



 universität
innsbruck

Wasserwirtschaftliche Aspekte von Blockgletschern in Kristallingebieten der Ostalpen

Speicherverhalten, Abflussdynamik und Hydrochemie
mit Schwerpunkt Schwermetallbelastungen

(RGHeavyMetal)

Endbericht



 Bundesministerium
Nachhaltigkeit und
Tourismus



 Das Land
Steiermark

 LAND
SALZBURG

 Vorarlberg
unser Land

LAND  KÄRNTEN

Autoren: Thomas Wagner ¹, Simon Kainz ¹, Michael Wedenig ¹, Roswitha Pleschberger ^{1,6}, Karl Krainer ², Andreas Kellerer-Pirklbauer ³, Markus Ribis ⁴, Stefan Hergarten ⁵, Gerfried Winkler ¹
Kontakt: Gerfried Winkler (gerfried.winkler@uni-graz.at)

¹ Institut für Erdwissenschaften, Karl-Franzens-Universität Graz, Heinrichstraße 26, 8010 Graz, Kontakt: gerfried.winkler@uni-graz.at

² Institut für Geologie, Universität Innsbruck, Innrain 52, 6020 Innsbruck

³ Institut für Geographie und Raumforschung, Karl-Franzens-Universität Graz, Heinrichstraße 36, 8010 Graz

⁴ geo.zt gmbh – poscher beratende geologen, Saline 17, 6060 Hall in Tirol

⁵ Institut für Geo- und Umweltwissenschaften, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Albertstr. 23B, 79104 Freiburg

⁶ jetzt bei Geotechnik Team GmbH, Technikerstrasse 3, 6020 Innsbruck

Auftrag

Das Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus / BMNT (ehem. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft / BMLFUW) beauftragte das Institut für Erdwissenschaften der Karl-Franzens-Universität Graz sowie seine Forschungspartner im Rahmen der Bund/Bundesländer-Kooperation folgendes DaFNE-Forschungsprojekt (Nr. 101093) durchzuführen:

„Wasserwirtschaftliche Aspekte von Blockgletschern in Kristallingebieten der Ostalpen - Speicherverhalten, Abflussdynamik und Hydrochemie mit Schwerpunkt Schwermetallbelastung“ (RGHeavyMetal, BBK-Nr. 101093)

Die Finanzierung erfolgte durch das Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus / BMNT und die am Projekt beteiligten Bundesländer Tirol, Salzburg, Steiermark und Kärnten. Die Blockgletscher im Land Vorarlberg wurden mit nachträglicher und gesonderter Beauftragung unter Bundesbeteiligung ebenso mitberücksichtigt. Die Darstellung der Ergebnisse im Bericht erfolgt über alle beteiligten Bundesländer.

Auftraggeber vertreten durch:

BMNT: Rudolf Philippitsch, Richild Mauthner-Weber, Harald Marent; Tirol: Johannes Pinzer, Gunther Heißel, Ferdinand Thaler; Salzburg: Johannes Wiesenegger, Margot Geiger-Kaiser; Steiermark: Michael Ferstl, Peter Rauch; Kärnten: Jochen Schlamberger; Vorarlberg: Clemens Mathis

Foto Deckblatt: Blockgletscher Wannenkarsee; K. Krainer

VORWORT

Natürliche Wasserspeicher mit qualitativ hochwertigem Grund- bzw. Quellwasser als wichtige bestehende und vor allem auch zukünftige Trink- und Nutzwasserressourcen finden sich in Österreich vornehmlich in den Tal- und Beckenlandschaften mit ausgedehnten wasserführenden Sand- und Kieskörpern sowie in den verkarsteten Nördlichen und Südlichen Kalkalpen mit schüttungsstarken Quellen.

Weniger bekannt sind hingegen die Wasserressourcen in den hochgelegenen westlichen Gebirgsregionen Österreichs im Grenzbereich zu den derzeit noch vergletscherten Gebirgsgruppen der kristallinen Gesteinseinheiten der Zentralzone wie zum Beispiel der Öztaler Alpen, den Hohen Tauern, aber auch der Schobergruppe und den östlicher gelegenen Schladminger Tauern.

Insbesondere in den kristallinen, hochalpinen Regionen Österreichs, wie die der Zentralalpen, stellen Blockgletscher mit unterschiedlicher Ausprägung markante morphologische Erscheinungsformen als häufig zungenförmig ausgebildete Schuttkörper der umgebenden Gebirgsstöcke als Sedimentlieferanten dar.

Die wasserwirtschaftliche Bedeutung dieser durchaus mächtigen Schuttkörper und deren zum Teil sehr schüttungsstarken Quellen, war noch vor nicht allzu langer Zeit durch die Höhenlage über ca. 2300 m Seehöhe eher gering und vor allem der Versorgung der hochalpinen Almbewirtschaftung vorbehalten.

Das hat sich jedoch durch die rasante Tourismusedwicklung mit einem enormen Wirtschaftswachstum, insbesondere durch den Wintersport und den damit verbundenen exponentiell steigenden Wasserbedarf in den letzten Jahrzehnten, stark verändert. Im Gegensatz zu den verkarstungsfähigen bzw. leichter löslichen Kalk- und Dolomitgesteinen der Kalkalpen mit ausreichend Speicherplatz im Gebirgsinneren und schüttungsstarken Quellen, stellen sehr dicht gepresste, kristalline Gesteinsformationen wie Schiefer und Gneise durch schwer lösliche Silikatminerale schlechte Wasserspeicher dar. Vielerorts wird und muss nunmehr auf diese oft einzig wichtige und ausreichende Wasserressource in den Blockgletschern zurückgegriffen werden.

Das Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus (vormals BMLFUW) hat daher im Hinblick auf die fortschreitende hohe wasserwirtschaftliche Bedeutung der Blockgletscher in den hochalpinen Einzugsgebieten Österreichs in Kooperation mit den Bundesländern Tirol, Salzburg, Kärnten, Steiermark und Vorarlberg in einem ersten Schritt die Universität Graz, Institut für Erdwissenschaften, mit dem Forschungsprojekt über Blockgletscher beauftragt. Aufgrund der umfassenden Themenstellung erfolgte die Bearbeitung in Zusammenarbeit mit der Universität Innsbruck und weiteren externen Fachexpertinnen und Fachexperten.

Wesentliches Ziel dabei war die Erforschung der Speicher- und Entwässerungsdynamik sowie die hydrochemische und isopenchemische Erfassung unserer heimischen Blockgletscherresservoirs.



Abbildung 1: Exkursion des Projektteams mit Projektpartnern zum aktiven Blockgletscher Bergli/Lareintal im Rahmen des Endworkshops Sept. 2018 (Foto: R. Philippitsch).

Mit den vorliegenden Forschungsergebnissen wurde erstmalig auch ein einheitliches Blockgletscherinventar für die österreichischen Ostalpen der Bundesländer Vorarlberg, Tirol, Salzburg, Kärnten und die Steiermark aufgrund hochmoderner Laserscanning-Daten (airborne laserscanning/ALS) geschaffen. Ebenso wurde der bisherige Wissensstand der hydrogeologischen, hydrologischen, hydrochemischen und isotopechemischen charakteristischen Eigenschaften von Blockgletschern wesentlich erweitert und insbesondere wertvolle Erkenntnisse betreffend Abfluss- und Speicherverhalten gewonnen. Die Ergebnisse können zudem als zusätzliche Grundlage für die Beurteilung der Auswirkungen des Klimawandels wie der zunehmenden Permafrostproblematik mit steigendem Gefahrenpotential für die bewohnten Gebirgstäler genutzt werden.

Darüber hinaus werden gleichzeitig in Umsetzung der EU-Wasserrahmenrichtlinie 2000/60/EG sowie des Wasserrechtsgesetzes 1959 i.d.g.F. und des Nationalen Gewässerbewirtschaftungsplans wesentlich detailliertere Grundlagen zur Beschreibung der Charakteristik dieser hochalpinen Sonderform von Porengrundwasserkörpern geschaffen, um damit auch die Gewässerbewirtschaftung nicht nur ökonomisch, sondern auch ökologisch in diesen hochsensiblen Einzugsgebieten optimieren zu können. Mit dieser Maßnahme liegen nunmehr auch die Voraussetzungen vor, um künftig ausgewählte Quellen in das staatliche, qualitative Überwachungsmessnetz der Gewässerzustandsüberwachungsverordnung (GZÜV 2006 i.d.g.F.) übernehmen zu

können und in Folge auch Risiko- und Zustandsbeurteilungen nach der Qualitätszielverordnung Chemie Grundwasser 2010 i.d.g.F. durchzuführen. Der Abschluss dieses DaFNE-Forschungsprojektes über hoch alpine Porengrundwasserkörper stellt jedenfalls eine äußerst gediegene Basis für die noch weiteren notwendigen Erkundungsschritte zur zusätzlichen Sicherung unserer wertvollen Wasserressourcen in Österreich dar.

Rudolf Philippitsch, BMNT, Abt. I/3

Inhalt

Zusammenfassung	8
1 Einleitung und Zielsetzung.....	11
2 Grundlagen	15
3 Untersuchungsgebiet	19
3.1 Regionales Untersuchungsgebiet	19
3.2 Lokale Untersuchungsgebiete	20
3.2.1 Schöneben/Dürrtal.....	21
3.2.2 Innere Ölgrube (Ölgrube Süd)	24
3.2.3 Bergli/Lareintal.....	28
3.2.4 Hochschober	31
3.2.5 Tuxer Hauptkamm	33
3.2.6 Blockgletscher Krummgampen	36
4 Blockgletscher- und Blockgletschereinzugsgebietsinventare	39
4.1 Methoden	39
4.1.1 Ausweisung	39
4.1.2 Attributierung.....	41
4.2 Ergebnisse.....	48
4.2.1 Blockgletscherinventar	48
4.2.2 Blockgletschereinzugsgebietsinventar.....	63
5 Wasserwirtschaftliche Aspekte von Blockgletschern	69
5.1 Blockgletscherquellen - Erhebung	69
5.2 Hydrogeologische Untersuchungsmethoden	75
5.2.1 Hydrochemie.....	75
5.2.2 Isotope.....	78
5.2.3 Hydrographanalyse	78
5.2.4 Natürliche und künstliche Tracer.....	79
5.3 Ergebnisse der hydrogeologischen Untersuchungen	81
5.3.1 Hydrochemie.....	81
5.3.2 Isotope.....	89
5.3.3 Hydrographanalyse	99
5.3.4 Natürliche und künstliche Tracer.....	102
5.4 Niederschlags-Abflussmodellierung	110
5.4.1 Methode	110

5.4.2	Ergebnisse	112
6	Thermisches Verhalten.....	120
7	Interpretation und Diskussion	126
8	Ergänzende Untersuchungen	133
9	Schlussfolgerungen und Ausblick.....	134
	Danksagung	139
10	Literatur.....	140
	Anhang A	149
	Statistik zum Blockgletscherinventar	149
	Anhang B	152
	Statistik zum Blockgletschereinzugsgebietsinventar	152
	Anhang C	154
	Messstellen nach Gebirgsgruppen	154

Zusammenfassung

In den letzten Jahren rückten alpine Einzugsgebiete und ihre hydrologische Auswirkung auf darunterliegende Gewässer immer mehr in den Fokus der Forschung und wasserwirtschaftlicher Untersuchungen. Vor allem im Zusammenhang mit Permafrost und dem durch die Klimaänderung bedingten Rückgang seiner Ausdehnung ergeben sich bedeutende wasserwirtschaftliche Herausforderungen. In diesem Kontext wurden speziell die in alpinen Einzugsgebieten vorliegenden Schuttakkumulationen wie Blockgletscher, an die oft stark schüttende Quellen gebunden sind, aufgrund ihrer wasserwirtschaftlichen Bedeutung für den österreichischen Alpenraum intensiv untersucht. Blockgletscher sind die markantesten Landschaftsformen in (ehemaligen) Permafrostgebieten. Jüngste Forschungsergebnisse zeigen die Bedeutung der Blockgletscher für das Speicherverhalten und die Abflusssdynamik alpiner Einzugsgebiete. Des Weiteren konnten regional in Tirol Schwermetallbelastungen von Quellwässern aus Permafrostbereichen und im Speziellen aus Blockgletscher beeinflussten Einzugsgebieten festgestellt werden.

Das gegenständliche Projekt hatte daher die Zielsetzung, eine fundierte Grundlage für die quantitative und qualitative Beurteilung, vor allem auch in Bezug auf mögliche Schwermetallbelastungen von Blockgletscherquellen im östlichen Alpenraum (primär für Kristallingebiete) zu schaffen. Die Grundlage für das Verständnis der saisonalen Variabilität der Schwermetallkonzentrationen ist die Kenntnis der Entwässerungsdynamik unter Berücksichtigung der einzelnen Abflusskomponenten und der Speicherfunktion von intakten (aktiven und inaktiven) wie auch reliktschen Blockgletschern in alpinen Einzugsgebieten. Die Basis ist hierbei die flächendeckende Erfassung aller Blockgletscher und ihrer hydrologischen Einzugsgebiete für den österreichischen Alpenraum. Es wurde daher ein Blockgletscherinventar und ein Blockgletschereinzugsgebietsinventar für die österreichischen Alpen erstellt. Die Ausweisung erfolgte für die Bundesländer Vorarlberg, Tirol, Salzburg, Steiermark und Kärnten. Die Inventarisierung basiert auf einem Geländemodell mit einer Auflösung von 1 m (airborne laserscan/ALS – Datensatz) und berücksichtigt die bereits vorhandenen Teilinventare. Insgesamt konnten 5769 Blockgletscher und blockgletscherverdächtige Landschaftsformen und ihre hydrologischen Einzugsgebiete mit einer Gesamtfläche von ca. 303 km² bzw. 1279 km² ausgewiesen und mit verschiedenen Kennwerten attribuiert werden. Eine große Zahl (3148) an Blockgletschern in Tirol ist aufgrund des hohen Gebirgsanteils offenkundig. In weiterer Folge wurden die Daten der Blockgletscher- und Blockgletschereinzugsgebietsinventare statistisch ausgewertet.

Auf dem Blockgletscherinventar aufbauend wurden Teilgebiete der Bundesländer Vorarlberg, Tirol, Salzburg und Steiermark flächendeckend in Bezug auf Blockgletscherquellen hydrogeologisch kartiert. Die erhobenen Quellen dienten in weiterer Folge der Auswahl jener Quellen, die für ein Monitoring über eine Dauer von maximal zwei Jahren herangezogen und hydrochemisch bzgl.

Schwermetallbelastung untersucht wurden. Das Monitoring zeigte, dass die Schwermetallbelastung der Blockgletscherquellen saisonal zwar variiert aber ganzjährig erkennbar ist. Das heißt, trotz einer Verdünnung durch saisonale unterschiedlich dominante Abflusskomponenten (Schneeschnmelze, Schmelzwasser von Permafrost- oder Gletschereis, Regen) ist eine Belastung ganzjährig nachweisbar. Daher wurde ergänzend eine einmalige Probenahme an Quellen in Vorarlberg, Tirol, Salzburg und Steiermark im letzten Projektjahr 2018 durchgeführt, um eine zusätzliche räumlichen Verdichtung der untersuchten Quellen im Alpenraum zu bekommen.

Die großflächige Erhebung zeigt, dass sich die Quellwasserbelastung durch Schwermetalle, vor allem Nickel mit teilweise einem Vielfachen des Grenzwertes der Trinkwasserverordnung (TWV), im Wesentlichen auf den Großraum der Öztaler Alpen (geologisch Ötztal-Stubai-Kristallin) beschränkt und dort primär an Quellen intakter Blockgletscher gebunden ist. Eine befürchtete Verbreitung in den westlich und östlich angrenzenden Alpenraum hat sich nicht bestätigt. Die detaillierte Auswertung der hydrochemischen Daten ermöglichte die Charakterisierung der belasteten Quellwässer und den Vergleich mit anderen bekannten, rein lithologisch/geologisch bedingten Belastungen von Quellwässern in einzelnen regionalen Gebieten der Alpen. Es konnten zwei Kationenvergesellschaftungen an belasteten Quellwässern identifiziert werden, eine Nickel/Mangan/Aluminium-Gruppe und eine Arsen/Uran-Gruppe. Die Ergebnisse zeigen, dass die Belastung von Quellwässern durch die Nickel/Mangan/Aluminium-Gruppe großflächig primär im Gebiet Ötztal-Stubai-Kristallin auftritt.

Eine derartige Belastung konnte nur an einer weiteren Quelle in den steirischen Schladminger Tauern festgestellt werden, wo eine an Störungen gebundene sulfidische Vererzung bekannt ist. Aufgrund der hydrochemischen Ähnlichkeit der belasteten Quellenwässer im Gebiet Ötztal-Stubai Kristallin und der Quelle in den Schladminger Tauern erscheinen sulfidische Vererzungen auch für die Quellen Tirol sehr plausibel.

Sämtliche erhobenen hydrochemischen Daten wurden in die H₂O-Datenbank des Bundesministeriums im Umweltbundesamt eingepflegt und stehen somit bundesweit zur Verfügung.

Um die Abflusssdynamik und das Speicherverhalten v.a. von intakten Blockgletschern besser zu verstehen, wurden Monitoring-Systeme an einzelnen Blockgletscherstandorten in Tirol installiert und bestehende erweitert, um ergänzende Untersuchungen durchführen zu können. Neben der kontinuierlichen Erfassung des Abflusses und der Parameter Wassertemperatur und elektrische Leitfähigkeit der Quellwässer wurden Markierungsversuche, Isotopen-Ereignisbeprobungen der Quellwässer sowie Isotopenmessungen von Regen, Schnee (Schneeprofile) und Permafrosteis durchgeführt. Basierend auf den Vorkenntnissen von reliktschen Blockgletschern konnte mit den neuen Daten ein verbessertes Prozessverständnis der Abflusssdynamik von intakten (im Speziellen von aktiven) Blockgletscher erarbeitet werden.

Dadurch ließ sich auch ein konzeptionelles Entwässerungsmodell für intakte Blockgletscher ableiten. Es konnte bei intakten Blockgletschern eine entsprechende Grundwasserkomponente - wie bei den reliktschen - nachgewiesen werden, die in den Wintermonaten einen entsprechenden Basisabfluss aus diesen Landschaftsformen ermöglicht. Im Sommerhalbjahr sind Schnee, Regen und Schmelzwasser von Gletscher- und Permafrosteis wichtige Abflusskomponenten. Es ist gelungen, grob die saisonale sowie die tageszyklische Variabilität der einzelnen Komponenten zueinander aufzuschlüsseln.

Für reliktsche Blockgletscher konnte mit Hilfe eines Niederschlags-Abflussmodells an einem alpinen Einzugsgebiet mit einer Größe bis ca. 44 km² gezeigt werden, dass auf Tagesbasis der Abflussanteil an darunterliegenden Pegeln bis zum vierfachen der Blockgletschereinzugsgebietsfläche betragen kann. Erste Ansätze, diese Modellierung auch auf wesentlich größere Einzugsgebiete mit einer Größe bis zu ca. 200 km² (d.h. deutlich tiefer liegende Pegel) anzuwenden, wurden im Zuge des Projekts an Einzugsgebieten in der Steiermark umgesetzt und zeigen eine mehr als dreifache Beeinflussung auf Tagesbasis. Dieser Ansatz für eine regionale Skala sollte konsequent weiterverfolgt werden.

In weiterer Folge konnte das Niederschlags-Abflussmodell erfolgreich mit einem Eisspeichermodul erweitert und für ein Testgebiet mit einem aktiven Blockgletscher in Tirol (Ölgrube Süd) angewendet werden. Neben reliktschen können somit auch intakte Blockgletscher als bedeutende Grundwasserspeicher/-puffer angesprochen werden. Somit wurde eine Grundlage geschaffen, den Einfluss von intakten Blockgletschern auf das Abflussverhalten darunterliegender Gewässer zu quantifizieren und somit auch Permafrost und Gletscher beeinflusste Einzugsgebiete zu modellieren. Dies ist eine wesentliche Grundlage für Prognosen in Bezug auf Klimawandel bedingte Änderung der Permafrostgrenze in alpinen Einzugsgebieten, bedarf aber noch weiterführenden Untersuchungen.

Generell zeigen die Ergebnisse, dass Blockgletscher (reliktsche und intakte) als seichte Aquifere und deren Funktion als Speicher/Puffer eine hohe wasserwirtschaftliche Relevanz haben. Angesichts des Klimawandels und der touristischen Nutzung alpiner Regionen wird ihre Bedeutung noch bekräftigt, wie z. B. hinsichtlich der Trinkwasserversorgung für Hütten oder der Beschneiungsanlagen, die durch Blockgletscherquellen gespeiste Speicherteiche ihr Wasser beziehen. Weiterführende Untersuchungen in Bezug auf das Abflussverhalten im größeren regionalen Maßstab und auf die Auswirkungen des Klimawandels auf Blockgletscher (Abschmelzprozess des Permafrosteises und damit Wandel von intakt zu reliktschen Blockgletschern) sind konsequent anzustreben. Ein weiterführendes Monitoring relevanter Quellen und deren übergeordneter Einzugsgebiete ist hierfür essentiell um lokal und folglich auch regional diese Grundwasserkörper besser und nachhaltig bewirtschaften zu können.

1 Einleitung und Zielsetzung

Alpine Regionen sind geprägt durch periglaziale Landschaftsformen wie vor allem Blockgletscher, die Indikatoren von durch Gebirgspermafrost (d.h. ganzjährig gefrorener Untergrund mit einer wenige Meter mächtigen, saisonalen Auftauschicht) beeinflussten Gebieten darstellen. Aktive Blockgletscher sind Schutt- und Eisgemische in Permafrostgebieten die langsam talabwärts kriechen und große Schutt- und Eisvolumina beinhalten können (Berthling, 2011; Haeberli, 2013). Bedingt durch klimatische Erwärmung kommt es zum Abschmelzen des Eisgehalts (viel langsamer als bei schuttfreien Eisgletschern bedingt durch den Puffereffekt der saisonalen Auftauschicht) und aktive Blockgletscher werden letzten Endes zu reliktschen Formen (Barsch, 1996). Diese Schuttakkumulationen bilden bedeutende Grundwasserspeicher im alpinen/hochalpinen Raum. Speziell reliktsche Blockgletscher als wichtige Grundwasserspeicher in alpinen kristallinen Einzugsgebieten gewinnen zunehmend eine besondere wasserwirtschaftliche Bedeutung, wie bereits Untersweg & Schwendt (1995, 1996) für die Steirischen Niederen Tauern zeigen konnten. Weitere Untersuchungen in den letzten Jahren im Zuge des EFRE-Projekts „Grundwasserspeicherung und Entwässerungsdynamik reliktscher Blockgletscher (GZ:ABT8-11.B-37)“, gefördert aus Mitteln des Europäischen Fonds für Regionale Entwicklung (EFRE) und aus Mitteln des Landes Steiermark sowie „Investition in ihre Zukunft“, lieferten wichtige Erkenntnisse zu den Speicher- und Entwässerungsprozessen (Pauritsch et al., 2015, 2017; Winkler et al., 2016 a,b). Des Weiteren konnten erste Grundlagen über den quantitativen Einfluss der reliktschen Blockgletscher als Grundwasserspeicher auf die darunterliegenden Oberflächengewässer mit deren aquatischen Ökosystemen erarbeitet werden (Wagner et al., 2016). Darüber hinaus zeigten Rogger et al. (2017) in einem alpinen Einzugsgebiet (5 km²) in den Öztaler Alpen, dass Schuttmassen alpiner Einzugsgebiete, die heute noch im Permafrostbereich liegen, durch Abschmelzen des Permafrosteises in Zukunft als wirksame Grundwasserspeicher bzw. -puffer für die Trink- und Nutzwasserwirtschaft dienen können.

Untersuchungen der letzten Jahre im alpinen Permafrost, insbesondere an aktiven Blockgletschern in den Öztaler Alpen (Tirol) haben gezeigt, dass bei einigen Blockgletscherquellen massive Schwermetallbelastungen, vor allem durch die Elemente Nickel als auch Mangan, Kobalt, Kupfer und Zink) vorliegen (Krainer et al., 2015a,b; Nickus et al., 2015; Ribis, 2017). Abbildung 2 gibt einen Überblick über jene Gebiete, in denen deutlich erhöhte Schwermetallbelastungen bereits vor Projektbeginn erfasst wurden.

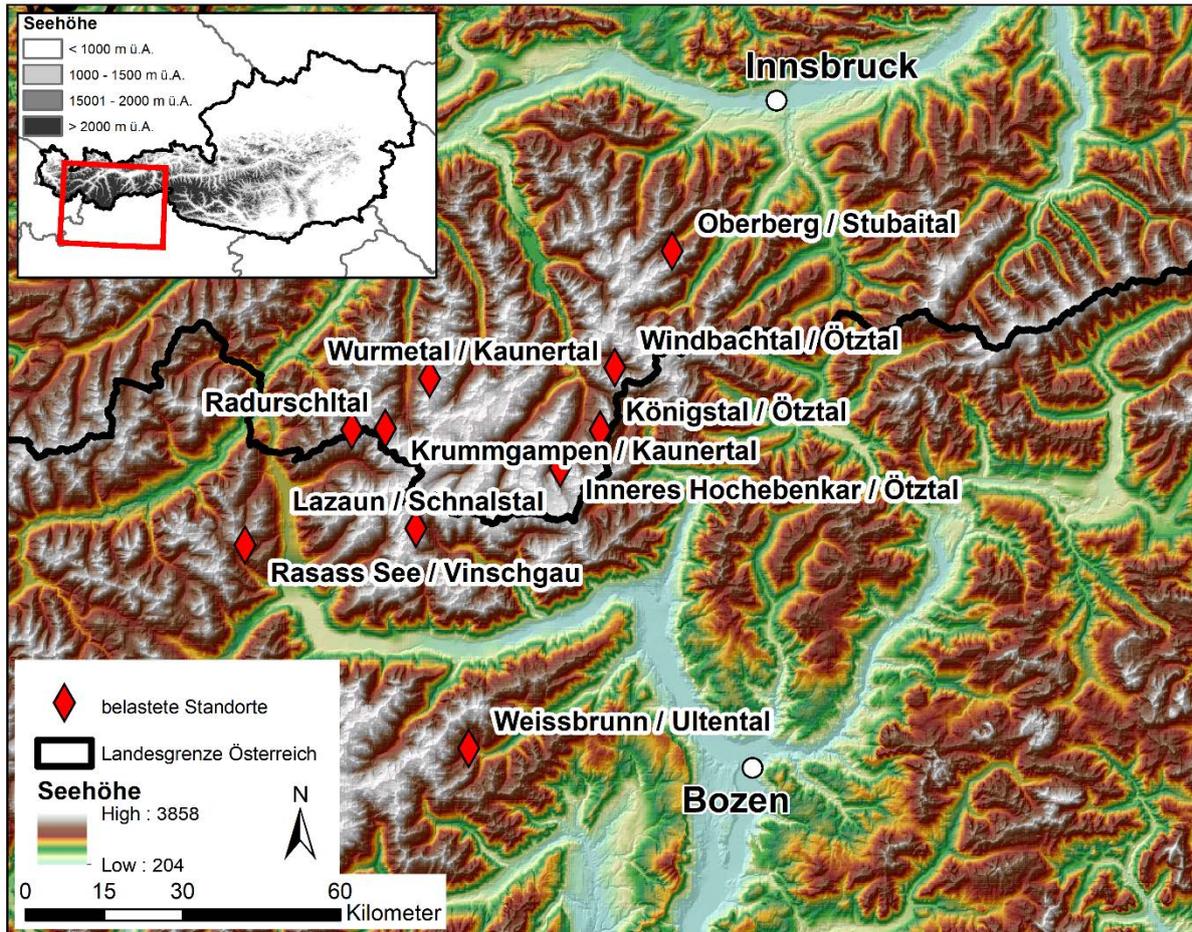


Abbildung 2: Übersichtsdarstellung von bereits vor Projektbeginn bekannter Standorte mit deutlich erhöhten Schwermetallwerten (Ribis, 2017).

Bohrkerne aus Kernbohrungen am Blockgletscher Lazaun (Schnalstal, Südtirol) haben gezeigt, dass bestimmte Schwermetalle im Permafrosteis in mehreren Horizonten stark angereichert sind (Krainer et al., 2015a). Die Schwermetalle (z.B. Ni) können möglicherweise über atmosphärischen Eintrag in das Eis gelangt sein, oder aber aus dem umliegenden Festgestein stammen. Aufgrund des möglichen atmosphärischen Eintrags ist nicht auszuschließen, dass die Belastungen für Teilgebiete flächendeckend oder sogar großflächig für den gesamten östlichen Alpenraum vorliegen können. In Bezug auf die Fragestellung von Schwermetallbelastung wurden noch keine großflächigen, österreichweiten Untersuchungen der wasserwirtschaftlich relevanten Blockgletscherquellen in den alpinen Kristallingebieten durchgeführt.

Die Schwermetallkonzentrationen der Quellwässer zeigen saisonale Schwankungen, wobei Grenzwerte der Trinkwasserverordnung (TWV) um ein Vielfaches (bis zum 30-fachen) überschritten werden. Die saisonalen Schwankungen der Schwermetall-Konzentrationen (Krainer et al., 2015b; Nickus et al., 2015) weisen auf eine Verdünnungskomponente hin, weshalb dem

Abflussverhalten und seinen Komponenten eine besondere Bedeutung zukommt. Das Abflussverhalten aktiver Blockgletscher wurde von Krainer & Mostler (2002) und Krainer et al. (2007) erstmals untersucht, wobei auf mehrere Abflusskomponenten (Schmelzwässer von Gletschereis, Permafrosteis und Schnee, Regen und Grundwasser) hingewiesen wurde. Erste quantitative Untersuchungen des Abflussverhaltens reliktscher Blockgletscher wurden in den Seckauer Tauern durchgeführt (Pauritsch et al., 2015, 2017; Winkler et al., 2016a,b). Die Entwässerungsdynamik der aktiven Blockgletscher ist im Vergleich zu den reliktschen aufgrund des Permafrosteises komplexer und weist noch viele offene Fragen auf, die für ein besseres Prozessverständnis der Verdünnung beantwortet werden müssen. Speziell ist die Relevanz einer Grundwasserkomponente und der damit verbundenen Speicherkapazität in intakten Blockgletschern noch zu diskutieren. Harrington et al. (2018) liefern dafür erste Ansätze und Erkenntnisse.

Eine weitere besondere Relevanz der sich ändernden Abflussdynamik ergibt sich aus dem Klimawandel durch die Änderung der Lufttemperaturen sowie Niederschlagsmengen und -intensitäten. Dieser bewirkt ein verstärktes Abschmelzen des Permafrosteises außerhalb (z. B. gefrorene Schutthalden) sowie in den Blockgletschern. Dies führt zu einer Veränderung von aktiven zu inaktiven und letztendlich zu reliktschen Blockgletschern, was voraussichtlich zu einer Änderung der Speichereigenschaften und somit der Abflussdynamik führen wird (Rogger et al., 2017). Das Abschmelzen des in Blockgletschern gebundenen Eises und welche Auswirkungen durch den Klimawandel zu erwarten sind, sind aktuell diskutierte Forschungsthemen (Jones et al., 2018, 2019).

Ziel des Projektes war es, eine Grundlage für die qualitative und quantitative Beurteilung in Bezug auf Schwermetallbelastung der Blockgletscherquellen im östlichen kristallinen Alpenraum zu schaffen. Die Basis für das Verständnis der saisonalen Variabilität der Schwermetallkonzentrationen ist die Kenntnis der Entwässerungsdynamik und der Speicherfunktion von intakten (aktiven und inaktiven) wie auch reliktschen Blockgletschern in alpinen Einzugsgebieten. Die hierfür geplanten methodischen Arbeitspakete (AP.I – AP.V) umfassten:

AP.I Blockgletscher- und Blockgletschereinzugsgebietsinventare

Die Erstellung eines einheitlichen Blockgletscher- und Blockgletschereinzugsgebietsinventars für die österreichischen Ostalpen in den Bundesländer Vorarlberg, Tirol, Salzburg, Steiermark und Kärnten.

AP.II Quellkartierung

Die großflächige und in Teilgebieten flächendeckende Erfassung der von Permafrost beeinflussten und an Blockgletscher (intakt und reliktsch) gebundenen Quellen.

AP.III Hydrochemische Charakterisierung – Probenahme

Die hydrochemische Charakterisierung der Quellwässer v.a. in Hinblick auf Schwermetallbelastung. Die Ergebnisse und Daten wurden digital für weitere Auswertungen und Untersuchungen zur Verfügung gestellt (H₂O-Fachdatenbank).

AP.IV Hydrogeologische Charakterisierung

Beschreibung/Charakterisierung der Grundwasserleiter sowie der Abflusskomponenten intakter und reliktscher Blockgletscher mit Hilfe von Hydrographanalysen und Untersuchungen mittels natürlicher und künstlicher Tracer.

AP.V Niederschlags-Abflussmodellierung

Niederschlags-Abflussmodellierungen an lokalen Testgebieten und in weiterer Folge auch im regionalen Maßstab, um das Abflussverhalten der Blockgletscher selbst und ihre Auswirkung auf tiefer liegende Fließgewässer und die damit verbundene saisonal variierende Verdünnung von Schwermetallkonzentrationen besser zu verstehen.

2 Grundlagen

Blockgletscher sind periglaziale Landschaftsformen, die häufig in alpiner Umgebung, jedoch auch in höheren Breitengraden, angetroffen werden. Im Hochgebirgsspermafrost bilden sie die markantesten Landschaftseinzelformen, was in zahlreichen Arbeiten beschrieben und diskutiert wird (z.B. Barsch, 1996; Haeberli, 1985, 2005; Haeberli et al., 2006; Jones et al., 2017). Abbildung 3a zeigt den aktiven Blockgletscher „Ölgrube Süd“ im Kautental, an dessen Stirn mehrere Quellen entspringen, die den darunter fließenden Gebirgsbach speisen. Ein Beispiel eines reliktschen Blockgletschers ist mit dem „Hölltal-Blockgletscher“ in den Seckauer Tauern in Abbildung 3b dargestellt.

Blockgletscher sind wohl eine der markantesten periglazialen Landschaftsformen aufgrund ihrer doch teilweise beträchtlichen Größe von bis zu einem Quadratkilometer und ihrer üblicherweise klar erkennbaren Abgrenzung zur Umgebung. Die erste wissenschaftliche Erwähnung eines Blockgletschers wurde von Steenstrup (1883) in Grönland gemacht (Humlum, 1982; Barsch, 1996). Jedoch hat die Blockgletscherforschung relativ spät eingesetzt, ist aber in den letzten Jahrzehnten intensiviert worden. Wahrhafting & Cox (1959) lieferten die erste noch aktuelle und bedeutende Arbeit über Blockgletscher. Einen Überblick über die Erforschungsgeschichte von Permafrost-relevanten Fragestellungen in Österreich bietet Krainer et al. (2012).

Selbst heute noch werden die Diskussionen über die Definition von Blockgletschern kontrovers geführt, da es durchaus unterschiedliche Ansichten zur Definition eines Blockgletschers gibt.

Barsch (1996) lieferte eine morphologische Definition: *„Aktive Blockgletscher sind loben- oder zungenförmige Körper die aus ständig gefrorenem, unverfestigtem Material bestehen, übersättigt mit in Zwischenräumen enthaltenem Eis und Eislinsen, welche aufgrund der Deformation des darin befindlichen Eises hangabwärts bzw. talwärts kriechen und welche daher Kennzeichen von kohäsivem Fließen sind.“* („Active rock glaciers are lobate- or tongue-shaped bodies of perennially frozen unconsolidated material, supersaturated with interstitial ice and ice lenses that move downslope or downvalley by creep as a consequence of the deformation of ice contained in them and which are, thus, features of cohesive flow.“).

Berthling (2011) gibt einen aktuellen Überblick über diese Diskussion und liefert eine Definition, die die exakte Herkunft des Eises in (aktiven) Blockgletschern nicht benötigt: *„Aktive Blockgletscher sind der sichtbare Ausdruck kumulierter Deformation durch langfristiges Kriechen von Eis/Schutt-Gemischen unter Permafrostbedingungen.“* („Active rock glaciers are the visible expression of cumulative deformation by long-term creep of ice/debris mixtures under permafrost conditions.“).



(a)



(b)

Abbildung 3: (a) Aktiver Blockgletscher „Ölgrube Süd“ im Kaunertal in den Öztaler Alpen mit an der Stirn entspringenden Quellen und darunter liegendem Gebirgsbach (Foto: G. Winkler); (b) reliktscher Blockgletscher „Hölltal“ im Ingeringtal in den Seckauer Tauern (Foto: T. Wagner).

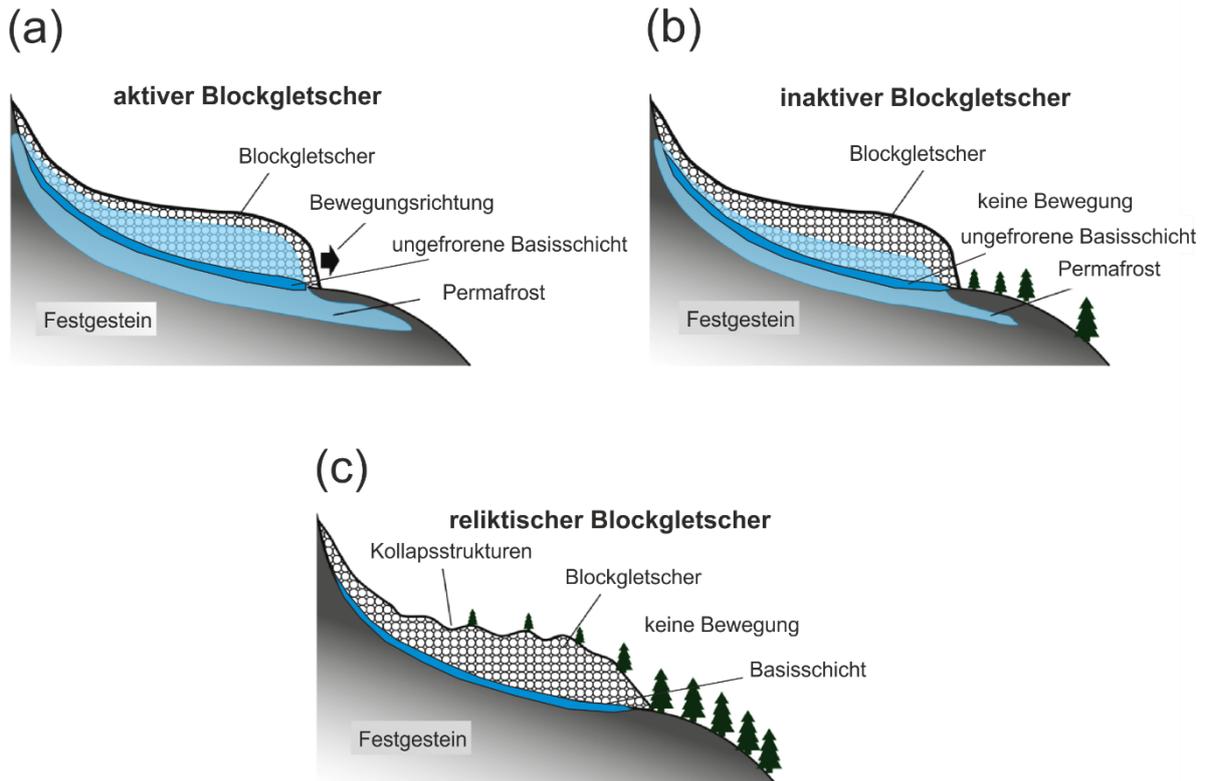


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Blockgletscherklassifikation in (a) aktive, (b) inaktive und (c) reliktsche Blockgletscher (modifiziert nach Winkler (2018), basierend auf Barsch (1996)). Zu beachten ist der (ungefrorene) Basislayer bzw. Grundwasserkörper, der in dunklem Blau gehalten ist.

Grundsätzlich werden morphologisch **intakte** und **reliktsche** (fossile) Blockgletscher unterschieden. Intakte Blockgletscher ihrerseits sind in **aktive** und **inaktive** Blockgletscher zu untergliedern (Abbildung 4).

Aktive Blockgletscher

Aktive Blockgletscher weisen im geneigten Gelände aufgrund ihres hohen Eisgehalts Bewegungsraten von mehreren Zentimetern bis Metern pro Jahr auf (z. B. Krainer & Mostler, 2006). Neben und auch wegen der Bewegungsraten sind sie durch das Fehlen von Vegetation charakterisiert (Barsch, 1996), die Blockgletscherstirn weist einen Böschungswinkel von oft 40° und mehr auf (Abbildungen 3a, 4a), was zur Instabilität der Stirn führt. Das Quellwasser ist vor allem durch die niedrige mittlere Wassertemperatur (kleiner 1°C , z. B. Krainer & Mostler, 2002) gekennzeichnet.

Inaktive Blockgletscher

Inaktive Blockgletscher (Abbildung 4b) weisen keine (erkennbaren) Bewegungen auf, was auf einen reduzierten Eisanteil aufgrund klimatischer Änderungen

(klimatisch inaktiv), zu geringem Nachschub an Blockmaterial, Eis oder flacher werdende Untergrundmorphologie (dynamisch inaktiv) zurückgeführt werden kann (Barsch, 1992). Sie können bereits eine Vegetationsbedeckung aufweisen und die Stirn ist durch einen deutlich flacheren Böschungswinkel mit entsprechender Stabilität gekennzeichnet. Eine Reaktivierung zu aktiven Blockgletschern kann bei sich ändernden Rahmenbedingungen auftreten (Barsch, 1996).

Reliktische (fossile) Blockgletscher

Reliktische Blockgletscher beinhalten im Gegensatz zu den intakten Blockgletschern kein Eis mehr. Sie zeigen ausgeprägte Kollapsstrukturen an der Oberfläche aufgrund der Volumenabnahme durch das Abschmelzen des Eisanteils und sind von Vegetation bedeckt (Abbildungen 3b, 4c). Sie sind aus klimageomorphologischer Sicht Vorzeitformen und zeigen frühere Permafrostbereiche an (z. B. Harrison et al., 2008).

Es soll hier aber festgehalten sein, dass die Genese eines Blockgletschers von seiner Entstehung (aus Hangschutt „talus-derived/ice-cemented“ oder aus schuttbedeckten Gletschern „glacier-derived/ice-cored“ entwickelt;) bis hin zu seinem „Zerfall“ in einen reliktschen/fossilen Blockgletscher komplex ist (Barsch, 1996). Die subjektive Unterscheidung rein anhand der Morphologie und des Bewuchses ist daher nicht einfach und nicht immer eindeutig, da berücksichtigt werden muss, dass es Übergangsformen – auch innerhalb einer Form selbst – gibt.

3 Untersuchungsgebiet

3.1 Regionales Untersuchungsgebiet

Das übergeordnete Untersuchungsgebiet für die Ausweisung der Blockgletscherinventare (Abbildung 5) umfasst im Wesentlichen die in Österreich auf Basis der EU-Wasserrahmenrichtlinie 2000/60/EG bzw. der Gewässerzustandsüberwachungsverordnung (GZÜV 2006 i.d.g.F.) festgelegten Grundwasserkörper:

GK100010 Zentralraum [DBJ], GK100055 Salzburger Hohe Tauern [DUJ], GK100186 Zentralzone [DRA], GK100185 Salzburger Hohe Tauern [MUR], GK100184 Turrach, Kreischberg, Frauenalpe, Stolzalpe [MUR], GK100052 Niedere Tauern einschl. Grauwackenzone [DUJ], GK100116 Niedere Tauern einschl. Seckauer Tauern [MUR], GK100120 Seetaler Alpen Nord [MUR], GK100152 Kristallin [RHE] und GK100154 Nördliche Kalkalpen [RHE].

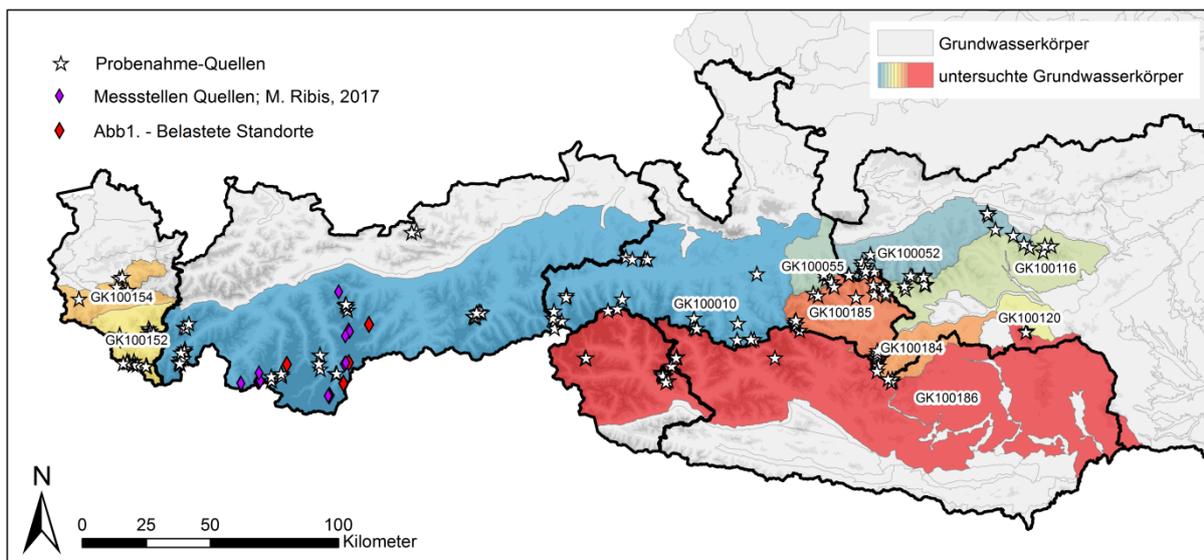


Abbildung 5: Übersichtskarte des übergeordneten Untersuchungsgebiets basierend auf der Grundwasserkörpereinteilung im NGP 2015 (Oberflächennahe Grundwasserkörper), bunt eingefärbte Bereiche sind die untersuchten Grundwasserkörper (primär kristalline Gebiete). Standorte der Probenahme-Quellen sind als Stern-Symbole gezeigt; Rauten verweisen auf die belasteten Standorte in Nordtirol, bzw. auf jene die von Ribis (2017) untersucht wurden.

In Ergänzung zu den in Abbildung 2 angeführten Standorten der belasteten Quellwässer in Tirol zeigt Abbildung 5 die zusätzlich berücksichtigten Quellen von Ribis (2017) sowie alle Standorte der Blockgletscherquellen, die im Zuge des Projekts untersucht wurden.

3.2 Lokale Untersuchungsgebiete

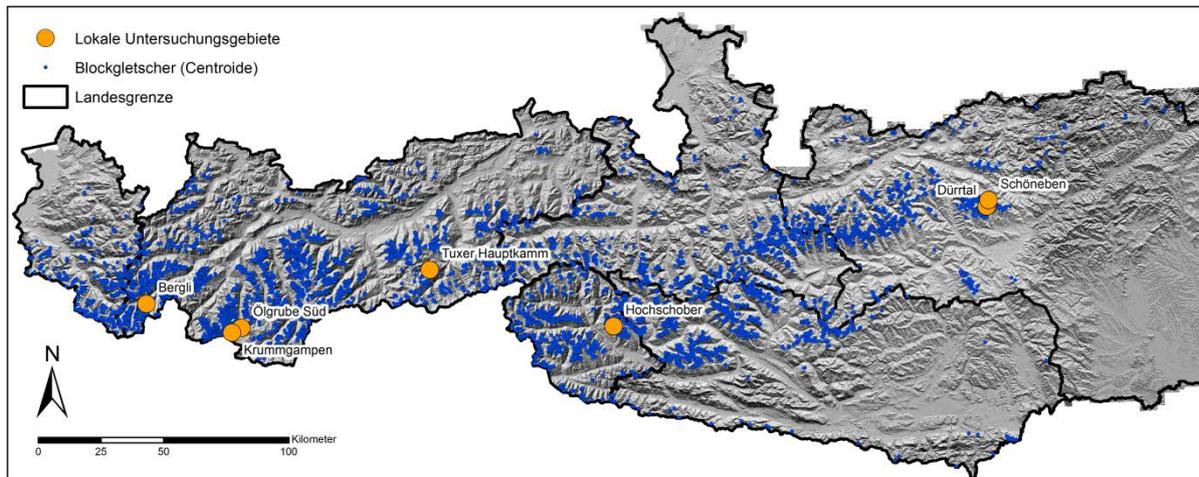


Abbildung 6: Übersichtsdarstellung der lokalen Untersuchungsgebiete in Tirol und der Steiermark (orange Punkte).

Für die Untersuchungen zum besseren Prozessverständnis der hydrogeologischen Eigenschaften dieser Landschaftsformen wurden im Wesentlichen neben der regelmäßigen Probenahme an ausgewählten Messstellen (lokale Testgebiete, Abbildung 6 und Tabelle 1) auch zeitlich hoch aufgelöste Detailuntersuchungen durchgeführt.

Ziel der Untersuchungen an den lokalen Testgebieten ist, die Speicherkapazität und Entwässerungsdynamik sowie die Abflusskomponenten der Quellwässer v.a. intakter Blockgletscher zu charakterisieren und quantitativ zu erfassen, und diese mit dem Abflussverhalten reliktscher Blockgletscher zu vergleichen.

Die Kenntnis über das Abflussverhalten stellt eine wesentliche Grundlage für Prognosen künftiger wasserwirtschaftlicher Nutzungen der Wasserressourcen alpiner Einzugsgebiete dar. Die Grundlage für die im Projekt durchgeführten Untersuchungen bildeten Testgebiete, an denen vorab langjährig Untersuchungen durchgeführt wurden und eine verwendbare Datengrundlage vorlag. In Ergänzung zu den Voruntersuchungen und bestehenden Messinstrumentierungen wurden zusätzliche Erkundungen umgesetzt. Einen Überblick über die für das gegenständliche Projekt relevanten, lokalen Untersuchungen in den jeweiligen Gebieten gibt Tabelle 1. Im Anschluss werden jene Testgebiete, die für die Untersuchungen des gegenständlichen Projektes ausgewählt wurden, ihre Instrumentierung sowie die spezifischen Ziele der Untersuchungen kurz beschrieben.

Tabelle 1: Vor dem Projekt vorliegende und ergänzte Geländearbeiten und Monitoring-Parameter. Elektrische Leitfähigkeit des Wassers (EC), Wassertemperatur (WT), Schüttungsmenge der Quelle (Q), Niederschlag (P), Lufttemperatur (AT), Luftfeuchte (AH), Windrichtung (WD), Windgeschwindigkeit (WV), Globalstrahlung (GR) und Strahlungsbilanz (RB), Digitalkamera für Fotos der Schneedeckendynamik (RDC). In grau gehaltene Felder zeigen ergänzende Arbeiten des Projekts an, rosa hinterlegte Felder sind Testgebiete, deren Erkenntnisse und Daten für die Interpretation eingebunden wurden, jedoch keine Projektgebiete sind.

	Schöneben	Dürrtal	Ölgrube Nord	Ölgrube Süd	Krummgampen	inneres Hochebenkar	äußeres Hochebenkar	Hochschober	Bergli (Galtür)	Tuxer Hauptkamm	Lazaun (IT)
Geologisch/geomorphologische Kartierung	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Monitoring Quelle WT	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Monitoring Quelle EC	X	X	X	X	X	X	X	-	X	-	X
Monitoring Messpegel Q	X	-	X	X	X	X	X	X	X	-	X
Hydrochemische Untersuchungen	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Isotopenhydrologische Untersuchungen	X	X	X	X	X	-	-	X	X	X	-
Schwermetalluntersuchungen	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Markierungsversuche	X	-	-	X	-	-	-	-	X	-	-
Meteorologische Station (P, AT, AH, WD, WV, GR, RB)	X	-	-	-	-	X	X	-	-	-	X
AT/AH Station	X	X	-	-	-	X	X	-	-	-	X
Isotopensignatur Niederschlag	X	-	X	X	-	-	-	X	X	-	-
Monitoring Bodentemperatur	X	X	-	X	X	-	-	X	X	X	-
Schneedeckendynamik (RDC)	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Geophysikalische Untersuchungen - Geometrie	X	-	X	X	-	-	-	-	-	-	-
Bewegungsraten	-	-	-	X	-	-	X	-	-	-	X

3.2.1 Schöneben/Dürrtal

Die lokalen östlichsten Untersuchungsgebiete in der Steiermark (Abbildung 6) umfassen die Einzugsgebiete des Schöneben- und Dürrtal-Blockgletschers (Abbildung 7). Das Gestein und Schuttmaterial beider Einzugsgebiete besteht aus granitoidischen Gneisen des Silvretta-Seckau Deckensystems und der mesozoischen Deckschichten des Oberostalpins.

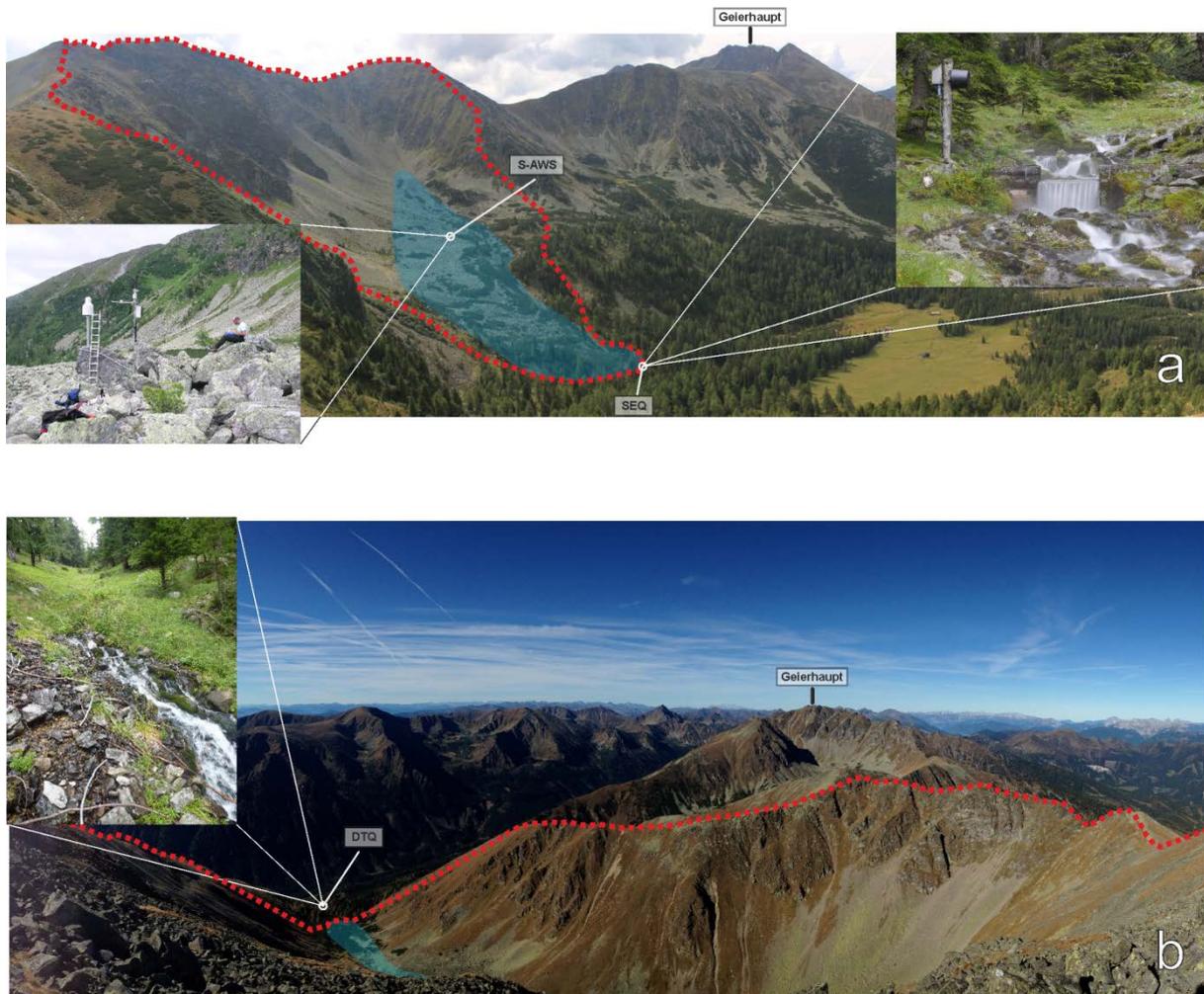


Abbildung 7: Überblick über die Einzugsgebiete (rot strichlierte Linien) des Schöneben-Blockgletschers (a) und des Dürrtal-Blockgletschers (b) mit dem Geierhaupt (2417 m ü.A.) als höchstem Gipfel der Seckauer Tauern. Die Blockgletscher sind in blauer Farbe ausgewiesen. Die kleinen Fotos zeigen die Hauptquellen SEQ und DTQ der Einzugsgebiete sowie die Wetterstation S-AWS am Schöneben-Blockgletscher (Winkler et al., 2016b).

Das Einzugsgebiet des Schöneben-Blockgletschers hat eine Fläche von 0,67 km² und reicht bis auf eine Höhe von 2295 m ü.A. (Abbildung 8). Der Blockgletscher wird an der orographisch rechten Seite von Schuttfächern überlagert, bzw. hat er sich aus diesen entwickelt, weshalb ein fließender Übergang vorliegt. Der zungenförmige Schöneben-Blockgletscher hat eine maximale Länge von 746 m, eine maximale Breite von 244 m und umfasst eine Fläche von 0,11 km². Die Blockgletscherwurzel befindet sich in einer Höhe von 1912 m und die Blockgletscherstirn reicht bis auf 1715 m hinab. Am Fuße der Blockgletscherstirn entspringt die Schönebenquelle (SEQ), durch die das Einzugsgebiet entwässert wird. Der Schöneben-Blockgletscher ist teilweise von Vegetation bedeckt, die sich aus Gräsern, Legföhren (*Pinus mugo*) und vereinzelt Bäumen (*Larix*, *Pinus cembra*) zusammensetzt (Abbildung 7a). Die Quelle SEQ wurde vom Hydrographischen Dienst Steiermark als Messstelle ausgebaut und ins hydrographische Messstellennetz als „Schönebenquelle“ (HZB-Nummer 396762) übernommen (Abbildungen 7, 8). Seit 2002 werden an der Messstelle zeitlich hoch

aufgelöst kontinuierlich die Parameter Wasserstand [mm] und Wassertemperatur [°C] gemessen, seit 2008 werden zusätzlich die elektrische Leitfähigkeit [$\mu\text{S}/\text{cm}$] und Wassertemperatur [°C] direkt am Quellaustritt erfasst (Winkler et al., 2016a). Geophysikalische Untersuchungen (Refraktionsseismik und Georadar) am Schöneben Blockgletscher aus dem Jahr 2012 ergaben einen ersten Einblick in die Internstruktur eines reliktschen Blockgletschers (Winkler et al., 2016a,b).

Das Einzugsgebiet des Dürrtal-Blockgletschers hat eine Fläche von 1,13 km² und reicht bis in eine Höhe von 2415 m ü.A. (Abbildung 8). Zusätzlich zu den Bereichen die als Blockgletscher, Schuttfächer oder schroffer Fels ausgewiesen sind (wie im Einzugsgebiet des Schöneben-Blockgletschers), sind hier auch großflächige Gebiete mit zum Teil von Grasbewuchs bedecktem Hangschutt vorhanden (Winkler et al., 2016a). Der ebenfalls zungenförmige Dürrtal-Blockgletscher hat eine maximale Länge von 859 m, eine maximale Breite von 134 m und bedeckt 0,079 km². Talaufwärts des Blockgletschers befinden sich weitere, zum Teil mächtige Schuttakkumulationen, welche aufgrund der fehlenden Bewegungsstrukturen nicht als Blockgletscher ausgewiesen wurden. Die Quelle, durch die das Einzugsgebiet entwässert wird (DTQ), entspringt erst 350 m weiter talabwärts (südwestlich) der Blockgletscherstirn. Dabei handelt es sich um eine Quellgruppe mit fünf Quellaustritten, deren relativer Beitrag zur Gesamtschüttung von den vorherrschenden hydrometeorologischen Bedingungen abhängig ist. Die Wassertemperatur und elektrische Leitfähigkeit der Quelle werden an einem Quellaustritt gemessen, der selbst nach langen Trockenperioden noch wasserführend ist. Auch der Dürrtal-Blockgletscher ist teilweise von Vegetation bedeckt, die sich aus Gräsern und vor allem im tiefer liegenden Bereich aus Legföhren (*Pinus mugo*) und vereinzelt Bäumen (*Larix decidua*, *Pinus cembra*) zusammensetzt (Abbildung 7b).

Im November 2011 wurde am Schöneben-Blockgletscher in zentraler Lage (1820 m ü.A.) eine automatische Wetterstation (S-AWS) errichtet, welche Lufttemperatur [°C], Luftfeuchte [%], Niederschlag [mm], Windgeschwindigkeit [m/s], Windrichtung [°], Globalstrahlung [W/m²] und Strahlungsbilanz [W/m²] misst und halbstündlich aufzeichnet. Zusätzlich wurden auch Lufttemperatur-/Luftfeuchtesensoren (mit Strahlungsschutz) an einer Position im oberen Bereich des Schöneben-Blockgletschers (S-ATH) sowie an zwei Positionen auf dem Dürrtal Blockgletscher installiert (D-ATH1 und D-ATH2, Abbildung 8).

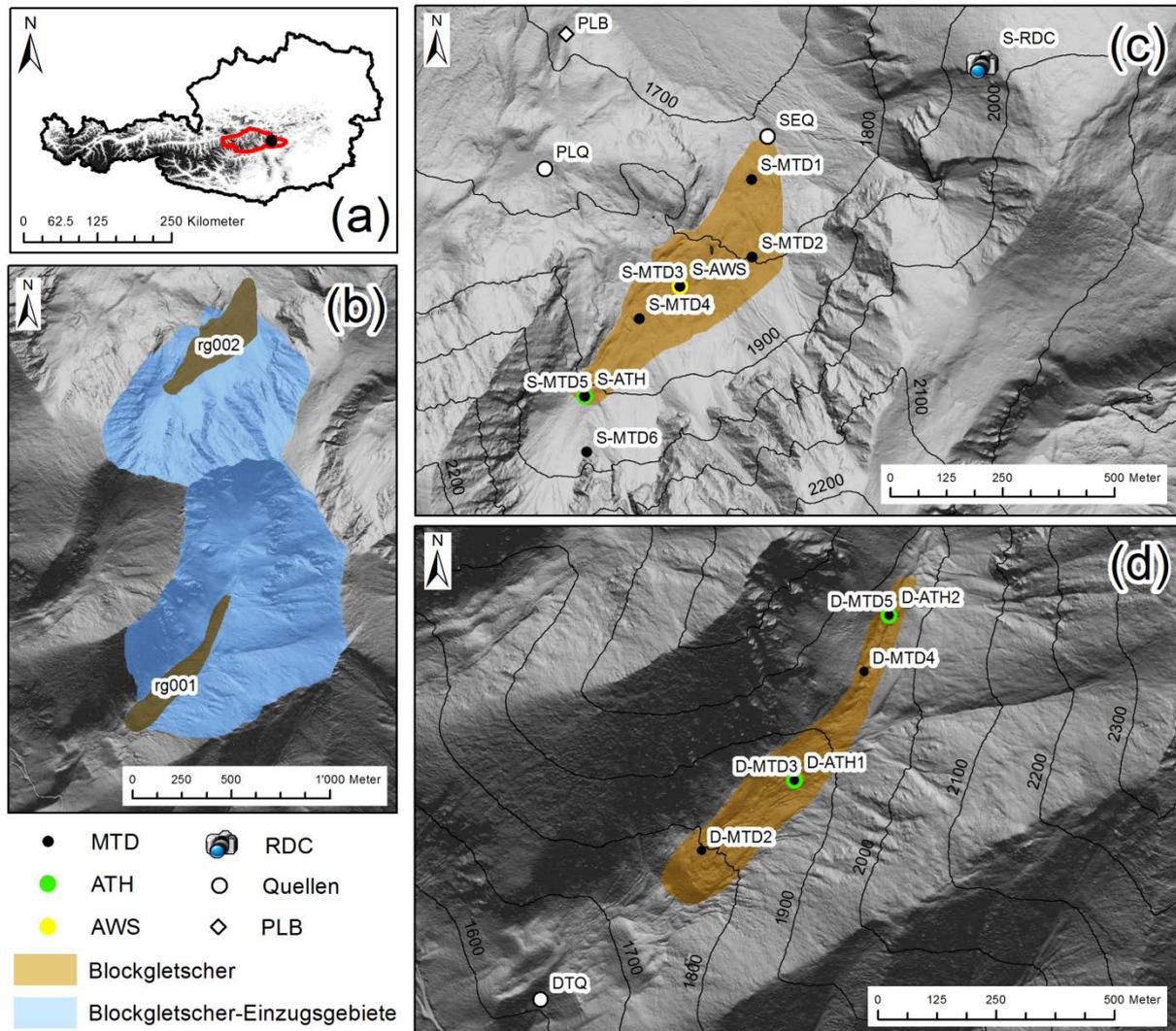


Abbildung 8: (a) Lage der lokalen Arbeitsgebiete Schöneben und Dürrtal in Österreich sowie als rote Linie der steirische Anteil der Niederen Tauern. (b) Blockgletscher Schöneben (rg002 = 6RG681) und Dürrtal (rg001 = 6RG680) und Einzugsgebiete. (c) und (d) Untersuchungsgebiete mit den Messinstrumentierungen und Messstellen. Die Auflistung der gemessenen Parameter ist Tabelle 1 zu entnehmen. Hillshade auf Basis ALS-Daten (1 m) (Winkler et al., 2016a).

3.2.2 Innere Ölgrube (Ölgrube Süd)

Der Blockgletscher Innere Ölgrube (Kauernergrat, Kaunertal, Nordtirol; siehe Abbildungen 3a, 6) liegt ca. 1,5 km südöstlich des Gepatschhauses. Der Blockgletscher ist 896 m lang, bis zu 333 m breit, bedeckt eine Fläche von 0,24 km² und ist aktiv (Berger et al., 2004; Krainer & Mostler, 2002, 2006; Krainer et al., 2007; Hausmann et al., 2012). Der Blockgletscher erstreckt sich von 2394 m ü.A. (Fuß der Stirn) bis 2727 m ü.A. (Wurzelzone), weist eine ausgeprägte Oberflächenmorphologie aus transversalen und longitudinalen Rücken und Vertiefungen auf und besteht aus zwei Blockgletscherzungen (Abbildung 9). Die Fläche des hydrologischen Einzugsgebietes beträgt ca. 1,83 km².

Die nördliche, mächtigere Zunge (Abbildung 10) besteht fast ausschließlich aus Orthogneisschutt, die südliche Zunge dagegen aus überwiegend bräunlich verwitterndem Paragneis-Glimmerschiefermaterial. An der Stirn des aktiven Blockgletschers befinden sich fünf Quellaustritte (RA 1, RA 2, RA 3 und 2 weitere unbenannte, Abbildungen 9, 10). Die Quellen werden zusätzlich zu den Schmelz- (Schnee) und Niederschlagswässern von einem kleinen Gletscherbach gespeist. Es handelt sich dabei um Schmelzwasser des Kargletschers Hinterer Ölgrubenferner sowie dem Kargletscher aus dem Ölgrubenjoch, das im nördlichen Blockgletscherlappen in der Wurzelzone in den Blockgletscher infiltriert. Im Wurzelbereich des südlichen Blockgletscherlappens befinden sich drei kleine Seen (vermutlich Thermokarstseen), deren Wassertemperaturen auch während des Hochsommers nicht über 1,5 °C stiegen (Berger et al., 2004). In ca. 150 m Entfernung zu den Quellen am Fuße der Blockgletscherstirn wurde im Schiltibach, der den Großteil des Einzugsgebietes der Inneren Ölgrube entwässert, eine Pegelstation installiert. Diese liefert seit dem Jahr 2001 kontinuierlich (im Stundenintervall; von technischen Ausfällen abgesehen) Daten der Wassertemperatur und des Pegelstands, wobei in den ersten Jahren nur vom Sommer (Mai bis Oktober) Daten vorliegen.

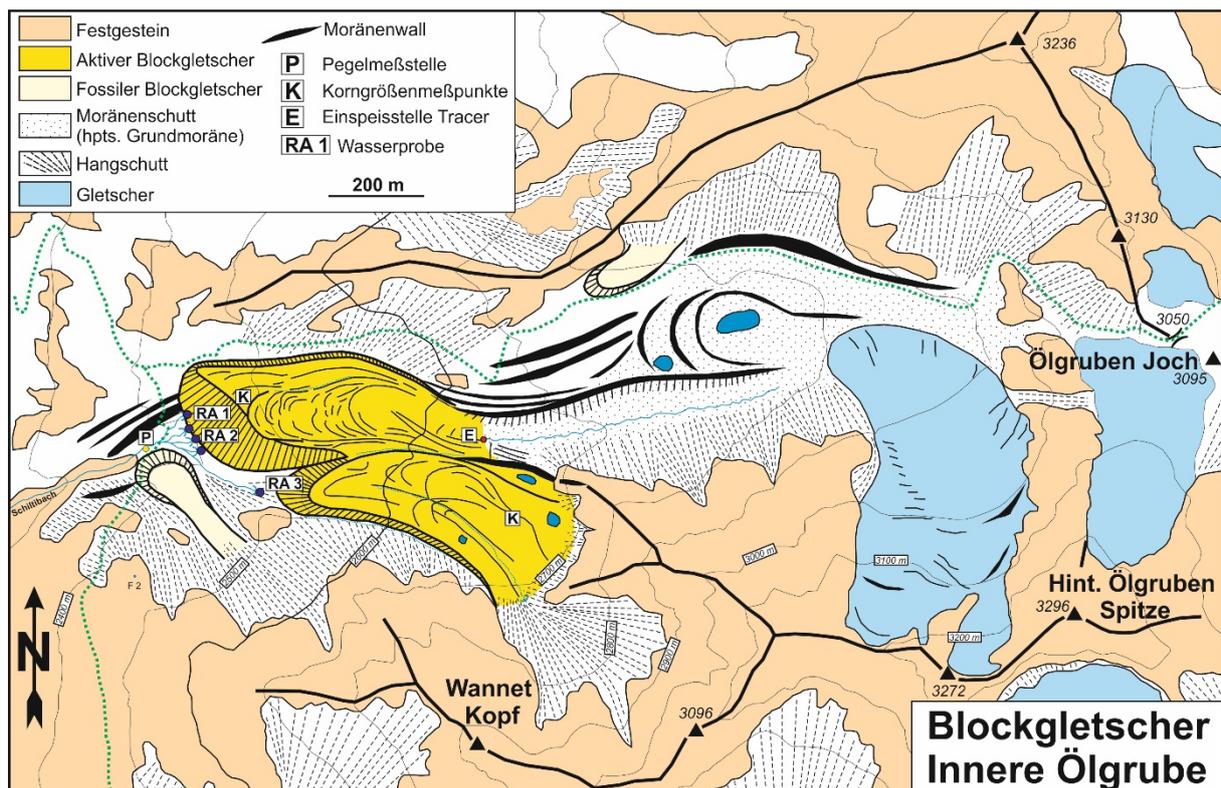


Abbildung 9: Geologisch/geomorphologische Karte der Inneren Ölgrube. P = Pegelmeßstelle, RA 1 - RA 3 = beprobte Quellaustritte, E = Eingabestelle der Farbtracer, K = Korngrößenmeßpunkte.



Abbildung 10: nördliche Zunge (a) und ca. 60 m mächtige Stirn (b) des Blockgletschers Innere Ölgrube (Fotos: G. Winkler).

Im Zuge früherer hydrogeologischer Untersuchungen von z. B. Berger et al. (2004) und Krainer et al. (2007) wurden temporär Daten wie Wassertemperatur, Pegelstand bzw. Quellschüttungsdaten sowie die elektrische Leitfähigkeit erhoben und untersucht. Krainer et. al (2007) haben zusätzlich mit Hilfe von

Isotopenuntersuchungen die Abflusskomponenten Schneeschmelze, Niederschlag, Grundwasser und Schmelzwasser des Permafrosteises identifizieren können. Eine zeitlich aufgelöste Quantifizierung der Abflusskomponenten war bisher allerdings noch nicht möglich.

Geophysikalische Untersuchungen (Kombination aus Seismik, Georadar und Gravimetrie) lieferten einen sehr guten Einblick in den internen Aufbau und Eisgehalt dieses Blockgletschers (Hausmann et al., 2012). Das Festgestein wird zunächst von 10 – 15 m mächtigen, feinkörnigen, ungefrorenen Sedimenten überlagert, darüber folgt dann der Permafrostkörper mit einer Mächtigkeit von 20 – 30 m, überlagert von 4 – 6 m ungefrorenen Schutt an der Oberfläche. Diese Daten – speziell der Nachweis des ungefrorenen, feinkörnigen Sedimentkörpers an der Basis des Blockgletschers – sind für die Interpretation der hydrogeologischen Daten von großer Bedeutung.

Aufbauend auf die bestehenden Erkenntnisse wurden nachstehende Messungen und Detailuntersuchungen durchgeführt:

1. Monitoring (stündlich) der Quellschüttung, der elektrischen Leitfähigkeit und der Wassertemperatur an der bestehenden Pegelstation ca. 150 m unterhalb der Blockgletscher-Stirn (seit 2015).
2. Monitoring (stündlich) der Wassertemperatur an vier Quellaustritten direkt an der Stirn des Blockgletschers (25.7.2014 - 14.10.2016).
3. Durchführung von zwei Markierungsversuchen mit Uranin, wobei einer bereits 2015 erfolgte (Rieder, 2017), der andere 2017 (Heigert, 2018). 2015 wurde auch Sulforodamin-B an einer weiteren Eingabestelle am südlichen Blockgletscherteil eingespeist; dieser Tracer konnte aber nicht detektiert werden.
4. Isotopenhydrologische Untersuchungen ($\delta^{18}\text{O}$ und $\delta^2\text{H}$) im Zuge von zeitlich hoch aufgelösten Ereignisprobenahmen.
5. Isotopenprobenahme des Niederschlages im Einzugsgebiets und des infiltrierenden Kargletscherbaches. Isotopenergebnisse aus Winterschnee waren aufgrund von Lawinengefahr nicht gewinnbar.

Ziel dieser Untersuchungen war die quantitative Erfassung der Entwässerungsdynamik für unterschiedliche Zeitskalen, wobei diese sowohl tageszyklische als auch saisonale Schwankungen beinhalten. Ein wichtiger Punkt hierbei ist die Trennung in Ereigniswasser (Regen, Schneeschmelze) und länger im Blockgletscher gespeichertes Wasser (Grundwasser) sowie der Einfluss der Schmelzwässer des sich im Einzugsgebiet befindlichen Kargletschers. Eine Trennung des Gletscher-Eiswassers von dem potentiell aus dem Blockgletscher kommenden Permafrost-Eiswasser ist schwierig und liegt vermutlich innerhalb der Unsicherheit der Messgrößen.

3.2.3 Bergli/Lareintal

Das Untersuchungsgebiet im Lareintal (Abbildungen 11, 12) südöstlich von Galtür (Paznauntal) liegt am Südrand des Silvrettakristallins, im Grenzbereich zum Unterengadiner Fenster. Im Bereich der Silvrettagruppe wurde der Blockgletscher im Kar (Berglerloch) des Inneren Bergli am Eingang des Lareintales, ca. 3 km E von Galtür, im Detail untersucht. Im Einzugsgebiet dominieren im vorderen Bereich Quarzitzneise, die den Großteil der östlichen und westlichen Bergflanken aufbauen. Untergeordnet finden sich auch helle Pegmatitgesteine, die an den östlichen Bergflanken aufgeschlossen sind. Im hinteren Teil des Berglerlochessels dominieren Amphibolite und Migmatite. Diese finden sich in den steilen Schutthalden bis in etwa 2300 m ü.A..

Der Blockgletscher ist 1545 m lang, bis zu 674 m breit, die Stirn endet auf einer Seehöhe von 2164 m ü.A., die Wurzelzone befindet sich auf 2668 m ü.A. (Abbildung 11). Die Fläche beträgt 0,51 km². Das hydrologische Einzugsgebiet umfasst ca. 1,59 km². Im Stirnbereich auf 2160 m entspringen vier Quellen, die den Großteil des Abflusses des Blockgletschers repräsentieren. Für alle weiteren Analysen wurde die westlichste Quelle herangezogen. Dort wurde vom Hydrographischen Dienst Tirol Temperatur- und Leitfähigkeitssonden installiert. Die steile Stirn des Blockgletschers im Inneren Bergli (Berglerloch) hebt sich morphologisch deutlich von den umgebenden eiszeitlichen Moränenablagerungen rund um den Berglensee ab. Der Stirnbereich ist teils bewachsen, weshalb nur mehr von geringer Bewegungsrate ausgegangen werden kann. Die Stirn ist ca. 40° steil. Der Stirnbereich ist in zwei zungenförmige Lappen aufgeteilt. Am Westende ist die Stirn länger ausgebildet als der östliche Teil. Morphologisch sind an der Oberfläche im vorderen Teil longitudinale Lobenlinien ausgebildet, und im Bereich der Höhenlinie 2320 m ü.A. ist im östlichen Teil eine weitere Blockgletscherstirn zu erkennen. Dasselbe zeigt sich ab einer Höhenlinie von 2400 m ü.A. im westlichen Teil des Blockgletschers. Dieser Bereich hat sich auf Grund des feinkörnigen Sediments vermutlich aus einer Hangschuttablagerung entwickelt. Ab einer Seehöhe von 2460 m ü.A. steilt der Blockgletscher auf. Es finden sich nun keine charakteristischen Loben mehr. Vielmehr prägt hier eine Anhäufung von steilaufragenden Schutthalden mit Vertiefungen von einigen Metern die Morphologie. Im hintersten Teil sind noch Gletschereisreste an der Oberfläche aufgeschlossen. Eine starke Einsenkung mit erhöhtem Schmelzwasserabfluss zeugt von einem ehemaligen Gletschersee. Dies markiert auch den Stand der Endmoräne von „1850/55“. Insgesamt kann beim Blockgletscher im Inneren Bergli von einer komplexen Blockgletscherablagerung mit mindestens drei übereinanderliegenden Blockgletschergenerationen ausgegangen werden.

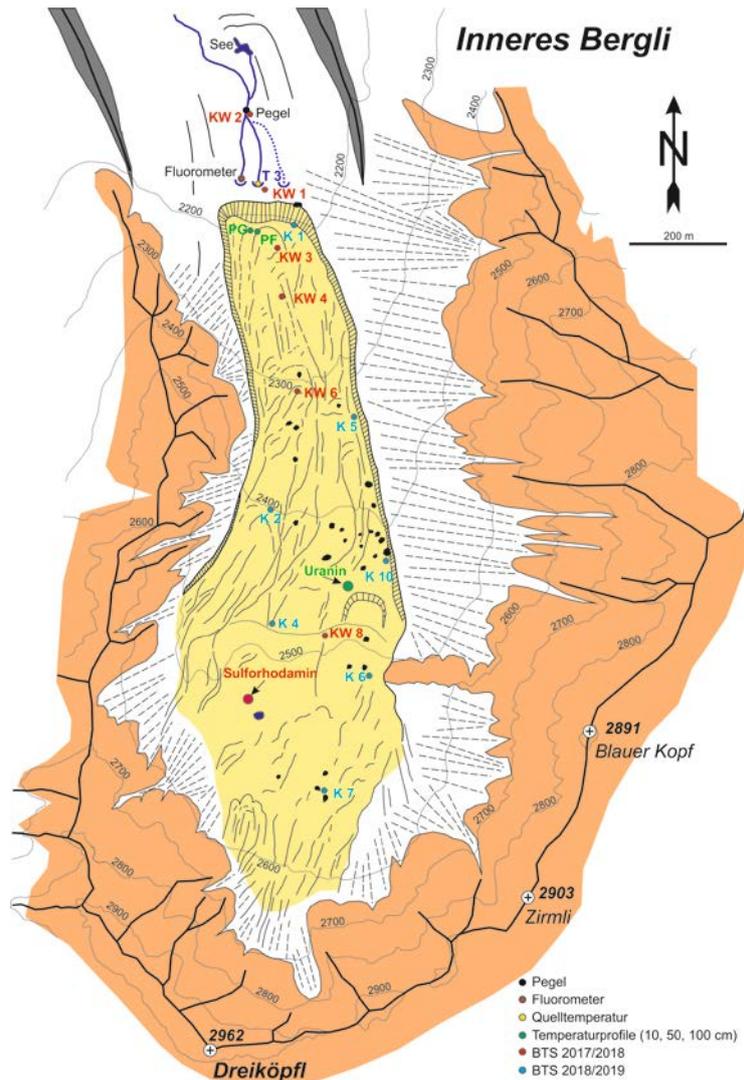


Abbildung 11: Geologische/geomorphologische Karte Inneres Bergli mit Lage der verschiedenen Messpunkte. Gelb: Blockgletscher; schwarz strichlierte Linien auf weißem Untergrund: Hangschutt; orange-braun: Festgestein; graue Polygone: Seitenmoränen.

Die Korngrößen auf der Oberfläche des Blockgletschers variieren zwischen feinkörnigen Bereichen und Grobblockwerk. Das Grobblockwerk besteht aus Blöcken mit einem Durchmesser von 50 cm. Es finden sich vereinzelt auch Blöcke mit mehreren Metern Durchmesser (Abbildung 12). Im Zuge von Geländebegehungen konnte im oberen Bereich Permafrosteis des Blockgletschers direkt beprobt werden (Isotopendaten). Die feinkörnigen Bereiche sind teils bewachsen, mitunter treten auch kleine Lärchen am Blockgletscher auf.



(a)



(b)

Abbildung 12: (a) Blockschutt am Blockgletscher an der Eingabestelle des Fluoreszenzfarbstoffs Uranin (Abbildung 11, Foto: G. Winkler); (b) Automatisierte Pegelstation des Hydrographischen Dienstes Tirol im Vorfeld des aktiven Bergli-Blockgletschers. Im Hintergrund sieht man den Stirnbereich (Foto: K. Krainer).

Aufbauend auf den bestehenden Erkenntnissen wurden nachstehende Messungen und Detailuntersuchungen durchgeführt:

1. Monitoring (stündlich) des Wasserstandes und damit der Quellschüttung, der elektrischen Leitfähigkeit und der Wassertemperatur an der bestehenden Pegelstation ca. 250 m unterhalb der Blockgletscher-Stirn (Abbildung 11; hydrographische Messstation seit Sommer 2014).
2. Monitoring (stündlich) der Wassertemperatur an zwei Quellaustritten direkt an der Stirn des Blockgletschers (seit Sommer 2016).
3. Durchführung eines Markierungsversuches mit Uranin und Sulphorhodamin-B, wobei die beiden Tracer an unterschiedlichen Lokationen eingespeist wurden (siehe Abbildungen 11, 12).
4. Isotopenhydrologische Untersuchungen ($\delta^{18}\text{O}$ und $\delta^2\text{H}$) im Zuge von zeitlich hoch aufgelösten Ereignisprobenahmen.
5. Isotopenprobenahme von Niederschlag (inkl. Schneeprofil) und Permafrosteis.

Ziel dieser Untersuchungen war die quantitative Erfassung der Entwässerungsdynamik für unterschiedliche zeitliche Skalen, wobei diese sowohl tageszyklische als auch saisonale Schwankungen beinhalten.

3.2.4 Hochschober

Im Gebiet um die Hochschoberhütte gibt es eine Vielzahl an Blockgletschern, sowohl intakte als auch reliktsche Formen (Abbildung 13). Festgesteine im Untersuchungsgebiet sind überwiegend Glimmerschiefer und Paragneise, im südlichen bis südöstlichen Bereich (Barrensee) sind Orthogneise, Amphibolite und auch Eklogite eingeschaltet. Der Großteil des Untersuchungsgebietes liegt in der Nordeinheit des Kristallins der Schobergruppe (Koralpe-Wölz Deckensystem), im Südosten (Bereich Barrensee - Prijakt) verläuft die Deckengrenze zwischen Nord- und Südeinheit und ein kleiner Teil liegt im Bereich der Südeinheit (Drauzug-Gurktal Deckensystem) (Klackl, 2018).

Im Herbst 2016 wurden insgesamt 14 Temperatursonden auf Blockgletschern zur Messung der Temperatur an der Basis der winterlichen Schneedecke, zusätzlich im Juni 2016 drei Temperatursonden auch an Blockgletscherquellen installiert. Die Sonden waren bis in den Frühsommer 2017 in Betrieb, bei den Quellen bis Anfang Oktober 2017 zusätzlich bei zwei Quellen (HSQ 1 und 2; Abbildungen 13, 14) auch vom 28.5. bis 16.8. 2018. Das Messintervall betrug zwei Stunden.

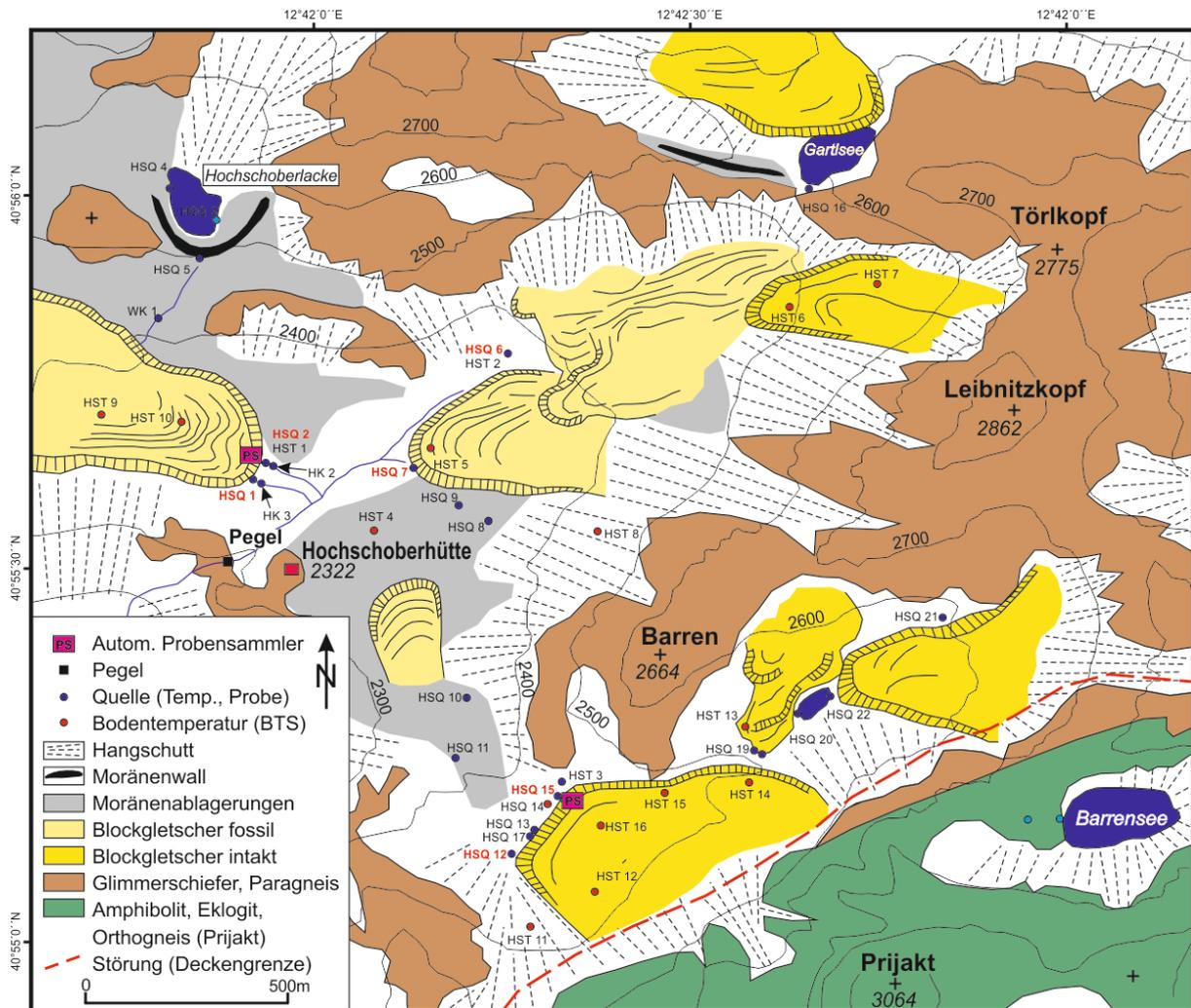


Abbildung 13: Geologisch-geomorphologische Übersichtskarte der Umgebung der Hochschoberhütte (Schobergruppe) mit Lage der verschiedenen Messpunkte.

Bei den zwei Quellen HSQ 2 und HSQ 15 (Abbildung 13) wurden im Sommer 2017 nacheinander ein automatischer Probensammler installiert und jeweils eine Ereignisbeprobung für Isotopenuntersuchungen durchgeführt.

1. Monitoring (stündlich) des Wasserstandes und der Wassertemperatur an der Pegelstation unterhalb der Hochschoberhütte, im Bereich der Wasserfassung für ein Kleinkraftwerk (seit August 2016).
2. Monitoring (stündlich) der Wassertemperatur an drei Quellaustritten direkt an der Stirn des Blockgletschers (1.7.2016 - 15.1.2017).
3. Isotopenhydrologische Untersuchungen ($\delta^{18}\text{O}$ und $\delta^2\text{H}$) im Zuge von zeitlich hoch aufgelösten Ereignisprobenahmen an HSQ 2 und HSQ 15 (Abbildungen 13, 14).
4. Isotopenprobenahme von Niederschlag (inkl. Schneeprofil).

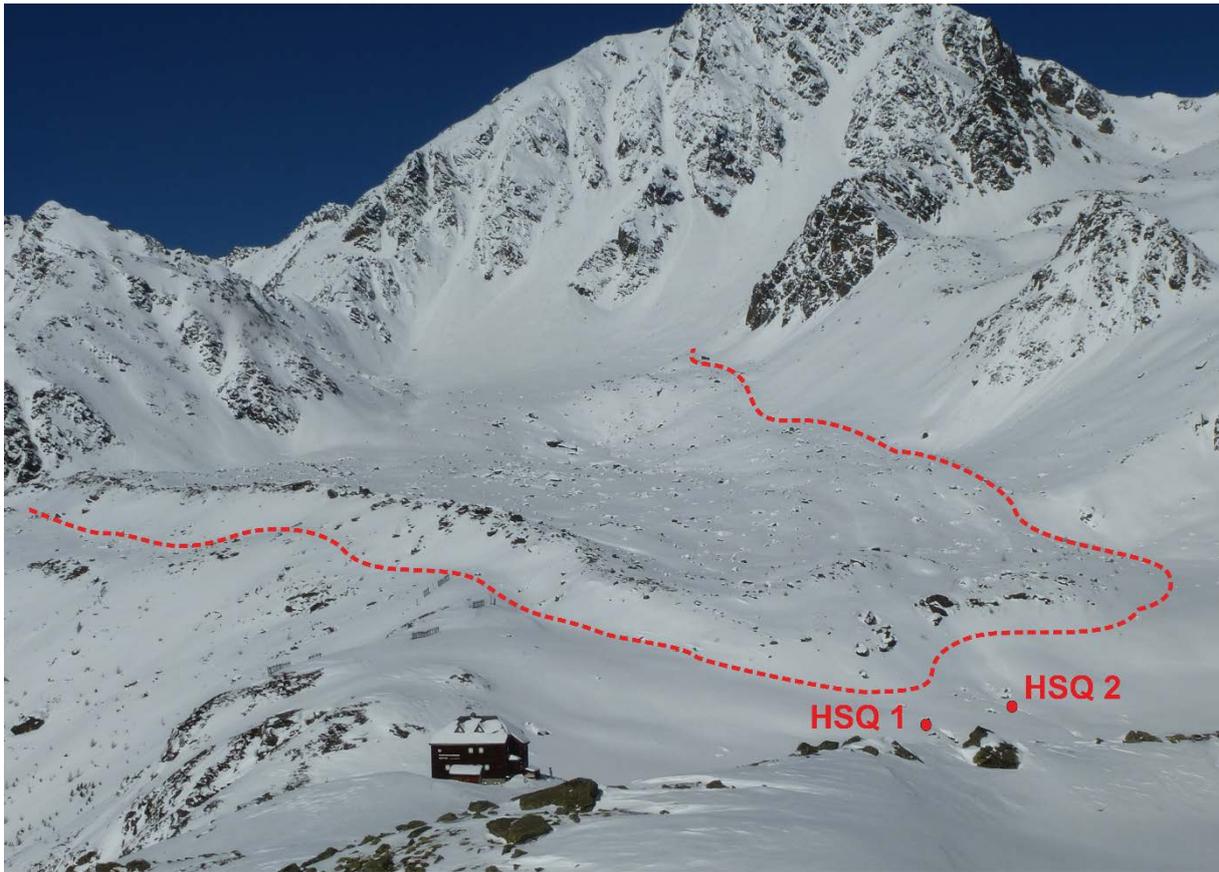


Abbildung 14: Reliktischer Blockgletscher mit den Quellaustritten HSQ 1 und HSQ 2 im März 2017; im Vordergrund ist die Hochschober-Hütte; die rote, strichlierte Linie ist die Blockgletscherumrahmung (Foto: G. Winkler).

Ziel dieser Untersuchungen war die quantitative Erfassung der Entwässerungsdynamik eines Einzugsgebiets mit mehreren Blockgletschern für unterschiedliche zeitliche Skalen, wobei diese sowohl tageszyklische als auch saisonale Schwankungen beinhalten.

3.2.5 Tuxer Hauptkamm

Das Untersuchungsgebiet am Tuxer Hauptkamm (Abbildungen 15, 16) liegt im Tauernfenster; aufgeschlossen sind Zentralgneis sowie direkt darüber liegende Hochstegenquarzite (ca. 10 m) und Hochstegenmarmor.

Untersucht wurden die Blockgletscher im Lange Wand Kar, Mitterschneidkar, im Kar des Haberfeldkopfes und im Kar nördlich des Höllenstein (Abbildung 15).

Der Blockgletscher im Lange Wand Kar ist 1595 m lang, bis zu 268 m breit und endet mit seiner Stirn auf 2247 m ü.A.. Der Blockgletscher im Mitterschneidkar ist 975 m lang, bis zu 327 m breit, die Stirn liegt auf 2394 m ü.A.. Beide Blockgletscher bestehen fast ausschließlich aus Zentralgneisschutt und die Stirn beider Blockgletscher liegt auf Hochstegenmarmor. Der kleine Blockgletscher im Kar des Haberfeldkopfes (auf der Nordnordwestseite des Roßkopfes) besteht nur aus Karbonatschutt (Hochstegenmarmor). Der kleine Blockgletscher im Kar

nördlich des Höllenstein besteht primär aus Knollengneiss. Alle Blockgletscher werden als aktiv eingestuft (Kogler, 2018).

Das Besondere dieser Blockgletscher liegt darin, dass die Zunge der Blockgletscher auf dem Hochstegenmarmor liegt, der stark verkarstet ist. Es treten bei keinem Blockgletscher größere Quellen an der Stirn oder talabwärts aus, weshalb zu vermuten ist, dass der größte Teil des Abflusses der Blockgletschereinzugsgebiete über Karsthohlräume im Hochstegenmarmor unter den Blockgletschern unterirdisch stattfindet. Grobe Schätzungen aufgrund der Einzugsgebietsgröße belaufen sich auf 70 – 100 l/s für die Sommermonate. Es ist bislang auch nicht bekannt, wo die Wässer wieder zutage treten. Es liegen Vermutungen vor, dass eine Exfiltrationszone im Bereich zwischen Finkenberg und Mayrhofen auftritt, wo es im Hochstegenmarmor eine Reihe von Quellaustritten gibt, die teilweise für die Trinkwasserversorgung genutzt werden. Aufgrund der fehlenden großen Blockgletscherquellen sind Untersuchungen zum Abflussverhalten aber nicht möglich, im Lange Wand Kar ist im Stirnbereich des Blockgletschers überhaupt kein Wasser sichtbar. Die vorliegenden kleinen Quellen (Abbildung 15) wurden hydrochemisch auf etwaige Schwermetallbelastungen untersucht. Im Mitterschneidkar sind im Stirnbereich des Blockgletschers zwei kleine Gerinne vorhanden (MSKQ 1 und MSKQ 2), die beprobt werden konnten. Eine weitere kleine Quelle liegt etwas weiter westlich, am Fuße der Stirn des kleinen Blockgletschers im Kar nördlich des Höllenstein (WWBGQ). Die Quellen HSK Q, HFK Q, LTS_Q, KJQ und EAQ wurden zu Vergleichszwecken beprobt.

Die Quellen wurden 2016 und 2017 bis zu fünfmal) untersucht (Wasserchemie, Isotopen). Ereignisbeprobungen und Installation einer Pegelmessstelle waren nicht möglich.

Ergänzende Untersuchungen wurden zum Blockgletschertyp (intakt oder reliktsch) durchgeführt und in weiterer Folge Bewegungsraten bestimmt. Auf drei der vier Blockgletscher wurden im Herbst 2016 insgesamt 20 Temperatursonden installiert (genaue Standorte siehe Abbildung 15), um die Temperatur an der Basis der winterlichen Schneedecke (BTS) zu messen und somit Rückschlüsse auf das Vorhandensein von Permafrost zu ziehen. Weitere 4 Sonden wurden vor der Stirn der Blockgletscher im Mitterschneidkar und Lange Wand Kar auf permafrostfreiem Untergrund installiert. Die Temperaturen der Sonden auf den Blockgletschern weisen auf das Vorhandensein von Permafrost-Eis im Untergrund hin. Luftbildvergleiche zeigen, dass die Blockgletscher noch aktiv sind. Der Blockgletscher im Lange Wand Kar hat sich im Zeitraum 1974 bis 2013 durchschnittlich um bis zu 0,4 m/Jahr bewegt (Kogler, 2018).

Korngrößenanalysen der oberflächlichen Schuttlage weisen darauf hin, dass der Blockgletscher im Kar des Haberfeldkopfes (Karbonatschutt) deutlich feinkörniger ist als die Blockgletscher, die aus Zentralgneis-Schutt bestehen (Kogler, 2018).

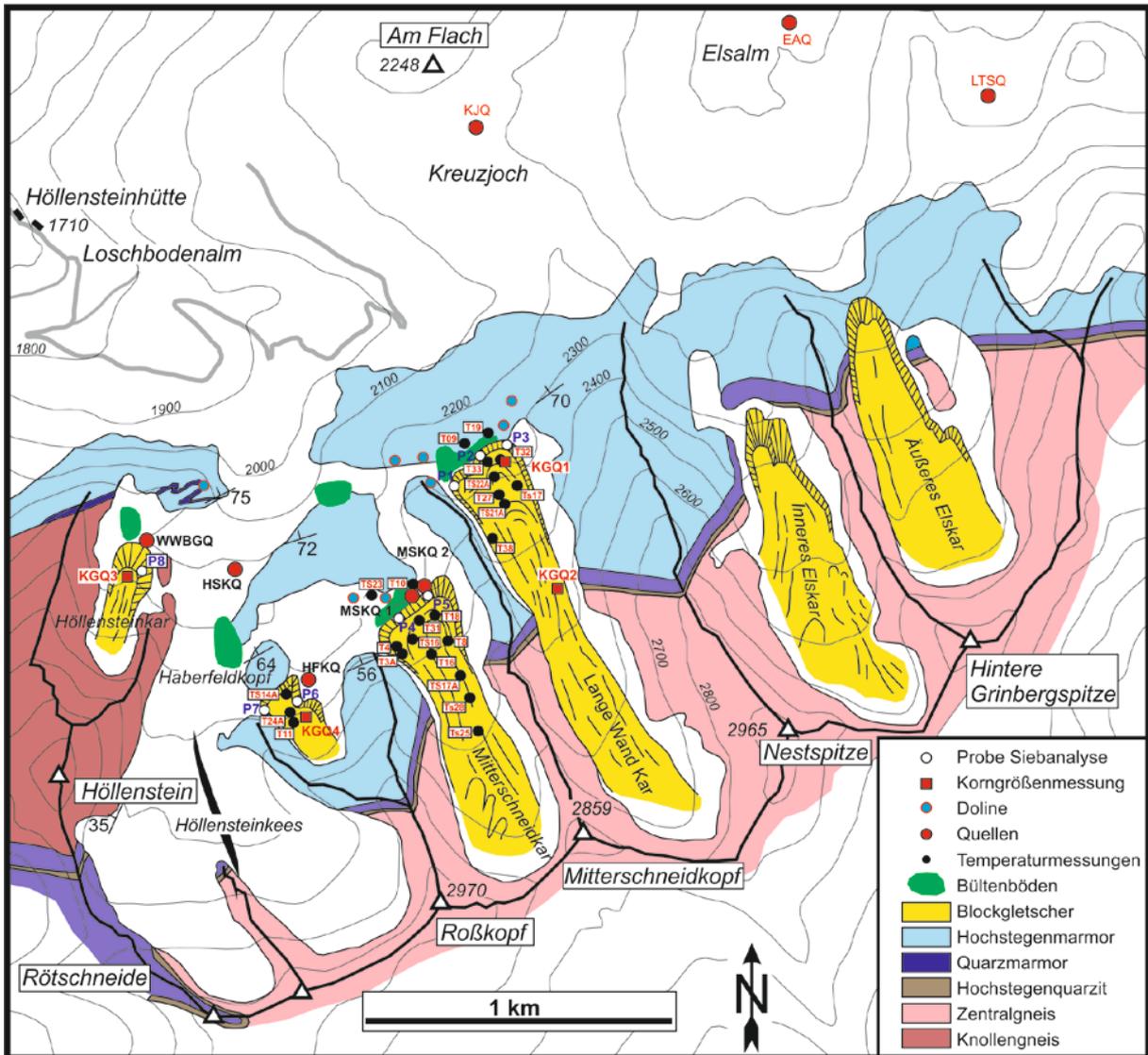


Abbildung 15: Geologische/geomorphologische Übersichtskarte des Testgebietes Tuxer Hauptkamm mit Lage der verschiedenen Messpunkte.



Abbildung 16: Blockgletscher des Tuxer Hauptkammes; Blickrichtung Südost (Foto: K. Krainer).

3.2.6 Blockgletscher Krummgampen

Der Blockgletscher Krummgampen liegt am Eingang des Krummgampentales auf der südlichen Talseite, einem Seitental des Kautertales (Öztaler Alpen, Abbildung 17). Die Festgesteine im Einzugsgebiet des Blockgletschers bestehen aus Paragneisen und Glimmerschiefern des Ötztal-Stubai-Komplexes, die intensiv bräunliche Verwitterungsfarben zeigen. Unmittelbar westlich und nördlich des Blockgletschers sind in die Paragneise mächtige Bänderamphibolite eingeschaltet. Die Schieferung der Gesteine streicht im Krummgampental generell SW-NE, die Gesteine werden von zahlreichen, ebenfalls häufig SW-NE-streichenden Störungen durchzogen. Entlang dieser Störungen sind die Gesteine vor allem im Kammereich durch Frostverwitterung stark zerlegt und aufgelockert.

Der Blockgletscher erstreckt sich von 2458 m ü.A. (Stirn) bis 2759 m ü.A. (Wurzelzone), ist 488 m lang, bis zu 286 m breit und bedeckt eine Fläche von 0,1 km². Der Blockgletscher ist zungenförmig, weist eine sehr grobblockige Oberfläche auf und ist nach Norden ausgerichtet. Die steile, leicht aktive Stirn hat den Krummgampenbach leicht überfahren (Abbildungen 17, 18).

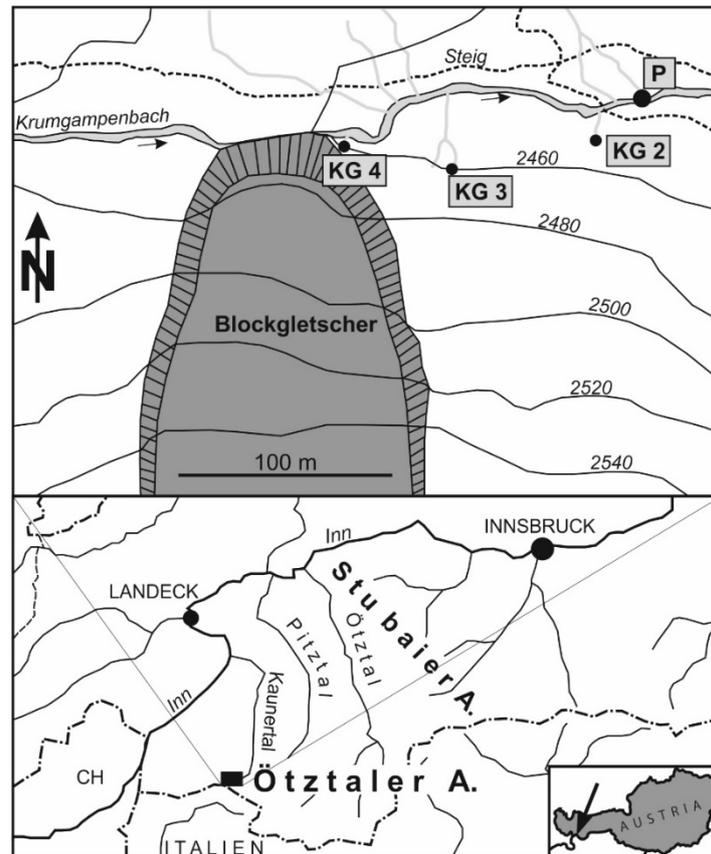


Abbildung 17: Lage des Blockgletschers Krummgampen, modifiziert nach Thies et al. (2017); KG2, KG3 und KG4: Blockgletscherquellen; P: temporäre Pegelmessstelle.



Abbildung 18: Zunge des aktiven Blockgletschers im Krummgampental (Blickrichtung WSW; Foto K. Krainer).

Hervorzuheben ist dieses Testgebiet aufgrund der sehr erhöhten Mineralisierung der Quellwässer, v.a. die hohe Schwermetallbelastung (Thies et al., 2013, 2017). Refraktionsseismische Untersuchungen, BTS-Messungen und Quelltemperaturen weisen eindeutig auf das Vorhandensein von Permafrost-Eis im Blockgletscher hin (Rogger et al., 2017).

Die Korngrößenverteilung ist ähnlich wie auf anderen Blockgletschern in den Ötztaler Alpen. Die oberflächige Schuttlage ist sehr grobblockig mit Korngrößen im dm- bis m-Bereich. Siebanalysen an zwei Sedimentproben mit einem höheren Anteil an feinkörnigem Material, entnommen im Bereich der steilen Stirn, ergaben eine für Blockgletscher typische Korngrößenverteilung mit einer sehr schlechten Sortierung (Rogger et al., 2017)

Da der Blockgletscher den Krummgampenbach im Stirnbereich überfahren hat, fließt vermutlich ein Teil der Schmelzwässer des Blockgletschers im Schutt direkt in den Krummgampenbach. Im nordöstlichen Bereich der Stirn befindet sich eine Quelle (KG 4), deren Wasser nach wenigen Metern ebenfalls in den Krummgampenbach mündet; östlich der Zunge des Blockgletschers sind im Bereich des Talbodens zwei weitere Quellen vorhanden (KG 2 und KG 3) (siehe Abbildung 17). Diese drei Quellen unterscheiden sich deutlich von allen anderen Quellen im Krummgampental (Thies et al., 2017) und weisen folgende Merkmale auf:

- a) konstant niedrige Quelltemperatur von meist $< 1.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (max. $1.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$)
- b) hohe elektrische Leitfähigkeit
- c) hohe Konzentrationen an Nickel und andere Schwermetalle
- d) relativ geringe jahreszeitliche Schwankungen der Quelltemperatur und der elektrischen Leitfähigkeit.

An der Quelle KG 2 wurde vom 13.10.2017 bis 25.10.2018 eine Temperatursonde installiert, die im Abstand von 2 Stunden die Wassertemperatur aufgezeichnet hat.

Ziel der Untersuchungen war, die saisonale Schwankung der Schwermetallbelastung zu erfassen und mittels Wassertemperatur zu überprüfen, ob ein Basisabfluss im Winter vorliegt.

4 Blockgletscher- und Blockgletschereinzugsgebietsinventare

4.1 Methoden

4.1.1 Ausweisung

Das im Zuge des Projekts erstellte polygonbasierte Blockgletscher- und Blockgletschereinzugsgebietsinventar für die Bundesländer Vorarlberg, Tirol, Salzburg, Steiermark und Kärnten bildet die Grundlage für die Untersuchung der wasserwirtschaftlichen Aspekte von Blockgletschern. Damit liegt erstmals ein einheitlich ausgewiesenes und attributiertes Blockgletscherinventar auf Basis eines hochaufgelösten Geländemodells für den Großteil der österreichischen Ostalpen vor, das bestehende regionale Inventare integriert. Dies wird erstmalig ergänzt durch ein entsprechendes Einzugsgebietsinventar.

Die Erstellung des Blockgletscherinventars erfolgte durch Zusammenführung, Überarbeitung und Ergänzung der bestehenden Inventare von Stocker & Krainer (2011), Krainer & Ribis (2012) und Stocker (2012a,b) für Westösterreich, sowie Lieb et al. (2012) und Kellerer-Pirklbauer et al. (2012, 2016) für Zentral- und Ostösterreich.

Grundlage der neuen Ausweisung bilden aus hochaufgelösten Airborne Laserscanning (ALS) Daten erstellte digitale Höhenmodelle mit einer horizontalen Auflösung von 1 m. Basierend auf dem deutlichen räumlichen Auflösungsunterschied konnte eine wesentliche Verbesserung der Blockgletscherinventare erzielt werden (Abbildung 19). Des Weiteren wurde die Ausweisung einheitlich für das ganze Untersuchungsgebiet mit dem konsistenten zugrundeliegenden Höhenmodell-Datensatz erarbeitet bzw. homogenisiert. Die Abgrenzung der Blockgletscher erfolgte manuell in ArcGIS (Version 10.4) auf Basis von Schummerungsdarstellungen (mit unterschiedlichen Azimutwerten der Beleuchtung) und Hangneigungsdarstellungen (slope maps), beide abgeleitet aus dem 1 m Höhenmodell, sowie Orthofotos; wobei morphologische Gegebenheiten (z.B. Stirn, Wülste, kollabierte Oberfläche, Fließstrukturen, Hangknick im Übergangsbereich zwischen Blockgletscher und Schutthalde) für die Abgrenzung herangezogen wurden. Zusätzlich wurde auf geologische Karten und Literatur zurückgegriffen. Wo die Möglichkeit bestand wurden die Fernerkundungsbasierten Ergebnisse durch Geländearbeit ergänzt und überprüft.

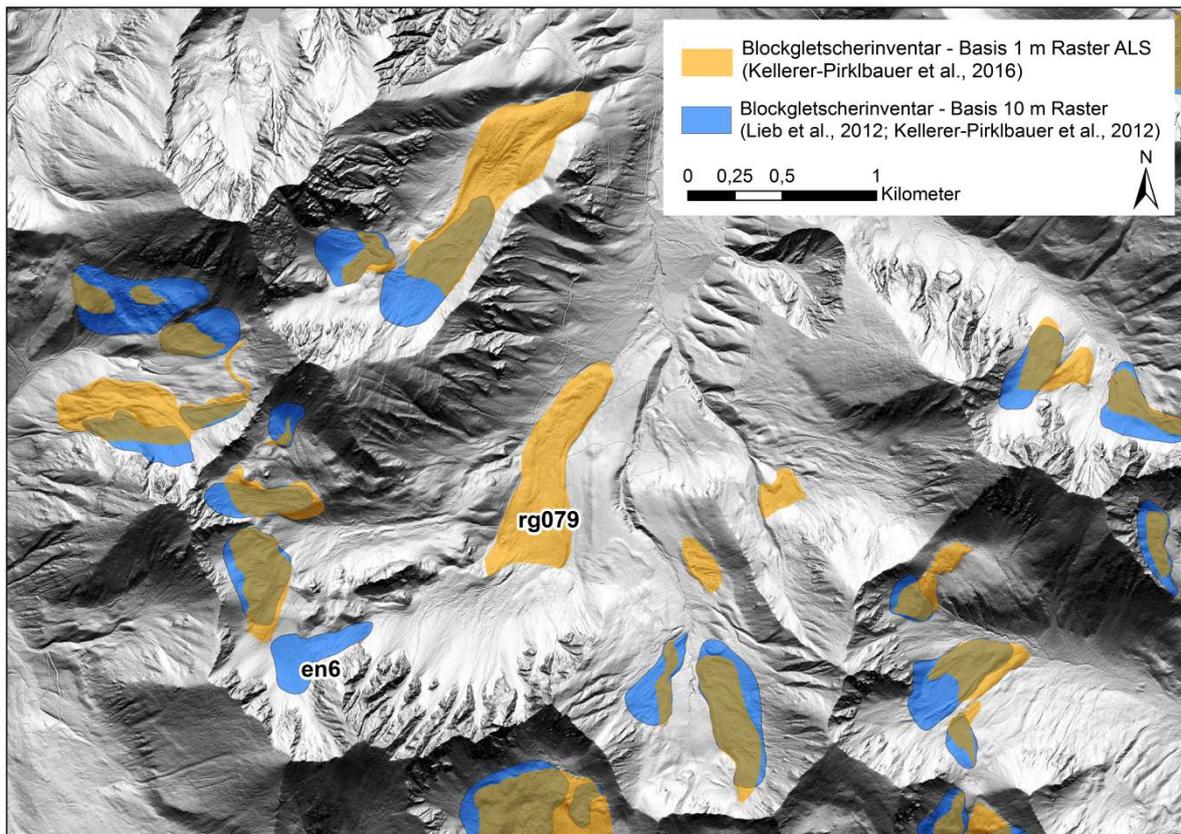


Abbildung 19: Unterschiede in der Ausweisung von Blockgletschern auf Basis divergierender Datengrundlagen, beispielhaft gezeigt für ein Teilgebiet in den Niederen Tauern. Tiefliegende Formen in bewaldeten Arealen (z.B. rg079, im neuen Inventar 6RG145) konnten durch das hochaufgelöste Geländemodell (ALS-Daten mit 1 m Rasterauflösung) erfasst werden. Früher erfasste Blockgletscher (z.B. en6) wurden nicht immer als solche bestätigt (Kellerer-Pirklbauer et al., 2016).

Die Identifizierung und Abgrenzung von Blockgletschern durch Interpretation charakteristischer Geländeformen bringt naturgemäß die Einschätzung des jeweiligen Bearbeiters zum Ausdruck (z. B. Schmid et al., 2015; Anderson et al., 2018); zu jeder ausgewiesenen Form ist daher ihr Bearbeiter dokumentiert. Im Sinne größtmöglicher Objektivität standen diese in stetem Austausch miteinander, ein eindeutiger Nachweis für jeden einzelnen Blockgletscher ist jedoch nur mit hohem finanziellen und zeitlichen Aufwand möglich. Bei den ausgewiesenen Geländeformen handelt es sich daher zu einem kleinen Teil um blockgletscherverdächtige Landschaftsformen. Im Sinne der Lesbarkeit werden sie in weiterer Folge jedoch als Blockgletscher bezeichnet. Neben klar erkennbaren Blockgletschern wurden auch Initialformen wie embryonale Blockgletscher bzw. „protalus ramparts“ (Ballantyne & Kirkbridge, 1986) im Inventar miterfasst; deren Identifikation (und Trennung von Blockgletschern) in der Literatur aber durchaus kritisch diskutiert wird und mit Vorsicht zu bewerten ist (z. B. Scapozza, 2015).

Die Blockgletschereinzugsgebiete wurden auf Basis des 1 m Geländemodells sowie der Ausdehnung der ausgewiesenen Blockgletscher in ArcGIS (Version 10.4) ermittelt. Hierbei wurde die Fließrichtung für jedes Pixel (1 x 1 m) bestimmt und ausgehend von den Blockgletscherflächen selbst jeder zufließende Punkt dem Einzugsgebiet zugerechnet (Winkler et al., 2018a). Implizit wird damit angenommen, dass das orographische Einzugsgebiet dem tatsächlichen entspricht. Dies ist für das Projektgebiet, das überwiegend kristalline Einzugsgebiete umfasst, eine akzeptable Näherung. Diese reproduzierbare Berechnung der Einzugsgebiete bedarf allerdings einer manuellen Überprüfung, da gerade bei 1 m Geländemodellen „Artefakte“ wie Forststraßen teilweise Fließwege vorgeben, die nicht immer der Realität entsprechen. Das Blockgletschereinzugsgebietsinventar ist ohne manueller Korrektur; jedoch aber mit einem Attribut „delinIssues“ in der Attributtabelle versehen, mit der auf mögliche Probleme hingewiesen wird. Eine Unterteilung in Einzugsgebiete die soweit plausibel erscheinen („ok“), in Einzugsgebiete, die kleine Unstimmigkeiten aufweisen („minorIssues“ und Zusatzbemerkungen) und in Einzugsgebiete die u.U. korrigiert werden müssten („manualCorr“). Von den berechneten 5769 Einzugsgebieten weisen 288 Einzugsgebiete potenziell zu korrigierende Polygone auf, wovon ein einziges Einzugsgebiet wirklich korrigiert werden sollte (cat6RG711), da ein Forststraßennetz dieses stark beeinflusst. Im konkreten Fall wäre eine Geländebegehung erforderlich, die im Rahmen dieses Projekts nicht stattfand.

4.1.2 Attributierung

4.1.2.1 Blockgletscherinventar

Jedem ausgewiesenen Blockgletscher wurden 34 Attribute zugeordnet (Tabelle 2). Die Attributierung wird im Wesentlichen von den bereits vorgelegenen Blockgletscherinventaren in Tirol (Krainer & Ribis, 2012) und Teilen der Steiermark (Kellerer-Pirklbauer et al., 2012, 2016) homogenisiert und auf einen Standard gebracht. Die Attribute beziehen sich auf Codierung, Name, Bezug zu bestehenden Inventaren, Raumlage, Geometrie, Aktivitätsgrad, Komplexität der Blockgletscherform und Angaben zu Quellen.

Im Zuge dieser Vereinheitlichung wurde insbesondere auf Konsistenz und Reproduzierbarkeit geachtet. Attribute mit Bezug auf Raumlage oder Geometrie wurden aus dem Höhenmodell abgeleitet. Attribute, die Verknüpfungen zu bestehenden raumbezogenen Datenbanken (z. B. Grundwasserkörper) herstellen, wurden mittels Verschnitt der ausgewiesenen Form mit den entsprechenden Flächen erstellt. Tabelle 2 fasst die ausgewiesenen Attribute zusammen; Definition, Einheit und Format jedes Attributs sind ihr zu entnehmen. Ergänzend wird im Folgenden das Zuordnungsverfahren für jedes Attribut dokumentiert.

Tabelle 2: Blockgletscher-Attribute. Die Definition jedes Parameters ist der Kurzbeschreibung zu entnehmen. Die Spalte Eintrag dokumentiert das Zuordnungsverfahren: ber = berechneter Wert; dat = Datenverschnitt; man = manueller Eintrag.

#	Parameter	Kurzbeschreibung	Kategorien / Einheiten / Bsp.	Format	Eintrag
1	intNr	Interne numerische Seriennummer des (embryonalen) Blockgletschers	z. B. 37801	long integer	ber
2	pers	Name der Person, welche die Ausweisung vorgenommen hat	KPA = Kellerer-Pirklbauer Andreas; KrK = Krainer Karl; PIR = Pleschberger Roswitha; RiM = Ribis Markus; WaT = Wagner Thomas	text (10)	man
3	LfType	Landform-Typ; Unterscheidung zwischen Blockgletschern und embryonalen Blockgletschern; Übergangsformen sind mit "?" gekennzeichnet	rg = rock glacier (Blockgletscher); ptr = protalus rampart/embryonal rock glacier (embryonaler Blockgletscher); Übergangsformen rg?, ptr?	text (4)	man
4	LfCode	Eindeutiger Code des Landform Polygons; die erste Zahl bezieht sich auf das Bundesland (ISO3166-2:AT), gefolgt von "RG" (Rock Glacier), und einer 4-stelligen Nummer zur Identifizierung des Polygons	z. B. 6RG0001; 5RG0123	text (10)	ber
5	LfCode_old	Im Inventar von Kellerer-Pirklbauer et al. (2016), Krainer & Ribis (2012), Lieb et al. (2012) bzw. Stocker & Krainer (2011) verwendeter, eindeutiger Code; neue Landformen mit „new“ bezeichnet	z. B. rg1234; new	text (10)	dat
6	name	Name des Blockgletschers, basierend auf einer topographischen Besonderheit wie z.B. Berggipfel, Bergrücken oder See (Namen der ÖK 1:50000 entnommen)	z.B. "w Querlstein" bedeutet Blockgletscher westlich des Bergs namens Querlstein	text (50)	man
7	maxLenLf	Maximale Fließlänge entlang der ehemaligen Kriechrichtung	[m]; z. B. 565	double	man
8	maxWidLf	Maximale Breite der Landform etwa rechtwinklig zur ehemaligen Kriechrichtung	[m]; z. B. 101	double	man
9	meanWidLf	Mittlere Breite = areaLf / maxLenLf	[m]; z. B. 76	double	ber
10	ratioLWLF	Länge/Breite Verhältnis = maxLenLf / meanWidLf	[-]	double	ber
11	xCoord	x-Koordinate des Centroids des Polygons (Hochwert)	[m]; z. B. 485951,2	double	ber
12	yCoord	y- Koordinate des Centroids des Polygons (Rechtswert)	[m]; z. B. 207072,5	double	ber
13	sys_Merid	System und Meridian-Angabe; Gliederung nach ALS-Datenquelle	BMN-M31; BMN-M34; GK-M31; GK-West	text (10)	dat

14	aspLf	Mittlere Hangausrichtung und (ehemalige) Fließrichtung (8 unterschiedliche Aspekt-Klassen)	z. B. NE	text (2)	ber
15	aspLfDeg	Mittlere Hangausrichtung und (ehemalige) Fließrichtung	[°] (ganzzahlig)	short integer	ber
16	slopeLf	Mittlere Hangneigung der Landform (durch die Oberflächenmorphologie des Blockgletschers beeinflusst)	[°]	double	ber
17	minElevLf	Seehöhe des tiefsten Punkts (Basis der Stirn) der Landform	[m ü.A.]; z.B. 2134	double	ber
18	meanElevLf	Mittlere Seehöhe der Landform (nicht zwangsweise gleich der Höhe des Centroids)	[m ü.A.]; z.B. 2222	double	ber
19	maxElevLf	Seehöhe des höchsten Punkts (Wurzelzone) der Landform	[m ü.A.]; z.B. 2301	double	ber
20	elevRangLf	Höhenunterschied (Relief) zwischen maxElevLf und minElevLf	[m]; z.B. 167	double	ber
21	moRang	Gebirgsgruppe, in der sich der Blockgletscher befindet (Alpenvereinseinteilung der Ostalpen/AVE-Einteilung)	z. B. Öztaler Alpen	text (50)	dat
22	GWK_Nr	Nummer des Grundwasser-körpers, in dem sich die Landform befindet (NGP 2015)	z.B. GK100185	text (10)	dat
23	GWK_Bez	Name des Grundwasserkörpers, in dem sich die Landform befindet (NGP 2015)	z.B. Salzburger Hohe Tauern [MUR]	text (100)	dat
24	areaLf	Projizierte Fläche des Landform-Polygons	[m ²]	double	ber
25	LfState	Aktivität des Blockgletschers unter Berücksichtigung der Alpine Permafrost Index Map von Boeckli et al. (2012)	INT = Intakter Blockgletscher (aktiv und inaktiv); REL = Reliktischer Blockgletscher	text (3)	ber
26	LfMorph	Blockgletscher mit einer oder mehreren Generationen; monomorph oder polymorph <i>sensu</i> Frauenfelder & Käab (2000)	m = monomorph; p = poly-morph; bei ptr = m; wenn unklar: p?	text (2)	man
27	LfShape	Form des Blockgletschers / der Landform; Unterscheidung zwischen zungen- und zobenförmigen sowie komplexen Formen	TS = tongue-shaped (zungenförmig; Länge > Breite); LS = lobate (lobenförmig; Breite > Länge); CX = complex (mehrere Zungen oder Loben oder ein Mix davon)	text (2)	ber/man
28	LfFormat	Information über die Entstehung der Landform (soweit dies anhand von Höhenmodell und Orthofotos abgeleitet werden kann)	TAL = Talus-derived (ice-cemented; aus Hangschutt entwickelt); GLA = Glacier-derived (ice-cored; aus schuttbedeckten Kargletschern oder Moränen mit Eiskern entwickelt); bei ptr = TAL; wenn unklar: GLA?	text (4)	man

29	LfSpring	Information, ob Quellen an der Blockgletscherstirn entspringen	0 = keine Quelle; 1 = eine Quelle; 2 = zwei Quellen; etc...; 99 = See; '-99 = nicht bekannt	short integer	man
30	commentLf	Zusätzliche Bemerkungen / Kommentare zur Landform	z. B. Quellfassung am Fuße der Stirn (ref: Untersweg & Schwendt, 1995)	text (100)	man
31	entryData	Datum (Jahr), in dem die Landform digitalisiert wurde (entspricht nicht notwendigerweise dem Erstellungs/ Aufnahme datum des zugrundeliegenden Höhenmodells bzw. Orthofotos)	z. B. 2016	short integer	man
32	mainStream	Gewässer, in dessen Einzugsgebiet die Landform liegt (HZB-Gliederung)	z. B. Gurgler Ache	text (100)	dat
33	H2O_DB	Nummer des zugehörigen H ₂ O Datenbank-Eintrags (sofern vorhanden)	z. B. BLGL6_0001 entspricht SEQ in der H2O-DB	text (50)	dat
34	referencLf	Literatur zur Landform	z. B. Krainer & Mostler (2002)	text (100)	man

Die Attribute **intNr**, **LfCode**, **LfCode_old**, **name**, **entryData**, **H2O_DB** und **referencLf** dienen der Identifizierung und Verknüpfung mit bestehenden Datenbanken oder Literatur.

Die Unterscheidung zwischen embryonalen Blockgletschern und Blockgletschern (**LfType**) wurde manuell anhand ihrer Morphologie vorgenommen. Da die Blockgletscherentwicklung kontinuierlich erfolgt, bestehen nicht eindeutig klassifizierbare Übergangsformen (entsprechender Vermerk in Attributtabelle).

Aussagekräftige Längenmaße müssen der komplexen Form von Blockgletschern Rechnung tragen. Die maximale Fließlänge entlang der (ehemaligen) Kriechrichtung ist i.d.R. gekrümmt. Diese Krümmung wurde durch eine stets durch fünf Punkte manuell definierte Polylinie nachgebildet, deren Gesamtlänge dem Attribut **maxLenLf** zugewiesen wurde. Entsprechend wurde **maxWidLf** stets als Gesamtlänge einer durch fünf Punkte manuell definierten Polylinie etwa rechtwinklig zur (ehemaligen) Kriechrichtung festgelegt, um die häufig komplexe Geometrie (z. B. infolge asymmetrisch verteilter Schuttlieferung) abzubilden. Die als Abmessungen definierten Polylinien bilden einen eigenen Datensatz, dessen Attribute (maximale Länge bzw. Breite) in der Attributliste der Landschaftsformen integriert wurde. Die Breite von Blockgletschern variiert mitunter erheblich entlang ihrer Fließachse. Dieser Umstand findet Eingang in der Festlegung einer mittleren Breite **meanWidLf**, die als Quotient aus projizierter Polygonfläche (**areaLf**) und maximaler Fließlänge (**maxLenLf**) berechnet wird. Die projizierte Polygonfläche ist stets kleiner als die tatsächliche Oberfläche des (räumlich variabel geneigten) Blockgletschers. Das Verhältnis der mittleren Breite zur maximalen Länge wurde verwendet, um ein Länge/Breite-Verhältnis zu berechnen (**ratioLWLf**). Diese Vorgangsweise trägt mit aussagekräftigen und klar definierten Längenmaßen den natürlichen Gegebenheiten ebenso Rechnung wie den Ansprüchen an Nachvollziehbarkeit und Reproduzierbarkeit.

Für die Zuweisung von Koordinaten wurde der Schwerpunkt (Centroid) jedes Polygons errechnet, dessen Position durch **xCoord**, **yCoord** und **sys_Merid**

festgelegt wird. Die Centroide der jeweiligen Polygone wurden so berechnet, dass diese immer innerhalb des Polygons zu liegen kommen (was bei komplexen Formen nicht immer gegeben sein muss). Das Koordinatensystem wurde anhand der von den jeweiligen Ländern zur Verfügung gestellten ALS-Datenquellen übernommen.

Die mittlere Ausrichtung des Blockgletschers (**aspLf**, **aspLfDeg**) bzw. der (ehemaligen) Fließrichtung wurde anhand der maxLenLf definierenden Polylinie errechnet. Dies erlaubt eine nachvollziehbare und automatisierte Berechnung der Ausrichtung.

Eine Reihe von Attributen wurde durch Verschnitt der ausgewiesenen Form mit dem Höhenmodell errechnet. Die mittlere Hangneigung der Landschaftsform (**slopeLf**) wurde mittels der aus dem Höhenmodell abgeleiteten Neigungskarte (Slope Raster) bestimmt. Die Mittelwertbildung ist naturgemäß von der unruhigen Oberflächenmorphologie des Blockgletschers (kleinräumige Wülste etc.) beeinflusst.

Durch Verschnitt des Höhenmodells mit dem betreffenden Polygon wurden die Seehöhe des tiefsten Punkts des Blockgletschers (**minElevLf**, i.A. Basis der Stirn), seine mittlere Höhe (**meanElevLf**; nicht zwangsweise gleich der Höhe des Centroids) sowie die seines höchsten Punkts (**maxElevLf**; i.A. Wurzelzone) bestimmt, sowie daraus die Höhendifferenz zwischen maximaler und minimaler Höhe (**elevRangLf**) berechnet.

Die Zuordnung des Blockgletschers zu einer Gebirgsgruppe (**moRang**; nach Alpenvereinseinteilung/AVE; Grassler (1984); Bezugsquelle: Österreichischer Alpenverein), Grundwasserkörper (**GWK_Nr**; **GWK_Bez**; nach NGP 2015 (Oberflächennahe Grundwasserkörper), Bezugsquelle: Umweltbundesamt) und Einzugsgebiet (**mainStream**; nach HZB-Gliederung; Bezugsquelle: Hydrographisches Zentralbüro) erfolgte durch Verschnitt mit den entsprechenden Datenbanken. Als Verschnitt wurde der Centroid-Punkt gewählt, da gerade Einzugsgebietsgrenzen je nach verwendetem Höhenmodell durchaus variieren.

Hinsichtlich des Aktivitätsgrades (**LfState**) wurde zwischen intakten (aktiv oder inaktiv) und reliktschen Blockgletschern unterschieden. Angesichts der großen Anzahl wurde daher basierend auf Wagner et al. (2018a) das von Boeckli et al. (2012) für den Alpenraum erstellte Permafrostindexmodell als Grundlage herangezogen. Blockgletscher in Bereichen geringer Permafrostwahrscheinlichkeit und solche, die zum größten Teil außerhalb der modellierten Permafrostbereiche liegen wurden als reliktsch klassifiziert; solche, die zur Gänze oder zum größten Teil in Bereichen liegen, für die das Modell zumindest Permafrost unter günstigen Bedingungen ausweist, dagegen als intakt. Da eine weitere Untergliederung intakter Blockgletscher (in aktive und inaktive) entsprechende Bewegungsdaten erfordert, wurde im Rahmen der großräumigen Inventarerstellung darauf verzichtet.

Sofern morphologisch ableitbar, wurde die Anzahl der Generationen einer Landschaftsform manuell erfasst (**LfMorph**): Monomorph („m“) bei nur einer Generation; polymorph („p“) sensu Frauenfelder & Käab (2000) bei mehr als einer Generation, entsprechender Vermerk bei nicht eindeutigen Übergangsformen.

Hinsichtlich der Form des Blockgletschers (**LfShape**) wird zwischen zungenförmigen, lobenförmigen und komplexen Formen (mehrere Zungen oder Loben, Mischformen) unterschieden. Im Sinne größtmöglicher Objektivität orientierte sich die Einteilung in zungen- oder lobenförmig zunächst am Länge/Breite-Verhältnis (Berechnung von $\text{maxLenLf}/\text{maxWidLf}$ sowie von $\text{maxLenLf}/\text{meanWidLf}$). Bei Verhältnissen nahe 1 sowie bei signifikanten Unterschieden zwischen beiden Berechnungsmethoden erfolgte die Einteilung manuell. Zusätzlich wurde eine visuelle Überprüfung jedes Polygons vorgenommen, um komplexe Formen zu klassifizieren.

Hinsichtlich der Entstehung der Blockgletscher wird zwischen solchen unterschieden, die sich aus Hangschutt entwickelt haben, und solchen, die sich aus schuttbedeckten Kargletschern bzw. aus Moränen mit Eiskern entwickelt haben (**LfFormat**). Diese Einteilung stellt eine schwierige und mitunter subjektive Einschätzung dar, da eine Ableitung der Blockgletschergenese generell aus Fernerkundungsdaten schwierig ist. Dies ist bereits für heute aktive Form schwierig. Für reliktsche Formen wurde versucht aus der Geometrie der Form, ihrer Feinmorphologie sowie des Nahbereiches die mögliche Genese der Form zu rekonstruieren und zu bewerten.

Informationen zu Quellen und Seen an der Blockgletscherstirn sind unter **LfSpring** angegeben. Sofern keine Geländebegehungen vorliegen, wurde dies anhand von Orthofotos und ÖK-Kartenblättern durchgeführt.

4.1.2.2 Blockgletschereinzugsgebietsinventar

Jedem ausgewiesenen Blockgletschereinzugsgebiet wurden 13 Attribute zugeordnet (Tabelle 3). Die Attribute wurden aus dem Höhenmodell oder durch Verknüpfungen mit dem Blockgletscherinventar abgeleitet. Definition, Einheit und Format jedes Attributs sind der Tabelle 3 zu entnehmen, ergänzend wird im Folgenden das Zuordnungsverfahren dokumentiert.

catCode dient der Identifizierung (in Anlehnung an den zugehörigen Blockgletscher, dessen **LfCode** außerdem als eigenes Attribut angegeben ist).

Die projizierte Fläche des Einzugsgebiets einschließlich der Blockgletscherfläche ist als **areaCatInd** angegeben. Sofern sich die Einzugsgebiete mehrerer Blockgletscher überschneiden (d.h. sofern ein Blockgletscher zumindest teilweise im Einzugsgebiet eines anderen liegt) ist das Einzugsgebiet abzüglich des (teilweise) enthaltenen Einzugsgebiet als **areaCat** angegeben. Während bei der Betrachtung eines einzelnen Einzugsgebiets auf **areaCatInd** zurückgegriffen wird (hydrologisch relevant), muss bei der Betrachtung der Gesamtfläche auf **areaCat** zurückgegriffen werden (sonst würde dies eine zu große Gesamtfläche ergeben).

ratioArea gibt das Verhältnis von Blockgletscherfläche zu individuellem Einzugsgebiet an ($\text{areaLf}/\text{areaCatInd}$).

maxEleCat, **minEleCat** und **meanEleCat** geben Höhenlage des höchsten und niedrigsten Punktes im Einzugsgebiet bzw. die gemittelte Höhe an; **eleRangCat** die Höhendifferenz zwischen höchstem und niedrigstem Punkt.

Die mittlere Neigung des Einzugsgebiets (**slopeCat**) ergibt sich durch Mittelung der aus dem Höhenmodell abgeleiteten Neigungskarte (Slope Raster).

Tabelle 3: Blockgletschereinzugsgebiets-Attribute. Die Definition jedes Parameters ist der Kurzbeschreibung zu entnehmen. Die Spalte Eintrag dokumentiert das Zuordnungsverfahren: ber = berechneter Wert; man = manueller Eintrag.

#	Parameter	Kurzbeschreibung	Kategorien / Einheiten / Bsp.	Format	Eintrag
1	catCode	Eindeutiger Code des Einzugsgebiet Polygons, angelehnt an den zugehörigen Blockgletscher-Code (LfCode)	z.B. cat5RG0321 (Einzugsgebiet zum Blockgletscher 5RG0321)	text (13)	ber
2	LfCode	Code des Blockgletschers, dem das Einzugsgebiet zugeordnet ist	z.B. 6RG0001; 5RG0123	text (10)	ber
3	areaCat	Fläche des Blockgletschereinzugsgebietes (ggf. abzüglich Überschneidungen)	[m ²]	double	ber
4	areaCatInd	Fläche des Blockgletschereinzugsgebietes	[m ²]	double	ber
5	ratioArea	Verhältnis Blockgletscherfläche/ Einzugsgebietsfläche = areaLf / areaCatInd	[-]	double	ber
6	maxEleCat	Seehöhe des höchsten Punktes des Blockgletschereinzugsgebietes	[m ü.A.]	double	ber
7	meanEleCat	Mittlere Seehöhe des Blockgletschereinzugsgebietes	[m ü.A.]	double	ber
8	minEleCat	Seehöhe des tiefsten Punktes des Blockgletschereinzugsgebietes	[m ü.A.]	double	ber
9	eleRangCat	Höhendifferenz zwischen höchstem (maxEleCat) und tiefsten (minEleCat bzw. minElevLf) Punkt des Einzugsgebietes	[m]	double	ber
10	slopeCat	Mittlere Hangneigung des Blockgletschereinzugsgebietes (inklusive dem Blockgletscher selbst)	[°]	double	ber
11	delinIssue	Abgrenzungsproblematik	ok; minorIssues; manualCorr	text (100)	man
12	commentCat	Zusätzliche Bemerkungen / Kommentare über die Einzugsgebiete (Bergbau; Forststraße mit Aufschlüssen; Strom- bzw. Seilbahnmasten; Quellfassungen)	z.B. Bleibergwerk im EZG; kleine Gletscherreste; Skigebiet; etc.	text (100)	man
13	referenCat	Literatur zum Einzugsgebiet	z.B. Winkler et al. (2016)	text (100)	man

Da anhand der ALS-Daten oberflächliche Eingriffe (z. B. Forststraßen) das errechnete Einzugsgebiet verändern können, wurde in diesem Fall ein Attribut **delinIssue** vergeben. Eine tatsächliche Beurteilung ist nur vor Ort möglich, da je nach Ausführung solche Eingriffe (Durchleitungen bei Forststraßen) das Einzugsgebiet tatsächlich verändern können.

4.2 Ergebnisse

4.2.1 Blockgletscherinventar

Eine Übersicht der Gesamtdaten des Blockgletscherinventars der Bundesländer Vorarlberg, Tirol, Salzburg, Steiermark und Kärnten findet sich in Tabelle 4. Im gesamten Untersuchungsgebiet wurden 5769 Blockgletscher ausgewiesen. Mit 3148 Blockgletschern liegt der größte Anteil in Tirol (Nord- und Osttirol), die geringste Anzahl befindet sich mit 303 Blockgletschern in Vorarlberg. Die Gesamtfläche dieser Landschaftsformen beträgt 303 km², denen eine Gesamteinzugsgebietsfläche von 1279 km² zugeordnet werden kann. 3460 Blockgletscher (~60 %) werden als reliktsch, 2309 (~40 %) als intakt eingestuft. Blockgletscher treten im Projektgebiet zwischen 475,5 m und 3311,7 m ü.A. auf. Der überwiegende Anteil (5269 Blockgletscher, ~91%) liegt auf nicht-verkarstungsfähigem Gestein, ein geringer Anteil (500 Blockgletscher, ~9 %) auf verkarstungsfähigem Untergrund (basierend auf NGP, 2015). Die Abbildungen 20 bis 24 zeigen die Verteilung der Blockgletscher und ihrer hydrologischen Einzugsgebiete in den einzelnen Bundesländern. In Tabelle 5 wird die Anzahl der Blockgletscher pro Grundwasserkörper (GWK) nach NGP 2015 aufgelistet. Eine Übersicht über die für das Projekt wichtigsten GWKs ist in Abbildung 5 dargestellt. Der überwiegende Anteil (v.a. intakter Blockgletscher) entfällt auf die Grundwasserkörper der Zentralzone. Zahlreiche (v.a. reliktsche) Blockgletscher liegen zudem in den Grundwasserkörpern der Niederen und Hohen Tauern, der Nördlichen Kalkalpen und im Vorarlberger Kristallin.

Aktuelle Teilergebnisse hinsichtlich der Relevanz von Blockgletschern in geschützten Gebieten der Alpen (Nationalparks bzw. Biosphärenpark) wurden im Rahmen eines Symposiums vorgestellt (Wagner et al., 2018a).

Tabelle 4: Übersicht des Blockgletscherinventars. Gesamtfläche der Blockgletscher (BG) sowie minimale (E-MIN), mittlere (E-MEDIAN; Median der mittleren Seehöhen) und maximale (E-MAX) Seehöhe pro Bundesland.

	Anzahl	Gesamtfläche BG	Blockgletscher - Seehöhe [m ü.A.]		
	[-]	[km ²]	E-MIN	E-MEDIAN	E-MAX
Steiermark	713	40,3	652,0	1876,6	2601,1
Salzburg	789	43,6	527,9	2076,4	2976,3
Kärnten	816	40,6	475,5	2236,4	2947,1
Osttirol	609	30,5	1708,5	2497,2	3128,2
Nordtirol	2539	136,5	1447,3	2467,5	3311,7
Vorarlberg	303	11,4	831,7	2143,5	2788,0
Gesamt	5769	303,0	475,5	2294,4	3311,7

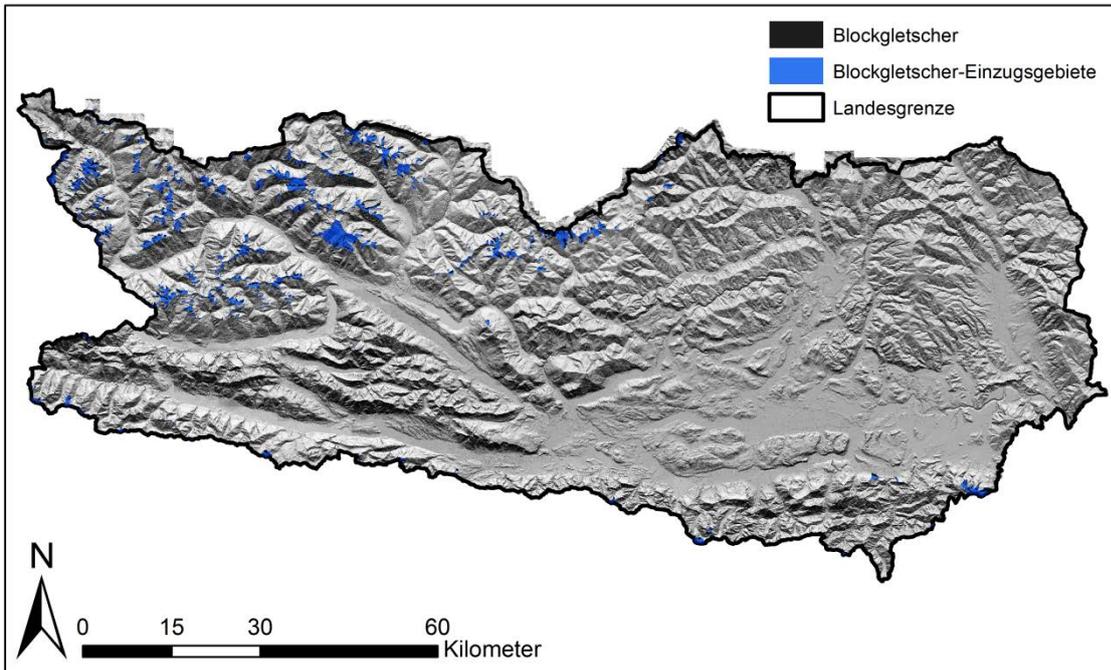


Abbildung 20: Blockgletscher- und Blockgletschereinzugsgebietsinventar für Kärnten.

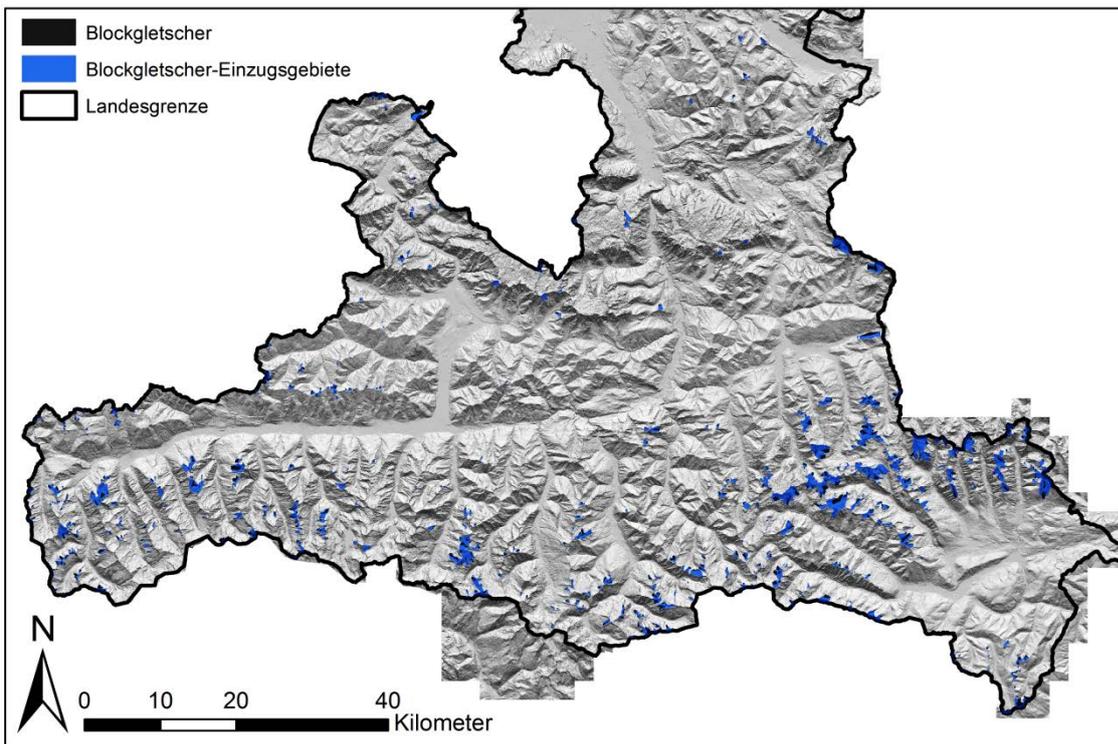


Abbildung 21: Blockgletscher- und Blockgletschereinzugsgebietsinventar für Salzburg.

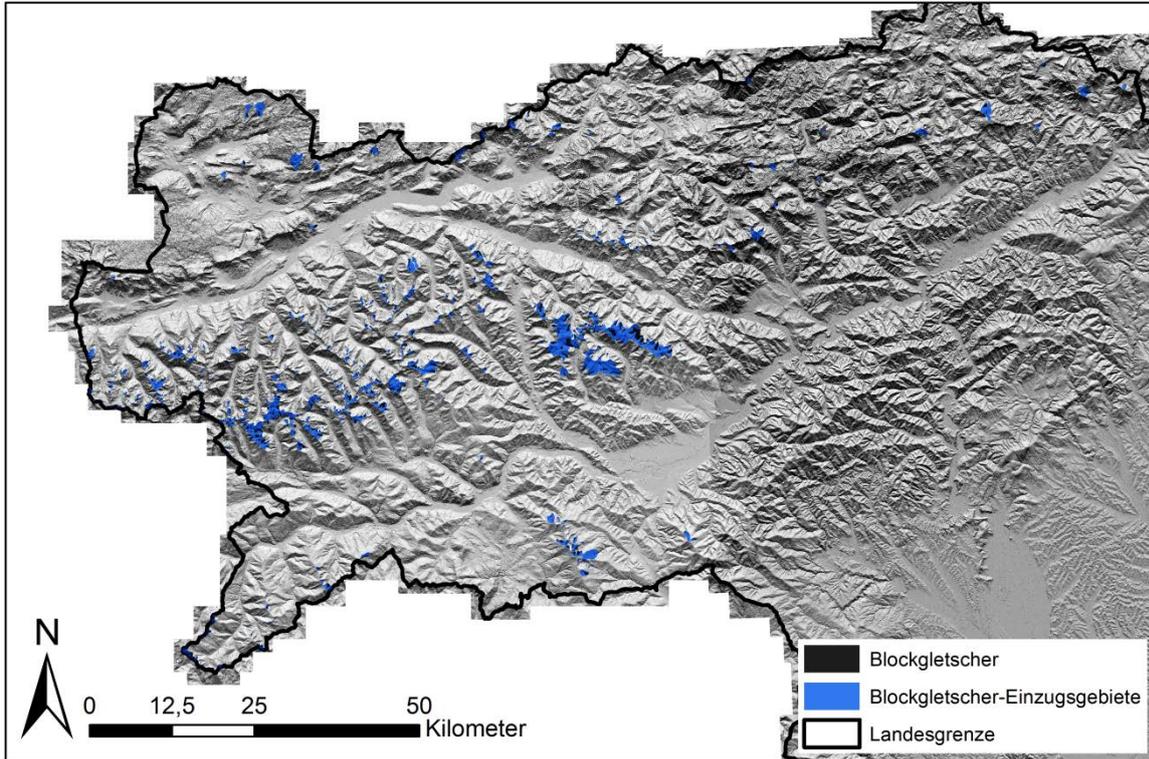


Abbildung 22: Blockgletscher- und Blockgletschereinzugsgebietsinventar für die Steiermark.

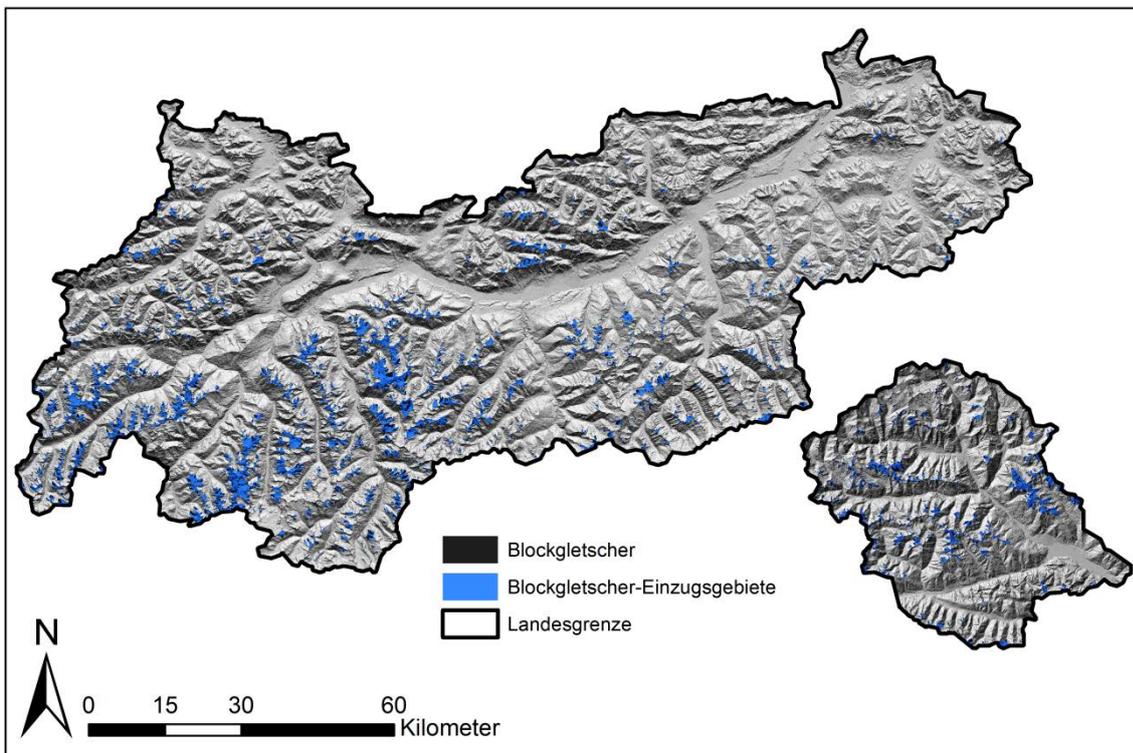


Abbildung 23: Blockgletscher- und Blockgletschereinzugsgebietsinventar für Tirol.

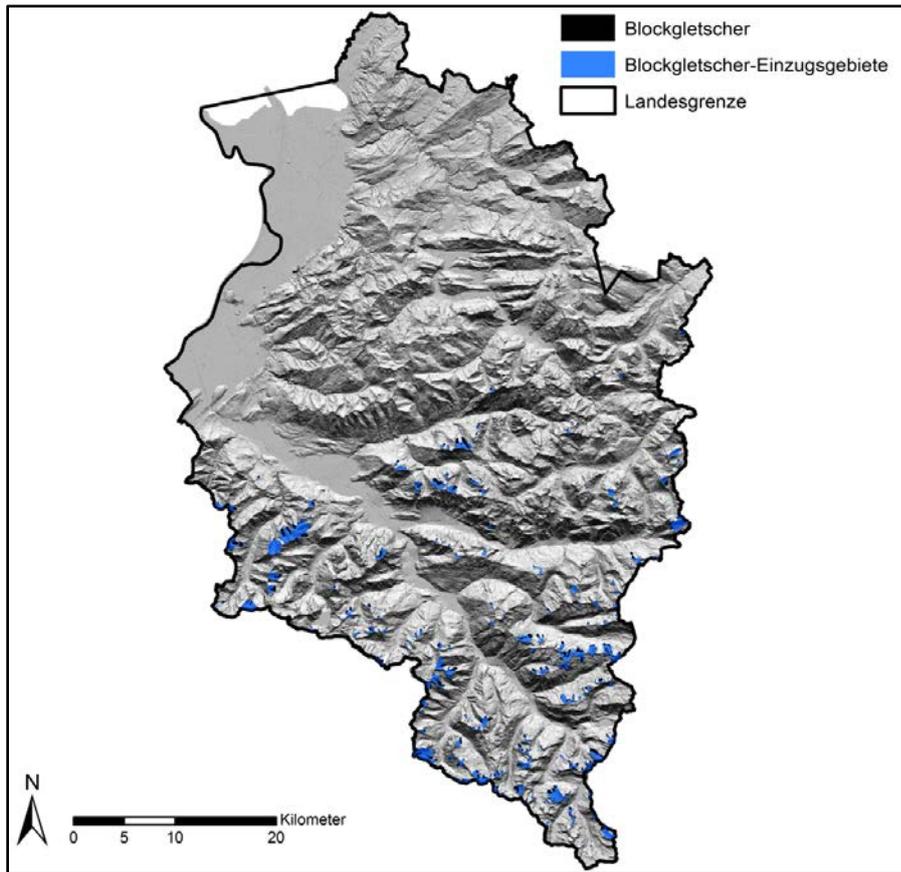


Abbildung 24: Blockgletscher- und Blockgletschereinzugsgebietsinventar für Vorarlberg.

Tabelle 5: Zuordnung der Blockgletscher zu den Grundwasserkörpern (nach NGP, 2015).

GWK Nr	GWK Bezeichnung	Anzahl	Anzahl reliktsch	Anzahl intakt
GK100010	Zentralzone [DBJ]	2760	1138	1622
GK100186	Zentralzone [DRA]	1346	852	494
GK100052	Niedere Tauern einschl. Grauwackenzone [DUJ]	300	284	16
GK100009	Nördliche Kalkalpen [DBJ]	278	217	61
GK100116	Niedere Tauern einschl. Seckauer Tauern [MUR]	266	264	2
GK100152	Kristallin [RHE]	221	131	90
GK100185	Salzburger Hohe Tauern [MUR]	219	205	14
GK100055	Salzburger Hohe Tauern [DUJ]	81	81	0
GK100154	Nördliche Kalkalpen [RHE]	63	57	6
GK100077	Südliche Kalkalpen [DRA]	60	58	2
GK100184	Turrach, Kreischberg, Frauenalpe, Stolzalpe [MUR]	46	46	0
GK100189	Nördliche Kalkalpen [DUJ]	45	43	2
GK100120	Seetaler Alpen Nord [MUR]	27	27	0
GK100194	Karawanken [DRA]	15	15	0
GK100108	Grauwackenzone Mitte [MUR]	14	14	0
GK100047	Grauwackenzone Mitte [DUJ]	13	13	0
GK100117	Nördliche Kalkalpen [MUR]	8	8	0
GK100113	Kristallin der Koralpe, Stubalpe und Gleinalpe [MUR]	2	2	0
GK100114	Kristallin nördlich des Mürztales einschl. Grauwackenzone [MUR]	2	2	0
GK100151	Helvetikum [RHE]	2	2	0
GK100155	Südliche Flyschzone [RHE]	1	1	0

Das attributierte Blockgletscherinventar erlaubt eine statistische Auswertung des ausgewiesenen Blockgletscherbestandes. Die verschiedenen Parameter weisen häufig eine hohe Streuung auf, insbesondere weicht häufig ein (kleiner) Anteil der Gesamtmenge stark von den übrigen ab (Ausreißer). Die Auswertung erfolgt mit entsprechender Rücksicht auf diese Eigenschaften. Zur grafischen Darstellung wurden meist Box-Whisker-Plots verwendet. Der zentrale Anteil der Verteilung wurde durch eine Box, deren Ausdehnung dem Interquartilabstand (25 % - 75 % der Stichprobe) entspricht, beschrieben. Der Median (50 % der Stichprobe) teilt die Box in zwei Hälften. Die Asymmetrie der Verteilung kann anhand der relativen Größe der beiden Boxhälften abgeschätzt werden. Die Whiskers (vertikale Linien) geben die Spannweite zwischen dem P10 und P25 bzw. dem P75 und P90 Perzentil an (10 – 25 % bzw. 75 – 90 % der Stichprobe), stärker abweichende Werte werden einzeln ausgewiesen (Ausreißer). Zu jedem Boxplot ist der zugehörige Stichprobenumfang angegeben. Bei asymmetrischen Verteilungen wird neben dem Median auch der Mittelwert angegeben. Die statistischen Kennzahlen sind im Anhang zusammengestellt.

4.2.1.1 Ausrichtung

Abbildung 25 zeigt die Verteilung der Ausrichtung (Attribut: aspLfDeg) der Blockgletscher im gesamten Projektgebiet, getrennt dargestellt und normiert für reliktsche und intakte Blockgletscher. Beide Diagramme verdeutlichen die Konzentration auf die nördliche Hälfte, im Schnitt entfallen 63 % aller Blockgletscher auf diese. Besonders deutlich (69 %) fällt dieser Trend für intakte Blockgletscher aus (gegenüber 59 % für reliktsche Blockgletscher). Intakte Blockgletscher sind besonders deutlich auf die Sektoren NW (19 %), N (18 %) und NE (15 %) konzentriert, reliktsche auf die Sektoren NE (17 %), N (16 %) und E (15 %). Die wenigsten Blockgletscher sind nach SW ausgerichtet (7 % der intakten, 8 % der reliktschen). Ein Sektor umfasst 22,5° plus und minus der Himmelsrichtung, also gesamt 45°. Die Verteilung spiegelt die günstigen Bedingungen für Permafrost in nordexponierten Lagen wider.

Abbildung 26 zeigt die Verteilung aller (reliktscher und intakter) Blockgletscher im Projektgebiet und stellt ihr die Verteilung der größten 20 % aller Blockgletscher gegenüber. Deutlich wird die Konzentration der größten Formen auf die Permafrost begünstigende Nordhälfte (66 %).

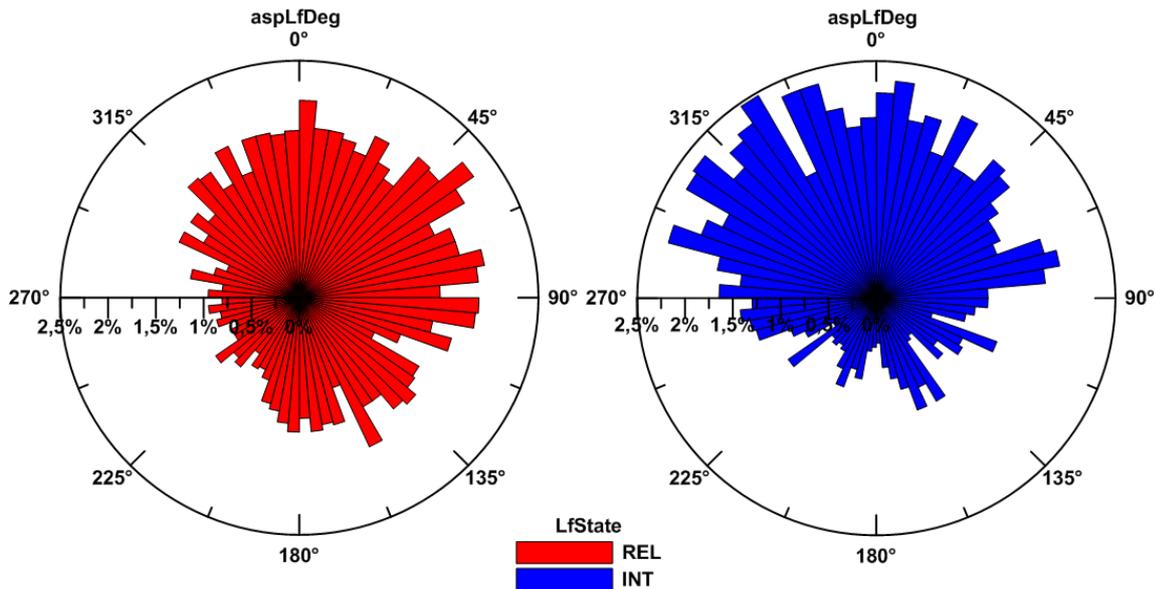


Abbildung 25: Ausrichtung der Blockgletscher, reliktsche (rot) und intakte (blau) getrennt dargestellt.

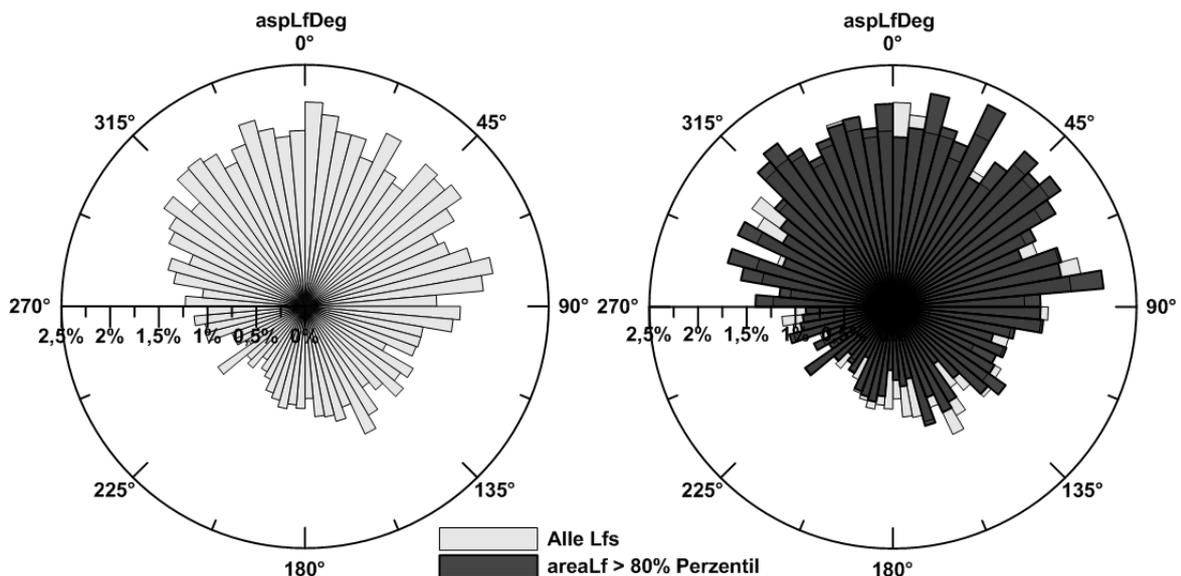


Abbildung 26: Ausrichtung der Blockgletscher (hellgrau) verglichen mit der Ausrichtung der größten 20 % aller Blockgletscher (dunkelgrau).

4.2.1.2 Höhe

Mehrere Seehöhendaten der Blockgletscher werden in der Attributtabelle erfasst (minElevLf, meanElevLf, maxElevLf). Die Form der Höhenverteilung unterscheidet sich bei Untersuchung der einzelnen Attribute nicht wesentlich, lediglich der Schwerpunkt der Verteilung verschiebt sich (minElevLf < meanElevLf < maxElevLf). Im Folgenden wird daher stets die Höhe des tiefsten Punktes (minElevLf), d.h. im Wesentlichen die Seehöhenlage der Blockgletscherstirn, jedes Blockgletschers verglichen.

Die Verteilung reliktscher und intakter Blockgletscher sowie die Verteilung ihrer Höhenlage zeichnen grob die Morphologie der österreichischen Ostalpen nach (Abbildung 27). Der Vergleich der einzelnen Bundesländer verdeutlicht die

ungleiche Höhenverteilung im Projektgebiet (Abbildung 28). Während im gesamten Projektgebiet die Blockgletscherstirn im Schnitt auf 2276 m ü.A. (Median) liegt, kommen reliktsche Blockgletscher insbesondere in Kärnten, Salzburg und der Steiermark bis in tiefe Lagen (bis 475 m ü.A.) vor. In Nord- und Osttirol befinden sich dagegen mehr als ein Viertel der Blockgletscherstirnen über 2500 m ü.A.. Im Schnitt liegen Blockgletscherstirnen in Tirol etwa 600 m höher als in der Steiermark, die Unterschiede zwischen Vorarlberg, Salzburg und Kärnten fallen deutlich geringer aus.

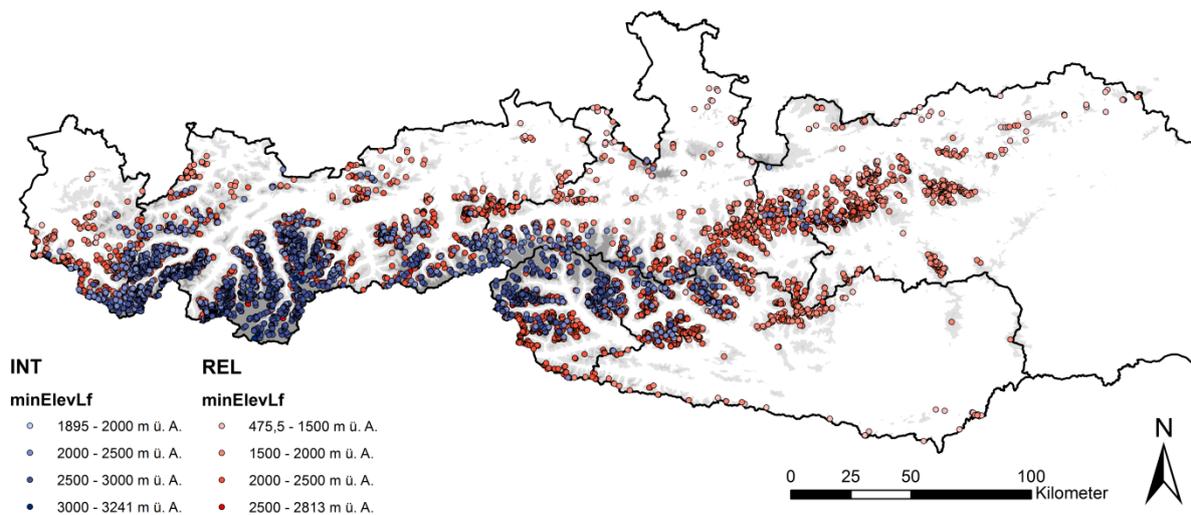


Abbildung 27: Räumliche Verteilung reliktscher (rot) und intakter (blau) Blockgletscher sowie ihrer Seehöhe (Farbintensität) im Projektgebiet. Die Verteilung zeichnet die Höhenverteilung der Ostalpen nach.

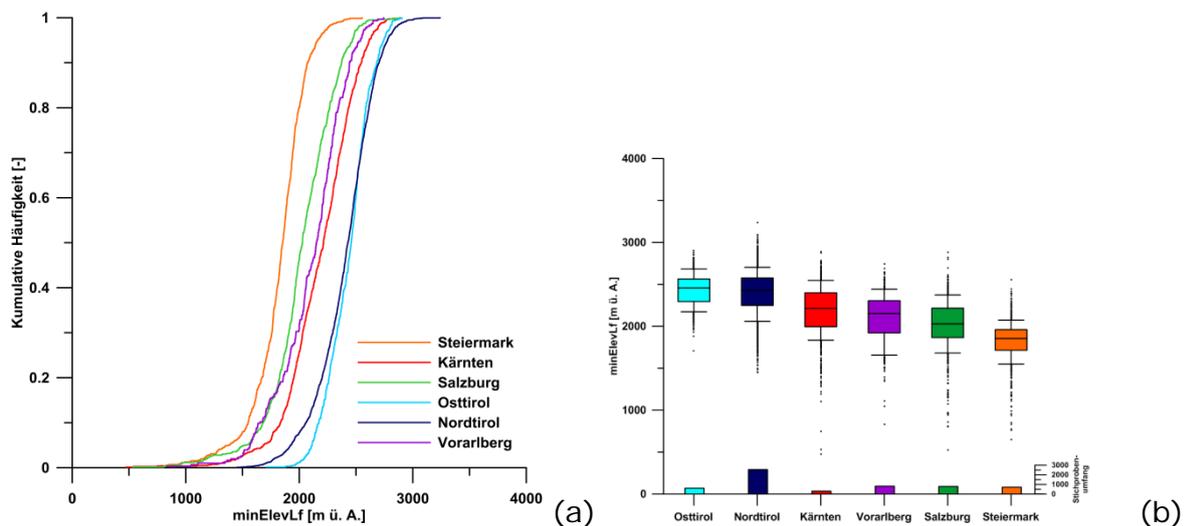


Abbildung 28: Vergleich der Höhenverteilung der Blockgletscherstirnen zwischen den einzelnen Bundesländern (Tirol geteilt in Nord- und Osttirol), dargestellt als kumulative Häufigkeit (a) bzw. als Box-Whisker-Plot (b). Die zugehörigen statistischen Kennzahlen sind im Anhang zusammengestellt.

Eine detaillierte Untersuchung der Höhenverteilung in den einzelnen Bundesländern lässt die regionalen Unterschiede deutlicher hervortreten und zeigt die ungleiche Verteilung reliktscher und intakter Blockgletscher auf (Abbildung 29). Deutlich ist die Konzentration insbesondere intakter Blockgletscher auf Tirol zu erkennen, während in der Steiermark reliktsche Blockgletscher dominieren. Die einheitlich skalierten Achsen ermöglichen einen Vergleich der Form der Verteilung zwischen den einzelnen Bundesländern sowie mit der Gesamtverteilung (in grau dargestellt).

Die Abhängigkeit der Höhenverteilung von der Fläche ist in Abbildung 30 ersichtlich. Der insgesamt beobachtbare Trend zunehmender Fläche mit abnehmender Seehöhe ist je nach Bundesland unterschiedlich stark ausgeprägt (zur Verdeutlichung als Box-Whisker-Plots dargestellt): Am markantesten tritt er in der Steiermark hervor, in Nordtirol dagegen am undeutlichsten. Unterschiede bezüglich der Form der Verteilung zwischen den einzelnen Bundesländern sind klar zu erkennen.

Der Zusammenhang zwischen Seehöhe und Ausrichtung sowie entsprechende Unterschiede zwischen reliktschen und intakten Blockgletschern sind in Abbildung 31 dargestellt. Insgesamt sind südexponierte Blockgletscher höher gelegen als nordexponierte, ein entsprechender Trend ist sowohl bei reliktschen (rot) als auch bei den insgesamt höher liegenden intakten (blau) Blockgletschern zu erkennen. Während die Unterschiede zwischen intakten und reliktschen Blockgletschern erheblich sind (Mediandifferenz 457 m; Median intakter Blockgletscher 2513 m ü.A., reliktscher 2056 m ü.A.), ist die Abhängigkeit von der Exposition weniger stark ausgeprägt: Die Mediandifferenz zwischen Nord- und Südausrichtung beträgt für reliktsche Blockgletscher 290 m (Median Nord 1954 m ü.A., Süd 2244 m ü.A.), für intakte 216 m (Median Nord 2416 m ü.A., Süd 2632 m ü.A.) Die Verteilung zeichnet die günstigen Bedingungen für Permafrost in nordexponierten Lagen nach.

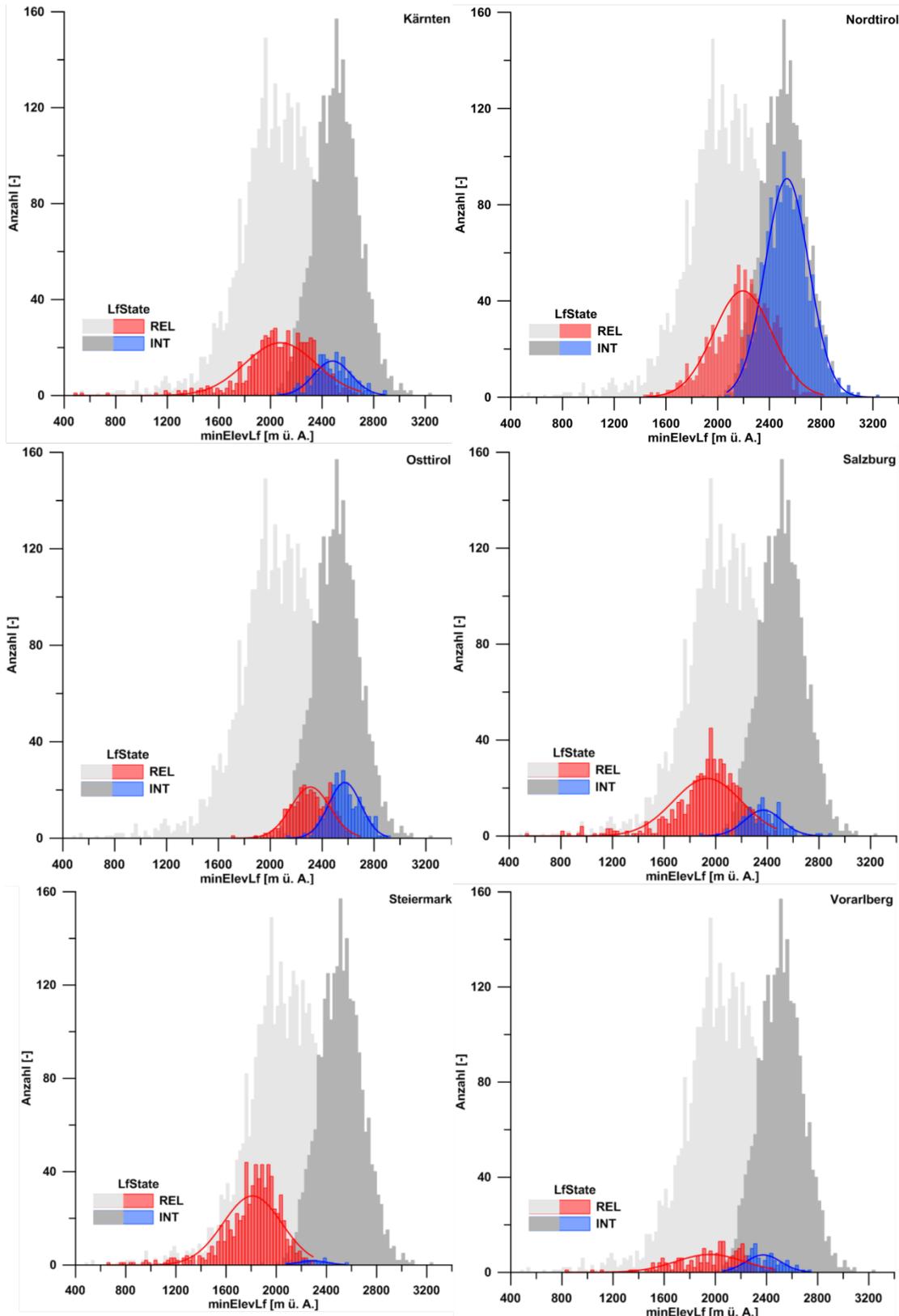


Abbildung 29: Detaillierte Verteilung der Höhenlage reliktscher (rot) bzw. intakter (blau) Blockgletscher je Bundesland. Zum Vergleich ist die projektgebietsweite Höhenverteilung aller Blockgletscher in hellgrau (reliktsch) bzw. dunkelgrau (intakt) dargestellt. Linien entsprechen jeweils idealisierten Normalverteilungen zum optischen Vergleich. Die zugehörigen statistischen Kennzahlen sind im Anhang zusammengestellt.

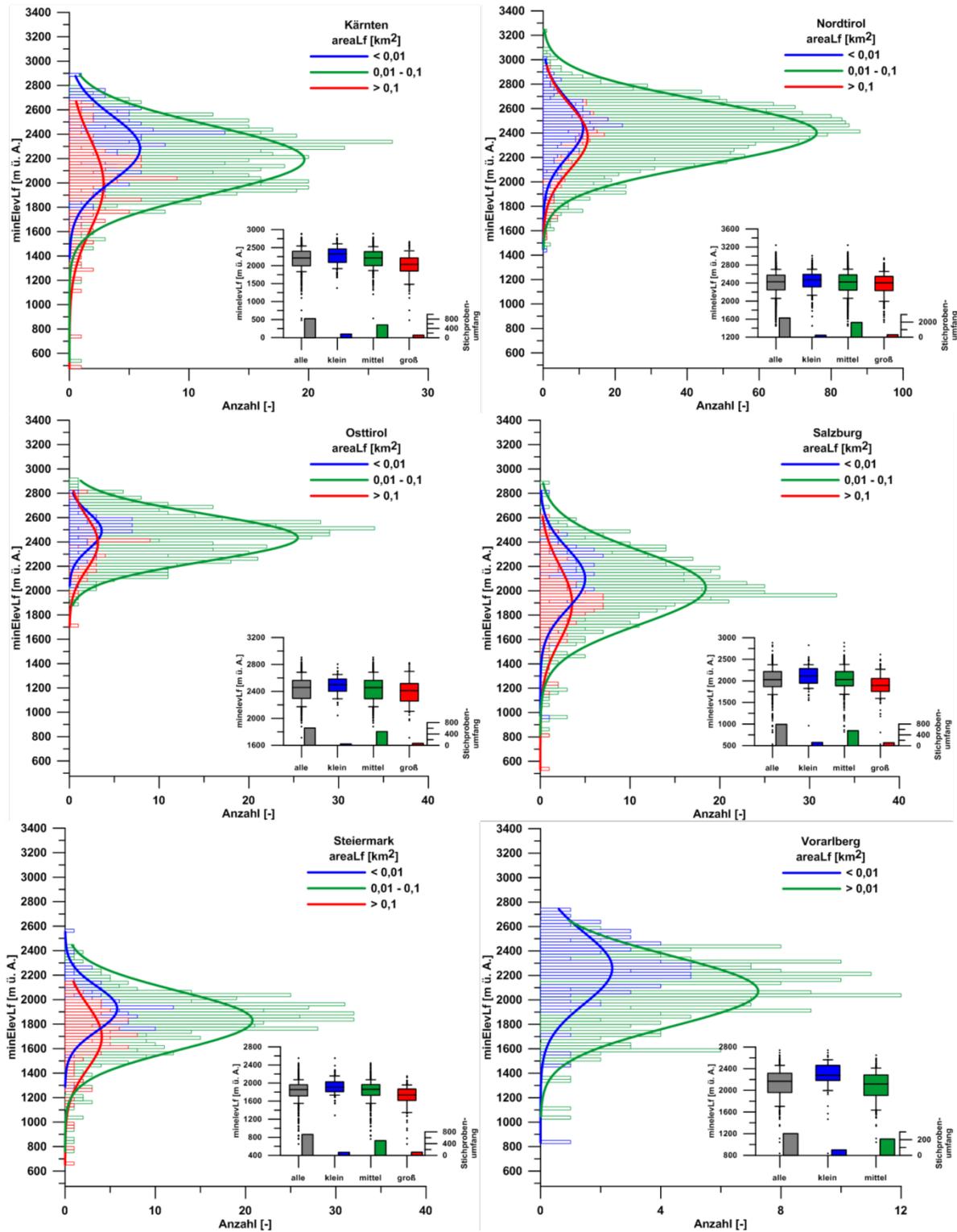


Abbildung 30: Höhenverteilung der Blockgletscherstirnen in Abhängigkeit von ihrer Fläche (klein ($<0,01 \text{ km}^2$), mittel ($0,01 - 0,1 \text{ km}^2$) bzw. groß ($>0,1 \text{ km}^2$)) und Unterschiede zwischen den Bundesländern. Linien entsprechen jeweils Normalverteilungen zum optischen Vergleich. Zur Verdeutlichung der Trends sind die Größenklassen zusätzlich als Box-Whisker-Plots dargestellt.

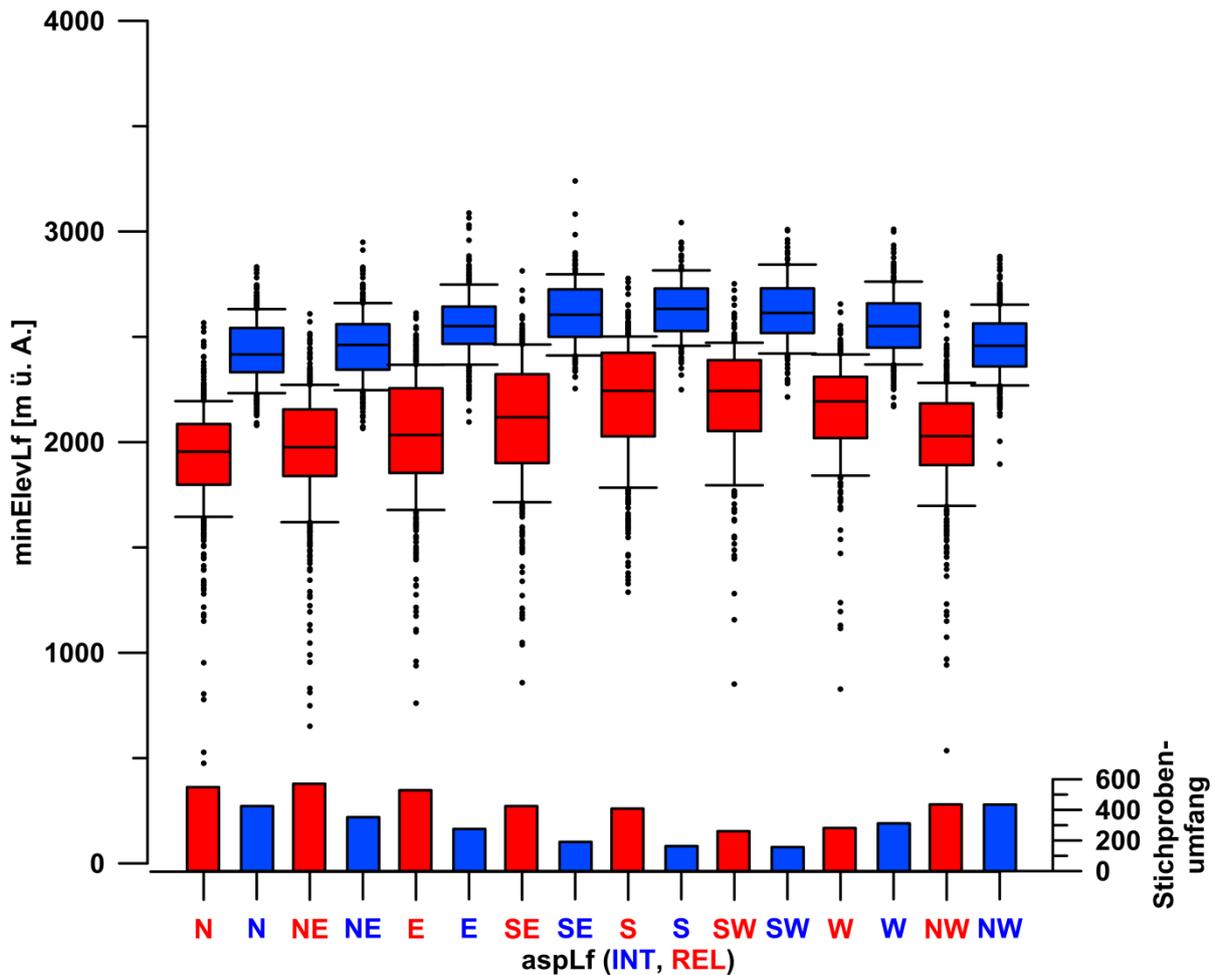


Abbildung 31: Abhängigkeit der Seehöhe von der Ausrichtung für reliktsche (rot) und intakte (blau) Blockgletscher. Zur Veranschaulichung ist für intakte wie für reliktsche Blockgletscher die Ausrichtung jeweils in Gruppen zusammengefasst, deren interne Höhenverteilung mittels Box-Whisker-Plots dargestellt wird. Die zugehörigen statistischen Kennzahlen sind im Anhang zusammengestellt.

4.2.1.3 Neigung

Die Verteilung der mittleren Blockgletscherneigung (Attribut: slopeLf) fällt in den einzelnen Bundesländern unterschiedlich aus (Abbildung 32). Tendenziell werden die steilsten Blockgletscher in Nordtirol (Median: $24,4^\circ$) gefunden, die flachsten in der Steiermark (Median: $21,8^\circ$), die übrigen Bundesländer liegen dazwischen. Insgesamt betrachtet ist die Schwankungsbreite beachtlich: Die steilsten Blockgletscher im Projektgebiet weisen Werte von knapp über $42,5^\circ$ auf, die flachsten dagegen etwas über $12,5^\circ$. Diese Schwankungsbreite ist auch innerhalb der meisten Bundesländer ähnlich stark ausgeprägt. Die regionale Verteilung der mittleren Neigung, mit Konzentration steiler Blockgletscher auf Nordtirol, zeigt Abbildung 33.

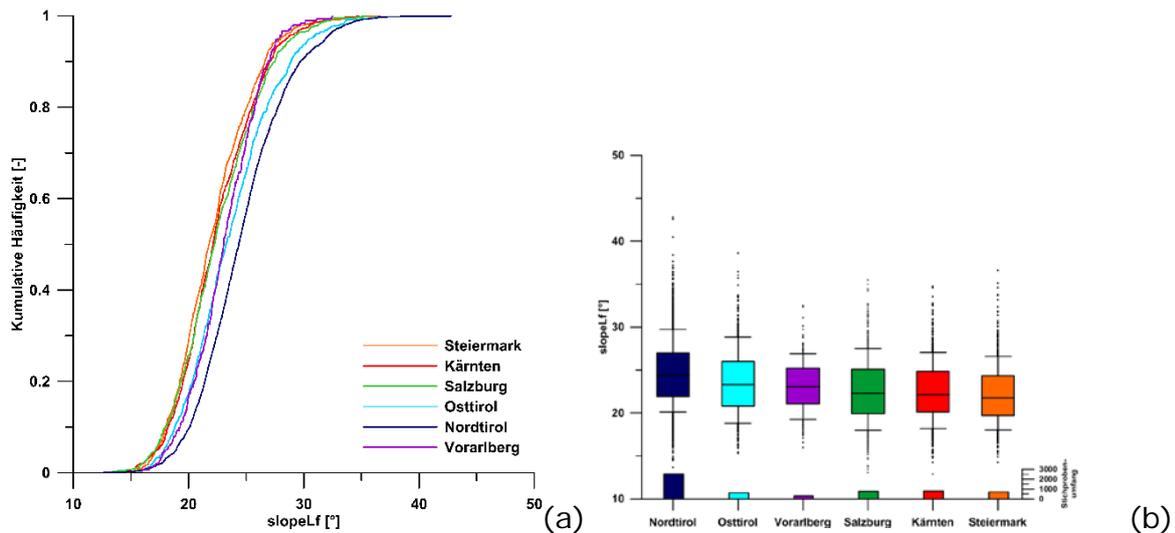


Abbildung 32: Vergleich der Neigungsverteilung zwischen den einzelnen Bundesländern, dargestellt als kumulative Häufigkeit (a) sowie als Box-Whisker-Plot (b). Die zugehörigen statistischen Kennzahlen sind im Anhang zusammengestellt.

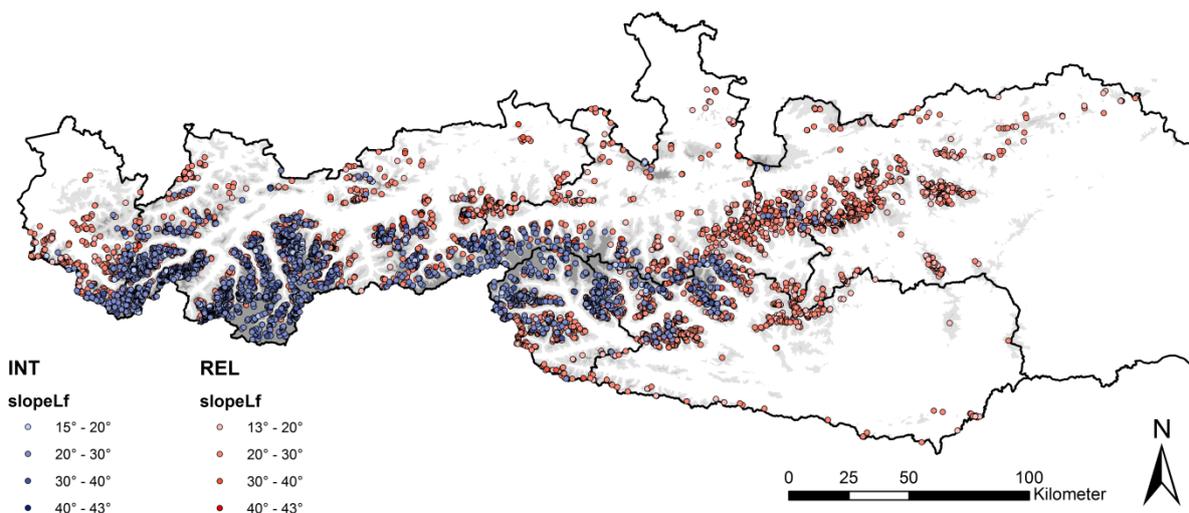


Abbildung 33: Regionale Verteilung der mittleren Neigung reliktscher (rot) und intakter (blau) Blockgletscher im Projektgebiet. Steile Blockgletscher treten insbesondere in Tirol häufig auf.

Abbildung 34 zeigt die Abhängigkeit der Blockgletscherneigung von Exposition und Aktivitätsgrad. Tendenziell sind südostexponierte Blockgletscher (Median 23,3° für intakte bzw. 21,4° für reliktsche) weniger stark geneigt als nordexponierte (Median 25,6° für intakte bzw. 23,0° für reliktsche Blockgletscher); dieser Trend ist für intakte Blockgletscher (Mediandifferenz 2,3°) etwas stärker ausgeprägt als für reliktsche (Mediandifferenz 1,6°). Deutlicher fällt der Unterschied zwischen insgesamt steileren intakten Blockgletschern (Median 24,8°) gegenüber flacheren reliktschen Blockgletschern (Median 22,2°) aus (Mediandifferenz 2,6°).

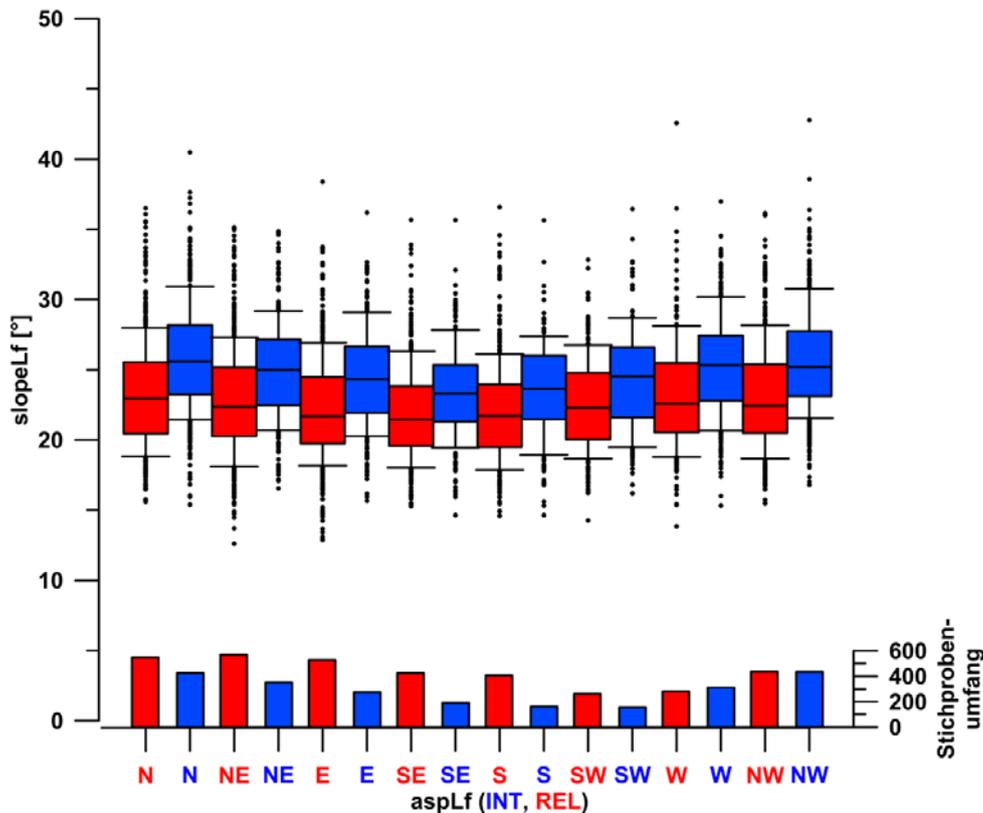


Abbildung 34: Abhängigkeit der mittleren Neigung von der Ausrichtung für reliktsche (rot) und intakte (blau) Blockgletscher. Die Ausrichtung ist jeweils in Gruppen zusammengefasst, deren interne Neigungsverteilung mittels Box-Whisker-Plots dargestellt wird. Die zugehörigen statistischen Kennzahlen sind im Anhang zusammengestellt.

4.2.1.4 Länge/Breite/Fläche

Abbildung 35 zeigt die Verteilung der maximalen Länge entlang der (ehemaligen) Fließrichtung (maxLenLf), maximalen Breite normal dazu (maxWidLf) und mittleren Breite (meanWidLf) aller Blockgletscher. Zusätzlich ist das Verhältnis maxLenLf/meanWidLf dargestellt. Die maximale Länge schwankt zwischen 17 m und 1908 m, ihr Median liegt bei 246 m. Die maximale Breite liegt zwischen 30 m und 2762 m, ihr Median bei 172 m. Die mittlere Breite liegt zwischen 24,7 m und 1542 m, ihr Median bei 126 m. Das Länge/Breiteverhältnis zeigt insgesamt eine Tendenz der Blockgletscher zu längsgestreckter Form: Der Median liegt bei 2,06, bei starker Streuung (Minimum: 0,10; Maximum: 11,35; unteres Quartil 1,22; oberes Quartil 3,05).

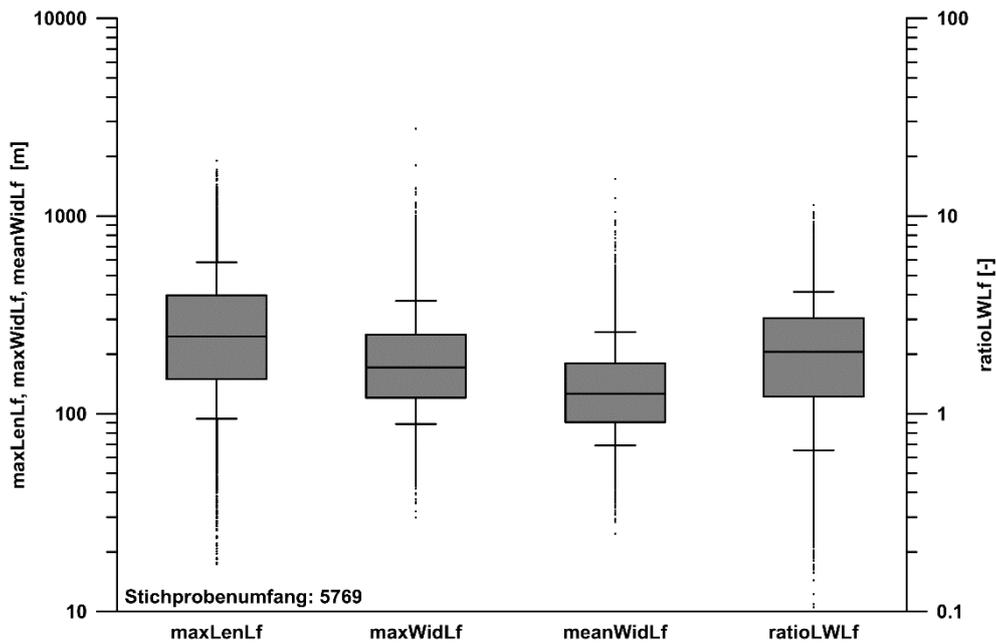


Abbildung 35: Verteilung maximaler (Fließ-)Länge (*maxLenLf*), maximaler Breite (*maxWidLf*) und mittlerer Breite (*meanWidLf*) sowie des Längen/Breiten Verhältnisses ($\text{ratioLWLF} = \text{maxLenLf}/\text{meanWidLf}$) aller Blockgletscher im Projektgebiet. Die zugehörigen statistischen Kennzahlen sind im Anhang zusammengestellt.

Die Verteilung der Blockgletscherfläche weist nur geringe Unterschiede zwischen den einzelnen Bundesländern auf (Abbildung 36). Der Median liegt bei 0,031 km² (bezogen auf das gesamte Projektgebiet). Deutlich wird die insgesamt kleinere Blockgletschergröße in Vorarlberg (Median: 0,019 km²). Nord- und Osttirol weisen gegenüber den übrigen Bundesländern einen geringeren Anteil von Blockgletschern mit weniger als 0,005 km² Fläche auf.

Die Blockgletscherfläche ist bei reliktschen wie intakten Blockgletschern ähnlich verteilt, wie Abbildung 37 veranschaulicht. Eine entsprechende Abhängigkeit von der Blockgletscherausrichtung ist ebenfalls nicht erkennbar. Dagegen zeigt Abbildung 38 die deutliche Dominanz großer Blockgletscher unterhalb von etwa 1500 m ü.A.

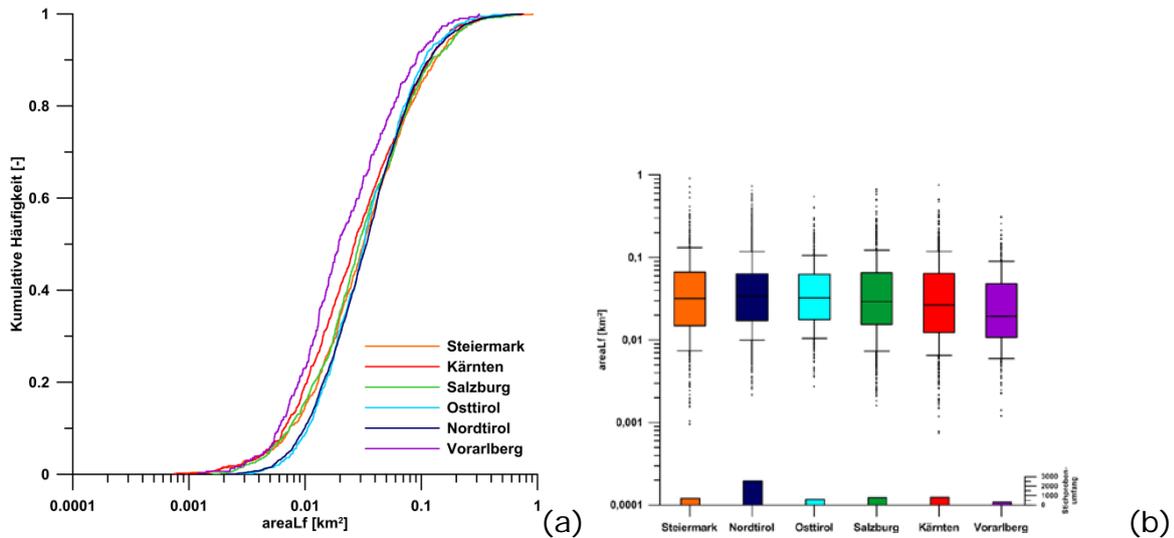


Abbildung 36: Vergleich der Flächenverteilung zwischen den einzelnen Bundesländern, dargestellt als kumulative Häufigkeit (a) sowie als Box-Whisker-Plot (b). Die zugehörigen statistischen Kennzahlen sind im Anhang zusammengestellt.

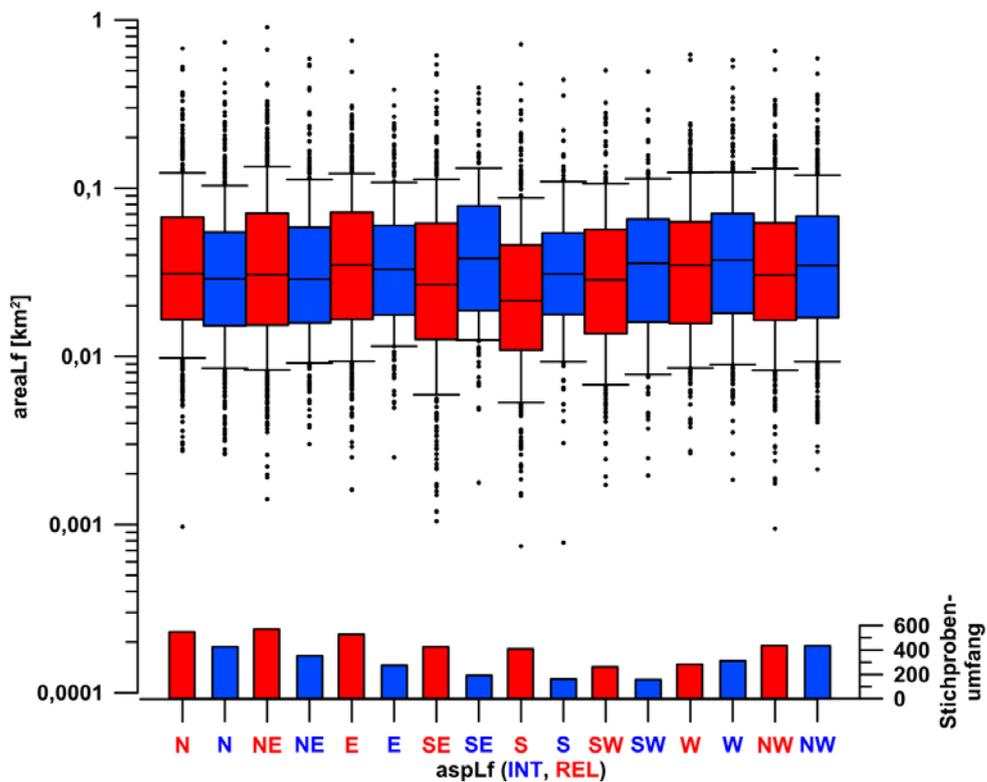


Abbildung 37: Zusammenhang zwischen Blockgletscherfläche und Ausrichtung für reliktsche (rot) und intakte (blau) Blockgletscher. Die Ausrichtung ist jeweils in Gruppen zusammengefasst, deren interne Flächenverteilung mittels Box-Whisker-Plots dargestellt wird. Die zugehörigen statistischen Kennzahlen sind im Anhang zusammengestellt.

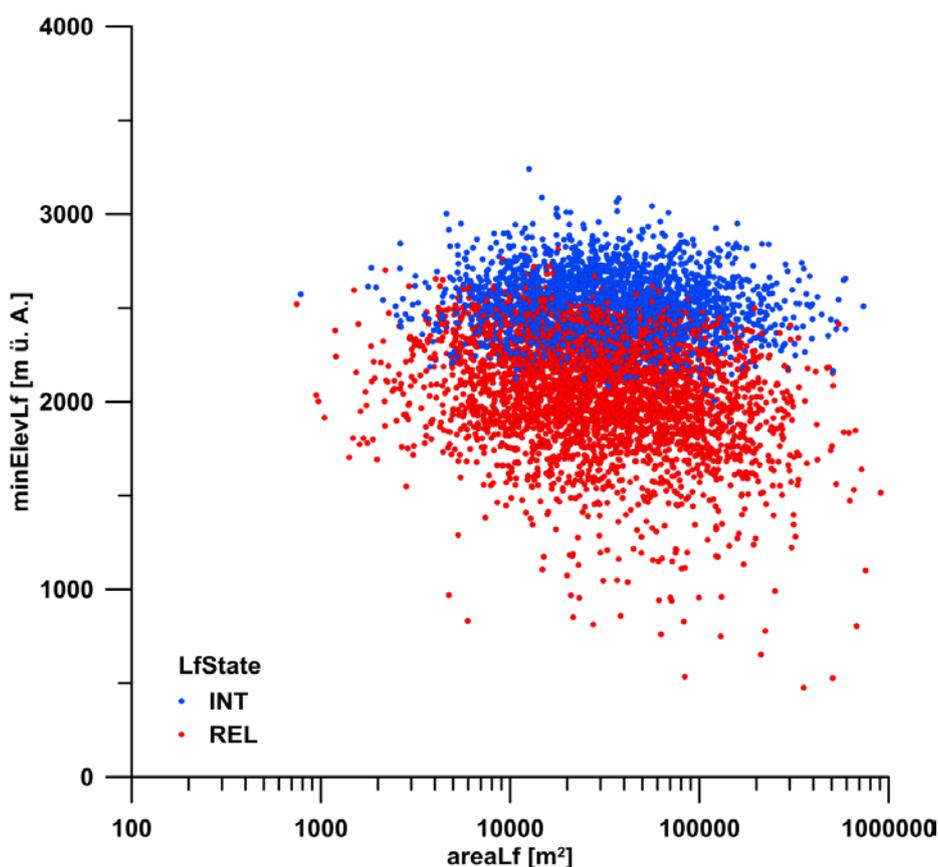


Abbildung 38: Zusammenhang zwischen Blockgletscherfläche und -höhe. Unter etwa 1500 m ü. A. dominieren große Blockgletscher.

4.2.2 Blockgletschereinzugsgebietsinventar

Eine Übersicht der Gesamtdaten des Blockgletschereinzugsgebietsinventars der Bundesländer Vorarlberg, Tirol, Salzburg, Steiermark und Kärnten findet sich in Tabelle 6. Die Gesamtfläche der Einzugsgebiete beträgt 1279 km². Die größte Gesamteinzugsgebietsfläche befindet sich mit 530 km² in Nordtirol, die kleinste in Vorarlberg (52,9 km²).

Tabelle 6: Übersicht des Blockgletschereinzugsgebietsinventars. Gesamtfläche der Einzugsgebiete (BG-EZG) sowie minimale (E-MIN), mittlere (E-MEDIAN; Median der mittleren Seehöhen) und maximale (E-MAX) Seehöhe pro Bundesland.

	Anzahl	Gesamtfläche BG-EZG	BG-EZG - Seehöhe [m ü.A.]		
	[-]	[km ²]	E-MIN	E-MEDIAN	E-MAX
Steiermark	713	201,6	652,0	2004,4	2742,4
Salzburg	789	190,0	527,9	2188,8	3146,3
Kärnten	816	190,0	475,5	2365,0	3181,0
Osttirol	609	114,5	1708,5	2597,3	3371,0
Nordtirol	2539	530,0	1447,3	2601,6	3549,4
Vorarlberg	303	52,9	831,7	2308,0	3100,5
Gesamt	5769	1279,0	475,5	2441,1	3549,4

4.2.2.1 Höhe

Mehrere Aspekte der Seehöhe der Blockgletschereinzugsgebiete wurden in der Attributtabelle erfasst (minEleCat, meanEleCat, maxEleCat). Die Form der kumulativen Höhenverteilung unterscheidet sich bei den einzelnen Attributen nicht wesentlich, lediglich der Schwerpunkt der Verteilung verschiebt sich ($\text{minEleCat} < \text{meanEleCat} < \text{maxEleCat}$). Im Folgenden wird daher stets die mittlere Höhe des Einzugsgebietes (meanEleCat) jedes Einzugsgebietes für Vergleiche herangezogen.

Der Vergleich der mittleren Seehöhe zwischen den Bundesländern zeigt ähnliche Trends wie die Verteilung der Seehöhen der zugehörigen Blockgletscher (Abbildung 39): Insgesamt liegen die Einzugsgebiete in Tirol am höchsten (Median: 2600 m ü.A.), in der Steiermark am niedrigsten (Median: 2004 m ü.A.). Die Mediandifferenz beträgt, ähnlich den Blockgletschern, etwa 600 m (vgl. Kapitel 4.2.1.2). Die übrigen Bundesländer nehmen Zwischenstellungen ein.

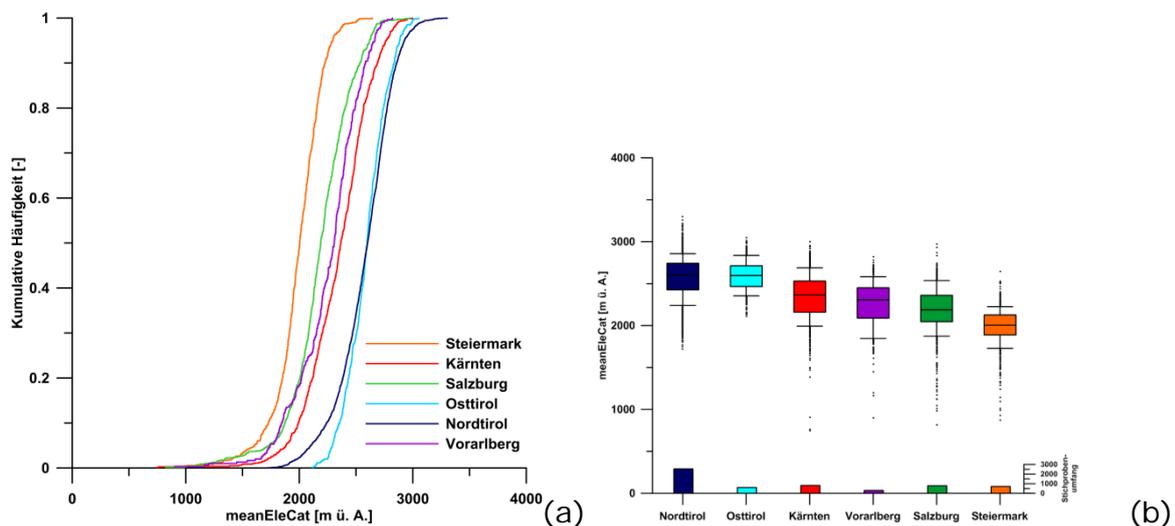


Abbildung 39: Verteilung der mittleren Seehöhe der Blockgletschereinzugsgebiete nach Bundesländern, dargestellt als kumulative Häufigkeit (a) bzw. als Box-Whisker-Plot (b). Die zugehörigen statistischen Kennzahlen sind im Anhang zusammengestellt.

4.2.2.2 Neigung

Die Verteilung der mittleren Einzugsgebietsneigung (Attribut: slopeCat) fällt in den einzelnen Bundesländern unterschiedlich aus (Abbildung 40). Tendenziell sind die Einzugsgebiete in Tirol am steilsten (Median $35,3^\circ$), in der Steiermark am flachsten (Median: $33,3^\circ$).

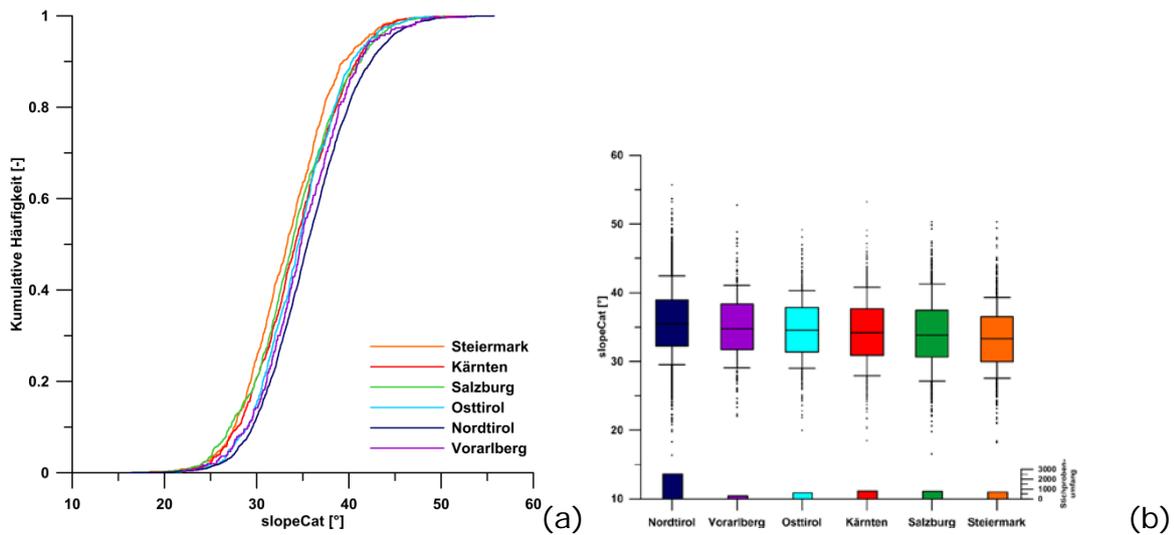


Abbildung 40: Verteilung der mittleren Neigung der Blockgletschereinzugsgebiete nach Bundesländern, dargestellt als kumulative Häufigkeit (a) bzw. als Box-Whisker-Plot (b). Die zugehörigen statistischen Kennzahlen sind im Anhang zusammengestellt.

4.2.2.3 Fläche

Die Verteilung der Einzugsgebietsfläche in den einzelnen Bundesländern zeigt (Abbildung 41), dass die Einzugsgebiete in der Steiermark tendenziell am größten sind (Median: 0,152 km²), in Vorarlberg dagegen am kleinsten (Median: 0,101 km²). Die großen Einzugsgebiete der Steiermark ergeben sich aus ihrer insgesamt niedrigeren Seehöhe. Das größte einzelne Einzugsgebiet liegt mit 8,34 km² dagegen in Kärnten.

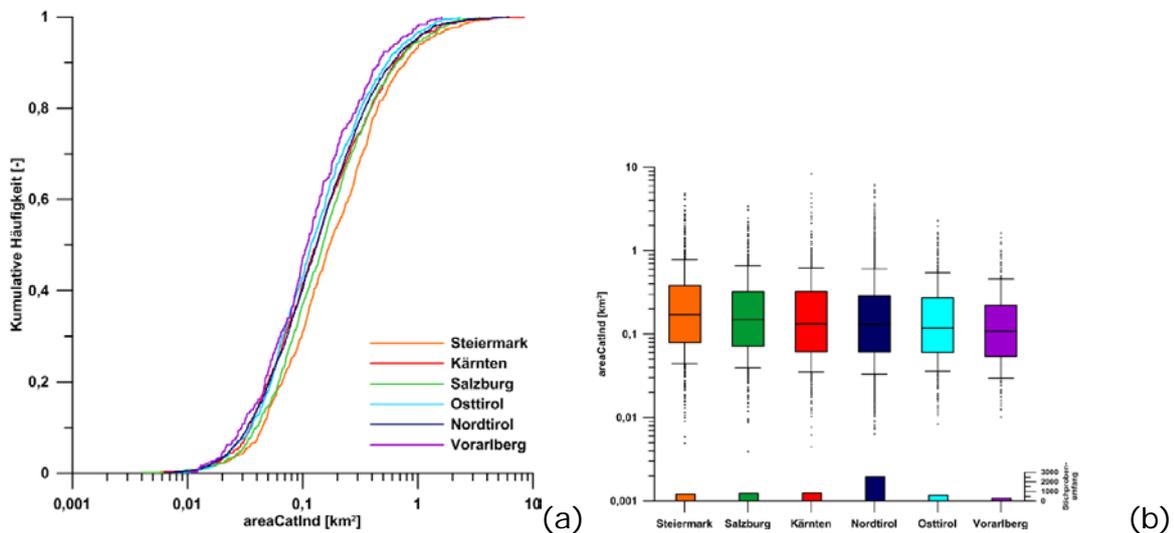


Abbildung 41: Verteilung der Einzugsgebietsfläche der Blockgletschereinzugsgebiete nach Bundesländern, dargestellt als kumulative Häufigkeit (a) bzw. als Box-Whisker-Plot (b). Die zugehörigen statistischen Kennzahlen sind im Anhang zusammengestellt.

Tabelle 7: Blockgletscherfläche und Einzugsgebietsfläche sowie deren Anteil an der Gesamtfläche über einer bestimmten Seehöhe nach Bundesländern.

Vorarlberg	Bundeslandsfläche [km ²]	Blockgletscherfläche [km ²]	Anteil [%]	Einzugsgebietsfläche [km ²]	Anteil [%]
Gesamtfläche	2603,2	11,4	0,4	52,9	2
Fläche >= 1500m ü. A.	1077,4	11,2	1	52,5	4,9
Fläche >= 2000m ü. A.	415,1	6,8	1,6	38,3	9,2
Fläche >= 2500m ü. A.	53,8	0,4	0,8	7,7	14,3
Fläche >= 3000m ü. A.	1,6	0	0	0	1,7
Salzburg					
Gesamtfläche	7161	43,6	0,6	190	2,7
Fläche >= 1500m ü. A.	3019,8	40,7	1,3	182,1	6
Fläche >= 2000m ü. A.	1235	25,3	2	136	11
Fläche >= 2500m ü. A.	259,2	3,2	1,2	19,3	7,4
Fläche >= 3000m ü. A.	23,6	0	0	0,1	0,3
Osttirol					
Gesamtfläche	2021,8	30,7	1,5	114,5	5,7
Fläche >= 1500m ü. A.	1600,3	30,7	1,9	114,5	7,2
Fläche >= 2000m ü. A.	1069,7	30,5	2,8	114	10,7
Fläche >= 2500m ü. A.	418,2	15,7	3,8	71,8	17,2
Fläche >= 3000m ü. A.	45,4	0,1	0,1	2,8	6,3
Nordtirol					
Gesamtfläche	10629,9	136,5	1,3	530	5
Fläche >= 1500m ü. A.	6115	136,5	2,2	530	8,7
Fläche >= 2000m ü. A.	3442,7	128,4	3,7	508,9	14,8
Fläche >= 2500m ü. A.	1322,4	73,4	5,5	328,3	24,8
Fläche >= 3000m ü. A.	226,6	1,1	0,5	26,9	11,9
Kärnten					
Gesamtfläche	9543,9	40,5	0,4	190	2
Fläche >= 1500m ü. A.	2693,8	38,4	1,4	185,7	6,9
Fläche >= 2000m ü. A.	1040,4	29,2	2,8	153,7	14,8
Fläche >= 2500m ü. A.	273,9	5,4	2	45,4	16,6
Fläche >= 3000m ü. A.	25	0	0	0,5	2,1
Steiermark					
Gesamtfläche	16419,2	40,3	0,2	201,6	1,2
Fläche >= 1500m ü. A.	2505,5	37	1,5	190,8	7,6
Fläche >= 2000m ü. A.	375,3	8,5	2,3	85,3	22,7
Fläche >= 2500m ü. A.	4,2	0	0,4	0,4	10,4
Fläche >= 3000m ü. A.	0	0	0	0	0

Da Blockgletscher im Wesentlichen auf alpine Regionen beschränkt sind, erschließt sich ihre hydrologische Bedeutung aus dem Vergleich ihrer Einzugsgebietsfläche mit der Gesamtfläche des alpinen Geländes in jedem Bundesland (Tabelle 7, Abbildung 42). Der Anteil der Einzugsgebietsfläche an der Gesamtfläche zeigt den Einfluss von Blockgletschern auf. Insbesondere in Nordtirol (23,7 %), Osttirol

(15,9 %) und Kärnten (16,6 %) entwässert ein bedeutender Anteil der Fläche ≥ 2500 m ü.A. über Blockgletscher. Um einen Eindruck von der Ausdehnung dieser von Blockgletschern geprägten Bereiche zu gewinnen, ist dem Anteil jeweils die absolute Fläche oberhalb der entsprechenden Seehöhe in km² gegenübergestellt. Die tatsächliche Bedeutung erschließt sich bei Vergleich des Anteils mit dieser Fläche: Während der relative Anteil in Nordtirol (14,3 %) bei Betrachtung der Fläche ≥ 2000 m ü.A. gegenüber etwa der Steiermark (22,7 %) kleiner ausfällt, zeigt ein Vergleich der absoluten Fläche ≥ 2000 m ü.A. (Tirol: 3552,6 km²; Steiermark: 375,3 km²) seine eigentliche Bedeutung.

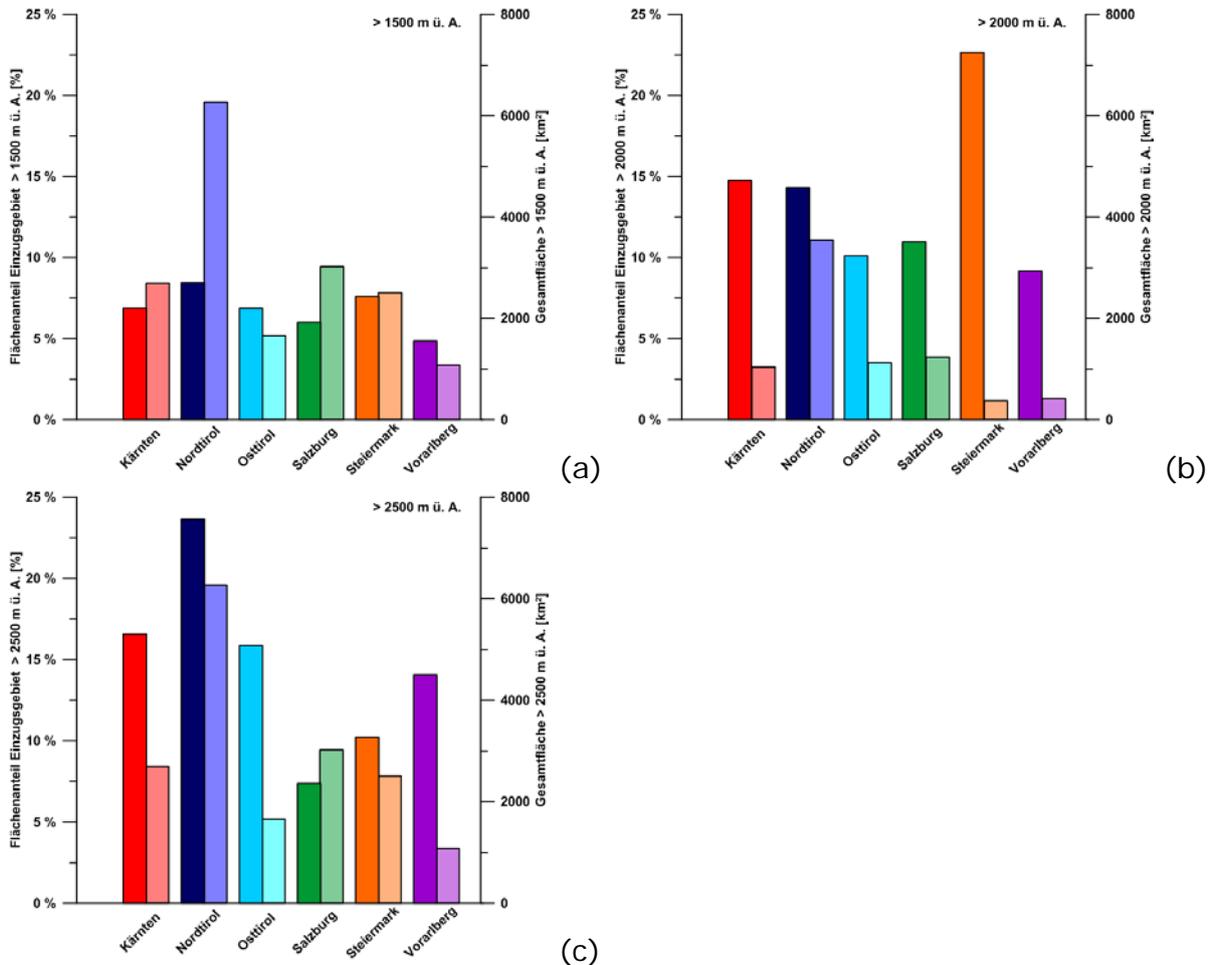


Abbildung 42: Gesamtfläche (jeweils blasse rechte Säule) sowie Anteil der Einzugsgebietsfläche an der Gesamtfläche (dunkle, linke Säule) über 1500 m ü. A. (a), über 2000 m ü. A. (b) bzw. über 2500 m ü. A. (c) pro Bundesland. Im Unterschied zu den übrigen Auswertungen wurde in diesem Fall auf das Attribut `areaCat` zurückgegriffen (anstatt `areaCatInd`), um die gesamte Blockgletschereinzugsgebietsfläche nicht zu überschätzen.

Abbildung 43 stellt der Blockgletscherfläche die zugehörige Einzugsgebietsfläche des Blockgletschers gegenüber. In der Steiermark stehen relativ kleine Blockgletscher tendenziell relativ großen Einzugsgebieten gegenüber (Median 1:5), in Tirol (ähnlich für Ost- und Nordtirol) sind relativ große Blockgletscher

kleinen Einzugsgebieten gegenüber gestellt (Median 1:3,5). Insbesondere ist die hohe Streuung zu beachten (Minimum 1:138).

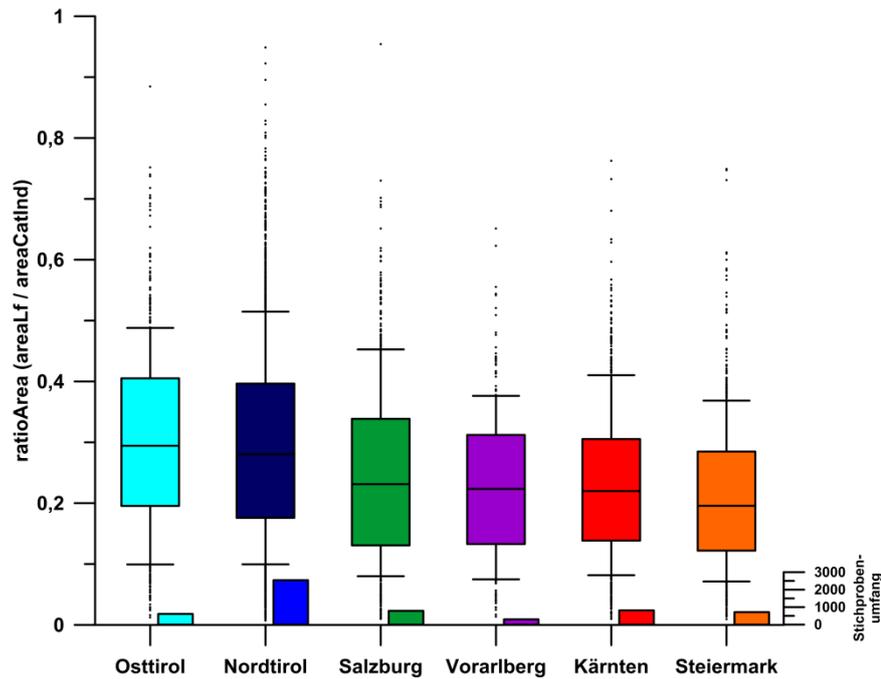


Abbildung 43: Verhältnis von Blockgletscherfläche zu Blockgletschereinzugsgebietsfläche, pro Bundesland dargestellt als Box-Whisker-Plot. Die zugehörigen Kennzahlen sind im Anhang zusammengestellt.

5 Wasserwirtschaftliche Aspekte von Blockgletschern

5.1 Blockgletscherquellen - Erhebung

Um eine möglicherweise großflächig, über den österreichischen Ostalpenraum verteilte Schwermetallbelastung an Blockgletscherquellen feststellen zu können, wurden Gebiete auf Basis der erarbeiteten/ausgewiesenen Blockgletscherinventare ausgewählt, in denen eine hydrogeologische Kartierung durchgeführt wurde. Der Schwerpunkt dieser Kartierung lag in der flächendeckenden Erhebung und Ausweisung der an Blockgletscher gebundenen Quellen. Eine Übersicht der Kenndaten der Kartierungsgebiete der jeweiligen Bundesländer ist Tabelle 8 zu entnehmen. Die Lage der Gebiete für Vorarlberg, Tirol, Salzburg und Steiermark kann den Abbildungen 44 bis 48 entnommen werden. Für das Bundesland Kärnten wurde eine einmalige Beprobung im Jahr 2017 an vier Blockgletscherquellen durchgeführt. Zusätzlich wurden im Jahr 2018 ergänzende Beprobungen an weiteren Quellen der Bundesländer Steiermark, Salzburg und Tirol einmalig durchgeführt, um eine räumliche Verdichtung zu erreichen.

Tabelle 8: Übersicht der im Zuge der Quellkartierung erhobenen Gebiete für die Bundesländer Vorarlberg, Tirol, Salzburg, (Kärnten) und Steiermark. # Gebietsnummer nach den Abbildungen 44-48; GK = Grundwasserkörper; BL = Bundesland; EJ = Erhebungsjahr; A = Fläche in km²; X = wenn gezielt Blockgletscherquellen beprobt wurden und eine Kartierungsgebietsfläche nicht zuweisbar ist.

#	Gebietsname	BL	EJ	A [km ²]	GK	Monitoring - Quellen
Steiermark						
1	Triebental; Hochreichart	Stmk	2016	19.3	GK 100052 GK 100116	6
2	Bösenstein; Rottenmanner Hütte	Stmk	2016	10.9	GK 100052	4
3	Zirbitzkogel	Stmk	2016	29.0	GK 1000120	2
4	Etrachsee, Sölkpass	Stmk	2016- 2018	78.0+ X	GK 100052 GK 100116	7 + 3
5	Haus, Untertal	Stmk	2016- 2018	19.7 + X	GK 100052	4 + 7
6	Turrach	Stmk	2016	21.8	GK 100184	5
Salzburg						
1	Obertauern (inkl. Tweng)	Slzbg	2016	33.9	GK 100055 GK 100185	9
2	N Tamsweg (Preber)	Slzbg	2016/20 18	7.4 + X	GK 100185	2 + 5
3	NW Turrach (Nockberge)	Slzbg	2016	8.5	GK 100185	5

4	Badgastein	Slzbg	2016/2018	5.0 + X	GK 100010	5
5	Rauris + Fuschertörl	Slzbg	2016/2017	19.7	GK 100010	4
6	Felber- und Stubachtal	Slzbg	2016/2018	11.9	GK 100010	1
7	Hollersbachtal	Slzbg	2016/2018	3.2 + X	GK 100010	2
8	Krimml	Slzbg	2017/2018	5.2 + X	GK 100010	2 + 5
9	Hinterglemm	Slzbg	2017	9.1	GK 100010	5
10	Muhr	Slzbg	2018	X	GK 100185	5
11	Großarl	Slzbg	2018	X	GK 100010	1
Tirol						
1	Schobergruppe	Tirol	2016/2018	9.1 + X	GK 100186	16 + 3
2	Tuxer Hauptkamm	Tirol	2016	14.2	GK 100010	8
3	Ölgrube & Krummgampen	Tirol	2016	13.4	GK 100010	8
4	Lareintal	Tirol	2016	15.4	GK 100010	10
5	Sölden (Ötztaler Alpen)	Tirol	2018	X	GK 100010	9
6	Verwall Gruppe	Tirol	2018	X	GK 100010	3
7	Stubai Alpen	Tirol	2018	X	GK 100010	5
8	Karwendel	Tirol	2018	X	GK 100009	3
9	Lasörlinggruppe	Tirol	2018	X	GK 100186	4
Kärnten						
1	Schobergruppe	Kntn	2017	X	GK 100186	2 + 1 (Grenze OT)
2	Ankogelgruppe	Kntn	2017	X	GK 100186	1
Vorarlberg						
1	Silvretta	Vrlbg	2018	17.7	GK 100152	10
2	Rätikon	Vrlbg	2018	14.6	GK 100152 GK 100154	4
3	Verwall Gruppe	Vrlbg	2018	8.1	GK 100152	6
4	Lechquellen Gebirge	Vrlbg	2018	32.4	GK 100154	5

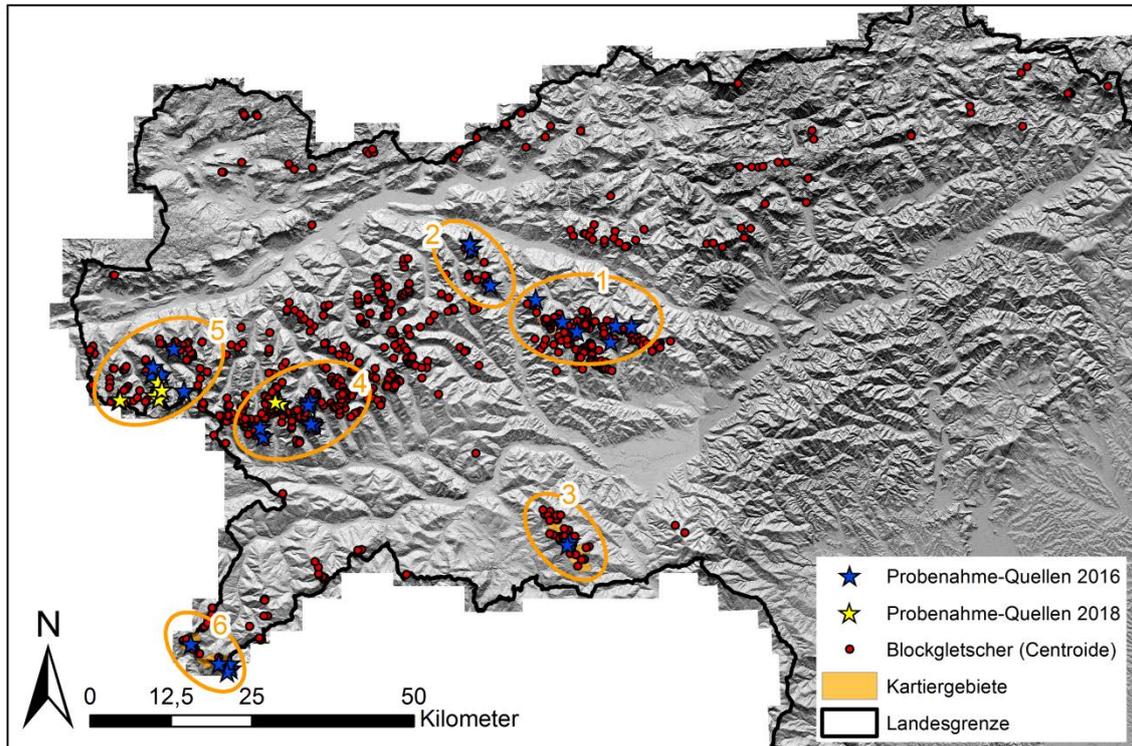


Abbildung 44: Ausgewiesene Gebiete des Bundeslandes Steiermark, in denen eine flächendeckende Erhebung der Blockgletscherquellen erfolgte sowie eine Verdichtung in den Gebieten 4 und 5 im Jahr 2018.

Für die Steiermark wurden im Sommer 2016 insgesamt ca. 180 km² in den Gebieten 1 bis 6 flächendeckend in Bezug auf Blockgletscherquellen erhoben (Tabelle 8). Auf Basis der Kartierung erfolgte eine Auswahl von 28 Quellen (Abbildung 44), die 2018 durch eine einmalige Beprobung an 10 weiteren Quellen ergänzt wurde.

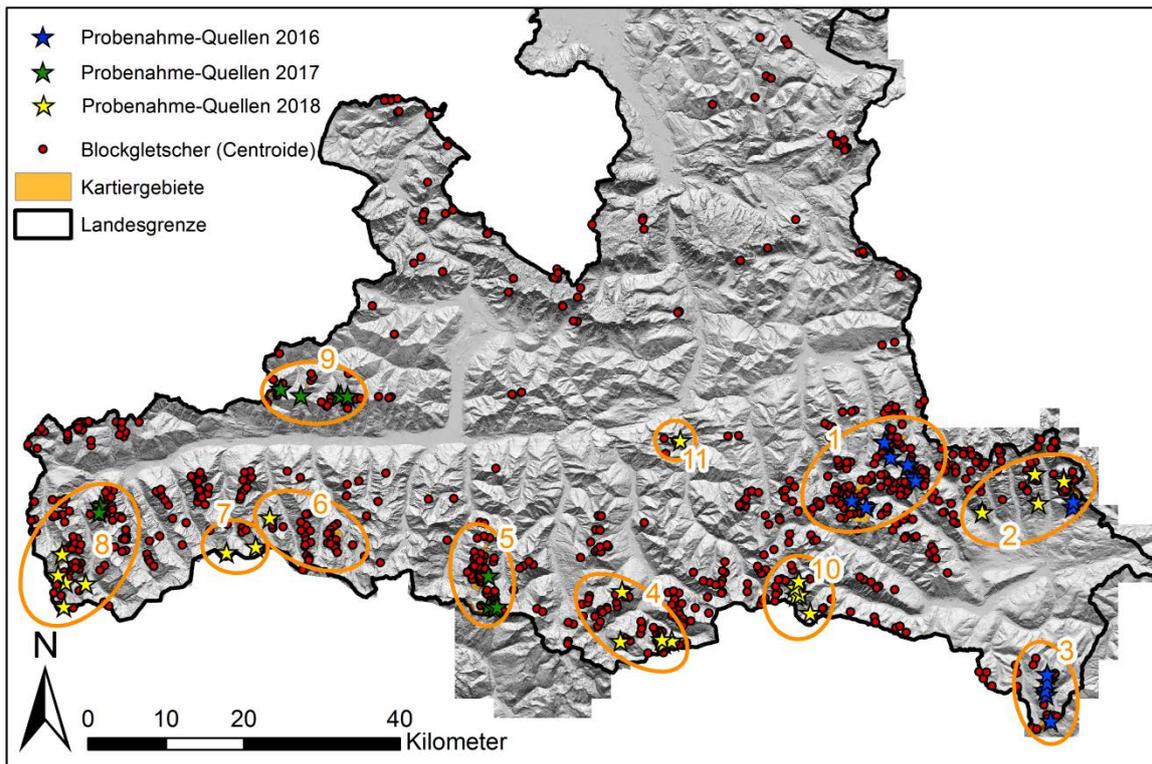


Abbildung 45: Ausgewiesene Gebiete des Bundeslandes Salzburg, in denen eine flächendeckende Erhebung der Blockgletscherquellen erfolgte sowie eine Verdichtung in den Gebieten 2, 4, 6, 7, 8, 10 und 11 im Jahr 2018.

Die flächendeckende Erhebung der Blockgletscherquellen der ausgewiesenen Gebiete in Salzburg (Abbildung 45) erfolgte 2016 und witterungsbedingt auch noch im Sommer 2017 und umfasst ca. 104 km². Des Weiteren wurden 2018 zur räumlichen Verdichtung noch in den Gebieten 2, 4, 6, 7, 8, 10 und 11 gezielte Probenahmen durchgeführt. Somit konnte Salzburg räumlich sehr gut abgedeckt werden.

Die Erhebung und Auswahl der Blockgletscherquellen innerhalb Tirols (Abbildung 46) erfolgte auf Basis der Vorarbeiten von Krainer & Ribis (2012) sowie weiterer Kartierungen außerhalb der bereits bekannten Gebiete, in denen erhöhte Schwermetallbelastungen bekannt waren (siehe rote und violette Rauten-Symbole in Abbildung 46; Ribis, 2017). Es wurden für Tirol ab 2016 die Gebiete 1 (Osttirol) und 2 bis 4 (Nordtirol) für das Monitoring ausgewiesen und mehrfach beprobt. Zur Verdichtung wurde im Jahr 2018 eine zusätzliche Probenahme in den Gebieten 5 bis 9 durchgeführt sowie 3 weitere Quellen in der Schobergruppe (Gebiet 1) beprobt.

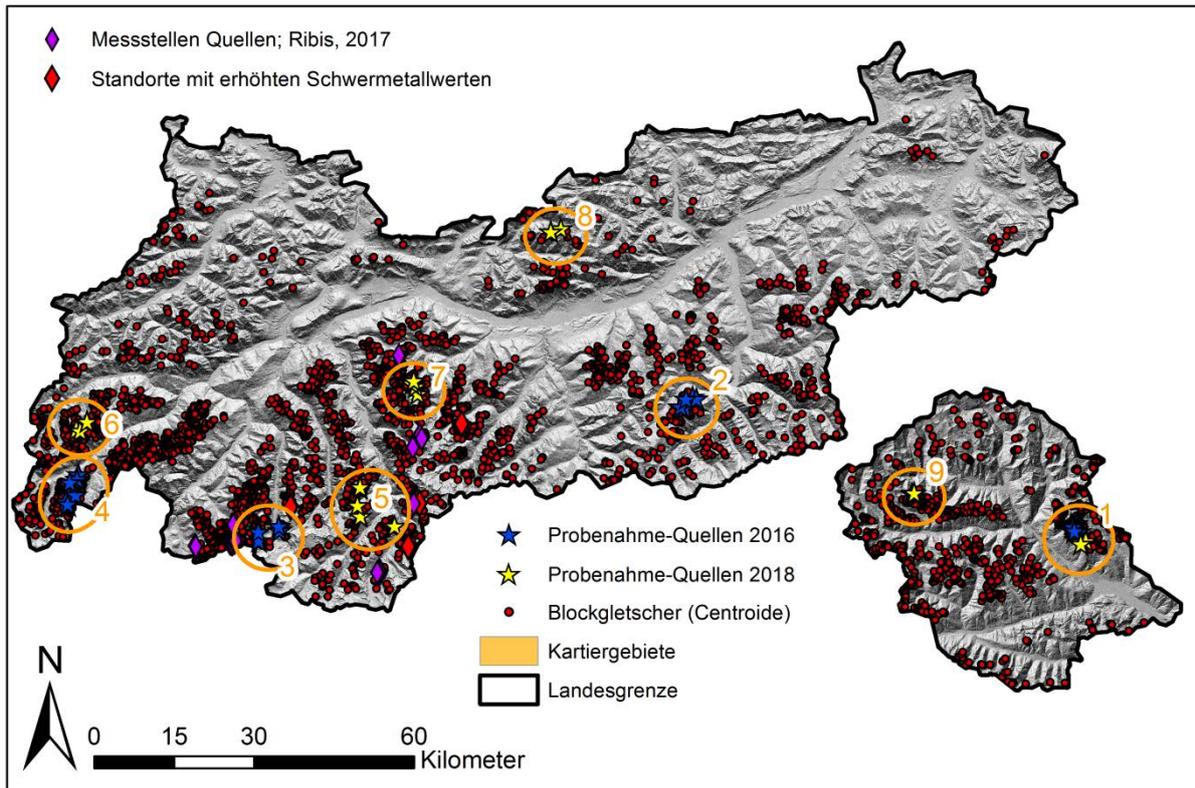


Abbildung 46: Ausgewiesene Gebiete des Bundeslandes Tirol, in denen eine flächendeckende Erhebung der Blockgletscherquellen erfolgte sowie eine Verdichtung in den Gebieten 1 und 5 bis 9 im Jahr 2018.

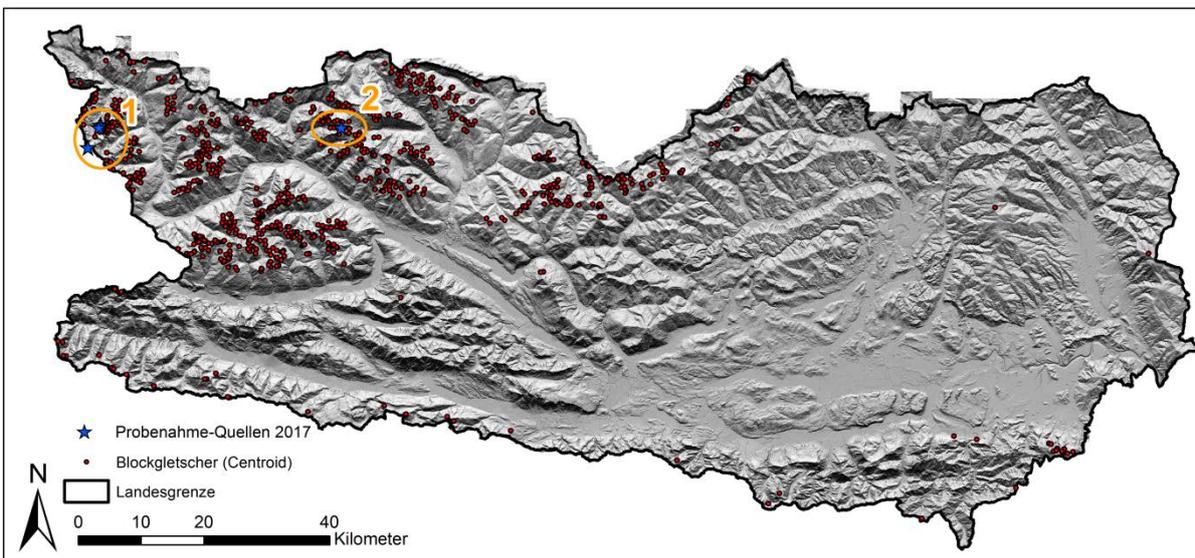


Abbildung 47: Ausgewiesene Gebiete des Bundeslandes Kärnten, in denen einmalig vier Blockgletscherquellen beprobt wurden.

In Kärnten erfolgte eine einmalige Probenahme in der Schober- bzw. Ankogelgruppe, durchgeführt an vier Blockgletscherquellen (Abbildung 47). Diese Probenahme entsprach aber nicht den Aufnahmekriterien der anderen Bundesländer (Auswahl anhand des Inventar, Selektion der Quellen), sondern es

wurde genutzt, dass in diesem Bereich andere Permafrost bezogene Untersuchungen stattfanden (Lieb et al., 2016). Aufgrund dieser Einschränkungen wurden die Daten auch nicht in die H2O-Fachdatenbank integriert.

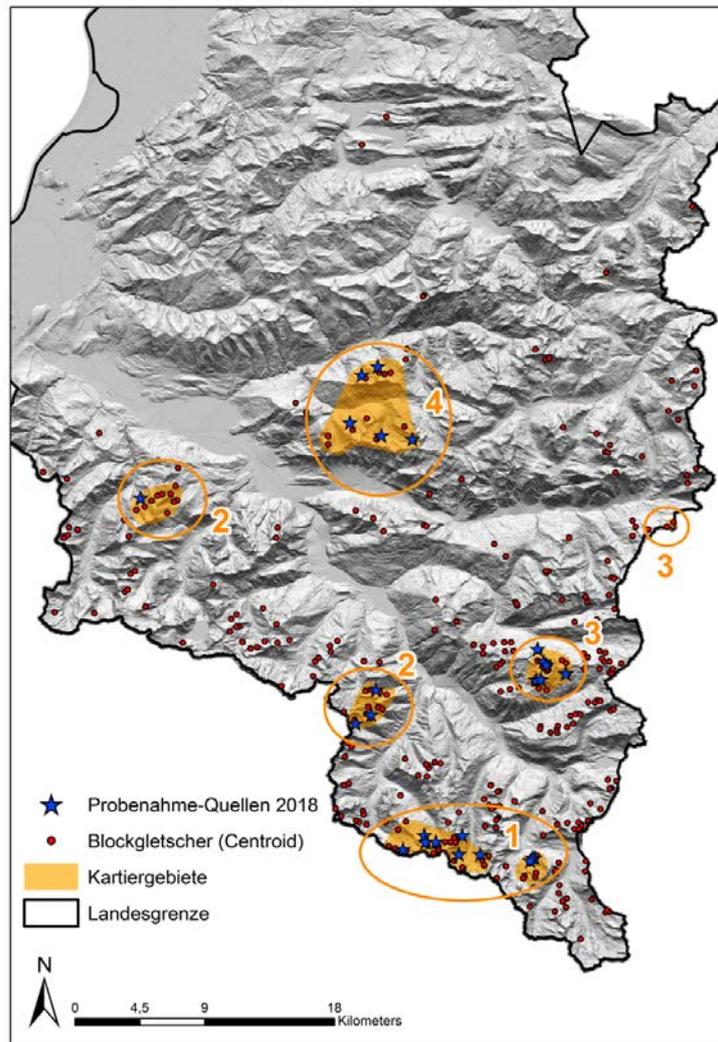


Abbildung 48: Ausgewiesene Gebiete des Bundeslandes Vorarlberg, in denen eine flächendeckende Erhebung der Blockgletscherquellen erfolgte.

Für das Bundesland Vorarlberg wurde das Blockgletscherinventar als auch die flächendeckenden Quellkartierungen und anschließende Beprobung relevanter Blockgletscherquellen im Jahr 2018 durchgeführt (Abbildung 48). Daher liegen für Vorarlberg nur einmalige Probenahmen vor. Diese sind aber als wichtige Abgrenzung in westlicher Richtung der beobachteten Belastungen in Nordtirol anzusehen.

Neben den Vorortparameter Schüttung, Wassertemperatur und elektrische Leitfähigkeit wurden einige weitere wesentliche Parameter einer Ersterhebung sowie die Stammdaten von Quellen aufgenommen, die auf den Ausführungen des Probenahmehandbuchs „Chemie Wasser (Kapitel Grundwasser)“ und der darin angeführten Codierung (Humer & Stadler, 2015) beruhen. Die Daten wurden in

weiterer Folge mit den hydrochemischen Analyseergebnissen in Abstimmung mit den Kolleginnen und Kollegen des Umweltbundesamts in die H2O-Fachdatenbank (bundesweite Erhebung der Wassergüte in Österreich) eingebunden. Somit sind nun die Laborergebnisse der hydrochemischen Analysen der jeweiligen Bundesländer direkt in der H2O-Fachdatenbank (<https://www.bmnt.gv.at/wasser/wisa/daten.html>) abrufbar und zur weiteren Verwendung bereitgestellt. Eine Auswertung dieser Daten erfolgt im nachstehenden Kapitel.

5.2 Hydrogeologische Untersuchungsmethoden

5.2.1 Hydrochemie

Die hydrochemischen Untersuchungen umfassen entsprechend der Gewässerzustandsüberwachungsverordnung (GZÜV 2006 i.d.g.F.) den Parameterblock 1 für Grundwasser bestehend aus 1.1 Probenahme und Vor-Ort-Parameter und 1.2 Chemisch-analytische Parameter (Tabelle 9). Im Besonderen wurde aber auch der Parameterblock 2.1 – Metalle gelöst (Tabelle 10) herangezogen, um die Schwermetallbelastungen erfassen zu können.

Tabelle 9: Parameterliste der „1.1 Probenahme und Vor-Ort-Parameter“ sowie der „1.2 chemisch-analytischen Parameter“ des Parameterblocks 1 – „Chemie Grundwasser“ der GZÜV (2006). MBG = Mindestbestimmungsgrenze.

1.1 Probenahme und Vor-Ort-Parameter

Parameter	Verfahren	Einheit	MBG
Abstich	-	m	-
Förderstrom bei Probenahme	-	l/s	-
Gesamtfördervolumen	-	l/s	-
Quellschüttung	-	l/s	-
organoleptische Feststellung von:			
Färbung	sensorisch	-	-
Trübung	sensorisch	-	-
Geruch	sensorisch	-	-
Messung von:			
Wassertemperatur	ÖN M 6616 - Mrz. 1994	°C	-
pH-Wert	DIN 38404 C5 - Jul. 2009	-	-
elektr. Leitf. (bei 20°C)	ÖN EN 27888 - Dez. 1993	µS/cm	-
Sauerstoffgehalt	ÖN EN 25814 - Jun. 1993	mg O2/l	0.2

1.2 chemisch-analytische Parameter

Parameter	Verfahren	Einheit	MBG
Gesamthärte	ÖN M 6268 - Jan. 2004	°dH	1
Karbonathärte	ÖN EN ISO 9963 - Feb. 1996	°dH	1
Hydrogencarbonat	ÖN EN ISO 9963 - Feb. 1996	mg/l	3

Calcium	ÖN EN ISO 11885 - Nov. 2009	mg/l	3
Magnesium	ÖN EN ISO 11885 - Nov. 2009	mg/l	1
Natrium	ÖN EN ISO 11885 - Nov. 2009	mg/l	1
Kalium	ÖN EN ISO 11885 - Nov. 2009	mg/l	2
Nitrat	ÖN EN ISO 10304-1 - Aug. 2009	mg NO ₃ /l	1
Nitrit	ÖN EN 26777 - Mai 1993	mg NO ₂ /l	0.01
Ammonium	ÖN ISO 7150-1 - Dez. 1987	mg NH ₄ /l	0.01
Chlorid	ÖN EN ISO 10304-1 - Aug. 2009	mg/l	1
Sulfat	ÖN EN ISO 10304-1 - Aug. 2009	mg SO ₄ /l	1
Orthophosphat	ÖN EN ISO 6878 - Sep. 2004	mg PO ₄ /l	0.02
Bor	ÖN EN ISO 11885 - Nov. 2009	mg/l	0.02
DOC (ber. als C)	ÖN EN 1484 - Aug. 1997	mg C/l	0.5
Eisen, gelöst	ÖN EN ISO 11885 - Nov. 2009	mg/l	0.01
Mangan, gelöst	ÖN EN ISO 11885 - Nov. 2009	mg/l	0.01

Tabelle 10: Parameterliste der „2.1 Metalle gelöst“ des Parameterblocks 2 – „Chemie Grundwasser“ der GZÜV (2006). MBG = Mindestbestimmungsgrenze.

2.1 Metalle gelöst

Parameter	Verfahren	Einheit	MBG
Aluminium	ÖN EN ISO 17294-2 - Feb. 2005	µg/l	10
Arsen	ÖN EN ISO 17294-2 - Feb. 2005	µg/l	1
Blei	ÖN EN ISO 17294-2 - Feb. 2005	µg/l	1
Cadmium	ÖN EN ISO 17294-2 - Feb. 2005	µg/l	0.2
Chrom	ÖN EN ISO 17294-2 - Feb. 2005	µg/l	1
Kupfer	ÖN EN ISO 17294-2 - Feb. 2005	µg/l	1
Nickel	ÖN EN ISO 17294-2 - Feb. 2005	µg/l	1
Quecksilber	ÖN EN 12338 - Okt. 1998	µg/l	0.1
Zink	ÖN EN ISO 17294-2 - Feb. 2005	µg/l	5

Zusätzlich wurde der Parameter Uran ergänzt, da dieser in parallel laufenden Sondermessprogrammen untersucht wurde.

Die Proben wurden hydrochemisch für die jeweiligen Bundesländer in den Landeslabors von Tirol, Salzburg, Steiermark und Kärnten analysiert sowie im Labor „Kalb Analytik“ in Vorarlberg.

Die Probenahmen erfolgten in den ersten beiden Projektjahren vierteljährlich, die Abbildung 49 zeigt Beispiele der Probenahmegebilde und gibt Eindrücke der Probenahmen in Abhängigkeit der jahreszeitlichen Herausforderungen.



(a)



(b)



(c)

Abbildung 49: (a) Ein Beispiel der Probengebinde für die Steiermark (Foto: T. Wagner); Eindrücke bei der Probenahme mit den jahreszeitlichen Herausforderungen: (b) Probenahme in der Nähe des Schwarzsees bei Sölden, Tirol (Foto: K. Krainer) und (c) Kettentörl, Ingeringtal Steiermark (Foto: G. Winkler).

5.2.2 Isotope

Untersuchungen im Vorfeld des Projektes haben gezeigt, dass Quellen aus intakten Blockgletschern saisonal als auch im Tagesverlauf starke Schüttungsschwankungen aufweisen (z.B. Krainer et al., 2007). Des Weiteren wird die Schüttung von mehreren Abflusskomponenten gebildet, die auf Niederschlag, Schneeschmelze, Grundwasser und Schmelzwasser von im Einzugsgebiet befindlichen Kargletschern und Permafrosteises zurück zu führen sind (z. B. Krainer et al., 2007) und deren Anteil an der Gesamtschüttung zeitlich variieren kann. Mit Hilfe der stabilen Isotope $\delta^{18}\text{O}$ und $\delta^2\text{H}$ können die unterschiedlichen Abflusskomponenten charakterisiert werden und in weiterer Folge deren zeitlich variabler Anteil an der Gesamtschüttung berechnet werden.

Es wurden an ausgewählten Quellen der Gebiete Hochschober, Ölgrube und Bergli/Lareintal zu den vierteljährlichen Probenahmen zusätzlich im Sommer/Herbst 2017 Probenahmen mit hoher zeitlicher Auflösung (stündlich bis 48 Std. Rhythmus) durchgeführt. Neben den Quellen wurden auch Proben des Niederschlags genommen und pro Gebiet ein Schneeprofil im März/April 2017 erfasst.

Die Laboranalysen der stabilen Isotope $\delta^{18}\text{O}$ und $\delta^2\text{H}$ wurden im Labor der JR-AquaConSol (Leitung: Dipl.Chem. Dr. Albrecht Leis) durchgeführt.

5.2.3 Hydrographanalyse

Untersuchungen der Quellschüttung von reliktschen Blockgletschern zeigten, dass sie der Entwässerungsdynamik von Karstquellen ähneln und Schüttungsquotienten ($Q_{\text{max}}/Q_{\text{min}}$) zwischen 20 und 100 aufweisen (Gödel, 1993; Untersweg & Schwendt, 1995, 1996, Winkler et al., 2016a,b). Derartige Schüttungsquotienten können als hochvariabel klassifiziert werden (Kresic & Stevanovic, 2010). Die Schüttungsquotienten von Quellen aus Kluftgrundwasser- oder Porengrundwasserleitern wie bspw. aus der Verwitterungszone in kristallinen Festgesteinen sind deutlich geringer (z.B. Richter & Lillich, 1975; Untersweg & Schwendt, 1995; Hölting & Coldewey, 2013). Sie sind aber auch von den hydrometeorologischen Einflüssen beeinflusst und können somit nur eingeschränkt für die Interpretation der Aquifereigenschaften herangezogen werden.

Auslaufkurven von Quellen (Hydrographen) hingegen spiegeln die Aquifereigenschaften besser wider, da sie von kurzzeitigen Änderungen der Grundwasserneubildung weitestgehend unbeeinflusst sind (z.B. Kresic & Bonacci, 2010). Daher wurden analytischen Lösungen für Hydrographanalysen herangezogen, die für komplexe Entwässerungssysteme wie Karstaquifere entwickelt wurden. In Anlehnung an die Ergebnisse von reliktschen Blockgletschern (Winkler et al., 2016b) und den Ergebnissen eines inaktiven Blockgletschers in Kanada (Harrington et al., 2018) wurde ein Ansatz gewählt, bei dem das Auslaufverhalten eines homogenen Aquifers einem exponentiellen Leerlaufen des Grundwasserspeichers angenähert wird (Maillet, 1905):

$$Q(t) = Q_0 e^{-\alpha t} \quad (1)$$

wobei $Q(t)$ [m^3/s] die Schüttungsmenge zur Zeit t [d], Q_0 [m^3/s] die Anfangsschüttung zur Zeit $t=0$ und α [$1/\text{d}$] den Auslaufkoeffizienten darstellt. Eine Überlagerung mehrerer exponentieller Leerlaufkurven (gerade Linien in halblogarithmischen Darstellungen der Schüttung über die Zeit) erlaubt eine Differenzierung in mehrere Grundwasserkomponenten (Winkler et al., 2016a).

In einem weiteren Schritt wurde eine Schwellenwertanalyse durchgeführt. Basierend auf der „fill and spill hypothesis“ von Tromp-van Meervels & McDonnell (2006) wird hier davon ausgegangen, dass die Reaktion der Quellschüttung von der Menge des Niederschlags und von der Topographie der Aquiferbasis abhängt. Mulden oder größere Vertiefungen der Basis können nach längeren Trockenperioden Speicher darstellen, die erst gefüllt werden müssen, bevor eine Reaktion der Quellschüttung auf ein Niederschlagsereignis erkennbar ist. Die Trennung zwischen Niederschlagswasseranteil und Basisabfluss eines Hydrographen wurde als vereinfachte Näherung nach der „constant-discharge-method“ nach McCuen (2005) bestimmt. Hierbei wurde die Schüttungsmenge vor dem Anstieg als Basis gewählt und die Wassermenge darüber als „Niederschlagswasseranteil“ angenommen (Abbildung 50). Diese Wassermenge wurde dann der Niederschlagsmenge gegenübergestellt.

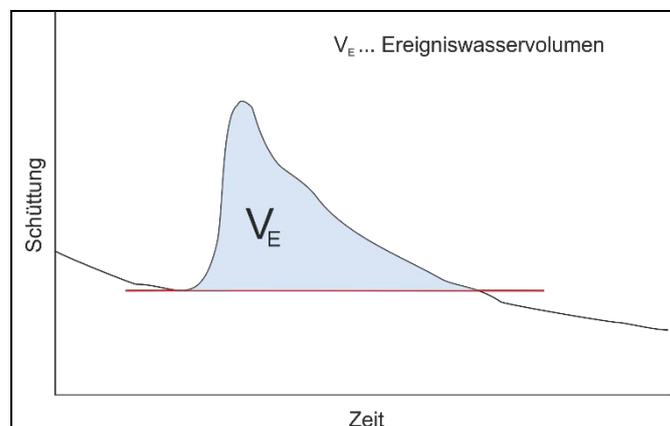


Abbildung 50: Trennung des Niederschlagswasseranteils vom Basisabfluss bei Schüttungsanstiegen nach einem Niederschlagsereignis (modifiziert nach McCuen, 2005).

5.2.4 Natürliche und künstliche Tracer

Die Wassertemperatur und elektrische Leitfähigkeit wurden als natürliche Marker verwendet, um die Abflusskomponenten der aktiven Blockgletscher zu untersuchen. Im konkreten Fall kann die elektrische Leitfähigkeit als konservativer und die Wassertemperatur als reaktiver Tracer angesehen werden. Die elektrische Leitfähigkeit (EC) wurde bei den aktiven Blockgletschern Bergli/Lareintal und

Ölgrube-Süd herangezogen, um die Abflusskomponente des höher mineralisierten Grundwassers von der Abflusskomponente aus geringer mineralisierte Regen-, Schnee- und Eisschmelzwasser auf Basis eines Zwei-Komponenten-Mischmodells zu trennen (Wels et al., 1991). Die Reduktion der elektrischen Leitfähigkeit basiert auf der Verdünnung durch die Mischung der zwei Wasserkomponenten Niederschlagswasser (Q_n) und Grundwasser, wobei mögliche Lösungsreaktionen zwischen Gestein und infiltrierendem Niederschlagswasser entlang der Fließwege vernachlässigt werden. Dies ist in Bezug auf die kristallinen Ausgangsgesteine des Blockgletschers (granitoide Gneise, Glimmerschiefer) und den kurzen Fließzeiten eine vertretbare Annahme, wodurch sich Q_n berechnen lässt:

$$Q_n \approx Q_s - \frac{EC_s - EC_p}{EC_{old} - EC_p} Q_s \quad (2)$$

Q_s [m^3/s] ist der Gesamtabfluss, EC_s [$\mu S/cm$] die elektrische Leitfähigkeit des Quellwassers, EC_p [$\mu S/cm$] die elektrische Leitfähigkeit des Niederschlags und EC_{old} [$\mu S/cm$] die elektrische Leitfähigkeit des Grundwassers vor dem Niederschlagsereignis. Eine Messung der elektrischen Leitfähigkeit des Niederschlagswassers im Einzugsgebiet Ölgrube-Süd ergab einen Wert der EC_p von $42 \mu S/cm$, was deutlich erhöht erscheint im Vergleich zu Literaturwerten wie bspw. $15 \mu S/cm$ in alpinen Einzugsgebieten von Bayern (Wetzel, 2003) oder $16 \mu S/cm$ vom Schöneben-Blockgletscher in der Steiermark (Winkler et al., 2016a) sowie den Angaben von $5-30 \mu S/cm$ in Hölting & Coldeway (2013). Als Mittelwert für die Analysen wurde daher $20 \mu S/cm$ angenommen.

Die Wassertemperatur als reaktiver Tracer macht eine direkte Auswertung schwierig, jedoch weisen Temperaturänderungen bei Schüttungsänderungen auf ein Wechselspiel zwischen unterschiedlichen Abflusskomponenten wie Eisschmelzwasser und gespeichertem Grundwasser hin.

Als künstliche Tracer wurden Uranin alleine und die Kombination Uranin mit Sulforodamin-B verwendet, wodurch eine zeitgleiche Tracereingabe an unterschiedlichen Eingabestellen erfolgen konnte. Deren Durchgangskurven wurden mittels eines Feldfluorometers (Albillia GGUN-FL30; Schnegg, 2002) bestimmt und basierend auf einer Kalibration des Gerätes im Labor in Konzentrationen umgerechnet. Es wurden die Wiederfindungsraten berechnet und in weiterer Folge die zeitliche Verzögerung des Tracerdurchgangs quantifiziert, um die Abstandsgeschwindigkeit ermitteln zu können. Tracerversuche wurden an den aktiven Blockgletschern Ölgrube-Süd (2 Versuche; 2015: Uran und Sulforodamin-B und 2017: Uranin) und Bergli/Lareintal (Versuch 2017; Uran und Sulforodamin-B) durchgeführt.

5.3 Ergebnisse der hydrogeologischen Untersuchungen

5.3.1 Hydrochemie

Abbildung 51 gibt eine Übersicht über die Verteilung der ausgewiesenen Blockgletscher des Untersuchungsgebietes und der Lage der Probenahmemessstellen. Ergänzend sind jene Gebiete/Standorte dargestellt, von denen bereits erhöhte Schwermetallwerte vor Projektbeginn bekannt waren und die bei parallel laufenden Untersuchungen erfasst werden konnten (Ribis, 2017).

Die Abbildung 52 gibt auszugsweise einen Überblick über die bestimmten Parameter Uran (U), Arsen (As), Nickel (Ni), Mangan (Mn) und Aluminium (Al). Neben den im Projekt erhobenen Messstellen und ermittelten hydrochemischen Analyseergebnissen wurde für die Charakterisierung der Schwermetallbelastungen auch auf die Ergebnisse von Schmidt (2014) aus dem Windachtal Rücksicht genommen. Trotz einer umfassenden Analytik wurden bei diesen Proben jedoch die Parameter Arsen und Uran nicht gemessen. Aufgrund der ähnlichen Charakteristik zu anderen Schwermetallbelasteten Quellwässern konnten die Quellen miteingebunden werden. Des Weiteren wurden zur besseren Veranschaulichung für Messstellen mit mehreren Probenahmen jene mit den höchsten Parameterwerten dargestellt. Es zeigt sich, dass eine regional höhere Belastung der Quellwässer (> Grenzwert der TWV) nur in den kristallinen alpinen Regionen Nordtirols vorliegt.

In diesem Zusammenhang wird auch auf die Ergebnisse zur Erhebung der Wassergüte in Österreich von Metallgehalten in Grundwässern (Philippitsch & Loishandl-Weisz, 2012; Wemhöner et al., 2015) sowie die Radionuklidkarte der Geologischen Bundesanstalt hingewiesen (Berka et al., 2014a,b).

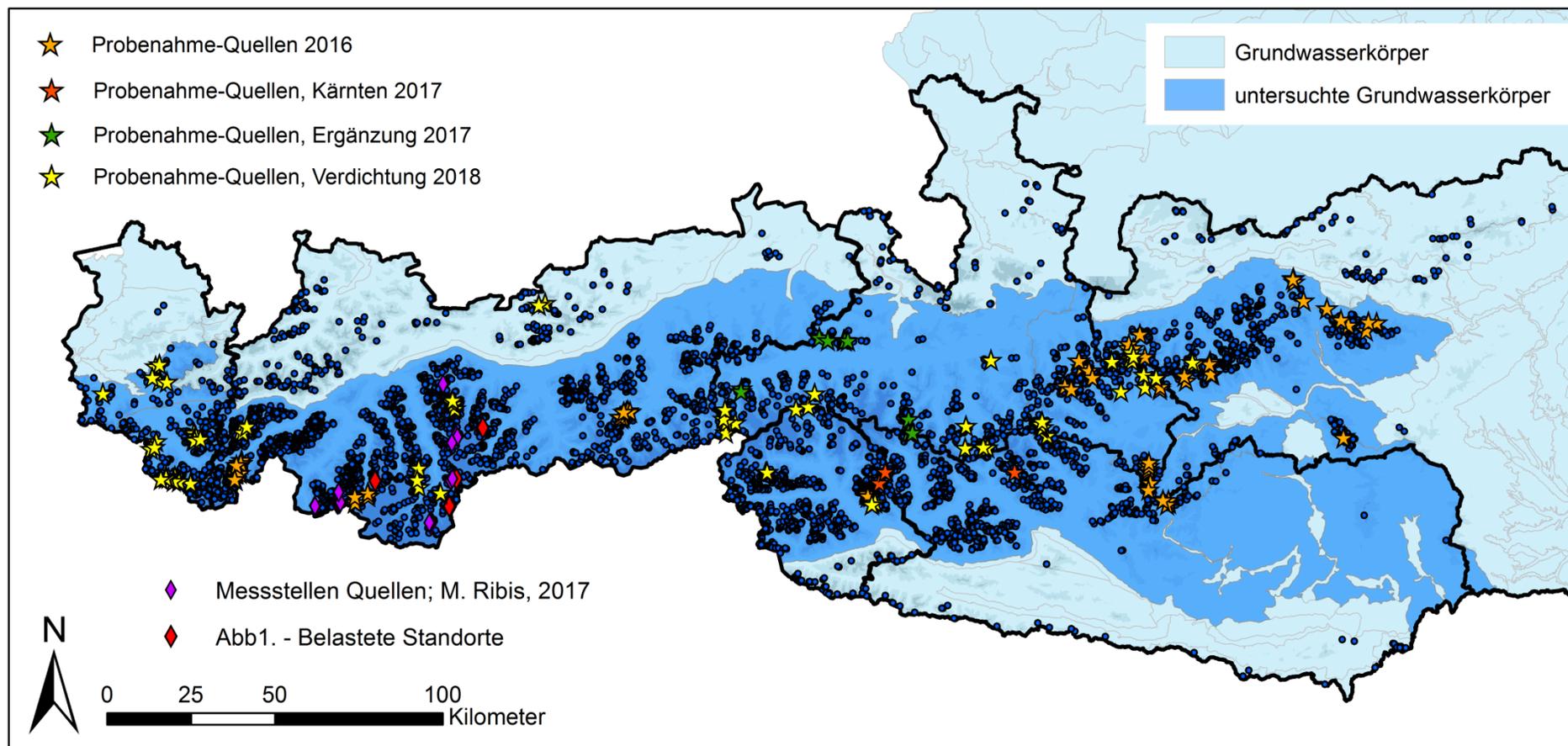


Abbildung 51: Übersicht der Blockgletscher (als Centroide) und der Probenahmemessstellen für das gesamte Untersuchungsgebiet.

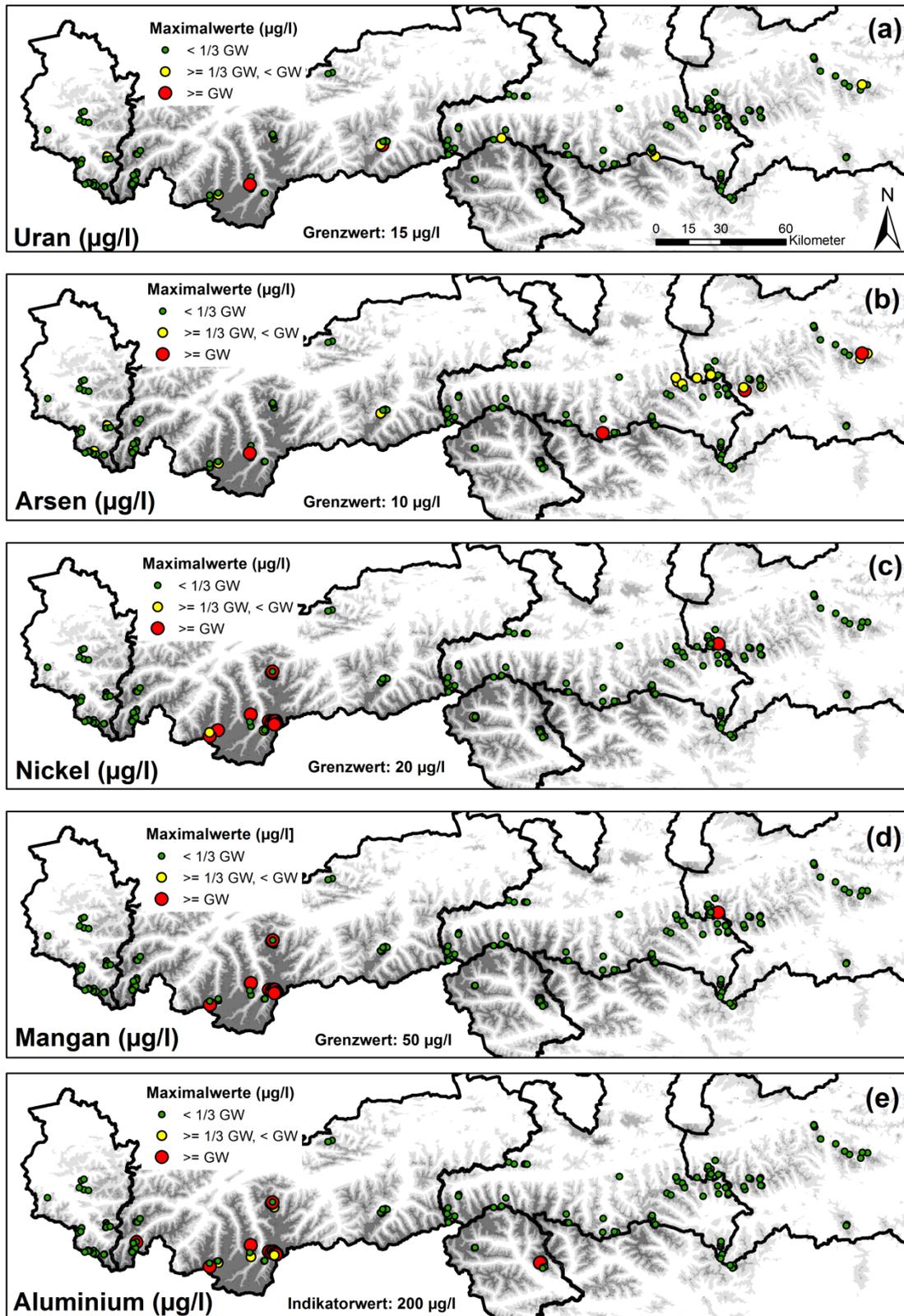


Abbildung 52: Übersichtskarte der Probenahmemessstellen mit belasteten Quellwässern der Parameter (a) Uran, (b) Arsen, (c) Nickel, (d) Mangan und (e) Aluminium der jeweiligen Probenahme mit einer Klassifizierung in drei Klassen: kleiner $1/3$ Grenzwert (GW); zwischen $1/3$ GW und GW; größer GW. Für Aluminium gibt es laut TWV keinen Grenzwert sondern einen Indikatorwert, der bei $200 \mu\text{g/l}$ liegt und nicht überschritten werden sollte.

Wesentliches Ziel der hydrochemischen Untersuchungen ist die Charakterisierung der mit Schwermetallen belasteten Quellen. Neben den im Zuge des Projekts gewonnenen Messwerte lagen noch aus Vorstudien und parallel laufenden Untersuchungen zusätzliche Daten von belasteten Quellen in Tirol vor, die eingebunden werden sollten. Da bei vielen Probenahmen aus Vorstudien mehrere Parameter fehlten (z.B. pH-Wert, Alkalinität, unterschiedliche Hauptionen, etc.), konnten für einen ganzheitlichen hydrochemischen Vergleich nur ausgewählte Proben verwendet werden (alle aus dem Windachtal; Schmidt, 2014). Für einige konnten mit Hilfe von PhreeqC die fehlenden Parameter (pH und/oder Alkalinität) modelliert werden, jedoch ergaben sich daraus auch Unsicherheiten für die Auswertung und Interpretation. Für die Charakterisierung der belasteten Quellen wurden in weiterer Folge jene Datensätze ausgesucht, die entsprechende Belastungen in signifikanten Anteilen anzeigen; d.h. Daten mit Werten über dem Grenzwert (hoch in Abbildung 53) und zusätzlich jene, die zumindest ein Drittel des Grenzwerts aufweisen (moderat in Abbildung 53). Bei Aluminium wurde der Indikatorwert von 200 µg/l herangezogen.

Zuerst wurden Wässer aus regional zusammengehörigen Gebieten und in weiterer Folge hydrochemisch ähnliche Wässer in Gruppen mit erhöhter Kationenvergesellschaftung zusammengefasst. Es zeigt sich, dass die Quellen, die Schwermetallbelastungen über dem Grenzwert der TWV haben, in die Kationenvergesellschaftungen „As/U“ und „Ni/Mn/Al“ differenziert werden können (Abbildung 53). Da beide Vergesellschaftungen (As/U und Ni/Mn/Al) regional vorkommen können, sind die entsprechenden regionalen Gebiete mit dem Präfix As (Gruppe As/U) oder Ni (Gruppe Ni/Mn/Al) gekennzeichnet.

- As/U:

As-Schladminger Tauern Zentral, As-Kaunertal/Ötztal, As-Ötztaler Kristallin, Schladminger Tauern Ost, BergliGesamt, Obertauern/Schlad West, Seckauer Tauern, TuxerHaupt, MurUrsprung

- Ni/Mn/Al:

Ni-Schladminger Tauern Zentral, Ni-Kaunertal/Ötztal, Ni-Ötztaler Kristallin, Hochgurgl, Hochkönig, Windachtal (Schoenkar, Wannenkar, Brunnenkar, Haglkar, Schraakar)

Das Gebiet Windachtal weist in den Daten nur SO₄ auf und ist somit nur in Plots mit HCO₃+SO₄ dargestellt.

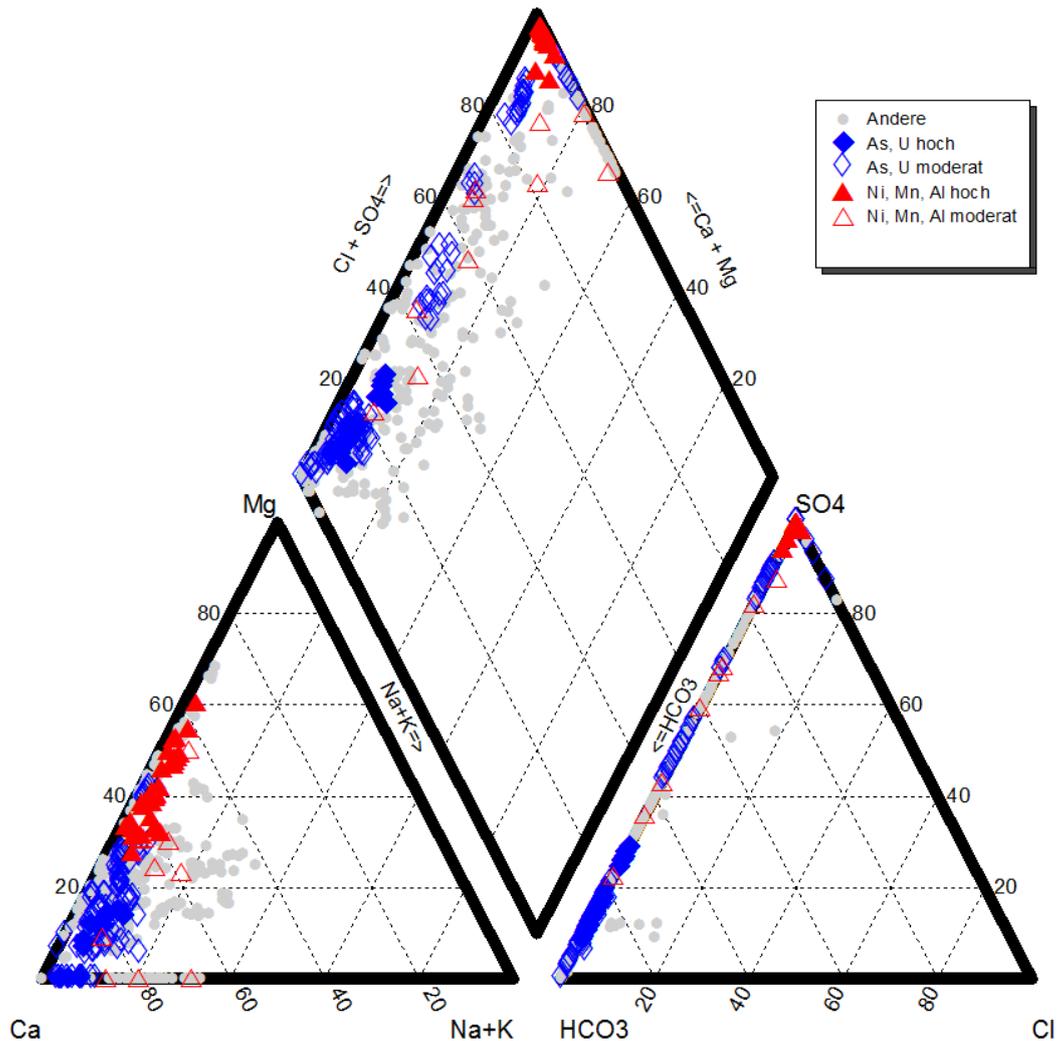


Abbildung 53: Piper Plot aller hydrochemischen Daten mit Kennzeichnung und Gruppierung der belasteten Quellen; hoch = Belastung größer als Grenzwert; moderat = Belastung über 1/3 des Grenzwerts; graue Punkte = keine Belastung.

Abbildung 53 zeigt, dass die Ni/Mn/Al belasteten Quellwässer einem Ca-Mg-SO₄-Typ und die As/U belasteten einem Ca-HCO₃-Typ zugeordnet werden können.

Die Gegenüberstellung von Ca+Mg zu HCO₃+SO₄ zeigt eine bimodale Verteilung (Abbildung 54). SO₄-dominierte Wässer plotten auf der 1:1-Linie und entsprechen den Ni/Mn/Al-belasteten Quellwässern, während die HCO₃-dominierten auf der 1:2-Linie plotten und den As/U-belasteten Quellwässern zugeordnet werden können. Intermediäre Wässer befinden sich dazwischen.

Generell lässt sich die 1:2 Linie als „Karbonat“-Linie deuten, d.h. bei Auflösung von Kalzit oder Dolomit wird 1Mol Calcium oder Calcium+Magnesium frei und 1Mol Karbonat (CO₃) welches dann zu HCO₃ dissoziiert, und da bei der Auflösung meist Kohlensäure (H₂CO₃) beteiligt ist, die durch den CO₂-Eintrag aus der Atmosphäre entsteht, kommt hier noch 1Mol Karbonat dazu; damit kommt es zum Verhältnis 1:2 im gelösten Zustand. SO₄ wird in der Lösung nicht durch atmosphärischen Eintrag verändert und es bleibt somit bei dem Verhältnis 1:1.

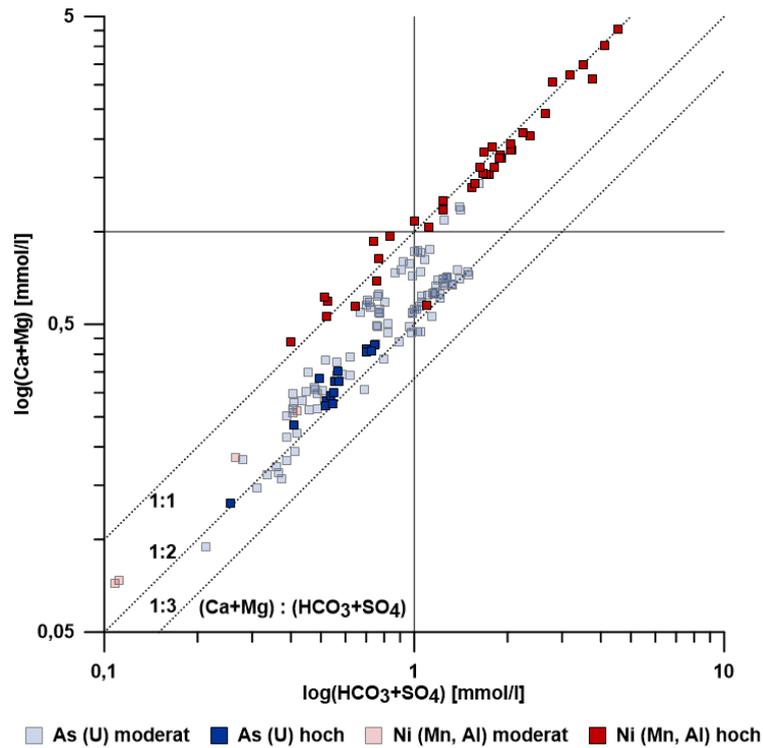


Abbildung 54: Doppellogarithmischer Plot des Ca+Mg- und HCO₃+SO₄-Mischungsverhältnisses für die Ni/Mn/Al und As/U belasteten Quellwässer. hoch ... Belastung größer als Grenzwert; moderat ... Belastung über 1/3 des Grenzwerts.

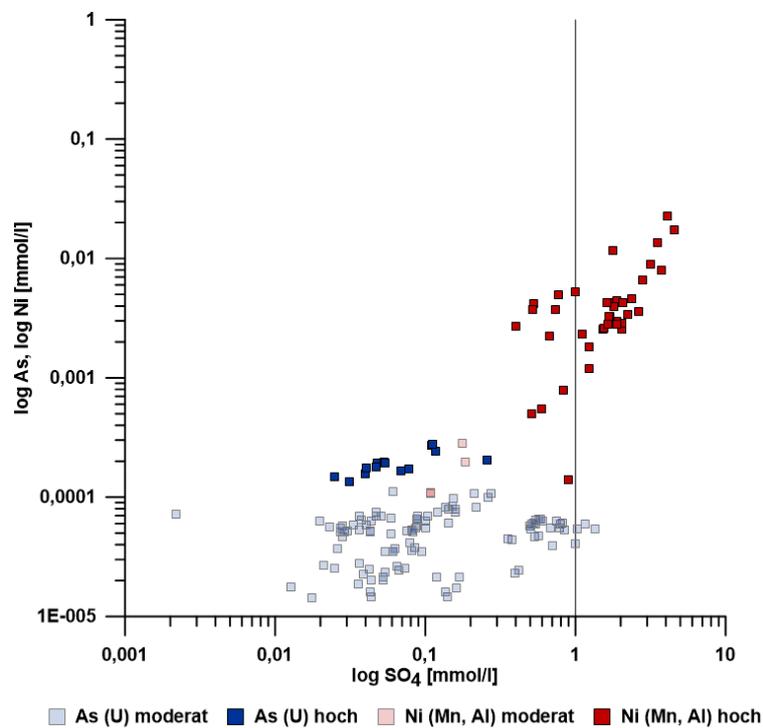


Abbildung 55: Sulfatanteil der Ni/Mn/Al und As/U belasteten Quellwässer. hoch ... Belastung größer als Grenzwert; moderat ... Belastung über 1/3 des Grenzwerts.

In Abbildung 55 kann man den Zusammenhang zwischen Sulfat und den Kationen As und Ni sehen. Die Ni belasteten Quellwässer plotten rechts von einem Sulfatgehalt von 1mmol, was bedeutet, dass hohe Ni-Werte mit dem Sulfat zusammenfallen. Die As-belasteten Quellwässer liegen im Wesentlichen links der Sulfatgehaltlinie 1mmol und zeigen somit geringere Sulfatgehalte.

Regional können die Quellwässer mit Ni/Mn/Al-Belastung über dem Grenzwert der TWV den Regionen Kaunertal und Ötztal zugeordnet werden (Abbildung 56). Des Weiteren ist die Probe BLGL6_0022 der Schladminger Tauern ebenfalls dieser Gruppe zuordenbar.

Die As/U-belasteten Quellen der Regionen Tuxer Hauptkamm, der Seckauer Tauern und Obertauern/Schladminger Tauern West sind an Gesteine mit hohem Karbonatanteil gebunden (Abbildung 57). Dies zeigt sich darin, dass die Daten auf der Linie 1:2 plotten und somit das Karbonatgleichgewicht gegeben ist. Die Quellwässer der anderen Gebiete weisen einen deutlichen Sulfatanteil auf und liegen daher zwischen der Sulfat dominierten Line und der Hydrogenkarbonat dominierten Linie (Abbildungen 54, 57).

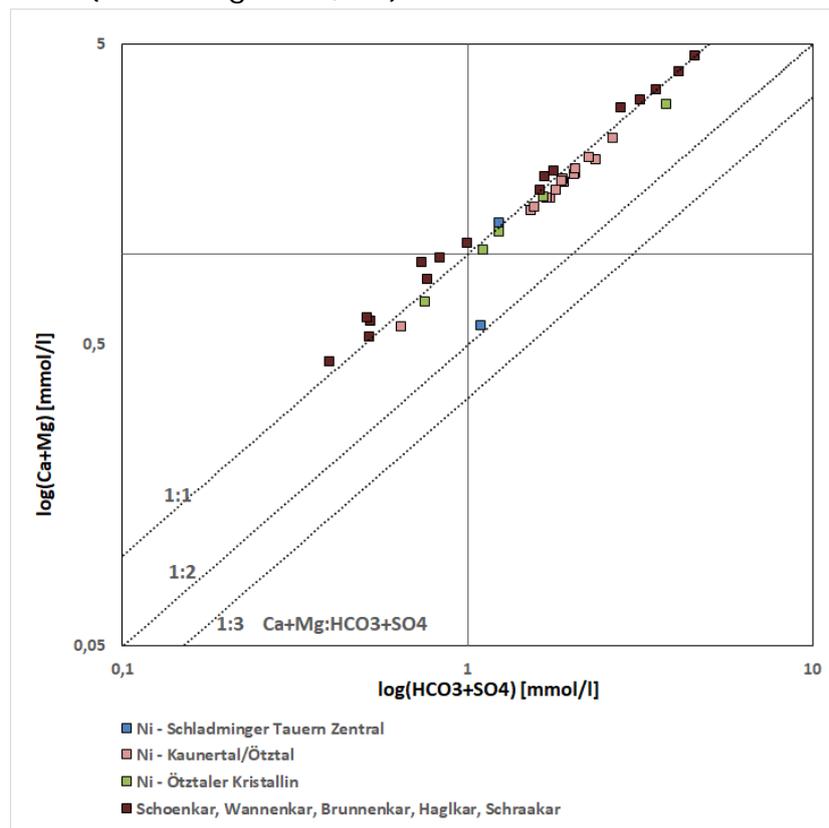


Abbildung 56: Ni/Mn/Al-belastete Quellwässer im Mischungsverhältnis Ca+Mg vs. $\text{HCO}_3 + \text{SO}_4$, die Proben vom Schoen-, Wannenkarr-, Brunnen-, Hagl- und Schraakar weisen kein HCO_3 auf.

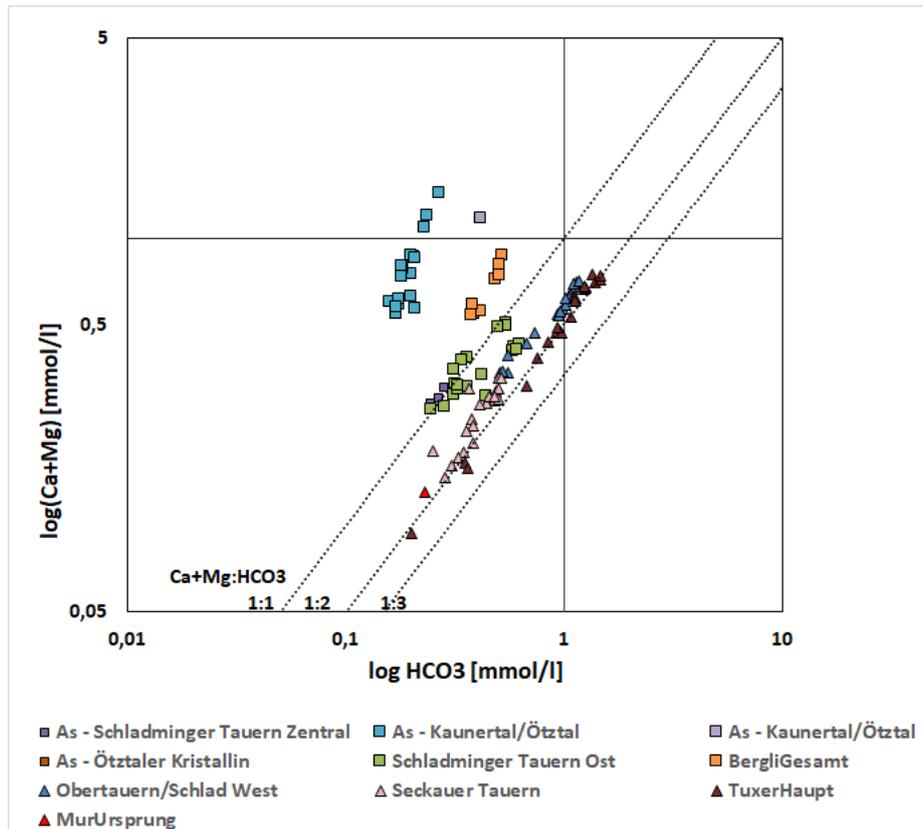


Abbildung 57: As/U belastete Quellen im Mischungsverhältnis $\text{Ca}+\text{Mg}$ und HCO_3 und ihre regionale Untergliederung.

Werden die Ergebnisse zusammenfassend betrachtet (Sulfatgehalt und eher saure pH-Werte; Abbildung 58), kann vermutet werden, dass die Nickel und Mangan Belastung stark vom Vorhandensein von Sulfidmineralien abhängt (z.B. Pentlandite für Ni).

Hingegen zeigen die Arsen- und Uran-belasteten Wässer eine etwas größere Diversität, was die HCO_3 und SO_4 Gehalte betrifft, wobei die hoch belasteten eindeutig HCO_3 -dominierte Wässer sind. Das hohe Ca/Mg -Verhältnis (Abbildung 53), die Dominanz des HCO_3 und der leicht ins alkalische verschobene pH-Wert (Abbildung 58) deuten auf die Auflösung von Ca -Karbonaten hin (Marmor, Kalkstein – möglicherweise Hochstegenmarmor bei den Quellwässern des Tuxer Hauptkamms).

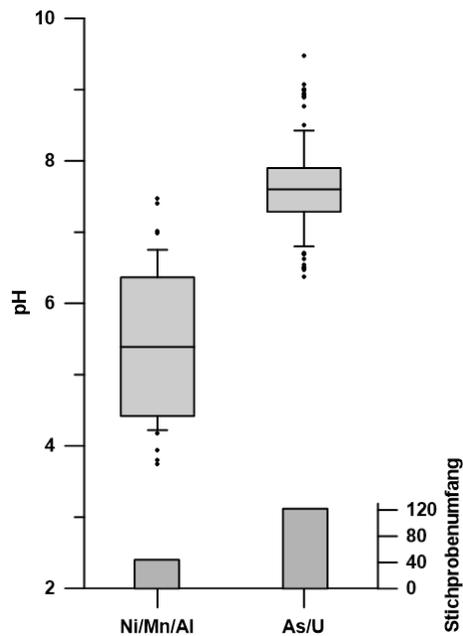


Abbildung 58: pH-Wertverteilung der Ni/Mn/Al-belasteten und As/U-belasteten Quellwässer; beide beinhalten moderate und hoch belastete Quellen.

5.3.2 Isotope

Allgemeine Charakterisierung

Eine Übersicht der Isotopenverhältnisse aller untersuchten Blockgletscherquellen ist in den Abbildungen 59 - 62 dargestellt. Abbildung 59 zeigt die Isotopenwerte aller Quellwässer der Blockgletscherquellen der Bundesländer Vorarlberg, Tirol, Salzburg und Steiermark.

Die lokale meteorische Wasserlinie Planner (L-MWL Planner) basiert auf den Niederschlagsdaten 2016-2018 der ANIP-Station Planneralm. Die globale (G-) und auch die Österreichische (A-) MWL (14 ANIP Stationen) wurden aus Hager & Foelsche (2015) übernommen. Des Weiteren sei auf den Wasserisotopenband bzw. die Wasserisotopenkarte von Philippitsch & Humer (2018) verwiesen.

In weiterer Folge sind die einzelnen Untersuchungsgebiete für jedes Bundesland in Abbildungen 60-63 ausgewiesen. Neben den Quellen wurden auch der Niederschlag für den Zeitraum 2016 und 2017 und pro Gebiet ein Schneeprofil im März/April 2017 aufgenommen und beprobt, um die Isotopensignatur des Niederschlags (Regen und Schnee) erfassen zu können.

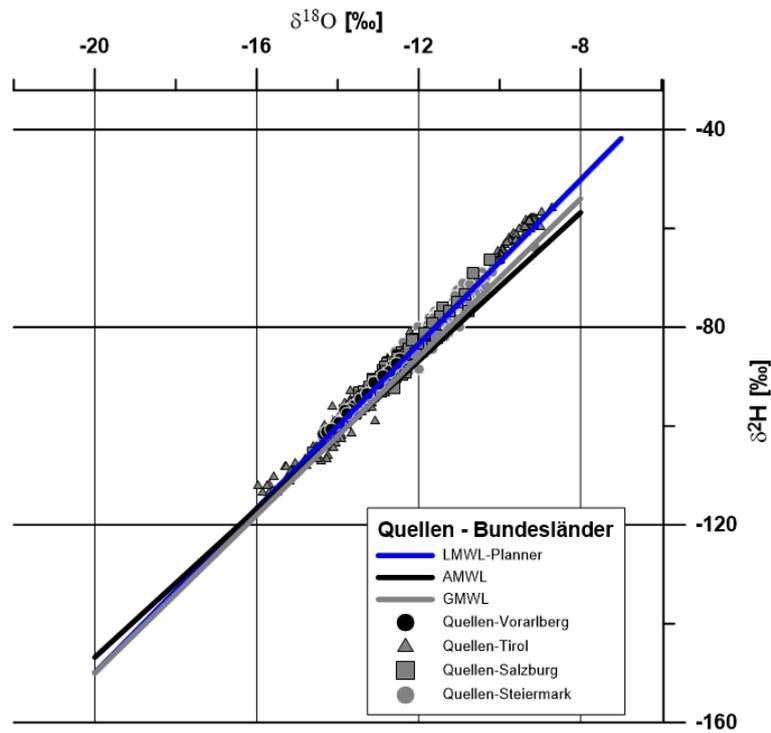


Abbildung 59: Isotopenwerte aller ausgewählten Quellen der Bundesländer Vorarlberg, Tirol, Salzburg und Steiermark. LMWL-Planner ($\delta^2\text{H} = 8.22 \cdot \delta^{18}\text{O} + 14.99$); AMWL: Austrian Meteoric Water Line ($\delta^2\text{H} = 7.5 \cdot \delta^{18}\text{O} + 3.2$); GMWL: Globale Meteoric Water Line ($\delta^2\text{H} = 8 \cdot \delta^{18}\text{O} + 10$).

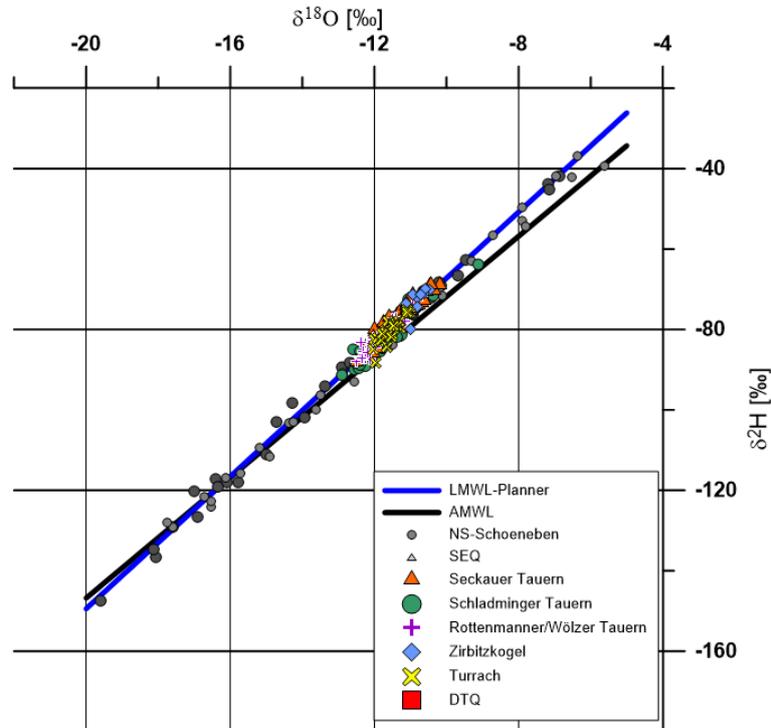


Abbildung 60: Isotopenwerte der einzelnen Gebiete der Steiermark. LMWL-Planner ($\delta^2\text{H} = 8.22 \cdot \delta^{18}\text{O} + 14.99$); AMWL: Austrian Meteoric Water Line ($\delta^2\text{H} = 7.5 \cdot \delta^{18}\text{O} + 3.2$).

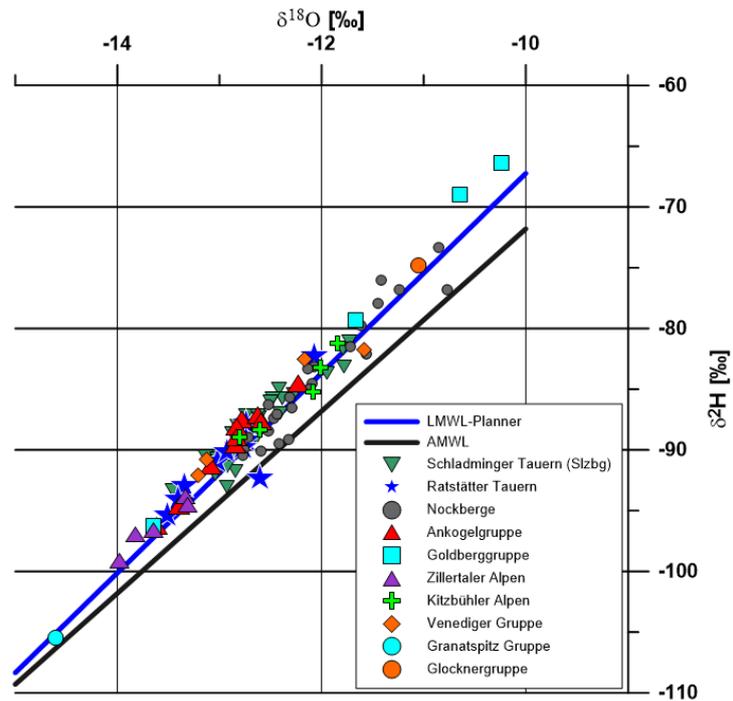


Abbildung 61: Isotopenwerte der einzelnen Gebiete in Salzburg. LMWL-Planner ($\delta^2\text{H} = 8.22 \cdot \delta^{18}\text{O} + 14.99$); AMWL: Austrian Meteoric Water Line ($\delta^2\text{H} = 7.5 \cdot \delta^{18}\text{O} + 3.2$).

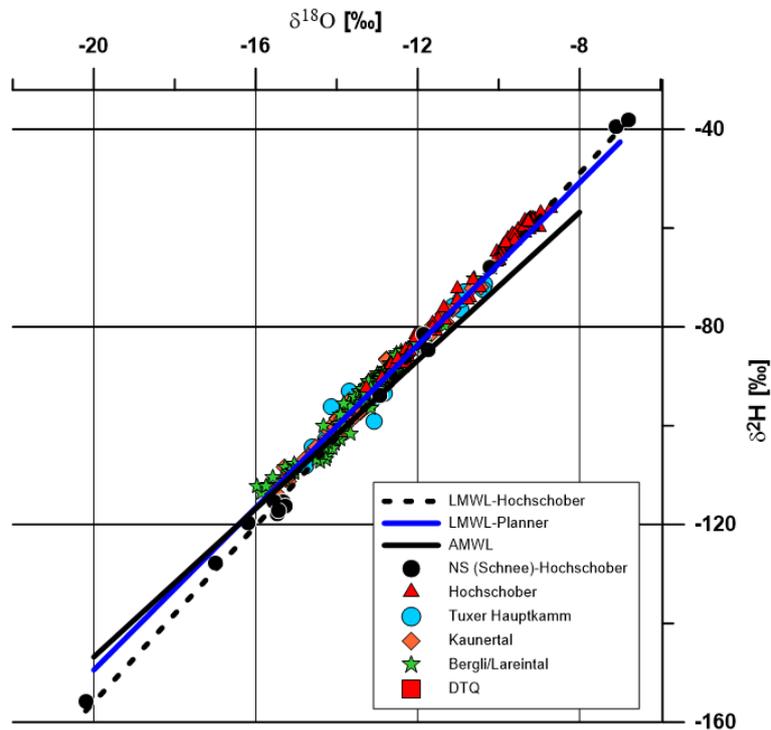


Abbildung 62: Isotopenwerte der einzelnen Gebiete in Tirol. LMWL-Hochschober basiert auf Niederschlags- und Schneewerte der Zeitperiode 2016/17 ($\delta^2\text{H} = 8.92 \cdot \delta^{18}\text{O} + 22.44$). LMWL-Planner ($\delta^2\text{H} = 8.22 \cdot \delta^{18}\text{O} + 14.99$); AMWL: Austrian Meteoric Water Line ($\delta^2\text{H} = 7.5 \cdot \delta^{18}\text{O} + 3.2$).

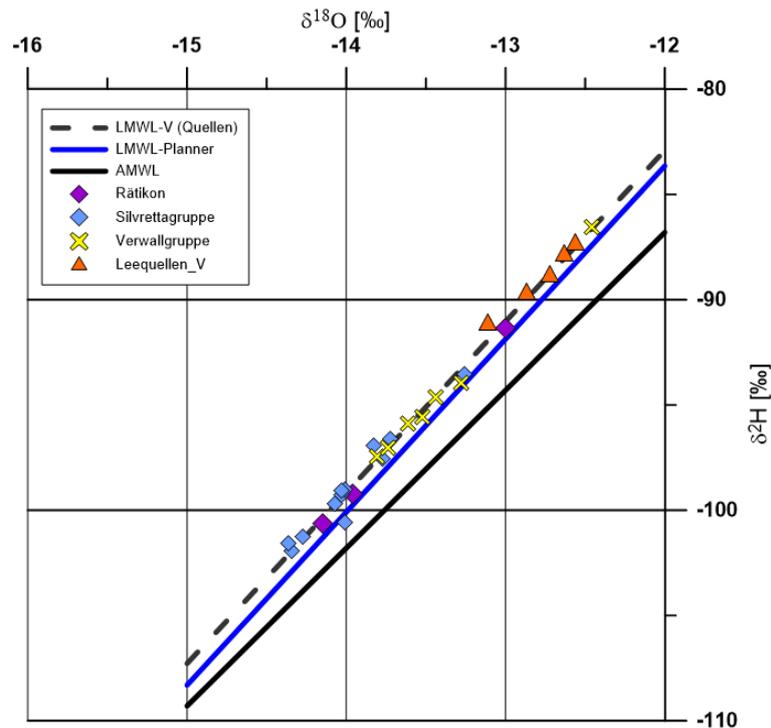


Abbildung 63: Isotopenwerte der einzelnen Gebiete in Vorarlberg. LMWL-V (Quellen) basiert auf den Isotopendaten aller Quellen in Vorarlberg ($\delta^2H = 8.12 \cdot \delta^{18}O + 14.59$). LMWL-Planner ($\delta^2H = 8.22 \cdot \delta^{18}O + 14.99$); AMWL: Austrian Meteoric Water Line ($\delta^2H = 7.5 \cdot \delta^{18}O + 3.2$).

Die erfassten und gemessenen Schneeprofile der Gebiete Bergli/Lareintal, Hochschober und Schöneben sind in Abhängigkeit der Tiefenzuordnung der gemessenen Werte in Abbildung 64 dargestellt. Diese Abbildung verdeutlicht die große Streubreite der Isotopenwerte für Schnee.

Zusammenfassend lässt sich die Aussage treffen, dass die Blockgletscherquellen aller Bundesländer im Wesentlichen eine ähnliche Signatur aufweisen und gut zu den Daten der LMWL-Planner passen (Abbildung 59), jedoch ist eine gewisse Abweichung der Quellendaten relativ zur AMWL (Hager & Foelsche, 2015) erkennbar. Diese zeigt sich im Besonderen an der LMWL-Hochschober, was vermutlich damit zu erklären ist, dass Niederschläge in der Schober Gruppe bereits einem verstärkten mediterranen Einfluss unterliegen, welcher zusätzlich noch durch spezielle, lokale Faktoren überlagert wird (Kaiser et al., 2002; Liebming et al., 2006).

Um eine genauere Aufschlüsselung der Isotopensignatur an einzelnen Quellen zu bekommen, wurden Ereignisbeprobungen durchgeführt.

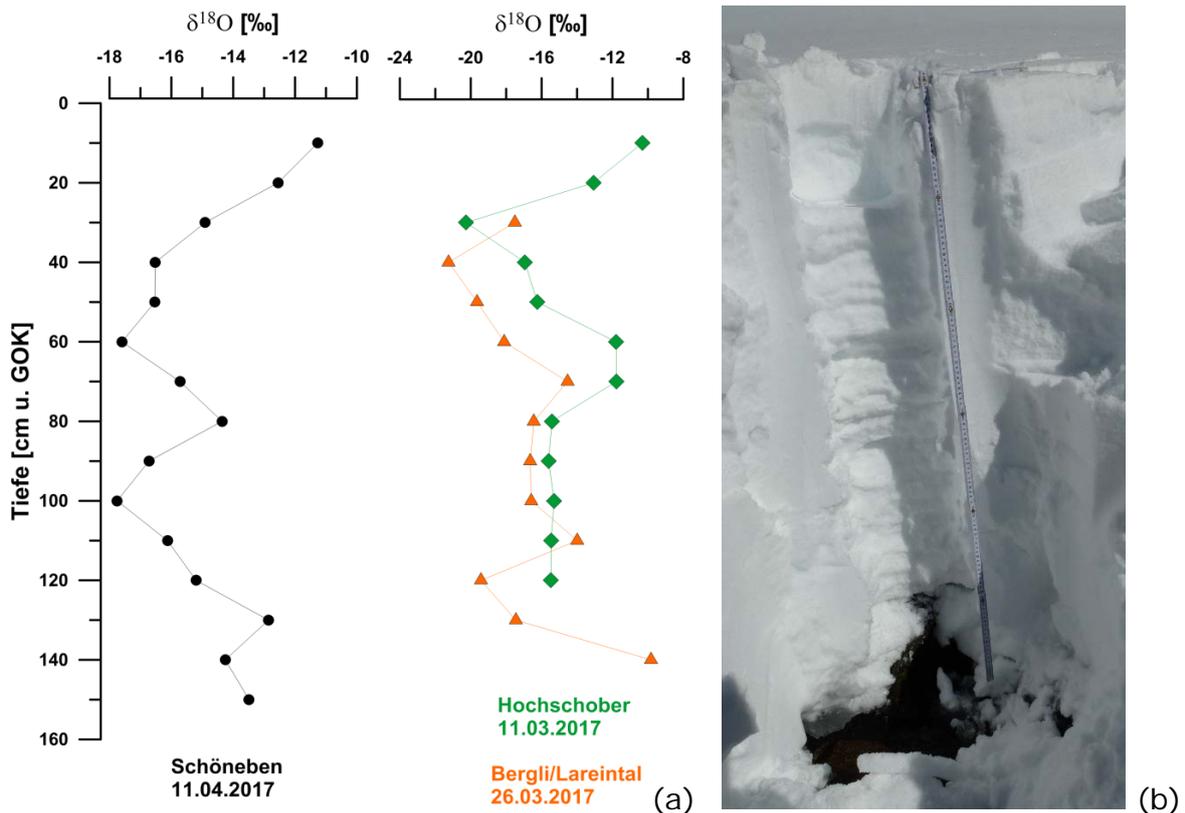


Abbildung 64: (a) Isotopenwerte $\delta^{18}\text{O}$ der Schneeprofile in den lokalen Untersuchungsgebieten Schöneben, Hochschober und Bergli/Lareintal in Bezug zur Tiefe. (b) Schneeprofil Hochschober, Lage des Profils bei HSQ7 in Abbildung 13 (Foto: G. Winkler).

Untersuchungen im Vorfeld des Projektes haben gezeigt, dass Quellen aus intakten Blockgletschern saisonal als auch im Tagesverlauf starke Schüttungsschwankungen aufweisen (z. B. Krainer et al., 2007). Des Weiteren wird die Schüttung von mehreren Abflusskomponenten gebildet, die auf Niederschlag, Schneeschmelze, Grundwasser und Schmelzwasser des Permafrosteises (oder wo vorhanden, auch auf Schmelzwasser von (Kar-) Gletschern) zurück zu führen sind (z. B. Krainer et al., 2007) und deren Anteil an der Gesamtschüttung zeitlich variieren kann. Mit Hilfe der stabilen Isotope $\delta^{18}\text{O}$ und $\delta^2\text{H}$ können die unterschiedlichen Abflusskomponenten charakterisiert und in weiterer Folge deren zeitlich variabler Anteil an der Gesamtschüttung berechnet werden (z.B. Sueker et al., 2000; Engel et al., 2016). Daher wurden an ausgewählten Quellen der Gebiete Hochschober, Ölgrube und Bergli/Lareintal zu den vierteljährlichen Probenahmen im Sommer/Herbst 2017 zusätzlich Probenahmen mit hoher zeitlicher Auflösung (stündlich bis 48 Std. Rhythmus) durchgeführt.

Saisonale Schwankungen:

Am aktiven Blockgletscher Bergli/Lareintal konnten aufgrund der guten Zugänglichkeit über die ganze Sommersaison 2017 (Mai-Oktober) Isotopendaten der Blockgletscherquelle in regelmäßigen Abständen genommen werden

(Abbildung 65). In Ergänzung konnte die Isotopensignatur des Permafrostes sowie des Niederschlags (Regen inkl. Schneeprofil) ermittelt werden. Es zeigt sich, dass die Isotopendaten der Quelle (Abbildung 11) auf der lokalen MWL liegen und somit Mischwässer des Niederschlags- und Eisschmelzwassers darstellen (Abbildung 66).

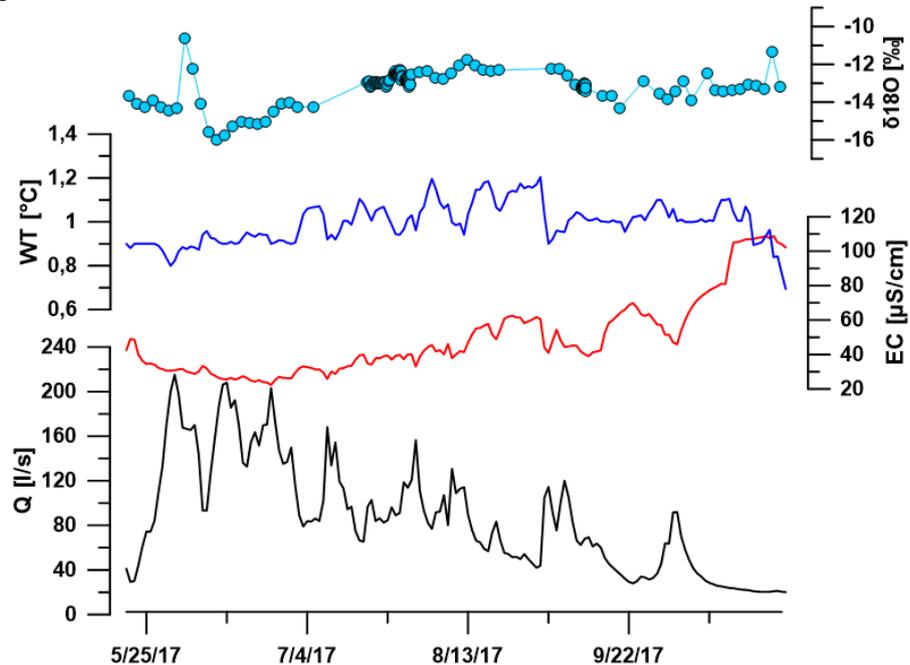


Abbildung 65: Isotopendaten der Quelle des aktiven Bockgletschers Bergli/Lareintal sowie Abfluss (Q), elektrische Leitfähigkeit (EC) und Wassertemperatur (WT).

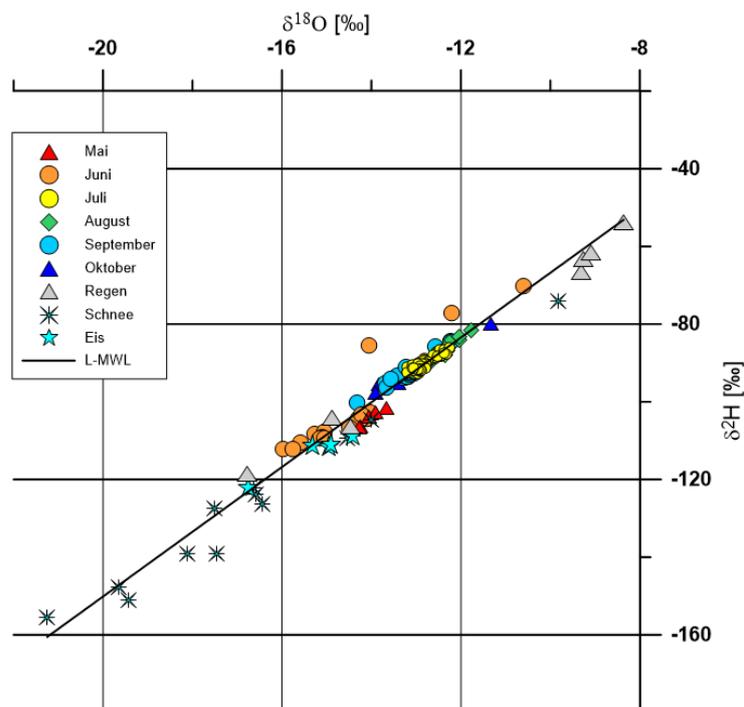


Abbildung 66: Isotopenverteilung der zeitlich hochaufgelösten Probenahmen 2017 der Blockgletscherquelle Bergli/Lareintal sowie von Regen-, Schnee- und Eisproben von dort. L-MWL basiert auf Schnee- und Niederschlagsdaten des Gebiets Hochschober ($\delta^2\text{H} = 8.34 \cdot \delta^{18}\text{O} + 16.58$).

Abbildung 67 stellt die zeitlich hochaufgelösten Isotopendaten der westlichen Blockgletscherquelle des Bergli Blockgletschers der elektrischen Leitfähigkeit (EC) derselben gegenüber. Die Komponenten Regen, Schnee bzw. Eis und Grundwasser stellen die Endglieder für Mischungsverhältnisse der Quellwässer dar. Es zeigt sich eine klare Beeinflussung durch Schnee (bzw. Eis) während der Schneeschmelze. Im Mai sind noch leicht erhöhte EC bemerkbar, dann aber eine geringe Mineralisierung (und entsprechende Isotopensignatur) dominiert durch Schmelzwasser. Im Sommer (Juli – September) ist das Quellwasser von Regen dominiert. Es zeigt sich eine Anreicherung von schweren Isotopen, aber noch geringe EC. Diese sind jedoch erhöht gegenüber Zeiten mit hohem Schmelzwasseranteil. Ab Herbst (kühlere Lufttemperaturen September - Oktober) ist ein deutlicher Anstieg der EC erkennbar und die Isotopensignatur geht Richtung -13‰ für $\delta^{18}\text{O}$. Bei dementsprechenden Schüttungsrückgang (Abbildung 65) lässt sich an den Quellen nahezu 100% gespeichertes Grundwasser erkennen. Ab November gibt es leider keine weiteren Aufzeichnungen mehr, da an der Messstelle keine Schüttung mehr gemessen wird (was nicht zwangsweise einem Trockenfallen (Vereisen) der Quelle entsprechen muss).

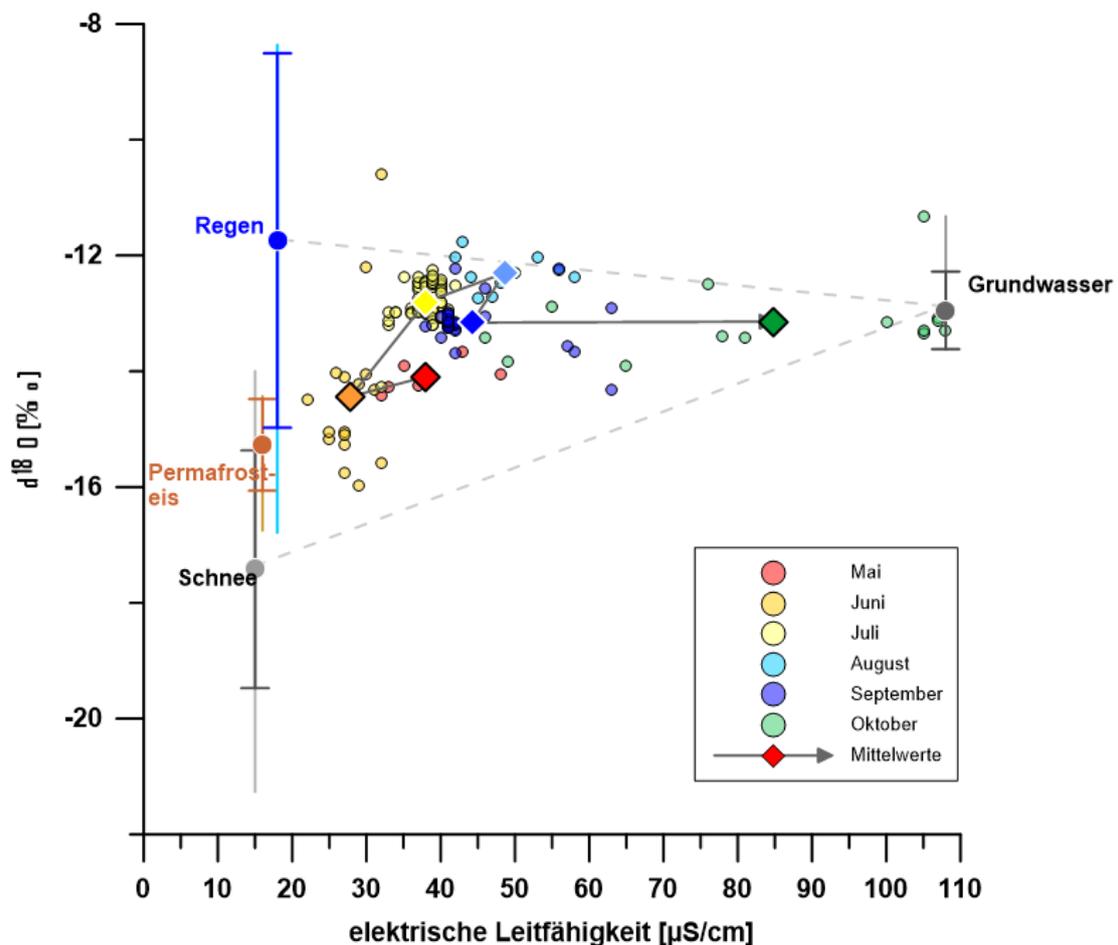


Abbildung 67: Saisonale Isotopenverteilung der Blockgletscherquelle des Bergli/Lareintal im Vergleich mit der elektrischen Leitfähigkeit.

Tagesschwankungen:

Im Gebiet Hochschober wurden zwei unterschiedliche Quellen mit unterschiedlichen Einzugsgebietscharakteristika beprobt. HSQ15 entspringt an der Stirn eines intakten Blockgletschers und entwässert ein Einzugsgebiet aus mehreren intakten Blockgletschern sowie zwei kleineren Seen; HSQ2 liegt an der Stirn eines reliktschen Blockgletschers (siehe Abbildungen 13, 14). Es liegen leider bei beiden Quellen keine Schüttungsdaten vor, die Isotopendaten (hier $\delta^{18}\text{O}$; Abbildung 68) weisen keine Tagesschwankungen auf, wie diese bei Bergli/Lareintal (dort allerdings nur angedeutet; Abbildung 69) und vor allem bei der Ölgrube Süd beobachtbar sind (Abbildung 70).

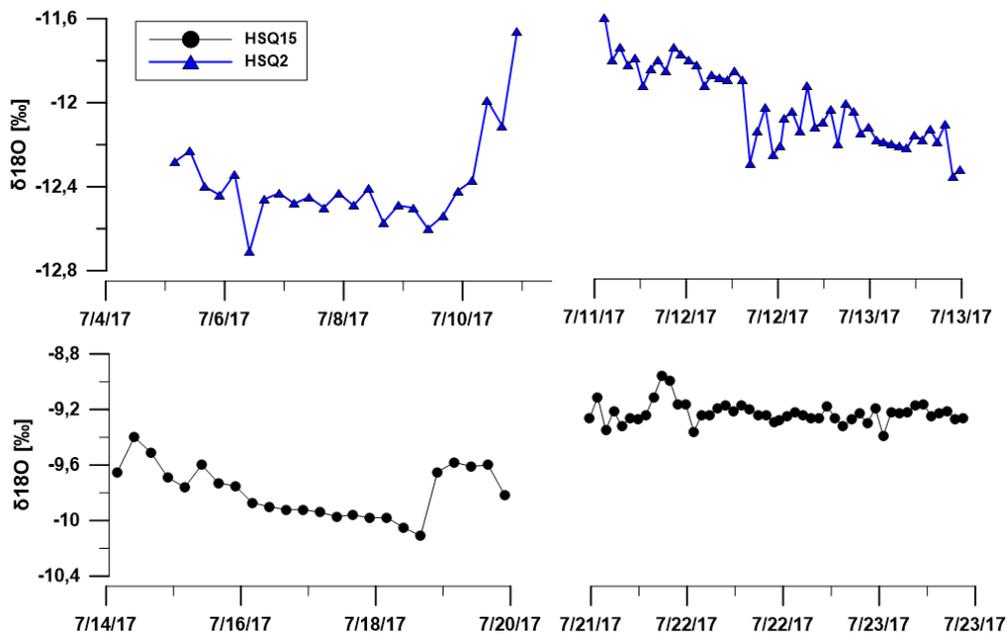


Abbildung 68: $\delta^{18}\text{O}$ Isotopendaten der Quelle HSQ2 eines reliktschen Blockgletschers und der Quelle HSQ15 als Mischwasser mehrerer intakter Blockgletscher im Hochschobergebiet.

Trotz gleicher Seehöhe und Nahelage der beiden Quellen HSQ2 und HSQ15 zeigt HSQ15 eine deutliche Anreicherung an schwereren Isotopen, was auf mögliche Verdunstungseffekte hinweist. Die im Gebiet der HSQ 15 befindlichen Seen (vor allem der Barrensee, siehe Abbildung 13) wären hierfür eine mögliche Erklärung.

Bei der untersuchten Blockgletscherquelle Bergli/Lareintal ist ein Tagesgang erkennbar, jedoch aber nur schwach ausgeprägt (Abbildung 69).

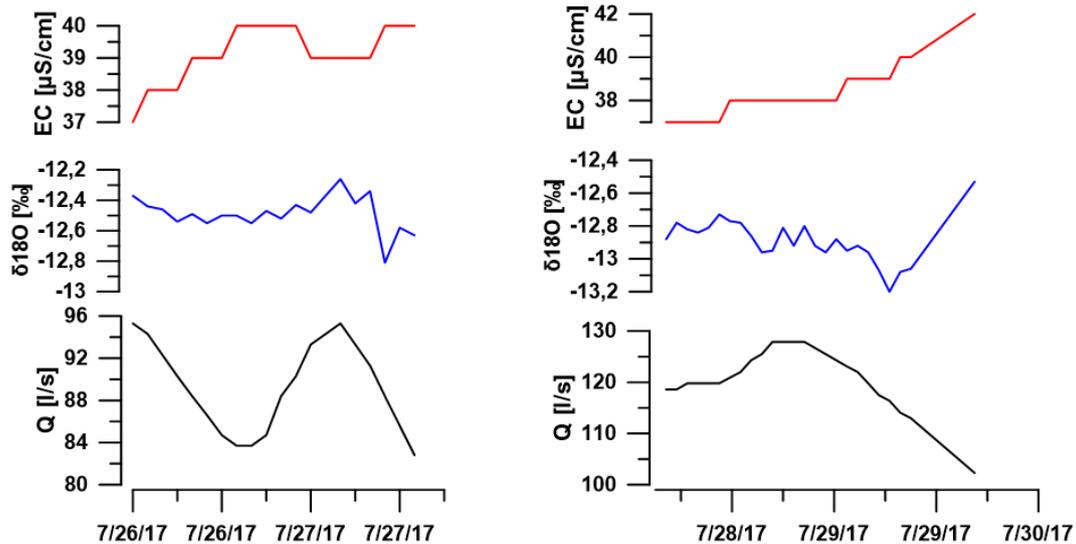


Abbildung 69: Ereignisbeprobungen an der Quelle des aktiven Blockgletschers Bergli/Lareintal.

In Abbildung 70 sind Daten einer Trockenwetterperiode für die Quelle Ölgrube Süd dargestellt, die ideale Bedingungen für die Beobachtung von Tageszyklen ohne Niederschlagsbeeinflussung schafft. Schüttungsmaxima und – minima sind gegen 6 Uhr bzw. 18 Uhr erkennbar. Daraus ergibt sich eine Zeitverzögerung des Tagesgangs zur Lufttemperatur von in etwa 16-18 Stunden. Die Isotopendaten zeigen eine Abreicherung der schwereren Isotope bei starker Verdünnung (maximale Schüttung), was zeitlich parallel mit der Verringerung der EC und auch der WT einhergeht. Bei generellem Schüttungsrückgang (erste Hälfte der gezeigten Trockenwetterperiode) ist ein EC-Anstieg und parallel eine Abreicherung der schwereren Isotope erkennbar. Danach zeigen sich weiterhin Tagesschwankungen, aber deren Niveau bleibt in etwa konstant. Die WT zeigt generell über den ganzen Beobachtungszeitraum einen Anstieg.

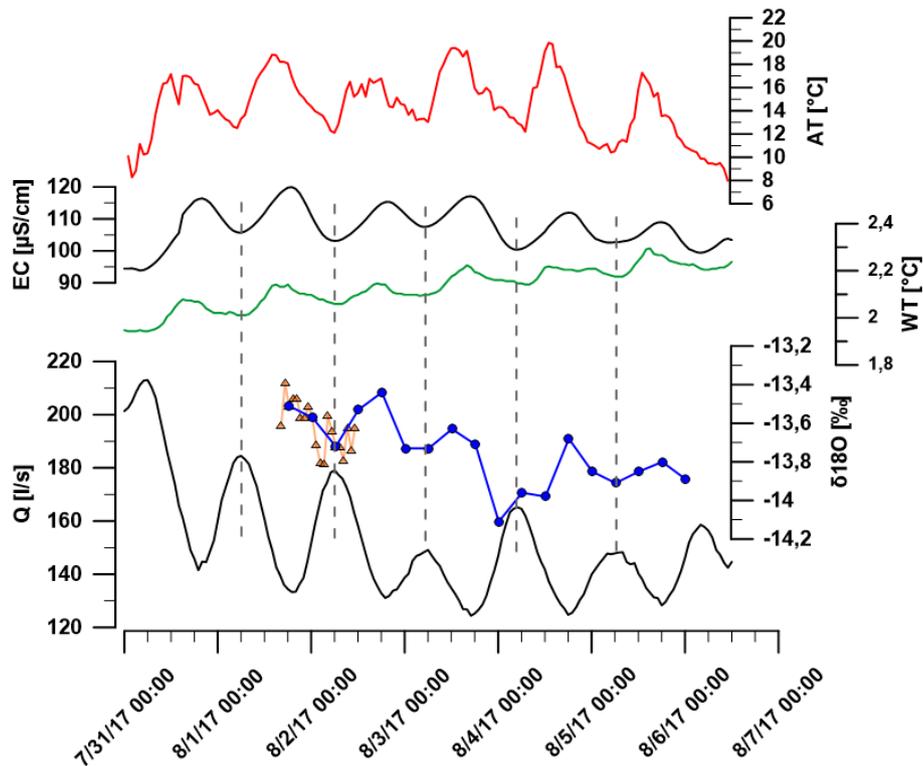


Abbildung 70: Tagesschwankungen der Schüttung (Q), $\delta^{18}O$ Isotopendaten (orange Dreiecke: Ereignisbeprobung im Stundentakt; blaue Punkte: Ereignisbeprobung im 6-Stundentakt), Wassertemperatur (WT), elektrischer Leitfähigkeit (EC) und Lufttemperatur (AT) während einer Trockenperiode der untersuchten Quelle des aktiven Blockgletschers Ölgrube Süd, Kaunertal.

Der offensichtliche Unterschied in der Ausprägung eines Tagesganges der Blockgletscherquellen im Hochschobergebiet (keine Tagesschwankungen), im Bergli/Lareintal (angedeutete Tagesschwankungen) und in der Ölgrube Süd (deutliche Tagesschwankungen) lässt sich vermutlich auf den unterschiedlichen Kargletscheranteil der jeweiligen Einzugsgebiete zurückführen: der Ölgrube Süd Blockgletscher hat zwei Kargletscher in seinem Einzugsgebiet (~10 % der Gesamteinzugsgebietsfläche) von denen Gletscherabflüsse in den Blockgletscher beobachtbar sind. Beim Blockgletscher Bergli/Lareintal befindet sich noch ein kleiner Kargletscher im Übergangsbereich zum bzw. in der Wurzelzone des Blockgletschers selbst. Im Einzugsgebiet der Hochschoberblockgletscherquellen sind keine relevanten Kargletscher mehr vorhanden (ein Rest oberhalb des Barrensee). Dies zeigt beim Blockgletscher Ölgrube Süd die Relevanz der Kargletscher am Gesamtabfluss auf. Jedoch deutet dies auch darauf hin, dass in den jeweiligen Beobachtungszeiträumen der Einfluss von Schmelzwasser aus Permafrosteis sehr gering bzw. zumindest nicht eindeutig beobachtbar ist.

5.3.3 Hydrographanalyse

Auslaufverhalten:

Die verfügbaren Abflussganglinien der Pegelstationen der Blockgletscher Schöneben (reliktisch), Ölgrube Süd (aktiv), Bergli/Lareintal (aktiv), Äußeres Hochebenkar und Inneres Reichenkar (beide aktiv; ergänzende Untersuchungsgebiete im Ötztal; siehe Kapitel 8. Ergänzende Untersuchungen; Brodacz, 2019) wurden zur Hydrographanalyse herangezogen. Generell zeigen die Hydrographen der Blockgletscherquellen ein ähnliches Verhalten wie jene von Karstquellen mit relativ hohen Schüttungsquotienten (Inset der Abbildung 71).

Analysen der Trockenwetterfalllinien des Abflusses des Ölgrube Süd Blockgletschers lassen beispielhaft das Auftreten von zumindest zwei Abflusskomponenten erkennen, die durch das Vorhandensein von drei Teilbereichen einer halblogarithmischen Darstellung der Schüttung über die Zeit ableitbar sind. Für eine genaue Beschreibung und Diskussion der Analyse wird auf Winkler et al. (2016b) verwiesen, worin dies anhand des reliktischen Schöneben Blockgletscher detailliert beschrieben wird.

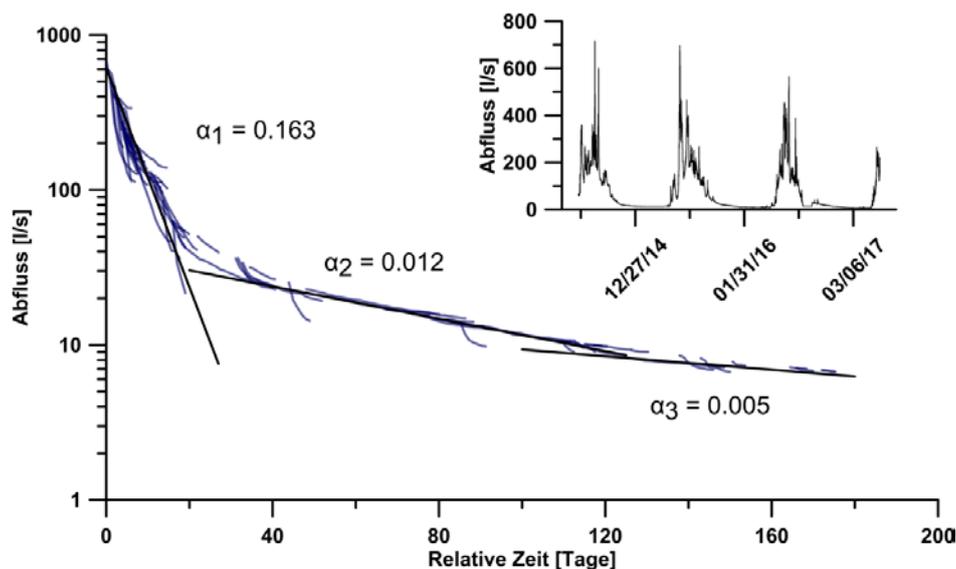


Abbildung 71: Trockenwetterfalllinien der Pegelstation Ölgrube Süd mit Daten aus dem Zeitraum 2014 bis 2017. Das Inset zeigt die Schüttungsganglinie der Pegelstation (modifiziert nach Heigert, 2018).

Abbildung 72 gibt einen Überblick über die jeweiligen Auslaufkoeffizienten (α -Werte) der drei Pegelstationen bzw. Blockgletscherquellen Inneres Reichenkar, Ölgrube Süd und Schöneben (Brodacz, 2019). Auswertungen des Äußeren Hochebenkars und von Bergli/Lareintal sind hier nicht dargestellt, da bei diesen Quellen der Basisabfluss aufgrund von Datenlücken nicht ausreichend abgebildet ist.

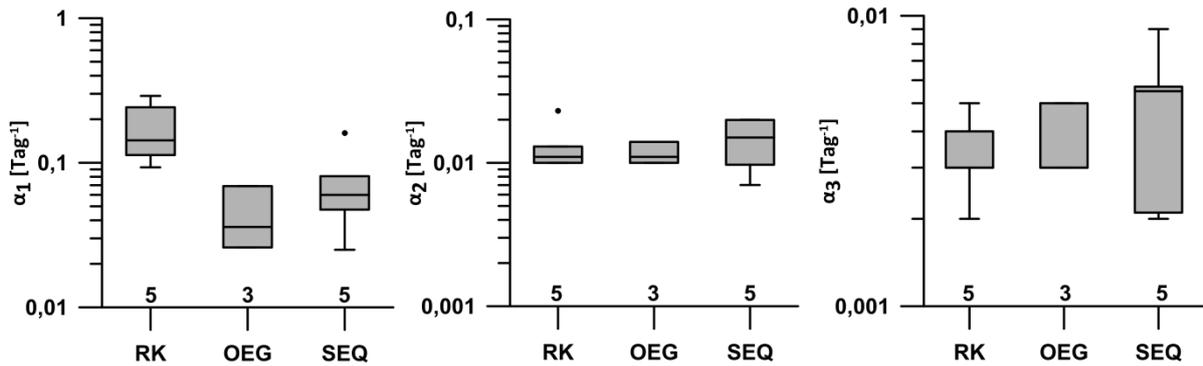


Abbildung 72: Auslaufkoeffizienten (α -Werte) der analysierten Blockgletscherquellen als Vergleich zwischen den einzelnen Gebieten (modifiziert nach Brodacz, 2019). RK = Inneres Reichenkar; OEG = Ölgrube Süd; SEQ = Quelle Schöneben Blockgletscher; Schwarze Punkte = statistische Ausreißer. Zu jeder Verteilung ist der Stichprobenumfang (ermittelte α -Werte) als Zahl angegeben.

Auffällig ist, dass generell die α_3 -Werte relativ klein sind und auf eine gute Speicherwirkung der Aquifere hinweisen. Dies spiegelt sich durch einen relativ ausgeprägten Basisabfluss wieder, der bei allen Blockgletschern (unabhängig ob reliktsch oder intakt) vorliegt. Dies ist in Übereinstimmung mit den elektrischen Leitfähigkeitswerten und den Ergebnissen der Isotopenanalyse der Quellwässer, die wiederum auf eine ausgeprägte Grundwasserkomponente hinweisen. Des Weiteren zeigen recht hohe α_1 -Werte eine schnelle Abflusskomponente aller untersuchten Blockgletscher an.

Die unterschiedlichen Abflusskomponenten wurde für den Schöneben Blockgletscher mit Hilfe eines mehrschichtigen Aufbaus oder durch präferentielle Fließwege erklärt (Pauritsch et al., 2017). Beide Möglichkeiten bzw. eine Kombination dieser sind auch für die aktiven Blockgletscher Ölgrube Süd und Inneres Reichenkar denkbar. Weitere Details werden im nächsten Kapitel 5.4.3 „Natürliche und künstliche Tracer“ angeführt.

Schwellenwertanalyse:

Eine weitere Beobachtung der Hydrographanalysen in Kombination mit Niederschlagsdaten erlaubt eine Auswertung bezüglich Schwellenwertanalyse (Harrington et al., 2018). Es deutet darauf hin, dass eine Quelle erst nach einer gewissen Anregung durch Niederschlag anspricht, zuvor aber noch unverändert bleibt, da sich gewissen Aquiferbereiche bzw. Muldenstrukturen (vorwiegend an der Aquiferbasis) erst auffüllen müssen, um ein Anspringen der Quelle zu erreichen („fill and spill hypothesis“ von Tromp-van Meervels & McDonnell (2006)).

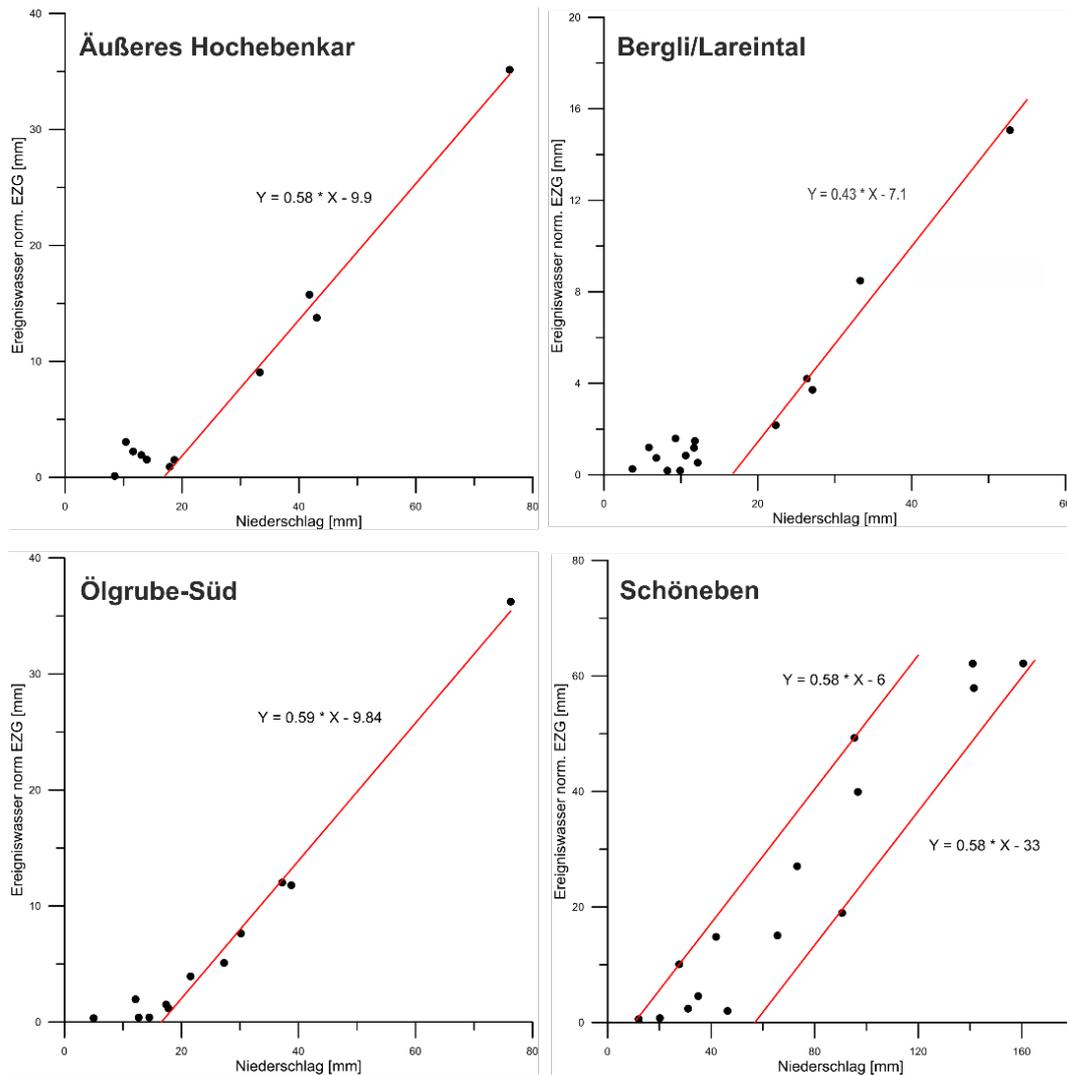


Abbildung 73: Schwellenwertermittlung der nötigen Niederschlagsmenge für einen merkbarer Quellschüttungsanstieg; Äußeres Hochebenkar, Bergli/Lareintal und Ölgrube Süd sind aktive Blockgletscher, Schöneben ist ein reliktscher Blockgletscher. Brodacz, 2019.

Die Ergebnisse der Schwellenwertanalyse zeigen, dass die aktiven Blockgletscher Äußeres Hochebenkar, Bergli/Lareintal und Ölgrube-Süd mit knapp unter 20 mm ähnliche Niederschlagsmengen benötigen, um einen merkbarer Schüttungsanstieg zu bewirken (Abbildung 73). Dies deckt sich auch mit Untersuchungen an einem inaktiven Blockgletscher in Canada (Harrington et al., 2018).

Die Ergebnisse für den reliktscher Schöneben Blockgletscher ergaben mit ca. 50mm mehr als den doppelten Schwellenwert, was einerseits auf das Nichtvorhandensein von Permafrost (-eis) zurück zu führen sein könnte. Andererseits aber darf der Einfluss der Topographie der Aquiferbasis nicht vernachlässigt werden. Diese ist durch eine ausgeprägte Übertiefung des Karbodens unter dem Blockgletscher im östlichen Teilbereich gekennzeichnet (Pauritsch et al., 2017), die einen entsprechende größeren Speicher darstellen

kann. Die Aquiferbasis der untersuchten intakten Blockgletscher ist, soweit bekannt (Hausmann et al., 2012), nicht von so einer Übertiefung betroffen. Auffallend ist, dass für alle Testgebiete die Steigung der Beziehung Niederschlagsmenge zu Ereigniswasseranteil nach dem Auffüllen etwaiger Speicher an der Basis in einer vergleichbaren Größenordnung vorliegt (rote Linien in Abbildung 73). Diese Steigungen entsprechen der Größenordnung von Harrington et al. (2018). Dies würde andeuten, dass die schnelle Fließkomponente in den hier analysierten Aquifere ähnlich ist; auch wenn es sich hier um einen reliktschen und drei aktive Blockgletscher handelt.

5.3.4 Natürliche und künstliche Tracer

Natürliche Tracer:

Die bereits vor Projektbeginn als stark Schwermetall belasteten Quellen KG 2, KG 3 und KG 4 des aktiven Krummgampen Blockgletschers im Kaunertal (Abbildung 17) wurden im Rahmen des Projekts weiter untersucht um die saisonale Variabilität der Schwermetallbelastung zu erfassen.

An der Quelle KG 2 wurde zusätzlich vom 13.10.2017 (letzte Probenahme für Wasserchemie) bis zum 25.10.2018 eine Temperatursonde installiert, die im Abstand von zwei Stunden die Wassertemperatur aufgezeichnet hat (Abbildung 74). Die Daten zeigen, dass die Quelltemperatur von Oktober bis Mitte Juli weniger als 1°C beträgt und die höchsten Werte (knapp 2°C) im August auftreten. Die tiefsten Werte wurden im März (unter 0,1 °C) und im Mittel der Beobachtungsperiode eine Temperatur von 0,56 °C gemessen. Die Wassertemperaturdaten deuten indirekt darauf hin, dass die Quelle im Winter nicht versiegt, was mit Beobachtungen des aktiven Blockgletschers Ölgrube Süd und Reichenkar konsistent scheint. Abbildung 74 zeigt die Quellwassertemperatur der KG 2 und die Parameter Ni/Mn/Al der Quellen KG 2 – 4 die über den Beprobungszeitraum genommen wurden. Hier ist hervorzuheben, dass es zwar eine gewisse Schwankung (Saisonalität?) in den Konzentrationen gibt, die Schwermetallbelastungen aber saisonal unabhängig markant hoch sind. Diese Erkenntnis diente auch als Basis für die Überlegung, vom ursprünglich im Projekt geplanten vierteljährlichen Probenahmerhythmus der Quellwässer abzuweichen und im Jahr 2018 eine Verdichtung durchzuführen.

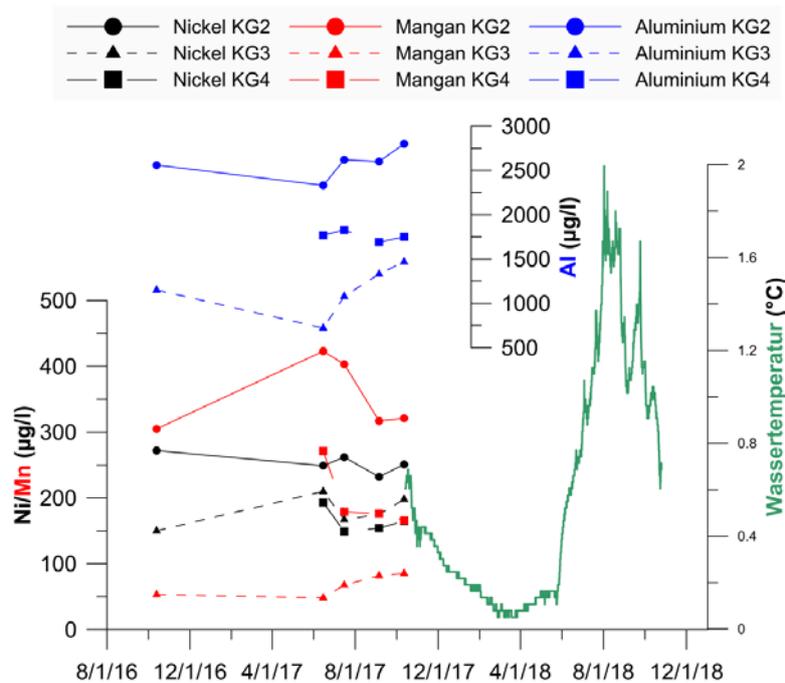


Abbildung 74: Wassertemperatur der KG 2 sowie Ni, Mn, Al Gehalte (in µg/l) anhand der Probenahmen an den Quellen KG 2, KG 3 und KG 4 des Krummgampen-Blockgletschers. Unterschiedliche Achsenskalierung von Ni/Mn und Al sind zu beachten.

Neben der Quellwassertemperatur ist vor allem die elektrische Leitfähigkeit ein wichtiger natürlicher Tracer; vor allem deswegen, weil sie in Kristallingebieten relativ zur Wassertemperatur als konservativ anzusehen ist (z.B. Winkler et al., 2016b).

Die Abbildungen 75-80 zeigen das dynamische Entwässerungsverhalten des Blockgletscherabflusses der Ölgrube Süd und erlauben unter Berücksichtigung der elektrischen Leitfähigkeit und einem Zwei-Komponenten-Mischmodell die Ausweisung einer Niederschlagskomponente (Eventwasser) bzw. einer länger gespeicherten Grundwasserkomponente. Die elektrische Leitfähigkeit des Quellwassers ist linear korreliert mit dem Grundwasseranteil, weshalb in den folgenden Abbildungen dies mit einer schwarzen Linie und zwei entsprechenden Achsen dargestellt werden kann (Abbildungen 75-80). Weiterführende Untersuchungen finden sich in Heigert (2018).

Abbildung 75 zeigt einen Überblick aller zur Verfügung stehenden Daten der Ölgrube Süd sowie über das dynamische Entwässerungsverhalten des Blockgletschers mit rasch ansteigenden Schüttungen nach einem Niederschlagsereignis und den damit verbundenen Einfluss auf die elektrische Leitfähigkeit. Aufgrund der alpinen Bedingungen und teilweise schwierigen Erreichbarkeit der Quelle bzw. des Pegels waren Datenlücken nicht vermeidbar. Auch ein teilweises Trockenfallen der Leitfähigkeitssonde lieferte unbrauchbare Daten. In den Abbildungen 76-80 wird näher auf einzelne Perioden eingegangen, für die durchgehende Datenreihen vorliegen und die eine Trennung von Eventwasser und länger gespeicherten Grundwasser erlauben.

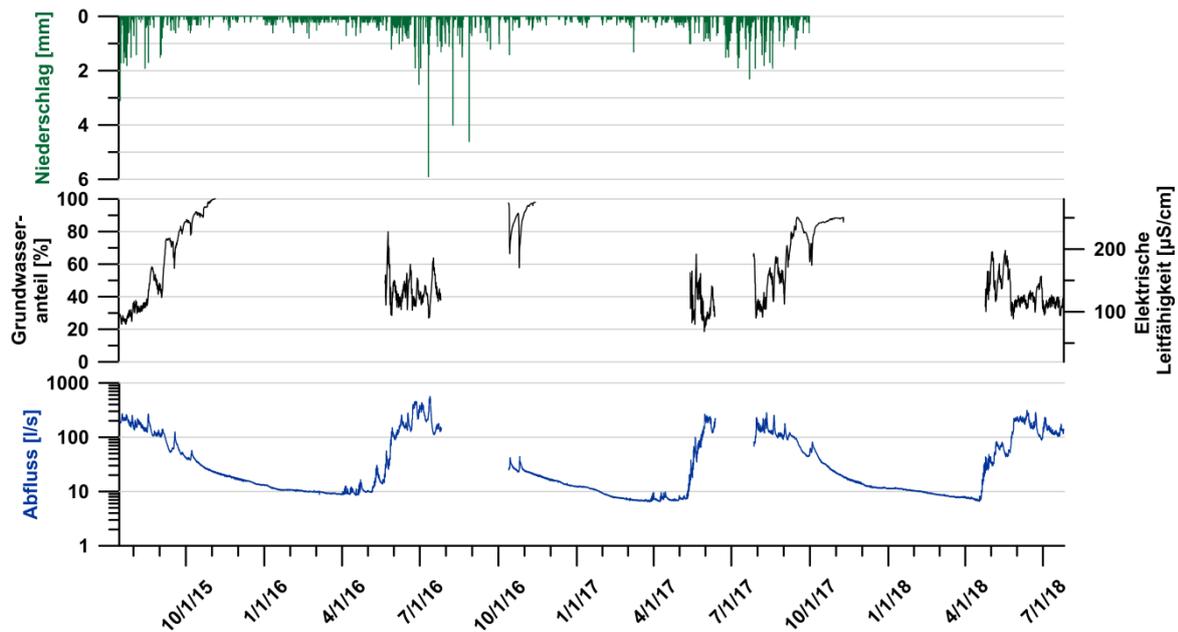


Abbildung 75: Trennung der Abflusskomponenten mittel Zwei-Komponenten-Mischmodell auf Basis der elektrischen Leitfähigkeit. Ergebnisse für die Pegelstation Ölgrube Süd von 15.7.2015 – 25.7.2018. Niederschlag der Station Weißsee (2464 m ü. A.), die von der TIWAG betreut wird und sich in 3,8 km Entfernung vom Blockgletscher befindet.

Abbildung 76 zeigt Schüttung und Grundwasseranteil im Sommer und Herbst 2015. Der Zeitraum Mitte Juli – Mitte August lässt tägliche Schwankungen (korrelieren invers mit der Schüttung) bei insgesamt leichtem Anstieg des Grundwasseranteils erkennen. Niederschlagsereignisse (Abflussspitzen) haben nur geringe Auswirkung auf die Zusammensetzung des Quellwassers. Das Verhalten ändert sich grundlegend während der ersten Septemberwoche: Tägliche Schwankungen sind kaum noch zu erkennen, während sich die Schüttung mit kontinuierlich steigendem Grundwasseranteil dem Basisabfluss nähert. Einzelne Niederschlagsereignisse haben starken Einfluss auf die Zusammensetzung des Wassers (bis zu 20 % Verringerung des Grundwasseranteils). Diese deutliche Änderung des Abflussverhaltens markiert den Übergang von der Niederschlags- und Schmelzwasser-dominierten Periode (Mai – August) zur von geringer Grundwasserneubildung geprägten (ab September).

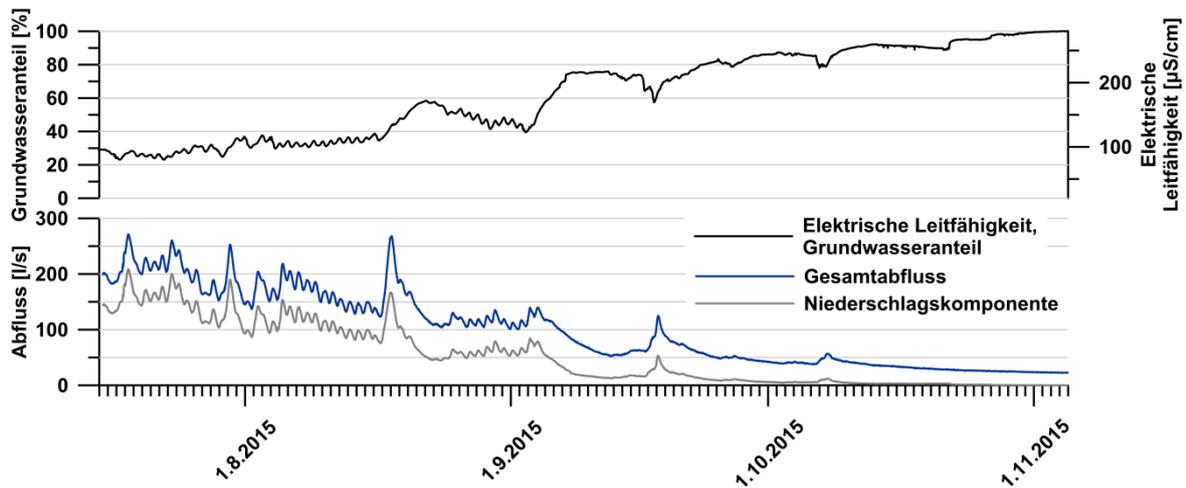


Abbildung 76: Trennung der Abflusskomponenten für die Pegelstation Ölgrube Süd von 15.7.2015 – 5.11.2015.

Abbildung 77 zeigt das Abflussverhalten während der Schneeschmelze im Frühsommer 2016. Die hohe Leitfähigkeit zu Beginn weist auf das Ausfließen gespeicherten Grundwassers infolge des vom infiltrierenden Schmelzwasser erhöhten hydraulischen Gradienten hin. Mit steigender Schüttung setzen ab Juni die täglichen Schwankungen des Grundwasseranteils ein, bei einem konstanten mittleren Anteil von ~ 40 %. Selbst markante Niederschlagsereignisse (z. B. Ende Juli) bewirken nur gedämpfte Änderungen der Mischungsanteile. Dagegen sind Phasen geringen Abflusses (z. B. um den 20.6. oder 17.7.) von deutlich erhöhtem Grundwasseranteil geprägt.

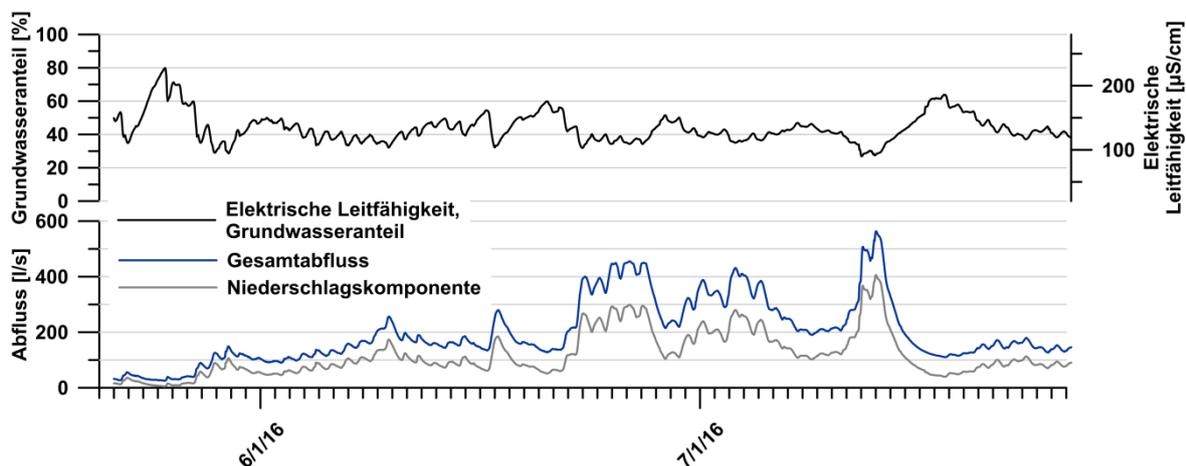


Abbildung 77: Trennung der Abflusskomponenten für die Pegelstation Ölgrube Süd von 21.5.2016 – 26.7.2016.

Abbildung 78 zeigt den Einfluss der Schneeschmelze im Frühsommer 2017. Mit dem starken Schüttungsanstieg Anfang Juni fällt der Grundwasseranteil aufgrund des Schmelzwasserandrangs auf ~ 20 %.

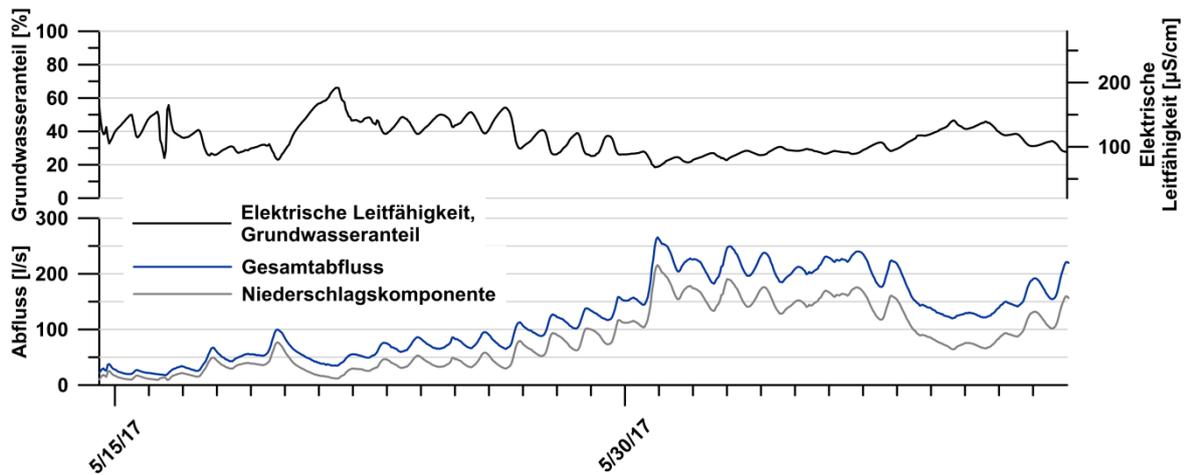


Abbildung 78: Trennung der Abflusskomponenten für die Pegelstation Ölgrube Süd von 14.5.2017 – 12.6.2017.

Abbildung 79 zeigt das Abflussverhalten im Sommer und Herbst 2017. Die täglichen Schwankungen (während der vom Eisschmelzwasser geprägten Grundwasserneubildung im August) sind als Inset hervorgehoben. Die negative Korrelation der elektrischen Leitfähigkeit mit der Quellschüttung stimmt sehr gut mit den während dieses Zeitraums hochaufgelöst gewonnenen und in Kapitel 5.3.2 besprochenen Isotopen- und Temperaturdaten überein (Abbildung 70). Der Übergang von Grundwasserneubildungs- zu Baseflow-dominierter Periode Anfang September (Ende der täglichen Schwankungen, kontinuierliche Zunahme des Grundwasseranteils, deutlicher Einfluss einzelner Niederschlagsereignisse) entspricht dem im Vorjahr beobachteten und oben beschriebenen Verhalten.

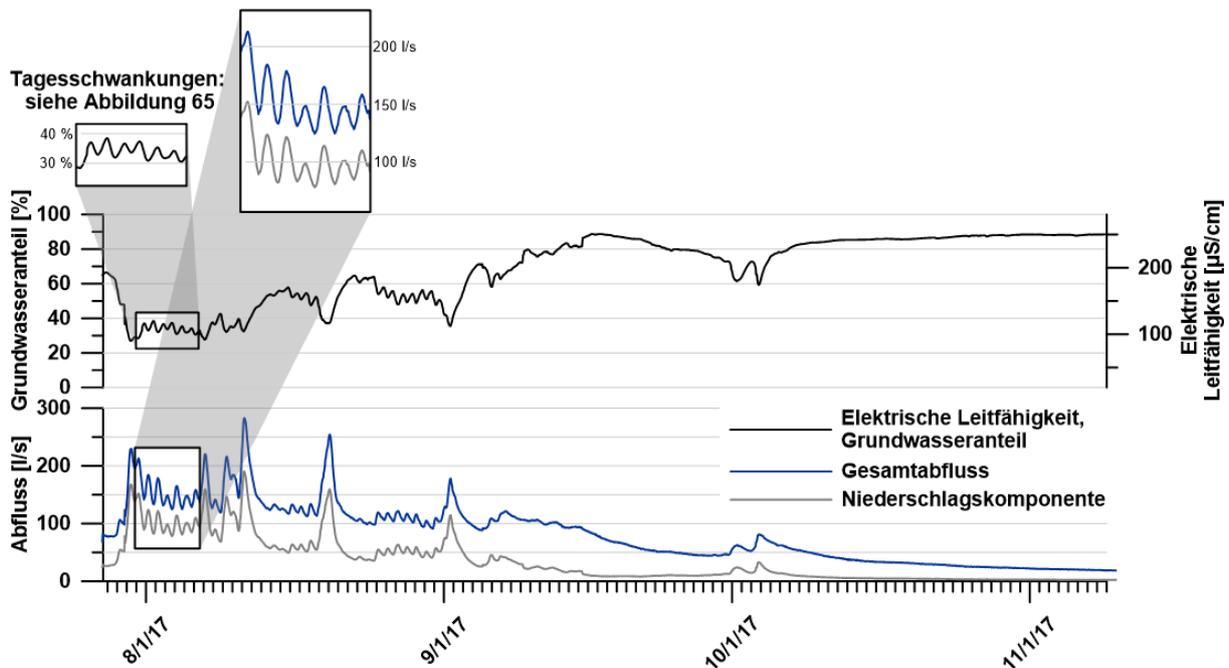


Abbildung 79: Trennung der Abflusskomponenten für die Pegelstation Ölgrube Süd von 27.7.2017 – 9.11.2017. Tagesschwankungen während einer Trockenperiode in diesem Zeitraum wurden in Kapitel 5.3.2 erläutert.

Abbildung 80 zeigt die aktuellste kontinuierliche Datenreihe aus dem Jahr 2018. Das Abflussverhalten während der Schneeschmelze sowie während des Sommers bestätigt die Beobachtungen der vorangegangenen Jahre.

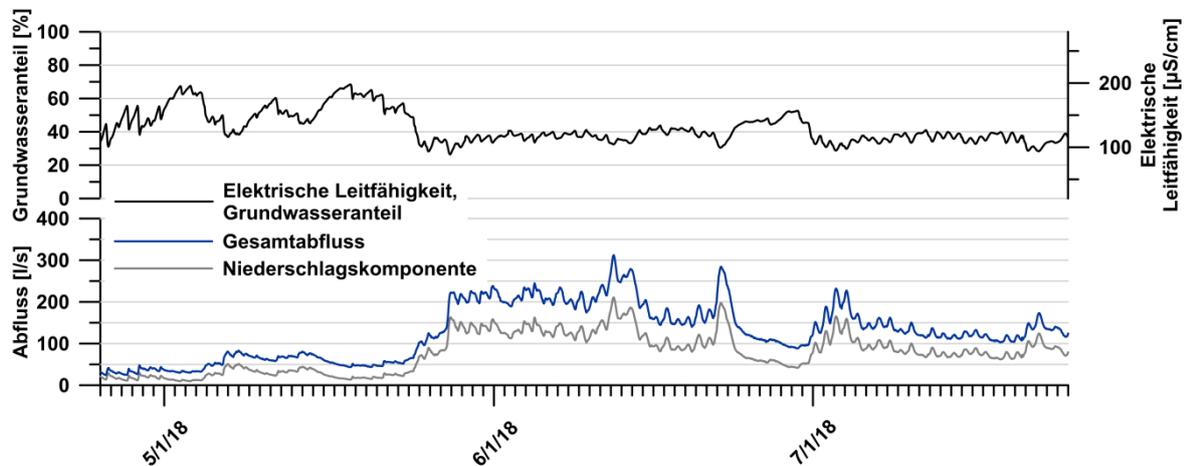


Abbildung 80: Trennung der Abflusskomponenten für die Pegelstation Ölgrube Süd von 25.4.2018 – 25.7.2018.

Weitere Messungen der elektrischen Leitfähigkeit vom Kargletscher (Schmelzwasser des Kargletschers) bis hin zur Wurzelzone des Blockgletschers (z.B. Gerinne in dem der künstliche Tracer Uranin eingespeist wurde; „E“ in Abbildung 9; Heigert, 2018) zeigten teilweise erhöhte Werte relativ zu denen der Quellwässer (maximaler Wert von 281 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Werte bis hin zu 505 $\mu\text{S}/\text{cm}$ etwas oberhalb der Tracereingabestelle sind auffällig. Sehr niedrige elektrische Leitfähigkeiten der Schmelzwässer des Kargletschers (1.2 – 4 $\mu\text{S}/\text{cm}$) stehen diesen Beobachtungen gegenüber. Ob diese hohen Werte auch mit Schwermetallbelastungen korrelieren, konnte nicht mehr untersucht werden; die Quellwässer des Ölgrube Süd Blockgletschers weisen allerdings keine Ni/Mn/Al Werte über den Grenzwerten auf.

Künstliche Tracer:

Im Rahmen dieses Projekts wurden zwei Markierungsversuche am Blockgletscher Ölgrube Süd (2017) und einer am Blockgletscher Bergli/Lareintal (2017) durchgeführt. Beide Versuche wurden ergänzend im Zuge von Masterarbeiten durchgeführt, wobei der Versuch am Blockgletscher Bergli/Lareintal noch nicht zur Gänze ausgewertet und somit in diesem Bericht nicht berücksichtigt ist. Ergänzend liegen Ergebnisse eines vorangegangenen Markierungsversuchs (2015) am Blockgletscher Ölgrube Süd vor.

Beim Tracerversuch 2015 am Blockgletscher Ölgrube Süd (Rieder, 2017) wurde sowohl Uranin als auch Sulforodamin-B an unterschiedlichen Eingabestellen eingespeist. Sulforodamin-B, welches in der Wurzelzone der südlichen Blockgletscherzunge eingebracht wurde, konnte nicht detektiert werden. Ein Verbleiben in der ungesättigten Zone ist nicht auszuschließen, aber nachdem die

Einspeisung an einem kleinen Gerinne aus dem dahinterliegenden Kar eingebracht wurde, ist eher anzunehmen, dass der Tracer sich im Grundwasser unter die Nachweisgrenze verdünnt hat und ein Nachweis an der Quelle im Beobachtungszeitraum nicht möglich war.

Die Tracerversuche aus den Jahren 2015 und 2017 am Blockgletscher Ölgrube Süd (Rieder, 2017; Heigert, 2018) ergab ein Erstauftreten des Markierungsstoffes Uranin (vergleichbare Eingabestellen entlang eines Rinnsals; 2015 etwas weiter oben) an der Quelle nach 2 h 40 min bzw. 2 h 34 min. Daraus lässt sich bei einem Abstand zwischen Eingabestelle und Quelle von ca. 1060 bzw. 850 m eine maximale Abstandsgeschwindigkeit v_{\max} von ca. 0,110 bzw. 0,092 m/s berechnen. Die Spitze der Tracerkonzentrationen tritt nach ca. 4,67 bzw. 5,33 h (2017, Abbildung 81) auf. Das ergibt für die modale Abstandsgeschwindigkeit 2015 und 2017 Werte von 0,066 bzw. 0,044 m/s. Die mediane Geschwindigkeit wird durch den Zeitpunkt $t_{0,5}$, d.h. 50% der Uranin-Einspeismenge bestimmt und beträgt 0,036 bzw. 0,037 m/s. Die mittlere Abstandsgeschwindigkeit errechnet sich aus dem Mittel aller drei Einzelgeschwindigkeiten und weist somit einen Wert von 0,07 bzw. 0,06 m/s für die Versuche von 2015 und 2017 auf (Tabelle 11).

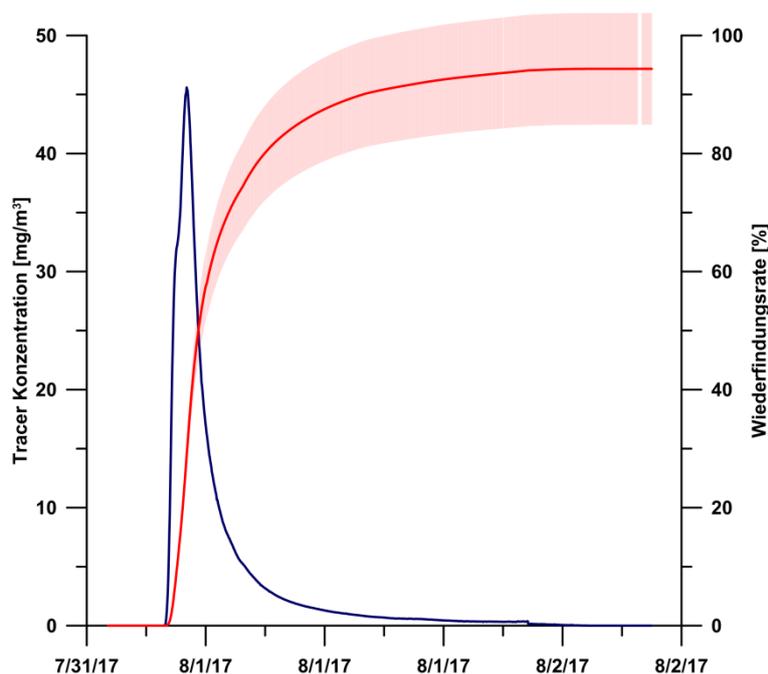


Abbildung 81: Konzentrationsverlauf des Markierungsstoffes Uranin sowie die kumulative Wiederfindung des Versuchs aus dem Jahr 2017 (Heigert, 2018). Die Wiederfindungsrate ist mit 10 % Fehlerbalken angegeben, um Unsicherheiten bzgl. des Abflusses während des Versuchs abzubilden.

Tabelle 11: Abstandsgeschwindigkeiten (m/s) errechnet aus der Tracerdurchgangskurven von den Markierungsversuchen 2015 und 2017 der Ölgrube Süd (Uranin).

Geschwindigkeiten (m/s)	Ölgrube Süd 2015	Ölgrube Süd 2017
Maximale Abstandsgeschwindigkeit	0,110	0.092
Modale Abstandsgeschwindigkeit	0,066	0,044
Mediane Abstandsgeschwindigkeit	0,036	0,037
Mittlere Abstandsgeschwindigkeit	0,07	0,06

Die Wiederfindungsraten betragen ca. 55 % bzw. mindestens 85 % der Eingabemenge (Abbildung 81). Der relativ niedrige Wiederfindungswert aus dem Jahr 2015 kann darauf zurückzuführen sein, dass ein Teil der eingespeisten 25 g des Farbtacers im Eis bzw. im Untergrund festgehalten und/oder später unterhalb der Nachweisgrenze (oder nach Beendigung der Messung) wieder abgegeben wurde. Eine UV-bedingte Zersetzung des Uranins in Nahbereich des Einspeisungspunktes wird als vernachlässigbar angesehen. Beim Versuch 2017 kann aufgrund der Unsicherheiten der Schüttungswerte von mindestens 85 bis hin zu einer 100 % Wiederfindung ausgegangen werden (Einspeismenge des Tracers im Vergleich zu 2015 eine Größenordnung mehr: 202.5g).

Die für das Aquifermaterial charakteristische hydraulische Durchlässigkeit (Durchlässigkeitsbeiwert, K) beträgt bei einer angenommenen effektiven Porosität von 0.2 und einem hydraulischen Gradienten (Höhendifferenz = 300 bzw. 290 m durch Fließstrecke = 1060 bzw. 850 m) von 0.28 bzw. 0.34 ca. $7,8 \times 10^{-2}$ bzw. $5,3 \times 10^{-2}$ m/s.

Die beiden Markierungsversuche deuten auf eine schnelle Komponente des Aquifers hin, welche durch das Einspeisen beim Gletscherbach durch den Blockgletscher verfolgt wird. Die langsame Komponente (Basisabfluss) wurde durch diese zwei Versuche nicht erfasst bzw. wurde aufgrund der begrenzten Dauer der Markierungsversuche ein späteres Auftreten der restlichen Tracermenge nicht mehr aufgezeichnet.

5.4 Niederschlags-Abflussmodellierung

5.4.1 Methode

Um das Auslaufverhalten von Blockgletscherquellen und im weiteren Sinne auch die Abflussdynamik von unterstromigen, von Blockgletschern beeinflussten, alpinen Einzugsgebieten besser zu verstehen, wurde ein globales (lumped-parameter) Niederschlags-Abflussmodell (N-A-Modell GR4J+; Wagner et al., 2016) und Erweiterungen davon angewandt. Der Modellansatz hat sich in alpinen Einzugsgebieten, bei denen meist eine begrenzte Datengrundlage vorliegt, bewährt (Wagner et al., 2013, 2016) und wurde im Rahmen dieses Projekts dahingehend erweitert, dass neben einem Schneemodul ein Eisspeicher hinzugefügt wurde (Abbildung 82). Dieser Ansatz ist basierend auf einem Tag-Grad-Ansatz ident dem Schneemodul und vergleichbar mit dem Ansatz von Nepal et al. (2017). Somit können intakte Blockgletscher und potentiell im Einzugsgebiet befindliche Kargletscher mitberücksichtigt werden. Des Weiteren wurde ein semi-distributiver Ansatz gewählt, um die Beeinflussung der Blockgletscher stromabwärts quantifizieren zu können (Wagner et al., 2016).

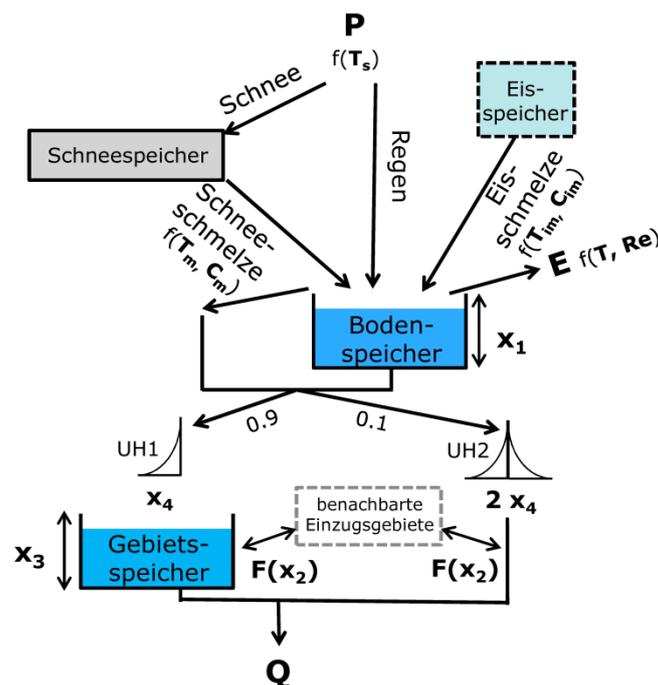


Abbildung 82: Modellstruktur des Niederschlags-Abfluss-Modells GR4J+ auf Tagesbasis mit Erweiterung eines Eisspeichers (modifiziert nach Wagner et al., 2016). T_s = Lufttemperatur unter der Niederschlag als Schnee fällt; T_m = Lufttemperatur über der Schnee zu schmelzen beginnt; C_m = Schneeschmelzkoeffizient der angibt wie viel Schnee pro °C Temperaturanstieg schmelzen kann; T_{im} = Lufttemperatur über der Eis zu schmelzen beginnt; C_{im} = Eisschmelzkoeffizient der angibt wie viel Eis pro °C Temperaturanstieg schmelzen kann; Re = extraterrestrische Strahlung; x_1 = maximale Kapazität des Bodenspeichers (production store); x_2 = Wasseraustauschkoeffizient; x_3 = maximale Kapazität des Gebietsspeichers (routing store); x_4 = zeitlicher Verzögerungsterm; UH1 und UH2 = Einheitshydrograph um für die zeitliche Verzögerung zwischen Niederschlagsereignis und Abfluss auf Basis des Verzögerungsterms x_4 zu sorgen.

Als Eingangsdaten für Lufttemperatur und Niederschlag in das N-A-Modell sind sowohl punktuelle (höhenkorrigierte) Wetterstationsdaten als auch flächenhaft vorliegende Rasterdatensätze geeignet (Wagner et al., 2016). Im konkreten Fall wurden in Gebieten ohne Stationsdaten auf den Rasterdatensatz „Schöner-ZAMG-Datensatz“ (Schöner & Dos Santos Cardoso, 2004) zurückgegriffen, in dem Daten bis April 2007 vorliegen.

In Wagner et al. (2016) konnte erfolgreich die Abflussdynamik des reliktschen Schöneben Blockgletschers simuliert werden und im übergeordneten Einzugsgebiet der Liesing (Pegel Unterwald) die Beeinflussung der reliktschen Blockgletscher quantitativ erfasst werden. Diese Analyse zeigt, dass reliktsche Blockgletscher in einem übergeordneten Einzugsgebiet einen auf Tagesbasis bis mehr als vierfachen Abflussanteil relativ zum bedeckenden Einzugsgebietsanteil aufweisen können. Bis zu 52 % des Abflusses an der Pegelstation Unterwald an einem bestimmten Tag ist durch reliktsche Blockgletscher bedingt, welche nur einen 12 % Anteil an der Einzugsgebietsfläche haben. Der höchste Anteil des langjährigen monatlichen Mittels liegt mit 23 % im Mai.

Im Zuge des Projekts soll daher das N-A-Modell

- (i) einerseits auf weitere übergeordnete Einzugsgebiete getestet werden, um die Beeinflussung von Blockgletschern auf die Abflussdynamik alpiner Einzugsgebiete im regionalen Maßstab besser zu verstehen.
- (ii) Andererseits soll das Modell für Abflüsse von intakten Blockgletschern Anwendung finden, um deren Abflussverhalten besser zu verstehen und zur Aquifercharakterisierung beizutragen.

Aufbauend auf den Ergebnissen von Winkler et al. (2016a) wurde die Beeinflussung der Blockgletscher auf übergeordneten Einzugsgebieten für die Pegelstationen Hammerjäger (Ingeringbach; 198,5 km²) und Tetter (Unterthalerbach; 63,3 km²), beide in der Steiermark befindlich, fortführend untersucht. Dieser Ansatz soll in künftigen Projekten auf regionale Einzugsgebiete angewandt werden, die von Permafrost beeinflusst sind und bspw. intakte Blockgletscher beinhalten. Dazu muss zuerst ein gutes Verständnis des Abflussverhaltens intakter Blockgletscher (Ölgrube Süd, Bergli, etc.) vorliegen; um deren Beeinflussung sinnvoll abbilden zu können.

Mehrjährige Pegeldata (1.6.2014-12.6.2017; jedoch lückenhaft) der Blockgletscherquellen der Ölgrube Süd (Kaunertal; Nordtirol) sowie Lufttemperatur- und Niederschlagsdaten der Wetterstation Weisssee (2464 m ü.A.; von der TIWAG freundlicherweise zur Verfügung gestellt) in relativer Nahelage erlauben eine erste Anwendung des N-A-Modells im lokalen Maßstab (1,83 km² Einzugsgebietsgröße) unter relativ komplexen Bedingungen, da es sich hierbei um einen aktiven Blockgletscher handelt, dessen Abfluss zusätzlich von Kargletschern gespeist wird (siehe Kapitel 3.2.2). Der flächenhafte Anteil der

Kargletscher im Einzugsgebiet beträgt etwa 10 % und bedarf der Berücksichtigung mittels eines Eisspeicher Moduls. Des Weiteren gibt es in diesem lokalen Untersuchungsgebiet zusätzliche Daten von natürlichen und künstlichen Tracer die im Rahmen dieses Projekts erhoben wurden. Die N-A-Modellierung komplementiert somit die Einzugsgebietscharakterisierung dieser Blockgletscherquellen der Ölgrube Süd.

5.4.2 Ergebnisse

Das N-A-Modell GR4J+ (Wagner et al., 2016) erweitert mit einem Eisspeicher-Modul konnte erfolgreich für den Pegel Ölgrube Süd angewandt werden. Niederschlag und Lufttemperatur wurden auf die mittlere Einzugsgebietshöhe von 2887 m ü.A. korrigiert (Kuhn, 2012; Kuhn et al., 2013). Ein zufriedenstellender visueller Fit der simulierten und beobachteten Abflüsse sowie mittlere Nash-Sutcliffe Effizienzkriterien (\overline{NSE}) (Nash und Sutcliffe, 1970; Wagner et al., 2016) von 88 % und einer Wasserbilanz von 99.8 % zeigen die Anwendbarkeit des Modellansatzes (und der Eingangsdaten).

Abbildung 83 zeigt beobachtete und simulierte Abflüsse sowie die Inputdaten des Niederschlags. Das N-A-Modell erlaubt weiters eine Trennung der Eingangswassermenge (Abbildung 84) in Regen (~40 %), Schnee (~35 %) und Eis (~25 %). Wichtig hierbei ist zu erwähnen, dass Eisschmelze zum Großteil den Kargletschern zuzurechnen ist und die Permafrosteis-Komponente mit dieser Datengrundlage und der Modellstruktur noch nicht getrennt aufzeigbar ist.

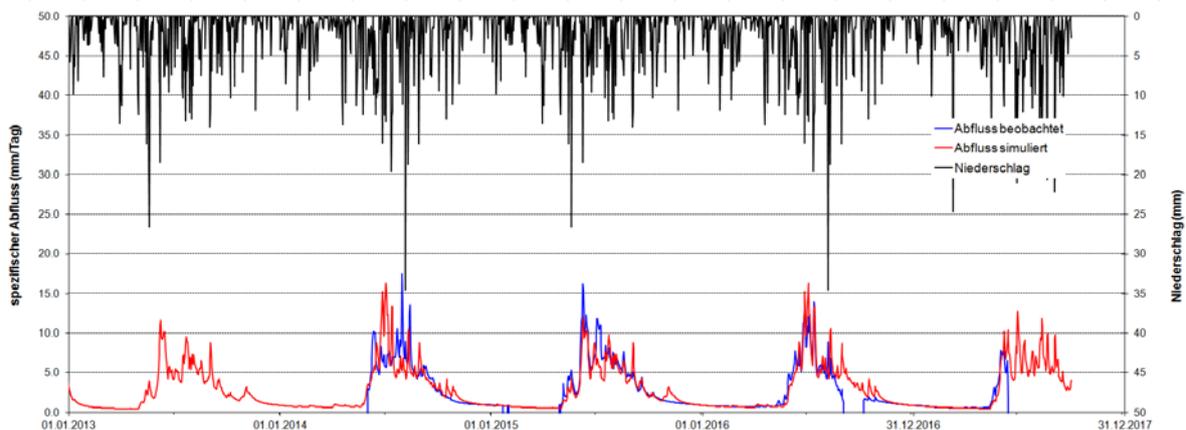


Abbildung 83: Beobachteter und simulierter Abfluss der Ölgrube Süd sowie Niederschlagsdaten der Station Weisssee (höhenkorrigiert).

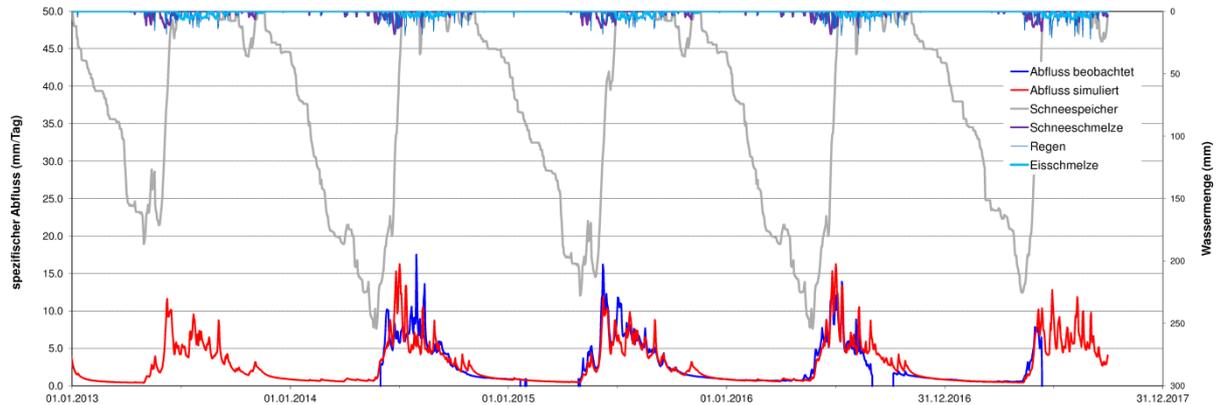


Abbildung 84: Beobachteter und simulierter Abfluss der Ölgrube Süd sowie die Eingangswassermenge getrennt in Regen, Schnee und Eis sowie die Schneemenge des Schneespeichers.

Eine interessante Beobachtung ist ein ausgeprägter Basisabfluss in den Wintermonaten, der auch vom N-A-Modell gut wieder gegeben wird. Abbildung 85 zeigt die Veränderung des Abflussverhaltens am Pegel der Ölgrube Süd, wenn der Eisspeicher nicht mehr vorliegen würde; sprich ein fiktives Abschmelzen der Kargletscher bereits passiert wäre. Alle anderen Parameter im Modell wurden aber nicht verändert.

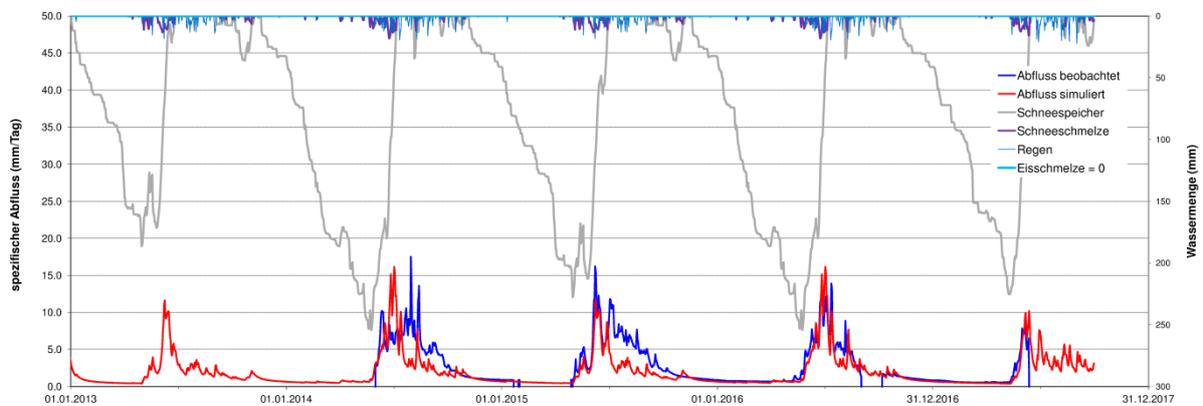


Abbildung 85: Beobachteter und veränderter simulierter Abfluss der Ölgrube Süd, der sich anhand der Eliminierung des Eisspeichers ($Eisschmelze = 0$) ergibt.

Das Modell zeigt einerseits einen Rückgang des Abflusses in den Sommermonaten (Juli – September), andererseits aber keine Veränderung des Basisabflusses in den Wintermonaten. Dies ist ein weiteres Indiz, dass auch intakte Blockgletscher eine durchaus relevante Grundwasserkomponente aufweisen können, wie dies bereits bei reliktschen Blockgletschern dargestellt werden konnte (Wagner et al., 2016; Winkler et al., 2016b; Pauritsch et al., 2017). Diese Erkenntnis deckt sich auch mit den isopenhydrologischen Untersuchungen (siehe Kapitel 5.3.2) und unterstreicht somit die wasserwirtschaftliche Relevanz von Blockgletschern im

Allgemeinen (reliktisch und intakt) hinsichtlich Speicher- und Pufferwirkung. Eine Berücksichtigung des abschmelzenden Permafrosteises in intakten Blockgletschern ist bisweilen noch nicht berücksichtigbar und bedarf weiterführender Untersuchungen (idealerweise an intakten Blockgletschern ohne Kargletscheranteil in deren Einzugsgebiet).

Um die übergeordnete Relevanz von Blockgletscherabflüssen auf darunterliegende Einzugsgebiete zu verdeutlichen, wurde ergänzend zu den Untersuchungen von Wagner et al. (2016) und Winkler et al. (2016a) die Pegelstation Hammerjäger des Ingeringbachs (198.5 km²; Seckauer Tauern) sowie die Pegelstation Tetter des Unterthalerbachs (63.3 km²; Schladminger Tauern) mit einem semidistributiven Ansatz (GR4J+sd; Wagner et al., 2016) ausgewertet. D.h. dass Modellparameter der Quelle des reliktischen Schönebenen Blockgletschers (grünes Polygon in Abbildungen 86 und 87) herangezogen wurden, um den Abfluss der reliktischen Blockgletscher im Einzugsgebiet der Pegels Hammerjäger und Tetter zu modellieren.

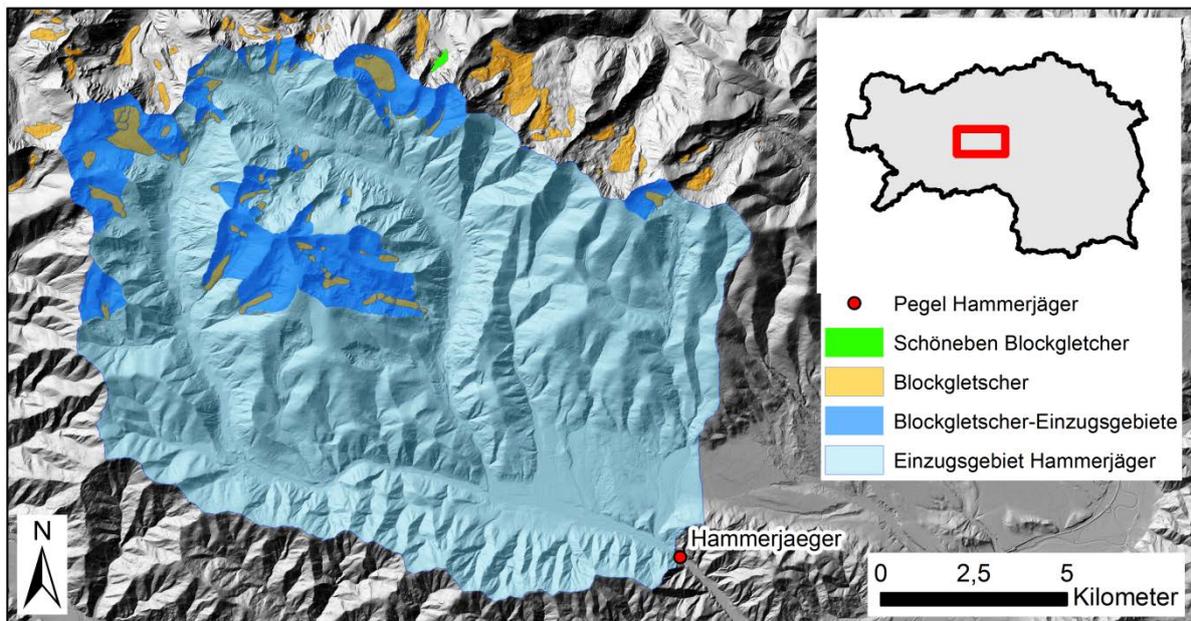


Abbildung 86: Lage des Pegels Hammerjäger (Ingeringbach) und das dazugehörige Einzugsgebiet inklusive der Blockgletscher in dem Gebiet und die relevanten Blockgletschereinzugsgebiete die mittels semidistributiven Ansatz im N-A-Modell berücksichtigt werden. Der Schönebenen Blockgletscher in einem benachbarten Einzugsgebiet ist hervorgehoben (grünes Polygon).

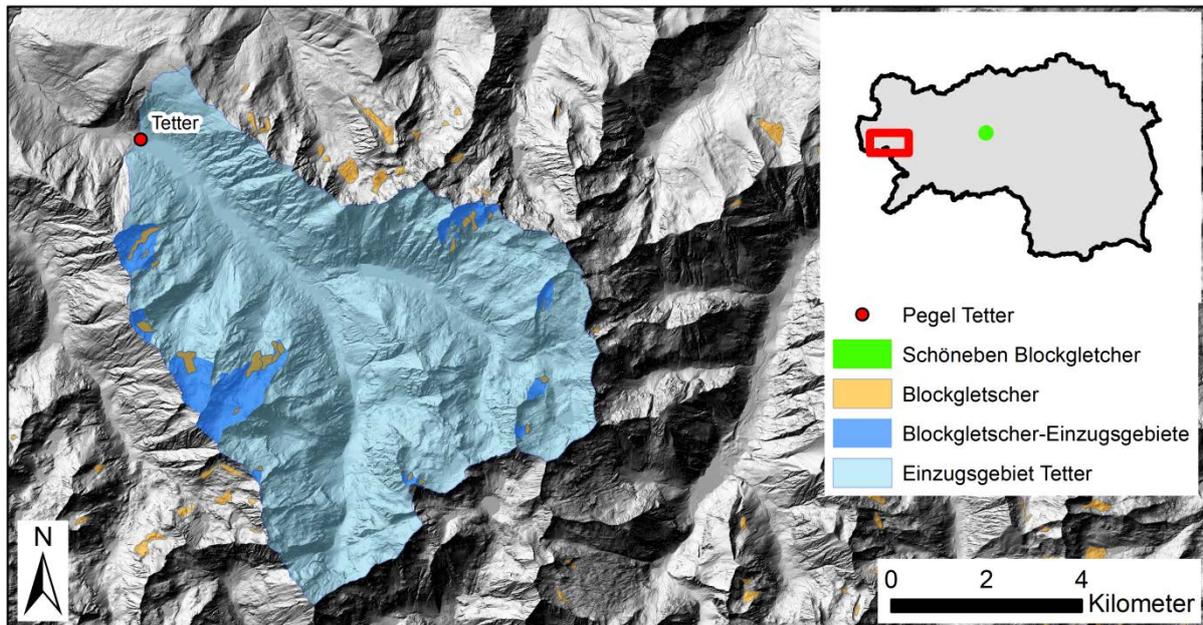


Abbildung 87: Lage des Pegels Tetter (Unterthalerbach) und das dazugehörige Einzugsgebiet inklusive der Blockgletscher in dem Gebiet und die relevanten Blockgletschereinzugsgebiete die mittels semidistributiven Ansatz im N-A-Modell berücksichtigt werden. Die Lage des Schöneben Blockgletschers ist im Inset als grünes Polygon hervorgehoben (siehe Abbildung 86 für die genaue Lage).

Diese Abflüsse können dann explizit im N-A-Modell der Einzugsgebiete Hammerjäger und Tetter berücksichtigt werden. Es wurden hier zwei Varianten des Vergleichs der Blockgletscherabflüsse mit dem Gesamtabfluss am jeweiligen Pegel gewählt:

(i) ein direkter Vergleich, in dem der Abfluss der Blockgletscher(-einzugsgebiete) direkt dem Gesamtabfluss gegenüber gestellt wird; und (ii) ein Vergleich, bei dem zuerst der Abfluss der Blockgletscher (-einzugsgebiete) durch das restliche Einzugsgebiet durchgeleitet („routing“) wird; ohne in diesem Niederschlag zu berücksichtigen. Variante (i) berücksichtigt nicht, dass die Blockgletscherabflüsse noch das restliche Einzugsgebiet passieren müssen. Variante (ii) berücksichtigt zwar, dass die Blockgletscherabflüsse das restliche Einzugsgebiet passieren, dies geschieht aber bei geringerer Wassermenge in den jeweiligen Speichern, da der Niederschlag des restlichen Einzugsgebiets nicht miteinbezogen wird. Somit ergeben diese zwei Varianten eine Bandbreite der möglichen Beeinflussung.

Für das Einzugsgebiet des Pegels Hammerjäger ist der \overline{NSE} des semidistributiven Modellansatzes unter expliziter Berücksichtigung der Einzugsgebiete der reliktschen Blockgletscher (mit den Parameterwerten der Quelle des Schöneben-Blockgletschers) minimal besser als bei Nichtberücksichtigung der Blockgletschereinzugsgebiete (Anstieg von 77 auf 78 % \overline{NSE} ; Vergleich zu Winkler et al., 2016a), welche flächenhaft für dieses Einzugsgebiet immerhin 19.6 % ausmachen. Für das Einzugsgebiet des Pegels Tetter ergibt sich ein \overline{NSE} von 75 %, was eine Verbesserung zur Nichtberücksichtigung der Blockgletscher von 1 % ist (\overline{NSE} von 74 %; siehe Winkler et al., 2016a). Der Flächenanteil der Blockgletscher

beeinflussten Einzugsgebietsfläche ist hierbei nur 7.7 %. Des Weiteren muss hier erwähnt werden, dass fünf der insgesamt 21 Blockgletscher in diesem Einzugsgebiet als intakt ausgewiesen sind und somit Permafrost-Eis beinhalten, was wiederum die Unsicherheit der Modellierung bei Verwendung der Modellparameter des reliktschen Schöneben Blockgletschers erhöht.

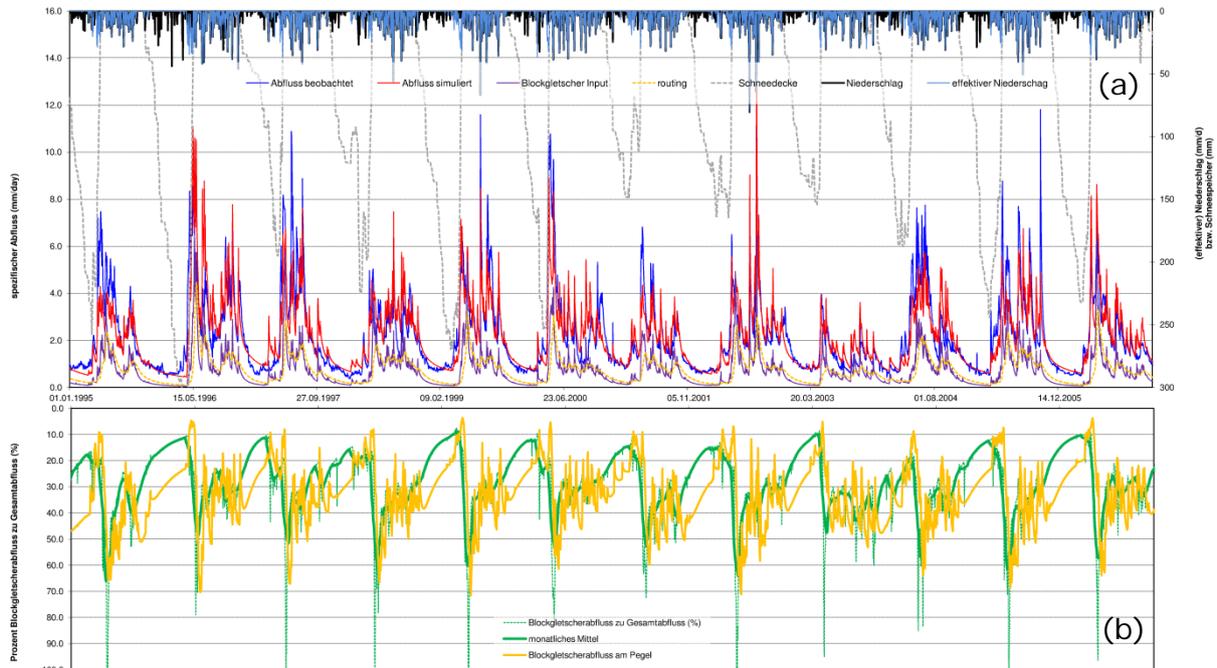


Abbildung 88: (a) Beobachteter und simulierter Abfluss des Pegels Hammerjäger (Ingeringbach), der Abfluss der Blockgletscher in diesem Einzugsgebiet ohne (Variante (i)) und mit Durchleitung („routing“; Variante (ii)) durch das restliche Einzugsgebiet sowie Niederschlagsdaten und Mächtigkeit der Schneedecke (in mm Wasserequivalent). (b) Prozentueller Anteil der blockgletscherbeeinflussten Abflüsse am Gesamtabfluss; einmal direkt verglichen (grün; Variante (i)), einmal nach Berücksichtigung der Durchleitung dieser Abflüsse durch das restliche Einzugsgebiet (gelb, Variante (ii)).

Abbildung 88 zeigt die N-A-Modellierung des Pegels Hammerjäger (Ingeringbach) unter Berücksichtigung der Blockgletscher mittels semidistributiven Ansatzes (Wagner et al., 2016). Um eine quantitative Aussage über den Anteil der blockgletscherbeeinflussten Abflüsse in diesem Einzugsgebiet machen zu können, wurde einerseits der Abfluss der Blockgletscherquellen direkt dem zu diesem Zeitpunkt auftretenden Gesamtabfluss gegenüber gestellt. Des Weiteren wurde der Blockgletscherabfluss durch das restliche Einzugsgebiet geleitet, um die zeitliche Verzögerung in diesem, immerhin 198.5 km² großen Einzugsgebiet zu berücksichtigen und dann erst wurde der Vergleich mit dem Gesamtabfluss errechnet. Diese zwei Ansätze bilden eine maximale Bandbreite der Beeinflussung ab. Jedoch zeigt ein anteiliger Blockgletscherabfluss von mehr als 100% an einzelnen Tagen (Monat Mai) am Gesamtabfluss der Variante (i), dass der Variante (ii) hier mehr Bedeutung zukommen sollte, was auch durch die Größe des Einzugsgebiets sinnvoll erscheint.

Ebenso sei klargestellt, dass die Berücksichtigung der Verzögerung durch das restliche Einzugsgebiet als Näherung vermutlich zu stark ausgeprägt ist. Im Mittel ist der Anteil des blockgletscherbeeinflussten Abflusses bei 32,8 %, was wiederum die relative Höhenlage der Blockgletschereinzugsgebiete zum Gesamteinzugsgebiet widerspiegelt. Die täglichen Schwankungen des blockgletscherbeeinflussten Anteils beträgt 3.6 % bis 71.5 % bei Berücksichtigung der Durchleitung durch das restliche Einzugsgebiet. Dies bedeutet, dass am Pegel Hammerjäger an einzelnen Tagen (Ende Mai, Anfang Juni) der Ingeringbach einen blockgletscherbeeinflussten Anteil von bis zu 71 % aufweisen kann, was wiederum das gut Dreifache, fast Vierfache des flächenhaften Anteils ausmacht.

Eine hohe Beeinflussung ist aber nicht nur am Ende bzw. gleich nach der Schneeschmelze zu beobachten, sondern auch in den Sommermonaten, wenn andere Kristallinquellen oft nur mehr wenig Wasser schütten (Untersweg und Schwendt, 1995, 1996). Betrachtet man die langjährigen Monatsmittelwerte, so ist im Juni ein 49 % Anteil an Blockgletscher beeinflussten Wässern am Pegel Hammerjäger ersichtlich (Abbildung 89). Dies ist das Zweieinhalbfache des flächenhaften Anteils. Interessant ist aber auch, dass bis Dezember dieser Anteil nicht mehr unter 35 % fällt. Dies ist aber nicht viel mehr als die 33.4 % des blockgletscherbeeinflussten Anteils nach der Wasserbilanz.

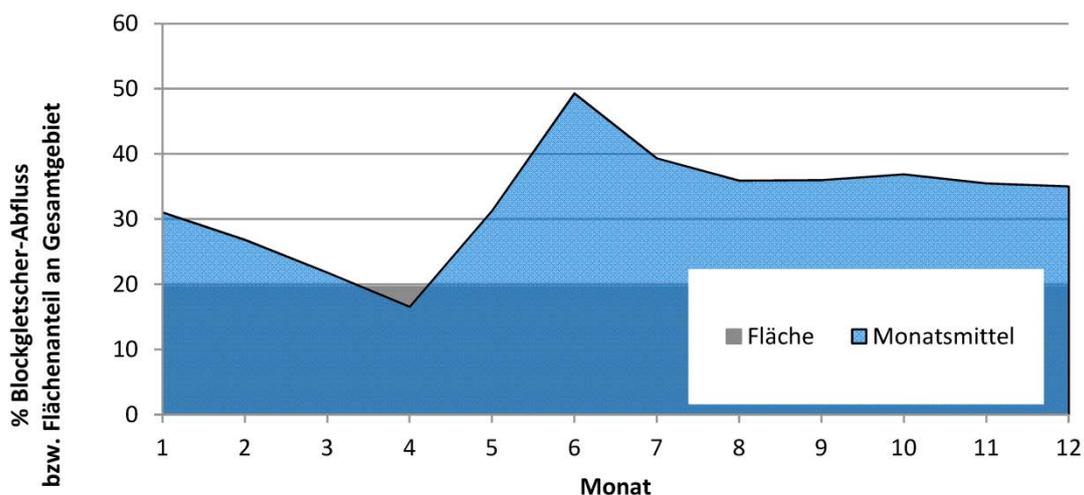


Abbildung 89: Prozentueller Anteil des Blockgletscherabflusses am Gesamtabfluss der Pegelstation Hammerjäger als langjährige Monatsmittelwerte relativ zum flächenhaften Anteil der Blockgletscher im Gesamteinzugsgebiet.

Abbildung 90 zeigt die N-A-Modellierung des Pegels Tetter (Unterthalerbach) unter Berücksichtigung der Blockgletscher mittels semidistributiven Ansatzes. Alle Blockgletscherbeeinflussten Teileinzugsgebiete wurden mit den Parametern des reliktschen Schöneben Blockgletschers berechnet, was im Tetter Einzugsgebiet eine gewisse Unsicherheit mit sich bringt, da fünf der insgesamt 21 Blockgletscher als intakt ausgewiesen sind. Dies ist aber eine nötige Näherung anhand der noch fehlenden Modellparameter für intakte Blockgletscherquellen und deren Einzugsgebiete. Bei gerade einmal 7,7 % Flächenanteil der

Blockgletscherbeeinflussten Teileinzugsgebiete errechnet sich immerhin eine Beeinflussung des Gesamtabflusses von bis zu 21 % an einzelnen Tagen (bei direktem Vergleich nach Variante (i) bis 28,5 %). Dies tritt vermehrt in den Monaten Juni und Juli auf (Abbildung 90), was sich auch in den langjährigen Monatsmittel äußert (Abbildung 91) und entspricht etwa der dreifachen Menge des Flächenanteils auf Tagesbasis.

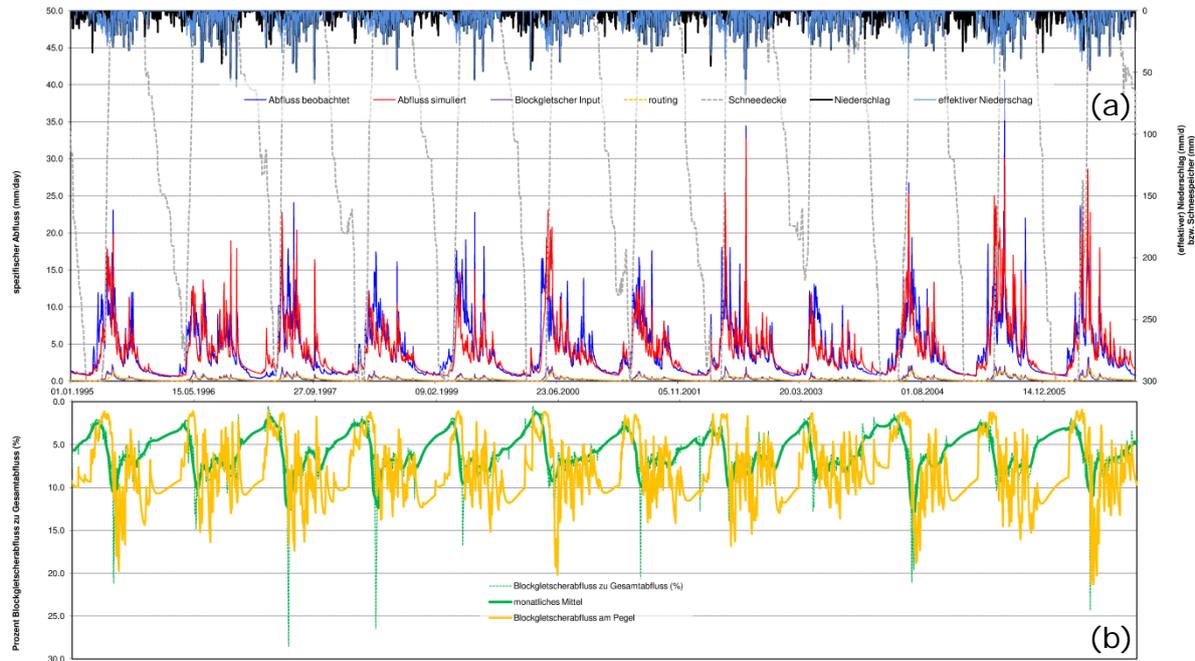


Abbildung 90: (a) Beobachteter und simulierter Abfluss des Pegels Tetter (Unterthalerbach), der Abfluss der Blockgletscher in diesem Einzugsgebiet ohne (Variante (i)) und mit Durchleitung („routing“; Variante (ii)) durch das restliche Einzugsgebiet sowie Niederschlagsdaten und Mächtigkeit der Schneedecke (in mm Wasserequivalent). (b) Prozentueller Anteil der blockgletscherbeeinflussten Abflüsse am Gesamtabfluss; einmal direkt verglichen (grün; Variante (i)), einmal nach Berücksichtigung der Durchleitung dieser Abflüsse durch das restliche Einzugsgebiet (gelb, Variante (ii)).

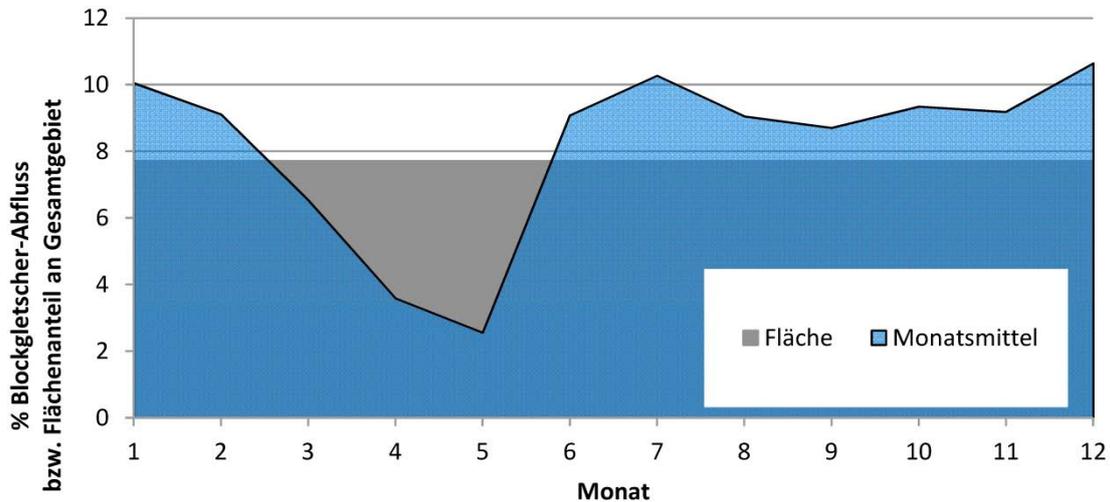


Abbildung 91: Prozentueller Anteil des Blockgletscherabflusses am Gesamtabfluss der Pegelstation Tetter als langjährige Monatsmittelwerte relativ zum flächenhaften Anteil der Blockgletscher im Gesamteinzugsgebiet.

Die Ergebnisse der N-A-Modellierung weisen deutlich auf die wasserwirtschaftliche Relevanz von Blockgletschern hinsichtlich Speicher- und Pufferwirkung hin. Eine relevante Grundwasserkomponente konnte bei dem reliktschen Schöneben Blockgletscher und dem intakten Ölgrube Süd Blockgletscher anhand der Modellierung nachgewiesen werden. Des Weiteren ist der Einfluss der Blockgletscher Abflüsse in unterstromigen Einzugsgebieten (Unterwald, Liesingbach; Hammerjäger, Ingeringbach; Tetter, Unterthalerbach) ein Vielfaches ihrer flächenhaften Anteile bei Betrachtung auf Tagesbasis.

Eine Ausweitung dieser Analysen für Einzugsgebiete, in denen größere intakte Blockgletscher anzutreffen sind, ist wünschenswert. Dies ist speziell hinsichtlich bekannter Schwermetallbelastung gebunden an intakten Blockgletscherquellen und entsprechender Berücksichtigung eines Verdünnungseffekts von Interesse.

Des Weiteren konnten Wagner et al. (2017) zeigen, dass der hier verwendete Modellansatz für Prognoserechnungen potentieller Änderungen der Abflussdynamik aufgrund des Klimawandels möglich ist. Die Grundvoraussetzungen hierfür sind prognostizierte Niederschlags- und Lufttemperaturentwicklungen und ein besseres Verständnis des Abschmelzprozesses in intakten Blockgletschern.

6 Thermisches Verhalten

Analysen der Temperaturdaten an der Oberfläche (strahlungsgeschützt) und in 1 m Tiefe an den reliktschen Blockgletscher Schöneben und Dürrtal (siehe Abbildung 92) zielen auf ein besseres Verständnis der Abschmelzprozesse von Permafrosteis in Blockgletschern ab (Wagner et al., in Begutachtung).

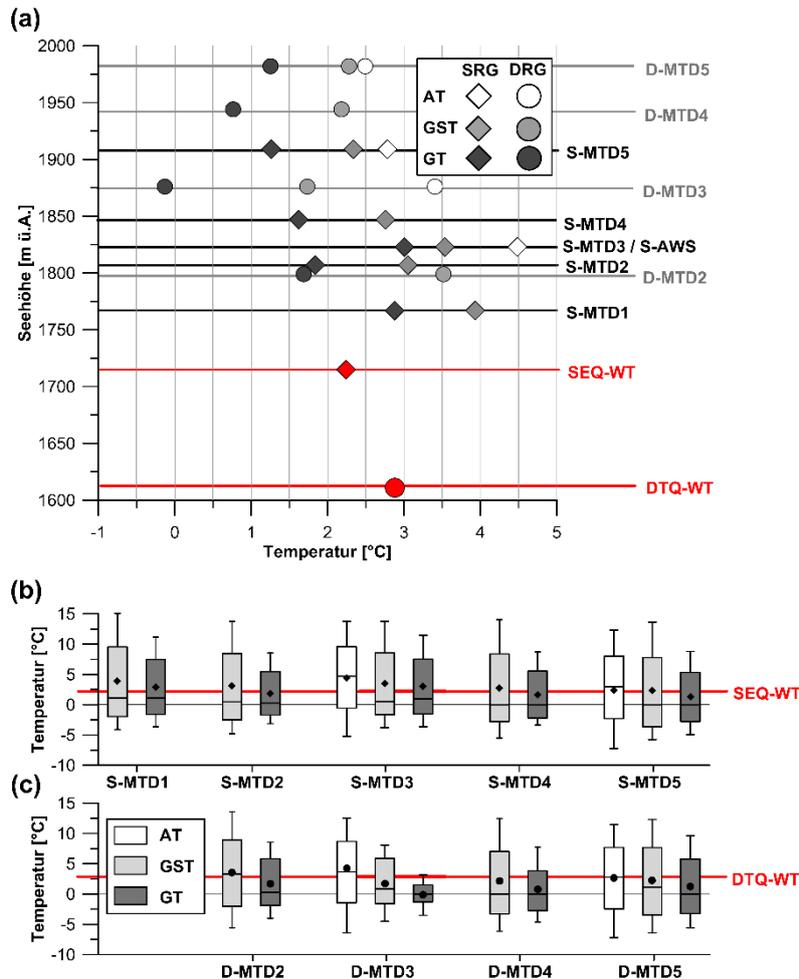


Abbildung 92: Luft- (AT), Oberflächen- (GST) und in 1 m Tiefe aufgezeichnete Temperaturdaten (GT) der Blockgletscher Schöneben und Dürrtal (S- bzw. D-; Lage siehe Abbildung 7) sowie die Quellwassertemperaturen der jeweiligen Blockgletscherquellen (WT). (a) Mittlere Temperaturen für den Beobachtungszeitraum Dez. 2012 bis Nov. 2015. (b) Statistische Auswertung der Daten auf Tagesbasis anhand von Box-Whisker-Plots. Mittelwert = schwarzer Punkt; Median = schwarzer Balken. Modifiziert nach Wagner et al. (in Begutachtung). Die Lage der Monitoringstandorte ist Abbildung 8 zu entnehmen.

Abbildung 92 zeigt die Temperaturdaten der reliktschen Blockgletscher Schöneben und Dürrtal im Zeitraum Dezember 2011 bis November 2015. Eine generell niedrigere Temperatur und auch eine Dämpfung der Temperaturschwankungen in die Tiefe je Standort sind in beiden Untersuchungsgebieten ersichtlich (Wagner et al., in Begutachtung). Darüber hinaus macht Abbildung 92b deutlich, dass die

Quellwassertemperaturen um bzw. über den Mittelwerten (schwarze Punkte) der Temperaturdatenlogger in 1m Tiefe liegen.

Eine wichtige Beobachtung hinsichtlich Klimaerwärmung wurde dahingehend gemacht, dass der Einfluss der Schneedeckendynamik im Winter die zwei Standorte Dürrtal und Schöneben unterscheidet. Das Fehlen einer durchgängigen Schneedecke in einer Wintersaison (hier ausrichtungsbedingt SW bevorzugter als NE) bewirkt eine stärkere Kühlung des Untergrundes, da kalte Luft in den Untergrund ungehindert infiltrieren / absinken kann (Balch-Effekt; Wagner et al, in Begutachtung).

Generell kann die Isolations- bzw. Kühlwirkung der grobblockigen obersten Blockgletscherschicht (von reliktschen Blockgletschern aber auch der "aktive layer" bzw. die Auftauschicht von intakten Blockgletschern) eine durchaus beträchtliche Verzögerung der Auswirkung der klimatischen Erwärmung auf das Temperaturregime im Blockgletscher betragen (z.B. Morard et al., 2008).

Wagner et al. (2018b) konnten anhand eines einfachen Wärmetauscher Modellansatzes (modifiziert in Abbildung 93) für den reliktschen Schöneben Blockgletscher zeigen, dass u.U. die Kühlwirkung der groben Blockschutt-Deckschicht ausreicht, um Quellwassertemperaturanomalien (Winkler et al., 2016b) an der Quelle (SEQ) zu erklären. Die Temperaturanomalien zeigen sich v.a. bei Niederschlagsereignissen im Sommer/Herbst, wenn relativ warmes Niederschlagswasser in den Blockgletscher infiltriert und einen Anstieg der Quellwassertemperatur bewirken müsste. Die Ganglinien zeigen jedoch einen kurzen negativen Temperaturpuls (grüne Linie in Abbildung 94). Während des Anstiegs der Quellschüttung (türkise Linie in Abbildung 94) fällt die Wassertemperatur zunächst recht stark ab, um sich dann schnell zu erholen, über das ursprüngliche Niveau anzusteigen und schließlich mit dem Rückgang der Quellschüttung langsam wieder abzufallen.

Dieses Phänomen ist bislang kaum verstanden. Somit ist auch die Frage offen, ob sich hieraus bereits die Existenz mehrerer unterschiedlich schneller Fließkomponenten ableiten lässt, oder ob auch einfache Fließsysteme ein solches Temperaturverhalten zeigen können. Das Ziel hierbei bestand darin, Modellansätze für dieses Phänomen zu finden und evtl. in einem zweiten Schritt eine Methodik zu entwickeln, daraus Erkenntnisse über die Temperaturverteilung im Blockgletscher zu gewinnen.

Eine Erweiterung dieses Modellansatzes an der Quelle SEQ wird im Folgenden genauer dargestellt.

Um zu einem grundsätzlichen Verständnis zu kommen, sollte das Modell auf physikalischen Grundlagen des Wärmetransports aufbauen. Andererseits sollte die Implementierung wesentlich einfacher als ein differentialgleichungsbasiertes, gekoppeltes Fluid- und Wärmetransportmodell sein, um eine effiziente numerische Umsetzung zwecks Bestimmung der Parameterwerte zu ermöglichen. Hierfür

wurde ein Modell aus diskreten Wärmereservoiren formuliert und implementiert. Abbildung 93 zeigt eine Version dieses Modells aus zwei in Reihe geschalteten Wärmereservoiren, wie es im Folgenden verwendet wird. Versionen mit mehreren parallelen Fließwegen wurden ebenfalls angedacht, bislang aber nicht formuliert und implementiert.

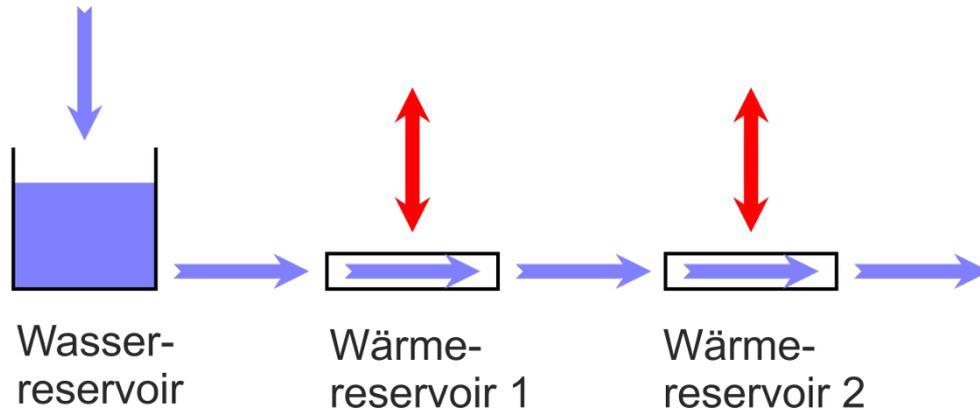


Abbildung 93: Prinzipskizze des Modells mit zwei in Reihe geschalteten Wärmereservoiren. Blaue Pfeile zeigen die Wasserflüsse an, rote Pfeile den Wärmeaustausch.

Das Modell beruht auf den folgenden vereinfachenden Annahmen.

Wasserfluss: Um eine Trennung von Wasserfluss und Wärmetransport zu erreichen, wird davon ausgegangen, dass jedes Wärmereservoir ein gegebenes Wasservolumen V_i enthält, sich dieses aber nicht mit der Zeit ändert. Änderungen der im Blockgletscher gespeicherten Wassermenge werden als vorgeschalteter Wasserspeicher angenommen, welcher keinen Einfluss auf den Wärmeaustausch hat. Unter dieser Annahme ist der Durchfluss durch jedes Wärmereservoir gleich der momentanen Quellschüttung $Q(t)$. Damit lässt sich dann die Verweilzeit des Wassers, welches zur Zeit t an der Quelle austritt, aus den Werten der Quellschüttung $Q(\tilde{t})$ zu Zeiten $\tilde{t} \leq t$ in der Vergangenheit berechnen.

Wärmekapazität: Es wird angenommen, dass jedes Wärmereservoir eine Temperatur T_i hat, welche grundsätzlich von der Zeit abhängen kann, aber nicht durch das durchfließende Wasser beeinflusst wird. Dies entspricht der Betrachtung als Reservoir mit einer unendlich großen Wärmekapazität.

Wärmeaustausch: Wie bei der Wärmeleitung wird davon ausgegangen, dass der Wärmefluss zwischen Reservoir und Wasser proportional zur Temperaturdifferenz ist. Unter dieser Annahme lässt sich jedes Reservoir durch einen Austauschkoefizienten λ_i charakterisieren, sodass die Temperatur der Wassers beim Verlassen des Reservoirs

$$T_i^{\text{out}} = T_i + (T_i^{\text{in}} - T_i)e^{-\lambda\tau_i(t)} \quad (3)$$

ist. Hierbei ist T_1^{in} die Temperatur beim Eintritt in das Reservoir und $\tau_1(t)$ die Verweilzeit. Gemäß den obigen Betrachtungen hängt die Verweilzeit von den Werten der Quellschüttung in der Vergangenheit ab und ist somit zeitabhängig. Gleichung 3 lässt sich sukzessive auf eine Abfolge von Reservoirs anwenden, wobei jeweils die Ausgangstemperatur eines Reservoirs die Eingangstemperatur des folgenden Reservoirs definiert. Eine Implementierung des Modells für eine beliebige Anzahl in Reihe geschalteter Reservoirs wurde erstellt.

Erste Untersuchungen haben gezeigt, dass mindestens zwei Reservoirs mit verschiedenen Temperaturen notwendig sind, um das beobachtete Verhalten qualitativ zu erklären. Hierbei enthält das Modell sechs freie Parameter: die Volumina der beiden Reservoirs V_1 und V_2 , den Wärmeaustauschkoeffizienten λ (für beide Reservoirs als identisch angenommen), die Wassereingangstemperatur T_1^{in} und die beiden Reservoirtemperaturen T_1 und T_2 .

Die Eignung des Modells wurde anhand eines ausgewählten Peaks in der Schüttungskurve des Schöneben-Blockgletschers (31.08.2012; Winkler et al., 2016b) untersucht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 94 und in Tabelle 12 dargestellt.

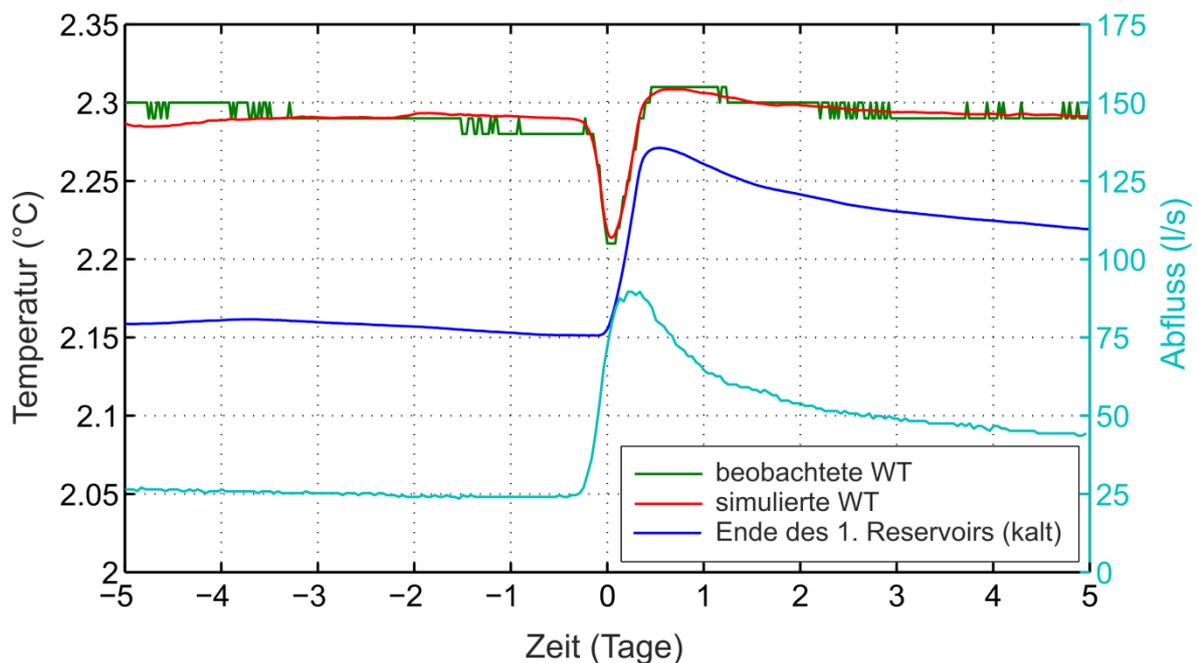


Abbildung 94: Erste Ergebnisse für den Peak in der Schüttungskurve des Schönebenblockgletschers vom 31.08.2012. WT = Wassertemperatur.

Tabelle 12: Best-Fit Parameterwerte für die in Abbildung 94 dargestellte Simulation.

Volumen	1. Reservoir (kalt)	$V_1 = 2610 \text{ m}^3$
	2. Reservoir (warm)	$V_2 = 690 \text{ m}^3$
Wärmeaustauschkoeffizient	beide Reservoirs	$\lambda = 0.644 \text{ pro Tag}$
Temperatur	Eingang 1. Reservoir	$T_1^{\text{in}} = 2.34^\circ\text{C}$
	1. Reservoir (kalt)	$T_1 = 2.00^\circ\text{C}$
	2. Reservoir (warm)	$T_2 = 2.87^\circ\text{C}$

Es werden sowohl die gemessenen Temperaturen als auch die Form des negativen Temperaturpeaks sehr gut getroffen. Lediglich der langsame Temperaturabfall an den Tagen vor dem Niederschlagsereignis konnte nicht reproduziert werden. Dies könnte aber an einem langsamen, jahreszeitlich bedingten Abfall der Temperatur des zweiten Reservoirs liegen, welcher hier nicht einbezogen wurde. Allerdings ist zu erwähnen, dass die in Tabelle 12 aufgeführten Werte mit großen Unsicherheiten behaftet sind, da hier sechs Parameterwerte aus einer recht kurzen Zeitreihe bestimmt wurden. So ist auch jede Aussage darüber, ob das kalte Reservoir durch Eis dominiert ist oder nicht, noch unsicher.

Mit dem Ziel einer zusätzlichen Validierung des Ansatzes und einer genaueren Bestimmung der Parameterwerte ist die Analyse der weiteren Niederschlagsereignisse geplant. Dies erfordert allerdings eine Weiterentwicklung der Implementierung, da hierbei einige der Parameter für alle Ereignisse identisch sein müssen (Volumina und Speicherkoeffizient), während die Temperaturen von Ereignis zu Ereignis variieren können.

Wie weit diese Kühleffekte das Abschmelzen des Permafrosteises in intakten Blockgletschern beeinflussen kann – speziell in Hinblick auf Klimaerwärmung – bedarf weiterer intensiver Forschung. Zusätzliche Temperaturlogger (insgesamt über 40; Tabelle 13) wurden in den Testgebieten Bergli, Tuxer Hauptkamm und Hochschober im Herbst 2016 installiert. Unterschiedliche Korngrößenzusammensetzungen der obersten Blocksicht werden vermutlich unterschiedliche Kühleffekte bewirken. Die hierbei gewonnenen Daten sollen in Zukunft für ein besseres Verständnis der Abschmelzprozesse von Permafrosteis in Blockgletschern dienen, jedoch bedarf es hier idealerweise noch längere Zeitreihen um mögliche Veränderungen aufzuzeigen.

Tabelle 13: Übersicht der installierten Temperaturdatenlogger in den lokalen Untersuchungsgebieten. GST = Oberflächensensoren, strahlungsgeschützt; GT = Temperaturdatenlogger in 50 cm bzw. 100 cm Tiefe; AT = Lufttemperatursensoren direkt im Untersuchungsgebiet.

	Schöneben	Dürrtal	Ölgrube Süd	Krummgampen	Hochschober	Bergli (Galtür)	Tuxer Hauptkamm
AT (200 cm Höhe)	2	2	X	X	X	X	X
GST (0 m)	6	4	1	5	14	11	24
GT (50 – 100 cm Tiefe)	5	4	3	X	X	6	X

7 Interpretation und Diskussion

Blockgletscher- und Blockgletschereinzugsgebietsinventar:

Im Rahmen dieses Projekts wurde das erste einheitliche österreichweite Blockgletscher- und Blockgletschereinzugsgebietsinventar auf Basis hochaufgelöster Laserscan-Daten (ALS-Daten, 1 m horizontale Auflösung) erstellt. Des Weiteren erfolgte eine homogenisierte und soweit wie möglich reproduzierbare Attributierung der einzelnen Landschaftsformen. Die große Anzahl der Blockgletscher (5769) verlangte nach einer gewissen Automatisierung der Attributzuweisung, was sich wiederum in der Reproduzierbarkeit positiv äußert. Jedoch erlaubt diese große Anzahl die Verifizierung jedes einzelnen Blockgletschers im Gelände oder durch andere Kollegen bei der Ausweisung nicht. Deshalb sei hier nochmals ausdrücklich darauf hingewiesen, dass es sich bei diesem Inventar um Blockgletscher und zu einem geringen Teil um blockgletscherverdächtige Landschaftsformen handelt.

Durch die im Projekt beteiligten Bundesländer Vorarlberg, Tirol, Salzburg, Steiermark und Kärnten kann von einem im Großen und Ganzen österreichweiten Inventar ausgegangen werden, da die relevanten Grenzbereiche der angrenzenden Bundesländer Ober- und Niederösterreich miteinbezogen wurden. Es kann aber nicht ausgeschlossen werden, dass in den Bundesländern Ober- und Niederösterreichs noch die eine oder andere verdächtige Landschaftsform vorliegt, die nicht mit dieser erweiterten Betrachtung erfasst wurde.

Generell ist die Verteilung der Blockgletscher in Österreich aus der Wechselwirkung zwischen Topographie und Vergletscherungsgeschichte (Abbildung 95 zeigt die Würmeiszeitliche Eisausdehnung) im Würmhochglazial sowie im alpinen Spätglazial zu erklären.

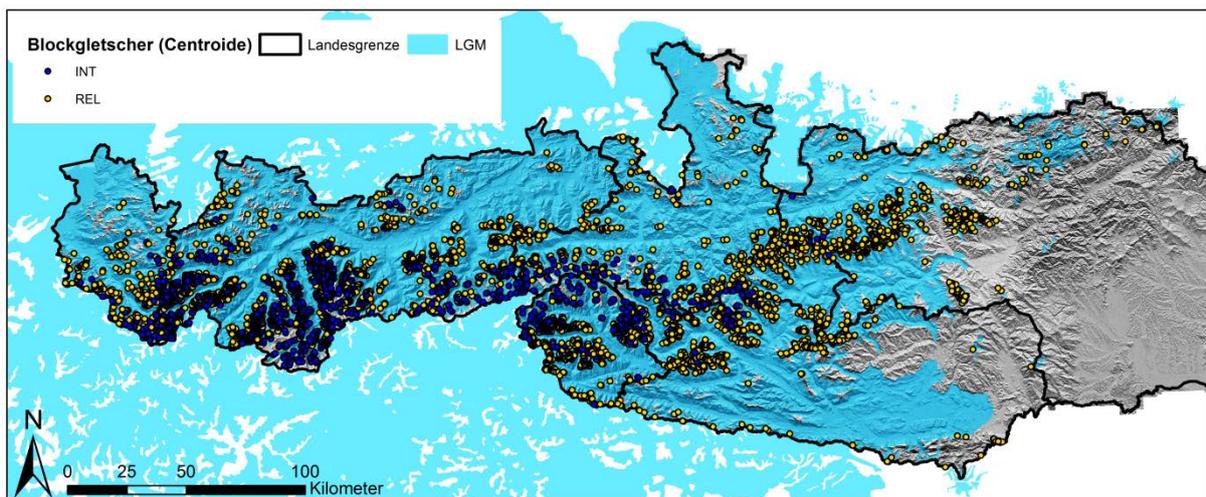


Abbildung 95: Verteilung der Blockgletscher im Untersuchungsgebiet (getrennt in reliktsch und intakt) im Vergleich zur Ausbreitung des Würmhochstandes („Last Glacial Maximum“; nach Ehlers et al. (2011)).

Die Anzahl (5769) als auch die Gesamtfläche (303 km²) der blockgletscherverdächtigen Landschaftsformen in Österreich ist beträchtlich. Für wasserwirtschaftliche Fragestellungen ist aber v.a. die hydrologische Einzugsgebietsfläche relevant (1279 km²).

Blockgletscher können Niederschläge, Schnee- und Eisschmelzwässer zwischenspeichern und verzögert abgeben. Dadurch kann der Anteil des Blockgletschers beeinflussten Abflusses vom Gesamtabfluss in übergeordneten Einzugsgebieten (tiefer liegenden Pegelstationen) ein Vielfaches des flächenhaften Anteils betragen (siehe Kapitel 5.4; N-A-Modellierung). Dies hat dann aber u.U. auch Auswirkungen auf die Wasserqualität; da sich potentielle Schwermetallbelastungen, die in Quellwässern aus intakte Blockgletscher angetroffen wurden, bei zu geringer Verdünnung auch dort noch bemerkbar machen können. Sowohl die qualitativen als auch quantitativen Aspekte für wasserwirtschaftliche Fragestellungen werden im Anschluss näher diskutiert.

Wasserwirtschaftliche Aspekte, Wasserqualität:

Die derzeitigen Ergebnisse zeigen, dass sich lokal bis regional auftretende hohe Schwermetallbelastungen (v.a. Ni, Mn) in erster Linie auf die Gebiete des Ötztal-Stubai-Kristallins in Tirol beschränken. Eine großflächige Ausdehnung nach Osten (Salzburg, Steiermark, Kärnten) oder Westen (Vorarlberg) ist anhand der Projektergebnisse nicht nachweisbar.

Im Zuge der hydrochemischen Charakterisierung der belasteten Quellwässer konnten generell zwei Gruppen von Kationenvergesellschaftungen ausgewiesen werden. Es zeigen sich eine Ni/Mn/Al-Gruppe und eine As/U-Gruppe, deren Quellwässer über dem Grenzwert der TWV liegen. Speziell die bereits bekannten, belasteten Quellwässer des aktiven Krummgampen Blockgletschers und weitere Proben, die sich primär im Ötztal-Stubai-Kristallin befinden, sind der Ni/Mn/Al-Gruppe zuzurechnen. Der selben Gruppen sind auch Proben eines intakten Blockgletschers aus dem steirischen Anteil der Schladminger Tauern zuordenbar. Im Gebiet der Schladminger Tauern und konkret in der näheren Umgebung der Quelle BLGL6-0022 sind sulfidische Vererzungen bekannt, die an diskrete Störungen gebunden sind (Robl et al., 2004) und auf die die Schwermetallbelastung im Quellwasser zurückgeführt werden kann. Die vergleichbare hydrochemische Signatur der Quellwässer im Ötztal-Stubai-Kristallin lässt somit auch für diese Quellwässer eine ähnliche Erklärung plausibel erscheinen. Anhand der generell eher sauren pH-Werte und Sulfatgehalte dieser Quellwässer, kann vermutet werden, dass die Belastung stark von Sulfidmineralen (sulfidischen Vererzungen, z.B. Pentlandit) abhängig ist. Somit dürfte der Belastung der Quellwässer eine lithologische Ursache zugrunde liegen und ein flächenhafter atmosphärischer Eintrag nicht zwingend notwendig sein. Mit Hilfe von Schwefelisotopen-Messungen könnte der Ursprung des Sulfatgehaltes geklärt werden, um diese Hypothese zu bekräftigen.

Die Belastung der Quellwässer durch As/U ist vergleichsweise eher gering und größtenteils unter den Grenzwerten der Trinkwasserverordnung. Von den insgesamt 184 beprobten Quellen sind bezüglich Arsen nur 4 und bezüglich Uran nur 3 Quellen über dem Grenzwert (hoch). Bei Betrachtung aller moderat belasteter Quellen der As/U-Gruppe ($> 1/3$ des Grenzwerts) ist zu erkennen, dass diese an Gesteine mit hohem Karbonatanteil gebunden sind (siehe Abbildung 53). Vor allem in den Seckauer Tauern konnte nachgewiesen werden, dass die As-Belastung höchstwahrscheinlich aus Vererzungen stammt, die an silikatisch-karbonatischen Ganggesteinen gebunden ist (Eder, 2019).

Ein nennenswerter Unterschied bei der Betrachtung der belasteten Quellen zwischen den zwei Gruppen ist, dass die Ni/Mn/Al-Gruppe primär an intakte Blockgletscherquellen gebunden ist, die der As/U-Gruppe sowohl an intakten als auch reliktschen Blockgletschern anzutreffen sind.

Verdünnungseffekte bzw. saisonale Schwankungen in den hoch belasteten Quellwässern konnten nur zu einem geringen Grad festgestellt werden (siehe z. B. Abbildung 74). Dies erlaubt eine Feststellung einer Belastung durch einmalige Probenahme. Diese Erkenntnis wurde im Zuge des Projekts genutzt, um eine flächenhafte Verdichtung der beprobten Blockgletscherquellen mit einer zusätzlichen einmaligen Probenahmekampagne 2018 zu erreichen.

Versucht man den Ursprung der Belastung festzustellen, so müssen folgende Beobachtungen berücksichtigt werden: (i) Die höchsten Belastungen wurden in Zeiten festgestellt (Herbst, Winter), wo keine Grundwasserneubildung und auch keine (Permafrost-)Eisschmelze aufgrund der geringen Außentemperaturen erfolgt. (ii) Des Weiteren zeigten die Messungen im Sommer bei hohen Außentemperaturen und entsprechend starker Schmelze des Permafrosteises keinen Belastungsanstieg.

Dies deutet auf eine Belastung der Grundwasserkomponente und somit der Basisschicht hin. Die Basisschicht ist durch eine entsprechend geringe hydraulische Durchlässigkeit und gute Speicherfähigkeit charakterisiert. Durch die Speicher- bzw. Pufferwirkung ist die Grundwasserkomponente über das gesamte Jahr gesehen aktiv und kann somit eine entsprechende Belastung bewirken. Die Möglichkeit, dass der Ursprung der Schwermetallbelastung primär an Permafrosteis gebunden ist (Krainer et al., 2015), bedarf zusätzlicher Annahmen. Die Schmelzwässer des Permafrosteises müssten vorrangig in die ungefrorene Basisschicht infiltrieren und entweder die Hauptkomponente der Grundwasserneubildung der Basisschicht darstellen oder durch ein Vielfaches der Mineralisierung aller anderen Grundwasserneubildungskomponenten aufweisen, um der starken Verdünnung entgegen zu wirken. Dies deutet darauf hin, dass das Permafrosteis möglicherweise nicht primär der Ursprung der Schwermetallbelastung ist, sondern bereits eine Belastung der Grundwasserkomponente selbst vorliegen könnte. Eine klare, eindeutige Ursachenzuweisung bedarf aber noch weiterer Untersuchungen.

Die Beobachtung, dass die Schwermetallbelastung der Gruppe Ni/Mn/Al primär an intakte Blockgletscher gebunden ist, kann an der subjektiven Auswahl der Messstellen liegen. Im gegenständlichen Projekt war eine systematische Probenahme sämtlicher Quellen (inklusive Quellen, die nicht an Blockgletscher gebunden sind) in Teilgebieten, wo Belastungen bekannt waren, nicht vorgesehen, sondern die Untersuchungen konzentrierten sich auf die Charakterisierung der hydrochemischen Belastung und ihre großflächige Ausbreitung im österreichischen Alpenraum.

Wasserwirtschaftliche Aspekte, Wasserquantität:

Bestehende Erkenntnisse der Untersuchungen an reliktschen Blockgletschern (z.B. Winkler et al., 2016a,b; Pauritsch et al., 2015, 2017) und intakten Blockgletschern (z.B. Giardino et al., 1992; Burger et al., 1999; Krainer et al., 2007, 2015a; Hausmann et al., 2012; Ribis, 2017) wurden im Zuge des Projekts mit den hier neu gewonnenen zusammen geführt und interpretiert. Daraus konnte eine erste hydrogeologische, konzeptionelle Vorstellung des internen Aufbaus von Blockgletschern erarbeitet werden (Abbildung 96; Winkler et al., 2018b).

Geophysikalische Daten der intakten Blockgletscher im Reichenkar, der Ölgrube Süd und des Kaiserbergtals zeigen, dass in allen Fällen über dem Festgesteinsuntergrund zunächst noch eine bis zu 15 m mächtige ungefrorenen feinkörnige Sedimentlage ausgebildet ist, darüber folgt dann der Permafrostkörper (Gemisch aus Eis und Schutt) und wird dann von einer mehrere Meter mächtigen Schuttlage bedeckt (Hausmann et al., 2007, 2012). Anhand des Auslaufkoeffizienten des Basisabflusses kann ein gespeichertes Volumen berechnet werden, was wiederum unter der Annahme einer effektiven Porosität auf eine Mächtigkeit des Grundwasserkörpers rückgerechnet werden kann. Für den Ölgrube Süd Blockgletscher ergibt dies eine Mächtigkeit von 7 – 13 m (Heigert, 2018); was gut zu den Ergebnissen der geophysikalischen Erkundungen (Hausmann et al., 2012) passt. Bohrungen am Blockgletscher Lazaun (Schmalstal, Südtirol) zeigten einen ähnlichen Aufbau (Krainer et al., 2015a). Diese bis zu 15 m mächtige Basisschicht konnte beim reliktschen Schöneben Blockgletscher als der relevante Grundwasserkörper identifiziert werden (Winkler et al., 2016a,b).

Das Vorhandensein dieser ungefrorenen Basisschicht in intakten Blockgletschern ist konsistent mit den Ergebnissen der Isotopenanalyse und der N-A-Modellierung in den lokalen Testgebiete. Eine relevante Grundwasserkomponente in intakten Blockgletschern konnte so erstmals eindeutig nachgewiesen werden. Vergleichbare langsame Abflusskomponenten (Basisabfluss; α_3 -Werte) und daraus abgeleitete Mächtigkeitswerte weiterer untersuchter Blockgletscher festigen diese Erkenntnis (Brodacz, 2019).

Basierend auf den Untersuchungen des lokalen Untersuchungsgebiets Ölgrube Süd ist anhand der Komponententrennung (elektr. Leitfähigkeit, Isotopendaten) ein relevanter Anteil an Eisschmelze offensichtlich. Hier sei aber nochmals darauf

hingewiesen, dass dies größtenteils Schmelzwässer der im Einzugsgebiet befindlichen Kargletscher sind und nur zu geringen, nicht eindeutig trennbaren Anteilen des Permafrosteises. Dies konnte auch mit einem N-A-Modell bestätigt werden, welches an der Ölgrube Süd angewandt wurde. Die bei der Ölgrube Süd beobachteten Tagesschwankungen während Trockenperioden in den Sommermonaten (z. B. Abbildung 70) konnten bei den aktiven Blockgletschern Bergli/Lareintal und im Hochschobergebiet nur eingeschränkt bzw. nicht festgestellt werden. Dies kann auf die Unterschiede in den Einzugsgebieten zurückgeführt werden. Der Blockgletscher Bergli/Lareintal weist nur einen sehr geringen Rest eines Kargletschers in der Wurzelzone des Blockgletschers auf. Die Quelle HSQ2 im Gebiet Hochschober entspringt einem reliktschen Blockgletscher und die Quelle HSQ15 im Gebiet Hochschober weist ein komplexes Einzugsgebiet auf, das sowohl kleine Seen (z.B. Barrensee) als auch mehrere Blockgletscher beinhaltet.

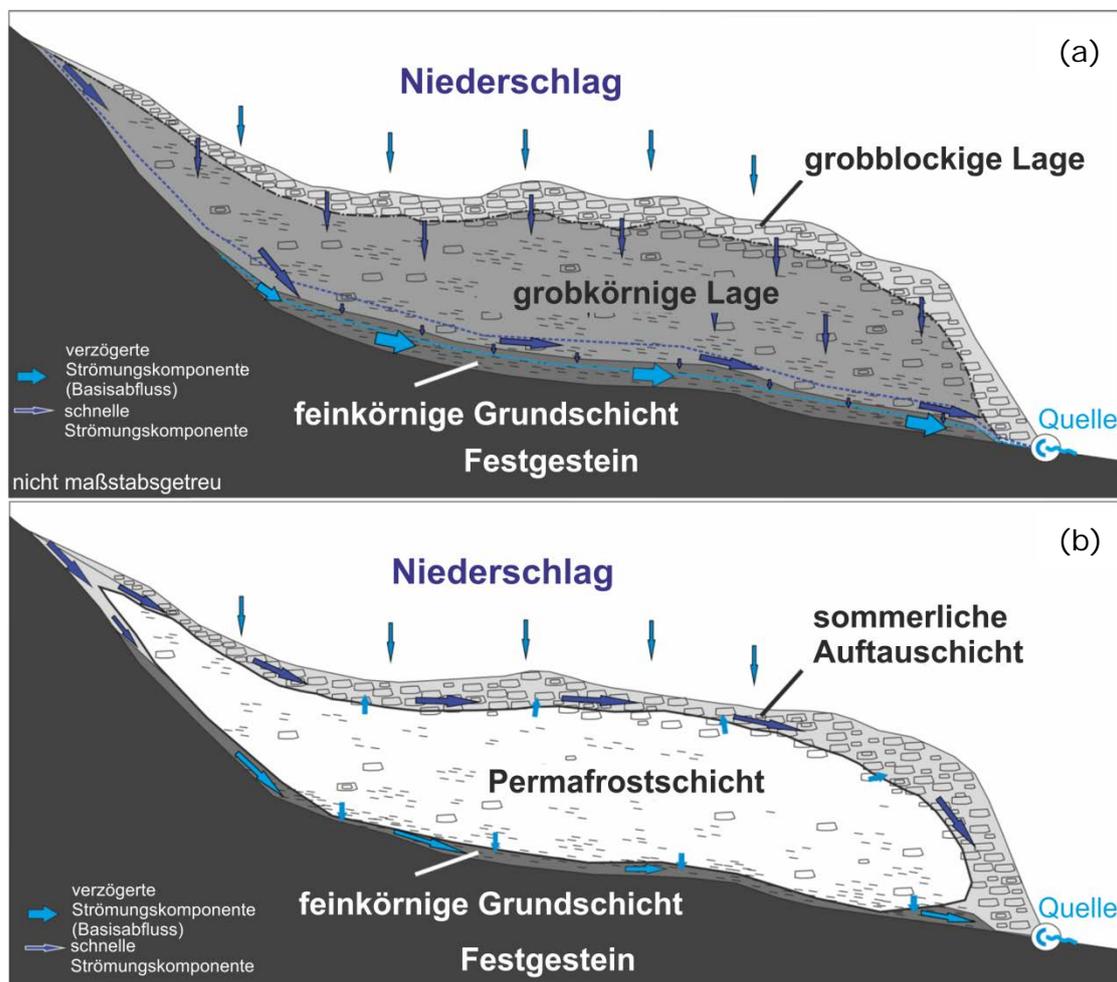


Abbildung 96: Konzeptionelle Vorstellung der Fließwege durch einen (a) reliktschen und (b) intakten Blockgletscher; Permafrost im Festgestein aufgrund der Übersichtlichkeit nicht dargestellt. Modifiziert nach Winkler et al. (2018b).

Basierend auf den Erkenntnissen dieses Projekts kann das konzeptionelle hydrogeologische Modell eines Blockgletschers erweitert werden (Abbildung 97; Winkler et al., 2018c). Intakte Blockgletscher weisen ein komplexeres

Abflussverhalten auf, da durch Permafrost-Eisschmelze und Eisschmelze von Kargletschern in den jeweiligen Blockgletschereinzugsgebieten bis zu zwei weitere Abflusskomponenten zu beachten sind. Diese Komponenten werden primär dem „schnellen“ Abfluss zugeordnet. Die Abbildung 97 zeigt die Erweiterung der schematischen Abbildung 96b, in der Schnee als auch ein Kargletscher das Gesamtbild vervollständigen.

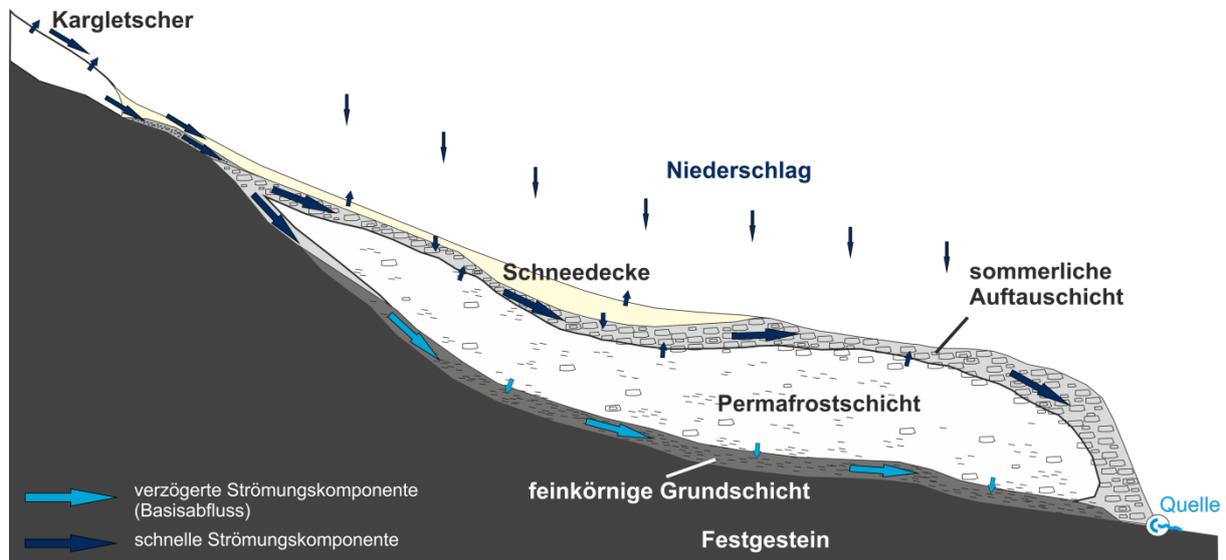


Abbildung 97: Konzeptionelle Vorstellung der Fließwege durch einen intakten Blockgletscher unter Beeinflussung durch einen im Einzugsgebiet befindlichen Kargletscher und einer Schneedecke. Modifiziert nach Winkler et al. (2018c). Permafrost im Festgestein aufgrund der Übersichtlichkeit nicht dargestellt.

Analysen der natürlichen Tracer zeigen eindeutig auch bei intakten Blockgletschern einen relevanten Grundwasseranteil an. Die bei der Ölgrube Süd nachgewiesene gemessene Grundwasserkomponente in den Wintermonaten, d.h. der Basisabfluss, wird durch weitere Messergebnisse am aktiven Blockgletscher Reichenkar bestätigt (Brodacz, 2019). Des Weiteren weisen bei den Blockgletschern Krummgampen und Bergli/Lareintal die Messreihen der Wassertemperatur auf einen Basisabfluss in Zeitperioden ohne Grundwasserneubildung hin, ohne dass direkte Abflussmessungen vorliegen.

Diese Ergebnisse sind durch eine ungefrorene Basisschicht in intakten Blockgletschern plausibel erklärbar und sind wasserwirtschaftlich von großer Bedeutung. Aus diesem Grund wurde die Basisschicht in Abbildung 97 in ihrer Mächtigkeit verdeutlicht.

Erste Ergebnisse aktiver Blockgletscher ohne Kargletscherbeeinflussung (z. B. Äußeres Hochebenkar) weisen ebenfalls auf eine relevante Grundwasserkomponente hin (Brodacz, 2019). In diesem Untersuchungsgebiet könnte durch weitere Beprobung und Analysen, ident jenen der Ölgrube Süd, ein Abschmelzen des Permafrosteises aufgezeigt werden.

Unter Berücksichtigung des Klimawandels und einer damit einhergehenden Klimaerwärmung wird früher oder später ein Tauen des Permafrosts und somit ein

Abschmelzen des Permafrosteises in zurzeit intakten Blockgletschern zu einer möglichen Erhöhung der Speicher- bzw. Pufferwirkung der Blockgletscher führen (Rogger et al., 2017). Wann es aber zum Abschmelzen des Permafrosteises in Blockgletschern kommt, wie groß diese Wassermengen sind und wie schnell dies voranschreitet, bedarf einer intensiveren Erforschung der Temperaturregime von Blockgletschern. Dazu wurden bereits im Rahmen dieses Projekts Datenlogger an der Blockgletscheroberfläche und in einer Tiefe von maximal 1 m installiert, um das thermische Verhalten (siehe Kapitel 6) von Blockgletschern besser zu verstehen. Auch wenn Langzeitdaten noch nicht vorliegen, so kann aber zumindest die grobblockige Deckschicht als wichtige Isolations-, ja sogar Kühleisenschicht gedeutet werden, die eine zeitliche Verzögerung des Abschmelzens von Blockgletscher-Permafrosteis relativ zu Gletschereis bewirkt.

Untersuchungen an den reliktschen Blockgletscher Dürrtal und Schöneben ergaben, dass eine lückenhafte Schneebedeckung der grobblockigen Deckschicht über die Wintermonate eine größere Kühlwirkung im ersten Meter dieser Deckschicht bewirkt (Wagner et al., in Begutachtung). Legt man dies auf zukünftige Winterbedingungen um (mehr Niederschlag in Form von Regen statt Schnee; späterer Schneedeckenaufbau und früherer Beginn der Schneeschmelze), so deutet dies auf bessere Bedingungen zum Erhalt des durch eine grobblockige Deckschicht geschützten Permafrosteises in intakten Blockgletschern (und auch Schuttbedeckten Gletschern) hin.

Basierend auf den Erkenntnissen dieses Projekts muss die Bedeutung der hydrogeologisch relevanten Langzeitbeobachtungen hervorgehoben werden, ohne die Prognosen der Veränderungen des Abflussverhaltens in alpinen Einzugsgebieten aufgrund der Erderwärmung nicht quantifizierbar sind.

8 Ergänzende Untersuchungen

In Ergänzung zum gegenständlichen Projekt wurden und werden begleitend weitere Untersuchungen an Blockgletschern vorwiegend in akademischen Abschlussarbeiten der Universitäten Graz und Innsbruck bearbeitet.

Es werden im Folgenden diese Arbeiten aufgelistet (Verfasser | Fertigstellungsjahr | Titel | Hauptbetreuer):

Dissertation:

Ribis, M. | 2017 | Geologisch-hydrogeologische und hydrochemische Untersuchungen in Permafrostbereichen der Öztaler Alpen (Tirol, Österreich). | Krainer K.

Masterarbeiten:

Rieder, A. | 2017 | Geologische, geomorphologische und hydrogeologische Untersuchungen im Bereich Ölgrube, Kaunergrat, Öztaler Alpen. | Krainer, K.

Heigert, K. | 2018 | Speicherverhalten und Abflussdynamik aktiver Blockgletscher am Beispiel Ölgrube Süd, Kaunertal | Winkler, G.

Klackl, D. | 2018 | Quartärgeologie und Hydrogeologie mit Schwerpunkt Blockgletscher in der Umgebung der Hochschoberhütte, Schobergruppe (Osttirol) | Krainer, K.

Kogler, T. | 2018 | Quartärgeologie und Permafrost (Blockgletscher) am Tuxer Hauptkamm (Zillertaler Alpen, Tirol, Österreich) | Krainer, K.

Eder, M. | 2019 | Origin of arsenic contamination of rock glacier springs in alpine headwaters of the Seckauer Tauern Range (Austria) | Winkler, G.

Brodacz, A. | 2019 | Speicherverhalten und Entwässerungsdynamik von Blockgletschern – Vergleichende Untersuchungen zwischen intakten und reliktschen Blockgletschern | Winkler, G.

Pedevilla, T. | noch Laufend | Hydrogeologische Untersuchungen an Blockgletschern im Lareintal | Krainer, K.

Auf die jeweiligen Arbeiten wurde in den betreffenden Textabschnitten mittels Referenz (z. B. Ribis, 2017) verwiesen.

9 Schlussfolgerungen und Ausblick

Blockgletscher sind die auffälligsten Landschaftsformen des alpinen Permafrosts, die Grundwasserleiter und –speicher in alpinen Einzugsgebieten darstellen. Ein im Zuge dieses Projekts erarbeitetes einheitliches und konsistentes Blockgletscherinventar weist für Österreich 5769 Blockgletscher und blockgletscherverdächtige Landschaftsformen aus, von denen rund 40 % noch als intakt eingestuft wurden. Eine Großzahl dieser Landschaftsformen ist in Tirol anzutreffen (3148), und davon sind wiederum viele noch intakte Blockgletscher (1825). Das dazu erstellte Blockgletschereinzugsgebietsinventar ergab, dass eine Gesamtfläche von 1279 km² über Blockgletscher entwässert.

Intakte Blockgletscher weisen ein sehr komplexes Abflussverhalten und eine nicht unbeträchtliche aber begrenzte Speicherfähigkeit analog den reliktschen Blockgletschern auf. Es konnte sowohl eine schnelle Abflusskomponente resultierend aus Regen, Schmelzwässern aus Schnee und Eis (Permafrost- und Kargletschereis aus dem Einzugsgebiet) als auch eine Grundwasserkomponente (länger gespeichertes Wasser) anhand der natürlichen Tracer elektrische Leitfähigkeit und Isotope quantitativ erfasst werden. Somit stellen diese Landschaftsformen komplexe Grundwasserleiter dar, die maßgeblich das Abflussverhalten alpiner Einzugsgebieten quantitativ in verschiedener Weise beeinflussen:

- a) Starkregenereignisse und Schneeschmelze werden durch diese Landschaftsformen und ihre Speicherfähigkeit teilweise abgepuffert.
- b) Eine ungefrorene, feinkörnige Basisschicht dient bei intakten Blockgletschern als wesentlicher Grundwasserleiter/-speicher und ermöglicht einen Basisabfluss, was dem Abflussverhalten von reliktschen gleichkommt. Dies bedeutet, dass generell die Quellen von Blockgletschern (intakt und reliktsch) auch nach längeren Trockenperioden und Zeiten, in denen keine Grundwasserneubildung erfolgen kann, eine beträchtliche Quellschüttung aufweisen können.
- c) In intakten Blockgletschern stellt das Permafrosteis einen weiteren langfristigen Wasserspeicher dar. Das Abschmelzen des Permafrosteises erfolgt allerdings im Vergleich zu Gletschereis stark zeitlich verzögert, da die oberste aktive grobblockige Deckschicht einen Isolations- bzw. sogar einen Kühleffekt aufweisen kann.
- d) Tagesschwankungen der Quellschüttung als auch der elektrischen Leitfähigkeit, Isotope und Wassertemperatur in schneefreien Perioden deuten auf einen Eisschmelzwasseranteil hin, der im Fall des aktiven Blockgletschers Ölgrube Süd bis ca. 25 % beträgt. Diese Tageschwankungen sind bei anderen aktiven Blockgletschern aber viel geringer bis gar nicht ausgeprägt, was nahelegt, dass der Schmelzwasseranteil primär von noch vorhandenen Kargletschern in den jeweiligen Einzugsgebieten und nur sehr untergeordnet vom Abschmelzen

des Permafrosts in den Blockgletschern stammt. Dies konnte anhand erster Niederschlags-Abfluss-Modellierungen des Ölgrube Süd Einzugsgebietes bestätigt werden. Auch der relevante Grundwasseranteil wurde dabei bestätigt.

- e) Für Einzugsgebiete mit reliktschen Blockgletschern konnte mit Niederschlags-Abfluss-Modellierungen auf Tagesbasis gezeigt werden, dass in übergeordneten Einzugsgebieten der Anteil des Gesamtabflusses ein Vielfaches der blockgletscherbeeinflussten Einzugsgebietsflächen ist. Die Auswirkungen der sich durch den Klimawandel verschiebenden Permafrostgrenze auf das Abflussverhalten von Blockgletschern und damit auch alpiner Einzugsgebiete muss Ziel künftiger Forschung sein.

Neben den quantitativen Aspekten des Abflussverhaltens war v.a. die österreichweite Erfassung der hydrochemischen Parameter von Blockgletscherquellen mit besonderem Augenmerk auf Schwermetalle ein wesentlicher Projektschwerpunkt. Insgesamt wurden 184 Quellen hauptsächlich von intakten und reliktschen Blockgletschern im österreichischen Alpenraum beprobt und deren hydrochemische Parameter in die H₂O-Fachdatenbank des Bundesministeriums für Nachhaltigkeit und Tourismus eingebunden.

Einige Quellen, die intakte Blockgletscher entwässern, sind durch eine hohe Schwermetallbelastung der Quellwässer (Kationenvergesellschaftung Nickel/Mangan/Aluminium) betroffen. Die Untersuchungen ergaben, dass die erhöhten Schwermetallkonzentrationen vorwiegend bei Quellwässern aus Blockgletschern auftreten, die an Gesteine des Ötztal-Stubai-Kristallins gebunden sind. Die hydrochemischen Gemeinsamkeiten der belasteten Quellen, vorwiegend im Ötztal-Stubai-Kristallin, (erhöhter Sulfatgehalt und eher saure pH-Werte; Nickel und Mangan Belastung) deuten ein Vorhandensein von Sulfidmineralen an und weisen daher auf eine lithologische Ursache hin. Des Weiteren schwankt die Schwermetallbelastung der Quellen zwar saisonal, jedoch liegt das ganze Jahr eine deutliche Belastung vor. Daraus kann geschlossen werden, dass Schmelzwässer von Permafrost- oder Kargletschereis möglicherweise nicht die alleinige Kontaminationsquelle sein dürften, da diese Abflusskomponente nicht über das ganze Jahr zur Verfügung steht und während der maximalen Belastungen (Spätherbst/Winter) gar nicht aktiv ist. Eine potentielle Infiltration von Schmelzwässern aus Permafrost- und Kargletschereis in die Basisschicht und dadurch bedingt eine erhöhte Schwermetallbelastung der Grundwasserkomponente kann jedoch nicht gänzlich ausgeschlossen werden.

Basierend auf den Ergebnissen erscheint somit ein großflächiger atmosphärischer Eintrag als Ursache weniger plausibel. Es ist auch keine großflächige Ausbreitung der Schwermetallbelastung in Richtung Osten und Westen des österreichischen Alpenraums erkennbar. Warum diese Belastungen primär bei Permafrost beeinflussten Quellwässern (Quellen aus intakten Blockgletschern) nicht aber bei Quellwässern reliktscher Blockgletscher (permafrostfrei) anzutreffen sind, soll in weiterführenden Forschungsarbeiten beantwortet werden.

Zusammenfassend können nachstehende **wasserwirtschaftliche Potentiale der Blockgletscher als Grundwasserleiter/-speicher** in alpinen Einzugsgebieten angeführt werden:

- Blockgletscher bieten aufgrund ihrer guten Speicherfähigkeit und ihrer Lage in hochgelegenen Alpenregionen ein gutes Potential als Trinkwasserressource.
 - Ihre gute Speicherfähigkeit und zumeist dahinterstehende große hydrologische Einzugsgebiete ergeben einen hohen Basisabfluss, wodurch auch nach längeren Trockenperioden oder Zeiten ohne Grundwasserneubildung entsprechend hohe Schüttung auftreten. Gerade in kristallinen Gebirgsregionen, wo meist nur Quellen mit sehr geringer Ergiebigkeit vorliegen, ist dies von hoher Relevanz.
 - Aufgrund ihrer Lage ist auch die Verunreinigungsgefahr als gering einzustufen, obwohl darauf hingewiesen werden muss, dass die schnelle Abflusskomponente eine gewisse Vulnerabilität bedingt.
 - Ein erstes Resultat des nun vorliegenden Blockgletscherinventars ist, dass einige bestehende Trinkwasserversorgungen bereits ihr Trinkwasser aus diesen Landschaftsformen beziehen, ohne dies gewusst zu haben.
- Der hohe Anteil am Abfluss übergeordneter Einzugsgebiete (bis zum Vierfachen des Einzugsgebietsflächenanteils) ist auch für die Energiewirtschaft ein wesentlicher Aspekt. Zahlreiche Kleinkraftwerke an Gebirgsbächen nutzen entsprechend diese Wasserressource zur Energiegewinnung.
- Des Weiteren bieten Blockgletscherquellen und auch die darunterliegenden Abflüsse sehr gute Rahmenbedingungen für die Nutzung der Wässer für Beschneiungsanlagen. Der Basisabfluss dieser Landschaftsformen ermöglicht auch im Winter eine Zuleitung in Speicherteiche. Die niedrigen Wassertemperaturen der Quellwässer begünstigen auch die Nutzung bei der Schneeproduktion selbst, da die Wassertemperaturen bereits nur knapp über 0 °C liegen.

Mit dem gegenständlichen Projekt wurde eine sehr gute Grundlage für das Prozessverständnis des Wasserdargebots aus Blockgletschern und damit verbunden des Abflussverhaltens alpiner Einzugsgebiete gelegt. Mit dem Projekt wurde ein erster wichtiger Schritt getan, um die künftigen Herausforderungen einer immer stärker und intensiver werdenden Nutzung der alpinen Regionen wie bspw. durch Tourismus zu meistern.

Die Projektergebnisse zeigen aber 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.

Im Anschluss werden einige wichtige Themenbereiche kurz angeführt.

- Aufgrund des Klimawandels und der damit einhergehenden Temperaturanstiege sowie eines erwarteten Anstiegs von Extremereignissen (Dürre aber auch Extremniederschläge) hat sich das Abflussverhalten in alpinen Einzugsgebieten bereits verändert und wird es weiter tun. Dies verlangt nach einem besseren Prozessverständnis des Abschmelzens des in Blockgletschern gebundenen Permafrosteises. Fragen wie „Wie weit beeinflusst dies die Retentionswirkung dieser seichten Aquifere und in weiterer Folge generell das Abflussverhalten alpiner Einzugsgebiete?“ gilt es hierbei zu beantworten.
- Schnee ist eine der wichtigsten Grundwasserneubildungskomponenten, deren Schmelzprozess und die damit verbundenen Auswirkungen auf die zeitlich verzögerte Grundwasserneubildung noch weitgehend unklar ist. Die Änderung der zu erwartenden Schneedeckendynamik aufgrund des Klimawandels hat aber nicht nur Auswirkungen auf die Wasserressource selbst, sondern beeinflusst maßgeblich das Temperaturverhalten der grobblockigen Deckschicht von Blockgletschern und damit den Abschmelzprozess des Permafrosteises.
- Die Schwermetallbelastung der Quellwässer scheint in erster Linie an Quellen aus intakten Blockgletschern gebunden zu sein. Im gegenständlichen Projekt war eine systematische Probenahme sämtlicher Quellen (inklusive Quellen, die nicht an Blockgletscher gebunden sind) in Teilgebieten, wo Belastungen bekannt waren, nicht vorgesehen. Die Untersuchungen fokussierten sich auf die Charakterisierung der hydrochemischen Belastung und ihre großflächige Ausbreitung im österreichischen Alpenraum. Hier sind weitere Forschungsvorhaben zu empfehlen, die entsprechend standardisiert hydrochemische und isotopenhydrologische sowie geochemische Analysen der Quellwässer bzw. Lithologien im Einzugsgebiet in Gebiete mit belasteten und nicht belasteten Quellwässern vorsehen.

Wesentlicher Punkt für alle weiteren Forschungsaktivitäten bildet aber ein speziell auf die jeweiligen Fragen abgestimmtes Monitoring, welches sich über ausreichende Zeitdauer erstrecken soll. Für die Beantwortung von Forschungsfragen in Bezug auf Klimawandel und seine Auswirkungen ist daher konsequent ein Langzeitmonitoring anzustreben, um sowohl die hydrologischen aber auch thermischen Gegebenheiten erfassen zu können. Das heißt, bestehende Messsysteme wie bspw. an den reliktschen und intakten Blockgletschern Schöneben (reliktisch), Ölgrube Süd (aktiv, mit Kargletscher) und Bergli/Lareintal (aktiv) sind als Grundvoraussetzung anzusehen und weiter zu führen, um in weiterer Folge ein besseres Verständnis des Abflussverhaltens alpiner Einzugsgebiete, die durch Blockgletscher beeinflusst sind, zu erarbeiten und mögliche Auswirkungen des Klimawandels und die damit in engem Zusammenhang stehende künftige wasserwirtschaftliche Nutzung dieser Einzugsgebiete abschätzen bzw. aufzeigen zu können.

Graz, April 2019



Assoz.-Prof. Dr. Gerfried Winkler (Projektleitung)



Ao.Prof. Dr. Karl Krainer



Dr. DI Thomas Wagner

Projektteam:

Universität Graz: Alexander Brodacz, Markus Eder, Kajetan Heigert, Simon Kainz, Andreas Kellerer-Pirklbauer, Roswitha Pleschberger, Thomas Wagner, Michael Wedenig, Gerfried Winkler

Universität Innsbruck: Karl Krainer, Dominik Klackl, Teresa Kogler, Thomas Pedevilla, Sabine Pernreiter, Markus Ribis, Aaron Rieder

Universität Freiburg: Stefan Hergarten

Danksagung

An dieser Stelle sei den GIS-Abteilungen der beteiligten Bundesländer Vorarlberg, Tirol, Salzburg, Steiermark und Kärnten für die Bereitstellung der ALS-Datensätze ausdrücklich gedankt. Des Weiteren wird den Kolleginnen und Kollegen der Landesabteilungen und der Landeslabore, des Umweltbundesamtes, sowie der Abteilung Nationale und internationale Wasserwirtschaft des BMNT für die sehr gute Zusammenarbeit und ihre Unterstützung gedankt. Ein weiterer Dank gilt Dr. DI Leis für die hilfreichen Diskussionen bezüglich Isotopenauswertung.

10 Literatur

- Anderson, R.S., Anderson, L.S., Armstrong, W.H., Rossi, M.W. & Crump, S.E. (2018): Glaciation of alpine valleys: The glacier – debris-covered glacier – rock glacier continuum. *Geomorphology* 311:127-142.
doi:10.1016/j.geomorph.2018.03.015.
- Ballantyne, C.K. & Kirkbridge, M.P. (1986): The characteristics and significance of some lateglacial protalus ramparts in upland Britain. *Earth Surfaces Processes and Landforms* 11:659-671.
- Barsch, D. (1992): Permafrost creep and rockglaciers. *Permafrost and Periglacial Processes* 3:175-188.
- Barsch, D. (1996): Rockglaciers. Indicators for the present and former geocology in high mountain environments. Springer, Berlin.
- Berger, J., Krainer, K. & Mostler, W. (2004): Dynamics of an active rock glacier (Ötztal Alps, Austria). *Quaternary Research* 62:233-242.
- Berka, R., Philippitsch, R., Katzlberger, Ch., Schubert, G. & Hörhan, Th. (2014a): Radionuklide in Grundwässern, Gesteinen und Bachsedimenten Österreichs 1 : 500 000. Geologische Themenkarte. Geologische Bundesanstalt, Wien.
https://www.bmnt.gv.at/wasser/wasserqualitaet/karte_radionuklide.html, letzter Zugriff: 11.4.2019.
- Berka, R., Katzlberger, Ch., Philippitsch, R., Schubert, G., Korner, M., Landstetter, C., Motschka, K., Pirkl, H., Grath, J., Draxler, A. & Hörhan, Th. (2014b): Erläuterungen zur geologischen Themenkarte Radionuklide in Grundwässern, Gesteinen und Bachsedimenten Österreichs 1 : 500 000. Geologische Bundesanstalt, Wien.
https://www.bmnt.gv.at/wasser/wasserqualitaet/karte_radionuklide.html, letzter Zugriff: 11.4.2019.
- 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
- Boeckli, L., Brenning, A., Gruber, S. & Noetzli, J. (2012): Permafrost distribution in the European Alps: calculation and evaluation of an index map and summary statistics. *The Cryosphere* 6:807-820.
- Brodacz, A. (2019): Speicherverhalten und Entwässerungsdynamik von Blockgletschern – Vergleichende Untersuchungen zwischen intakten und reliktschen Blockgletschern. Unveröffentl. Masterarbeit, Karl-Franzens-Universität Graz.
- Burger, K.C., Degenhardt, J.J. & Giardino, J.R. (1999): Engineering geomorphology of rock glaciers. *Geomorphology* 31:93-132.

- Eder, M. (2019): Origin of arsenic contamination of rock glacier springs in alpine headwaters of the Seckauer Tauern Range (Austria). Unveröffentl. Masterarbeit, Karl-Franzens-Universität Graz.
- Ehlers, J., Gibbard, P.L. & Hughes, P.D. (Eds.) (2011): Quaternary Glaciations – Extent and Chronology. A closer look. *Development in Quaternary Sciences* 15:2-1108.
- Engel, M., Penna, D., Bertoldi, G, Dell’Agnese, A., Soulsby, C. & Comiti, F. (2016): Identifying run-off contributions during melt-induced run-off events in a glazierized alpine catchment. *Hydrological Processes* 30: 343-364.
- Frauenfelder, R. & Käab, A. (2000): Towards a palaeoclimatic model of rock-glacier formation in the Swiss Alps. *Annals of Glaciology* 31:281-286.
- 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. (eds.), *Periglacial Geomorphology*. Wiley, Chichester, 159-184.
- Gödel, S. (1993): Geohydrologie der Blockgletscher im Hochreichhart-Gebiet (Seckauer Tauern, Steiermark). MSc Arbeit, Universität Wien, Österreich.
- Grassler, F. (1984): Alpenvereinseinteilung der Ostalpen (AVE). *Berg '84* (Alpenvereinsjahrbuch 108): 215 – 224.
- GZÜV (2006): Gewässerzustandsüberwachungsverordnung; StF: BGBl. II Nr. 479/2006 (i.d.g.F).
- Haerberli, W. (1985): Creep of mountain permafrost: Internal structure and flow of alpine rock glaciers. *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich* 77:1-142.
- Haerberli, W. (2005): Investigating glacier-permafrost relationships in high-mountain areas: historical background, selected examples and research needs. In: Harris, C., Murton, J.B. (Eds.), *Cryospheric Systems: Glaciers and Permafrost: The Geological Society of London, Spec. Publ., 242*, pp. 29–37.
- Haerberli, W. (2013): Mountain permafrost – research frontiers and a special long-term challenge. *Cold Regions Science and Technology* 96: 71-76. doi:10.1016/j.coldregions.2013.02.004
- Haerberli, W., Hallet, B., Arenson, L., Elconin, R., Humlum, O., Käab, A., Kaufmann, V., Ladanyi, B., Matsuoka, N., Springman, S. & Vonder Mühll, D. (2006): Permafrost Creep and Rock Glacier Dynamics. *Permafrost and Periglacial Processes* 17: 189–214. doi:10.1002/ppp.561.
- Hager, B. & Foelsche, U. (2015): Stable isotope composition of precipitation in Austria. *Austrian Journal of Earth Sciences* 108/2: 2-13. doi:10.17738/ajes.2015.0012.

- Harrington JS, Mozil A, Hayashi M & Bentley LR. (2018): Groundwater flow and storage processes in an inactive rock glacier. *Hydrological Processes* 32: 3070–3088. doi.org/10.1002/hyp.13248
- Harrison, S., Whalley, B. & Anderson, E. (2008): Relict rock glaciers and protalus lobes in the British Isles: implications for Late Pleistocene mountain geomorphology and palaeoclimate. *Journal of Quaternary Science* 23/3: 287-304. doi: 10.1002/jqs.1148
- 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 and Periglacial Processes* 18: 351-367. doi: 10.1002/ppp.60
- 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. *Austrian Journal of Earth Sciences* 105/2: 12-31.
- Heigert, K. (2018): Speicherverhalten und Abflussdynamik aktiver Blockgletscher am Beispiel Ölgrube Süd, Kaunertal. Unveröffentl. Masterarbeit, Technische Universität Graz.
- Hölting, B. & Coldewey, W.G. (2013): Hydrogeologie - Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie. Springer Spektrum Verlag, Berlin/Heidelberg, 438 S.
- Humer, F. & Stadler, E. (2015): Probennahmehandbuch Chemie Wasser – Grundwasser, Oberflächengewässer, Sedimente.
- Humlum, O. (1982): Rock glacier types on Disko, Central West Greenland. *Geografisk Tidsskrift* 82: 59-66.
- Jones, D.B., Harrison, S., Anderson, K., Selly, H.L., Wood, J.L. & Betts, R.A. (2017): The distribution and hydrological significance of rock glaciers in the Nepalese Himalaya. *Global and Planetary Change* 160: 123-142.
- Jones, D.B., Harrison, S., Anderson, K., Betts, R.A. (2018): Mountain rock glaciers contain globally significant water stores. *Scientific Reports* 8, 2834. doi: 10.1038/s41598-018-21244-w
- Jones, D.B., Harrison, S., Anderson, K., Whalley, W.B. (2019): Rock glaciers and mountain hydrology: A review. *Earth-Science Reviews*, doi: 10.1016/j.earscirev.2019.04.001
- Kaiser, A., Scheifinger, H., Kralik, M., Papesch, W., Rank, D. & Stichler, W. (2002): Links between meteorological conditions and spatial/temporal variations in long-term isotope records from the Austrian precipitation network. 1563-0153, International Atomic Energy Agency (IAEA).
- Kellerer-Pirklbauer, A., Lieb, G.K. & Kleinfurchnner, H. (2012): A new rock glacier inventory in the eastern European Alps. *Austrian Journal of Earth Sciences* 105/2: 78-93.

- Kellerer-Pirklbauer, A., Wagner, T. & Winkler, G. (2016): Inventarisierung von blockgletscher-verdächtigen Formen und deren hydrologischen Einzugsgebieten in den steirischen Niederen Tauern mit Hilfe von hochaufgelösten Geländemodellen. *Joannea Geologie und Palaeontologie* 12:53-62.
- Klackl, D. (2018): Quartärgeologie und Hydrogeologie mit Schwerpunkt Blockgletscher in der Umgebung der Hochschoberhütte, Schobergruppe (Osttirol). Unveröffentlichte Masterarbeit, Universität Innsbruck, 97 Seiten.
- Kogler, T. (2018): Quartärgeologie und Permafrost (Blockgletscher) am Tuxer Hauptkamm (Zillertaler Alpen, Tirol, Österreich). Unveröffentlichte Masterarbeit, Universität Innsbruck, 140 Seiten.
- Krainer, K. & Mostler, W. (2002): Hydrology of active rock glaciers: examples from the Austrian Alps. *Arctic Antarctic and Alpine Research* 34:142–149.
- Krainer, K. & Mostler, W. (2006): Flow velocities of active rock glaciers in the Austrian Alps. *Geografiska Annaler A* 88/4:267–280. doi:10.1111/j.0435-3676.2006.00300.x
- Krainer, K. & Ribis, M. (2012): A Rock Glacier Inventory of the Tyrolean Alps (Austria). *Austrian Journal of Earth Sciences* 105/2:32-47.
- Krainer, K., Mostler, W. & Spötl, C. (2007): Discharge from active rock glaciers, Austrian Alps: a stable isotope approach. *Austrian Journal of Earth Sciences* 100:102–112.
- Krainer, K., Kellerer-Pirklbauer, A., Kaufmann, V., Lieb, G.K., Schrott, L., Hausmann, H. (2012): Permafrost research in Austria: history and recent advances. *Austrian Journal of Earth Sciences* 105/2:2-11.
- Krainer, K., Bressan, D., Dietre, B., Haas, J.N., Hajdas, I., Lang, K., Mair, V., Nickus, U., Reidl, D., Thies, H. & Tonidandel, D. (2015a): 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
- Krainer, K., Ribis, M. & Schmidt, V. (2015b): Der Blockgletscher im Inneren Hochebenkar, in: Schallhart, N. & Erschbamer, B. (eds), *Forschung am Blockgletscher - Methoden und Ergebnisse*, Series Alpine Forschungsstelle Obergurgl Band 4:77-96, Innsbruck university press.
- Kresic, N. & Bonacci, O. (2010): Spring discharge hydrograph. In: Kresic, N., Stevanovic, Z. (Hrsg.) *Groundwater Hydrology of Springs: Engineering, Theory, Management, and Sustainability*, S. 129–163. Elsevier, Amsterdam.
- Kresic, N. & Stevanovic, Z. (2010): *Groundwater Hydrology of Springs: Engineering, Theory, Management, and Sustainability*, S. 573. Elsevier, Butterworth-Heinemann, Amsterdam.

- Kuhn, M. (2012): Rain and snow at high elevation. In: *Plants in Alpine Regions*, Lütz, C. (Hg.), Springer Verlag Wien, New York, S. 1-10.
- Kuhn, M., Dreiseitl, E. & Emprechtinger, M. (2013): Temperatur und Niederschlag an der Wetterstation Obergurgl, 1953-2011. In: Koch, E.-M., Erschbamer, B. (Hrsg.) *Klima, Wetter, Gletscher im Wandel. Alpine Forschungsstelle Obergurgl – Band 3*, S. 11-30. Innsbruck University Press.
- Lieb, G.K., Kellerer-Pirklbauer, A. & Kleinfurchnner, H. (2012): Second rock glacier inventory (RGI2) of Central and Eastern Austria, link to Shapefile. <https://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.869805>
- Lieb, G.K., Kellerer-Pirklbauer, A., Kaufmann, V., Avian, M. (2016): The Graz permafrost monitoring network in the Hohe Tauern National Park (Austria). *Das Grazer Permafrost-Monitoring-Netzwerk im Nationalpark Hohe Tauern (Österreich) – Joannea - Geologie und Paläontologie* 12, 9-16.
- Liebminger, A., Haberhauer, G., Papesch, W. & Heiss, G. (2006): Correlation of the isotopic composition in precipitation with local conditions in alpine regions. *Journal of Geophysical Research* 111:D05104. doi: 10.1029/2005JD006258
- Maillet, E. (1905): *Mécanique et physique du globe: essai d'hydraulique souterraine et fluviale [Mechanics and physics of the world: an essay of subterranean and fluvial hydraulics]*. Hermann, Paris
- McCuen, R. H. (2005): *Hydrologic analysis and design (3rd ed.)*. Upper Saddle River, USA: Pearson Prentice Hall.
- Morard, S., Delaloye, R. & Dorthe, J. (2008): Seasonal Thermal Regime of a Mid-Latitude Ventilated Debris Accumulation. In: *Proceedings of the ninth international conference on permafrost, Fairbanks*, S. 1233-1238.
- Nash, J.E. & Sutcliffe, J.V. (1970): River flow forecasting through conceptual models. Part I – A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10/3, 282-290. doi: 10.1016/0022-1694(70)90255-6
- Nepal, S., Chen, J., Penton D.J., Neumann, L.E., Zheng, H. & Wahid, S. (2017): Spatial GR4J conceptualization of the Tamor glaciated alpine catchment in Eastern Nepal: evaluation of GR4JSG against streamflow and MODIS snow extent. *Hydrological Processes* 31, 51-68.
- NGP 2015 – 2. Nationaler Gewässerbewirtschaftungsplan (2015): BMLFUW, Sektion IV Wasserwirtschaft. <https://www.bmnt.gv.at/wasser/wisa/fachinformation/ngp/ngp-2015.html>
- Nickus, U., Krainer, K., Thies, H. & Tolotti, M. (2015): Blockgletscherabflüsse im Äußeren Hohebenkar – Hydrologie, Wasserchemie und Kieselalgen, in: Schallhart, N. & Erschbamer, B. (eds), *Forschung am Blockgletscher* -

- Methoden und Ergebnisse, Series Alpine Forschungsstelle Obergurgl Band 4:117-134, Innsbruck university press.
- 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
- Philippitsch, R. & Loishandl-Weisz, H. [Hrsg.] (2012): *Metalle im Grundwasser in Österreich. Karten und Erläuterungen.* Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien. https://www.bmnt.gv.at/wasser/wasserqualitaet/grundwasser/metalle_gw_2013.html, letzter Zugriff: 11.4.2019.
- Philippitsch, R. & Humer, F. [Hrsg.] (2018): *Isotopenzusammensetzung in natürlichen Wässern in Österreich – Grundlagen und Anwendungsbeispiele zur Wasser-Isotopenkarte Österreichs 1:500.000.* Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus, Wien. <https://www.bmnt.gv.at/wasser/wasserqualitaet/wasserisotopen.html>, letzter Zugriff: 11.4.2018.
- Ribis, M. (2017): *Geologisch-hydrogeologische und hydrochemische Untersuchungen in Permafrostbereichen der Ötztaler Alpen (Tirol, Österreich).* Dissertation, Universität Innsbruck, Innsbruck.
- Richter, W. & Lillich, W. (1975): *Abriß der Hydrogeologie.* 281 Seiten. Schweizerbartsche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- Rieder, A. (2017): *Geologische, geomorphologische und hydrogeologische Untersuchungen im Bereich Ölgrube, Kaunergrat, Ötztaler Alpen.* Unveröffentl. Masterarbeit, Universität Innsbruck, Innsbruck.
- Robl, J., Fritz, H., Stüwe, K. & Bernhard, F. (2004): Cyclic fluid infiltration in structurally controlled Ag-Pb-Cu occurrences (Schladming, Eastern Alps). *Chemical Geology* 205:17-36.
- 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, doi:10.1002/2016WR019341.
- Scapozza, C. (2015): Investigation on protalus ramparts in the Swiss Alps. *Geogr. Helv.* 70:135-139.
- Schmidt, W. (2014): *Geologisch-geomorphologische Kartierung eines ausgewählten Gebietes im Windachtal (Ötztal/Tirol).* Unveröffentlichte Masterarbeit, Universität Innsbruck, 169 Seiten.

- Schmid, M.-O., Baral, P., Gruber, S., Shahi, S., Shrestha, T., Stumm, D. & Wester, P. (2015): Assessment of permafrost distribution maps in the Hindu Kush Himalayan region using rock glaciers mapped in Google Earth. *the Cryosphere* 9:2089-2099. doi:10.5194/tc-9-2089-2015.
- Schnegg, P.A. (2002): An inexpensive field fluorometer for hydrogeological tracer tests with three tracers and turbidity measurement. In: Bovanegra E, Martinez D, Massone H (eds) XXXII IAH and ALHSUD Congress Groundwater and Human Development, Mar del Plata, Argentina, October 2002.
- Schöner, W. & Dos Santos Cardoso, E. (2004): Datenbereitstellung, Entwicklung von Regionalisierungstools und einer Schnittstelle zu den regionalen Klimamodellen (Arbeitsbericht für den Zeitraum 1.11.2003 bis 30.9.2004). Projektbericht für das Projektjahr 1, Projekt reclip:more (Research for Climate Protection: Model Run Evaluation). 44 pp, http://foresight.ait.ac.at/SE/projects/reclip/reports/report6_Regionalisierung_ZAMG.pdf
- Steenstrup, K.J.V. (1883): Bidrag til Kjendskab til Bræerne og Bræ-Isen i Nord-Grønland. *Meddelelser om Grønland* 4/2:69-112.
- Stocker, K. & Krainer, K. (2011): Abschlussbericht – Blockgletscherinventar Vorarlberg. Unveröffentlichter Bericht, 6 Seiten.
- Stocker, K. (2012a): Geologie und Blockgletscher der Madererspitze (Vorarlberg). Unveröffentlichte Masterarbeit, Institut für Geologie und Paläontologie, Universität Innsbruck. 134 Seiten.
- Stocker, K. (2012b): Blockgletscher in Vorarlberg und in der Verwallgruppe. *Museumsverein Jahrbuch Vorarlberger Landesmuseum* 2012:124-139.
- Sueker, J.K., Ryan, J.N., Kendall, C. & Jarrett, R.D. (2000): Determination of hydrological pathways during snowmelt for alpine/subalpine basins, Rocky Mountain National Park, Colorado. *Water Resources Research* 36:63-75.
- Thies, H., Nickus, U., Tolotti, M., Tessadri, R. & Krainer, K. (2013): Evidence of rock glacier melt impacts on water chemistry and diatoms in high mountain streams. *Cold Regions Science and Technology* 96:77-85.
- Thies, H., Nickus, U., Tessadri, R., Tropper, P. & Krainer, K. (2017): Peculiar arsenic, copper, nickel, uranium, and yttrium-rich stone coatings in a high mountain stream in the Austrian Alps. *Austrian Journal of Earth Sciences* 110/2. doi:10.17738/ajes.2017.0012
- Tromp-van Meervels, H.J. & McDonnell, J.J. (2006): Threshold relations in subsurface stormflow: 2. The fill and spill hypothesis. *Water Resources Research* 42:W02411. doi:10.1029/2004WR003800
- Untersweg, T. & Schwendt, A. (1995): Die Quellen der Blockgletscher in den Niederen Tauern. *Bericht der wasserwirtschaftlichen Planung* Nr. 78, Graz, S. 76.

- Untersweg, T. & Schwendt, A. (1996): Blockgletscher und Quellen in den Niederen Tauern. *Mitteilungen der Österreichischen Geologischen Gesellschaft* 87: 47-55.
- Wagner, T., Mayaud, C., Benischke, R. & Birk, S. (2013a): Ein besseres Verständnis des Lurbach-Karstsystems durch ein konzeptionelles Niederschlags-Abfluss-Modell. *Grundwasser* 18: 225-235.
- Wagner, T., Pauritsch, M. & Winkler, G. (2016): Impact of relict rock glaciers on spring and stream flow of alpine watersheds: Examples of the Niedere Tauern Range, Eastern Alps (Austria). *Austrian Journal of Earth Sciences* 109/1: 84-98. doi: 10.17738/ajes.2016.0006
- Wagner, T., Themeßl, M., Schüppel, A., Gobiet, A., Stigler, H. & Birk, S. (2017): Impacts of climate change on stream flow and hydro power generation in the Alpine region. *Environmental Earth Sciences* 76: 4. doi: 10.1007/s12665-016-6318-6
- Wagner, T., Winkler, G., Ribis, M., Kellerer-Pirklbauer, A., Lieb, G.K. & Krainer, K. (2018a): Rock glaciers – prominent landforms in (protected areas of) Austria. Conference Volume, 6th Symposium for Research in Protected Areas: 689-692. doi: 10.1553/np_symposium2017
- Wagner, T., Pauritsch, M., Hergarten, S. & Winkler, G. (2018b): Spring water temperatures affected by cooling effects of relict rock glaciers – preliminary results of the Niedere Tauern Range, Austrian Alps. – In: Koukal, V. & Wagreich, M. (Eds.): PANGEO AUSTRIA 2018 – Abstracts, 24–26 September 2018, Vienna. – *Berichte der Geologischen Bundesanstalt* 128, 28, Vienna.
- Wagner, T., Pauritsch, M., Mayaud, C., Kellerer-Pirklbauer, A., Thalheim, F. & Winkler, G.: Difference in ground cooling of the blocky surface layers of two nearby relict rock glaciers (Niedere Tauern Range, Austria). *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, in Begutachtung.
- Wahrhaftig, C. & Cox, A. (1959): Rock glaciers in the Alaska Range. *Geological Society of America Bulletin* 70: 383–436. doi: 10.1130/0016-7606(1959)70[383:RGITAR]2.0.CO;2.
- Wels, C., Cornett, R.J. & Lazarete, B.D. (1991): Hydrograph separation: a comparison of geochemical and isotopic tracers. *Journal of Hydrology* 122: 253-274.
- Wemhöner, U., Humer, F., Schubert, G., Berka, R., Philippitsch, R. & Hörhan, Th. (2015): Uran in Grundwässern Österreichs. *Bericht und Karte* 1 : 500.000. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.
<https://www.bmnt.gv.at/wasser/wasserqualitaet/uran-GW.html>, letzter Zugriff: 11.4.2018.

- Wetzel, K-F. (2003): Runoff prediction processes in small alpine catchments within the unconsolidated Pleistocene sediments of the Laimbach area (Upper Bavaria). *Hydrological Processes* 17:2463-2483.
- Winkler, G. (2018): *Alpine Hydrogeology of Crystalline Catchments - Groundwater flow and its impact on the runoff of alpine catchments*. Unveröffentl. Habilitationsschrift, S. 381, Karl-Franzens-Universität Graz.
- Winkler, G., Pauritsch, M., Wagner, T. & Kellerer-Pirkelbauer, A. (2016a): Reliktische Blockgletscher als Grundwasserspeicher in alpinen Einzugsgebieten der Niederen Tauern. *Berichte der Wasserwirtschaftlichen Planung Steiermark*, Band 87, S. 134.
- Winkler, G., Wagner, T., Pauritsch, M., Birk, S., Kellerer-Pirkelbauer, A., Benischke, R., Leis, A., Morawetz, R. & Schreilechner, M.G. (2016b): 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., Ribis, M., Pauritsch, M. & Krainer, K. (2018a): The impact of rock glaciers on the runoff of alpine catchments in protected areas of Austria. *Conference Volume, 6th Symposium for Research in Protected Areas: 735-738*. doi:10.1553/np_symposium2017
- Winkler, G., Wagner, T., Krainer, K., Ribis, M. & Hergarten, S. (2018b): Hydrogeology of Rock Glaciers – Storage Capacity and Drainage Dynamics – an Overview. In: Sychev, V.G., Mueller, L.; *Novel methods and results of landscape research in Europe, Central Asia and Siberia, Vol II/71*, 329-334.
- Winkler, G., Kainz, S., Wagner, T., Leis, A. & Krainer, K. (2018c): Flow component characterization of alpine aquifers – an isotopic approach. 16th Stable Isotope Network Austria Meeting SINA Tagung.

Anhang A

Statistik zum Blockgletscherinventar

Die folgenden Tabellen enthalten die statistischen Kennzahlen zur Seehöhe der Blockgletscherstirn (Tabellen A1-A3), mittleren Blockgletscherneigung (Tabellen A4, A5), Länge und Breite (Tabelle A6) bzw. Fläche (Tabellen A7, A8) (vgl. Abschnitt 4.2.1)

Tabelle A1: Verteilung der Seehöhe der Blockgletscherstirn (minElevLf) nach Bundesländern (Stichprobenumfang N [-], Minimalwert Min [m ü.A.], Maximalwert Max [m ü.A.], 10 %-, 25 %-, 75 %-, 90 %-Perzentil P10, P25, P75, P90 [m ü.A.], Interquartilabstand IQR [m], Standardabweichung s [m]).

Bundesland	N	Median	Mittelwert	Min	Max	P10	P25	P75	P90	IQR	s
Österreich	5769	2276,27	2233,98	475,47	3240,64	1794,82	1999,71	2486,28	2632,39	486,58	339,64
Kärnten	816	2213,01	2182,27	475,47	2888,33	1834,44	1994,78	2399,57	2546,26	404,79	304,06
Nordtirol	2539	2428,18	2401,10	1447,26	3240,64	2059,63	2248,89	2575,70	2702,60	326,81	255,65
Osttirol	609	2457,05	2434,14	1708,53	2904,41	2173,27	2295,88	2563,57	2682,00	267,69	191,97
Salzburg	789	2027,96	2019,76	527,85	2883,19	1682,83	1866,29	2216,10	2372,24	349,81	299,74
Steiermark	713	1853,92	1823,72	652,03	2554,20	1550,38	1714,63	1960,88	2072,66	246,25	244,83
Vorarlberg	303	2151,76	2099,10	831,71	2743,64	1662,56	1920,28	2303,95	2441,74	383,66	304,71

Tabelle A2: Verteilung der Seehöhe der Blockgletscherstirn (minElevLf) nach Bundesländern und Aktivität (LfState) (Stichprobenumfang N [-], Minimalwert Min [m ü.A.], Maximalwert Max [m ü.A.], 10 %-, 25 %-, 75 %-, 90 %-Perzentil P10, P25, P75, P90 [m ü.A.], Interquartilabstand IQR [m], Standardabweichung s [m]).

Bundesland	N	Median	Mittelwert	Min	Max	P10	P25	P75	P90	IQR	s
Österreich, intakt	2309	2513,29	2515,35	1895,13	3240,64	2297,74	2397,60	2628,75	2735,85	231,16	169,36
Österreich, reliktisch	3460	2059,16	2046,13	475,47	2812,53	1695,43	1878,88	2254,88	2402,59	376,00	291,68
Kärnten, intakt	208	2468,60	2480,85	2069,84	2888,33	2304,03	2386,24	2573,26	2670,73	187,02	144,95
Kärnten, reliktisch	608	2097,29	2076,96	475,47	2701,81	1765,42	1937,20	2270,79	2381,99	333,59	276,29
Nordtirol, intakt	1537	2531,60	2535,83	2073,52	3240,64	2325,63	2414,52	2646,64	2753,54	232,11	168,91
Nordtirol, reliktisch	1002	2210,76	2194,33	1447,26	2812,53	1892,95	2055,30	2357,80	2468,11	302,50	226,33
Osttirol, intakt	288	2564,21	2574,56	2138,67	2904,41	2419,54	2494,56	2659,74	2746,49	165,18	124,44
Osttirol, reliktisch	321	2309,36	2309,50	1708,53	2683,63	2114,91	2205,05	2431,72	2494,72	226,67	151,23
Salzburg, intakt	155	2366,37	2368,52	1895,13	2883,19	2204,14	2268,91	2465,83	2524,28	196,91	143,85
Salzburg, reliktisch	634	1967,78	1934,50	527,85	2471,81	1633,80	1827,13	2103,10	2218,43	275,97	264,09
Steiermark, intakt	20	2282,73	2293,10	2080,46	2554,20	2166,46	2204,36	2384,33	2420,13	179,97	118,35
Steiermark, reliktisch	693	1844,34	1810,17	652,03	2293,55	1548,51	1709,73	1954,62	2051,30	244,89	233,96
Vorarlberg, intakt	101	2348,99	2375,10	2064,42	2743,64	2211,49	2284,55	2463,64	2562,23	179,08	138,26
Vorarlberg, reliktisch	202	2020,89	1959,46	831,71	2463,23	1592,93	1800,22	2166,25	2244,91	366,04	268,39

Tabelle A3: Verteilung der Seehöhe der Blockgletscherstirn (minElevLf) nach Ausrichtung (aspLf) und Aktivität (LfState) (Stichprobenumfang N [-], Minimalwert Min [m ü.A.], Maximalwert Max [m ü.A.], 10 %-, 25 %-, 75 %-, 90 %-Perzentil P10, P25, P75, P90 [m ü.A.], Interquartilabstand IQR [m], Standardabweichung s [m]).

aspLf, LfState	N	Median	Mittelwert	Min	Max	P10	P25	P75	P90	IQR	s
Nord, intakt	425	2416,15	2431,34	2079,53	2831,53	2232,83	2332,08	2542,04	2630,87	209,96	147,56
Nord, reliktisch	549	1954,38	1924,00	475,47	2566,78	1645,72	1798,17	2086,21	2193,43	288,04	250,84
Nordost, intakt	351	2461,30	2457,71	2064,42	2949,07	2247,20	2343,69	2558,24	2659,71	214,55	158,27
Nordost, reliktisch	571	1975,96	1962,09	652,03	2609,15	1620,00	1839,65	2155,19	2271,94	315,54	272,75
Ost, intakt	275	2550,80	2557,37	2095,98	3087,68	2370,35	2467,98	2643,33	2747,36	175,35	155,00
Ost, reliktisch	528	2033,84	2024,63	760,58	2612,95	1680,75	1852,96	2255,57	2365,97	402,60	285,29
Südost, intakt	191	2604,75	2613,81	2253,97	3240,64	2411,11	2500,19	2719,09	2796,99	218,89	156,39
Südost, reliktisch	425	2118,18	2090,58	857,94	2812,53	1715,47	1900,83	2322,80	2462,98	421,97	310,43
Süd, intakt	163	2632,38	2633,02	2248,82	3042,83	2458,58	2529,78	2727,60	2814,13	197,82	142,59
Süd, reliktisch	408	2244,14	2195,40	1287,13	2777,32	1791,02	2027,09	2418,30	2500,58	391,22	284,62
Südwest, intakt	157	2613,31	2623,28	2214,06	3009,37	2429,62	2517,68	2730,13	2832,80	212,45	158,68
Südwest, reliktisch	261	2243,09	2187,52	851,14	2752,05	1795,16	2052,61	2389,11	2471,73	336,50	283,57
West, intakt	312	2550,46	2556,57	2169,02	3010,49	2369,07	2448,55	2658,16	2761,70	209,61	153,63
West, reliktisch	282	2193,04	2146,21	828,24	2655,93	1841,26	2019,60	2309,60	2415,29	290,00	253,80
Nordwest, intakt	435	2457,38	2461,67	1895,13	2880,74	2269,41	2359,14	2562,72	2652,54	203,59	152,05
Nordwest, reliktisch	436	2028,81	2003,60	535,20	2614,30	1697,57	1891,30	2182,61	2280,56	291,31	264,57

Tabelle A4: Verteilung der mittleren Blockgletscherneigung (slopeLf) nach Bundesländern (Stichprobenumfang N [-], Minimalwert Min [°], Maximalwert Max [°], 10 %-, 25 %-, 75 %-, 90 %-Perzentil P10, P25, P75, P90 [°], Interquartilabstand IQR [°], Standardabweichung s [°]).

Bundesland	N	Median	Mittelwert	Min	Max	P10	P25	P75	P90	IQR	s
Österreich	5769	23,24	23,56	12,61	42,76	18,90	20,82	25,93	28,57	5,11	3,85
Kärnten	816	22,11	22,47	12,88	34,74	18,22	20,09	24,85	27,04	4,76	3,50
Nordtirol	2539	24,37	24,65	12,61	42,76	20,11	21,91	27,00	29,72	5,08	3,89
Osttirol	609	23,27	23,65	15,33	38,59	18,83	20,82	26,00	28,86	5,18	3,91
Salzburg	789	22,27	22,57	13,09	35,48	18,02	19,92	25,09	27,45	5,17	3,69
Steiermark	713	21,77	22,16	14,25	36,59	18,01	19,71	24,32	26,60	4,60	3,41
Vorarlberg	303	23,06	23,11	15,94	32,51	19,28	21,04	25,19	26,90	4,15	3,00

Tabelle A5: Verteilung der mittleren Blockgletscherneigung (slopeLf) nach Ausrichtung (aspLf) und Aktivität (LfState) (Stichprobenumfang N [-], Minimalwert Min [°], Maximalwert Max [°], 10 %-, 25 %-, 75 %-, 90 %-Perzentil P10, P25, P75, P90 [°], Interquartilabstand IQR [°], Standardabweichung s [°]).

aspLf, LfState	N	Median	Mittelwert	Min	Max	P10	P25	P75	P90	IQR	s
Nord, intakt	425	25,58	25,90	15,39	40,49	21,46	23,24	28,19	30,93	4,94	3,81

Nord, reliktsch	549	22,96	23,26	15,60	36,49	18,84	20,46	25,53	27,98	5,08	3,72
Nordost, intakt	351	25,00	24,96	16,57	34,85	20,70	22,44	27,17	29,18	4,74	3,41
Nordost, reliktsch	571	22,37	22,81	12,61	35,13	18,11	20,28	25,13	27,31	4,85	3,77
Ost, intakt	275	24,32	24,39	15,66	36,17	20,28	21,91	26,64	29,09	4,73	3,51
Ost, reliktsch	528	21,68	22,21	12,88	38,39	18,18	19,75	24,48	26,91	4,73	3,67
Südost, intakt	191	23,30	23,37	14,64	35,65	19,45	21,30	25,30	27,81	3,99	3,40
Südost, reliktsch	425	21,45	21,93	15,27	35,69	18,03	19,58	23,84	26,31	4,26	3,44
Süd, intakt	163	23,65	23,58	14,64	35,64	19,02	21,49	25,95	27,37	4,46	3,41
Süd, reliktsch	408	21,70	21,98	14,59	36,59	17,88	19,48	23,91	26,01	4,42	3,52
Südwest, intakt	157	24,54	24,39	16,20	36,44	19,51	21,60	26,60	28,68	5,00	3,66
Südwest, reliktsch	261	22,29	22,51	14,26	32,83	18,66	20,03	24,78	26,76	4,74	3,23
West, intakt	312	25,32	25,26	15,33	36,96	20,66	22,80	27,42	30,20	4,62	3,58
West, reliktsch	282	22,58	23,19	13,84	42,56	18,81	20,53	25,47	28,11	4,94	3,89
Nordwest, intakt	435	25,20	25,63	16,81	42,76	21,54	23,12	27,75	30,73	4,63	3,65
Nordwest, reliktsch	436	22,43	23,08	15,48	36,14	18,67	20,49	25,37	28,16	4,88	3,81

Tabelle A6: Verteilung der maximalen Länge entlang der (ehemaligen) Fließrichtung (maxLenLf), maximalen Breite normal dazu (maxWidLf), mittleren Breite (meanWidLf) bzw. des Verhältnisses maxLenLf/meanWidLf (ratioLWLF) für alle Blockgletscher (Stichprobenumfang N [-], Minimalwert Min [m] bzw. [-], Maximalwert Max [m] bzw. [-], 10 %-, 25 %-, 75 %-, 90 %-Perzentil P10, P25, P75, P90 [m] bzw. [-], Interquartilabstand IQR [m] bzw. [-], Standardabweichung s [m] bzw. [-]).

Attribut	N	Median	Mittelwert	Min	Max	P10	P25	P75	P90	IQR	s
maxLenLf	5769	246,18	305,39	17,38	1907,73	94,45	149,43	397,05	582,90	246,18	224,17
maxWidLf	5769	171,48	209,59	29,85	2761,98	88,69	120,52	251,40	371,54	171,48	142,58
meanWidLf	5769	126,40	149,93	24,73	1541,60	69,10	90,55	180,01	258,32	126,40	92,68
ratioLWLF	5769	2,06	2,29	0,10	11,35	0,65	1,22	3,05	4,13	2,06	1,44

Tabelle A7: Verteilung der Blockgletscherfläche (areaLf) nach Bundesländern (Stichprobenumfang N [-], Minimalwert Min [km²], Maximalwert Max [km²], 10 %-, 25 %-, 75 %-, 90 %-Perzentil P10, P25, P75, P90 [km²], Interquartilabstand IQR [km²], Standardabweichung s [km²]).

Bundesland	N	Median	Mittelwert	Min	Max	P10	P25	P75	P90	IQR	s
Österreich	5769	0,0310	0,0525	0,0007	0,9084	0,0085	0,0154	0,0634	0,1176	0,0480	0,0672
Kärnten	816	0,0267	0,0497	0,0007	0,7555	0,0066	0,0124	0,0644	0,1174	0,0520	0,0658
Nordtirol	2539	0,0338	0,0538	0,0021	0,7361	0,0100	0,0172	0,0637	0,1171	0,0465	0,0662
Osttirol	609	0,0323	0,0502	0,0027	0,5437	0,0105	0,0176	0,0621	0,1065	0,0445	0,0561
Salzburg	789	0,0291	0,0553	0,0016	0,6776	0,0073	0,0154	0,0656	0,1232	0,0503	0,0755
Steiermark	713	0,0318	0,0566	0,0009	0,9084	0,0074	0,0149	0,0667	0,1314	0,0519	0,0774
Vorarlberg	303	0,0195	0,0375	0,0012	0,3145	0,0060	0,0107	0,0476	0,0900	0,0369	0,0453

Tabelle A8: Verteilung der Blockgletscherfläche (areaLf) nach Ausrichtung (aspLf) und Aktivität (LfState) (Stichprobenumfang N [-], Minimalwert Min [km²], Maximalwert Max [km²], 10 %-, 25 %-, 75 %-, 90 %-Perzentil P10, P25, P75, P90 [km²], Interquartilabstand IQR [km²], Standardabweichung s [km²]).

aspLf, LfState	N	Median	Mittelwert	Min	Max	P10	P25	P75	P90	IQR	s
Nord, intakt	425	25,58	25,90	15,39	40,49	21,46	23,24	28,19	30,93	4,94	3,81
Nord, reliktisch	549	22,96	23,26	15,60	36,49	18,84	20,46	25,53	27,98	5,08	3,72
Nordost, intakt	351	25,00	24,96	16,57	34,85	20,70	22,44	27,17	29,18	4,74	3,41
Nordost, reliktisch	571	22,37	22,81	12,61	35,13	18,11	20,28	25,13	27,31	4,85	3,77
Ost, intakt	275	24,32	24,39	15,66	36,17	20,28	21,91	26,64	29,09	4,73	3,51
Ost, reliktisch	528	21,68	22,21	12,88	38,39	18,18	19,75	24,48	26,91	4,73	3,67
Südost, intakt	191	23,30	23,37	14,64	35,65	19,45	21,30	25,30	27,81	3,99	3,40
Südost, reliktisch	425	21,45	21,93	15,27	35,69	18,03	19,58	23,84	26,31	4,26	3,44
Süd, intakt	163	23,65	23,58	14,64	35,64	19,02	21,49	25,95	27,37	4,46	3,41
Süd, reliktisch	408	21,70	21,98	14,59	36,59	17,88	19,48	23,91	26,01	4,42	3,52
Südwest, intakt	157	24,54	24,39	16,20	36,44	19,51	21,60	26,60	28,68	5,00	3,66
Südwest, reliktisch	261	22,29	22,51	14,26	32,83	18,66	20,03	24,78	26,76	4,74	3,23
West, intakt	312	25,32	25,26	15,33	36,96	20,66	22,80	27,42	30,20	4,62	3,58
West, reliktisch	282	22,58	23,19	13,84	42,56	18,81	20,53	25,47	28,11	4,94	3,89
Nordwest, intakt	435	25,20	25,63	16,81	42,76	21,54	23,12	27,75	30,73	4,63	3,65
Nordwest, reliktisch	436	22,43	23,08	15,48	36,14	18,67	20,49	25,37	28,16	4,88	3,81

Anhang B

Statistik zum Blockgletschereinzugsgebietsinventar

Die folgenden Tabellen enthalten die statistischen Kennzahlen zur mittleren Seehöhe der Einzugsgebiete (Tabelle A9), mittleren Einzugsgebietsneigung (Tabelle A10), bzw. -fläche (Tabelle A11), sowie das Verhältnis von Blockgletscher- und Einzugsgebietsfläche (Tabelle A12) (vgl. Abschnitt 4.2.2).

Tabelle A9: Verteilung der mittleren Seehöhe der Blockgletschereinzugsgebiete (meanEleCat) nach Bundesländern (Stichprobenumfang N [-], Minimalwert Min [m ü.A.], Maximalwert Max [m ü.A.], 10 %-, 25 %-, 75 %-, 90 %-Perzentil P10, P25, P75, P90 [m ü.A.], Interquartilabstand IQR [m], Standardabweichung s [m]).

Bundesland	N	Median	Mittelwert	Min	Max	P10	P25	P75	P90	IQR	s
Österreich	5769	2441,09	2399,85	746,14	3302,62	1961,13	2166,23	2645,80	2790,31	479,57	330,02
Kärnten	816	2364,98	2341,86	746,14	2997,69	1993,62	2159,43	2529,95	2688,04	370,52	283,52
Nordtirol	2539	2601,53	2573,22	1718,52	3257,54	2241,07	2426,44	2742,64	2856,09	316,20	244,76
Osttirol	609	2596,98	2589,97	2110,50	2999,92	2354,82	2465,26	2711,96	2829,17	246,70	177,01
Salzburg	789	2188,76	2182,87	820,84	2970,10	1875,34	2047,27	2360,86	2533,11	313,59	284,23
Steiermark	713	2004,45	1986,98	873,94	2643,76	1728,62	1888,91	2127,65	2225,95	238,73	221,60

Vorarlberg	303	2308,03	2251,80	899,98	2820,22	1848,05	2097,11	2450,45	2581,26	353,34	288,87
------------	-----	---------	---------	--------	---------	---------	---------	---------	---------	--------	--------

Tabelle A10: Verteilung der mittleren Einzugsgebietsneigung (slopeCat) nach Bundesländern (Stichprobenumfang N [-], Minimalwert Min [°], Maximalwert Max [°], 10 %-, 25 %-, 75 %-, 90 %-Perzentil P10, P25, P75, P90 [°], Interquartilabstand IQR [°], Standardabweichung s [°]).

Bundesland	N	Median	Mittelwert	Min	Max	P10	P25	P75	P90	IQR	s
Österreich	5769	34,68	34,86	16,38	55,73	28,57	31,42	38,19	41,43	6,77	5,06
Kärnten	816	34,17	34,28	18,48	53,22	27,92	30,91	37,69	40,77	6,78	4,96
Nordtirol	2539	35,49	35,73	16,38	53,65	29,57	32,26	38,97	42,37	6,71	5,05
Osttirol	609	34,47	34,55	19,92	47,01	29,01	31,38	37,80	40,21	6,42	4,53
Salzburg	789	33,84	34,05	16,56	50,33	27,16	30,63	37,48	41,27	6,85	5,23
Steiermark	713	33,29	33,44	18,22	50,26	27,57	29,97	36,53	39,31	6,55	4,82
Vorarlberg	303	34,78	35,04	22,04	52,71	29,08	31,71	38,30	41,03	6,59	4,95

Tabelle A11: Verteilung der Einzugsgebietsfläche (areaCatInd) nach Bundesländern (Stichprobenumfang N [-], Minimalwert Min [km²], Maximalwert Max [km²], 10 %-, 25 %-, 75 %-, 90 %-Perzentil P10, P25, P75, P90 [km²], Interquartilabstand IQR [km²], Standardabweichung s [km²]).

Bundesland	N	Median	Mittelwert	Min	Max	P10	P25	P75	P90	IQR	s
Österreich	5769	0,1359	0,2757	0,0039	8,3396	0,0352	0,0638	0,3012	0,6203	0,2375	0,4539
Kärnten	816	0,1329	0,2857	0,0045	8,3396	0,0350	0,0611	0,3220	0,6223	0,2609	0,5221
Nordtirol	2539	0,1317	0,2659	0,0063	5,9585	0,0331	0,0608	0,2859	0,6049	0,2251	0,4429
Osttirol	609	0,1171	0,2222	0,0083	1,9713	0,0359	0,0600	0,2702	0,5314	0,2101	0,2783
Salzburg	789	0,1496	0,2883	0,0039	3,4045	0,0396	0,0713	0,3229	0,6519	0,2516	0,4142
Steiermark	713	0,1707	0,3506	0,0049	4,8312	0,0445	0,0796	0,3837	0,7782	0,3041	0,5523
Vorarlberg	303	0,1089	0,1970	0,0102	1,6100	0,0296	0,0544	0,2204	0,4588	0,1661	0,2423

Tabelle A12: Verteilung des Verhältnisses Blockgletscherfläche/Einzugsgebietsfläche (ratioArea) nach Bundesländern (Stichprobenumfang N [-], Minimalwert Min [-], Maximalwert Max [-], 10 %-, 25 %-, 75 %-, 90 %-Perzentil P10, P25, P75, P90 [-], Interquartilabstand IQR [-], Standardabweichung s [-]).

Bundesland	N	Median	Mittelwert	Min	Max	P10	P25	P75	P90	IQR	s
Österreich	5769	0,2478	0,2668	0,0072	0,9544	0,0885	0,1537	0,3564	0,4713	0,2027	0,1497
Kärnten	817	0,2199	0,2322	0,0096	0,7627	0,0818	0,1384	0,3048	0,4102	0,1664	0,1254
Nordtirol	2539	0,2804	0,2957	0,0072	0,9486	0,0995	0,1758	0,3963	0,5126	0,2205	0,1600
Osttirol	607	0,2943	0,3019	0,0125	0,8845	0,1026	0,1955	0,4047	0,4858	0,2092	0,1486
Salzburg	789	0,2312	0,2461	0,0099	0,9544	0,0804	0,1307	0,3387	0,4520	0,2081	0,1440
Steiermark	713	0,1957	0,2118	0,0093	0,7491	0,0714	0,1220	0,2848	0,3681	0,1628	0,1209
Vorarlberg	303	0,2233	0,2285	0,0137	0,6512	0,0748	0,1331	0,3118	0,3760	0,1786	0,1204

Anhang C

Messstellen nach Gebirgsgruppen

Tabelle A13: Anzahl beprobter Messstellen nach Gebirgsgruppen.

Gebirgsgruppe	Anzahl	Gebirgsgruppe	Anzahl
Schladminger Tauern	36	Lechquellen-Gebirge	5
Silvretta	20	Stubai Alpen	5
Schober-Gruppe	19	Goldberg-Gruppe	4
Öztaler Alpen	17	Rätikon	4
Zillertaler Alpen	13	Rottenmanner und Wölzer Tauern	4
Ankogel-Gruppe	10	Karwendel	3
Nockberge	10	Lavantaler Alpen	2
Verwall-Gruppe	9	Radstädter Tauern	2
Venediger-Gruppe	8	Glockner-Gruppe	1
Seckauer Tauern	6	Granatspitz-Gruppe	1
Kitzbüheler Alpen	5		

Tabelle A14: Beprobte Messstellen nach Gebirgsgruppen. Die Messstellenbezeichnung entspricht der Bezeichnung in der H₂O-Fachdatenbank.

Gebirgsgruppe	Anzahl	Messstellenbezeichnung	Interne Bezeichnung
Ankogel-Gruppe	10	BLGL5_0029	KAS815
		BLGL5_0030	KAS820
		BLGL5_0031	KAS821
		BLGL5_0032	KAS829
		BLGL5_0046	KAS895
		BLGL5_0047	KAS908
		BLGL5_0048	KAS916
		BLGL5_0049	KAS918
		BLGL5_0050	KAS927
		BLGL5_0051	IGL001
Glockner-Gruppe	1	BLGL5_0027	BRK012
Goldberg-Gruppe	4	BLGL5_0024	BRK059
		BLGL5_0025	BRK026
		BLGL5_0026	BRK055
		BLGL5_0028	KAS800
Granatspitz-Gruppe	1	BLGL5_0043	KAS872
Karwendel	3	BLGL7_0047	A1 Q_KW
		BLGL7_0048	A3 Q_BG_KW
		BLGL7_0049	A9 Q_KW
Kitzbüheler Alpen	5	BLGL5_0019	KAS631
		BLGL5_0020	KAS574
		BLGL5_0021	KAS613
		BLGL5_0022	KAS617
		BLGL5_0023	KAS541

Lavanttaler Alpen	2	BLGL6_0017	BUS06
		BLGL6_0018	BUS32
Lechquellen-Gebirge	5	BLGL8_011	PLR039
		BLGL8_012	PLR042
		BLGL8_020	PLR072
		BLGL8_021	PLR073
		BLGL8_022	PLR078
Nockberge	10	BLGL2_0001	PAM249
		BLGL2_0002	PAM259
		BLGL2_0003	PAM263
		BLGL2_0004	PAM265
		BLGL5_0010	PAM037
		BLGL5_0011	PAM088
		BLGL5_0012	PAM099
		BLGL5_0013	PAM102
		BLGL5_0014	PAM147
		BLGL6_0023	PAM200
Ötztaler Alpen	17	BLGL7_0001	KG2
		BLGL7_0002	KG3
		BLGL7_0003	KG4
		BLGL7_0004	RA_01
		BLGL7_0005	RA_02
		BLGL7_0006	RA_03
		BLGL7_0007	RA_04
		BLGL7_0051	RIF1
		BLGL7_0052	SCS 1
		BLGL7_0053	SCS 2
		BLGL7_0054	SCS 21
		BLGL7_0055	SCS 3
		BLGL7_0056	KS1
		BLGL7_0057	KS2
		BLGL7_0058	KS3
		BLGL7_0059	PB1
		BLGL7_0060	RB1
Rätikon	4	BLGL8_004	PLR014
		BLGL8_005	PLR019
		BLGL8_006	PLR023
		BLGL8_007	PLR025
Radstädter Tauern	2	BLGL5_0008	KAS346
		BLGL5_0009	KAS364
Rottenmanner und Wölzer Tauern	4	BLGL6_0007	BS03
		BLGL6_0008	WG01
		BLGL6_0009	WG02
		BLGL6_0010	WG07

Schladminger Tauern	36	BLGL5_0001	PAM164
		BLGL5_0002	PAM171
		BLGL5_0003	KAS037
		BLGL5_0004	KAS059
		BLGL5_0005	KAS065
		BLGL5_0006	KAS188
		BLGL5_0007	KAS213
		BLGL5_0015	KAS182
		BLGL5_0016	KAS215
		BLGL5_0033	KAS838
		BLGL5_0034	PAM245
		BLGL5_0035	PAM243
		BLGL5_0036	KAS852
		BLGL5_0037	KAS855
		BLGL6_0011	DE03
		BLGL6_0012	DE07
		BLGL6_0013	THF072
		BLGL6_0014	THF075
		BLGL6_0015	THF012
		BLGL6_0016	THF068
		BLGL6_0019	HK01
		BLGL6_0020	WaT040
		BLGL6_0021	WaT041
		BLGL6_0022	WaT008
		BLGL6_0024	WaT042
		BLGL6_0025	DE09
		BLGL6_0026	RM1
		BLGL6_0027	RM2
		BLGL6_0028	WaT103
		BLGL6_0029	WaT105
		BLGL6_0030	WaT108
		BLGL6_0031	WaT109
		BLGL6_0032	WaT110
		BLGL6_0033	WaT201
		BLGL6_0034	WaT202
		BLGL6_0035	WaT203
Schober-Gruppe	19	BLGL7_0008	HSQ1
		BLGL7_0009	HSQ6
		BLGL7_0010	HSQ7
		BLGL7_0011	HSQ12
		BLGL7_0012	HSQ15
		BLGL7_0037	HSQ3
		BLGL7_0038	HSQ8
		BLGL7_0039	HSQ13
		BLGL7_0040	HSQ16

		BLGL7_0041	HSQ18
		BLGL7_0042	HSQ20
		BLGL7_0043	HSQ221
		BLGL7_0044	HSQ226
		BLGL7_0045	HSQ24
		BLGL7_0046	HSQ23
		BLGL7_0050	HSQ2
		BLGL7_0073	AS 1
		BLGL7_0074	AS 2
		BLGL7_0075	AS 3
Seckauer Tauern	6	BLGL6_0001	SEQ
		BLGL6_0002	DTQ1
		BLGL6_0003	HRQ1
		BLGL6_0004	KTQ1
		BLGL6_0005	BeL059
		BLGL6_0006	BeL080
Silvretta	20	BLGL7_0013	B5
		BLGL7_0014	B3
		BLGL7_0015	C15
		BLGL7_0016	C13
		BLGL7_0017	D1
		BLGL7_0018	See
		BLGL7_0023	C14
		BLGL7_0024	Bergli_gesamt
		BLGL7_0030	D9
		BLGL7_0031	C21
		BLGL8_001	PLR001
		BLGL8_002	PLR003
		BLGL8_003	PLR010
		BLGL8_013	PLR050
		BLGL8_014	PLR051
		BLGL8_015	PLR055
		BLGL8_016	PLR061
		BLGL8_017	PLR062
		BLGL8_018	PLR063
		BLGL8_019	PLR064
Stubai Alpen	5	BLGL7_0061	KW1
		BLGL7_0062	KW2
		BLGL7_0063	PHt1
		BLGL7_0064	PHTW1
		BLGL7_0065	PHt2
Venediger-Gruppe	8	BLGL5_0017	KAS729
		BLGL5_0018	KAS720
		BLGL5_0044	KAS879
		BLGL5_0045	KAS881

		BLGL7_0069	KBBG1
		BLGL7_0070	KBB1
		BLGL7_0071	KBB2
		BLGL7_0072	KBB3
Verwall-Gruppe	9	BLGL7_0066	DH1
		BLGL7_0067	DH2
		BLGL7_0068	KB1
		BLGL8_008	PLR029
		BLGL8_009	PLR031
		BLGL8_010	PLR035
		BLGL8_023	PLR081
		BLGL8_024	PLR084
		BLGL8_025	PLR090
Zillertaler Alpen	13	BLGL5_0038	KAS859
		BLGL5_0039	KAS863
		BLGL5_0040	KAS868
		BLGL5_0041	KAS869
		BLGL5_0042	KAS871
		BLGL7_0019	WWBG Q
		BLGL7_0020	HFK Q
		BLGL7_0021	MSK Q1
		BLGL7_0022	MSK Q2
		BLGL7_0025	EA Q
		BLGL7_0026	LTS Q
		BLGL7_0027	KJ Q
		BLGL7_0036	HSK Q