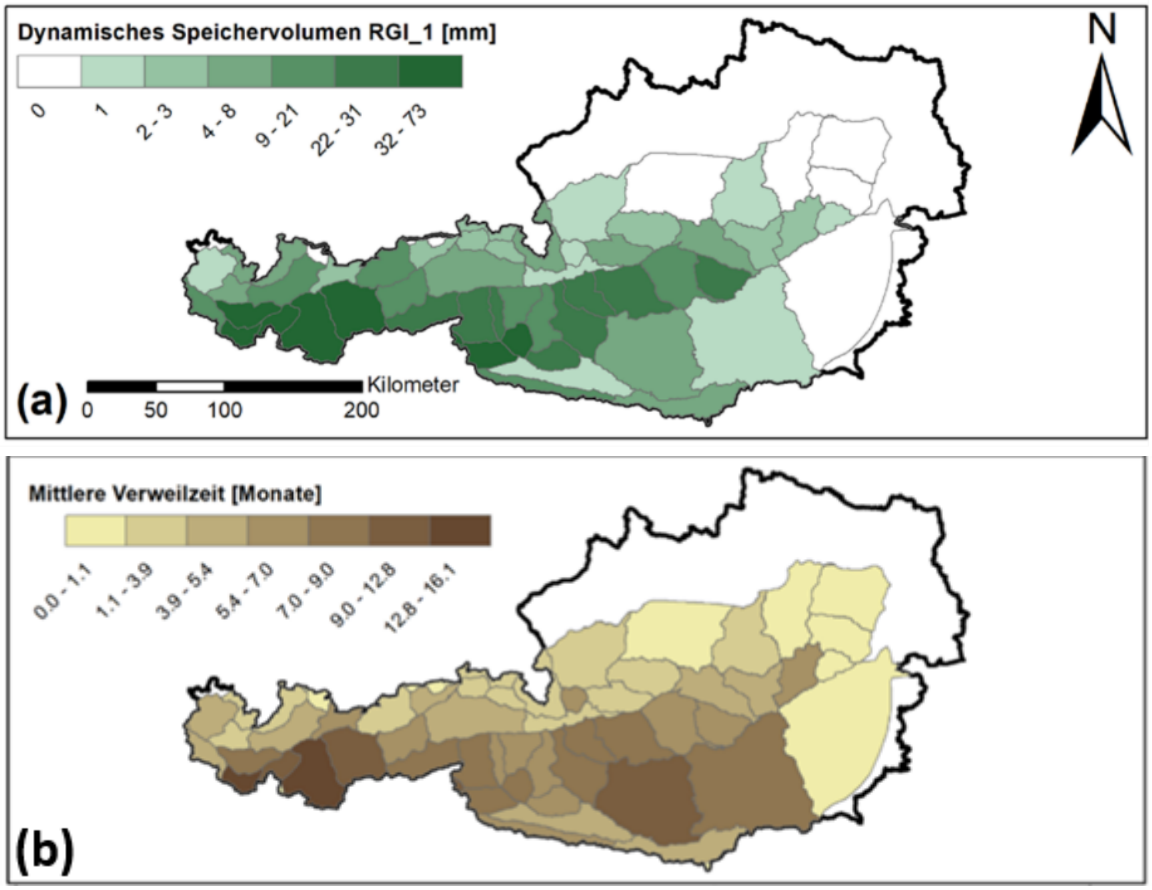
Verweilzeit von mehreren Monaten bis wenigen Jahren aufweist (Abbildung 17b) und damit vergleichsweise rasch die Abflussdynamik alpiner Einzugsgebiete prägt, werden für das in Permafrosteis gespeicherte Wasser Verweilzeiten von mehreren hundert bis tausend Jahren angenommen (Wagner et al., 2021b). Das gespeicherte Permafrosteis in intakten Blockgletschern wird auf etwa 1/12 des aktuell in Gletschereis gespeicherten Wassers geschätzt.

Abbildung 16: Vergleich der als Gletschereis und Permafrosteis gespeicherten Wasserressourcen in Gletschern bzw. Blockgletschern auf Basis einzelner Gebirgsgruppen (nach Grassler, 1984) anhand des flächennormierten Eis-Wasser-Äquivalents. (a) Eis-Wasser-Äquivalent des in intakten Blockgletschern gespeicherten Permafrosteises unter Annahme eines mittleren Eisgehaltes von 50 % (RGI_1; Wagner et al., 2020c). (b) Eis-Wasser-Äquivalent des 2015 in Gletschern gespeicherten Eises (GI_4; Buckel und Otto, 2018)



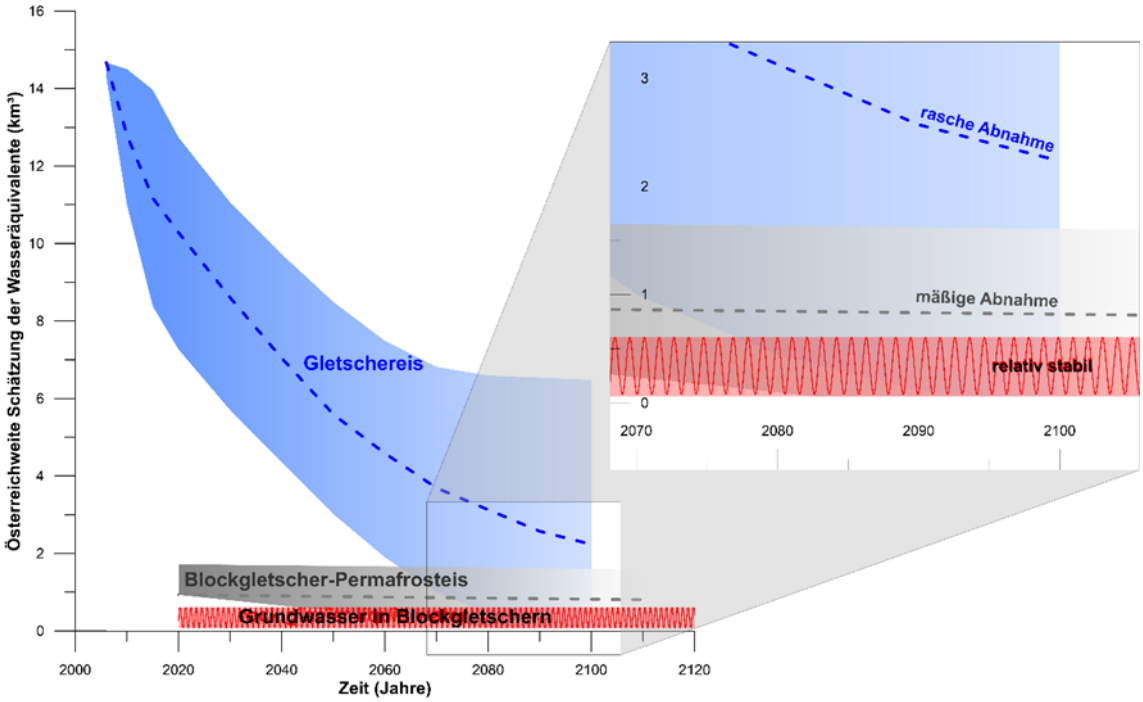
Das Grundwasservolumen, das in der ungefrorenen Basisschicht aller intakten und reliktischen Blockgletscher (Wagner et al., 2020c; Winkler et al., 2016b, 2018) gespeichert werden kann, kann eine Größenordnung bis zu einem 1/20 des in Form von Gletschereis gespeicherten Wassers erreichen.

Abbildung 17: Potentieller (maximaler) Grundwasserspeicher und Verweildauer auf Basis einzelner Gebirgsgruppen (nach Grassler, 1984); (a) Dynamisches Speichervolumen von Blockgletschern und (b) Schätzung der mittleren Verweilzeit in Blockgletschern als Quotient aus dynamischem Speichervolumen auf Basis der Wasserbilanz



Es würde in etwa das Eineinhalbfache des jährlichen Trinkwasserbedarfs von Österreich (Berechnungsbasis: 130 l/Tag und Einwohner) abdecken. Hier ist hervorzuheben, dass dieser dynamische Speicher regelmäßig (saisonal) wieder befüllt und entleert wird (Wagner et al., 2021b). Die rasche Eisschmelze der Gletscher bedeutet auch eine rasche Abnahme dieser gespeicherten Wasservolumina für die Zukunft (Abbildung 18). Die Schuttbedeckung von Blockgletschern schützt hingegen das Permafrosteis vor dem Abschmelzen, weshalb die Abnahme des gespeicherten Wasservolumens deutlich langsamer verläuft. Der mögliche Grundwasseranteil aus der ungefrorenen Basisschicht ist ohnedies auch in der Zukunft relativ stabil. (Wagner et al., 2021b).

Abbildung 18: Verhältnis des gespeicherten Wassers in Form von Eis und Grundwasser in Gletschern und Blockgletschern Österreichs mit geschätzter Entwicklung bis zum Jahr 2100 (modifiziert nach Wagner et al., 2021b)



6.2 Blockgletscher im alpinen Abflussgeschehen

In Österreich entwässern über 1200 km² im alpinen Raum über Blockgletscher, in denen das Wasser zwischengespeichert und verzögert wieder abgegeben wird (Wagner et al., 2019). Aufgrund ihrer Speicherfähigkeit und den schüttungsstarken Quellen beeinflussen Blockgletscher generell das alpine Abflussgeschehen. Um diesen Einfluss zu erfassen, wurde die Grundwasserneubildung und Abflussdynamik der Blockgletscherquellen und der darunterliegenden Gerinne in den fünf Untersuchungsgebieten mittels Niederschlags-Abfluss-Modellierung analysiert. Darauf aufbauend wurden für die Klimaszenarien RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5 Prognosen des zukünftigen Abflussverhaltens bis ins Jahr 2099 erstellt (Kapitel 7).

Das Hauptaugenmerk der Untersuchungen lag auf der Erfassung des Blockgletschereinflusses auf übergeordnete Flusssysteme und etwaiger Veränderung durch fortschreitenden Klimawandel.

6.2.1 Niederschlags-Abfluss-Modellierung

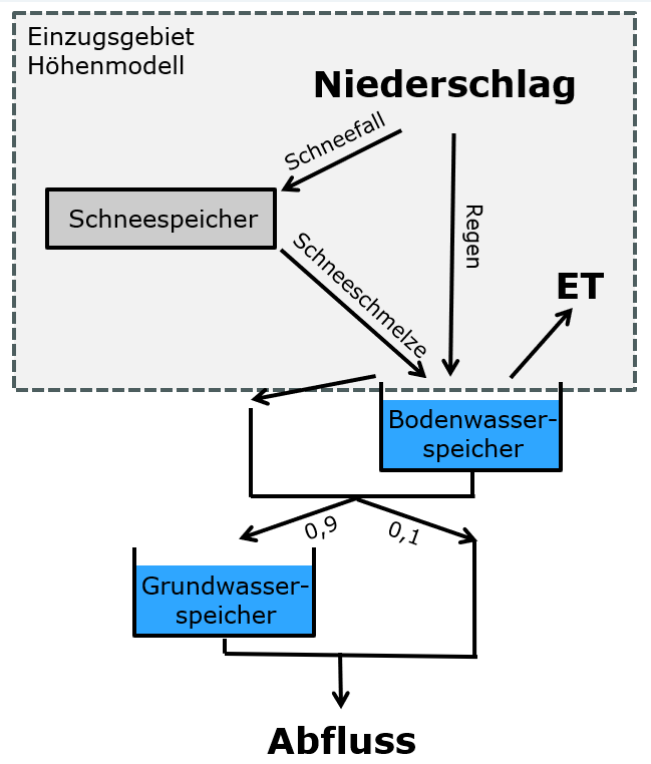
Mit Hilfe einer Niederschlags-Abfluss-Modellierung wurde die Grundwasserneubildung und die Abflussdynamik sowohl der Blockgletscherquellen wie auch der übergeordneten Einzugsgebiete in jedem der fünf Untersuchungsgebiete charakterisiert. Für jedes Einzugsgebiet wurde auf die jeweilige Abflussganglinie der 14 installierten Pegelstationen zurückgegriffen. Diese umfassen die im Zuge des Projekts aufgezeichneten und auf Tagesbasis gemittelten Zeitreihen von 2020 bis 2022 an fünf Blockgletscherquellen (Rotbühel, Arzkarquelle, Buchleitenquelle, Lantschfeldquelle, Kettentörlquelle) sowie an sieben alpinen Bachläufen (Vergaldaalpe, Vorderes Bergle, Ruppalm, Ochsenhütte, Sonnblick, Postalm, Kettentörlbach). Zusätzlich wurden die langjährigen Aufzeichnungen der Hydrographischen Dienste (1961–2022) an den Pegeln Hammerjäger und Mauterndorf, Aufzeichnungen der TIWAG am Pegel Radurschlalpe sowie Aufzeichnungen der illwerke vkw am Pegel Suggadinbach (Gargellen) inklusive der abgeleiteten Wassermenge für die Modellkalibrierung der übergeordneten Einzugsgebiete herangezogen. Für die Modellierung wurden die Daten auf Tagesbasis gemittelt, als Modell wurde das Niederschlags-Abfluss Modell GR4J (Perrin et al., 2003) herangezogen und mit dem Tag-Grad Schneemodell CemaNeige (Valéry et al., 2014b) gekoppelt. Als Eingangsdaten für die Grundwasserneubildung des verwendete Niederschlags-Abfluss-Modell dienten Rasterdaten (1 x 1 km) mit Tagesauflösung von Lufttemperatur, Niederschlag und potenzieller Evapotranspiration des SPARTACUS (Spatiotemporal Reanalysis Dataset for Climate in Austria) bzw. ARET (Austrian Reference Evapotranspiration Dataset) Datensatzes (siehe Infobox).

Ziel der Modellierung war es, für die jeweiligen Einzugsgebiete die unterschiedlichen Abflusskomponenten und deren Dynamik abzubilden (Einzugsgebietscharakterisierung) und in weiterer Folge den Anteil der Blockgletscher am Abfluss stromabwärts zu quantifizieren. Die Ergebnisse der einzelnen Untersuchungsgebiete werden im Anschluss erläutert.

Infobox – Methodik

Die Grundwasserneubildung und Abflussdynamik von Blockgletscherquellen und der darunterliegenden Gerinne wurde mittels Niederschlags-Abfluss-Modellierung analysiert. Für die Modellierung der Abflussdynamik wurden das Niederschlags-Abfluss Modell GR4J (Perrin et al., 2003) und das Tag-Grad Schneemodell CemaNeige (Valéry et al., 2014b) gekoppelt.

Als Eingangsdaten für das verwendete Niederschlags-Abfluss-Modell dienten Rasterdaten (1 x 1 km) mit Tagesauflösung von Lufttemperatur, Niederschlag und potenzieller Evapotranspiration (ET) des SPARTACUS (Spatiotemporal Reanalysis Dataset for Climate in Austria; Hiebl und Frei, 2016, 2018) bzw. ARET (Austrian Reference Evapotranspiration Dataset; Haslinger und Bartsch, 2016) Datensatzes. Beide Datensätze wurden für den Zeitraum 1.1.1961 bis 31.12.2022 für die jeweiligen Einzugsgebieten auf Tagesbasis extrahiert und flächengewichtet gemittelt. Für die nach Höhenstufen differenzierte Schneemodellierung wurde auf hochauflösende Höhenmodelle der Untersuchungsgebiete zurückgegriffen (horizontale Auflösung 1 x 1 m), erstellt auf Basis von Airborne Laserscanning Daten der Landesregierungen Kärnten, Salzburg, Steiermark, Tirol und Vorarlberg. Für jedes Einzugsgebiet wurde die Verteilung der Seehöhe anhand des jeweiligen Höhenmodells ermittelt und fünf Höhenstufen mit jeweils 20 % Flächenanteil am Einzugsgebiet ausgewiesen.



Wie in der schematischen Darstellung des Niederschlags-Abfluss-Modells ersichtlich, wird zuerst der Niederschlag anhand der Lufttemperatur in Regen(tropfen) bzw. Schnee(flocken) aufgeteilt, wobei Schnee in einem Schneespeicher zwischengespeichert wird und erst aufgrund sich ändernder Lufttemperatur schmilzt. Regen und Schneeschmelzwasser reichern den

Bodenspeicher an. Je nach Lufttemperatur, potentieller Verdunstung und Füllstand des Bodenspeichers verdunstet Wasser (ET) daraus. Wenn der Bodenwasserspeicher voll ist, wird das Wasser direkt weitergeleitet und fließt gemeinsam mit dem Abfluss aus dem Bodenwasserspeicher zu 90% in den Grundwasserspeicher (langsame Komponente). Die restlichen 10% fließen direkt zur Quelle (schnelle Komponente). Das Modell wird anhand der gemessenen Schüttungsdynamik je Pegel kalibriert und so die einzelnen freien Parameter des Modells erarbeitet (Einzugsgebietscharakterisierung). Details dazu finden sich in Seelig et al. (2024).

Folgende Fragen sollen im Zuge der Untersuchungen beantwortet werden:

- „Wie beeinflusst das Retentionsverhalten der Blockgletscher das Abflussverhalten darunterliegender Flusssysteme?“
- „Wie wirken sich unterschiedliche meteorologische und hydrogeologische Gegebenheiten im österreichischen Alpenraum auf das Abflussverhalten aus?“

„Wie beeinflusst das Retentionsverhalten der Blockgletscher das Abflussverhalten darunterliegender Flusssysteme?“

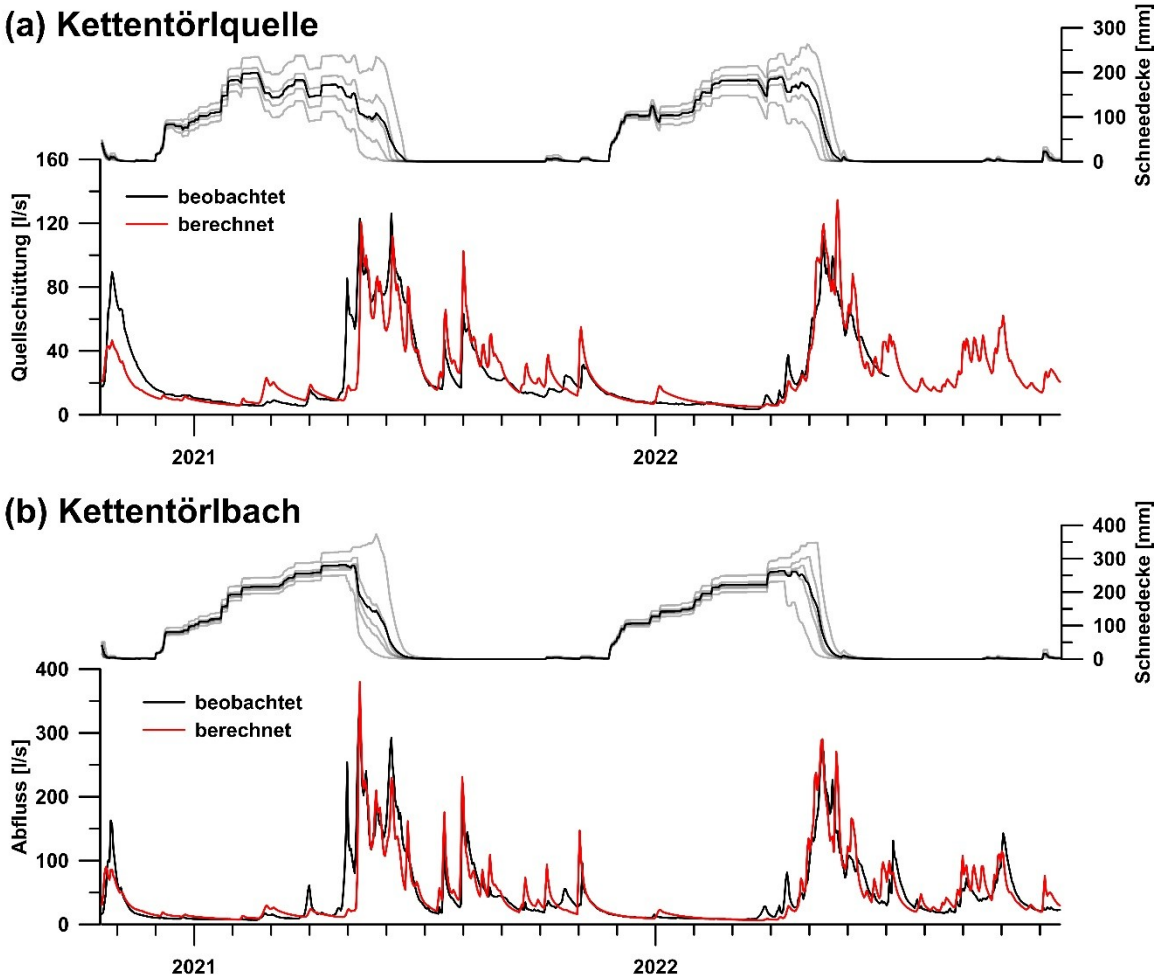
Die Beantwortung dieser Frage erfolgt beispielhaft an den Ergebnissen des Untersuchungsgebiets Ingering- und Gaalgraben in der Steiermark. Die Niederschlags-Abfluss-Modellierung wurde für die Einzugsgebiete der Messstellen Kettentörlquelle, Kettentörlbach und Hammerjäger (Abbildung 5) durchgeführt. Die Messstelle Kettentörlquelle erfasst das Abflussverhalten einer Blockgletscherquelle, die Messstellen Kettentörlbach erfasst das Abflussverhalten an einem alpinen Bach im Talschluss des Ingeringgrabens und an der Messstelle Hammerjäger am Ingeringbach (Lage in Abbildung 5 dargestellt) wurde der Einfluss der Blockgletscher als Grundwasserspeicher auf die Abflussdynamik dieses übergeordneten Einzugsgebietes untersucht.

Um die Abflussdynamik von Einzugsgebieten verstehen zu können, muss vorab beschrieben werden, ob und wie Wasser vorwiegend als Grundwasser in den Einzugsgebieten temporär gespeichert werden kann. Der höchstgelegene Bereich der Einzugsgebiete Kettentörlquelle und Kettentörlbach besteht aus steilen, felsigen Hängen, die nahezu keine Möglichkeit bieten, Wasser zu speichern. In tieferen Lagen dominieren alpine Wiesen, grobblockiger Hangschutt und Blockgletscher als typische Landschaftsform, die teilweise von Latschenkiefern bewachsen sind. Die Böden sind in diesen Bereichen der

Einzugsgebiete flächenmäßig nur wenig und sehr gering mächtig ausgeprägt. Das Festgestein, hauptsächlich Ortho- und Paragneise, weist eine sehr geringe hydraulische Durchlässigkeit auf. Daher sind Grundwasserspeicher mit entsprechenden Quellen fast ausschließlich an glaziale und periglaziale Lockergesteinsablagerungen wie Blockgletscher gebunden, die entsprechend mächtige Schuttablagerungen und Wasserspeicher darstellen. Das Einzugsgebiet der Kettentörlquelle entwässert fast zur Gänze über Blockgletscher, die das infiltrierende Wasser bis zu mehrere Monate speichern kann, bevor es abgegeben wird. Im Einzugsgebiet des Kettentörlbachs entwässert 54 % der Fläche über Blockgletscher, d.h. Wasser infiltriert in diese Grundwasserleiter und wird temporär gespeichert. Der Rest des Gebietes kann das Wasser kaum bis nicht speichern und ermöglicht somit einen raschen oberflächigen Abfluss. Zusätzlich ist in hochgelegenen alpinen Einzugsgebieten Schnee ein wichtiger saisonaler, temporärer Speicher von Wasser. Der höhenabhängige Schneedeckenaufbau und folglich auch der Abschmelzprozess wurden mit Hilfe eines Schneemodellansatz simuliert und in das Niederschlag-Abflussmodell integriert.

Das Modell bildet die Entwässerungsdynamik der jeweiligen Einzugsgebiete unter Berücksichtigung der verschiedenen temporären Speicher wie Schneedecke und Blockgletscher gut ab (Abbildung 19 und Abbildung 20). Es zeigt sich im Frühjahr beim Kettentörlbach ein deutlich ausgeprägterer Schüttungsanstieg und -abfall gegenüber der Kettentörlquelle, was den Anteil des oberflächig rasch abfließenden Anteils im Einzugsgebiet Kettentörlbach widerspiegelt (Abbildung 19). Im Vergleich dazu infiltriert das Wasser (Niederschlags- und Schneeschmelzwasser) im Einzugsgebiet der Kettentörlquelle über die grobblockige Oberfläche des Blockgletschers in den Untergrund und wird im Blockgletscher gespeichert und verzögert wieder abgegeben. Entsprechend stark ist auch die Schüttung an der Kettentörlquelle von Anfang Mai bis Mitte Juni im Vergleich zu den Maximalschüttungsmengen in diesem Zeitraum (ca. 60 l/s zu 120 l/s; 1:2), wohingegen beim Kettentörlbach die Schüttung immer wieder relativ stark abnimmt und daher zwischen ca. 90 l/s und 350 l/s (1:3,8) schwankt.

Abbildung 19: Ergebnisse der Niederschlags-Abfluss-Modellierung am Pegel Kettentörlquelle (a) und am Pegel Kettentörlbach (b)



Da Blockgletscher neben dem Basisabfluss auch eine sehr rasche Abflusskomponente aufweisen, ist die Reaktionszeit auf Niederschlagsereignisse bei beiden Pegeln sehr ähnlich. Die Speicherwirkung zeigt sich erst in der anschließenden, länger anhaltenden höheren Schüttung bei der Kettentörlquelle.

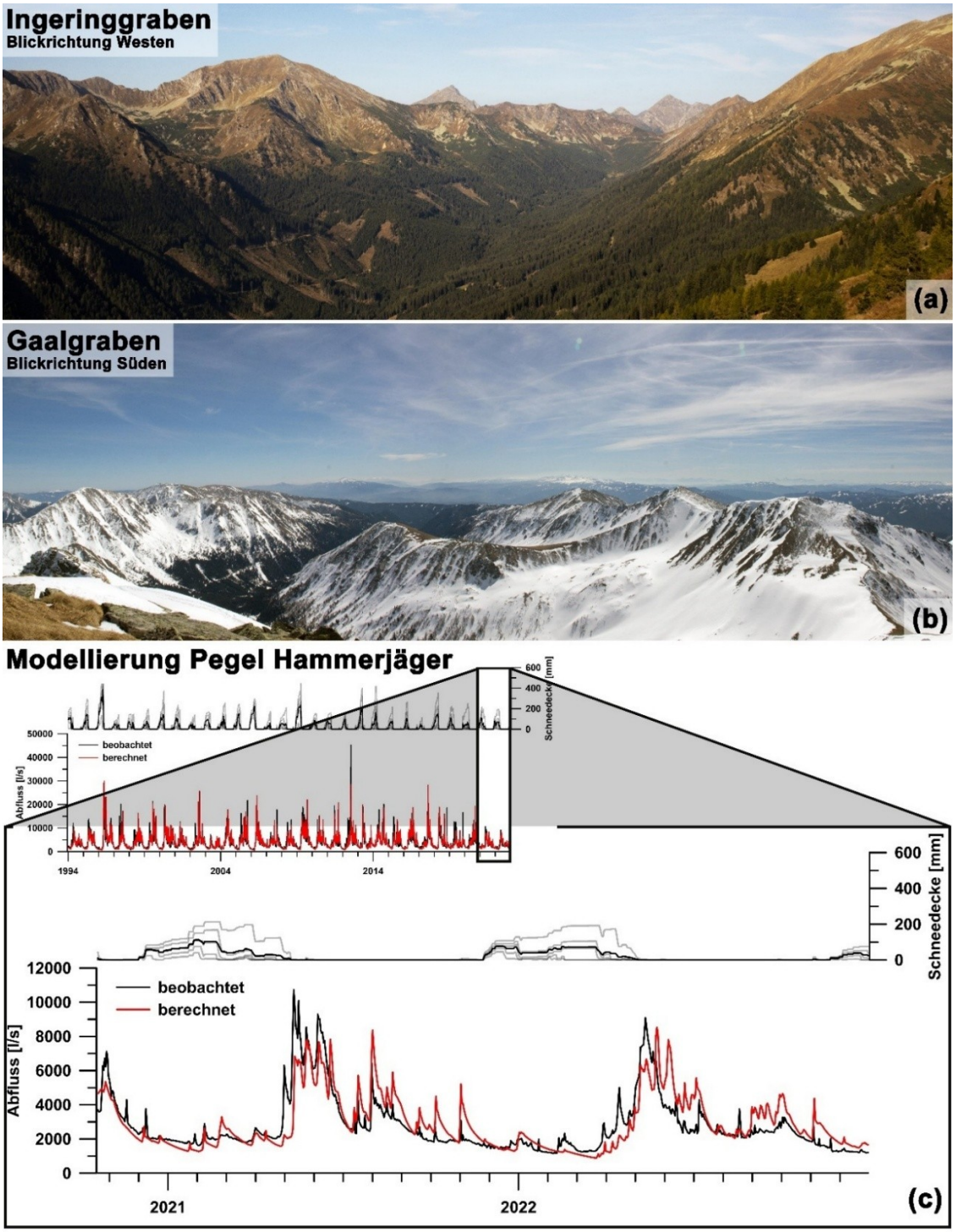
Im übergeordneten Einzugsgebiet Hammerjäger stellt sich die Situation aufgrund unterschiedlicher Gegebenheiten und weiterer Lockergesteinsakkumulationen als Wasserspeicher anders dar: Hier gibt es große Waldflächen sowie bedeutende Anteile an Weide- und Ackerland, welche eine bis zu mehrere Meter mächtige Verwitterungszone mit darauf liegendem Boden aufweisen. Diese Lockermaterialzone kann deutlich mehr Wasser aufnehmen und zeitlich verzögert abgeben als jene Bereiche im Einzugsgebiet Kettentörlbach (z.B. dünne Grasmatten). Des Weiteren gibt es entlang der Haupttäler Ingering- und Gaalgraben, insbesondere im Süden des Gebiets im Seckauer Becken,

ausgedehnte Sedimentablagerungen mit mächtigen (Tal-) Grundwasserleiter. Nachdem das Einzugsgebiet des Pegels Hammerjäger sich zwischen ca. 750 m und 2400 m ü.A. erstreckt, erfolgt das Abschmelzen der Schneedecke in den unterschiedlichen Höhenstufen zu unterschiedlichen Zeitperioden (Februar – Mai).

Der Einfluss der Blockgletscher und ihre Speicherfähigkeit auf die Abflussdynamik übergeordneter Gewässer wird auf Basis der Modelle für Kettentörlbach und Hammerjäger in Abbildung 21 bzw. Abbildung 22 dargestellt. Dabei zeigen sich im Jahresverlauf deutliche Unterschiede im Abflussverhalten.

- Am Pegel Kettentörlbach (Einzugsgebietsfläche 1,48 km²) wird ein Großteil des Wassers in den Blockgletschern des Einzugsgebiets gespeichert und speist während des Winters den Basisabfluss (Abbildung 21). Während dieser Jahreszeit nimmt der Anteil des Wassers aus den Blockgletschern stetig zu, da kaum neues Wasser in den Untergrund nachsickert. Im Februar, kurz vor Beginn der Schneeschmelze, stammt mehr als 90 % des Wassers am Pegel Kettentörlbach aus diesen Reserven. Mit der Schneeschmelze im Frühjahr sinkt dieser Anteil jedoch abrupt, weil viel Schmelzwasser als direkter Oberflächenabfluss oder schnelle Komponente der seichten Grundwasserkörper in den Bach gelangt. Auch der Wechsel von Schneefall zu Regen als Niederschlag verstärkt diesen Effekt in dieser Jahreszeit. Nach dem Ende der Schneeschmelze im Frühsommer bleibt der Anteil des Wassers aus den Blockgletschern bis in den Spätherbst relativ konstant, bis mit den ersten Schneefällen der Anteil des Abflusses aus diesen Reserven zum Oberflächenabfluss wieder steigt (Abbildung 21).
- Der Einfluss der Blockgletscher am Pegel Hammerjäger (Einzugsgebietsfläche 198,93 km²) zeigt ein völlig anderes Muster (Abbildung 22). Hier machen die Blockgletscher nur etwa 14 % der gesamten Einzugsgebietsfläche aus. Die wichtigsten Wasserspeicher sind die Lockergesteins-Ablagerungen in den Tälern und Becken des Ingering- und Gaalgrabens sowie des Seckauer Beckens. Daher ist der Einfluss der Blockgletscher im Winter eher gering (Abbildung 22). Er steigt aber im späten Frühjahr deutlich an, wenn große Mengen Schmelzwasser aus der hochgelegenen Schneedecke freigesetzt werden, während in tieferen Lagen der Schnee bereits abgeschmolzen ist. Das Schneeschmelzwasser füllt die Speicher der Blockgletscher auf und hält ihren Einfluss auf den Abfluss bis in den Spätherbst hinein relativ hoch (über 25%, Abbildung 22). Dieses saisonale Muster ist typisch für alpine Einzugsgebiete mit starken Höhenunterschieden und einer entsprechend unterschiedlichen Schneeschmelzdynamik.

Abbildung 20: Eindrücke und Ganglinien des Einzugsgebiets Hammerjäger. (a) Der Ingeringgraben ist entlang der NW-SE ausgerichteten Talachse strukturiert; (b) Der Gaalgraben weist eine N-S ausgerichtete Talachse auf, entlang derer die Blockgletschereinzugsgebiete angeordnet sind. (c) Ergebnisse der Niederschlags-Abfluss Modellierung am Pegel Hammerjäger mit herausgezoomten Zeitbereich ident der in Abbildung 19 gezeigten Pegel Kettentörlbach und -quelle



Fotos: Simon Seelig

Abbildung 21: Blockgletschereinfluss am Pegel Kettentörlbach (54 % Flächenanteil). (a) Saisonale Schwankung des Blockgletschereinflusses im zwanzigjährigen Mittel. Zusätzlich ist die Verteilung des Niederschlags sowie der Schneedecke im Einzugsgebiet dargestellt. (b) Räumliche Verteilung der analysierten Teil-Einzugsgebiete. Die blau dargestellten Bereiche entsprechen den Blockgletscher-Einzugsgebieten

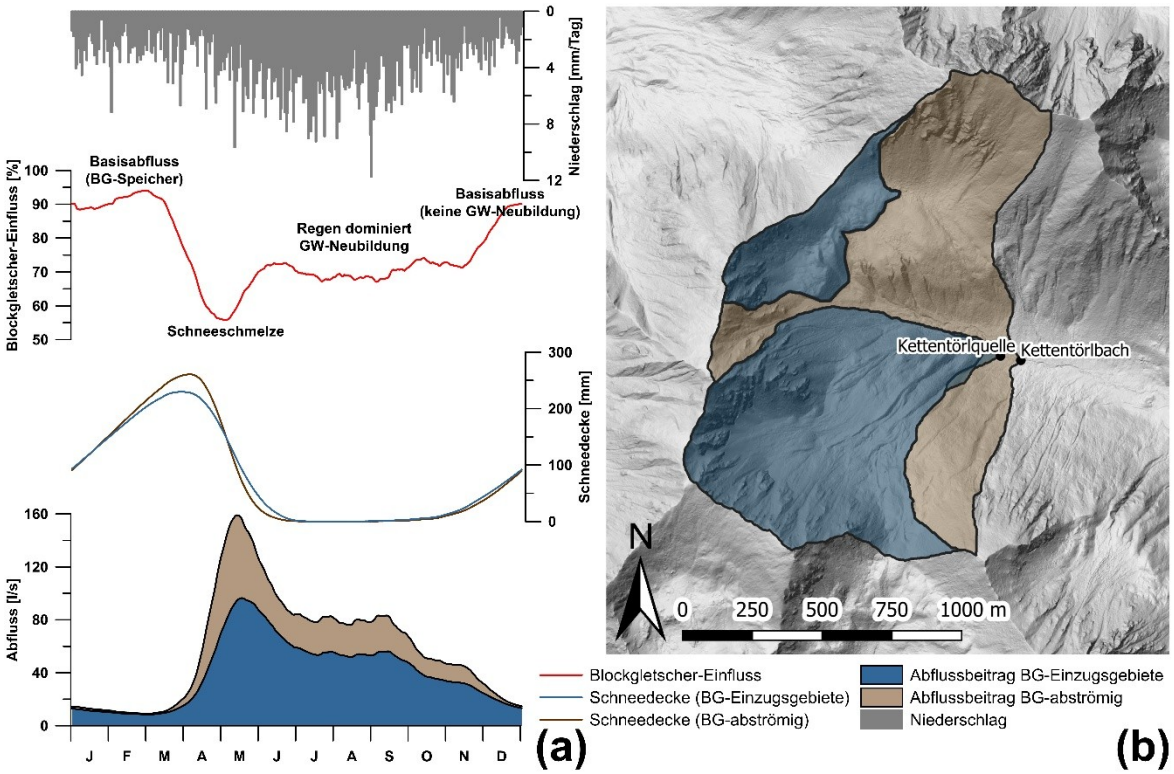
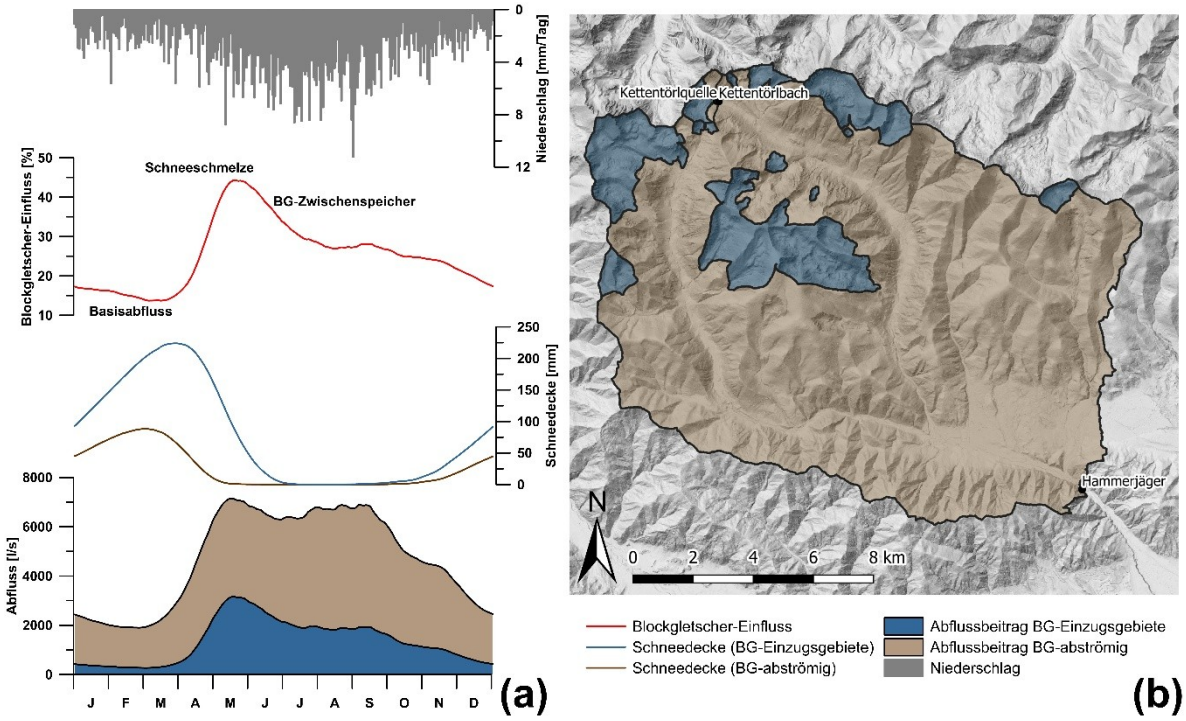


Abbildung 22: Blockgletschereinfluss am Pegel Hammerjäger (14 % Flächenanteil). (a) Saisonale Schwankung des Blockgletschereinflusses im zwanzigjährigen Mittel. Zusätzlich ist die Verteilung des Niederschlags, der Schneedecke sowie des Abflusses im Einzugsgebiet dargestellt. (b) Räumliche Verteilung der analysierten Teil-Einzugsgebiete. Die blau dargestellten Bereiche entsprechen den Blockgletscher-Einzugsgebieten



Diese beiden saisonalen Muster treten in allen fünf Untersuchungsgebieten des Projekts in unterschiedlicher Ausprägung auf. Sie werden als **„grundwasser-dominiert“** (Abbildung 21, Beispiel Kettentörlbach) und **„schmelzwasser-dominiert“** (Abbildung 22, Beispiel Hammerjäger) bezeichnet. Ein **grundwasser-dominierter Einfluss** bedeutet, dass ein Großteil des gespeicherten Wassers an die Blockgletscher gebunden ist und diese den Basisabfluss bestimmen. Ein **schmelzwasser-dominierter Einfluss** liegt vor, wenn neben den Blockgletschern auch andere Ablagerungen wie Schuttfächer, Moränen oder lockere Sedimente in Tälern und Becken größere Wassermengen speichern. Der größte Schüttungsanteil von den Blockgletschereinzugsgebieten zeigt sich zur Zeit der Schneeschmelze (Mai – Juni).

Allgemein ist in diesen alpinen Regionen hervorzuheben, dass ein Großteil der Grundwasserneubildung und damit das Füllen der Grundwasserspeicher durch die Schneeschmelze und das Einsickern der Schmelzwässer in den Untergrund erfolgt. Die Höhenverteilung der Einzugsgebiete und die Einteilung in fünf Höhenstufen für die

Schneeberechnungen ist für Kettentörlbach und Hammerjäger in Abbildung 23 dargestellt. Für jede der fünf Höhenstufen ist die Saisonalität der effektiven Schneetemperatur sowie der Schneedeckenhöhe (ausgedrückt als Wasseräquivalent) berechnet worden. In den höher gelegenen Einzugsgebieten Kettentörlquelle und Kettentörlbach zeigt die saisonale Entwicklung den allmählichen Schneedeckenaufbau von Ende Oktober bis Mitte April sowie das folgende Abschmelzen der Schneedecke im Mai und Juni (Abbildung 23a), in Übereinstimmung mit Feldbeobachtungen während des Projektzeitraums (Abbildung 24).

Das Abschmelzen der winterlichen Schneedecke erfolgt je nach Höhenlage und Exposition zeitlich gestaffelt (Abbildung 23). Dies tritt im Einzugsgebiet Hammerjäger (1668 m Höhendifferenz) erwartungsgemäß am deutlichsten hervor – während in den tieferen Bereichen die Schneedecke ihren Höhepunkt bereits im Februar erreicht, setzt in den hochgelegenen Anteilen der Abschmelzprozess erst im April ein (Abbildung 23).

Abbildung 23: Höhenzonen für die Schneedeckenbemessung und Schneedeckendynamik für die Einzugsgebiete Kettentörlbach a) und b) und Hammerjäger c) und d)

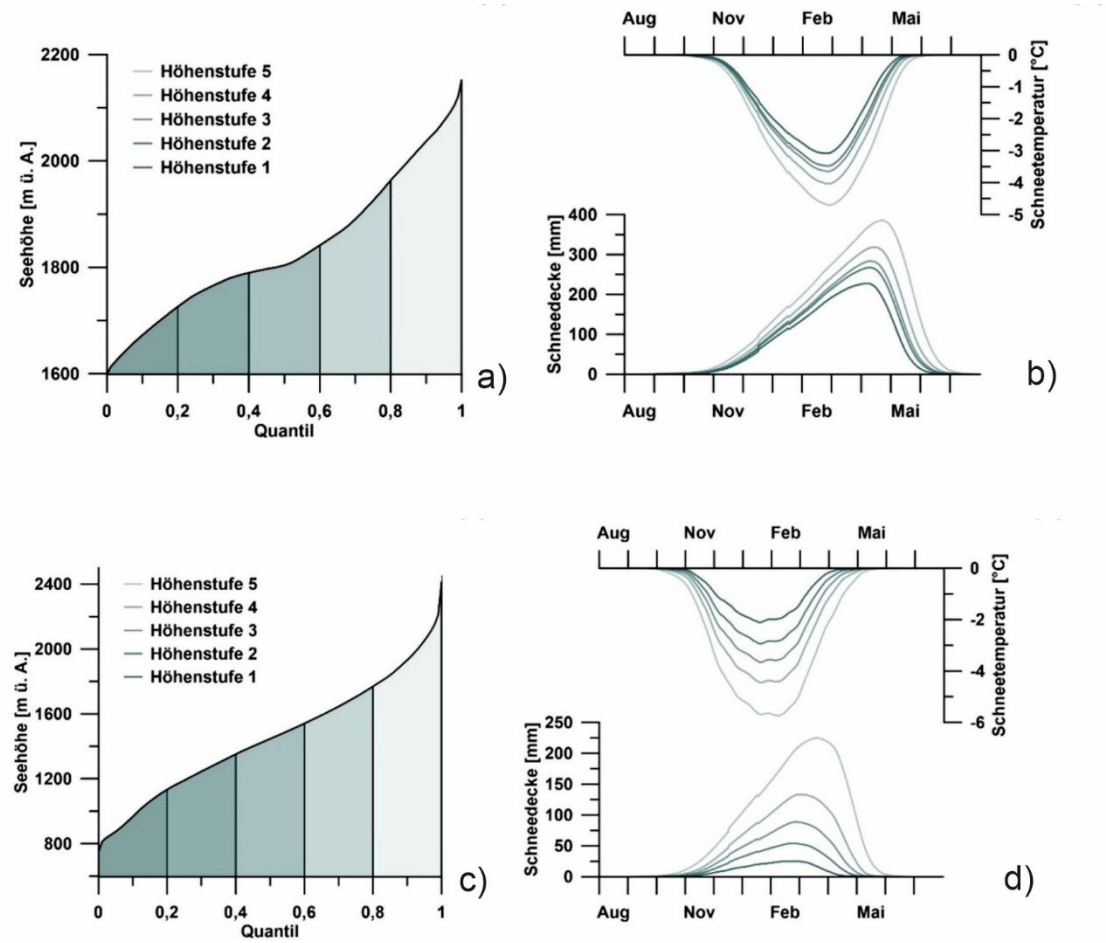
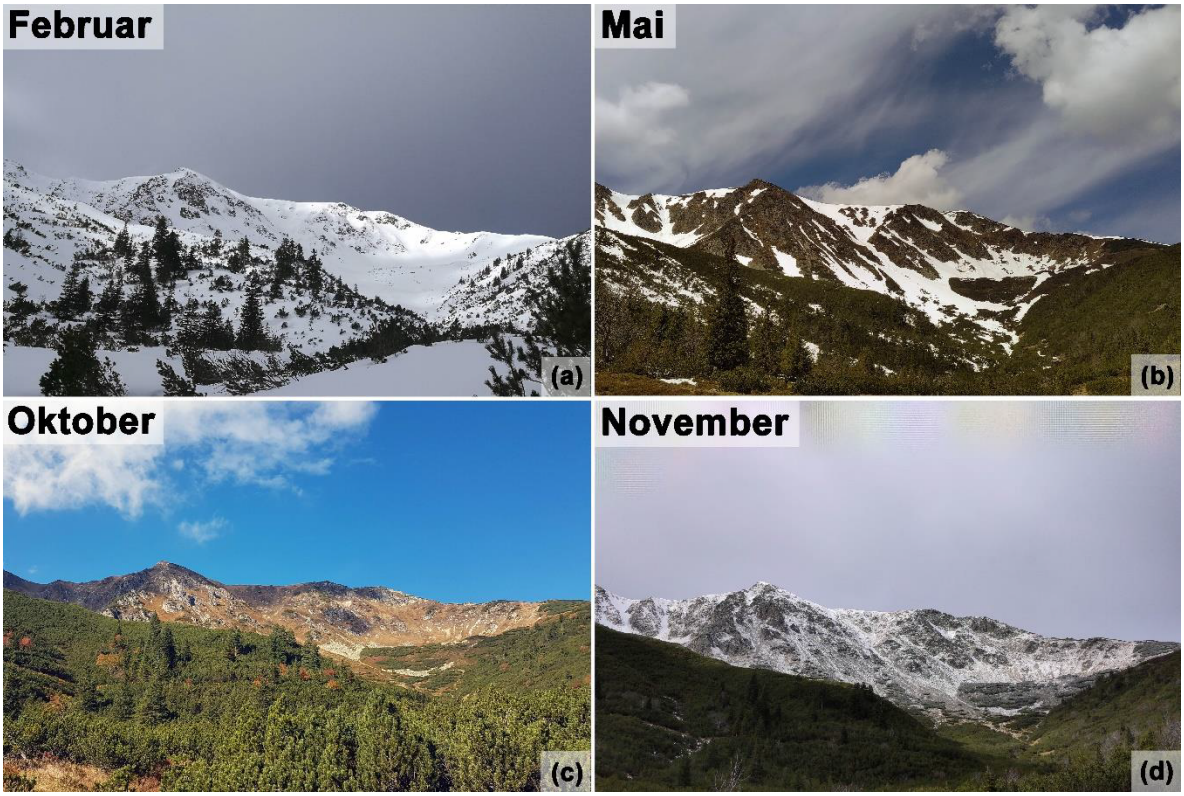


Abbildung 24: Einzugsgebiete der Kettentörlquelle (linke Bildhälften) und des Kettentörlbaches (rechte Bildhälften). Der durch die Kettentörlquelle entwässerte Blockgletscher erscheint als konvexe Geländeform vorne links im Bild. (a) Im Hochwinter sind große Teile des Einzugsgebiets schneebedeckt. (b) Im Frühjahr sind die sonnenexponierten sowie die tiefer gelegenen Teile bereits schneefrei, während die Mulden und Rinnen noch von Altschnee bedeckt werden. (c) Im Sommer und Herbst sind beide Einzugsgebiete schneefrei. Die Geländeoberfläche ist von steilen Schrofen, Hangschuttfächern, alpinen Matten und Krummholz geprägt. (d) Im Frühwinter bedecken bereits mäßig ergiebige Schneefälle Teile des Einzugsgebietes mit einer dünnen, lockeren Schneedecke



Fotos: (a) Gerfried Winkler, (b) (c) (d) Simon Seelig

„Wie wirken sich unterschiedliche meteorologische und hydrogeologische Gegebenheiten im österreichischen Alpenraum auf das Abflussverhalten aus?“

Wie in den vorherigen Kapiteln beschrieben wird die Abflussdynamik des alpinen Gewässernetzes maßgeblich durch Grundwasser, welches vorrangig an Quellen zu Tage tritt, geprägt. Dies gilt für die unterschiedlichen Gebirgsgruppen, die sowohl geologisch unterschiedlich aufgebaut sind als auch anderen meteorologischen Bedingungen ausgesetzt sind. Lokal ist der Einfluss von Grundwasser auf das Abflussregime in alpinen

Regionen jedoch unterschiedlich stark, was im Wesentlichen am geologischen Aufbau der Einzugsgebiete und der darin befindlichen Grundwasserleiter/-speicher liegt. Diese bestimmen, wie viel Wasser in den Untergrund infiltrieren kann oder oberflächig abfließt und somit auch die Reaktion von Fließgewässer auf Niederschlags- und Schneeschmelzereignisse. Die Wasserzirkulation im Untergrund hängt wiederum vorrangig von den hydrogeologischen Eigenschaften der Grundwasserleiter ab, weshalb deren Charakterisierung eine große Bedeutung zukommt.

Blockgletscher haben eine hohe Speicherkapazität, weshalb Grundwasser in der Größenordnung von mehreren Monaten gespeichert werden kann. Sie beeinflussen somit die Entwässerungsdynamik alpiner und hochalpiner Einzugsgebiete maßgeblich. Die Intensität dieses Einflusses variiert regional und hängt insbesondere von der Anzahl, ihrem Flächenanteil im Einzugsgebiet und der Verteilung der Blockgletscher sowie ihrem Zusammenspiel mit anderen Grundwasserleitern im Einzugsgebiet ab (Abbildung 25). Die im Rahmen dieser Untersuchung analysierten Einzugsgebiete enthalten neben Blockgletschern auch andere Porengrundwasserleiter, deren Zusammenwirken die Abflussdynamik des Gewässernetzes beeinflusst: In hochalpinen Lagen dominieren Moränenablagerungen und Schuttfächer, während in Talbereichen mächtige sedimentäre Tal- und Beckenfüllungen auftreten. Zusätzlich sind lokal Karstgrundwasserleiter vorhanden, insbesondere in den Karbonatgesteinen des Radstadt-Deckensystems (Untersuchungsgebiet Lantschfeld und Taurachtal in Salzburg) sowie der Sulzfluh-Decke (Untersuchungsgebiet Vergalda- und Valzifental in Vorarlberg).

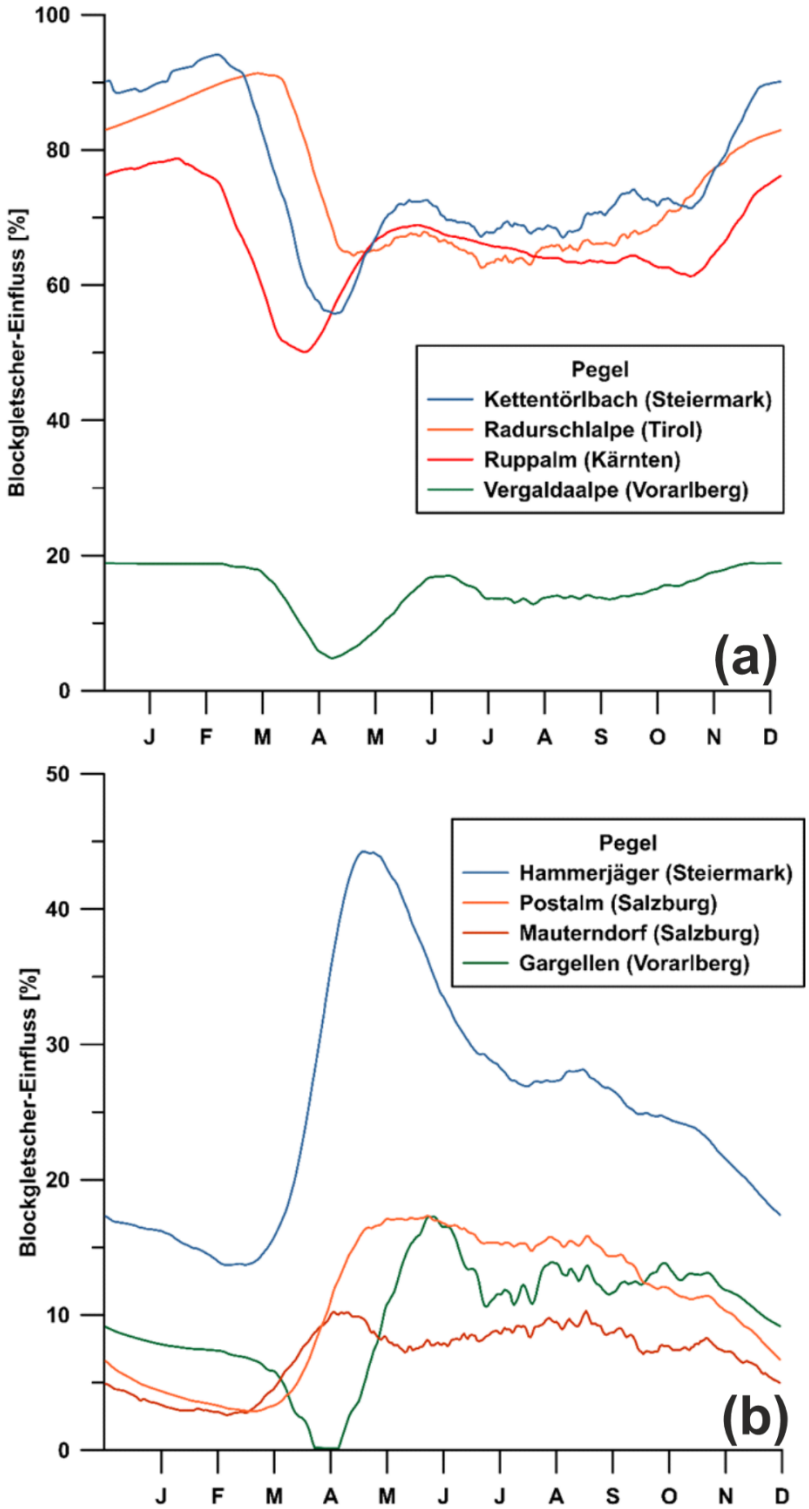
Die quantitative Analyse des Blockgletscher-Einflusses auf die untersuchten Gewässer spiegelt die geologischen Rahmenbedingungen in den Einzugsgebieten wider (Abbildung 25):

Im hochgelegenen, kristallinen Radurschltal (Tirol) sind Blockgletscher die bedeutendsten Grundwasserspeicher und dominieren den Basisabfluss des Radurschlbaches (Pegel Radurschlalpe) während der Trocken- und Winterperioden. Eine ähnliche Situation zeigt sich in den hochgelegenen Bereichen der überwiegend kristallinen Seckauer Tauern (Untersuchungsgebiet Kettentörlbach in der Steiermark) sowie in der kristallinen Reißeckgruppe (Untersuchungsgebiet Ruppalm in Kärnten). Der Einfluss der Blockgletscher auf die Entwässerungsdynamik der übergeordneten Einzugsgebiete ist hauptsächlich von ihrem Flächenanteil innerhalb des Einzugsgebiets abhängig. Dies wird beispielsweise am Pegel Vergaldaalpe in der Silvretta (Untersuchungsgebiet Vergalda- und Valzifenztal in Vorarlberg) deutlich: Hier speichern Blockgletscher Grundwasser wie in den anderen

Gebieten über mehrere Monate und beeinflussen den Basisabfluss des Vergaldabaches. Im konkreten Fall zeigt sich aber ein geringerer Einfluss aufgrund des begrenzten Flächenanteils (Abbildung 25a). Der hohe Anteil des Blockgletscherabflusses während der Wintermonate weist jedoch auf ihre zentrale Funktion als Grundwasserspeicher hin, wodurch sie als **"grundwasser-dominierter"** Typ klassifiziert werden (Abbildung 25a).

In Einzugsgebieten mit Karstgrundwasserleitern oder mächtigen sedimentären Talfüllungen ist der von Blockgletschern bereitgestellte Speicheranteil hingegen begrenzt (Abbildung 25b). Dies ist anhand der Pegel Postalm am Lantschfeldbach und Mauterndorf an der Lungauer Taurach ersichtlich: Trotz des Vorkommens von Blockgletschern dominieren in diesen Gebieten die Karstgrundwasserleiter das Abflussregime. Entlang des Lungauer Taurachtals kommen zudem die Porengrundwasserleiter der sedimentären Talfüllung hinzu. Ein ähnliches Muster zeigt sich am Pegel Gargellen, wo die verkarsteten Karbonatgesteine des westlichen Einzugsgebiets (Rätikon) den Einfluss der Blockgletscher auf den Abfluss des Suggadinbaches verringern. Ebenso dominieren die mächtigen Tal- und Beckenfüllungen in den tiefen Lagen des Ingeringbaches am Pegel Hammerjäger den Basisabfluss. In diesen Regionen spielen Blockgletscher vorrangig saisonal im späten Frühjahr und Frühsommer eine Rolle, nachdem die Schneeschmelze in den hochgelegenen Blockgletscher-Einzugsgebieten in vollem Gange war und die Grundwasserstände und Schüttungen der Blockgletscher ihr Maximum erreichen. Die hohen Schüttungen tragen dann überproportional zum Abfluss bei. Dieses saisonale Muster wird als **"schmelzwasser-dominierter"** Typ bezeichnet und weist Blockgletschern eine untergeordnete, wenngleich saisonal bedeutsame Rolle zu.

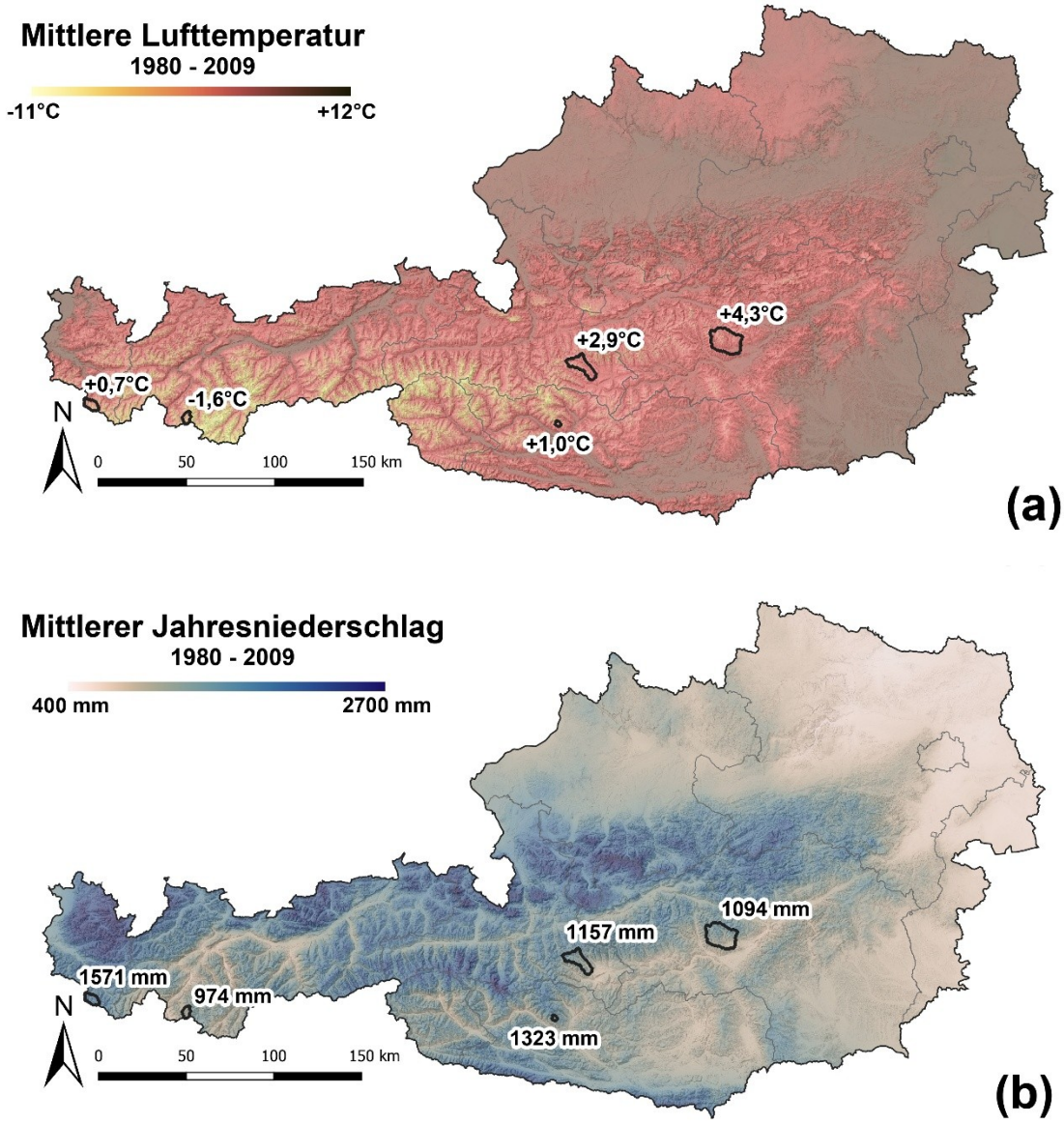
Abbildung 25: (a) Jahresgang des Blockgletscher-Einflusses, ausgedrückt in Prozent der Abflussmenge am jeweiligen Pegel, an den grundwasser-dominierten Flüssen des Projekts. (b) Jahresgang des Blockgletscher-Einflusses an den schmelzwasser-dominierten Flüssen des Projekts



Insgesamt sind Blockgletscher aus wasserwirtschaftlicher Sicht vor allem in kristallinen Gebirgsregionen von Bedeutung. Dort steigt ihr Einfluss auf das alpine Abflussregime mit zunehmender Seehöhe, da bedeutende Quellen oft an Blockgletscher gekoppelt sind. Bei Gewässern höherer Ordnung (übergeordnete Flusssysteme) kann ihr Einfluss jedoch durch ausgedehnte Karstgrundwasserleiter oder mächtige sedimentäre Tal- und Beckenfüllungen stark reduziert sein. Während sie in kristallinen Regionen den Basisabfluss ganzer Täler dominieren können (z. B. Radurschltal), sind sie in verkarstungsfähigen Gesteinen eine wesentliche, aber nicht allein entscheidende Speicherkomponente (z. B. Lantschfeld und Lungauer Taurachtal).

Die Untersuchungsgebiete in den fünf Bundesländern weisen nicht nur hydrogeologisch unterschiedliche Rahmenbedingungen auf, auch die meteorologischen Verhältnisse sind entsprechend unterschiedlich. Abbildung 26 veranschaulicht die unterschiedlichen meteorologischen Verhältnisse in den fünf Untersuchungsgebiete anhand der langjährigen Temperatur und Niederschlagswerte. Diese unterschiedlichen Verhältnisse sind in gewisser Weise auch in der Zukunft zu erwarten.

Abbildung 26: Lage und klimatische Bedingungen in den fünf Untersuchungsgebieten Vergalda- und Valzifenztal (Vorarlberg), Radurschltal (Tirol), Hintereggengraben (Kärnten), Lantschfeld und Taurachtal (Salzburg) sowie Ingering- und Gaalgraben (Steiermark). (a) Langjährige mittlerer Lufttemperatur im historischen Referenzzeitraum (1980–2009) gemäß SPARTACUS Datensatz (Hiebl und Frei, 2016) und mittlere Lufttemperatur im jeweiligen Untersuchungsgebiet. (b) Langjähriger mittlerer Jahresniederschlag im historischen Referenzzeitraum (1980–2009) gemäß SPARTACUS Datensatz (Hiebl und Frei, 2018) und mittlerer Jahresniederschlag im jeweiligen Untersuchungsgebiet



Datengrundlage: Open Data Österreich (www.data.gv.at)

6.2.2 Isotope – Validierung

Ergänzend zur Niederschlags-Abfluss-Modellierung werden die Grundwasserneubildungskomponenten der Blockgletscherquellen und die Abflusskomponenten der übergeordneten Flusssysteme durch die Analyse stabiler Isotopendaten bestimmt. Im Anschluss erfolgt ein Vergleich zwischen den Ergebnissen der Modellierung und der Isotopenanalyse. Die isotopenhydrologische Auswertung erfordert zum einen eine zeitlich möglichst hochaufgelöste Probennahme der Gewässer und zum anderen die Erfassung der Isotopensignaturen der maßgeblichen Komponenten der Grundwasserneubildung, nämlich Regen und Schnee. Ein besonderer Fokus liegt auf der Bestimmung der Anteile von Regen- und Schmelzwasser an der Grundwasserneubildung. Zudem wird untersucht, wie viel des Abflusses aus jungem Wasser besteht, das nur eine kurze Verweilzeit von weniger als zwei bis drei Monaten im Einzugsgebiet aufweist.

Infobox – Isotopenanalytik

Die Isotopensignatur des Niederschlags (δ2H und δ18O) ist durch signifikante jahreszeitliche und regionale Schwankungen gekennzeichnet. Um diese Signatur zu erfassen, wurden im Sommer 2021 in allen fünf Untersuchungsgebieten Regenwassersammler installiert. Zur Einordnung der gemessenen Isotopensignaturen wurden die Proben mit nahe gelegenen Stationen des Österreichischen Isotopenmessnetzes (Austrian Network of Isotopes in Precipitation, ANIP) verglichen. Zusätzlich wurden zwei Schneeprobenahmekampagnen durchgeführt. Die erste Kampagne fand im Winter 2020/21 statt und umfasste eine einmalige Beprobung der Schneedecke in allen fünf Untersuchungsgebieten. Pro Untersuchungsgebiet wurden jeweils ein bis zwei Schneeprofile aufgenommen (Klassifikation nach Fierz et al., 2009). Im Rahmen einer zweiten Beprobungskampagne wurde im Winter 2021/22 die Schneedecke in den beiden steirischen Untersuchungsgebieten Ingeringgraben und Schöneben mehrfach beprobt.

Basierend auf den beiden Endgliedern Regenwasser und Schneeschmelzwasser wurde ein **Zwei-Komponenten-Mischungsmodell** für Quellen und Bachläufe erstellt. Dieses geht davon aus, dass sich der Abfluss Q [l/s] aus zwei Abflusskomponenten Q1 [l/s] und Q2 [l/s] zusammensetzt (Genereux, 1998):

$$Q=Q1+Q2$$

Die im Abfluss gemessene Isotopensignatur CQ [‰] ergibt sich aus dem Mischungsverhältnis dieser Komponenten (Anteile f1 [-] bzw. f2 [-]) und der Signatur ihrer Endglieder (C1 [‰] bzw. C2 [‰]):

$$CQ=f1\ C1+f2\ C2$$

In kristallinen Gebieten unterliegt die Mineralisierung des Grundwassers in der Regel nur relativ geringen Schwankungen, so dass die elektrische Leitfähigkeit einen nahezu konservativen Tracer darstellt. Daher kann der Beitrag der Grundwasserkomponente durch die zusätzliche Auswertung der **elektrischen Leitfähigkeit** von ganzjährig entnommenen Wasserproben näherungsweise bestimmt werden (Winkler et al., 2016, 2021). Auf Basis eines **Drei-Komponenten-Mischungsmodells** werden mittels zweier Tracer die Beiträge der drei Endglieder errechnet. Abflusskomponenten und Signaturen der Tracer A und B ergeben sich gemäß

$$Q=Q1+Q2+Q3$$

$$AQ=f1\ A1+f2\ A2+f3\ A3$$

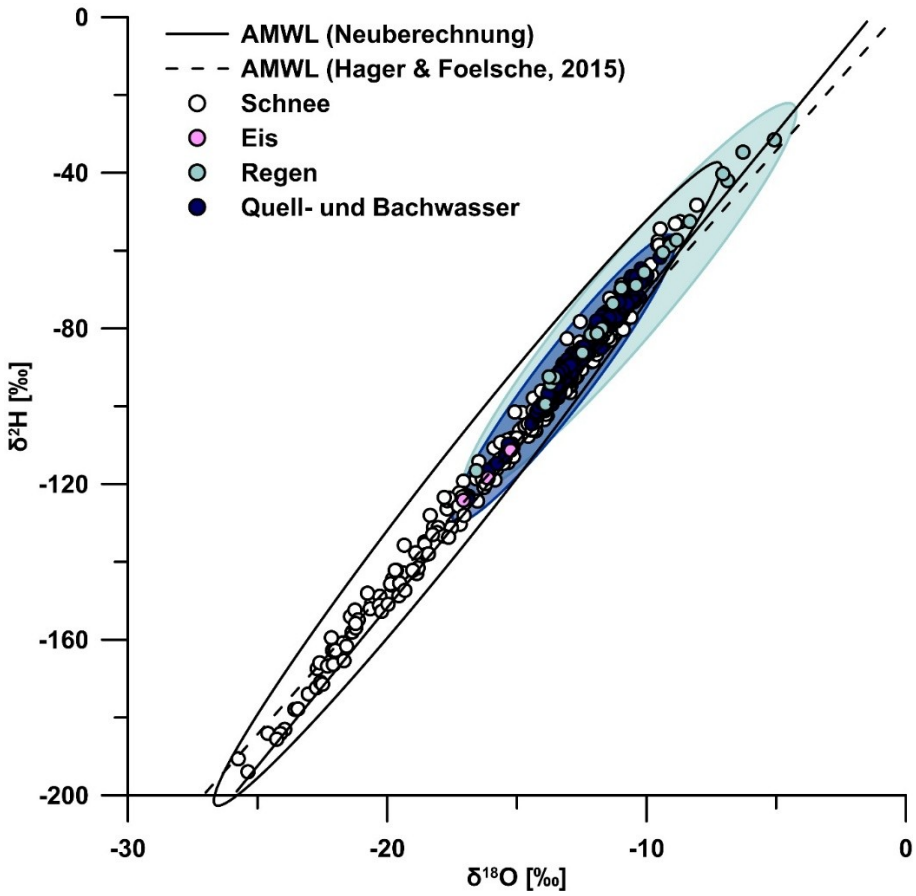
$$BQ=f1\ B1+f2\ B2+f3\ B3$$

Die Isotopenwerte im Niederschlag schwanken im Jahresverlauf: Sommerregen enthält mehr schwere Isotope, Winterregen weniger schwere. In alpinen Einzugsgebieten wird Niederschlag in der Schneedecke, im Boden sowie im Grundwasser zwischengespeichert und zeitverzögert freigesetzt. Dadurch zeigen Bäche und Quellen eine gegenüber dem Niederschlag abgeschwächte und verzögerte Isotopensignatur. Anhand dieser Verzögerung kann die Verweilzeit des Wassers im Einzugsgebiet abgeschätzt werden. Dabei zeigt sich, dass eine unkritische Evaluierung zu erheblichen Fehlern führt, die eine Abweichung von bis zu mehreren hundert Prozent ausmachen können. (Seeger und Weiler, 2014; Kirchner, 2016a, 2016b). Als robuste Kennzahl wurde von Kirchner (2016a, 2016b) stattdessen die junge Abflusskomponente eingeführt. Sie beschreibt den Anteil von Wasser, das nicht älter als 2–3 Monate ist, und wird aus der jahreszeitlichen Isotopenvariation berechnet.

Wodurch zeichnet sich die grundsätzliche Isotopensignatur der Regen-, Schnee-, Quell- und Bachwässer in den untersuchten Gebieten aus?

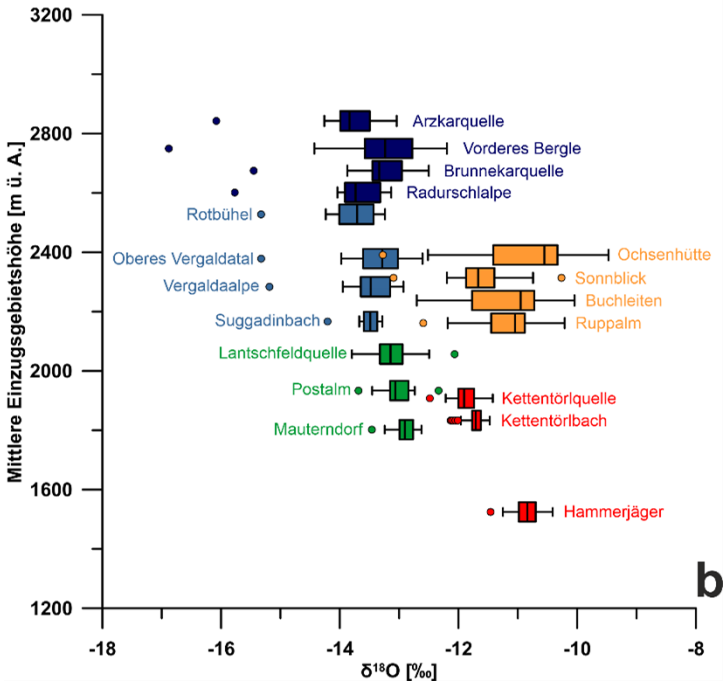
Abbildung 27 zeigt die im Rahmen des Projekts gesammelten Daten in einem Diagramm, das die Werte von δ2H und δ18O gegenüberstellt. Die Isotopensignaturen von Schnee- und Eisproben weisen tendenziell weniger schwere Isotope auf, während Regenwasserproben in der Regel mehr schwere Isotope aufweisen. Die Wasserproben aus Bächen und Quellen liegen zwischen diesen beiden Extremen, da sie Mischungen aus Regen- und Schmelzwasser darstellen. Insgesamt folgen die Proben der Steigung der meteorischen Wasserlinie, was darauf hinweist, dass die Isotopenfraktionierungen hauptsächlich unter Gleichgewichtsbedingungen stattgefunden haben. Sublimations- und Verdunstungsprozesse spielten dagegen nur eine untergeordnete Rolle, sodass die Isotopensignaturen der Quellen und Bäche kaum beeinflusst wurden. Dies stimmt gut mit der Lage der Einzugsgebiete in hochalpinen Regionen überein, die durch niedrige Temperaturen und mäßige Verdunstungsraten geprägt sind.

Abbildung 27: Zusammenfassende Darstellung der analysierten Wasserproben und ihrer Beziehung zur Austrian Meteoric Water Line (AMWL) nach Hager und Foelsche (2015) bzw. ihrer Neuberechnung anhand aktualisierter Daten



Die Isotopenwerte der Quell- und Bachproben spiegeln die Höhenlagen der jeweiligen Einzugsgebiete wider (Abbildung 28). Trotz regionaler Unterschiede ist ein übergeordneter Trend zu stärker abgereicherten (negativeren) Isotopenwerten mit zunehmender Seehöhe in den Untersuchungsgebieten in Vorarlberg, Tirol, Salzburg und der Steiermark gut erkennbar. Eine Ausnahme bildet das Untersuchungsgebiet Hintereggengraben in Kärnten, dessen Proben deutliche Abweichungen aufweisen (orange markiert in Abbildung 28). Dies könnte auf einen stärkeren mediterranen Einfluss in dieser Region zurückzuführen sein, das heißt, dass die Wetterlage und damit die Niederschläge primär aus dem Süden (Adria) und nicht wie in den anderen Testgebieten vom Westen bis Nordwesten (Atlantik) kommen.

Abbildung 28: Höhenabhängigkeit der δ18O-Signatur nach Untersuchungsgebiet und Teileinzugsgebieten. Trotz der saisonalen Schwankungsbreite und lokalen Unterschieden ist ein übergeordneter Trend in den Untersuchungsgebieten Tirol, Vorarlberg, Salzburg und Steiermark erkennbar, das Untersuchungsgebiet Kärnten folgt diesem nicht



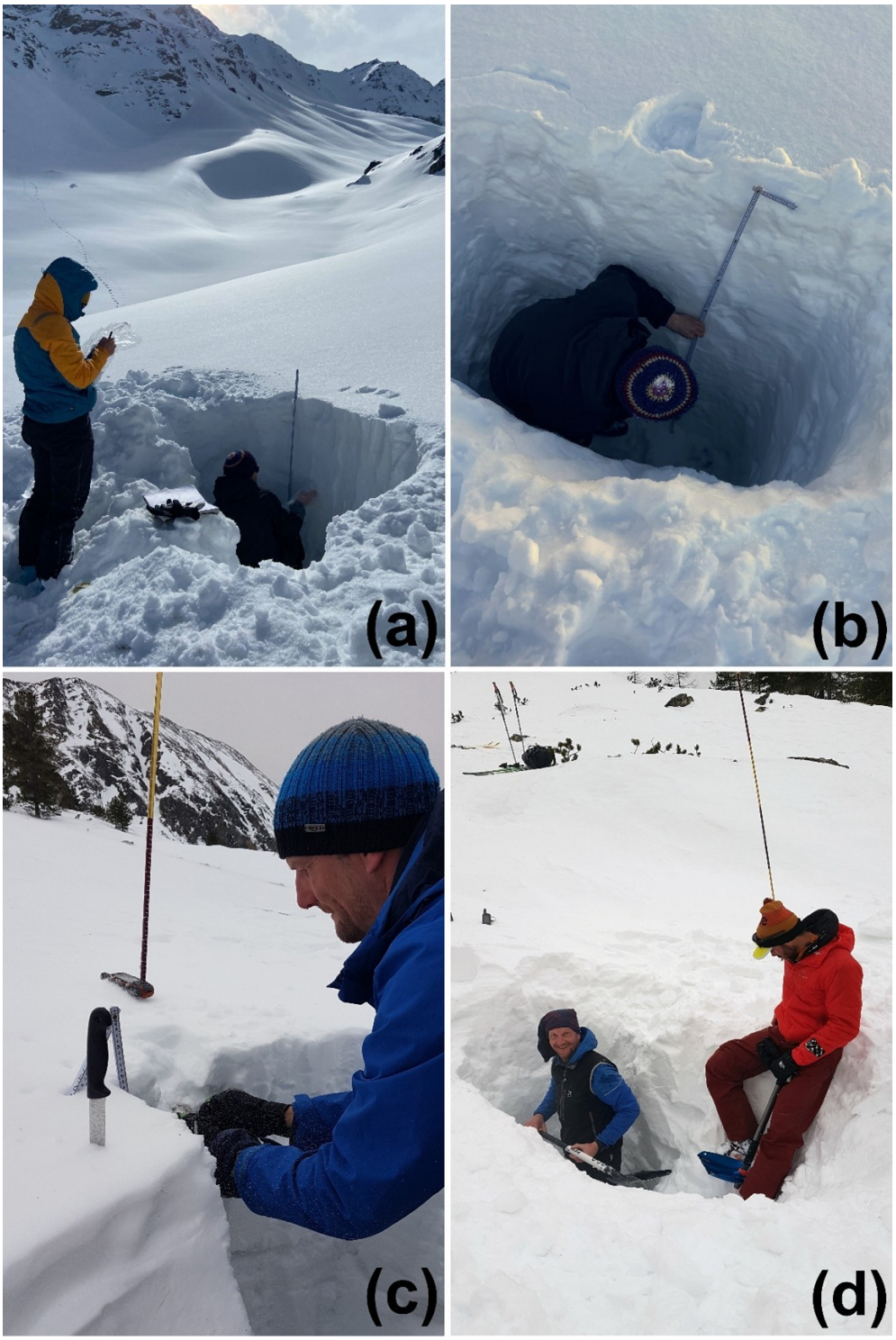
Wie wurde der Einfluss von Regen- und Schneeschmelzwasser auf den Abfluss bestimmt?

Neben der Niederschlags-Abfluss-Modellierung wurde die Grundwasserneubildungs- und Abflusskomponenten der Blockgletscherquellen bzw. der übergeordneten Flusssysteme anhand stabiler Isotopendaten analysiert. Das Ziel war es hierbei die Anteile von Regen- und Schneeschmelzwasser abzuschätzen. Dazu wurden 345 Quell- und Bachwasserproben, 22 Regenwasserproben und 353 Schneeproben entnommen und analysiert. Im Sommer 2021 wurden in allen fünf Untersuchungsgebieten Regensammler installiert und im Abstand weniger Wochen die Regenproben entnommen. Diese Proben geben Auskunft über die Isotopensignatur des Regenwassers im jeweiligen Gebiet und seine Veränderung im Laufe des Sommers.

Die Bestimmung des Anteils von Schneeschmelzwasser zur Grundwasserneubildung ist besonders herausfordernd. Im Rahmen des Projekts wurden zwei Schneeprobenahmekampagnen durchgeführt (Abbildung 29). Die erste Kampagne (Winter 2020/21) umfasste eine Beprobung der Schneedecke in allen Untersuchungsgebieten, wobei ein bis zwei Schneeprofile pro Standort aufgenommen wurden. Die zweite

Kampagne (Winter 2021/22) konzentrierte sich auf die steirischen Untersuchungsgebiete Ingeringgraben und Schöneben, wo die Schneedecke mehrfach untersucht wurde. Abbildung 30 zeigt beispielhaft ein Schneeprofil, das am 9. März 2021 am Rotbühel im Vergaldatal (Vorarlberg) aufgenommen wurde. Es verdeutlicht die starken Schwankungen der Isotopenwerte innerhalb der Schneedecke. Das Profil beginnt mit einer 35 cm dicken Schicht aus Tiefenreif an der Schneedeckenbasis, gefolgt von 62 cm grobkörnigem Altschnee. Beide Schichten wurden durch Umwandlungsprozesse geprägt, was an den abgerundeten Kristallkanten zu erkennen ist. Darüber liegt eine 16 cm dicke Schicht aus kantigkörnigem Schnee, deren unterste 3 cm feines, windverfrachtetes Sediment enthalten („Saharastaub“). Eine markante Schmelzkruste bildet die obere Begrenzung dieser älteren Schneeschichten und entstand während einer milden Wetterperiode bis zum 4. März 2021. Darüber befindet sich eine jüngere Triebschneeschicht, die durch starken Wind gebildet wurde und nach dem Schneefallereignis am 5. März 2021 kalten, trockenen Bedingungen ausgesetzt war.

Abbildung 29: (a) Aufnahme des Schneeprofils Vorderes Bergle im Untersuchungsgebiet Radurschltal (Tirol). (b) Aufnahme des Schneeprofils Gampe im Untersuchungsgebiet Radurschltal (Tirol). (c) Schneeprobenahme am Schneeprofil Schöneben 1 im ergänzenden Untersuchungsgebiet Schöneben (Steiermark). (d) Aufschließen des Schneeprofils Schöneben 4 im ergänzenden Untersuchungsgebiet Schöneben (Steiermark)



Fotos: (a) (b) Thomas Wagner, (c) (d) Simon Seelig

Die Isotopenwerte oberhalb und unterhalb der Schmelzkruste unterscheiden sich stark. In der oberflächennahen Triebschneeschicht ist eine deutliche Anreicherung schwerer Isotope zu erkennen (höhere δ2H bzw. δ18O-Werte). Darunter variieren die Werte mit zunehmender Tiefe, zeigen jedoch insgesamt eine Abreicherung schwerer Isotope. In der Tiefenreifschicht an der Schneedeckenbasis wird eine Anreicherung schwerer Isotope deutlich. Diese Muster entstehen durch Sublimations- und Resublimationsprozesse sowie dem Transport von Wasserdampf innerhalb der Schneedecke. Die Schichtstruktur bestimmt, wie stark diese Prozesse die Isotopenwerte beeinflussen. Der allgemeine Schneedeckenaufbau ist bei allen Schneeprofilen aus Vorarlberg und Tirol ähnlich, die im März 2021 im Zuge des Projekts aufgenommen wurden. Er spiegelt die Witterungsverhältnisse des Winters 2020/21 wider, weist aber lokale Unterschiede auf. Die markante Schmelzkruste und der überregionale Eintrag von Saharastaub ermöglichen eine grobe Korrelation zwischen den Profilen.

Abbildung 30: Stabile Isotopensignatur geschmolzener Schneeproben des Profils Rotbühel (Vergaldatal, Vorarlberg). Triebschnee (DFbk) überlagert eine ausgeprägte Schmelzkruste (MFcr, rot hervorgehoben), darunter folgt älterer, teils aufbauend umgewandelter Schnee (FCso) und körniger Altschnee (FCxr). An der Basis liegt eine ältere Lage Tiefenreif (DHxr). Die Kurzbezeichnungen und Profilaufnahme entsprechen der UNESCO/IACS International Classification for Seasonal Snow on the Ground (Fierz et al., 2009)

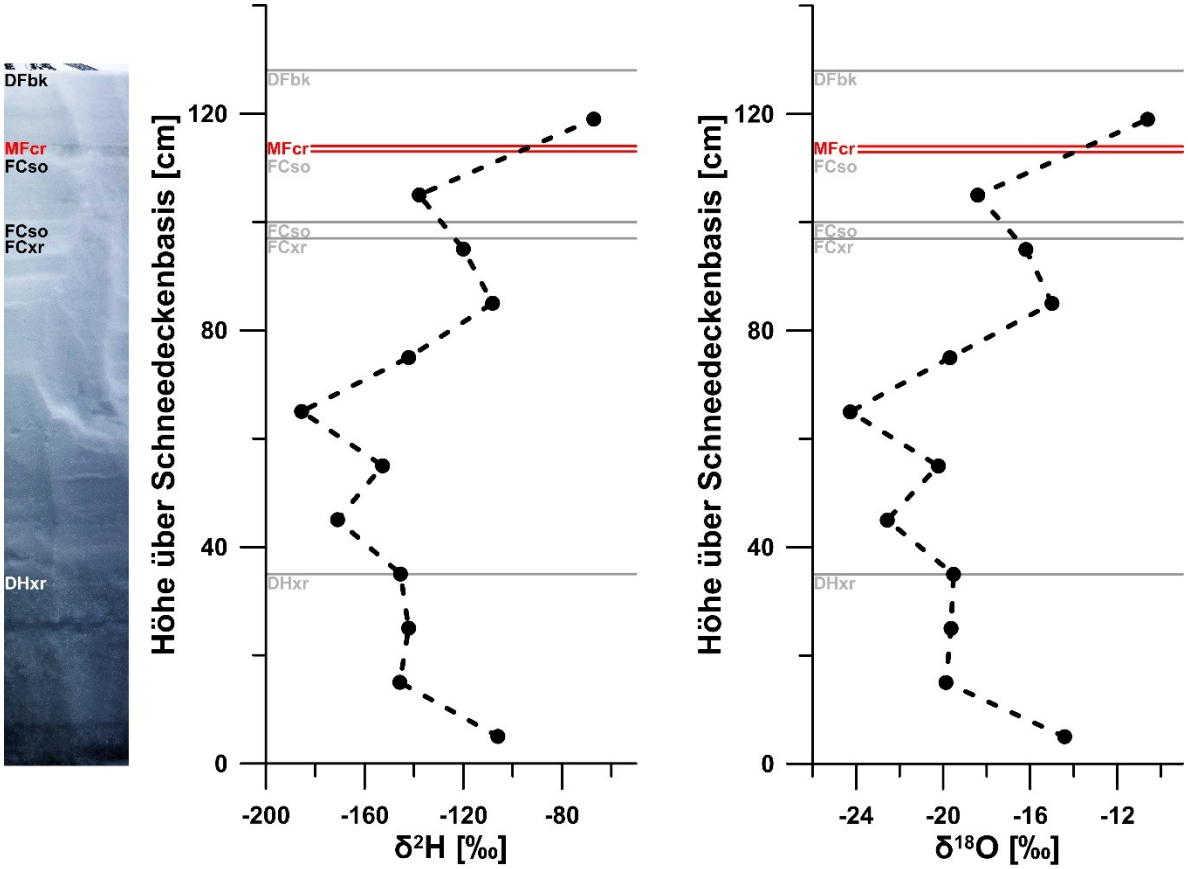


Foto: Simon Seelig

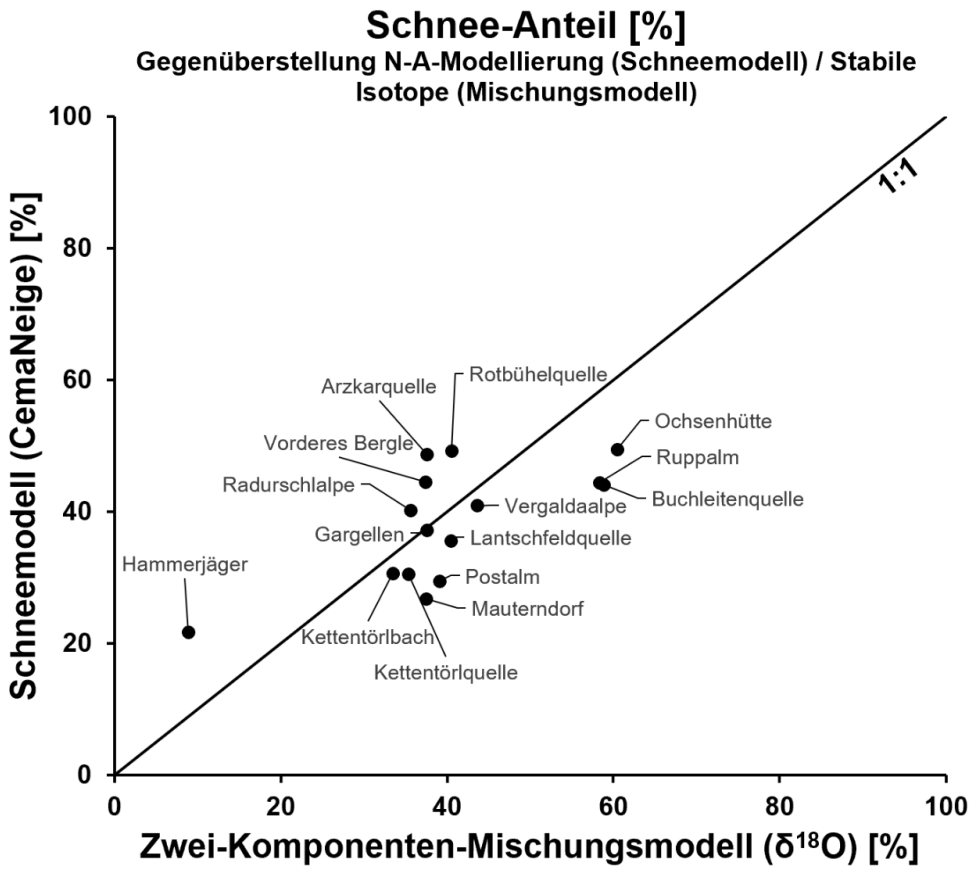
Während die Schneedecke durch stark schwankende Isotopensignaturen gekennzeichnet ist, führt die Durchfeuchtung im Frühjahr meist zu einer teilweisen Homogenisierung. Die frühe Schneeschmelze sowie temporäre, intermittierende Schmelzphasen spiegeln jedoch die heterogene Isotopenzusammensetzung der einzelnen Schneeschichten auch im Schmelzwasser wider. Während der Hauptschmelze hingegen kommt es in der Regel zu einer guten Durchmischung und Homogenisierung (Beria et al., 2018).

Um den mittleren Beitrag von Regen- und Schneeschmelzwasser zur Quellschüttung zu berechnen, wurde ein Zwei-Komponenten-Mischungsmodell verwendet (siehe Infobox Isotopenanalytik). Dabei wurden die gemessenen Isotopensignaturen des Abflusses in Regen- und Schneewasseranteile aufgeschlüsselt. Diese Anteile dienen zur unabhängigen

Validierung des Niederschlags-Abfluss-Modells, das ebenfalls zwischen Regen und Schnee differenziert. Wird ein solches Modell an ein Schneemodul gekoppelt, simuliert es die Wasserbilanz, indem es Niederschlag in Regen oder Schnee unterteilt, Schneespeicherung und -schmelze berücksichtigt und die resultierenden Abflüsse berechnet. Ein Abgleich mit den aus Isotopenanalysen bestimmten Regen- und Schneebeiträgen zeigt, ob das Modell die hydrologischen Prozesse realistisch abbildet. In diesem Fall stimmen die Ergebnisse beider Ansätze gut überein, mit einer Abweichung von 22 % und einem Spearman-Korrelationskoeffizienten von 0,68 (Abbildung 31).

Eine detaillierte Analyse zeigt jedoch Herausforderungen bei der Erfassung der Isotopensignatur von Schnee als Grundwasserneubildungskomponente. Die starke Streuung der Isotopensignatur in Schneeprofilen führt zu hohen Unsicherheiten bei der Bestimmung des mittleren Schneeanteils an der Grundwasserneubildung. Vermutlich variiert die Isotopensignatur des Schneeschmelzwassers weniger, was durch regelmäßige Probenahmen an der Schneedeckenbasis während der Schmelzperiode überprüft wurde. Messungen im Ingering- und Gaalgraben-Gebiet zeigen eine systematische Anreicherung schwerer Isotope im Schmelzwasser (Brandmayr, 2024). Für die anderen vier Testgebiete fehlen solche Untersuchungen, weshalb auf Schneedeckenproben mit hoher Variabilität zurückgegriffen werden musste, was zu den beschriebenen Unsicherheiten führt.

Abbildung 31: Validierung des Schnee-Modells CemaNeige mittels Zwei-Komponenten-Mischmodells auf Basis stabiler Isotopendaten (siehe Infobox). Die durchgezogene Linie entspricht perfekter Übereinstimmung (1:1)



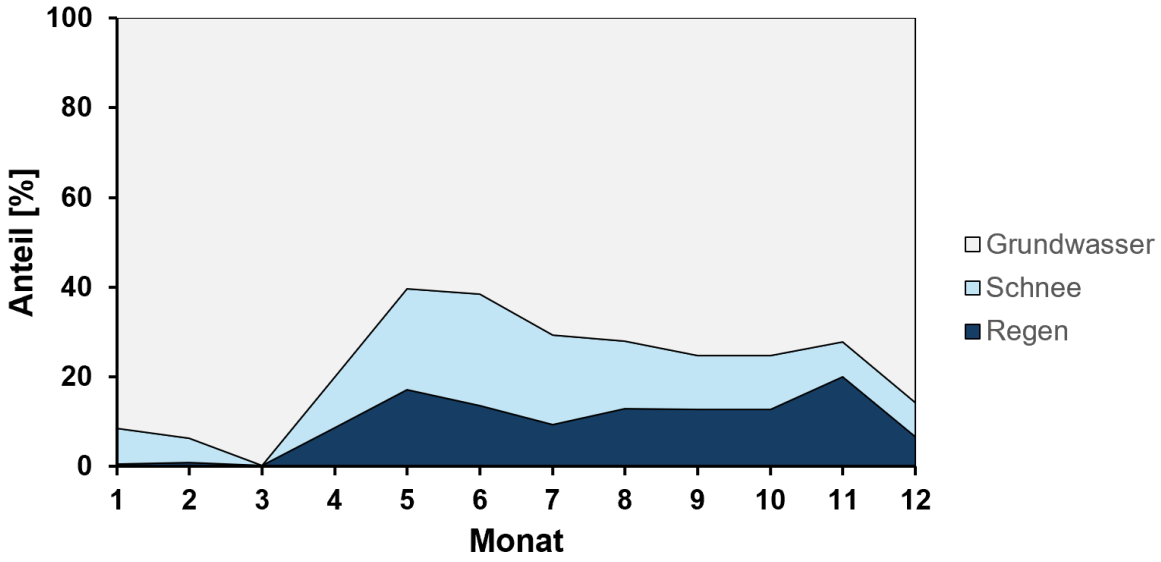
Welche Rolle spielt länger gespeichertes Grundwasser für die Blockgletscherquellen?

Neben Regen- und Schneeschmelzwasser trägt auch länger gespeichertes Grundwasser zum Abfluss in den übergeordneten Einzugsgebieten bei. Dieses unterscheidet sich durch eine höhere elektrische Leitfähigkeit, da es länger mit dem Gestein in Kontakt war. Da Grundwasser selbst eine Mischung aus älteren Regen- und Schneeschmelzwassern ist, weist es zudem häufig eine mittlere Isotopensignatur von ca. 13 ‰ δ18O-Werte auf.

Zur genaueren Bestimmung der Abflusskomponenten wurde ein Drei-Komponenten-Mischungsmodell verwendet, das zusätzlich die elektrische Leitfähigkeit als Tracer einbezieht (siehe Infobox Isotopenanalytik). Ein Beispiel für eine solche Analyse ist in Abbildung 32 für die Kettentörlquelle (Steiermark) dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass länger gespeichertes Grundwasser mit 69% den Hauptanteil über das Jahr darstellt. Anteile von Regen- und Schneeschmelzwässer, die als schnelle Komponenten rasch an die

Quelle gelangen, weisen einen jährlichen Anteil von 14 % bzw. 17 % auf. Im Frühjahr dominiert der Schneeschmelzwasseranteil gegenüber dem Regen, während im Sommer und Herbst der Regenwasseranteil zunimmt. Da der Grundwasseranteil nur indirekt über den Basisabfluss geschätzt wurde, könnte er tatsächlich etwas niedriger ausfallen.

Abbildung 32: Drei-Komponenten-Mischungsmodell am Pegel Kettentörlquelle im Untersuchungsgebiet Ingering- und Gaalgraben (Steiermark). Die Quelle entwässert einen Blockgletscher mit hoher Infiltrations- und Speicherkapazität, entsprechend hoch fällt der Grundwasseranteil am Gesamtabfluss aus. Der Anteil an Schnee- und Regenwasser, welche teilweise rasch an die Quelle gelangen, folgt dem Jahresgang, mit höherem Schneeanteil im Frühjahr und Regenanteil im Spätsommer und Herbst



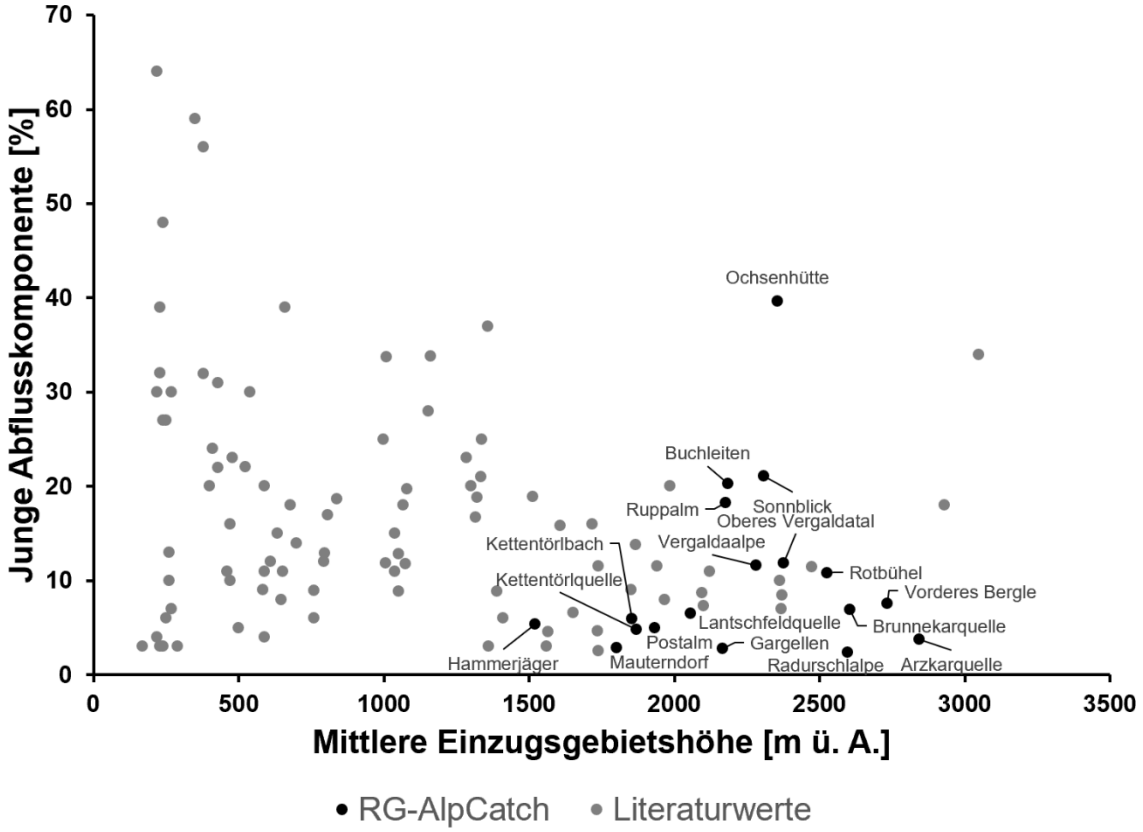
Wie lange bleibt Niederschlagswasser im Einzugsgebiet gespeichert?

Um die Verweilzeit von Wasser im Einzugsgebiet zu bestimmen, wurde der Anteil jungen Wassers im Abfluss berechnet, also der Anteil von Wasser, das nicht älter als zwei bis drei Monate ist. Dabei wurden zwei Berechnungsmethoden gegenübergestellt: Die erste Methode betrachtet den zeitlichen Durchschnitt über den gesamten Untersuchungszeitraum, indem eine periodische Regression aller Isotopendaten durchgeführt wird. Die zweite Methode gewichtet zusätzlich die Abflussmenge, sodass Phasen mit hohem Abfluss stärker berücksichtigt werden.

Der zeitlich gemittelte Anteil des jungen Wassers ist meist niedrig und liegt zwischen etwa 2 und 21 %, mit der Ausnahme am Standort Ochsenhütte, wo er fast 40 % beträgt (Abbildung 33). Wenn zusätzlich nach Abflussmenge gewichtet wird, ergibt sich insgesamt ein höherer Anteil, der zwischen etwa 6 und 54 % schwankt. Das liegt daran, dass bei Hochwasserereignissen vermehrt junges Wasser in den Abfluss gelangt, während längerer Trockenperioden dagegen fast ausschließlich älteres Wasser aus gespeicherten Reserven stammt.

Mit zunehmender Höhe nimmt der zeitlich gemittelte Anteil des jungen Wassers tendenziell ab (Abbildung 33). In schneebedeckten Gebieten oberhalb von 1500 Metern ist dieser Anteil meist besonders gering, da der Winterniederschlag dort über mehrere Monate in der Schneedecke gespeichert bleibt, bevor er allmählich freigesetzt wird. Diese Beobachtung entspricht globalen Trends, und wurde im Zuge des vorliegenden Projekts, von einzelnen Ausnahmen abgesehen, bestätigt.

Abbildung 33: Der Zusammenhang zwischen (Zeit-gemittelter) junger Abflusskomponente und mittlerer Einzugsgebietshöhe. Die junge Abflusskomponente nimmt tendenziell mit zunehmender Seehöhe ab, Gebiete über 1500 m ü. A. weisen nur in Ausnahmefälle (Ochsenhütte) hohe Anteile jungen Wassers auf. Zur Einordnung sind Literaturwerte aus verschiedenen Gebirgsgruppen angegeben (Jasechko et al., 2017; Maier, 2018; von Freyberg et al., 2018; Stockinger et al., 2019; Ceperley et al., 2020; Gallart et al., 2020; Floriancic et al., 2024)



6.3 Wasserqualität

6.3.1 Hydrochemie

Warum und welche hydrochemischen Untersuchungen wurden durchgeführt?

Vorrangiges Ziel der hydrochemischen Untersuchung war, geogene Hintergrundwerte hochalpiner Quellwässer und übergeordneter Fließgewässer als künftige Referenzwerte zu erhalten.

Insbesondere sind Hintergrundwerte für die qualitative Zustandsbeurteilung der Grundwasserkörper zur Umsetzung der EU-Wasserrahmenrichtlinie 2000/60/EG sowie auf nationaler Ebene des Wasserrechtsgesetzes 1959 idgF bzw. der Qualitätszielverordnung Chemie Grundwasser 2010 und der Gewässerzustandsüberwachungsverordnung 2006 unerlässlicher Bestandteil. Die hydrochemische Charakterisierung ist elementarer Bestandteil zur Beschreibung von Grundwasserkörpern und insbesondere für die Trinkwasserversorgung unerlässlich! Gerade für den alpinen bis hochalpinen Raum stellen somit bislang kaum vorhandene Wasserqualitätsdaten von Spuren- und Ultraspurenelementen sowohl geogener (natürlicher) als auch anthropogener Herkunft eine wichtige Ergänzung zur Verdichtung der Datengrundlage dar (Wemhöner et al., 2012, 2015; Brielmann et al., 2018a; Humer et al., 2019). Darüber hinaus können diese Qualitätsdaten künftig für weitere naturwissenschaftlichen Forschungsbereiche wie z. B. der Geologie, Petrologie und Geochemie von großem Nutzen sein (Infobox Elementanalytik).

Insgesamt wurden 15 Messstellen in den fünf Untersuchungsgebieten während des Frühsommers (Juni/Juli 2022) und im Spätherbst (November 2022) beprobt, um anorganische Wasserinhaltsstoffe (Metall(oid)e; der Begriff steht für Metalle und Halbmetalle) während Schmelzwasserführung und Niederwasserbedingungen zu untersuchen. Die Konzentrationen wurden sowohl in der Gesamtphase inklusive Schwebstoffe als auch, nach Filtration, in der gelösten, schwebstofffreien Phase der Wasserproben untersucht. Schwebstoffe sind feste natürliche oder anthropogene Partikel, die aufgrund der geringen Größe und Masse nicht absinken und daher im Wasser schweben. Schwermetalle und andere Schadstoffe können an Schwebstoffe gebunden werden und so im aquatischen Milieu transportiert werden. Deshalb ist es wichtig, den Schwebstoffgehalt des Wassers, sowie die Metall(oid)konzentration der Schwebstoffe zu

bestimmen. Letztere beinhaltet den in den Schwebstoffen enthaltene und den an Schwebstoff gebundenen Anteil von Metallen. Zusätzlich zu den Metall(oid)en, welche in der österreichischen Gewässerzustandsüberwachungsverordnung (GZÜV; siehe Infobox GZÜV) geregelt sind, wurde eine Vielzahl weiterer Metall(oid)e bestimmt. Ein besonderer Schwerpunkt wurde auf jene Metall(oid)e gelegt, die aufgrund deren Einsatz in modernen Technologien und industriellen Anwendungen in die aquatische Umwelt gelangen und ein Risiko für die Wasserqualität darstellen könnten. Dazu gehören zum Beispiel die Metalle der Seltenen Erden oder Edelmetalle. Geogene (natürliche) Hintergrundkonzentrationen dieser sogenannten „neu-entstehenden Kontaminanten“ (siehe Infobox Neu entstehende Kontaminanten) sind bislang noch nicht erfasst worden. Daher eignen sich die im Zuge dieses Projektes vorgenommenen Untersuchungen, die geogene Hintergrundbelastung in den untersuchten Gebieten zu erfassen. Weiters bilden sie eine hilfreiche Basis für zukünftige Untersuchungen bezüglich der Abschätzung von anthropogenen, das heißt vom Menschen verursachten Kontaminationen, oder geochemischer Zusammenhänge von Gesteins-Wechselwirkungen.

Infobox „Elementanalytik“

Die Elementanalytik wird angewendet, um Konzentrationen von Elementen/Metallen in Proben nach entsprechender Probenvorbereitung zu bestimmen. Mit sehr nachweisstarken Geräten wie der für diese Studie verwendeten Sektor-Feld-Induktiv gekoppeltes Plasma-Massenspektrometrie (ICP-SFMS) können Konzentrationen bis in den niedrigsten ng/L-Bereich mit hoher Genauigkeit bestimmt werden. (Hinweis: 1 ng/L – Nanogramm pro Liter - entspricht einem Milliardstel Gramm bzw. 0,000000001 g/L). Bei dieser Technik wird die Probe in einem Argon-Plasma bei Temperaturen bis zu 10000 °C verdampft und in die kleinsten Teilchen, die Atome bzw. Ionen zerlegt. Diese Prozesse heißen **Atomisierung** und **Ionisierung**. Die Ionen werden anschließend entsprechend des Masse/Ladungsverhältnisses in einem Magnetfeld getrennt und anschließend detektiert. Voraussetzung für die Bestimmung geringster Konzentrationen sind **Reinraumlabors** mit sehr reiner Luft, die zuvor mit speziellen Filtern gereinigt wurde, um winzigste Staubpartikel zu entfernen. Zusätzlich herrscht im Reinraumlabor ein leichter Überdruck, um zu verhindern, dass schmutzige Luft von außen eindringt. Reinraumklassen sind in der ISO-Norm 14664-1 festgelegt und beschreiben, wie rein die Luft in einem Reinraum ist. Je niedriger die Zahl, desto reiner ist der Raum. Die Elementanalytik dieser Proben

wurde in einem Reinraum der ISO-Klasse 7 mit Abzügen der ISO-Klasse 5 durchgeführt. Zum Vergleich: Reinräume der ISO Klasse 7 haben maximal 10.000 Partikel pro Kubikmeter, während normale Luft in Büros oder im Wohnzimmer mehr als 35 Millionen Partikel pro Kubikmeter hat.

Infobox Gewässerzustandsüberwachungsverordnung (GZÜV)

In der Gewässerzustandsüberwachungsverordnung 2006 (GZÜV) in der geltenden Fassung (BGBl. II Nr. 128/2019) wird die Überwachung der Qualität von Oberflächengewässern und Grundwasser festgelegt, um frühzeitig Verschmutzungen zu erkennen und Maßnahmen zum Schutz der Gewässer einleiten zu können. So kann sichergestellt werden, dass nationale und EU-weite Umweltziele erreicht bzw. eingehalten werden. In der GZÜV sind verschiedene Parameter wie Eigenschaften des Gewässers und Nähr- und Schadstoffe definiert und in Parameterblöcke eingeteilt. Anorganische Parameter sind in Parameterblock 1 und 2 definiert:

- Parameterblock 1 (1.2. Chemisch-analytische Parameter): Calcium (Ca), Magnesium (Mg), Natrium (Na), Kalium (K), Bor (B), Eisen gelöst (Fe) und Mangan gelöst (Mn)
- Parameterblock 2 (2.1 Metalle gelöst): Aluminium (Al), Arsen (As), Blei (Pb), Cadmium (Cd), Chrom (Cr), Kupfer (Cu), Nickel (Ni), Quecksilber (Hg) und Zink (Zn)

Die Probenahme erfolgte unter Einhaltung von standardisierten Normen. In diesen Normen sind die Auswahl der Probenahmestellen, die Sauberkeit und Vorbereitung der Probennahmegefäße, die Probenahmetechnik, die entsprechende Konservierung, Lagerung und der Transport der Proben sowie die Dokumentation geregelt. Diese Aspekte sind wichtig, um genaue und zuverlässige Messergebnisse zu gewährleisten. Probenvorbereitung und Analytik erfolgten in Reinraumlabors, um Verunreinigungen der Proben und somit Überbefunde der zu bestimmenden Metall(oid)e zu vermeiden. Das Institut für Analytische Chemie ist nicht für die Bestimmung von Metallkonzentrationen in Grund- und Oberflächenwasser akkreditiert. Um die Eignung der angewendeten analytischen Verfahren nachzuweisen, wurden alle wichtigen Verfahrenskenngrößen unter Einhaltung von Normen (EN/IEC 17025:2018) ermittelt und dokumentiert.

Infobox „Neu-entstehende Kontaminanten“

Neu-entstehende Kontaminanten sind Stoffe, die entweder neu in die Umwelt gelangen oder deren schädliche Auswirkungen auf Menschen, Tiere und das Ökosystem erst erkannt wird. Bisher wurden diese Stoffe nicht überwacht oder reguliert.

- Metalle der seltenen Erden werden zum Beispiel für Magnete in Windkraftanlagen, Elektroautos, Smartphones und in der Medizin benötigt. Zu dieser Gruppe gehören Cer (Ce), Dysprosium (Dy), Erbium (Er), Europium (Eu), Gadolinium (Gd), Holmium (Ho), Lanthan (La), Lutetium (Lu), Neodym (Nd), Praseodym (Pr), Samarium (Sm), Scandium (Sc), Terbium (Tb), Thulium (Tm), Ytterbium (Yb) und Yttrium (Y)
- Platingruppenelemente werden zum Beispiel in der Autoindustrie als Katalysatoren, in der Elektronik, Schmuckindustrie und in der Medizin verwendet. Zu dieser Gruppe gehören Gold (Au), Iridium (Ir), Palladium (Pd), Platin (Pt), Rhodium (Rh), Ruthenium (Ru) und Silber (Ag).
- Weitere Elemente von Relevanz: Barium (Ba), Beryllium (Be), Bismut (Bi), Gallium (Ga), Kobalt (Co), Lithium (Li), Rubidium (Rb), Selen (Se), Strontium (Sr), Thallium (Tl), Thorium (Th), Uran (U), Vanadium (V), Antimon (Sb), Hafnium (Hf), Tellur (Te), Zinn (Sn), Germanium (Ge), Molybdän (Mo), Niob (Nb), Phosphor (P), Schwefel (S), Silicium (Si), Tantal (Ta), Titan (Ti), Wolfram (W) und Zirkon (Zr).

Die Konzentrationen in den Blockgletscherquellen sind aufgrund der hochalpinen Lage, der geologischen Eigenschaften und der kurzen Verweilzeiten meist sehr niedrig. Es konnten dennoch Wechselwirkungen und Korrelationen zwischen den einzelnen Metallen festgestellt werden. In diesem Kapitel werden ausgewählte Metalle des Parameterblock 1 und 2 der GZÜV sowie weitere, insbesondere „neu-entstehende Kontaminanten“ dargestellt und näher erläutert.

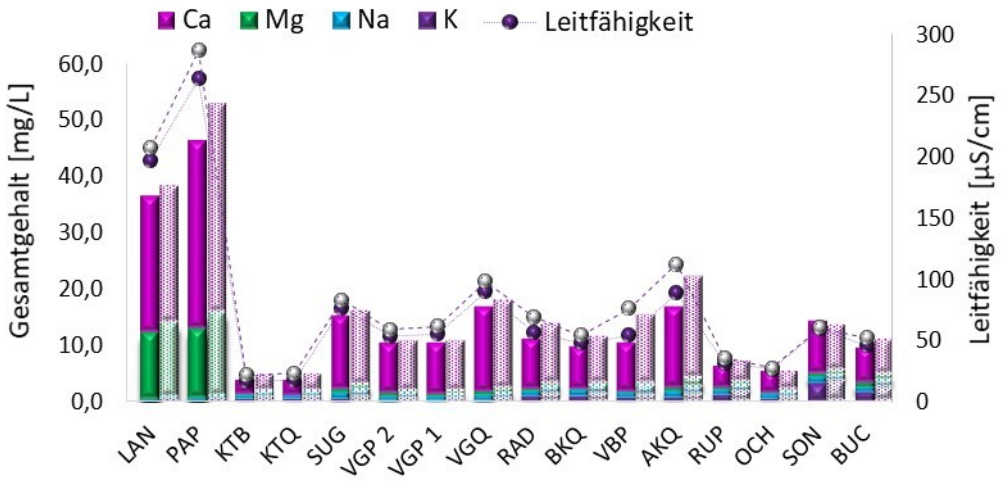
Bei der graphischen Darstellung der Daten werden folgende Abkürzungen für die Messstellen an Quellen und Oberflächengerinne (Bäche) der einzelnen Untersuchungsgebiete verwendet:

- Ingering- und Gaalgraben (Steiermark): Kettentörlquelle (KTQ), Kettentörlbach (KTB)
- Lantschfeld und Taurachtal (Salzburg): Lantschfeldquelle (LAN), Lantschfeldbach am Pegel Postalm (PAP)
- Hintereggengraben (Kärnten): Buchleitenquelle (BUC), Sonnblickquelle (SON), Reinitzbach am Pegel Ochsenhütte (OCH), Reinitzbach am Pegel Ruppalm (RUP)
- Radurschltal (Tirol): Arzkarquelle (AKQ), Brunnekarquelle (BKQ), Brunnwandgrabenbach am Pegel Vorderes Bergle (VBP), Radurschlbach am Pegel Radurschlalpe (RAD)
- Vergalda-und Valzifenztal (Vorarlberg): Rotbühelquelle (VGQ), Vergaldabach am Pegel Oberes Vergaldatal (VGP1), Vergaldabach am Pegel Vergaldaalpe (VGP2), Suggadinbach am Pegel Gargellen (SUG)

Wie setzen sich die Wässer zusammen?

Calcium, Magnesium, Natrium und Kalium sind die wichtigsten Kationen in natürlichem Wasser. Die Gesamtkonzentration von in Wasser gelöstem Calcium und Magnesium ist die Ursache für die Wasserhärte – je höher deren Konzentration, desto höher die Härte des Wassers. Die elektrische Leitfähigkeit ist die Summe aller in Wasser gelösten Stoffe und ist höher, wenn mehr gelöste Stoffe im Wasser enthalten sind. Wasserhärte und Leitfähigkeit stehen somit in direktem Zusammenhang. Abbildung 34 zeigt die Konzentrationen der Hauptkationen sowie die elektrische Leitfähigkeit der untersuchten Wasserproben. Die Summe der Hauptkationen sind in den Proben, die während Niederwasserbedingungen genommen wurden, etwas höher und somit ist auch die elektrische Leitfähigkeit erhöht. Höhere Konzentrationen in den Proben der Karbonat-dominierten Blockgletscherregion Lantschfeld und Taurachtal, Salzburg (LAN, PAP) werden durch die höhere Löslichkeit von Karbonatgestein im Vergleich zu Silikatgestein verursacht.

Abbildung 34: Hauptkationenzusammensetzung (Gesamtgehalte) und elektrische Leitfähigkeit der untersuchten Proben (gefüllt: Probenahme 07/2022, gepunktet: Probenahme 11/2022)



In der „Hydrochemischen Karte Österreichs 1:500 000“ (BMLFUW, 2017a,b) sind durchschnittliche Summen der gelösten Stoffe verschiedener Gewässer angegeben. Diese reichen von 100 mg/L in Kluft-Kristallingrundwässern über Karst- und Karbonatgrundwässer (260 mg/L) und Flusswässer (275 mg/L) bis hin zu Porengrundwasser mit 557 mg/L. Im Vergleich dazu sind die Konzentrationen der untersuchten Blockgletscherquellen und unterstromigen Gerinne extrem gering.

Eisen, Mangan und Aluminium wurden in allen beprobten Blockgletscherquellen nachgewiesen. Die Ergebnisse zeigen, dass diese Metalle teilweise sehr stark an Schwebstoffe gebunden sind. In den meisten Proben waren die Konzentrationen dieser Elemente während der Schmelzwasserführung höher als während Niederwasser-bedingungen. Aufgrund des logistischen Aufwands der Probenahme im Hochgebirge und des schneearmen Winters 2022 war die Schmelzwasserführung an einigen Standorten zum Zeitpunkt der Beprobung bereits weitgehend abgeklungen, sodass die Proben eher typische hochsommerliche hydrologische Bedingungen widerspiegeln. Zudem hängt die Abflusscharakteristik auch während der Schmelzperiode stark vom genauen Zeitpunkt und den Wetterbedingungen ab. Maximal gemessenen Konzentrationen waren bei Eisen 238 µg/L (Median: 5,38 µg/L), bei Mangan 13 µg/L (Median: 0,47 µg/L) und bei Aluminium 193 µg/L (Median: 7,30 µg/L). In der Qualitätszielverordnung Chemie Grundwasser sind für diese Metalle keine Schwellenwerte angegeben. Die Trinkwasserverordnung (TWV, 2024) gibt Indikatorwerte (Grenzwerte) an. Das sind Konzentrationen, die nicht

überschritten werden sollen. Diese liegen für Eisen und Aluminium bei 0,2 mg/L (=200 µg/L) und für Mangan bei 0,05 mg/L (=50 µg/L). In den untersuchten Blockgletscherwässern waren die Konzentration geringer als die Indikatorwerte.

Die Konzentrationen von Arsen (Abbildung 35), Uran (Abbildung 36) und Quecksilber (Abbildung 37) waren in den beprobten Quellen BKQ, AKQ und VBP des Einzugsgebietes Radurschtal (Tirol) weitaus höher als in den Quellen der anderen Einzugsgebiete. Ebenfalls deutlich erhöhte Konzentrationen liegen auch an der Messstelle des Radurschlbachs bei der Radurschlalpe (RAD) vor. Diese Metall(oid)e kommen im Gegensatz zu Eisen, Mangan und Aluminium hauptsächlich vollständig gelöst vor und weisen kaum saisonale Schwankungen auf. Arsen und Quecksilber sind in der Qualitätszielverordnung Chemie Grundwasser (QZV Chemie GW, 2010) geregelt. Der Schwellenwert von Arsen in Grundwasser liegt bei 9 µg/L und wurde bei einer Quelle überschritten. Die gemessenen Quecksilberkonzentrationen aller Quellen und Oberflächengerinne liegen bei maximal 1 ng/L und sind somit fast 1000 mal geringer als der Grundwasser-Schwellenwert von 0,9 µg/L und 70 mal geringer als die in der Wasserrahmenrichtlinie (WWRL, RL 2000/60/EG) bzw. in der Qualitätszielverordnung Chemie Oberflächengewässer (QZV Chemie OG, 2019) angegebene maximal zulässige Konzentration in Oberflächengewässer, welcher bei 0,07 µg/L liegt. Erhöhte Belastungen von Arsen und Uran in diesem Einzugsgebiet zugehörigen Blockgletscherquellen wurden schon in einer früheren Studie festgestellt (RG-HeavyMetal Wagner et al., 2019) und lassen sich höchstwahrscheinlich auf Vererzungen zurückführen. Weiters wurden in diesen Quellen erhöhte Lithium- und Antimonkonzentrationen im Vergleich zu den Proben der anderen Einzugsgebiete gemessen. Diese Metalle sind in keiner Verordnung geregelt, werden allerdings als neu-entstehenden Kontaminanten bzw. besorgniserregende Stoffe behandelt. Die Konzentrationsprofile von Lithium und Antimon sind vergleichbar mit jenen von Arsen und die maximal gemessenen Konzentrationen waren 2,50 µg/L und 0,4 µg/L. Es liegt nahe, dass Antimon und Arsen vergesellschaftet sind und die jeweils vorherrschende Gesteins-Geochemie widerspiegeln (Brighenti et al., 2024 & Seelig et al., 2025c).

Abbildung 35: Arsenkonzentrationen in den gemessenen Wasserproben in der Gesamtphase und der gelösten Phase nach Abtrennung durch Filtration (< 0.45 µm)

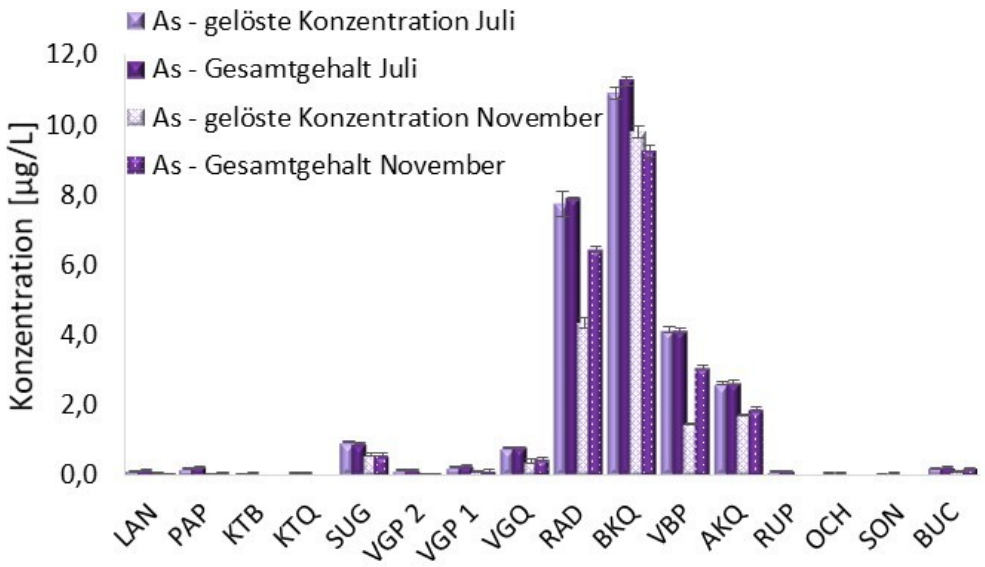


Abbildung 36: Urankonzentrationen in den gemessenen Wasserproben in der Gesamtphase und der gelösten Phase nach Abtrennung durch Filtration (< 0,45 µm)

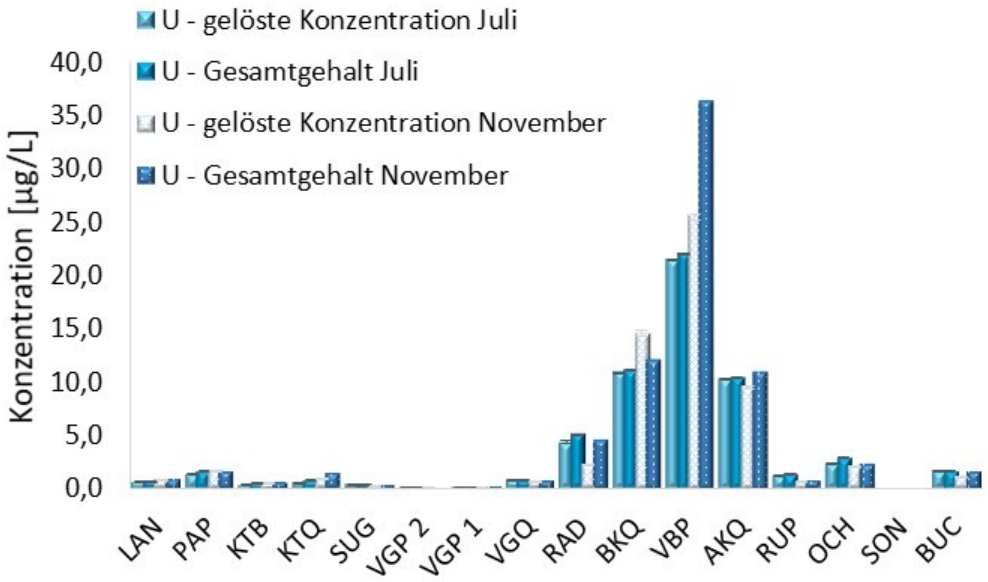
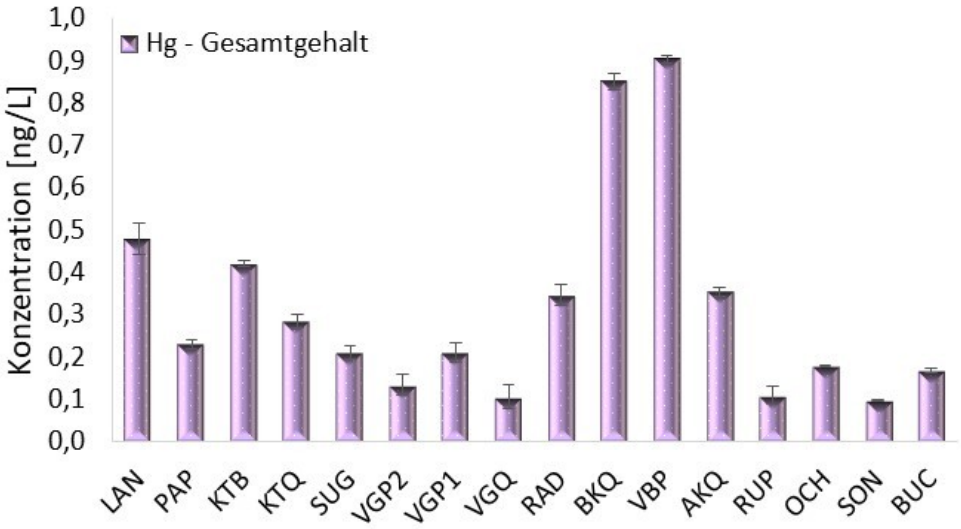


Abbildung 37: Quecksilberkonzentrationen in den gemessenen Wasserproben in der Gesamtphase während Niederwasserbedingungen



Chrom und Kupfer liegen in sehr ähnlichen Konzentrationsbereichen vor und zeigen auch ein sehr ähnliches Konzentrationsprofil. Der Schwellenwert im Grundwasser beträgt für Chrom 45 µg/L, während die maximal gemessenen Konzentrationen aller Messstellen unter 1 µg/L lagen. Kupferkonzentrationen lagen bei maximal 0,25 µg/L. Ein Schwellenwert ist nicht definiert. Beide Metalle waren fast vollständig gelöst und die Konzentrationen waren während der Schmelzwasserführung nur leicht höher als während Niederwasserbedingungen. Eine Ausnahme davon wurde in zwei Quellen des Hintereggengraben (Kärnten) festgestellt. In den Quellen Buchleitenquelle (BUC) und Sonnblick (SON) waren die Metallkonzentrationen in der Gesamtphase um einiges höher, was heißt, dass ein Anteil dieser Metalle an Schwebstoff gebunden ist. Es zeigten sich auch große saisonale Unterschiede bei diesen zwei Quellen. Dieses Ergebnis wurde ebenfalls bei Eisen, Mangan und Aluminium festgestellt.

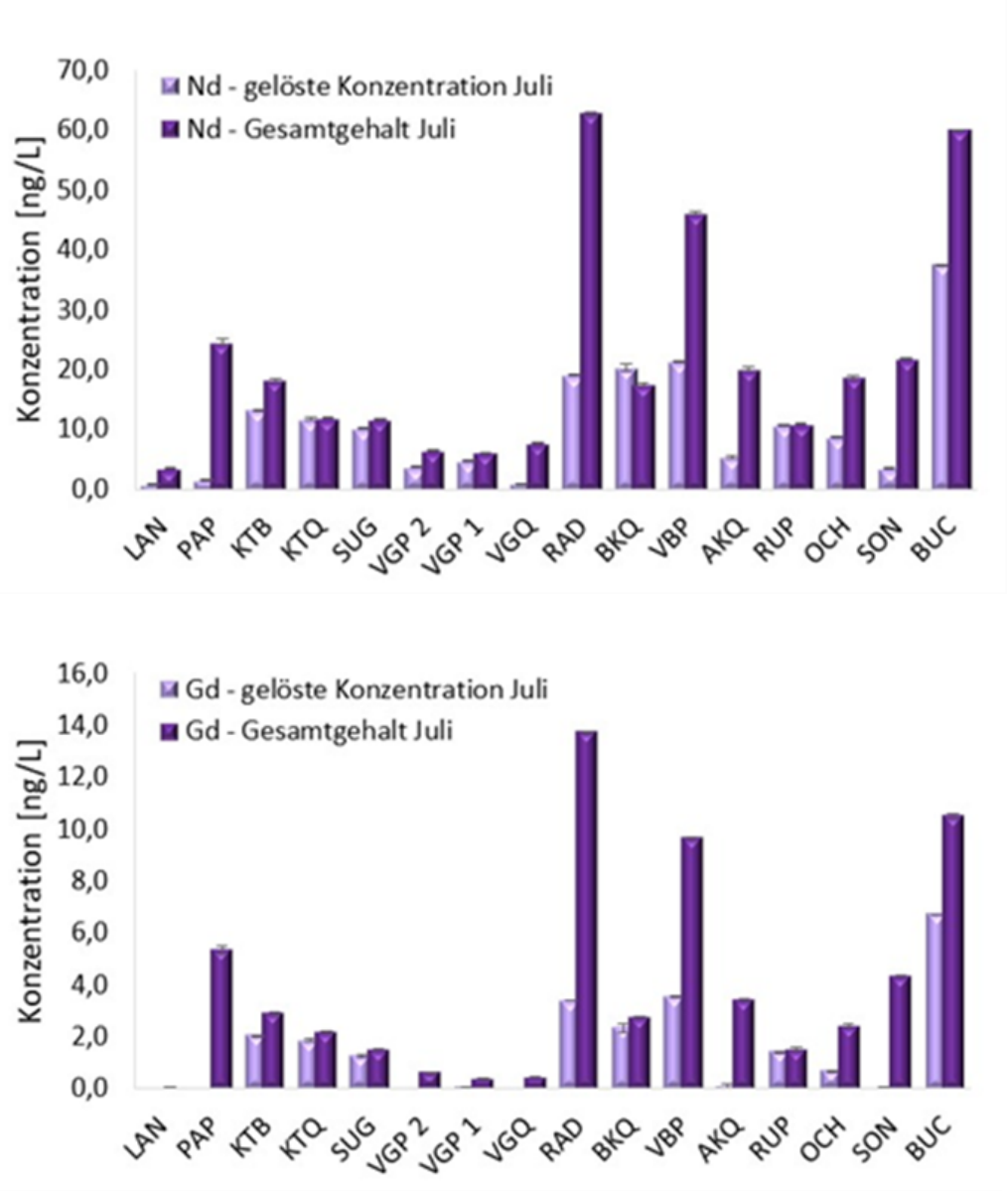
Cadmium konnte in allen beprobten Quellen während der Schmelzwasserführung mit Maximal-Konzentrationen von 0,015 µg/L nachgewiesen werden. In den bei Niederwasserbedingungen genommenen Proben lagen die Cadmiumkonzentrationen unterhalb der Bestimmungsgrenze.

Blei, Nickel und Zink wurden nur vereinzelt in bestimmten Quellen nachgewiesen und im Vergleich zu Cadmium waren die Konzentrationen dieser Metalle während Niederwasserbedingungen etwas höher.

Was sind „Seltene Erden“ und warum wurden sie gemessen?

Die Metalle der Seltenen Erden sind eine Gruppe von insgesamt 17 Elementen, die chemisch sehr ähnlich sind. Durch den vielfältigen Einsatz dieser Metalle zählen sie zum einen zu den sogenannten „Technologie-kritischen Elementen“ mit dem Risiko der Rohstoffverknappung, zum anderen zu den neu-entstehenden Kontaminanten, da die Gefahr hoch ist, durch Abbau, Verwendung und Recycling oder Entsorgung die aquatische Umwelt zu schädigen. Aufgrund der schlechten Mobilität der Metalle der Seltenen Erden in Grund- und Oberflächenwasser sind deren Konzentrationen extremst gering und oft ohne aufwendiger Probenvorbereitung trotz des Einsatzes extrem nachweisstarker analytischer Geräte nicht nachweisbar. Aufgrund ihrer chemischen Ähnlichkeit ist das Verteilungsmuster sehr gleichmäßig. Das ist in Abbildung 38 am Beispiel von Neodym und Gadolinium dargestellt. Die Konzentrationen in der Gesamtphase sind – abhängig von der untersuchten Messstelle – oft deutlich höher als in der gelösten Phase.

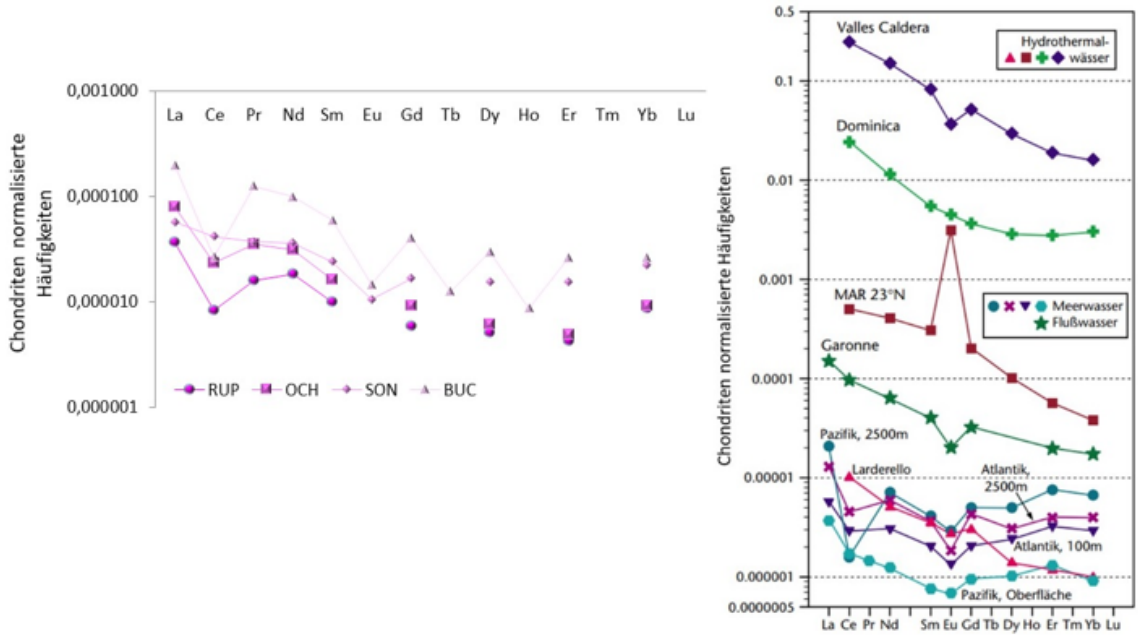
Abbildung 38: Konzentrationen von Neodym und Gadolinium in den gemessenen Wasserproben in der Gesamtphase und der gelösten Phase während der Schmelzwasserführung



Für aussagekräftige Interpretationen werden vor allem normierte Verteilungsmuster herangezogen. Dazu wird das Verhältnis aus den gemessenen Konzentrationen in den beprobten Gewässern und der Gehalt der Metalle der Seltenen Erden in **Chondriten** berechnet. Chondrite bilden die größte Klasse der Meteoriten und spiegeln die Zusammensetzung der frühen Erde und des Sonnensystems wider. Durch Normierung mit Chondriten können geochemische Entwicklungen identifiziert werden. In Abbildung 39 (links) sind als Beispiel die Chondriten-normierten Konzentrationen der Metalle der Seltenen Erden in den beprobten Quellen des Hintereggengrabens dargestellt.

Chondriten-normierte Darstellungen zeigen entweder flache Kurven, was bedeutet, dass keine signifikanten geologischen Veränderungen im Vergleich zur frühen Erde stattgefunden haben. Anstiege der Chondriten-normierten Kurven nach links oder rechts können Rückschlüsse auf das Ausgangsgestein (Erdkruste oder Erdmantel) geben, und durch natürliche Wasser-Gestein-Reaktionen spiegelt sich dieses Muster in Grundwasser wider. Ein Vergleich der im Rahmen dieses Projektes erfassten Daten mit den Chondriten-normierten Häufigkeiten von Metallen der Seltenen Erden in unterschiedlichen natürlichen Gewässern (Abbildung 39 rechts) zeigt deutlich, dass die Konzentrationen nur geringfügig höher als jene in Tiefen-Meerwasser sind – also in Bereichen, in denen davon ausgegangen werden kann, dass die Hintergrundkonzentrationen natürlich bedingt sind.

Abbildung 39: Chondriten-normierten Konzentrationen (log-Skalierung) der Metalle der Seltenen Erden in den beprobten Quellen des Hintereggengrabens (links) und in unterschiedlichen natürlichen Gewässern (Geochemie der Seltenen Erden, Uni Köln) (rechts)



Negative Anomalien, also Abweichungen von nur einem Element nach unten, weisen auf natürliche (hydro-)geochemische Prozesse hin. Diese treten häufig bei Cer (Ce) auf, da es in oberflächennahen Grundwässern mit hohem Sauerstoffgehalt oxidiert und sich daher die Löslichkeit verringert. Im Gegensatz dazu führen reduzierende, sauerstoffarme Bedingungen, welche in tiefen, älteren Bereichen des Grundwasserkörpers oder in (Tiefen-) Meerwasser vorherrschen, oder der Kontakt mit bestimmten Gesteinen, zu einer

negativen Europium-Anomalie (Eu). Positive Anomalien sind Abweichungen eines Elementes nach oben. Diese können auf anthropogene Belastungen hinweisen. Diese Art Anomalie wurde mittlerweile schon bei Gadolinium (Gd) in Fluss- und Meerwasser festgestellt, da es durch den hohen Einsatz dieses Metalls, beispielsweise in der Medizin als Kontrastmittel in der Magnetresonanztomographie, zu einem erhöhten Eintrag in die aquatischen Systeme kommt. Ausgeprägte positive Anomalien (und somit anthropogene Belastungen) sind in den untersuchten Quellwässern nicht zu erkennen.

6.3.2 Persistente organische Schadstoffe

Warum werden persistente organische Schadstoffe in alpinen Blockgletscherquellen untersucht?

Persistente organische Schadstoffe wie PFAS (Per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen) und PAK (polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe) sind langlebige chemische Substanzen, die in der Umwelt unerwünscht sind und nicht ins Trinkwasser gelangen sollten. Im Projekt „RGAlpCatch“ wurde untersucht, ob an von Blockgletschern gespeisten Quellen und Bächen eine etwaige Hintergrundbelastung durch derartige Schadstoffe vorliegt. Aufgrund der abgelegenen, alpinen Einzugsgebiete der Blockgletscherquellen, wäre eine solche Belastung im Wesentlichen auf Einträge über die Luft und Niederschläge zurückzuführen. Es ist bereits bekannt, dass derartige Schadstoffe global auch in entlegenen Regionen nachweisbar sind.

Infobox – persistente organische Schadstoffe

Zur Ermittlung der Hintergrundkonzentrationen der Schadstoffgruppen PFAS und PAK wurden im Projekt AlpCatch insgesamt 14 ausgewählte Blockgletscherquellen und -bäche zweimal untersucht. Die Probenahmen erfolgten zum einen bei hoher Wasserführung der Blockgletscherquellen und -bäche im Juni bzw. Juli 2022 zum anderen bei niedriger Wasserführung im November 2022.

Die Einzelstoffanalytik der Wasserproben in Hinblick auf **per- und polyfluorierte Substanzen (PFAS)** erfolgte basierend auf der Norm DIN 38407-42:2011-03. Insgesamt wurden im Projekt „RGAlpCatch“ elf Perfluorcarbonsäuren (Kettenlänge C4–C14), zehn Perfluorsulfonsäuren (Kettenlänge C4–C13), drei Fluortelomersulfonsäuren und drei per- und polyfluorierte

Alkylethercarbonsäuren und -sulfonsäuren (Ersatzstoffe für PFOA und PFOS) in den Wasserproben analysiert. Im abgeschlossenen Projekt „RGHeavyMetal“ (DaFNE 101093) wurden zwölf Perfluorcarbonsäuren (Kettenlänge C3–C14), sieben Perfluorsulfonsäuren (Kettenlänge C4–C10) und ein Perfluoroctansulfonamid (PFOSA) in den Wasserproben analysiert.

Aus der Gruppe der **polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK)** wurden im Projekt „RGAlpCatch“ 16 Einzelstoffe analysiert: Anthracen, Fluoranthen, Naphthalin, Benzo(a)pyren, Benzo(b)fluoranthen, Benzo(k)fluoranthen, Benzo(g,h,i)perylen, Indeno(1,2,3-cd)pyren, Acenaphthen, Acenaphthylen, Benzo(a)anthracen, Dibenzo(a,h)anthracen, Chrysen, Fluoren, Phenanthren und Pyren. Nach Flüssig-Flüssigextraktion erfolgte die Messung mittels Gaschromatographie/Massenspektrometrie gemäß DIN 38407-39:2011-09.

Sind in den untersuchten Blockgletscherquellen persistente organische Schadstoffe nachweisbar?

Insgesamt waren in den Blockgletscherquellen bis auf einzelne Ausnahmen keine Belastungen durch polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) feststellbar. Diese Schadstoffe entstehen beispielsweise bei Verbrennungsprozessen, werden über die Luft transportiert und mit Niederschlägen abgelagert. Einzelbefunde sind möglicherweise auf regionale und lokale Belastungsfaktoren (Kleinfeuerung, Straßen, industrielle Anlagen) zurückzuführen. Von den 16 untersuchten PAK wurde nur Phenanthren an einer Messstelle (Radurschlalpe) in messbarer Menge nachgewiesen. Naphthalin und Phenanthren traten an einzelnen Quellen in äußerst geringen Konzentrationen (unter der Bestimmungsgrenze) auf.

Im Projekt „RGAlpCatch“ wurden einzelne PFAS in sehr niedrigen Konzentrationen (Tabelle 8) geografisch relativ verbreitet in Blockgletscherquellen gemessen. Insgesamt wurden jedoch höchstens zwei der 27 untersuchten PFAS gleichzeitig in einer Wasserprobe gefunden. Besonders häufig wurde die Substanz 6:2 Fluortelomersulfonsäure (6:2 FTS) detektiert. Vereinzelt gemessen wurden auch Perfluornonansäure (PFNA) und Perfluorbutansäure (PFBA). Im Vorgängerprojekt „RGHeavyMetal“ wurde insbesondere Trifluoressigsäure (TFA, als Trifluoracetat), eine ultrakurzkettige, im Boden und in Wasser sehr mobile PFAS-Einzelverbindung geografisch relativ verbreitet in Konzentrationen bis zu 0,24 µg/l (Tabelle 8) nachgewiesen. TFA wurde im Projekt „RGAlpCatch“ nicht untersucht.

Tabelle 8: Nachweishäufigkeiten und Maximalkonzentrationen quantifizierter PFAS in ausgewählten Blockgletscherquellen (DaFNE-Projekte „RGHeavyMetal“ 2018, „RGAlpCatch“ 2022). NG=Nachweisgrenze, BG=Bestimmungsgrenze, n=Anzahl Proben, n.n.=nicht nachweisbar, <BG=unterhalb Bestimmungsgrenze. Quelle: Universität Graz, Umweltbundesamt, BML, Ämter der Landesregierungen

PFAS	NG [µg/l]	BG [µg/l]	n	n.n.	< BG	quantifiziert	maximale Konzentration [µg/l]	maximale Konzentration [ng/l]
TFA	0,05	0,1	24	2	22	13	0,24	240
PFBA	0,0005	0,001	53	33	11	9	0,0044	4,4
PFHxA	0,00025	0,0005	53	51	1	1	0,00059	0,59
PFNA	0,00025	0,0005	53	46	3	4	0,0022	2,2
6:2 FTS	0,00025	0,0005	29	17	1	11	0,0073	7,3

Wie sind die Untersuchungsergebnisse zu bewerten?

Das durchaus verbreitete Auffinden der PFAS-Einzelverbindungen TFA und 6:2 FTS in den untersuchten Blockgletscherquellen (RGAlpCatch, RGHeavyMetal) verdeutlicht, wie wichtig chemikalienrechtliche Beschränkungen von persistenten organischen Schadstoffen zur Vermeidung und Verminderung des Eintrags derartiger Substanzen in die Umwelt (und auch in Trinkwasserressourcen) sind. Insbesondere die Einzelbefunde für PFNA (ein von der Europäischen Chemikalienagentur ECHA als „besonders besorgniserregender“ klassifizierter Stoff) zeigt zudem, dass lokal auch in entlegenen Gebieten mit problematischen Befunden zu rechnen ist.

7 Klimawandel

Die Alpen sind in besonders hohem Ausmaß von den Auswirkungen des Klimawandels betroffen. Die Lufttemperatur steigt im Schnitt um 0,3°C pro Dekade an und übertrifft damit den globalen Temperaturanstieg von 0,2°C pro Dekade deutlich (Hock et al., 2019). In den meisten alpinen und hochalpinen Einzugsgebieten prägt gegenwärtig die Schneedecke durch ihre Speicherfunktion im Winter und ihr Abschmelzen im Frühjahr die Abflussdynamik. Die Schneedeckendynamik ist jedoch besonders starken Veränderungen durch den Klimawandel unterworfen, mit entsprechenden Auswirkungen auf den Abfluss (Beniston et al., 2018). Zusätzlich verändert die Zunahme von Extremereignissen wie Starkniederschlägen oder Dürreperioden die Abflussdynamik über die Sommermonate, was gesamtheitlich eine große Herausforderung für zuverlässige wasserwirtschaftliche Prognosen ergibt.

Für die fünf Testgebiete wurden Modellierungen des künftigen Abflussverhaltens für die Klimaszenarien RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5 bis zum Jahr 2099 durchgeführt. Um die zu erwartenden Veränderungen quantifizieren zu können, wurden hierfür die Modellergebnisse des historischen Referenzzeitraums (1980–2009) den prognostizierten Veränderungen in naher Zukunft (2030–2059) und in ferner Zukunft (2070–2099) gegenübergestellt. Anhand des Testgebiets Steiermark werden beispielhaft die Ergebnisse der einzelnen Modellierungsschritte für alle Testgebiete dargelegt und erläutert (Abbildung 40). Alle Detailergebnisse der anderen Testgebiete sind dem Forschungsbericht Seelig et al. (2024) zu entnehmen. Die Ergebnisse dienen als Grundlage für die anschließende gemeinsame Beurteilung des Klimaeinflusses in allen Testgebieten.

Infobox – Klimadaten

Aufbauend auf den Ergebnissen der Niederschlags-Abfluss-Modellierung wurden Prognosen des zukünftigen Abflussverhaltens bis ins Jahr 2099 erstellt. Für die Prognose der zukünftigen Abflussdynamik wurde auf die ÖKS15 Klimaszenarien zurückgegriffen.

Der **ÖKS15**-Datensatz (Österreichische Klimaszenarien 2015) wurde erstellt, um eine Grundlage für die Klima- und Klimaimpaktforschung in Österreich zu schaffen. Das Ziel war es, für die Prognosen der Abflussmodellierung einen

einheitlichen, wissenschaftlich fundierten Klimadatensatz bereitzustellen, der auf die spezifischen Anforderungen der Forschung in Österreich zugeschnitten ist (Chimani et al., 2016, 2020). Der Datensatz enthält die Variablen Tagesmaximum und –minimum der Lufttemperatur, tägliche Niederschlagsmengen, sowie Globalstrahlung. Es sind drei Emissionsszenarien verfügbar, die drei unterschiedlichen Pfade der Sozioökonomischen Entwicklung widerspiegeln: **RCP8.5** – der fossile Weg, **RCP4.5** – der mittlere Weg und **RCP2.6** – der 2-Grad Weg. Je Emissionsszenario liegen mehrere Klimamodelle vor (8 Modelläufe für RCP2.6, 16 Modelläufe für RCP4.5 und 8.5). In Summe wurden somit 40 Modellrechnungen pro Messstelle durchgeführt. Die Ausgangsdaten aus dem EURO-CORDEX Archiv regionaler Klimasimulationen (Jacob et al., 2014) wurden mit einer trenderhaltenden Methode Bias-korrigiert (Switanek et al., 2017) und für Österreich auf einem 1x1 km Raster skaliert. Als Referenzdaten kamen SPARTACUS (Temperatur) und GPARD1 (der Vorgängerdatensatz zu SPARTACUS Niederschlag) zum Einsatz.

Wie wirkt sich der Klimawandel auf die Abflussdynamik des Testgebiets Steiermark aus?

Die prognostizierte Veränderung des Abflussverhaltens im Untersuchungsgebiet der Steiermark, Ingering- und Gaalgraben, ist in Abbildung 40 zusammengefasst. Das saisonale Abflussverhalten im historischen Referenzzeitraum (1980–2009) wird in Abbildung 40a der prognostizierten Veränderung in naher Zukunft (2030–2059, kräftig eingefärbt) bzw. in ferner Zukunft (2070–2099, blass eingefärbt) gegenübergestellt. Alle Prognosen sind nach den Klimaszenarien (RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5) aufgeschlüsselt, der Median je Emissionspfad ist als Linie dargestellt, die Prognoseunsicherheit (Spannweite der analysierten Klimamodelle je Emissionspfad) ist farblich hinterlegt.

Tendenziell wird eine Zunahme des durchschnittlichen Monatsabflusses im einstelligen Prozentbereich des Abflusses am Pegel Kettentörlquelle erwartet, insbesondere für die ferne Zukunft (Abbildung 40a). Diese Zunahme entspricht der tendenziell zunehmenden Niederschlagsmenge in den meisten Klimamodellen im Untersuchungsgebiet (Chimani et al., 2015; vgl. dazu auch Haslinger et al., 2023). Der Jahresgang der Quellschüttung erfährt eine deutliche Veränderung mit stärkerer Schüttung im Frühjahr (März, April, Mai) und geringerer Schüttung im Sommer (Juni, Juli, August). Diese Veränderung ist in erster Linie auf den Anstieg der Lufttemperatur zurückzuführen. Dadurch setzt die Schneeschmelze früher im Jahr ein, Frühjahrsniederschläge fallen zunehmend als Regen (statt als Schnee) und insbesondere die Sommermonate sind durch stärkere Evapotranspiration

gekennzeichnet. Die früher einsetzende Grundwasserneubildung füllt den Blockgletscher als Grundwasserspeicher zu Beginn des Frühjahrs, zu Sommerbeginn ist dieser bereits teilweise leergelaufen (Abbildung 40a).

Ähnliche Veränderungen des Abflussverhaltens werden für den Pegel Kettentörlbach erwartet (Abbildung 40b). Die prognostizierte mittlere Veränderung der zusammengefassten Blockgletschereinzugsgebiete des Untersuchungsgebiet Ingering- und Gaalgraben fällt ähnlich aus (Abbildung 40c). Dagegen zeigt die Prognose am Pegel Hammerjäger eine deutlich geringere Veränderung der Abflussdynamik im Jahresgang, trotz ähnlicher Gesamtänderung der Abflussmenge (Abbildung 40d). Der Grund dafür liegt einerseits in der niedrigeren mittleren Seehöhe des Einzugsgebietes Hammerjäger. Die Schneeschmelze spielt bereits gegenwärtig eine deutlich geringere Rolle als in den hochalpinen Einzugsgebieten, entsprechend wirken sich Veränderungen im jährlichen Schneeschmelzzyklus weniger drastisch auf die saisonale Abflussdynamik aus. Andererseits erlaubt der Porenraum der Sedimente (Grundwasserkörper) entlang des Haupttales und des Seckauer Beckens eine Zwischenspeicherung des früher anfallenden Schmelzwassers und ist damit in der Lage, die saisonale Verschiebung der Grundwasserneubildung abzupuffern. Der begrenzte Speicher der Blockgletscher im hochgelegenen Einzugsgebiet ist dagegen nicht in der Lage, die drastischen Veränderungen im alpinen Wasserhaushalt auszugleichen – einerseits aufgrund des hohen hydraulischen Gradienten (Hangneigung), andererseits aufgrund seiner begrenzten Ausdehnung im Vergleich zu den großflächigen Grundwasserkörpern der tiefer liegenden Tal- und Beckenlagen des Einzugsgebietes.

Eine detaillierte Aufschlüsselung der einzelnen Modellkomponenten unterstreicht die Änderung der Abflussdynamik an der Kettentörlquelle (Abbildung 41a): Das Modell prognostiziert zunehmend Regen und weniger Schnee während der Wintermonate, Boden- und Grundwasserspeicher sind daher während dieser Zeit stärker gefüllt. Im Frühjahr sticht insbesondere die geringere Schneeschmelze heraus, im Sommer nimmt das im Boden gespeicherte Wasser infolge stärkerer Evapotranspiration deutlich ab (Abbildung 41a). Parallel zur Kettentörlquelle zeigen die Aufschlüsselungen der Modellkomponenten für Kettentörlbach (Abbildung 41b), Blockgletscher-Einzugsgebiete im Untersuchungsgebiet Ingering- und Gaalgraben (Abbildung 41c) und Hammerjäger (Abbildung 41d) ähnliche Muster. Die Dynamik ist jedoch unterschiedlich stark ausgeprägt und unterstreicht die Rückschlüsse für die zukünftigen Abflussdynamik der Einzugsgebiete.

Abbildung 40: Prognostizierte Veränderung des Abflussverhaltens im Untersuchungsgebiet Ingering- und Gaalgraben (Steiermark) (a) am Pegel Kettentörlquelle, (b) am Pegel Kettentörlbach, (c) der Blockgletscher-Einzugsgebiete im Untersuchungsgebiet, (d) am Pegel Hammerjäger

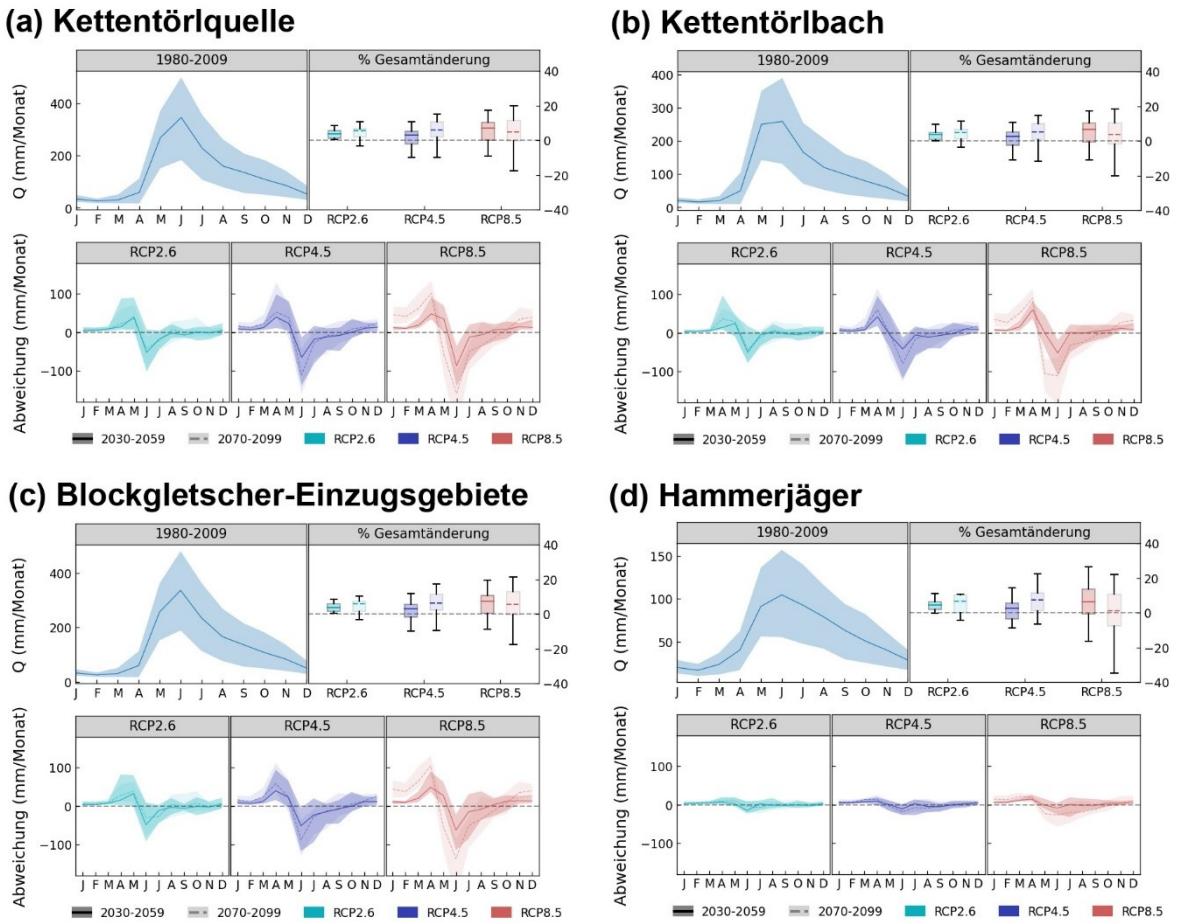


Abbildung 41: Prognostizierte Veränderung der einzelnen hydrologischen Komponenten im Untersuchungsgebiet Ingering- und Gaalgraben (Steiermark) an den Pegeln Kettentörlquelle (a) und Kettentörlbach (b). Die Balkendiagramm geben jeweils den Median der prognostizierten Veränderung aus dem Satz an Modelläufen pro Treibhausgasemissionspfades an (8 Modelläufe für RCP2.6, 16 Modelläufe für RCP4.5 und 8.5)

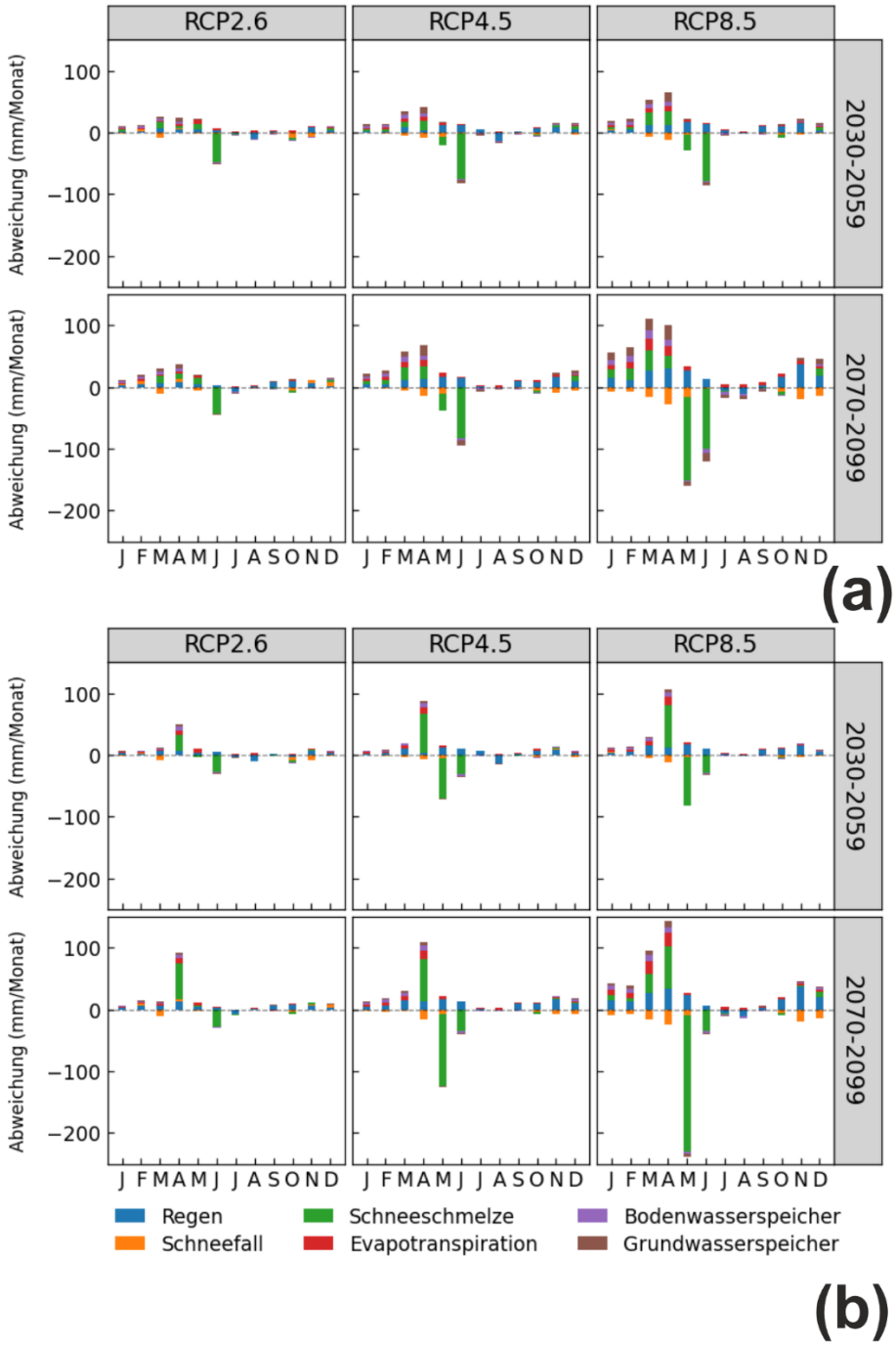
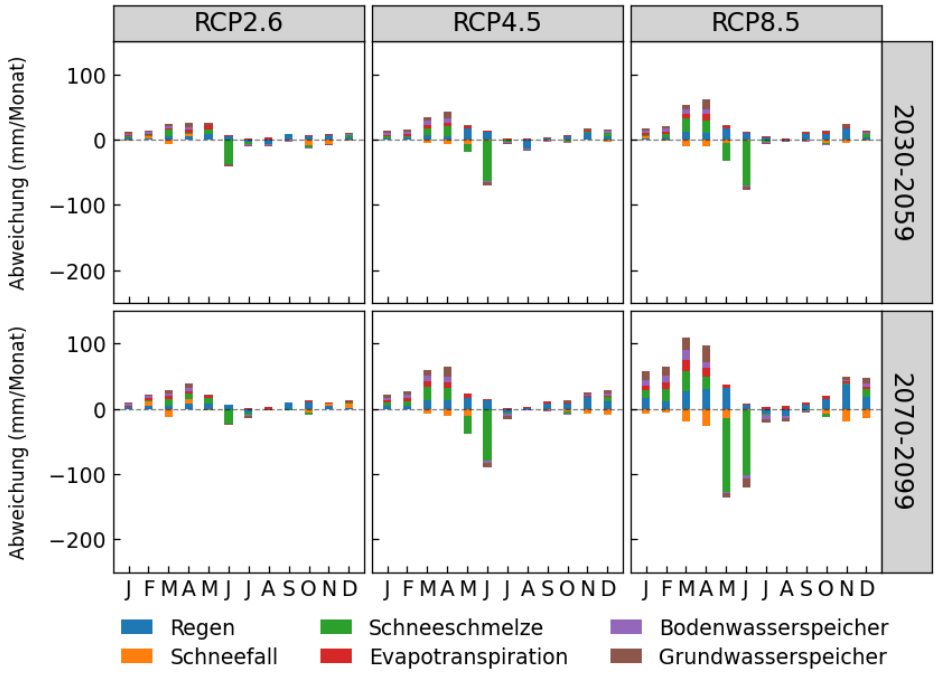


Abbildung 42: Prognostizierte Veränderung der einzelnen hydrologischen Komponenten im Untersuchungsgebiet Ingering- und Gaalgraben (Steiermark) am Pegel Hammerjäger. Die Balkendiagramm geben jeweils den Median der prognostizierten Veränderung aus dem Satz an Modelläufen pro Treibhausgasemissionspfades an (8 Modelläufe für RCP2.6, 16 Modelläufe für RCP4.5 und 8.5)



Sind die Auswirkungen für alle Testgebiete verteilt über den österreichischen Alpenraum gleich?

Die fünf Untersuchungsgebiete des vorliegenden Projektes unterscheiden sich abgesehen von ihrer geographischen Lage (verteilt über den gesamten österreichischen Alpenraum) hinsichtlich (i) ihrer Schneedeckenentwicklung, (ii) der Verteilung der Blockgletscher im Einzugsgebiet, (iii) der Boden- und Vegetationsbedeckung, (iv) der klimatischen Rahmenbedingungen und (v) dem Festgesteinsuntergrund. Der Einfluss des Klimawandels auf das Abflussverhalten ist in allen Untersuchungsgebieten deutlich erkennbar und je nach Region unterschiedlich ausgeprägt:

- Für die Untersuchungsgebiete in der Steiermark (Ingering- und Gaalgraben), in Salzburg (Lantschfeld und Taurachtal) und in Kärnten (Hintereggengraben) wird tendenziell eine leichte Zunahme der jährlichen Abflussmenge erwartet (Tabelle 9). Nur vereinzelt an Pegeln für die ferne Zukunft und RCP4.5/8.5 werden leichte

Abnahmen der jährlichen Abflussmenge errechnet. Für die beiden Untersuchungsgebiete im Westen Österreichs (Radurschltal in Tirol, Vergalda- und Valzifenztal in Vorarlberg) wird dagegen tendenziell eine Abnahme prognostiziert.

- Im Vergleich zum historischen Referenzzeitraum (1980 – 2009) zeigen die Zukunftsprognosen je Testgebiet eine zeitlich unterschiedliche Verschiebung des Abflussregimes:

  - Im **Frühjahr** zeigt sich generell eine **Abflusszunahme**. In den tiefer gelegenen Einzugsgebieten im Osten (Steiermark, Kärnten, Salzburg) und generell den übergeordneten Flusssysteme nimmt der Abfluss im März, April und Mai zu, in den höher gelegenen Einzugsgebieten im Westen (Vorarlberg, Tirol) nimmt er im April, Mai und Juni zu (Abbildung 43). Diese Zunahme ist für pessimistische Klimaszenarien stärker ausgeprägt als für optimistische und in der fernen Zukunft (2070–2099) markanter als in der nahen Zukunft (2030–2059).

  - Anschließend folgt ein **sommerliches Abflussdefizit**, wieder grob nach Seehöhe gestaffelt: Für die östlicher gelegenen Einzugsgebiete (Steiermark, Salzburg, Kärnten) werden geringere Abflüsse im Juni und Juli prognostiziert, für die westlicher gelegenen Gebiete (Tirol, Vorarlberg) im Juli und August (Abbildung 43). Für die tiefer gelegenen östlichen Gebiete wird darüber hinaus ein **erhöhter Abfluss während der Wintermonate** vorhergesagt.

  - Die Stärke dieser Veränderungen fällt je nach h**ydrogeologischen Eigenschaften des Einzugsgebiets** unterschiedlich aus: (i) kleine Einzugsgebiete mit begrenzten Grundwasserspeichern (z.B. Arzkarquelle, Vergaldaalpe) zeigen starke Veränderungen, (ii) große Einzugsgebiete mit mächtigen Grundwasserkörpern (z.B. Mauterndorf, Hammerjäger) zeigen dagegen deutlich abgepufferte Auswirkungen.

Abbildung 43: Regional und lokal unterschiedlich starke und zeitlich verschobene Auswirkungen des Klimawandels auf die Abflussregime der Untersuchungsgebiete der fernen Zukunft (2070–2099) zur Bezugsperiode (1980–2009). Obere Zeile: Blockgletscherquellen in den fünf Untersuchungsgebieten des Projekts. Untere Zeile: Übergeordnete Flusssysteme in den vier Untersuchungsgebieten, in denen Daten dazu vorliegen. Die Linien stellen jeweils den Median der einzelnen Modellläufe zu jedem Treibhausgas-Emissionspfad dar

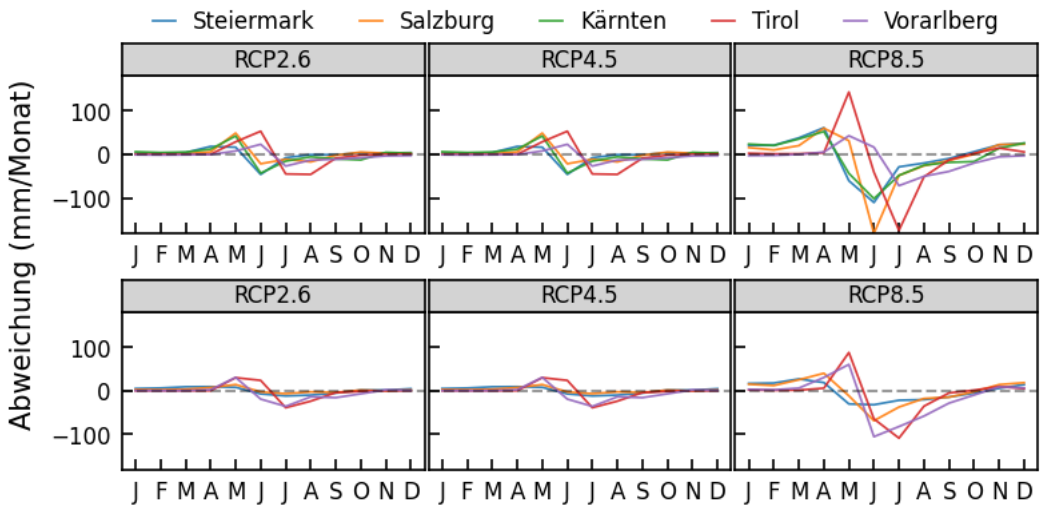


Tabelle 9: Prognostizierte Änderung des Jahresabflusses für die drei simulierten Treibhausgasemissionspfade (RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5), jeweils dargestellt für die nahe Zukunft (2030–2059) und die fernere Zukunft (2070–2099) im Vergleich zur Bezugsperiode (1980–2009). Angegeben ist jeweils der Median aller simulierten Klimamodelle, die vollständige Bandbreite der jeweiligen simulierten Klimamodelle ist in Abbildung 40 dargestellt

Einzugsgebiet	**RCP 2.6**		**RCP 4.5**		**RCP 8.5**	
	Nahe Zukunft	**Ferne Zukunft**	**Nahe Zukunft**	**Ferne Zukunft**	**Nahe Zukunft**	**Ferne Zukunft**
Ingering- und Gaalgraben (Steiermark)						
Kettentörlquelle	3,6 %	4,8 %	2,6 %	4,6 %	6,3 %	2,0 %
Kettentörlbach	3,9 %	5,0 %	2,9 %	5,6 %	6,9 %	4,0 %
Hammerjäger	4,6 %	6,4 %	2,6 %	7,3 %	6,2 %	0,9 %
Lantschfeld und Taurachtal (Salzburg)						
Lantschfeldquelle	0,9 %	1,7 %	2,6 %	-1,2 %	2,1 %	-2,5 %
Postalm	0,4 %	2,3 %	3,2 %	-0,4 %	2,1 %	-6,8 %
Mauterndorf	1,0 %	3,4 %	4,1 %	3,8 %	2,7 %	2,7 %
Hintereggengraben (Kärnten)						
Buchleitenquelle	1,8 %	2,8 %	1,0 %	3,0 %	2,2 %	0,6 %
Ochsenhütte	2,1 %	2,4 %	0,9 %	3,1 %	2,1 %	-1,2 %
Ruppalm	2,0 %	2,5 %	1,2 %	3,7 %	3,2 %	2,9 %
Radurschltal (Tirol)						
Arzkarquelle	-1,2 %	-2,0 %	-2,8 %	-0,3 %	-1,3 %	-6,0 %
Vorderes Bergle	-0,5 %	-1,0 %	-2,1 %	0,8 %	1,9 %	-4,3 %
Radurschlalpe	-2,8 %	-6,1 %	-6,7 %	-2,1 %	-2,3 %	-18,5 %
Vergalda- und Valzifenztal (Vorarlberg)						
Rotbühelquelle	-5,5 %	-6,4 %	-3,3 %	-6,2 %	-6,8 %	-17,6 %
Vergaldaalpe	-4,6 %	-5,6 %	-1,8 %	-3,5 %	-5,4 %	-14,5 %
Gargellen	-6,0 %	-6,3 %	-3,0 %	-5,5 %	-7,6 %	-19,3 %

Wie anhand der fünf Untersuchungsgebieten aufgezeigt werden kann, ist je nach Region und Klimamodell eine leicht positive oder negative Gesamtänderung in den Abflüssen zu erkennen. Für die fünf Gebiete ist ein Ost-Westgefälle erkennbar, d.h. tendenziell mehr Niederschlag und folglich auch Abfluss im Osten (Untersuchungsgebiete in Steiermark, Salzburg und Kärnten) und tendenziell weniger Niederschlag und folglich weniger Abfluss im Westen (Untersuchungsgebiet in Tirol und Vorarlberg). Eine unmittelbare Übertragung auf andere Regionen ist zwar nicht ohne Weiteres möglich, doch lassen sich übergreifende Veränderungen durchaus in ihrem saisonalen Verlauf erkennen.

Die saisonale Veränderung des Abflusses wird auf den prognostizierten Anstieg der Lufttemperatur im Alpenraum zurückgeführt, in deren Folge sich drei wesentliche Komponenten der Grundwasserneubildung verändern (Barnett et al., 2005; Benettin et al., 2018; Hock et al., 2019):

- Infolge des Temperaturanstiegs nimmt der flüssige Anteil am Winterniederschlag zu, d.h. es fällt zunehmend mehr Regen als Schnee. Dies erhöht die Abflüsse im Winter und führt zu kürzeren Schneedeckendauern.
- Früher im Jahr einsetzende Regenfälle und erhöhte Temperaturen führen zu früherem Abschmelzen der winterlichen Schneedecke, was die Abflussspitzen alpiner Gewässer beeinflusst. Die stärksten Abflüsse verschieben sich vom späten Frühjahr und Frühsommer (Juni, Juli) in den April und Mai.
- Die höheren Lufttemperaturen führen zu verstärkter Evapotranspiration, die sich insbesondere in den Sommermonaten auf den Wasserhaushalt der Einzugsgebiete auswirkt. In der Folge nehmen die Abflüsse im Sommer ab. Darüber hinaus werden die hochalpinen Grundwasserspeicher früher aufgefüllt (frühere Schneeschmelze), geben aber auch entsprechend früher wieder Wasser ab, sodass im Sommer ein geringerer Basisabfluss zur Verfügung steht.

Das Zusammenspiel von veränderter Niederschlagsphase (flüssig/fest), veränderter Schneedeckendynamik (kürzere Dauer, früheres Abschmelzen) und erhöhter Evapotranspiration (insbesondere im Sommer) erklärt die prognostizierten saisonale Veränderungen des Abflussregimes. In Abhängigkeit der klimatischen Rahmenbedingungen, der Höhenlage und Exposition, und der hydrogeologischen Eigenschaften des Einzugsgebiets wirkt sich dieses Zusammenspiel lokal unterschiedlich aus. Die veränderte Schneedeckendynamik prägt die Abflussregime in alpinen Einzugsgebieten besonders, diese Änderung wird in Abbildung 44 dargestellt. Der Median (Linie) und die Schwankungsbreite (farblich hinterlegt) der Klimamodelle sind pro

Szenarien für die nahe Zukunft (2030–2059, kräftig dargestellt) bzw. für die ferne Zukunft (2070–2099, blass dargestellt) relativ zur Bezugsperiode (1980–2009) abgebildet. Die Schneedecke nimmt generell deutlich ab, wobei zeitliche Unterschiede in Abhängigkeit der Höhenlage der Einzugsgebiete vorliegen (Abbildung 44). In den tiefer gelegenen Einzugsgebieten der Kettentörlquelle (a) und Lantschfeldquelle (b) zeigt sich die Abnahme insbesondere im Frühjahr, in den höher gelegenen Einzugsgebieten der Arzkarquelle (c) und Rotbühelquelle (d) im Frühsommer. Die nach Höhenstufe gestaffelte Anordnung ist deutlich erkennbar.

Ähnlich verhält es sich bei den Einzugsgebieten der übergeordneten Flusssysteme (Abbildung 45): Die niedriger gelegenen Einzugsgebiete der Pegel Hammerjäger (a) und Mauterndorf (b) erfahren die stärkste Veränderung im Spätwinter und Frühjahr, die höher gelegenen Einzugsgebiete Radurschlalpe (c) und Gargellen (d) im späten Frühjahr.

Abbildung 44: Prognostizierte Veränderung der Schneedeckendynamik, dargestellt als mittleres Schnee-Wasser-Äquivalent (SWE) der Schneedecke in den Einzugsgebieten von vier Blockglescherquellen: (a) Kettentörlquelle im Untersuchungsgebiet Ingering- und Gaalgraben, Steiermark. (b) Lantschfeldquelle im Untersuchungsgebiet Lantschfeld und Taurachtal, Salzburg. (c) Arzkarquelle im Untersuchungsgebiet Radurschltal, Tirol. (d) Rotbühelquelle im Untersuchungsgebiet Vergalda- und Valzifenztal, Vorarlberg

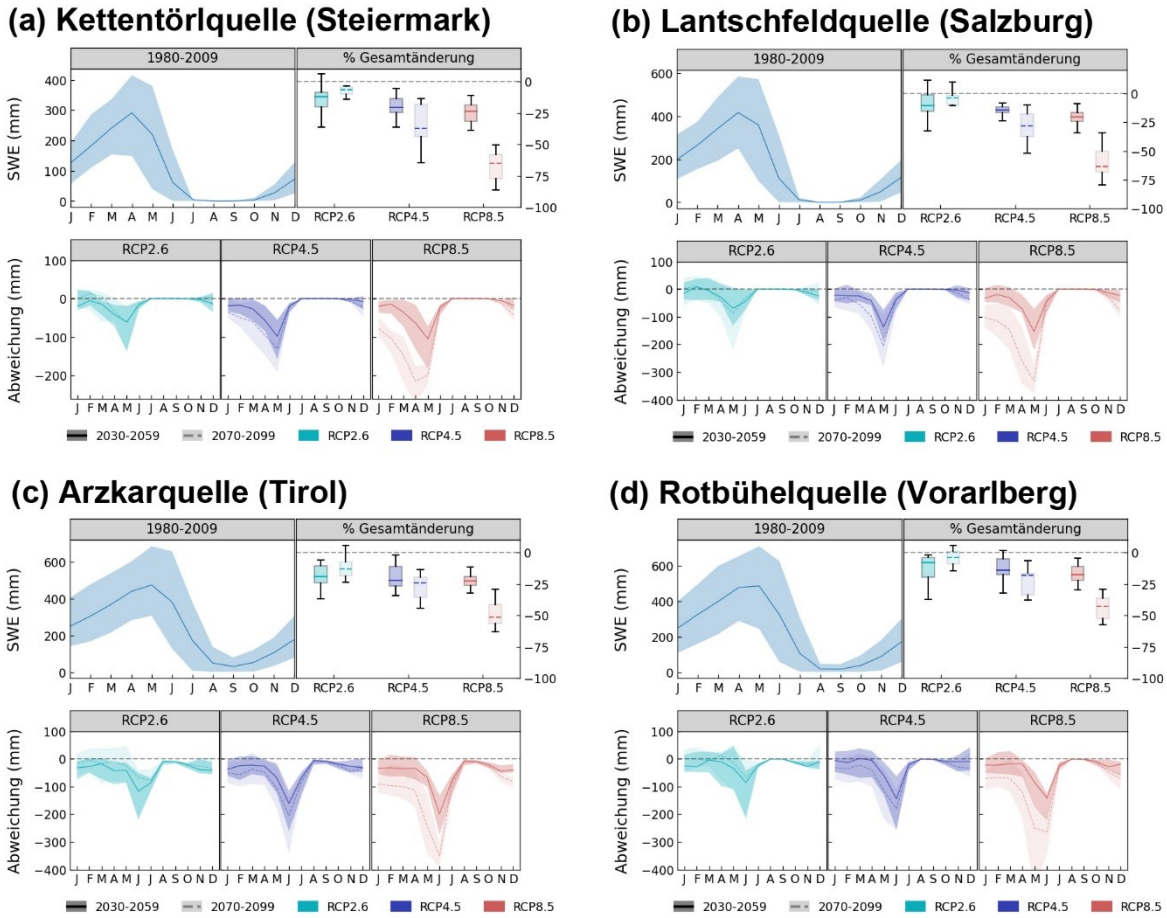
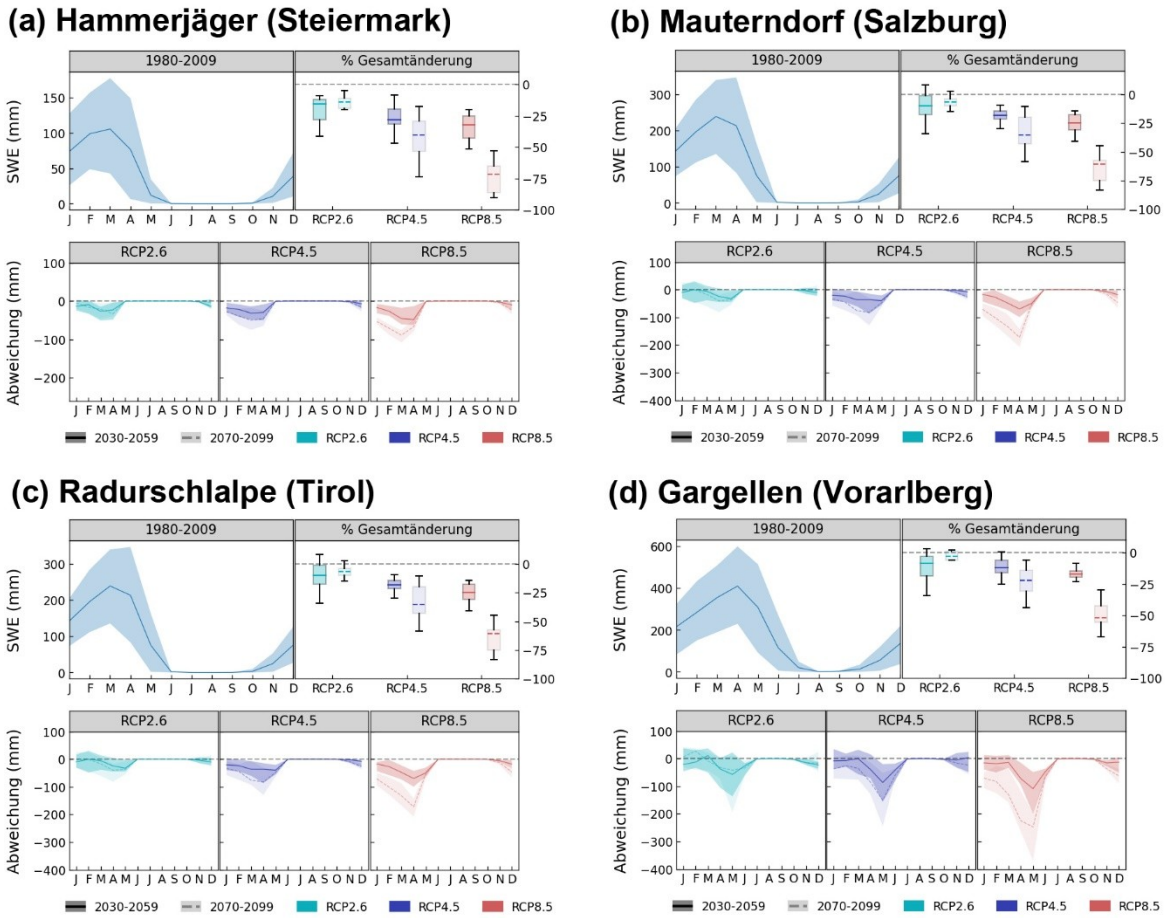


Abbildung 45: Prognostizierte Veränderung der Schneedeckendynamik, dargestellt als mittleres Schnee-Wasser-Äquivalent (SWE) der Schneedecke in den Einzugsgebieten von vier übergeordneten Flüssen: (a) Ingeringbach am Pegel Hammerjäger im Untersuchungsgebiet Ingering- und Gaalgraben, Steiermark. (b) Lungauer Taurach am Pegel Mauterndorf im Untersuchungsgebiet Lantschfeld und Taurachtal, Salzburg. (c) Radurschlbach am Pegel Radurschlalpe im Untersuchungsgebiet Radurschltal, Tirol. (d) Suggadinbach am Pegel Gargellen im Untersuchungsgebiet Vergalda- und Valzifenztal, Vorarlberg



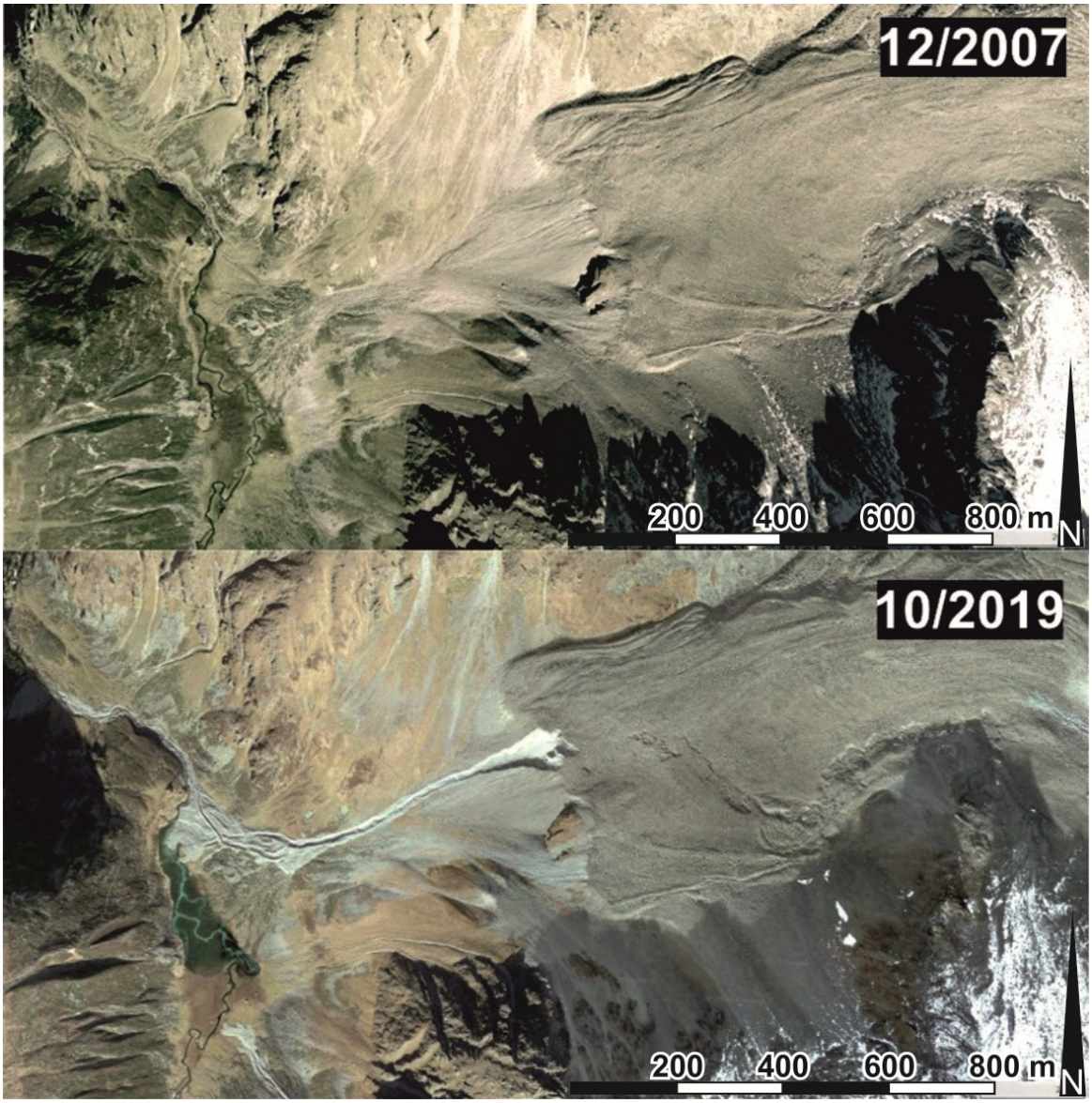
Insgesamt fällt die Abnahme der Schneemenge in den hochgelegenen Quell- und Fluss-Einzugsgebieten deutlicher aus, da diese gegenwärtig noch stärker von der winterlichen Schneedecke geprägt werden (Abbildung 44 und Abbildung 45). Die zeitliche Verschiebung und abnehmende Intensität der Schneeschmelze ist ein bedeutender Faktor für die zukünftig veränderte Abflussdynamik.

Mächtige Aquifere, wie etwa sedimentäre Talfüllungen oder Karstgrundwasserleiter in den in Salzburg, Vorarlberg oder der Steiermark gelegenen Untersuchungsgebieten,

puffern diese Effekte bis zu einem gewissen Grad ab, sie gleichen sie aber nicht vollständig aus. Insgesamt zeigt sich der dominante Einfluss der Schneedecke auf das Abflussverhalten alpiner und hochalpiner Einzugsgebiete mit variablem Blockgletscheranteil (als Grundwasserspeicher), und somit prägen Änderungen der Schneedeckendynamik die Prognosen des zukünftigen Abflussverhaltens. Dies betrifft die zukünftige Verfügbarkeit der Wasserressourcen im österreichischen Alpenraum und sollte im Sinne einer nachhaltigen wasserwirtschaftlichen Planung berücksichtigt werden.

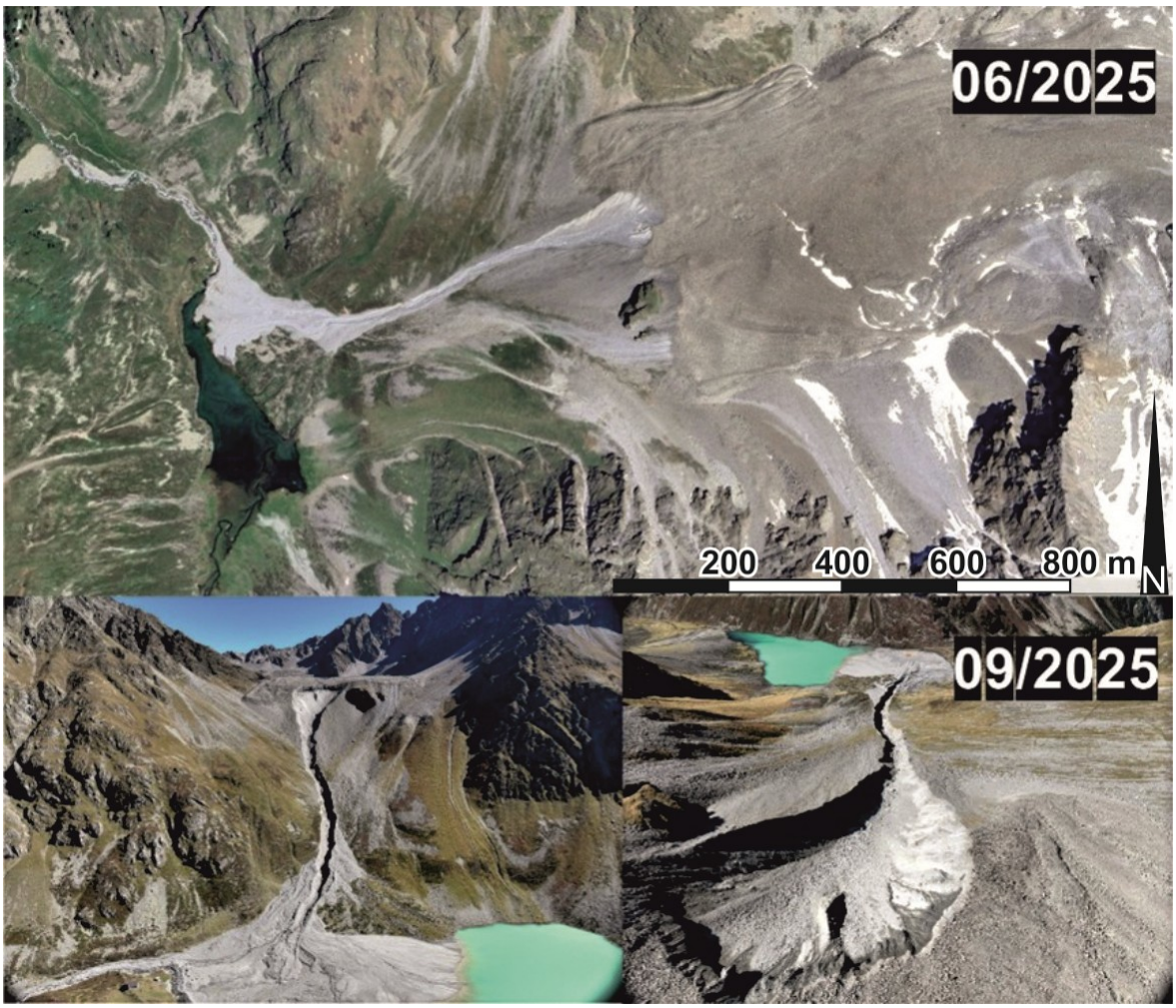
Blockgletscher stellen nicht nur eine bedeutende Wasserressource dar, sondern bergen auch ein erhebliches Naturgefahrenpotenzial, wie Ereignisse im Sommer 2019 und 2025 im Tiroler Radurschltal zeigten (Abbildung 46 und Abbildung 47). Dort führte im Sommer 2019 das plötzliche Entleeren eines auf dem Hüttekar-Blockgletscher entstandenen Thermokarstsees mit ca. 160000 m³ Wasser über unterirdische Schmelzwasserkanäle zu einer Hangmure, die große Sedimentmengen mobilisierte, den Radurschlbach aufstaute und den Gampesee bildete (Seelig et al., 2023). Die dabei wirksamen Prozesse sind ein rascher Abfluss über diskrete Kanäle im Eis-Schutt Gemisch des Blockgletschers (Thermokarstkanäle) und ein effizienter Wärmetransport durch Konvektion im Thermokarstsee, was den Schmelzprozess des Permafrosteises beschleunigte. Der daraus resultierende Wasserandrang an der Stirn des Blockgletschers destabilisierte diese und löste eine Hangmure aus. Solche Thermokarstkanäle konzentrieren den Wassertransport auf wenige, bevorzugte Fließpfade mit hoher Strömungsgeschwindigkeit und bergen die Gefahr plötzlicher Wasseraustritte (Seelig et al., 2025a,b). Die nun vorhandenen Thermokarstkanäle ermöglichten im Sommer 2025 einen weiteren Hangmurenabgang, der sich nach einem lokalen Starkniederschlagereignis am 30. Juni ereignete. Die Thermokarstkanäle ermöglichten, dass das Niederschlagswasser aus dem hydrologischen Einzugsgebiet in kurzer Zeit gebündelt zur Stirn strömte, dort Lockergesteinsmassen mobilisierte und neuerlich eine Hangmure auslöste. Die Abbildung 46 und Abbildung 47 geben einen Überblick über die zeitliche Landschaftsentwicklung im Radurschltal vor dem ersten Hangmurereignis 2019, danach und nach dem Hangmurgang 2025. Die Erkenntnisse unterstreichen die geotechnische Relevanz gefrorener Schuttkörper und die Notwendigkeit, Thermokarstprozesse für eine fundierte Risikoabschätzung in hochalpinen Lagen zu verstehen.

Abbildung 46: Satellitenaufnahmen des Stirnbereichs Hüttekarblockgletscher vor (2007) und nach dem Murgang 2019.



Aufnahmen 2007, 2019 Google Earth Pro (2025)

Abbildung 47: Satellitenaufnahmen des Stirnbereichs Hüttekarblockgletscher nach dem Murgang 2025. Die beiden Bilder 09/2025 zeigen die Vermurung nach dem 2. Hangmurgang



Aufnahmen 06/2025 Google Earth Pro (2025); Fotos 09/2025: Melina Frießenbichler)

8 Schlussfolgerungen

Mit dem Vorprojekt RGHeavyMetal (101093; Wagner et al, 2019) wurden im Sinne des Wasserrechtsgesetzes 1959 idgF bzw. des Nationalen Gewässerbewirtschaftungsplans und in Umsetzung der EU-Wasserrahmenrichtlinie 2000/60/EG wesentliche Grundlagen zur Beschreibung der Charakteristik der hochalpinen Porengrundwasserkörper in Blockgletschern geschaffen. Die Ergebnisse weisen neben qualitativen Aspekten vor allem auch quantitativ auf die künftigen Herausforderungen in Bezug auf das Spannungsfeld der immer intensiveren Nutzung und dem Schutz des äußerst sensiblen Ökosystems alpiner Einzugsgebiete hin.

Im Projekt RGAlpCatch (101561; Seelig et al., 2024) konnten das Speichervermögen und **der Einfluss von Blockgletscher als Grundwasserspeicher auf die hochalpine Entwässerungsdynamik** quantitativ und qualitativ erfasst werden, und nachstehende Erkenntnisse erarbeitet werden:

- Blockgletscher sind wesentliche Grundwasserspeicher im alpinen Raum, welche Wasser in Form von Permafrosteis und Grundwasser in einer Größenordnung von ca. 0,9 km³ bzw. 0,6 km³ speichern können. Dies entspricht ca. dem 2,2-fachen bzw. 1,4-fachen des jährlichen Trinkwasserbedarfs Österreichs.

- Die Speicherpotentiale der Blockgletscher werden sich auch langfristig nicht wesentlich ändern. Es wird eine leichte Verschiebung des in Form von Permafrosteis gespeicherten Wassers zu Grundwasser erfolgen, da durch das im Vergleich zu Gletschereis langsame Abschmelzen des Permafrosteises weiterer Porenraum als Grundwasserspeicher zur Verfügung stehen wird.

- Der Aufbau und die interne Struktur von Blockgletschern sowie deren Einzugsgebiete begünstigen die Speicher- und Pufferfunktion und in weiterer Folge einen sehr hohen Grundwasseranteil im Abfluss in darunterliegenden Oberflächengewässer. Bei Gewässern erster Ordnung liegt beim gemittelten Langzeitabfluss der Anteil der schnellen, oberflächigen und oberflächennahen Abflusskomponente in der Regel weit unter 20 %, der Rest ist Grundwasser.

- In übergeordneten Einzugsgebieten (bis 200 km²), die primär aus kristallinen Gesteinen aufgebaut sind, ist der Abflussanteil, der aus Gebieten stammt, die durch Blockgletscher entwässern, temporär überproportional groß und erreicht bis zum 4-fachen der Flächenausdehnung des Blockgletschereinzugsgebietsanteils (Wagner et al., 2016). In den Gerinnen erster Ordnung (wenige km²) entspricht der Abflussanteil zur Zeit des Basisabflusses nahezu 100 %.

- Karstaquifere im Einzugsgebiet und/oder großvolumigen Sedimentfüllungen in den Tallagen reduzieren den Einfluss der Blockgletschereinzugsgebiete auf den Abfluss übergeordneter Einzugsgebiete (Bsp. Mauterndorf oder Suggadinbach) deutlich.

- Aufgrund ihrer entlegenen Lage im Gebirge sind Blockgletscher als Grundwasserleiter vor anthropogenen Verunreinigungen relativ gut geschützt. Des Weiteren liegen die mittleren Verweilzeiten aufgrund der guten Speicherkapazität im Bereich von mehreren Monaten. Vereinzelt konnten dennoch Verunreinigungen über atmosphärischen Eintrag wie bspw. von PFAS nachgewiesen werden.

Die Modellierungsergebnisse der **Klimaszenarien** ergaben, dass künftig eine saisonale Verschiebung der Abflussdynamik zu erwarten ist; und es generell zu leichten Zu- und Abnahmen der mittleren jährlichen Gesamtschüttungen je nach Klimamodell kommen kann.

- Im Frühjahr/Frühsommer werden höhere Abflüsse für alle Testgebiete erwartet. Die Sommermonate werden hingegen durch ein ausgeprägtes Abflussdefizit gekennzeichnet sein.

- Wesentlicher Einflussfaktor im Frühjahr ist die Änderung der Schneedeckendynamik, da vor allem bei tiefer gelegenen Einzugsgebieten die Schneeschmelze früher einsetzen wird. Zusätzlich zeigt sich, dass Wärmeperioden während der Wintermonate den Basisabfluss erhöhen können.

- Daraus resultierend beginnt das Auslaufen der Grundwasserspeicher ebenfalls früher. In Kombination mit den zu erwartenden höheren Lufttemperaturen und damit auch höherer Evapotranspiration in den Sommermonaten ergibt sich ein deutlich ausgeprägtes Abflussdefizit in den Sommermonaten.

- Die Ergebnisse zeigen eine deutliche Korrelation zu den Seehöhen der Einzugsgebiete: tiefer gelegene reagieren früher auf die Änderungen als höher gelegene.

Aufgrund des Klimawandels und des damit verbundenen Anstiegs von Extremereignissen (Starkniederschläge aber auch Dürreereignisse) und Änderung der Schneedeckendynamik unterliegt das Abflussverhalten in alpinen Einzugsgebieten stetigen Änderungen. Je nach simulierten Treibhausgasemissionspfad und Klimamodell bzw. ferne oder nahe Zukunft zeigt sich in der mittleren jährlichen Gesamtschüttung im Median eine Änderung zur Bezugsperiode von +7,3% bis -19,3%.

Die **wasserwirtschaftlich relevanten Aspekte** des Klimawandeleinflusses auf Blockgletscher als Grundwasserspeicher und darunterliegende Oberflächengewässer können nachstehend zusammengefasst werden:

- Blockgletscher stellen langfristig wesentliche Wasserspeicher dar. Wasser wird sowohl als Permafrosteis, welches nur langsam abschmilzt, als auch als Grundwasser gespeichert und entsprechend verzögert abgegeben. Der Einfluss von Klimawandel auf die Speicherfunktion ist somit deutlich geringer ausgeprägt als bei Gletschern. Somit ist auch eine nachhaltige und langfristige wasserwirtschaftliche Nutzung gegeben.

- Aufgrund der Lage im Gebirge sind die Grundwasserleiter und die darin gespeicherten Grundwasserressourcen weitestgehend vor anthropogenen Verunreinigungen geschützt. Eine Hintergrundbelastung durch atmosphärisch eingetragene Schadstoffe wie PFAS konnte vereinzelt dennoch festgestellt werden.

- Die Abflussdynamik wird wesentlich durch die Schneedeckendynamik geprägt, was eine deutliche Verschiebung der Abflussdynamik von Blockgletschern als Grundwasserleiter und der darunterliegenden Einzugsgebiete bedeutet. Während im Winter und vor allem im Frühjahr höhere Abflüsse zu erwarten sind, wird in den Sommermonaten der Abfluss deutlich zurückgehen.

- Insgesamt kann von einer Zunahme der Abflussmengen im einstelligen Prozentbereich im Osten bis zum Ende des 21. Jahrhunderts ausgegangen werden. In den westlichen Untersuchungsgebieten wird dagegen eine leichte Abnahme der Abflussmenge erwartet, die lokal unterschiedlich ausfällt – je nach Untersuchungsgebiet im einstelligen bis niedrigen zweistelligen Prozentbereich.

- Die interne Struktur und vor allem der Permafrosteiskörper bei intakten Blockgletschern ermöglicht die Bildung von Thermokarstseen, die sich rasch entleeren und große Gesteinsschuttmengen an der Stirn von Blockgletschern mobilisieren können. Dies stellt eine potentielle Naturgefahr dar, die sich aufgrund der steigenden Temperaturen und dem damit verbundenen Abschmelzen des Permaforsteises im alpinen Raum erhöhen kann.

Die Kenntnis über die potentiellen Wasserressourcen in Blockgletschern und eine Einzugsgebietscharakterisierung ermöglichen eine planbare, nachhaltige Nutzung. Die Ergebnisse zeigen klare Änderungen der Abflussdynamik und ermöglichen eine Identifizierung des Hauptfaktors Schneedeckendynamik dieser Änderungen. Dies ermöglicht in weiterer Folge, konkret darauf abgestimmte Untersuchungen durchzuführen. Somit ist anzustreben, dass künftig ein besseres Prozessverständnis für die unterschiedliche Grundwasserneubildung durch Schnee bzw. Regen sowohl quantitativ wie auch qualitativ generiert wird. Dadurch kann sich die öffentliche Hand frühzeitig mit den damit zusammenhängenden künftigen Herausforderungen und möglichen Gefahren für die bewohnten Gebirgstäler auseinandersetzen und zielgerichteter vorbereiten. Dies umfasst beispielsweise den erwarteten Rückgang der Schüttung der zur Wasserversorgung verwendeten Quellen in den Sommermonaten. Die Ergebnisse sind eine Hilfestellung für eine nachhaltige Wasserversorgung alpiner Bereiche, die im Spannungsfeld zwischen steigendem Tourismus und erforderlichem Schutz sowie nachhaltiger Nutzung der Wasserressourcen steht. Des Weiteren liefern die daraus gewonnenen Erkenntnisse ergänzende Informationen zur umfassenden Studie des BML „Wasserschatz Österreich“ (Lindinger et al., 2021). Es wurden Grundlagen erarbeitet, die zum besseren Verständnis des Abschmelzprozesses des Permafrosteises in Blockgletschern beitragen. Dies ist vor dem Hintergrund des Themas „Naturgefahren in touristisch genutzten Regionen“ von Relevanz.

In RGAlpCatch wurden Grundlagen zur Beantwortung der Fragen zur Sicherung einer dauerhaften quantitativen Wasserversorgung von Tourismus-(Schi-)-Regionen erarbeitet. Es können darauf aufbauend Perspektiven für eine künftige Entwicklung (Ersatz oder Ergänzung) der Wasserversorgung inneralpiner Siedlungsgebiete aufgezeigt werden, welche bei begrenztem „Raumangebot in Tallagen“ zusehends mit raumplanerischen Konflikten zwischen ordnungsgemäßen Schutz der Wasserversorgung und beispielsweise Baulandbegehrlichkeiten zu kämpfen haben. Die hydrologischen Messungen an Blockgletscherquellen stellen des Weiteren eine deutliche Verdichtung des Grundwassermessstellennetzes des Hydrografischen Dienstes Österreichs zur Umsetzung

der Wasserkreislauferhebungsverordnung (WKEV) in den großflächigen, kristallinen Einzugsgebieten im alpinen bis hochalpinen Raum dar. Gleichermaßen trifft das auch auf die hydrochemischen Messungen zur Umsetzung der Gewässerzustandsüberwachungsverordnung (GZÜV) zu. Diese Verdichtung resultiert in einem verbesserten Bild über die detaillierten wasserwirtschaftlichen Verhältnisse im Bereich von Blockgletschern und darunterliegenden Fließgewässern. Neben dem Aspekt der Trink- und Nutzwasserversorgung durch die Quellen wird auch das Abflussverhalten der daraus entstehenden Fließgewässer wesentlich detaillierter beschrieben, was in Bezug auf z.B. Hochwasserrisikomanagementpläne wichtige Grundlagen liefert.

Die Projektergebnisse zeigen auch, dass noch einiger **Forschungsbedarf** vorliegt, um für die künftigen Herausforderungen in Bezug auf das Spannungsfeld der immer intensiveren Nutzung und dem Schutz des äußerst sensiblen Ökosystems alpiner Einzugsgebiete gerüstet zu sein. Dies umfasst im Wesentlichen zwei Themenbereiche:

- Schnee ist eine wesentliche Grundwasserneubildungskomponente, deren künftige Änderungen der Akkumulation und Ablationsphasen und die damit verbundenen Auswirkungen auf das Grundwasser in alpinen Regionen noch umfassender Untersuchungen bedürfen.

- Die Ergebnisse des Untersuchungsgebiets Lantschfeld in Salzburg haben gezeigt und bestehende Fachkenntnisse bestätigt, dass Karstaquifere bei der Entwässerung im alpinen Raum eine wesentliche Rolle spielen. Die Auswirkungen von Klimawandel auf diese hoch komplexen karbonatischen, kalkalpinen Grundwasserleiter und ihrer Entwässerungssysteme sind aber noch weitgehend unerforscht, obwohl das hydrogeologische Verständnis von Karstgrundwasserleiter auf eine sehr lange Forschungsgeschichte zurückblicken kann.

Für eine erweiterte, nachhaltige und zukunftsorientierte wasserwirtschaftliche Planung bzw. Gesamtzusammenschau der Trink- und Nutzwasserversorgung sind gleichermaßen die kalkalpinen Gesteinsformationen Österreichs mit deren großen Grundwasserressourcen von ebenso hoher Relevanz und Notwendigkeit. Eine quantitative Erfassung der klimatischen Auswirkungen auf diese Wasserressourcen, vor allem in Bezug auf die Schneedeckendynamik, ist in gleichem Maße anzustreben. Im Hinblick auf den rasant fortschreitenden Klimawandel für den Alpenraum Österreichs sollte auch diese Forschungslücke geschlossen werden.

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Kenngrößen der fünf Untersuchungsgebiete. Mittlere Seehöhe MSH [m ü. A.], Einzugsgebietsfläche A [km^2], durch Blockgletscher entwässernder Flächenanteil ABG [%], langjährige (1980–2009) mittlere Lufttemperatur T [°C], langjähriger mittlerer Jahresniederschlag P [mm], langjährige mittlere potenzielle Evapotranspiration PET [mm], langjährige klimatische Wasserbilanz KWB [mm]. Berechnung basierend auf Haslinger und Bartsch (2016), Hiebl und Frei (2016, 2018) sowie Wagner et al. (2020c) 25

Tabelle 2: Einzugsgebietscharakterisierung im Untersuchungsgebiet Ingering- und Gaalgraben sowie der Schöneben im Liesinggraben (Steiermark). Mittlere Seehöhe des Einzugsgebiets in MSH [m ü.A.], Einzugsgebietsfläche A [km^2], durch Blockgletscher entwässernde Fläche ABG [%], Blockgletscher-Anzahl im Einzugsgebiet # BG (intakte Blockgletscher # INT, reliktische Blockgletscher # REL), langjährige (1980–2009) mittlere Lufttemperatur T [°C], langjähriger mittlerer Jahresniederschlag P [mm], langjährige mittlere potenzielle Evapotranspiration PET [mm], langjährige klimatische Wasserbilanz KWB [mm]. Auswertung basierend auf Wagner et al. (2020c) 32

Tabelle 3: Einzugsgebietscharakterisierung im Untersuchungsgebiet Lantschfeld und Taurachtal (Salzburg). Mittlere Seehöhe MSH [m ü. A.], Einzugsgebietsfläche A [km^2], durch Blockgletscher entwässernde Fläche ABG [%], Blockgletscher-Anzahl im Einzugsgebiet # BG (intakte Blockgletscher # INT, reliktische Blockgletscher # REL). langjährige (1980–2009) mittlere Lufttemperatur T [°C], langjähriger mittlerer Jahresniederschlag P [mm], langjährige mittlere potenzielle Evapotranspiration PET [mm], langjährige klimatische Wasserbilanz KWB [mm]. Auswertung basierend auf Wagner et al. (2020c).)..... 35

Tabelle 4: Einzugsgebietscharakterisierung im Untersuchungsgebiet Hintereggengraben (Kärnten). Mittlere Seehöhe MSH [m ü. A.], Einzugsgebietsfläche A [km^2], durch Blockgletscher entwässernde Fläche ABG [%], Blockgletscher-Anzahl im Einzugsgebiet # BG (intakte Blockgletscher # INT, reliktische Blockgletscher # REL), langjährige (1980–2009) mittlere Lufttemperatur T [°C], langjähriger mittlerer Jahresniederschlag P [mm], langjährige mittlere potenzielle Evapotranspiration PET [mm], langjährige klimatische Wasserbilanz KWB [mm]. Auswertung basierend auf Wagner et al. (2020c) 40

Tabelle 5: Einzugsgebietscharakterisierung im Untersuchungsgebiet Radurschltal (Tirol). Mittlere Einzugsgebietshöhe MSH [m ü. A.], Einzugsgebietsfläche A [km^2], durch Blockgletscher entwässernde Fläche ABG [%], Blockgletscher-Anzahl im Einzugsgebiet # BG (intakte Blockgletscher # INT, reliktische Blockgletscher # REL), langjährige (1980–2009) mittlere Lufttemperatur T [° C], langjähriger mittlerer Jahresniederschlag P [mm], langjährige mittlere potenzielle Evapotranspiration PET [mm], langjährige klimatische Wasserbilanz KWB [mm]. Auswertung basierend auf Wagner et al. (2020c) 43
Tabelle 6: Einzugsgebietscharakterisierung im Untersuchungsgebiet Vergalda- und Valzifenztal (Vorarlberg). Mittlere Seehöhe MSH [m ü. A.], Einzugsgebietsfläche A [km^2], durch Blockgletscher entwässernde Fläche ABG [%], Blockgletscher-Anzahl im Einzugsgebiet # BG (intakte Blockgletscher # INT, reliktische Blockgletscher # REL), langjährige (1980–2009) mittlere Lufttemperatur T [° C], langjähriger mittlerer Jahresniederschlag P [mm], langjährige mittlere potenzielle Evapotranspiration PET [mm], langjährige klimatische Wasserbilanz KWB [mm]. Auswertung basierend auf Wagner et al. (2020c)..... 47
Tabelle 7: Exponenten aus Trockenwetterfalllinien an 8 Blockgletscherquellen der österreichischen Alpen. Exponent der an den Basisabfluss angepassten Exponentialfunktionen α_3 [Tag^{-1}], gesättigte Mächtigkeit zu Beginn der Basisabfluss-Periode B bei effektiver Porosität von 0,2 [m]. 52
Tabelle 8: Nachweishäufigkeiten und Maximalkonzentrationen quantifizierter PFAS in ausgewählten Blockgletscherquellen (DaFNE-Projekte „RGHeavyMetal“ 2018, „ RGAlpCatch“ 2022). NG=Nachweisgrenze, BG=Bestimmungsgrenze, n=Anzahl Proben, n.n.=nicht nachweisbar, <BG=unterhalb Bestimmungsgrenze. Quelle: Universität Graz, Umweltbundesamt, BML, Ämter der Landesregierungen.... 100
Tabelle 9: Prognostizierte Änderung des Jahresabflusses für die drei simulierten Treibhausgasemissionspfade (RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5), jeweils dargestellt für die nahe Zukunft (2030–2059) und die fernere Zukunft (2070–2099) im Vergleich zur Bezugsperiode (1980–2009). Angegeben ist jeweils der Median aller simulierten Klimamodelle, die vollständige Bandbreite der jeweiligen simulierten Klimamodelle ist in Abbildung 40 dargestellt 109

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung eines alpinen Einzugsgebiets mit Schneebedeckung, Gletscher, und Blockgletscher bis hin zu Talgrundwasserkörper. All diese „Speicher“ tragen dazu bei, dass Niederschlag in alpinen Einzugsgebieten mit einer gewissen Verzögerung in den Flüssen abströmig ankommen. Modifiziert nach Brighenti et al. (2019) 19

Abbildung 2: Konzeptionelle Vorstellung der Fließwege durch einen (a) intakten und (b) reliktischen Blockgletscher (verändert nach Seelig, 2024)..... 22

Abbildung 3: Lage der Untersuchungsgebiete auf der Reliefkarte Österreichs..... 24

Abbildung 4: Temporär installierte Pegel und Abflussmessungen zur Erstellung der zugehörigen Schlüsselkurven. (a) Pegel Kettentörlquelle in der Steiermark. Der Torstahl dient der Stabilisierung des Pegelrohrs. (b) Abflussmessung mittels Salztracermethode am Pegel Ochsenhütte in Kärnten. (c) Am Pegel Arzkarquelle in Tirol werden die Aufzeichnungen weiter fortgeführt. (d) Pegel Ruppalm in Kärnten, befestigt an nebenstehendem Felsblock 26

Abbildung 5: Untersuchungsgebiet Ingering- und Gaalgraben (Steiermark). (a) Lage der Pegel und zugehöriger Einzugsgebiete sowie der Blockgletscher und ihrer Einzugsgebiete basierend auf Wagner et al. (2020c). Die in (b) und (c) dargestellten Detailkarten für das Einzugsgebiet der Kettentörlquelle, des Kettentörlbaches und der Schönebenquelle sind durch schwarze Umrahmungen ausgewiesen..... 28

Abbildung 6: (a) Talschluss des Ingeringgrabens in den zentralen Seckauer Tauern. Reliktische Blockgletscher sind farblich hervorgehoben, die Positionen der Pegel Kettentörlbach und Kettentörlquelle, der Niederschlags-Sammelprobe (N) sowie der Schneeprofile (S1-S5) verzeichnet. Ingeringgraben vom Kettentörl (1864 m), Blickrichtung Südwesten. (b) Schöneben..... 31

Abbildung 7: Untersuchungsgebiet Lantschfeld und Taurachtal (Salzburg). Lage der Pegel und zugehöriger Einzugsgebiete sowie der Blockgletscher und deren Einzugsgebiete basierend auf Wagner et al. (2020c)..... 33

Abbildung 8: Untersuchungsgebiet Hintereggengraben (Kärnten). (a) Lage der Pegel und zugehöriger Einzugsgebiete sowie der Blockgletscher und ihrer Einzugsgebiete basierend auf Wagner et al. (2020c)..... 36

Abbildung 9: Untersuchungsgebiet Hintereggengraben, Lage der Pegel Sonnblick und Buchleiten, des Schneeprofils und des Regensammlers. Blockgletscher sind rot hervorgehoben. Die Roßalm, im Hintergrund der Höhenzug Gurglitzen (2352 m ü.A.) – Hocheck (2432 m ü.-A.) 38
Abbildung 10: Untersuchungsgebiet Radurschltal (Tirol). (a) Lage der Pegel und zugehöriger Einzugsgebiete, der Blockgletscher und ihrer Einzugsgebiete basierend auf Wagner et al. (2020c) sowie der Gletscher basierend auf Buckel und Otto (2018) 41
Abbildung 11: Untersuchungsgebiet Radurschltal, Lage der Pegel Arzkarquelle, Brunnekarquelle und Vorderes Bergle, der Schneeprofile und des Regensammlers. Blockgletscher sind rot hervorgehoben. Panorama vom Wildnörderer nach Osten gegen Hüttekar, Arzkar und Hinteres Bergle 42
Abbildung 12: Untersuchungsgebiet Vergalda- und Valzifenztal (Vorarlberg). Lage der Pegel und zugehöriger Einzugsgebiete sowie der Blockgletscher und ihrer Einzugsgebiete basierend auf Wagner et al. (2020c)..... 45
Abbildung 13: Das Vergaldatal im Vorarlberger Untersuchungsgebiet. Die Lage des Pegels Rotbühel, des Schneeprofils sowie des Regensammlers ist angegeben, Blockgletscher sind rot hervorgehoben. Rotbühel und Eisentäli im Talschluss des Vergaldatales, Blickrichtung Osten..... 46
Abbildung 14: Beispiele von Blockgletscherquellen und daran installierten Pegelmessstellen: a) Preberkessel (Schladminger Tauern), b) Berglerlochquelle (HZB-Nummer 395525, Ötztaler Alpen); 48
Abbildung 15: Auswertung der Trockenwetterfalllinien an Blockgletscherquellen. (a) Trockenwetterfalllinie der Kettentörlquelle im Untersuchungsgebiet Ingering- und Gaalgraben (Steiermark). (b) Trockenwetterfalllinie der Lantschfeldquelle im Untersuchungsgebiet Lantschfeld und Taurachtal (Salzburg). (c) Trockenwetterfalllinie der Buchleitenquelle im Untersuchungsgebiet Hintereggengraben (Kärnten). (d) Trockenwetterfalllinie der Arzkarquelle im Untersuchungsgebiet Radurschltal (Tirol). (e) Trockenwetterfalllinie der Rotbühelquelle im Untersuchungsgebiet Vergalda- und Valzifenztal (Vorarlberg). (f) Boxplots der Exponenten in diesem Projekt sowie der von Wagner et al. (2020b) an fünf weiteren Blockgletscherquellen ermittelten Exponenten 51

Abbildung 16: Vergleich der als Gletschereis und Permafrosteis gespeicherten Wasserressourcen in Gletschern bzw. Blockgletschern auf Basis einzelner Gebirgsgruppen (nach Grassler, 1984) anhand des flächennormierten Eis-Wasser-Äquivalents. (a) Eis-Wasser-Äquivalent des in intakten Blockgletschern gespeicherten Permafrosteises unter Annahme eines mittleren Eisgehaltes von 50 % (RGI_1; Wagner et al., 2020c). (b) Eis-Wasser-Äquivalent des 2015 in Gletschern gespeicherten Eises (GI_4; Buckel und Otto, 2018)..... 53
Abbildung 17: Potentieller (maximaler) Grundwasserspeicher und Verweildauer auf Basis einzelner Gebirgsgruppen (nach Grassler, 1984); (a) Dynamisches Speichervolumen von Blockgletschern und (b) Schätzung der mittleren Verweilzeit in Blockgletschern als Quotient aus dynamischem Speichervolumen auf Basis der Wasserbilanz..... 54
Abbildung 18: Verhältnis des gespeicherten Wassers in Form von Eis und Grundwasser in Gletschern und Blockgletschern Österreichs mit geschätzter Entwicklung bis zum Jahr 2100 (modifiziert nach Wagner et al., 2021b)..... 55
Abbildung 19: Ergebnisse der Niederschlags-Abfluss-Modellierung am Pegel Kettentörlquelle (a) und am Pegel Kettentörlbach (b) 60
Abbildung 20: Eindrücke und Ganglinien des Einzugsgebiets Hammerjäger. (a) Der Ingeringgraben ist entlang der NW-SE ausgerichteten Talachse strukturiert; (b) Der Gaalgraben weist eine N-S ausgerichtete Talachse auf, entlang derer die Blockgletschereinzugsgebiete angeordnet sind. (c) Ergebnisse der Niederschlags-Abfluss Modellierung am Pegel Hammerjäger mit herausgezoomten Zeitbereich ident der in Abbildung 19 gezeigten Pegel Kettentörlbach und -quelle 62
Abbildung 21: Blockgletschereinfluss am Pegel Kettentörlbach (54 % Flächenanteil). (a) Saisonale Schwankung des Blockgletschereinflusses im zwanzigjährigen Mittel. Zusätzlich ist die Verteilung des Niederschlags sowie der Schneedecke im Einzugsgebiet dargestellt. (b) Räumliche Verteilung der analysierten Teil-Einzugsgebiete. Die blau dargestellten Bereiche entsprechen den Blockgletscher-Einzugsgebieten 63
Abbildung 22: Blockgletschereinfluss am Pegel Hammerjäger (14 % Flächenanteil). (a) Saisonale Schwankung des Blockgletschereinflusses im zwanzigjährigen Mittel. Zusätzlich ist die Verteilung des Niederschlags, der Schneedecke sowie des Abflusses im Einzugsgebiet dargestellt. (b) Räumliche Verteilung der analysierten Teil-Einzugsgebiete. Die blau dargestellten Bereiche entsprechen den Blockgletscher-Einzugsgebieten 64

Abbildung 23: Höhenzonen für die Schneedeckenbemessung und Schneedeckendynamik für die Einzugsgebiete Kettentörlbach a) und b) und Hammerjäger c) und d) 65
Abbildung 24: Einzugsgebiete der Kettentörlquelle (linke Bildhälften) und des Kettentörlbaches (rechte Bildhälften). Der durch die Kettentörlquelle entwässerte Blockgletscher erscheint als konvexe Geländeform vorne links im Bild. (a) Im Hochwinter sind große Teile des Einzugsgebiets schneebedeckt. (b) Im Frühjahr sind die sonnenexponierten sowie die tiefer gelegenen Teile bereits schneefrei, während die Mulden und Rinnen noch von Altschnee bedeckt werden. (c) Im Sommer und Herbst sind beide Einzugsgebiete schneefrei. Die Geländeoberfläche ist von steilen Schrofen, Hangschuttfächern, alpinen Matten und Krummholz geprägt. (d) Im Frühwinter bedecken bereits mäßig ergiebige Schneefälle Teile des Einzugsgebietes mit einer dünnen, lockeren Schneedecke 66
Abbildung 25: (a) Jahresgang des Blockgletscher-Einflusses, ausgedrückt in Prozent der Abflussmenge am jeweiligen Pegel, an den grundwasser-dominierten Flüssen des Projekts. (b) Jahresgang des Blockgletscher-Einflusses an den schmelzwasser-dominierten Flüssen des Projekts..... 69
Abbildung 26: Lage und klimatische Bedingungen in den fünf Untersuchungsgebieten Vergalda- und Valzifenztal (Vorarlberg), Radurschltal (Tirol), Hintereggengraben (Kärnten), Lantschfeld und Taurachtal (Salzburg) sowie Ingering- und Gaalgraben (Steiermark). (a) Langjährige mittlerer Lufttemperatur im historischen Referenzzeitraum (1980–2009) gemäß SPARTACUS Datensatz (Hiebl und Frei, 2016) und mittlere Lufttemperatur im jeweiligen Untersuchungsgebiet. (b) Langjähriger mittlerer Jahresniederschlag im historischen Referenzzeitraum (1980–2009) gemäß SPARTACUS Datensatz (Hiebl und Frei, 2018) und mittlerer Jahresniederschlag im jeweiligen Untersuchungsgebiet 71
Abbildung 27: Zusammenfassende Darstellung der analysierten Wasserproben und ihrer Beziehung zur Austrian Meteoric Water Line (AMWL) nach Hager und Foelsche (2015) bzw. ihrer Neuberechnung anhand aktualisierter Daten .. 75
Abbildung 28: Höhenabhängigkeit der δ 18O-Signatur nach Untersuchungsgebiet und Teileinzugsgebieten. Trotz der saisonalen Schwankungsbreite und lokalen Unterschieden ist ein übergeordneter Trend in den Untersuchungsgebieten Tirol, Vorarlberg, Salzburg und Steiermark erkennbar, das Untersuchungsgebiet Kärnten folgt diesem nicht 76

Abbildung 29: (a) Aufnahme des Schneeprofils Vorderes Bergle im Untersuchungsgebiet Radurschltal (Tirol). (b) Aufnahme des Schneeprofils Gampe im Untersuchungsgebiet Radurschltal (Tirol). (c) Schneeprobenahme am Schneeprofil Schöneben 1 im ergänzenden Untersuchungsgebiet Schöneben (Steiermark). (d) Aufschließen des Schneeprofils Schöneben 4 im ergänzenden Untersuchungsgebiet Schöneben (Steiermark) 78
Abbildung 30: Stabile Isotopensignatur geschmolzener Schneeproben des Profils Rotbühel (Vergaldatal, Vorarlberg). Triebschnee (DFbk) überlagert eine ausgeprägte Schmelzkruste (MFcr, rot hervorgehoben), darunter folgt älterer, teils aufbauend umgewandelter Schnee (FCso) und körniger Altschnee (FCxr). An der Basis liegt eine ältere Lage Tiefenreif (DHxr). Die Kurzbezeichnungen und Profilaufnahme entsprechen der UNESCO/IACS International Classification for Seasonal Snow on the Ground (Fierz et al., 2009) 80
Abbildung 31: Validierung des Schnee-Modells CemaNeige mittels Zwei-Komponenten-Mischmodells auf Basis stabiler Isotopendaten (siehe Infobox). Die durchgezogene Linie entspricht perfekter Übereinstimmung (1:1) 82
Abbildung 32: Drei-Komponenten-Mischungsmodell am Pegel Kettentörlquelle im Untersuchungsgebiet Ingering- und Gaalgraben (Steiermark). Die Quelle entwässert einen Blockgletscher mit hoher Infiltrations- und Speicherkapazität, entsprechend hoch fällt der Grundwasseranteil am Gesamtabfluss aus. Der Anteil an Schnee- und Regenwasser, welche teilweise rasch an die Quelle gelangen, folgt dem Jahresgang, mit höherem Schneeanteil im Frühjahr und Regenanteil im Spätsommer und Herbst 83
Abbildung 33: Der Zusammenhang zwischen (Zeit-gemittelter) junger Abflusskomponente und mittlerer Einzugsgebietshöhe. Die junge Abflusskomponente nimmt tendenziell mit zunehmender Seehöhe ab, Gebiete über 1500 m ü. A. weisen nur in Ausnahmefälle (Ochsenhütte) hohe Anteile jungen Wassers auf. Zur Einordnung sind Literaturwerte aus verschiedenen Gebirgsgruppen angegeben (Jasechko et al., 2017; Maier, 2018; von Freyberg et al., 2018; Stockinger et al., 2019; Ceperley et al., 2020; Gallart et al., 2020; Floriancic et al., 2024)..... 85
Abbildung 34: Hauptkationenzusammensetzung (Gesamtgehalte) und elektrische Leitfähigkeit der untersuchten Proben (gefüllt: Probenahme 07/2022, gepunktet: Probenahme 11/2022)..... 91
Abbildung 35: Arsenkonzentrationen in den gemessenen Wasserproben in der Gesamtphase und der gelösten Phase nach Abtrennung durch Filtration (< 0.45 µm) 93

Abbildung 36: Urankonzentrationen in den gemessenen Wasserproben in der Gesamtphase und der gelösten Phase nach Abtrennung durch Filtration (< 0,45 µm) 93
Abbildung 37: Quecksilberkonzentrationen in den gemessenen Wasserproben in der Gesamtphase während Niederwasserbedingungen 94
Abbildung 38: Konzentrationen von Neodym und Gadolinium in den gemessenen Wasserproben in der Gesamtphase und der gelösten Phase während der Schmelzwasserführung 96
Abbildung 39: Chondriten-normierten Konzentrationen (log-Skalierung) der Metalle der Seltenen Erden in den beprobten Quellen des Hintereggengrabens (links) und in unterschiedlichen natürlichen Gewässern (Geochemie der Seltenen Erden, Uni Köln) (rechts) 97
Abbildung 40: Prognostizierte Veränderung des Abflussverhaltens im Untersuchungsgebiet Ingering- und Gaalgraben (Steiermark) (a) am Pegel Kettentörlquelle, (b) am Pegel Kettentörlbach, (c) der Blockgletscher-Einzugsgebiete im Untersuchungsgebiet, (d) am Pegel Hammerjäger 104
Abbildung 41: Prognostizierte Veränderung der einzelnen hydrologischen Komponenten im Untersuchungsgebiet Ingering- und Gaalgraben (Steiermark) an den Pegeln Kettentörlquelle (a) und Kettentörlbach (b). Die Balkendiagramm geben jeweils den Median der prognostizierten Veränderung aus dem Satz an Modelläufen pro Treibhausgasemissionspfades an (8 Modelläufe für RCP2.6, 16 Modelläufe für RCP4.5 und 8.5)..... 105
Abbildung 42: Prognostizierte Veränderung der einzelnen hydrologischen Komponenten im Untersuchungsgebiet Ingering- und Gaalgraben (Steiermark) am Pegel Hammerjäger. Die Balkendiagramm geben jeweils den Median der prognostizierten Veränderung aus dem Satz an Modelläufen pro Treibhausgasemissionspfades an (8 Modelläufe für RCP2.6, 16 Modelläufe für RCP4.5 und 8.5)..... 106
Abbildung 43: Regional und lokal unterschiedlich starke und zeitlich verschobene Auswirkungen des Klimawandels auf die Abflussregime der Untersuchungsgebiete der fernen Zukunft (2070–2099) zur Bezugsperiode (1980–2009). Obere Zeile: Blockgletscherquellen in den fünf Untersuchungsgebieten des Projekts. Untere Zeile: Übergeordnete Flusssysteme in den vier Untersuchungsgebieten, in denen Daten dazu vorliegen. Die Linien stellen jeweils den Median der einzelnen Modellläufe zu jedem Treibhausgas-Emissionspfad dar 108

Abbildung 44: Prognostizierte Veränderung der Schneedeckendynamik, dargestellt als mittleres Schnee-Wasser-Äquivalent (SWE) der Schneedecke in den Einzugsgebieten von vier Blockglescherquellen: (a) Kettentörlquelle im Untersuchungsgebiet Ingering- und Gaalgraben, Steiermark. (b) Lantschfeldquelle im Untersuchungsgebiet Lantschfeld und Taurachtal, Salzburg. (c) Arzkarquelle im Untersuchungsgebiet Radurschltal, Tirol. (d) Rotbühelquelle im Untersuchungsgebiet Vergalda- und Valzifenztal, Vorarlberg 112
Abbildung 45: Prognostizierte Veränderung der Schneedeckendynamik, dargestellt als mittleres Schnee-Wasser-Äquivalent (SWE) der Schneedecke in den Einzugsgebieten von vier übergeordneten Flüssen: (a) Ingeringbach am Pegel Hammerjäger im Untersuchungsgebiet Ingering- und Gaalgraben, Steiermark. (b) Lungauer Taurach am Pegel Mauterndorf im Untersuchungsgebiet Lantschfeld und Taurachtal, Salzburg. (c) Radurschlbach am Pegel Radurschlalpe im Untersuchungsgebiet Radurschltal, Tirol. (d) Suggadinbach am Pegel Gargellen im Untersuchungsgebiet Vergalda- und Valzifenztal, Vorarlberg 113
Abbildung 46: Satellitenaufnahmen des Stirnbereichs Hüttekarblockgletscher vor (2007) und nach dem Murgang 2019. 115
Abbildung 47: Satellitenaufnahmen des Stirnbereichs Hüttekarblockgletscher nach dem Murgang 2025. Die beiden Bilder 09/2025 zeigen die Vermurung nach dem 2. Hangmurgang 116

Literaturverzeichnis

Angerer, T., Tropper, P., Volgger, A., Gasteiger, P., Bodeving, L., Haller, S., Klein, C., Spötl, C., Onuk, P., Hobiger, G., Regelous, M., Hauzenberger, C. (2019): Das Pb-Zn-Cu-Fe-Metallsystem im Ötztal-Stubai-Kristallin: Untersuchungen zu Herkunft und Anreicherung von Hochtechnologie-Metallen mit einer Abschätzung der Sicherungswürdigkeit. Abschlussbericht. Geologische Bundesanstalt, Wien.

Arnhof, M. (2022): Hydrochemische Charakterisierung von Blockgletscherquellen mit karbonatgesteinsdominiertem Einzugsgebiet (Beispiel Lantschfeld, Salzburg). Masterarbeit, Universität Salzburg.

Beria, H., Larsen, J. R., Ceperley, N. C., Michelon, A., Vennemann, T., Schaefli, B. (2018): Understanding snow hydrological processes through the lens of stable water isotopes. WIREs Water 5 (6), 3. DOI: 10.1002/wat2.1311.

Berka, R., Philippitsch, R., Katzlberger, C., Schubert, G., Hörhan, T. (2014a): Radionuklide in Grundwässern, Gesteinen und Bachsedimenten Österreichs 1:500 000. Geologische Bundesanstalt, Wien.

Berka, R., Katzlberger, C., Philippitsch, R., Schubert, G., Korner, M., Landstetter, C., Motschka, K., Pirkl, H., Grath, J., Draxler, A., Hörhan, T. (2014b): Erläuterungen zur geologischen Themenkarte Radionuklide in Grundwässern, Gesteinen und Bachsedimenten Österreichs 1:500 000. Geologische Bundesanstalt, Wien.

Berthling, I. (2011): Beyond confusion. Rock glaciers as cryo-conditioned landforms. Geomorphology 131 (3-4), 98–106. DOI: 10.1016/j.geomorph.2011.05.002.BMLFUW (2017a), Philippitsch, R., Grath, J., Humer F.: Hydrochemische Karte Österreich 1:500 000, Oberflächennahe Grundwässer und Fließgewässer. Wien. https://www.bmluk.gv.at/themen/wasser/wasserqualitaet/hydrochemische_karte_2017.html

BMLFUW (2017b), Philippitsch, R., Grath, J., Humer F.: Bericht zur „Hydrochemische Karte Österreich 1:500 000“, Oberflächennahe Grundwässer und Fließgewässer. S.92, Wien. https://www.bmluk.gv.at/themen/wasser/wasserqualitaet/hydrochemische_karte_2017.html

BMLRT (2021): 2. Nationaler Gewässerbewirtschaftungsplan 2021. Wien: Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus (BMLRT).

Brandmayr, M. (2024): Isotopic signature of snow as groundwater recharge. Master Thesis. Universität Graz, Graz.

Braunstingl, R., Pestal, G., Hejl, E. (2005): Geologische Karte von Salzburg 1:200 000, Geologische Bundesanstalt, Wien.

Brielmann, H., Legerer, P., Schubert, G., Wemhöner, U., Philippitsch, R., Humer, F., Zieritz, I., Rosmann, T., Schartner, C., Scheidleder, A., Grath, J., Stadler, E. (2018a): Hydrochemie und Hydrogeologie der österreichischen Grundwässer und deren natürliche Metall- und Nährstoffgehalte (Update Geohint 2018). Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus (BMNT), Wien.

Brielmann, H., Wemhöner, U., Clara, M., Scharf, S., Grath, J., Zieritz, I., Kulcsar, S., Schuhmann, A., Philippitsch, R. (2018b): Spurenstoffe im Grundwasser. Untersuchungen zum Vorkommen von Quecksilber und 30 ausgewählten organischen Substanzen anthropogener Herkunft. Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus (BMNT), Wien.

Buckel, J., Otto, J-C (2018): The Austrian glacier inventory GI 4 (2015) in ArcGis (shapefile) format. PANGAEA 2018. DOI:10.1594/PAN- 459 GAEA.887415. Online verfügbar: https://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.887415

Chimani, B., Heinrich, G., Hofstätter, M., Kerschbaumer, M., Kienberger, S., Leuprecht, A., Lexer, A., Peßenteiner, S., Poetsch, M. S., Salzmann, M., Spiekermann, R., Switanek, M., Truhetz, H. (2016): Endbericht ÖKS15 – Klimaszenarien für Österreich—Daten—Methoden—Klimaanalyse. Projektbericht. https://data.ccca.ac.at/dataset/a4ec86ca-eeae-4457-b0c7-78eed6b71c05

Chimani, B., Matulla, C., Hiebl, J., Schellander-Gorgas, T., Maraun, D., Mendlik, T., Eitzinger, J., Kubu, G., Thaler, S. (2020): Compilation of a guideline providing comprehensive information on freely available climate change data and facilitating their efficient retrieval. Climate Services, 19, 100179. https://doi.org/10.1016/j.cliser.2020.100179

Eder, M. (2019): Origin of arsenic concentration in spring waters of relict rock glacier springs in alpine headwaters of the Seckauer Tauern Range (Austria). Masterarbeit, Karl-Franzens-Universität, Graz.

Elster, D., Fischer, L., Hann, S., Goldbrunner, J., Schubert, G., Berka, R., Hobiger, G., Legerer, P., Philippitsch, R. (2018): Österreichs Heil- und Mineralwässer. Hg. v. Geologische Bundesanstalt, Wien.

Exner, C. (1980): Geologie der Hohen Tauern bei Gmünd in Kärnten. Jb. Geol. B.-A. 123 (2), 343–410.

Exner, C. (1984): Der Südrand des Tauernfensters bei Spittal an der Drau. Jb. Geol. B.-A. 127 (3), 349–367.

Exner, C. (1989): Geologie des mittleren Lungaus. Jb. Geol. B.-A. 132 (1): 7–103.

Exner, C., Hejl, E., Mandl, G. W. (2005): Geologische Karte der Republik Österreich 1:50 000. Blatt 157 Tamsweg. Geologische Bundesanstalt, Wien.

Fierz, C., Armstrong, R. L., Durand, Y., Etchevers, P., Greene, E., McClung, D. M., Nishimura, K., Satyawali, P. K., Sokratov, Sergey, A. (2009): The International Classification for Seasonal Snow on the Ground. Hg. v. IHP. International Hydrological Programme (IHP) of the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), Paris (IHP-VII Technical Documents in Hydrology, 83).

Fischer, A., Seiser, B., Stocker-Waldhuber, M., Mitterer, C. & Abermann, J. (2015): The Austrian Glacier Inventories GI 1 (1969), GI 2 466 (1998), GI 3 (2006), and GI LIA in ArcGIS (shapefile) format. PANGAEA 2015. DOI: 10.1594/PANGAEA.844988. Online verfügbar: https://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.844988.

Flügel, H. W., Neubauer, F. (1984): Geologische Karte der Steiermark 1:200 000. Geologische Bundesanstalt, Wien.

Freyberg, J. von, 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.

Friedman, I., Benson, C., Gleason, J. (1991): Isotopic changes during snow metamorphism. In: Taylor, H. P., O'Neil, J. R., Kaplan, I. R. (Ed.): Stable Isotope Geochemistry: A Tribute to Samuel Epstein. The Geochemical Society, San Antonio, Texas (The GEochemical Society Special Publication, 3), 211–221.

Froehlich, K., Kralik, M., Papesch, W., Rank, D., Scheifinger, H., Stichler, W. (2008): Deuterium excess in precipitation of Alpine regions - moisture recycling. Isotopes in environmental and health studies 44 (1), 61–70. DOI: 10.1080/10256010801887208.

Fuchs, G. (1984): Geologische Karte der Republik Österreich 1:25 000. Erläuterungen zu Blatt 169 Partenen (Ost und West). Geologische Bundesanstalt, Wien.

Fuchs, G., Pirkl, H. (1980): Geologische Karte der Republik Österreich 1:25 000. Blatt 169 Partenen. Geologische Bundesanstalt, Wien.

Genereux, D. (1998): Quantifying uncertainty in tracer-based hydrograph separation. Water Resour. Res. 34 (4), 915–919.

Gentile, A., Canone, D., Ceperley, N., Gisolo, D., Previati, M., Zuecco, G., Schaefli, 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.

Giardino, J. R., Vitek, J. D., DeMorett, J. L. (1992): A Model of Water Movement in Rock Glaciers and Associated Water Characteristics. In: Dixon, J. C. & Abrahams A. D. (Hg.): Periglacial Geomorphology. Wiley, Chichester. S. 159–184.

Gobiet, A., Kotlarski, S., Beniston, M., Heinrich, G., Rajczak, J., Stoffel, M. (2014): 21st century climate change in the European Alps - a review. Science of The Total Environment 493: 1138–1151. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2013.07.050.

Grassler, F. (1984): Alpenvereinseinteilung der Ostalpen. In: Deutscher Alpenverein (DAV), Österreichischer Alpenverein (ÖAV) und Alpenverein Südtirol (AVS) (Hg.): Berg '84. Alpenvereinsjahrbuch 108. München, S. 215–224.

Google Earth Pro (2025): Satellitenbilder des Oberen Radurschltals, Tirol, Österreich. Bilddaten © 2025 Maxar Technologies. Google LLC, Mountain View, CA, USA. Verfügbar unter: https://earth.google.com/ (letzter Zugriff 8. Oktober 2025).

Hager, B., Foelsche, U. (2015): Stable isotope composition of precipitation in Austria. AJES 108 (2): 2-13. DOI: 10.17738/ajes.2015.0012.

Harrington, J. S., Mozil, A., Hayashi, M., Bentley, L. R. (2018): Groundwater flow and storage processes in an inactive rock glacier. Hydrol. Process. 32 (20): 3070–3088. DOI: 10.1002/hyp.13248.

Haslinger, K., Bartsch, A. (2016): Creating long-term gridded fields of reference evapotranspiration in Alpine terrain based on a recalibrated Hargreaves method. Hydrol. Earth Syst. Sci. 20 (3): 1211–1223. DOI: 10.5194/hess-20-1211-2016.

Haslinger, K., Schöner, W., Abermann, J., Laaha, G., Andre, K., Olefs, M., Koch, R. (2023): Apparent contradiction in the projected climatic water balance for Austria. Wetter conditions on average versus higher probability of meteorological droughts. Natural Hazards and Earth System Sciences 23 (8), 2749–2768. DOI: 10.5194/nhess-23-2749-2023.

Haslinger, K., Breinl, K., Pavlin, L. et al. (2025): Increasing hourly heavy rainfall in Austria reflected in flood changes. Nature. https://doi.org/10.1038/s41586-025-08647-2

Häusler, H. (1988): Unterostalpine Jurabreccien in Österreich. Versuch einer sedimentologischen und paläogeographischen Analyse nachtriadischer Breccienserien im unterostalpinen Rahmen des Tauernfensters (Salzburg - Tirol). Jb. Geol. B.-A. 131 (1), 21–125.

Häusler, H. (1995a): Geologische Karte der Republik Österreich 1:50 000. Blatt 156 Muhr. Geologische Bundesanstalt, Wien.

Häusler, H. (1995b): Geologische Karte der Republik Österreich 1:50 000. Erläuterungen zu Blatt 156 Muhr. Geologische Bundesanstalt, Wien.

Hausmann, H., Krainer, K., Brückl, E., Mostler, W. (2007): Internal structure and ice content of Reichenkar rock glacier (Stubai Alps, Austria) assessed by geophysical investigations. Permafrost Periglac. Process. 18 (4), 351–367. DOI: 10.1002/ppp.601.

Hausmann, H., Krainer, K., Brückl, E., Ullrich, C. (2012): Internal structure, ice content and dynamics of Ölgrube and Kaiserberg rock glaciers (Ötztal Alps, Austria) determined from geophysical surveys. AJES 105 (2), 12–31.

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.

Hejl, E. (2005): Geologische Karte der Republik Österreich 1:50 000. Erläuterungen zu Blatt 157 Tamsweg. Geologische Bundesanstalt, Wien.

Hiebl, J., Frei, C. (2016): Daily temperature grids for Austria since 1961—concept, creation and applicability. Theor Appl Climatol 124 (1-2): 161–178. DOI: 10.1007/s00704-015-1411-4.

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.

Hock, R., Rasul, G., Adler, C., Cáceres, B., Gruber, S., Hirabayashi, Y., Jackson, M., Kääb, A., Kang, S., Kutuzov, S., Milner, A., Molau, U., Morin, S., Orlove, B., Steltzer, H. (2019): High Mountain Areas. In: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (Ed.): IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate, 131–202.

Hoinkes, G., Thöni, M. (1993): Evolution of the Ötztal-Stubai, Scarl-Campo and Ulten Basement Units. In Raumer, R. F. & Neubauer, F. (Hg.): Pre-Mesozoic Geology in the Alps. Springer Berlin Heidelberg, S. 485–494.

Hoinkes, G., Krainer, K., Tropper, P. (2021): Ötztaler Alpen, Stubaier Alpen und Texelgruppe. Sammlung geologischer Führer, 112. Gebr. Borntraeger, Stuttgart.

Humer, G. (1995): Niederschlagsisotopenmessnetz Österreich. Bundesministerium für Umwelt, Wien (Monographien, 52).

Humer, F., Wemhöner, U., Philippitsch, R., Elster, D., Schubert, G., Kaminsky, E.-F., Hobiger, G., Benold, C., Legerer, P., Berka, R., Waitzinger, M., Finger, F., Krämer, S., Chardi, K., Schenkeveld, W., Fischer, L., Hann, S., Dersch, G. (2019): Uran im Grundwasser. Endbericht zum DaFNE-Forschungsprojekt Nr. 101204. Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus (BMNT), Wien.

Intergovernmental Panel on Climate Change (2019): IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. Pörtner, H.-O., Roberts, D. C., Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Tignor, M., Poloczanska, E., Mintenbeck, K., Alegría, A., Nicolai, M., Okem, A., Petzold, J., Rama, B. & Weyer, N. M. (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 755 pp. https://doi.org/10.1017/9781009157964.

Jasechko, S. (2019): Global Isotope Hydrogeology—Review. Rev. Geophys. 57 (3), 835–965. DOI: 10.1029/2018RG000627.

Jones, D. B., Harrison, S., Anderson, K., Whalley, W. B. (2019a): Rock glaciers and mountain hydrology. A review. Earth-Sci. Rev. 193: 66–90. DOI: 10.1016/j.earscirev.2019.04.001.

Jones, D. B., Harrison, S., Anderson, K. (2019b): Mountain glacier-to-rock glacier transition. Global and Planetary Change 181 (2), 102999. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2019.102999.

Kirchner, J. W. (2016a): 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.

Kirchner, J. W. (2016b): 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.

Krainer, K., Mostler, W. (2002): Hydrology of active rock glaciers: examples from the Austrian Alps. Arctic Antarctic and Alpine Research 34: 142–149. DOI: 10.1080/15230430.2002.12003478.

Krainer, K., Bressan, D., Dietre, B., Haas, J.N., Hajdas, I., Lang, K., Mair, V., Nickus, U., Reidl, D., Thies, H., Tonidandel, D. (2015): A 10,300-year-old permafrost core from the active rock glacier Lazaun, southern Ötztal Alps (South Tyrol, northern Italy). Quaternary Research 83: 324-335. DOI: 10.1016/j.yqres.2014.12.005.

Lindinger, H., Brielmann, H. Broer, M., Formanek, C., Gattringer, I., Germann, V., Grath, J., Grunert, M., Holler, C., Liebel, G., Neunteufel, R., Rosmann, T., Schönbauer, A., Sinemus, N., Szerencsits, M., Überreiter, E. (2021): Wasserschatz Österreichs, Grundlagen für nachhaltige Nutzungen des Grundwassers. Veröffentl. Bericht des BMLRT, S. 122, Wien.

Maillet, E. (1905): Essai d'hydraulique souterraine et fluviale, Paris, Librairie scientifique A. Hermann.

Mandl, G. W., Matura, A. (1995): Geologische Karte der Republik Österreich 1:50 000. Blatt 127 Schladming. Geologische Bundesanstalt, Wien.

Mandl, M., Kurz, W., Hauzenberger, C., Fritz, H., Klötzli, U., Schuster, R. (2018): Pre-Alpine evolution of the Seckau Complex (Austroalpine basement/Eastern Alps). Constraints from in-situ LA-ICP-MS U Pb zircon geochronology. Lithos 296-299, 412–430. DOI: 10.1016/j.lithos.2017.11.022.

Mandl, M., Kurz, W., Hauzenberger, C., Fritz, H., Pfingstl, S. (2022): Geochemistry of granitoids from the Austroalpine Seckau Complex. A key for revealing the pre-Alpine evolution of the Eastern Alps. Mineralogy and Petrology 116 (3), 251–272. DOI: 10.1007/s00710-022-00781-3.

Mathis, C. (2005): Die Fidelisquelle. In: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW) (Hg.): Quellbeobachtung im Hydrographischen Dienst in Österreich. Mitteilungen des Hydrographischen Zentralbüros, 70, 59–65. Wien.

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.

Metz, K. (1967): Geologische Karte der Republik Österreich 1:50 000. Blatt 130 Oberzeiring und 131 Kalwang. Geologische Bundesanstalt, Wien.

Metz, K. (1971): Die Gaaler Schuppenzone als Südgrenze der Seckauer Masse. Mitt. naturwiss. Ver. Steiermark 100: 57–71.

Metz, K. (1976): Der geologische Bau der Seckauer und Rottenmanner Tauern. Jb. Geol. B.-A. 119 (2), 151–205.

Moser, M. (2012): GEOFAST 1:50 000. Zusammenstellung ausgewählter Archivunterlagen der Geologischen Bundesanstalt. Blatt 172 Weißkugel. Geologische Bundesanstalt, Wien.

Moser, H., Stichler, W. (1974): Deuterium and oxyggen-18 contents as an index of the properties of snow covers. In: International Association of Hydrological Sciences (IAHS) (Hg.): Snow Mechanics. Grindelwald Symposium. IAHS Press, Wallingford (IAHS Publication 114), 122–135.

Obwegs, M. (2024): Thermokarst lake detection - a remote sensing approach. Master Thesis. Universität Graz, Graz.

Olefs, M., Koch, R., Schöner, W., Marke, T. (2020): Changes in Snow Depth, Snow Cover Duration, and Potential Snowmaking Conditions in Austria, 1961–2020—A Model Based Approach. Atmosphere 11 (12), 1330. DOI: 10.3390/atmos11121330.

Pauritsch, M. (2016): Hydrogeology of relict rock glaciers (Niedere Tauern Range, Austria). Unveröffentlichte Dissertation, Karl-Franzens-Universität Graz.

Pauritsch, M., Birk, S., Wagner, T., Hergarten, S., Winkler, G. (2015): Analytical approximations of discharge recessions for steeply sloping aquifers in alpine catchments. Water Resources Research 51:8729-8740. DOI: 10.1002/2015WR017749.

Pauritsch, M., Wagner, T., Winkler, G., Birk, S. (2017): Investigating groundwater flow components in an Alpine relict rock glacier (Austria) using a numerical model. Hydrogeology Journal 25: 371-383. DOI: 10.1007/s10040-016-1484-x.

Perrin, C., Michel, C., Andréassian, V. (2003): Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. Journal of Hydrology 279: 275–289.

Pestal, G., Rataj, W., Reitner, J. M., Schuster, R. (2006): Geologische Karte der Republik Österreich 1:50 000. Blatt 182 Spittal an der Drau. Geologische Bundesanstalt, Wien.

Pfingstl, S., Kurz, W., Schuster, R., Hauzenberger, C. (2015): Geochronological constraints on the exhumation of the Austroalpine Seckau Nappe (Eastern Alps). AJES 108 (1), 172–185.

Posavec, K., Parlov, J., Nakić, Z. (2010): Fully automated objective-based method for master recession curve separation. Ground Water 48 (4), 598–603. DOI: 10.1111/j.1745-6584.2009.00669.x.

Posavec, K., Giacopetti, M., Materazzi, M., Birk, S. (2017): Method and Excel VBA Algorithm for Modeling Master Recession Curve Using Trigonometry Approach. Ground Water 55 (6), 891–898. DOI: 10.1111/gwat.12549.

Purtscheller, F. (1978): Ötztaler und Stubaier Alpen. Borntraeger, Berlin. (Sammlung geologischer Führer, 53).

QZV Chemie GW (2010): BGBl. II Nr. 98/2010 Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über den guten chemischen Zustand des Grundwassers. StF: BGBl. II Nr. 98/2010 [CELEX-Nr: 31991L0692, 32006L0118] und konsolidierte Fassungen

QZV Chemie OG (2019): Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über die Festlegung des Zielzustandes für Oberflächengewässer (Qualitätszielverordnung Chemie Oberflächengewässer). StF: BGBl. II Nr. 96/2006 [CELEX-Nr.: 31976L0464, 31982L0176, 31983L0513, 31984L0156, 31984L0491, 31986L0280, 32000L0060

Ribis, M. (2017): Geologisch-hydrogeologische und hydrochemische Untersuchungen in Permafrostbereichen der Ötztaler Alpen (Tirol, Österreich). Dissertation. Leopold-Franzens-Universität, Innsbruck.

Rogger, M., Chirco, G. B., Hausmann, H., Krainer, K., Brückl, E., Stadler, P., Blöschl, G. (2017): Impact of mountain permafrost on flow path and runoff response in a high alpine catchment. Water Resources Research 53.

Rupp, C., Linner, M., Mandl, G. W. (2011): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Oberösterreich 1:200 000. Geologie der österreichischen Bundesländer. Geologische Bundesanstalt, Wien.

Schmid, S. M., Fügenschuh, B., Kissling, E., Schuster, R. (2004): Tectonic map and overall architecture of the Alpine orogen. Eclogae geol. Helv. 97 (1): 93–117.

Schmid, S. M., Scharf, A., Handy, M. R., Rosenberg, C. L. (2013): The Tauern Window (Eastern Alps, Austria). A new tectonic map, with cross-sections and a tectonometamorphic synthesis. Swiss Journal of Geosciences 106 (1), 1–32.

Schubert, G. (1992): Die hydrogeologischen Verhältnisse im Einzugsgebiet der nördlichen Taurach bei Obertauern (Radstädter Tauern, Salzburg) unter Berücksichtigung anthropogener Einflüsse. Dissertation. Erzherzog-Johann-Universität, Graz.

Schubert, G. (2003): Hydrogeologische Karte von Österreich 1:500 000. Geologische Bundesanstalt, Wien.

Schubert, G. (2006): Erläuterungen zur Hydrogeologischen Karte von Österreich 1:500 000. Geologische Bundesanstalt, Wien.

Schuster, R., Pestal, G., Reitner, J. M. (2006): Geologische Karte der Republik Österreich 1:50 000. Erläuterungen zu Blatt 182 Spittal an der Drau. Geologische Bundesanstalt, Wien.

Seelig, S., Wagner, T., Krainer, K., Avian, M., Olefs, M., Haslinger, K., Winkler, G. (2023): The role of thermokarst evolution in debris flow initiation (Hüttekar Rock Glacier, Austrian Alps). Natural Hazards and Earth System Sciences 23 (7), 2547–2568. DOI: 10.5194/nhess-23-2547-2023.

Seelig, S. (2024): Assessing groundwater hydrology of rock glaciers in response to climate change. Dissertation. Universität Graz.

Seelig, S., Seelig, M., Vremec, M., Wagner, T., Krainer, K., Philippitsch, R., Avian, M., Haslinger, K., Brielmann, H., Fischer, L., Leis, A., Ribis, M., Obwegs, M., Hausleber, M., Reszler, C., Hann, S., Mauthner-Weber, R., Winkler, G. (2024): Blockgletscher als Grundwasserspeicher in alpinen Einzugsgebieten und ihr Einfluss auf übergeordnete Flusssysteme unter dem Aspekt des Klimawandels (RGAlpCatch). Abschlussbericht. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft. Wien, 2024.

Seelig, S., Seelig, M., Krainer, K., Winkler, G. (2025a): Mechanisms of solute transport on ice-supersaturated debris: 2. Rock glacier hydrology in alpine glacialperiglacial systems. Water Resources Research, 61, e2024WR037236. https://doi.org/10.1029/2024WR037236

Seelig, M., Seelig, S., Krainer, K., Winkler, G. (2025b): Hydraulics of channelized flow in ice-supersaturated debris: 1. Rock glacier hydrology in alpine glacial-periglacial systems. Water Resources Research, 61, e2024WR037235. https://doi.org/10.1029/2024WR037235

Seelig, S., Krainer, K., Tropper, P., Pettauer, M., Leis, A., Wagner, T., Bertolotti, G., Philippitsch, R., Winkler, G. (2025c): Origin and Evolution of High Nickel Concentrations in Rock Glacier Springs. ACS Environmental Science & Technology – Water. 10.1021/acsestwater.5c00542

Thalmann, F., Schermann, O., Schroll, E., Hausberger, G. (1989): Geochemischer Atlas der Republik Östereich 1 : 1,000.000. Böhmische Masse und Zentralzone der Ostalpen (Bachsedimente < 0,18 mm). Geologische Bundesanstalt, Wien.

Tollmann, A. (1964): Exkursion I/4: Radstädter Tauern. Mitt. Geol. Ges. Wien 57 (1), 49–56.

Tollmann, A. (1980): Geology and Tectonics of the Eastern Alps (Middle Sector). Abh. Geol. B.-A. 34, 197–255.

Tropper, P., Recheis, A. (2003): Garnet zoning as a window into the metamorphic evolution of a crystalline complex: the northern and central Austroalpine Ötztal-Complex as a polymorphic example. Mitt. Österr. Geol. Ges. 94, 27–53.

Untersweg, T., Schwendt, A. (1995): Die Quellen der Blockgletscher in den Niederen Tauern. Berichte der wasserwirtschaftlichen Rahmenplanung, 7.8 Hg. v. Amt der Steiermärkischen Landesregierung, Graz.

Untersweg, T., Schwendt, A. (1996): Blockgletscher und Quellen in den Niedern Tauern. Mitt. Österr. Geol. Ges. 87, 47–55.

TWV (2024): Verordnung des Bundesministers für soziale Sicherheit und Generationen über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (Trinkwasserverordnung – TWV, BGBl. II Nr. 304/2001), i.d.g.F. (zuletzt geändert durch BGBl. II Nr. 57/2024).

Valéry, A., Andréassian, V., Perrin, C. (2014a): 'As simple as possible but not simpler'. What is useful in a temperature-based snow-accounting routine? Part 1 – Comparison of six snow accounting routines on 380 catchments. Journal of Hydrology 517 (2), 1166–1175. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.04.059.

Valéry, A., Andréassian, V., Perrin, C. (2014b): 'As simple as possible but not simpler'. What is useful in a temperature-based snow-accounting routine? Part 2 – Sensitivity analysis of the Cemaneige snow accounting routine on 380 catchments. Journal of Hydrology 517 (12), 1176–1187. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.04.058.

Vavtar, F. (1981): Syngenetische metamorphe Kiesanreicherungen in Paragneisen des Ötztal-Kristallins (Kaunertal, Tirol). Veröffentlichungen des Tiroler Landesmuseums Ferdinandeum 61, 151–169.

Vavtar, F. (1988): Die Erzanreicherungen im Nordtiroler Stubai-, Ötztal- und Silvrettakristallin. Arch. f. Lagerst.forsch. Geol. B.-A. 9, 103–153.

Wagner, T., Kainz, S., Wedenig, M., Pleschberger, R., Krainer, K., Kellerer-Pirklbauer, A., Ribis, M., Hergarten, S., Winkler, G. (2019): Wasserwirtschaftliche Aspekte von Blockgletschern in Kristallingebieten der Ostalpen. Speicherverhalten, Abflussdynamik und Hydrochemie mit Schwerpunkt Schwermetallbelastungen. Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus (BMNT), 158 S.

Wagner, T., Pleschberger, R., Kainz, S., Ribis, M., Kellerer-Pirklbauer, A., Krainer, K., Philippitsch, R., Winkler, G. (2020a): The first consistent inventory of rock glaciers and their hydrological catchments of the Austrian Alps. AJES 113 (1): 1–23. DOI: 10.17738/ajes.2020.0001.

Wagner, T., Brodacz, A., Krainer, K., Winkler, G. (2020b): Active rock glaciers as shallow groundwater reservoirs, Austrian Alps. Grundwasser - Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie 37 (1): 215–230. DOI: 10.1007/s00767-020-00455-x.

Wagner, T., Ribis, M., Kellerer-Pirklbauer, A., Krainer, K., Winkler, G. (2020c): The Austrian rock glacier inventory RGI_1 and the related rock glacier catchment inventory RGCI_1 in ArcGis (shapefile) format. PANGAEA 2020. DOI:10.1594/PANGAEA.921629. Online verfügbar: https://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.921629 (letzter Zugriff 24.2.2021).

Wagner, T., Seelig, S., Krainer, K., Winkler, G. (2021a): Storage-discharge characteristics of an active rock glacier catchment in the Innere Ölgrube, Austrian Alps. Hydrological Processes 35 (5). DOI: 10.1002/hyp.14210.

Wagner, T., Seelig, S., Helfricht, K., Fischer, A., Avian, M., Krainer, K., Winkler, G. (2021b): Assessment of liquid and solid water storage in rock glaciers versus glacier ice in the Austrian Alps. Science of The Total Environment 800, 149593. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.149593.

Weber, L. (1997): Handbuch der Lagerstätten der Erze, Industrieminerale und Energierohstoffe Österreichs. Erläuterungen zur Metallogenetischen Karte von Österreich 1 : 500 000 unter Einbeziehung der Industrieminerale und Energierohstoffe. Archiv für Lagerstättenforschung, 19. Geologische Bundesanstalt, Wien.

Wemhöner, U., Schartner, C., Loishandl-Weisz, H., Schubert, G., Schedl, A. (2012): Metalle im Grundwasser in Österreich. Karten und Erläuterungen. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW), Wien.

Wemhöner, U., Humer, F., Schubert, G., Berka, R., Philippitsch, R., Hörhan, T. (2015): Uran in Grundwässern Österreichs. Bericht und Karte 1 : 500 000. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW), Wien.

Winkler, G., Wagner, T., Pauritsch, M., Birk, S., Kellerer-Pirkelbauer, A., Benischke, R., Leis, A., Morawetz, R., Schreilechner, M.G. (2016): Identification and assessment of groundwater flow and storage components of the relict rock glacier Schöneben, Niedere Tauern Range, Eastern Alps (Austria). Hydrogeology Journal 24: 937-953. DOI: 10.1007/s10040-015-1348-9.

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. & und Mueller, L. (Hg.): Novel methods and results of landscape research in Europe, Central Asia and Siberia. Vol II/71. FGBNU "VNII agrochimii", Moskau, S. 329–334.

WRRL, RL 2000/60/EG (2000): Wasserrahmenrichtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und der Rates zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich Wasserpoitik.