Wasserwirtschaftliche Aspekte von Blockgletschern in Kristallingebieten der Ostalpen – Speicherverhalten, Abflussdynamik und Hydrochemie mit Schwerpunkt Schwermetallbelastungen

Water resources management issues of rock glaciers in alpine catchments of the Eastern Alps - storage capacity, flow dynamics and hydrochemistry in particular heavy metal pollution

G. WINKLER¹, T. WAGNER¹ & K. KRAINER²

¹ Institut für Erdwissenschaften, NAWI Graz Geozentrum, Karl-Franzens-Universität Graz; <u>gerfried.winkler@uni-graz.at</u>, <u>thomas.wagner@uni-graz.at</u>

² Institut für Geologie, Leopold-Franzens-Universität Innsbruck; Karl.Krainer@uibk.ac.at

Zusammenfassung

Im Zuge des Projekts wurden ein einheitliches Blockgletscherund Blockgletschereinzugsgebietsinventar für den österreichischen Anteil der Alpen mit insgesamt 5769 Blockgletschern erstellt, die eine Blockgletscher- und Blockgletschereinzugsgebietsfläche von 303 km² bzw. 1279 km² umfassen. In ausgewählten Gebieten der zentralen Gebirgsgruppen in den Ostalpen, die aus Kristallingesteinen aufgebaut werden, wurden an Blockgletschern die Hydrochemie mit Schwerpunkt Schwermetallbelastungen sowie das Speicherverhalten und die Abflussdynamik untersucht. Hierfür wurden in mehreren Testgebieten der Bundesländer Steiermark, Kärnten, Salzburg, Tirol und Vorarlberg insgesamt 183 Quellen von hauptsächlich intakten und reliktischen Blockgletschern beprobt, Vorortparameter (Schüttung, Wassertemperatur, elektrische Leitfähigkeit) erhoben und umfangreiche hydrochemische und isotopenhydrologische Analysen durchgeführt. Es konnten anhand der Schwermetallanalysen zwei Quellentypen mit höheren Konzentrationen hydrochemisch unterschieden werden: Quelltyp As/U und Quelltyp Ni/Mn/Al. Letzterer ist vor allem in den Ötztaler und Stubaier Alpen verbreitet und durch hohe Sulfatgehalte sowie saure pH-Werte charakterisiert. Die Ergebnisse der Isotopenanalysen (δ^{18} O und δ^{2} H) in Kombination mit den Werten der elektrischen Leitfähigkeit zeigen einen deutlichen saisonalen Zyklus unterschiedlicher Abflusskomponenten. Generell sind Wässer, die an Blockgletscherquellen entspringen, Mischwässer aus Schneeschmelze, Regenwasser, Schmelzwasser von im Einzugsgebiet befindlichem Gletschereis (und untergeordnet vermutlich auch Permafrosteis) und länger gespeichertem Grundwasser, wobei sich das Mischungsverhältnis saisonal stark verändert. Während der Hauptschneeschmelze im Mai und Juni wird das Quellwasser von Schneeschmelze dominiert (sehr niedrige Werte der elektrischen Leitfähigkeit, Abreicherung schwerer Isotope), im Sommer (Juli, August) dominiert Regen aus Niederschlagsereignissen (niedrige Werte der elektrischen Leitfähigkeit, Anreicherung schwerer Sauerstoffisotopen) sowie, wenn vorhanden, Gletscherschmelzwasser. Zum Herbst hin nimmt die Quellschüttung kontinuierlich ab, gleichzeitig steigt die elektrische Leitfähigkeit aufgrund des zunehmenden Einflusses an höher mineralisiertem Grundwasser kontinuierlich an, bis im Spätherbst und Winter die Quelle nahezu ausschließlich von Grundwasser gespeist wird (hohe Werte der elektrischen Leitfähigkeit, Sauerstoffisotope liegen im Bereich von -13 $\% \delta^{18}$ O). Die Schüttung intakter Blockgletscherquellen ist während der Schneeschmelze (bzw. auch Gletschereisschmelze im Sommer) auch durch ausgeprägte Tagesschwankungen gekennzeichnet. Die Abflussdynamik einiger intakter Blockgletscher wurde mit Hydrographenanalysen an Abflussganglinien, Schwellenwertanalysen, Tracerversuchen und Niederschlags-Abflussmodellierungen untersucht. Generell zeigen intakte

Beiträge zur Hydrogeologie IS	SN 0376-4826	Band 63	2021	66/100
-------------------------------	--------------	---------	------	--------

Blockgletscher ein ähnliches Schüttungsverhalten wie Karstquellen, es können eine schnelle und eine langsame Abflusskomponente auseinandergehalten werden. Speziell ein ausgeprägter Basisabfluss konnte festgestellt werden, der auf eine entsprechende Grundwasserkomponente zurückzuführen ist. Das Grundwasser wird in der ungefrorenen, feinkörnigen, bis zu über 10 m mächtigen Sedimentlage gespeichert, die an der Basis von Blockgletschern zwischen dem Festgestein und dem gefrorenen Permafrostkörper vorliegt. Diese Erkenntnis deckt sich mit geophysikalischen Untersuchungen und vereinzelten Bohrungen aus anderen Studien. Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass sowohl reliktische wie auch intakte Blockgletscher aufgrund ihrer Speicherfähigkeit und Pufferwirkung von wasserwirtschaftlicher Bedeutung sind, einerseits als Trinkwasserressource, andererseits auch für die Energiewirtschaft oder für Beschneiungsanlagen.

<u>Schlüsselwörter:</u> Blockgletscherquellen, Abflussverhalten, Blockgletscherinventar, Blockgletschereinzugsgebietsinventar, Schwermetallanalysen, Österreichische Alpen

<u>Keywords</u>: rock glacier springs, discharge dynamics, rock glacier inventory, rock glacier catchment inventory, heavy metal analyses, Austrian Alps

Einleitung

Dieser Beitrag ist eine Zusammenfassung des Endberichts des DaFNE Forschungsprojekts "Wasserwirtschaftliche Aspekte von Blockgletschern in Kristallingebieten der Ostalpen – Speicherverhalten, Abflussdynamik und Hydrochemie mit Schwerpunkt Schwermetallbelastungen; RG-HeavyMetal, Nr. 101093" (Wagner et al., 2019) und der daraus resultierenden bisherigen Veröffentlichungen (Wagner et al., 2019, 2020a,b,c, 2021).

Permafrost ist in den Alpen ab einer Seehöhe von ca. 2500 m weit verbreitet (z. B. Böckli, 2012), wobei intakte (aktive und inaktive) Blockgletscher die häufigste und morphologisch auffälligste Form des Pemrafrosts darstellen (z. B. Jones et al., 2019). Blockgletscher sind lappen- bis zungenförmige diskrete Körper aus ständig gefrorenem, unverfestigtem Material, übersättigt mit Eiszement und Eislinsen, die sich kriechend hang- oder talabwärts bewegen. Der gefrorene Permafrostkörper wird von einer bis zu mehrere Meter mächtigen, saisonal ungefrorenen Schuttlage (Auftauschicht) bedeckt. Blockgletscher sind gekennzeichnet durch eine auffallende Morphologie mit einer steilen Stirn und steilen Flanken, und einer meist grobblockigen Oberfläche mit oft ausgeprägten Rücken und Vertiefungen. Am Fuße der steilen Stirn entspringen häufig eine oder mehrere Blockgletscherquellen.

Hinsichtlich ihrer Aktivität können aktive, inaktive und reliktische (fossile) Blockgletscher unterschieden werden (Barsch, 1996). Aktive Blockgletscher enthalten Eis und bewegen sich langsam abwärts mit Fließgeschwindigkeiten von meist einigen Zentimetern bis einigen Dezimetern pro Jahr. Inaktive Blockgletscher enthalten ebenfalls Eis, sind aber stationär und weisen bereits Bewuchs auf. Aktive und inaktive Blockgletscher werden häufig als intakte Blockgletscher zusammengefasst. Reliktische (oder fossile) Blockgletscher enthalten kein Eis mehr, bewegen sich nicht mehr und sind meist schon stärker bewachsen.

Die große Zahl an Blockgletschern unterstreicht deren Bedeutung als Permafrosterscheinung im Hochgebirge. Da das Permafrosteis meist eine Temperatur von nur knapp unter 0 °C aufweist, ist Permafrost besonders anfällig für den Klimawandel. Klimamodelle prognostizieren für die Alpen eine Erwärmung von bis zu 4 °C bis 2100, was schlussendlich auch zu einem verstärkten Abschmelzen des Permafrosteises führen wird. In diesem Zusammenhang ist auch eine Veränderung des Wasserhaushaltes im hochalpinen Raum zu erwarten (Jones et al., 2019).

Beiträge zur Hydrogeologie	ISSN 0376-4826	Band 63	2021	67/100
			-	

Jüngste Forschungsergebnisse zeigen, dass Blockgletscher einen großen Einfluss auf das Speicherverhalten und die Abflussdynamik in alpinen Einzugsgebieten aufweisen (z. B. Winkler et al., 2016a,b; Wagner et al., 2016, 2020c, 2021; Jones et al., 2018; Hayashi, 2020). Außerdem konnten im Vorfeld des Projektes in Tirol Schwermetallbelastungen von Quellwässern aus Permafrostbereichen, insbesondere aus Blockgletscher beeinflussten Einzugsgebieten festgestellt werden (Krainer et al., 2015; Thies et al., 2013, 2017).

Das gegenständliche Projekt hatte die übergeordnete Zielsetzung, eine Grundlage für die qualitative und quantitative Beurteilung in Bezug auf Schwermetallbelastung der Blockgletscherquellen in den Kristallingebieten der österreichischen Alpen zu schaffen.

Dafür war das Erreichen der nachstehenden Teilziele notwendig:

- (i) die flächendeckende Erfassung aller Blockgletscher und ihrer hydrologischen Einzugsgebiete in entsprechenden vereinheitlichten Inventaren für den gesamten österreichischen Alpenraum
- (ii) ein konzeptionelles Entwässerungsmodell für Blockgletscher, d. h., die Prozess basierte Kenntnis der Entwässerungsdynamik und der Speicherfunktion von intakten (aktiven und inaktiven) wie auch reliktischen Blockgletschern in alpinen Einzugsgebieten als Basis für das Verständnis der saisonalen Variabilität der Schwermetallkonzentrationen
- (iii) die hydrochemische Charakterisierung der Blockgletscherquellen vor allem hinsichtlich Schwermetallbelastung

Um die Zwischenziele (ii) und (iii) zu erreichen, wurden, aufbauend auf den Inventaren (i), in ausgewählten Teilgebieten der Bundesländer Vorarlberg, Tirol, Salzburg und Steiermark flächendeckend Blockgletscherquellen hydrogeologisch kartiert. Anhand der erhobenen Geländedaten wurden Quellen für ein Monitoring über die Dauer von maximal zwei Jahren ausgewählt und hydrochemisch vor allem hinsichtlich Schwermetallbelastungen untersucht.

Um die Abflussdynamik und das Speicherverhalten v. a. von intakten Blockgletschern besser zu verstehen, wurden Monitoring Systeme an einzelnen Blockgletscherstandorten in der Steiermark und Tirol installiert und bestehende erweitert. Neben der kontinuierlichen Erfassung des Abflusses und der natürlichen Tracer Wassertemperatur und elektrische Leitfähigkeit der Quellwässer wurden Markierungsversuche, Isotopen-(Ereignis)beprobungen der Quellwässer sowie Isotopenmessungen von Regen, Schnee (Schneeprofile) und vereinzelt Permafrosteis durchgeführt.

Untersuchungsgebiete

Das übergeordnete Untersuchungsgebiet umfasst einen Großteil der österreichischen Alpen (Abb. 1). Dies schließt folgende Gebirgsgruppen ein: Silvretta- und Verwallgruppe (Vorarlberg und Tirol), Ötztaler und Stubaier Alpen, Tuxer Hauptkamm, Deferegger Alpen (Lasörlinggruppe, Rieserferner Gruppe) und Schobergruppe (Tirol), Salzburger Hohe Tauern; Niedere Tauern (Salzburg/Steiermark/Kärnten) einschließlich Kreischberg, Turrach, Frauenalpe, Stolzalpe, Seckauer Tauern und nördliche Seetaler Alpen sowie ein Gebiet in den Nördlichen Kalkalpen (Karwendel, Tirol). Für das bessere Prozessverständnis der hydrogeologischen Eigenschaften der Blockgletscher wurden in ausgewählten Testgebieten (Abb. 1 und Tab. 1) umfangreiche geologische und hydrogeologische Untersuchungen durchgeführt.

Ziel der Untersuchungen an den lokalen Testgebieten war, die Speicherkapazität und Entwässerungsdynamik sowie die Abflusskomponenten der Quellwässer intakter Blockgletscher zu

Beiträge zur Hydrogeologie	ISSN 0376-4826	Band 63	2021	68/100
----------------------------	----------------	---------	------	--------

charakterisieren und quantitativ zu erfassen, und diese mit dem Abflussverhalten reliktischer Blockgletscher zu vergleichen.



Abbildung 1: Übersichtsdarstellung der lokalen Untersuchungsgebiete in Tirol und der Steiermark (große orange Punkte) sowie alle ausgewiesenen Blockgletscher (kleine blaue Punkte).

Tabelle 1: Vor dem Projekt vorliegende und im Zuge des Projekts 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.

Blockgletscher Art der Untersuchung	Schöneben	Dürrtal	Innere Ölgrube	Krummgampen	Hochschoberhütte	Inneres Bergli	Tuxer Hauptkamm
Geologisch-geomorphologische	•	•	•	•	•	•	•
Kartierung	-			_			
Monitoring Quelle WT	•	•	•	•	•	•	
Monitoring Quelle EC	•	•	•	•		•	
Monitoring Messpegel Q	•		•				
Hydrochemische Untersuchungen	•	•	•	•	•	•	
Isotopenhydrologische Untersuchungen	•						
Schwermetalluntersuchungen	•	•	•	•	•	•	
Markierungsversuche	•		•	1		•	
Meteorologische Station							
(P, AT, AH, WD, WV, GR, RB)	•						
AT/AH Station	•	•					
Isotopensignatur Niederschlag	•		•		•	•	
Monitoring Bodentemperatur	•	•		•	•	•	•
Schneedeckendynamik (RDC)	•						
Geophysikalische Untersuchungen	•		•				
Bewegungsraten			•				

Beispielgebend werden in diesem Beitrag nachstehend die Untersuchungsgebiete Schöneben, Innere Ölgrube, Inneres Bergli und Krummgampen beschrieben. Die vollständige Beschreibung der Untersuchungsgebiete findet sich in Wagner et al. (2019).

Blockgletscher Schöneben

Das östlichste lokale Untersuchungsgebiet in der Steiermark (Abb. 1) umfasst das Einzugsgebiet des reliktischen Schöneben Blockgletschers in den Seckauer Tauern (Abb. 2). Das Gestein und Schuttmaterial des Einzugsgebietes besteht aus granitoiden Orthogneisen des Silvretta-Seckau Deckensystems und der mesozoischen Deckschichten (Pfingstl et al., 2015).

Das Einzugsgebiet des Schöneben Blockgletschers hat eine Fläche von 0,67 km² und reicht bis auf eine Höhe von 2295 m ü. A. (Abb. 2). Der zungenförmige Schöneben Blockgletscher ist 746 m lang, bis zu 244 m breit und umfasst eine Fläche von 0,11 km². Die Wurzelzone des Blockgletschers befindet sich auf einer Höhe von 1912 m ü. A. und die Blockgletscherstirn reicht bis auf 1715 m ü. A. hinab. Am Fuße der Blockgletscherstirn entspringt die Schönebenquelle (SEQ), durch die das Einzugsgebiet entwässert wird. Der Schöneben Blockgletscher ist teilweise von Vegetation bedeckt. Die Quelle (SEQ) an der Stirn des reliktischen Schöneben Blockgletschers wurde vom Hydrographischen Dienst Steiermark als Messstelle ausgebaut. 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 [µS/cm] und Wassertemperatur [°C] direkt am Quellaustritt erfasst (Winkler et al., 2016a). Umfassende geophysikalische Untersuchungen ermöglichten eine gute Vorstellung des internen Aufbaus. Unter der bis zu mehreren Metern mächtigen grobblockigen Deckschicht liegt ein sandig bis blockiger Schuttkörper mit einer Mächtigkeit von bis zu mehreren Zehnermetern. Unterlagert werden diese Schuttmassen von einer feinkörnigen (schluffig bis feinsandige) Basisschicht, die eine Mächtigkeit bis 15 m aufweisen kann (Winkler et al., 2016a,b, 2018).

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 diese halbstündlich aufzeichnet. Zusätzlich wurden auch Lufttemperatur-/Luftfeuchtesensoren mit Strahlungsschutz an einer Position im oberen Bereich des Schöneben Blockgletschers (S-ATH, Abb. 2c) installiert.

70/100



Abbildung 2: (a) Lage des lokalen Arbeitsgebietes Schöneben in Österreich sowie als orange Linie der steirische Anteil der Niederen Tauern. (b) Untersuchungsgebiet mit den Messinstrumentierungen und Messstellen. Die Auflistung der gemessenen Parameter ist Tab. 1 zu entnehmen. S-MTD1 bis S-MTD5 = Standorte für Bodentemperaturmessungen, S-AWS = automatische Wetterstation, S-ATH = Lufttemperatur und Luftfeuchtemessstandort. Hillshade auf Basis ALS-Daten (1 m) (Winkler et al., 2016a). (c) Überblick über das Einzugsgebiet (rot strichlierte Linien) des Schöneben Blockgletschers mit dem Geierhaupt (2417 m ü. A.) als höchster Gipfel der Seckauer Tauern. Der Blockgletscher ist in blauer Farbe ausgewiesen. Die kleinen Fotos zeigen die Hauptquelle SEQ sowie die Wetterstation S-AWS (Winkler et al., 2016b; Fotos M. Pauritsch).

Blockgletscher Innere Ölgrube

Der Blockgletscher Innere Ölgrube (Kaunertal, Nordtirol; siehe Abb. 1) 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 (siehe Berger et al., 2004). Der Blockgletscher erstreckt sich von 2394 m ü. A. bis 2727 m ü. A., weist eine ausgeprägte Oberflächenmorphologie aus transversalen und longitudinalen Rücken und Vertiefungen auf und besteht aus zwei Blockgletscherzungen (Abb. 3, 4). Die Fläche des hydrologischen Einzugsgebietes beträgt ca. 1,83 km².

Die nördliche, mächtigere Zunge besteht fast ausschließlich aus Orthogneis Material, die südliche Zunge dagegen aus Paragneis/Glimmerschiefer Material. An der Stirn des aktiven Blockgletschers befinden sich fünf Quellaustritte (RA 1, RA 2, RA 3 und zwei weitere unbenannte, Abb. 3). Die Quellen werden zusätzlich zu den Schneeschmelz- und Niederschlagswässern noch von einem kleinen Gletscherbach gespeist. Es handelt sich dabei um Schmelzwasser der Kargletscher Hinterer Ölgrubenferner und Ölgrubenjoch, das im nördlichen Blockgletscherlappen in der Wurzelzone in den Blockgletscher infiltriert. Im Wurzelbereich des südlichen Blockgletscherlappens befinden sich drei kleine (vermutlich Thermokarst-) Seen (Berger et al., 2004). In ca. 150 m Entfernung zu den Quellen am Fuße der Blockgletscherstirn wurde im Schiltibach eine Pegelstation installiert. Diese Pegelstation

Beiträge zur Hydrogeologie	ISSN 0376-4826	Band 63	2021	71/100
----------------------------	----------------	---------	------	--------

liefert seit dem Jahr 2001 kontinuierlich (im Stundenintervall) Daten der Wassertemperatur und des Pegelstands, wobei in den ersten Jahren nur von Mai bis Oktober Daten vorliegen.

Geophysikalische Untersuchungen (Seismik, Georadar und Gravimetrie) lieferten einen 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.



Abbildung 3: Geologische/geomorphologische Karte der Inneren Ölgrube. P = Pegelmessstelle, RA 1- RA 3 = beprobte Quellaustritte, E = Eingabestelle der Farbtracer, K = Korngrößenmesspunkte.



Abbildung 4: Der aktive Blockgletscher in der Inneren Ölgrube (Kaunertal), (a) Ansicht von gegenüberliegender Talseite; (b) die steile, sehr aktive Blockgletscherstirn des Blockgletschers mit Blockgletscherquelle (Fotos K. Krainer).

Beiträge zur Hydrogeologie	ISSN 0376-4826	Band 63	2021	72/100
				-

Diese Informationen sind für die Interpretation der hydrogeologischen Daten von großer Bedeutung; speziell der Nachweis des ungefrorenen, feinkörnigen Sedimentkörpers an der Basis des Blockgletschers (siehe auch feinkörnige Basisschicht des reliktischen Schöneben Blockgletschers).

Blockgletscher Inneres Bergli

Das Untersuchungsgebiet im Inneren Bergli im Lareintal (Abb. 5, 6) südöstlich von Galtür (Paznauntal) liegt am Südrand des Silvrettakristallins, im Grenzbereich zum Unterengadiner Fenster (Abb. 1). Im Einzugsgebiet dominieren im vorderen Bereich Quarzitgneise, 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 Berglerlochkessels dominieren Amphibolite und Migmatite.

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. (Abb. 5). Die Fläche beträgt 0,51 km², die des hydrologischen Einzugsgebietes 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 wurden vom Hydrographischen Dienst Tirols Temperaturund Leitfähigkeitssonden installiert. Des Weiteren erfolgt eine kontinuierliche, automatisierte Erfassung der Wassermenge, die aus dem Blockgletscher fließt mittels einer Pegelstation (hydrographischer. Dienst Tirol) ca. 100 m unterhalb der Blockgletscherstirn (Abb. 6).

Die steile Stirn des Blockgletschers im Inneren Bergli (Berglerloch) hebt sich morphologisch deutlich von den umgebenden eiszeitlichen Moränenablagerungen rund um den Berglisee ab. Der Stirnbereich ist teils bewachsen, weshalb nur mehr von geringer Bewegungsrate ausgegangen werden kann. Im hintersten Teil sind noch Eisreste an der Oberfläche aufgeschlossen. Der Blockgletscher im Inneren Bergli ist ein komplexer Blockgletscher, der sich aus mindestens drei übereinanderliegenden Blockgletschergenerationen zusammensetzt.



Abbildung 5: 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; BTS: Basistemperatur der Schneedecke / Temperatursensoren an der Blockschuttoberfläche.



Abbildung 6: Der aktive Blockgletscher im Inneren Bergli, Silvrettagruppe (Tirol) mit Pegelmessstelle im Vordergrund (Foto K. Krainer).

Blockgletscher Krummgampen

Der Blockgletscher Krummgampen liegt am Eingang des Krummgampentals, einem Seitental des Kaunertals (Ötztaler Alpen, Abb. 1). Die Festgesteine im Einzugsgebiet des Blockgletschers bestehen aus Paragneisen und Glimmerschiefern des Ötztal-Stubai-Komplexes. 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 Kammbereich durch Frostverwitterung stark zerlegt und aufgelockert.

Der Blockgletscher erstreckt sich von 2458 m ü. A. bis 2759 m ü. A., 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, aktive Stirn hat den Krummgampenbach leicht überfahren (Abb. 7, 8).

Refraktionsseismische Untersuchungen, BTS-Messungen und Quelltemperaturen weisen eindeutig auf das Vorhandensein von Permafrosteis im Blockgletscher hin (Rogger et al., 2017).

Die drei Quellen des Blockgletschers (KG 2, 3 und 4; Abb. 7) unterscheiden sich deutlich von allen anderen Quellen im Krummgampental (Thies et al., 2017) und weisen folgende Merkmale auf: (i) konstant niedrige Quelltemperatur von meist < 1.5 °C (max. 1.9 °C), (ii) hohe elektrische Leitfähigkeit, (iii) relativ geringe jahreszeitliche Schwankungen in der Quelltemperatur und der elektrischen Leitfähigkeit und (iv) hohe Konzentrationen an Nickel und anderen Schwermetallen.



Abbildung 7: Blockgletscher Krummgampen mit Lage der untersuchten Quellen KG 2, KG 3 und KG 4, modifiziert nach Thies et al. (2017); P: temporäre Pegelmessstelle.



Abbildung 8: Zunge des aktiven Blockgletschers im Krummgampental (Blickrichtung WSW; Foto K. Krainer).

Blockgletscher- und Blockgletschereinzugsgebietsinventar

Die Erstellung des Blockgletscherinventars erfolgte durch Zusammenführung, Überarbeitung und Ergänzung der bestehenden Inventare von 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. Damit liegt erstmals ein einheitliches Blockgletscherinventar auf Basis eines hochaufgelösten Geländemodells für die österreichischen Ostalpen vor, das bestehende regionale Inventare integriert. Diese Datensätze wurde von Wagner et al. (2020a) vorgestellt und diskutiert sowie als gesamter Datensatz auf der internationalen Datenplattform PANGAEA für weitere Forschungen zur Verfügung gestellt (Wagner et al., 2020b).

Beiträge zur Hydrogeologie	ISSN 0376-4826	Band 63	2021	76/100
				-

Jedem ausgewiesenen Blockgletscher wurden 34 Attribute zugeordnet. Die Attributierung wurde 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. Jedem ausgewiesenen Blockgletschereinzugsgebiet wurden 13 Attribute zugeordnet. Die Attribute wurden aus dem Höhenmodell oder durch Verknüpfungen mit dem Blockgletscherinventar abgeleitet (Wagner et al., 2020a).

Im gesamten Untersuchungsgebiet wurden 5769 Blockgletscher ausgewiesen (Tab. 2). 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 reliktisch, 2309 (~ 40 %) als intakt eingestuft. Der überwiegende Anteil (5136 Blockgletscher, ~ 89 %) liegt auf nicht-verkarstungsfähigem Gestein, ein geringer Anteil (633 Blockgletscher, ~11 %) auf verkarstungsfähigem Untergrund (Abb. 9). Die Blockgletscher treten im Projektgebiet zwischen 475,5 m ü. A. und 3311,7 m ü. A. auf.

Tabelle 2: 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	Blockglet	scher - Seehö	he (m ü.A.)
		(km²)	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

Blockgletscher in Kristallingesteinen



Abbildung 9: Räumliche Verteilung aller Blockgletscher der österreichischen Alpen, differenziert in Blockgletscher in Kristallingesteinen und in verkarstungsfähigen Gesteinen (modifiziert nach Wagner et al. 2020a).

Beiträge zur Hydrogeologie ISSN 0376-48	526 Band 63	2021	///100
---	-------------	------	--------

Die Verteilung reliktischer und intakter Blockgletscher sowie die Verteilung ihrer Höhenlage zeichnen grob die Topographie der österreichischen Ostalpen nach (Wagner et al, 2020a).

Der Vergleich der einzelnen Bundesländer verdeutlicht die ungleiche Höhenverteilung im Projektgebiet (Abb. 10). Während im gesamten Projektgebiet die Blockgletscherstirn im Schnitt auf 2276 m ü. A. (Median) liegt, kommen reliktische Blockgletscher insbesondere in Kärnten, Salzburg und der Steiermark bis in tiefe Lagen (bis 475 m ü. A.) vor. In Nord- und Osttirol liegt 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.

Abb. 11 zeigt die Verteilung der Ausrichtung der Blockgletscher im gesamten Projektgebiet, getrennt dargestellt und normiert für reliktische und intakte Blockgletscher. Intakte und auch reliktische Blockgletscher sind überwiegend nach NE, N und NW ausgerichtet. Beide Diagramme verdeutlichen die Konzentration auf die nördliche Hälfte, im Schnitt entfallen 63 % aller Blockgletscher auf diese. Besonders deutlich fällt dieser Trend für intakte Blockgletscher aus (69 % gegenüber 59 % für reliktische Blockgletscher). Die wenigsten Blockgletscher sind nach SW ausgerichtet.

Insgesamt sind südexponierte Blockgletscher höher gelegen als nordexponierte, ein entsprechender Trend ist sowohl bei reliktischen als auch bei den insgesamt höher liegenden intakten Blockgletschern zu erkennen. Während die Unterschiede zwischen intakten und reliktischen Blockgletschern erheblich sind (Mediandifferenz 457 m; Median intakter Blockgletscher 2513 m ü. A., reliktischer 2056 m ü. A.), ist die Abhängigkeit von der Exposition weniger stark ausgeprägt: Die Mediandifferenz zwischen Nordund Südausrichtung beträgt für reliktische 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.

Die maximale Länge der Blockgletscher 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 zischen 25 m und 1542 m, ihr Median bei 126 m. Das Länge-Breite-Verhältnis zeigt die Tendenz von Blockgletschern zu längsgestreckter Form.

3 2021 78/100



Abbildung 10: Höhenverteilung der Blockgletscherstirnen in Abhängigkeit von ihrer Fläche (klein (<0,01 km²), mittel (0,01–0,1 km²) bzw. groß (>0,1 km²)) 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 (Wagner et al., 2019).



Abbildung 11: Ausrichtung der Blockgletscher (aspLfDeg), reliktische (REL; orange) und intakte (INT; hellblau) getrennt dargestellt.

Eine Übersicht der Gesamtdaten des Blockgletschereinzugsgebietsinventars der Bundesländer Vorarlberg, Tirol, Salzburg, Steiermark und Kärnten findet sich in Tab. 3. Die Gesamtfläche der Einzugsgebiete beträgt 1279 km². Die größte Gesamteinzugsgebietsfläche befindet sich mit 530 km² in Nordtirol, die kleinste in Vorarlberg (52,9 km²). Tab. 4 gibt eine Übersicht der Blockgletscher- und der Einzugsgebietsflächen sowie deren Anteil an der Gesamtfläche über einer bestimmten Seehöhe je Bundesland. Zum Beispiel werden fast 25 % (328,3 km²) Nordtirols über 2500 m ü. A. durch Blockgletscher entwässert.

	Anzahl	Gesamtfl. BG-EZG	BG - EZ	ZG - Seehöhe	(m ü.A.)
		(km²)	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	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

Tabelle 3: 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.

$Definage zur right ubgeblogie = 1000 0070^{-4}020 = 0010000 = 2021 = 00710$	Beiträge zur Hydrogeologie	ISSN 0376-4826	Band 63	2021	80/10
--	----------------------------	----------------	---------	------	-------

	Fläche Bundesland	Fläche Blockgletscher	Anteil (%)	Einzugsgebiets- fläche	Anteil (%)
	(km²)	(km²)		(km²)	
Vorarlberg gesamt	2603,2	11,4	0,4	52,9	2,0
Fläche >= 1500 m ü.A.	1077,4	11,2	1	52,5	4,9
Fläche >= 2000 m ü.A.	415,1	6,8	1,6	38,3	9,2
Fläche >= 2500 m ü.A.	53,8	0,4	0,8	7,7	14,3
Fläche >= 3000 m ü.A.	1,6	0	0	0	1,7
Salzburg gesamt	7161,0	43,6	0,6	190,0	2,7
Fläche >= 1500 m ü.A.	3019,8	40,7	1,3	182,1	6,0
Fläche >= 2000 m ü.A.	1235,0	25,3	2	136,0	11,0
Fläche >= 2500 m ü.A.	259,2	3,2	1,2	19,3	7,4
Fläche >= 3000 m ü.A.	23,6	0	0	0,1	0,3
Osttirol gesamt	2021.8	30.7	1.5	114 5	57
Eläche \geq = 1500 m ü A	1600.3	30.7	1,0	114.5	7.2
Fläche >= 2000 m ü A	1069.7	30.5	2.8	114.0	10.7
Fläche >= 2500 m ü A	418.2	15.7	3.8	71.8	17.2
Fläche >= 3000 m ü A	45.4	0.1	0.1	2.8	6.3
	10,1	0,1	0,1	2,0	0,0
Nordtirol gesamt	10629,9	136,5	1,3	530,0	5,0
Fläche >= 1500 m ü.A.	6115,0	136,5	2,2	530,0	8,7
Fläche >= 2000 m ü.A.	3442,7	128,4	3,7	508,9	14,8
Fläche >= 2500 m ü.A.	1322,4	73,4	5,5	328,3	24,8
Fläche >= 3000 m ü.A.	226,6	1,1	0,5	26,9	11,9
Kärnten gesamt	9543,9	40,5	0,4	190,0	2,0
Fläche >= 1500 m ü.A.	2693,8	38,4	1,4	185,7	6,9
Fläche >= 2000 m ü.A.	1040,4	29,2	2,8	153,7	14,8
Fläche >= 2500 m ü.A.	273,9	5,4	2,0	45,4	16,6
Fläche >= 3000 m ü.A.	25,0	0	0	0,5	2,1
Obsiseed	40440.0	40.0	0.0	001.0	10
Stelermark gesamt	16419,2	40,3	0,2	201,6	1,2
Flache >= 1500 m u.A.	2505,5	37,0	1,5	190,8	7,6
Flache >= 2000 m U.A.	375,3	8,5	2,3	85,3	22,1
Flache >= 2500 m û.A.	4,2	0	0,4	0,4	10,4
Flache >= 3000 m ü.A.	0	0	0	0	0

Tabelle 4: Blockgletscherfläche und Einzugsgebietsfläche sowie deren Anteil an der Gesamtfläche über einer bestimmten Seehöhe nach Bundesländern.

Wasserwirtschaftliche Untersuchungen (Methoden, Ergebnisse und Diskussion)

Für die Steiermark wurden im Sommer 2016 insgesamt ca. 180 km² flächendeckend in Bezug auf Blockgletscherquellen erhoben. Auf Basis der Kartierung erfolgte eine Auswahl von 28 Quellen, die 2018 durch eine einmalige Beprobung an 10 weiteren Quellen ergänzt wurde (Abb. 12).

Die flächendeckende Erhebung der Blockgletscherquellen der ausgewiesenen Gebiete in Salzburg erfolgte 2016 und 2017 und umfasst eine Fläche von ca. 104 km². Des Weiteren wurden 2018 zur räumlichen Verdichtung noch in ausgewählten Gebieten gezielte Probennahmen durchgeführt.



Abbildung 12: 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.

Die Erhebung und Auswahl der Blockgletscherquellen in Tirol erfolgte auf Basis der Vorarbeiten von Krainer & Ribis (2012) sowie weiterer Kartierungen außerhalb der Gebiete, in denen bereits erhöhte Schwermetallbelastungen bekannt waren (Ribis, 2017). Es wurden für Tirol ab 2016 die Umgebung der Hochschoberhütte (Osttirol) und die Gebiete Tuxer Hauptkamm, Ölgrube, Krummgampen (Kaunertal), und Inneres Bergli (Silvrettagruppe) für das Monitoring ausgewiesen und mehrfach beprobt. Zur Verdichtung wurde im Jahr 2018 eine zusätzliche Probenahme in den Gebieten Schwarzsee ob Sölden, Verwallgruppe, Sellrainer Berge, Karwendel und Deferegger Alpen durchgeführt sowie drei weitere Quellen in der Schobergruppe beprobt (Abb. 13).



Abbildung 13: 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.

Beiträge zur Hydrogeologie	ISSN 0376-4826	Band 63	2021	82/100

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

Hydrochemische und isotopenhydrologische Analysen

Zur Feststellung der Schwermetallbelastung von Blockgletscherquellen wurde eine möglichst flächendeckende Quellkartierung und Beprobung durchgeführt (Tab. 5, Abb. 14). In Vorarlberg wurden in 4 Gebieten 25 Quellen beprobt und analysiert, in Tirol in 10 Gebieten 69 Quellen, in Salzburg in 11 Gebieten 51 Quellen, in Kärnten in 2 Gebieten 4 Quellen (nicht in H2O-Datenbank eingebunden) und in der Steiermark in 6 Gebieten insgesamt 38 Quellen. Damit liegen von insgesamt 183 Quellen (hauptsächlich von intakten und reliktischen Blockgletschern), verteilt über die österreichischen Alpen, Wasseranalysen vor (Tab. 5).

Tabelle 5: Übersicht der im Zuge der Quellkartierung erhobenen Gebiete für die Bundesländer Vorarlberg, Tirol, Salzburg, (Kärnten) und Steiermark. Nr. = Gebietsnummer; EJ = Erhebungsjahr; A = Fläche in km²; X = wenn gezielt Blockgletscherquellen beprobt wurden und eine Kartierungsgebietsfläche nicht zuordenbar ist; GK = Grundwasserkörper; MQ = Messstellenanzahl.

Nr.	Gebietsname	EJ	A (km²)	GK	MQ
	Steiermark				
1 2 3 4 5 6	Triebental; Hochreichart Bösenstein; RottenmannerHütte Zirbitzkogel Etrachsee, Sölkpass Haus, Untertal Turrach	2016 2016 2016-2018 2016-2018 2016-2018 2016	19,3 10,9 29,0 78,0+X 19,7+X 21,8	GK 100052, 100116 GK 100052 GK 1000120 GK 100052, 100116 GK 100052 GK 100184	6 4 2 7+3 4+7 5
	Salzburg				
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11	Obertauern (inkl. Tweng) N Tamsweg (Preber) NW Turrach (Nockberge) Badgastein Rauris + Fuschertörl Felber- und Stubachtal Hollersbachtal Krimml Hinterglemm Muhr Großarl	2016 2016/2018 2016/2018 2016/2018 2016/2017 2016/2018 2017/2018 2017 2018 2018	33,9 7,4+X 8,5 5,0+X 19,7 11,9 3,2+X 5,2+X 9,1 X X	GK 100010 GK 100010 GK 100010 GK 100010 GK 100010 GK 100010 GK 100010 GK 100010 GK 100010 GK 100185 GK 100010	9 2+5 5 5 4 1 2+5 5 4 2+5 5 5 1
	Tirol				
1 2 3 4 5 6 7 8 9	Schobergruppe Tuxer Hauptkamm Ölgrube + Krummgampen Bergli + Lareintal Sölden (Ötztaler Alpen) Verwall Gruppe Stubaier Alpen Karwendel Deferegger Alpen	2016/2018 2016 2016 2018 2018 2018 2018 2018 2018 2018	9,1+X 14,2 13,4 15,4 X X X X X X	GK 100186 GK 100010 GK 100010 GK 100010 GK 100010 GK 100010 GK 100010 GK 10009 GK 100186	16+3 8 10 9 3 5 3 4
	Kärnten				
1 2	Schobergruppe Ankogelgruppe	2017 2017	X X	Gk100186 GK100186	2+1 1
	Vorarlberg				
1 2 3 4	Silvrettagruppe Rätikon Verwallgruppe Lechquellen Gebirge	2018 2018 2018 2018	17,7 14,6 8,1 32,4	GK 100152 GK 100152, 100154 GK 100152 GK 100154	10 4 6 5



Abbildung 14: (links) Ein Beispiel der Probengebinde für die Steiermark (Foto: T. Wagner); Eindrücke bei der Probenahme mit den jahreszeitlichen Herausforderungen: (rechts) Kettentörl, Ingeringtal Steiermark (Foto: G. Winkler).

Neben den Vorortparametern Schüttung, Wassertemperatur und elektrische Leitfähigkeit wurden Kenndaten entsprechend der Parameterblöcke 1.2 weitere und 2.1 der einige Gewässerzustandsverordnung (GZÜV; BGBI.II Nr. 22279/2006 idgF) erhoben. Die hydrochemische Analyse der an den Blockgletscherquellen entnommenen Proben umfasst neben den Vorortparametern die Gesamthärte, Karbonathärte, Hydrogenkarbonat, Mg, Na, K, Nitrat, Nitrit, Ammonium, Chlorid, Sulfat, Orthophosphat, Bor, DOC und eine Reihe von gelösten Metallen (Fe, Mn, Al, As, Pb, Cd, Cr, Cu, Ni, Hg, Zn und U) (siehe Tab. 6a und Tab. 6b).

Parameter	Verfahren	Einheit	MBG
Gesamthärte	ÖN M 6268 - Jan. 2004	°dH	1
Karbonathärte	ÖN EN ISO 9963 - Feb. 1996	°dH	1
Hydrogenkarbonat	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 NO3/I	1
Nitrit	ÖN EN 26777 - Mai 1993	mg NO2/I	0,01
Ammonium	ÖN ISO 7150-1 - Dez. 1987	mg NH4/I	0,01
Chlorid	ÖN EN ISO 10304-1 - Aug. 2009	mg/l	1
Sulfat	ÖN EN ISO 10304-1 - Aug. 2009	mg SO4/I	1
Orthophosphat	ÖN EN ISO 6878 - Sep. 2004	mg PO4/I	0,02
Bor	ÖN EN ISO 11885 - Nov. 2009	mg/l	0,02
DOC (ber. als C)	ÖN EN 1484 - Aug. 1997	mg C/I	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 6a: Parameterliste der "1.2 chemisch-analytischen Parameter" des Parameterblocks 1 – "Chemie Grundwasser" der GZÜV (2006). MBG = Mindestbestimmungsgrenze.

Tabelle 6b: Parameterliste der "2.1 Metalle gelöst" des Parameterblocks 2 – "Chemie Grundwasser" der GZÜV (2006). MBG = Mindestbestimmungsgrenze.

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

Beiträge zur Hydrogeologie	ISSN 0376-4826	Band 63	2021	84/100
			-	

Die Analyseergebnisse ermöglichen eine Differenzierung der mit Schwermetallen belasteten Blockgletscherquellen (über dem Grenzwert der Trinkwasserverordnung) in die Kationenvergesellschaftungen "As/U" und "Ni/Mn/Al" (Abb. 15, 16).

Quelltyp As/U wurde lokal in den Schladminger Tauern, Seckauer Tauern, Mur-Ursprung, Tuxer Hauptkamm, Ötztal/Kaunertal und in der Silvrettagruppe (Bergli) festgestellt.

Quelltyp Ni/Mn/Al kommt lokal in den Schladminger Tauern und an vielen Stellen in den Stubaier- und Ötztaler Alpen vor (v. a. Windachtal, Hochgurgl-Kaisertal, Inneres Hochebenkar, Umgebung Schwarzsee, Wurmetal, Krummgampental). Für eine genaue Lokalisierung dieser Gebiete sei auf den Endbericht (Wagner et al., 2019) verwiesen.

Die mit Ni/Mn/Al belasteten Quellwässer können einem Ca-Mg-SO₄-Typ, die mit As/U belasteten Quellwässer einem Ca-HCO₃-Typ zugeordnet werden.

Die mit Nickel und Mangan belasteten Quellwässer enthalten höhere Sulfatgehalte und fallen tendenziell mit sauren pH-Werten zusammen. Dies weist auf eine mögliche Herkunft aus Sulfidmineralen in den Festgesteinen hin, jedoch sind für eine eindeutige Zuweisung der Herkunft noch weitere Untersuchungen nötig. In den Stubaier-Ötztaler Alpen liegen die Ni/Mn/Al Belastungen an zahlreichen Blockgletscherquellen über dem Grenzwert der Trinkwasserverordnung. Diese Quellwässer stammen alle von intakten, meist aktiven Blockgletschern. Des Weiteren haben Untersuchungen am Bohrkern des aktiven Blockgletschers Lazaun im hinteren Schnalstal (Südtirol) gezeigt, dass Nickel und weitere Schwermetalle im Eis des Blockgletschers in mehreren Horizonten stark angereichert sind (Krainer et al., 2015). Es findet sich auch in der Blockgletscherquelle des Lazaun-Blockgletschers eine starke Nickel-Belastung. Wie das Nickel in das Eis gelangt ist und woher es stammt (aus Sulfidmineralen der Festgesteine oder atmosphärischer Eintrag) ist noch nicht geklärt.

Die mit Arsen und Uran belasteten Blockgletscherquellen (Tuxer Hauptkamm, Seckauer Tauern, Obertauern/Schladminger Tauern West) sind dagegen deutlich HCO₃-dominiert, was auf die Herkunft (Lösung) von Calcium-Karbonaten (Kalk, Kalkmarmor) hindeutet (z. B. Hochstegenmarmor am Tuxer Hauptkamm).



Abbildung 15: 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 16: Übersichtskarte der Probenahmestellen 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 Trinkwasserverordnung (TWV) keinen Grenzwert, sondern einen Indikatorwert, der bei 200 μg/l liegt und nicht überschritten werden sollte.

An den ausgewählten Blockgletscherquellen wurden parallel zu den hydrochemischen Proben auch Isotopenproben genommen, um eine allgemeine Charakterisierung der Wässer zu ermöglichen. Weitere wesentliche Fragestellungen, wofür die Isotopenmessungen zur Beantwortung herangezogen wurden, waren die Trennung, Herkunft und das Mischungsverhältnis unterschiedlicher Abflusskomponenten der Quellwässer für verschiedene Zeitskalen (tägliche und saisonale Schwankungen). Daher wurden zusätzlich an Blockgletscherquellen in der Umgebung der Hochschoberhütte (Schobergruppe), der Ölgrube (Kaunertal, Ötztaler Alpen) und Inneres Bergli (Silvrettagruppe) Isotopenproben mit hoher zeitlicher Auflösung (stündlich bis 48-Stunden-Intervall) entnommen sowie Ereignisbeprobungen durchgeführt. Außerdem wurden Niederschlagsproben (Regenwasser) genommen und im Vorfeld der bzw. auf den Blockgletschern Schöneben, Hochschoberhütte und Inneres Bergli im März/April 2017 Schneeprofile aufgenommen und beprobt. In der Wurzelzone des Blockgletschers im Inneren Bergli konnten auch einige Permafrosteisproben für Isotopenanalysen entnommen werden.

Generell zeigen die Wässer aller beprobten Blockgletscherquellen eine ähnliche Isotopensignatur. Die Proben zeigen aber eine leichte Abweichung zur Austrian Meteoric Water Line (AMWL). Diese Abweichung ist besonders deutlich an den Proben der Umgebung der Hochschoberhütte erkennbar und vermutlich auf den verstärkten mediterranen Einfluss bzw. Verdunstungseffekte der dortigen Seen zurückzuführen.

An der Quelle des aktiven Blockgletschers im Inneren Bergli (Silvrettagruppe) wurden von Mai bis Oktober 2017 in regelmäßigen Zeitabständen Isotopenproben genommen und analysiert. Zusätzlich liegen Daten vom Schneeprofil, vom Regenwasser und von einigen Eisproben aus der Wurzelzone des Blockgletschers vor. Dies erlaubt einen Einblick in die saisonale Dynamik dieser Blockgletscherquelle. Die Isotopenwerte der Blockgletscherquelle im Inneren Bergli liegen auf der lokalen meteorischen Wasserlinie und stellen somit Mischwässer des Niederschlagswassers (Schnee, Regen) und des Schmelzwassers des Permafrosteises dar (Abb. 17).



Abbildung 17: 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 ($\delta^2 H = 8.34 * \delta^{18}O + 16.58$).

Beiträge zur Hydrogeologie	ISSN 0376-4826	Band 63	2021	87/100
			-	- /

Einen klaren saisonale Zyklus zeigt die Gegenüberstellung der Zeitreihe der Isotopenwerte der Blockgletscherquelle im Inneren Bergli zu den Werten der elektrischen Leitfähigkeit (Abb. 18). Das Quellwasser der Blockgletscherquelle stellt eine Mischung aus letztlich vier Komponenten dar (Schmelzwasser der winterlichen Schneedecke, Schmelzwasser des Kargletschereises und untergeordnet des Permafrosteises im Blockgletscher, Regenwasser und Grundwasser), deren Mischungsverhältnis sich saisonal stark verändert.

Im Mai und Juni, während der Hauptschneeschmelze, wird das Quellwasser von der Schneeschmelze dominiert, was durch die niedrigen Werte der elektrischen Leitfähigkeit und leichten Isotopenwerte dokumentiert wird. Im Juli und August geht der Einfluss der Schneeschmelze stark zurück und das Quellwasser wird vor allem vom Regenwasser sommerlicher Niederschläge dominiert, angezeigt durch immer noch niedrige Werte der elektrischen Leitfähigkeit und Anreicherung schwerer Isotope. Da gleichzeitig auch die Schüttung der Quelle kontinuierlich abnimmt, wird auch der Einfluss des höher mineralisierten Grundwassers durch einen leichten Anstieg der elektrischen Leitfähigkeit angedeutet. Im Herbst (September, Oktober) ist schließlich ein deutlich erkennbarer Anstieg der elektrischen Leitfähigkeit bei gleichzeitig starkem Rückgang der Schüttung erkennbar und die Isotopenwerte bewegen sich im Bereich von -13‰ δ^{18} O. Diese Werte zeigen, dass im Herbst das Quellwasser fast ausschließlich vom Grundwasser aus dem Blockgletscher gespeist wird (Abb. 18).



Abbildung 18: Saisonale Isotopenverteilung der Blockgletscherquelle des Bergli/Lareintal im Vergleich mit der elektrischen Leitfähigkeit.

Neben den saisonalen Schwankungen konnten auch starke Schüttungsänderungen an Quellen von aktiven Blockgletschern im Tagesverlauf festgestellt werden (Wagner et al., 2021). Während einer Trockenwetterperiode waren beim Abfluss des Blockgletschers in der Inneren Ölgrube deutliche Tageszyklen in der Schüttung, der elektrischen Leitfähigkeit, der Wassertemperatur und der Isotopenwerte erkennbar (Abb. 19). Das Schüttungsmaximum wurde jeweils gegen 6 Uhr, das Schüttungsminimum gegen 18 Uhr beobachtet. Während Schüttungsmaxima wurden jeweils die niedrigsten Werte der elektrischen Leitfähigkeit und Wassertemperatur gemessen, während Schüttungsminima dagegen die höchsten Werte der elektrischen Leitfähigkeit und Wassertemperatur. Während Schüttungsmaxima ist auch eine deutliche Abreicherung der schweren Isotope erkennbar,

Beiträge zur Hydrogeologie	ISSN 0376-4826	Band 63	2021	88/100
----------------------------	----------------	---------	------	--------

was auf die starke Verdünnung durch Schmelzwasser der Schneedecke und der Kargletscher im Einzugsgebiet zurückzuführen zu sein scheint.

Untersuchungsergebnisse der Blockgletscherquelle im Inneren Bergli zeigen nur undeutliche Tagesschwankungen. Bei zwei beprobten Blockgletscherquellen in der Umgebung der Hochschoberhütte wurden keine Tagesschwankungen im Untersuchungszeitraum festgestellt.

Wie stark Tagesschwankungen nach der Hauptschneeschmelze ausgeprägt sind, hängt offensichtlich stark vom Vorhandensein oder Fehlen von Kargletschern im Einzugsgebiet der Blockgletscher ab. Beim Blockgletscher in der Inneren Ölgrube befinden sich im Einzugsgebiet noch zwei kleine Kargletscher, die ungefähr 10 % der gesamten Fläche des Einzugsgebietes bedecken (Wagner et al., 2021). Beim Blockgletscher im Inneren Bergli sind in der Wurzelzone des Blockgletschers noch Reste eines ehemaligen Kargletschers vorhanden, bei den Blockgletschern in der Umgebung der Hochschoberhütte sind dagegen keine Kargletscher oder Gletscherreste mehr vorhanden. In jüngsten Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass ca. 30 % des Jahresabflusses an der Blockgletscherquelle Innere Ölgrube Schmelzwässer des Kargletschers sind, die künftig weiter zurückgehen und vermutlich gänzlich verschwinden werden (Wagner et al., 2021).



Abbildung 19: Tagesschwankungen der Schüttung (Q), blaue Punkte: δ^{18} O Isotopendaten, (Ereignisbeprobungen im 6-Stundentakt), Wassertemperatur (WT), elektrischer Leitfähigkeit (EC) und Lufttemperatur (AT) während einer Trockenperiode der untersuchten Quelle des aktiven Blockgletschers Innere Ölgrube, Kaunertal (modifiziert nach Wagner et al., 2021).

Hydrographanalyse

An den Abflussganglinien der Pegelstationen der Blockgletscher Schöneben (reliktisch), Innere Ölgrube, Inneres Bergli, Äußeres Hochebenkar und Inneres Reichenkar (alle aktiv) wurden Hydrographanalysen durchgeführt. Generell zeigen die Hydrographen der Pegelstationen ein ähnliches Verhalten wie jene von Karstquellen mit relativ hohen Schüttungsquotienten (Wagner et al., 2020c).

Analysen der Trockenwetterfalllinie der Pegelstation Innere Ölgrube zeigen beispielhaft das Auftreten von zumindest zwei Abflusskomponenten, eine schnelle Abflusskomponente mit Reaktionszeiten auf Niederschlags-/Schneeschmelzereignisse innerhalb weniger Stunden und eine verzögerte

Beiträge zur Hydrogeologie ISS	5N 0376-4826 🔰 Band 6	3 2021	89/100
--------------------------------	-----------------------	--------	--------

Abflusskomponente, wo länger gespeichertes Grundwasser (mehrere Monate) einen Basisabfluss in Zeitperioden ohne Grundwasseranreicherung möglich macht (Abb. 20).



Abbildung 20: Trockenwetterfalllinien der Pegelstation Ölgrube Süd mit Daten aus dem Zeitraum 2014 bis 2017. Das Inset zeigt die Schüttungsganglinie der Pegelstation (Heigert, 2018).

Die Auslaufkoeffizienten (α -Werte) der Pegelstationen Inneres Reichenkar, Innere Ölgrube (beide aktive Blockgletscher) und Schöneben (reliktischer Blockgletscher) zeigen sehr ähnliche Werte (Wagner et al, 2020c). Die relativ hohen α_1 -Werte deuten auf eine schnelle Abflusskomponente bei allen drei Blockgletschern hin. Bei allen drei Blockgletschern ist auch ein ausgeprägter Basisabfluss vorhanden. Generell sind die α -Werte der am längsten gespeicherten Abflusskomponente relativ niedrig, was auf eine gute Speicherwirkung der Aquifere hinweist. Dies passt auch gut zu den Werten der elektrischen Leitfähigkeit und den Isotopendaten der Quellwässer, was wiederum auf eine ausgeprägte Grundwasserkomponente hinweist.

Schwellenwertanalyse

Die Hydrographanalyse in Kombination mit Niederschlagsdaten ermöglicht eine Schwellenwertanalyse (Harrington et al., 2018). Die Schwellenwertanalyse zeigt, ab welchen Niederschlagsmengen (Schwellenwert) die Quelle mit einem deutlichen Schüttungsanstieg reagiert. Unterhalb des Schwellenwertes bleibt die Quellschüttung unverändert, da bestimmte Aquiferbereiche oder Muldenstrukturen an der Basis des Aquifers erst aufgefüllt werden müssen, um ein Anspringen der Quelle zu erreichen.

Die Schwellenwertanalyse zeigt, dass die aktiven Blockgletscher Äußeres Hochebenkar, Inneres Bergli und Innere Ölgrube mit knapp unter 20 mm ähnliche Niederschlagsmengen benötigen, um einen markanten Anstieg der Quellschüttung zu erreichen (Abb. 21; Wagner et al., 2020c).



Abbildung 21: Schwellenwertermittlung der nötigen Niederschlagsmenge für einen merkbaren Quellschüttungsanstieg; Äußeres Hochebenkar, Begli/Lareintal und Innere Ölgrube sind aktive Blockgletscher, Schöneben ist ein reliktischer Blockgletscher (modifiziert nach Wagner et al., 2020c).

Der reliktische Blockgletscher Schöneben benötigt dagegen mit ca. 50 mm Niederschlag mehr als den doppelten Schwellenwert (Abb. 21). Dies ist vermutlich auf das deutlich höhere Porenvolumen (Speichervermögen) zurückzuführen, da dieser Blockgletscher kein Permafrosteis mehr enthält. Auch eine ausgeprägte Übertiefung (Muldenstruktur) an der Basis des Aquifers könnte eine gewisse Rolle spielen (Pauritsch et al., 2017).

Die Steigung der Beziehung Niederschlagsmenge zu Ereigniswasseranteil ist bei allen untersuchten Blockgletschern ähnlich, was darauf hinweist, dass die schnelle Abflusskomponente sowohl im Aquifer des reliktischen als auch im Aquifer der aktiven Blockgletscher ähnlich ist (Wagner et al., 2020c).

Natürliche und künstliche Tracer

Beim Abfluss des Blockgletschers Innere Ölgrube konnte unter Berücksichtigung der elektrischen Leitfähigkeit und Anwendung eines Zwei-Komponenten-Mischmodells die schnelle Abflusskomponente ("Eventwasser") und die länger gespeicherte Grundwasserkomponente getrennt ausgewiesen werden (Wagner et al., 2021).

Abb. 22 zeigt beispielhaft den Gesamtabfluss, die schnelle Abflusskomponente und den Grundwasseranteil des Blockgletschers Innere Ölgrube während der Schneeschmelze im Frühsommer 2018 (16. Mai bis 25. Juli). Mit steigender Schüttung sind ab Ende Mai tägliche Schwankungen des Grundwasseranteils zu erkennen mit einem konstanten Anteil von ~ 30-40 %. Auch markante Niederschlagsereignisse (z. B. Ende Juni) führen nur zu einer geringen Änderung der Mischungsanteile. Phasen mit geringem Abfluss (z. B. 24. Juni und 01. Juli) zeigen dagegen einen deutlich höheren Grundwasseranteil.



Abbildung 22: Trennung der Abflusskomponenten für die Pegelstation Innere Ölgrube von 16.05.2018–25.07.2018.

Abb. 23 zeigt das Abflussverhalten des Blockgletschers Innere Ölgrube für den Zeitraum 31. Juli bis 12. November 2017. Mitte Juli bis Anfang September sind deutliche tägliche Schwankungen erkennbar, wobei in diesem Zeitraum der Grundwasseranteil nur leicht ansteigt. Während dieser Zeit kommt es durch infiltrierende Niederschläge und Eisschmelzwasser zur Grundwasserneubildung. Diese deutliche Änderung zu Beginn des Septembers markiert den Übergang von der durch Niederschlags- und Schmelzwasser dominierten Periode (Mai bis August) zur Periode mit geringer Grundwasserneubildung und folglich höherem Grundwasseranteil am Gesamtabfluss (ab September).



Abbildung 23: Trennung der Abflusskomponenten für die Pegelstation Innere Ölgrube von 31.7.2017–12.11.2017.

Die Markierungsversuche mit Fluoreszenzfarbstoffen am Blockgletscher Innere Ölgrube in den Jahren 2015 und 2017 ergaben ein Erstauftreten des Markierungsstoffes Uranin an der Quelle nach 2 h 40 min bzw. 2 h 34 min (Rieder, 2017; Heigert, 2018, Kainz, 2020). 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 Spitzen der Tracerkonzentration traten nach ca. 4,67

Beiträge zur Hydrogeologie ISSN 0	376-4826 Band 63	2021	92/100
-------------------------------------	--------------------	------	--------

bzw. 5,33 h (2017, Abb. 24) auf. Die mittlere Abstandsgeschwindigkeit weist einen Wert von 0,07 bzw. 0,06 m/s für die Versuche von 2015 und 2017 auf (Wagner et al., 2021).

Die Einspeismengen des Tracers 2015 und 2017 betrugen 25 bzw. 202,5 g. Die Wiederfindungsraten betrugen ca. 46 % bzw. mindestens 43 % (Abb. 24). Die relativ niedrigen Wiederfindungswerte aus beiden Jahren kann vermutlich darauf zurückzuführen sein, dass ein Teil des eingespeisten Farbtracers im Eis bzw. im Untergrund festgehalten und/oder später unterhalb der Nachweisgrenze (oder nach Beendigung der Messung) wieder abgegeben wurde. Mit den zwei Tracerversuchen wurde somit die schnelle Abflusskomponente des Blockgletschers offensichtlich, für die verzögerte Komponente wäre ein längerer Beobachtungszeitraum nötig, sie konnte bis jetzt noch nicht erfasst werden.



Abbildung. 24: Konzentrationsverlauf des Markierungsstoffs Uranin sowie die kumulative Wiederfindung des Versuchs aus dem Jahr 2017 (modifiziert nach Heigert, 2018). Die Wiederfindungsrate ist mit 5 % Fehlerbalken angegeben, um Unsicherheiten bzgl. des Abflusses abzubilden.

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. 7,8x10⁻² bzw. 5,3x 0⁻² m/s.

Niederschlags-Abflussmodellierung

Um das Auslaufverhalten von Blockgletscherquellen und 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 im Zuge des Projekts erarbeitete Erweiterungen davon angewandt (Wagner et al., 2021).

Wagner et al. (2016) konnten erfolgreich die Abflussdynamik des reliktischen Schöneben Blockgletschers simulieren und im übergeordneten Einzugsgebiet der Liesing (Pegel Unterwald) die Beeinflussung der reliktischen Blockgletscher quantitativ erfassen. Diese Analyse zeigt, dass an bestimmten Tagen reliktische Blockgletscher in einem übergeordneten Einzugsgebiet bis zu mehr als die vierfache Abflussmenge relativ zum jeweiligen Einzugsgebietsanteil beitragen können. An der Pegelstation Unterwald stammen bis zu 52 % des Abflusses an bestimmten Tagen von reliktischen Blockgletschern, die aber nur 12 % der Einzugsgebietsfläche ausmachen. Der höchste Anteil des

Beiträge zur Hydrogeologie ISSN)376-4826 Band 63	2021	93/100
---------------------------------	-------------------	------	--------

langjährigen monatlichen Mittels liegt mit 23 % im Mai. Im Zuge des Projekts wurde daher das N-A-Modell

- I. auf weitere übergeordnete Einzugsgebiete getestet, um die Beeinflussung von Blockgletschern auf die Abflussdynamik alpiner Einzugsgebiete im regionalen Maßstab besser zu verstehen.
- II. Außerdem fand das Modell für Abflüsse von intakten Blockgletschern Anwendung, um deren Abflussverhalten besser zu verstehen und zur Aquifercharakterisierung beizutragen (Wagner et al., 2021).

Um die übergeordnete Relevanz von Blockgletscherabflüssen auf darunterliegende Einzugsgebiete zu verdeutlichen (i), 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.

Die täglichen Schwankungen des blockgletscherbeeinflussten Anteils am Pegel Hammerjäger betragen zwischen 3,6 % und 71,5 % bei Berücksichtigung der Durchleitung durch das restliche Einzugsgebiet. Dies bedeutet, dass am Pegel Hammerjäger an einzelnen Tagen (Ende Mai, Anfang Juni) bis zu 71 % des Abflusses von Blockgletschern stammen.

Eine starke Beeinflussung durch Blockgletscher 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 stammen im Juni am Pegel Hammerjäger 49 % des Abflusses von Blockgletschern. 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.

Beim Pegel Tetter (Unterthalerbach) mit gerade einmal 7,7 % Flächenanteil der blockgletscherbeeinflussten Teileinzugsgebiete errechnet sich immerhin eine Beeinflussung des Gesamtabflusses von bis zu 21 % an einzelnen Tagen. Dies tritt vermehrt in den Monaten Juni und Juli auf, was sich auch in den langjährigen Monatsmittel äußert (Abb. 25) und entspricht etwa der dreifachen Menge des Flächenanteils auf Tagesbasis.



Abbildung 25: Prozentueller Anteil des Blockgletscherabflusses am Gesamtabfluss der Pegelstation Tetter als langjährige Monatsmittelwerte relativ zum flächenhaften Anteil der Blockgletscher im Gesamteinzugsgebiet.

Die Anwendung des N-A-Modells für aktive Blockgletscher wurde erstmals erfolgreich am Blockgletscher Inneren Ölgrube (Kaunertal; Nordtirol) im lokalen Maßstab (1,83 km² Einzugsgebietsgröße) angewandt (Wagner et al., 2021) (ii). Mehrjährige Pegeldaten des Blockgletschers sowie Lufttemperatur- und Niederschlagsdaten der nahegelegenen Wetterstation

Beiträge zur Hydrogeologie	ISSN 0376-4826	Band 63	2021	94/100
			-	

Weisssee (2464 m ü. A.; von der TIWAG freundlicherweise zur Verfügung gestellt) ermöglichten die Modellierung der komplexen Abflussbedingungen im Einzugsgebiet, die durch eine zusätzliche Abflusskomponente von Kargletschern geprägt werden. Der flächenhafte Anteil der Kargletscher im Einzugsgebiet des Blockgletschers Innere Ölgrube beträgt etwa 10 %, was durch ein Eisspeicher Modul berücksichtigt wurde. Niederschlag und Lufttemperatur wurden auf die mittlere Einzugsgebietshöhe von 2887 m ü. A. korrigiert (Kuhn, 2012; Kuhn et al., 2013).

Das N-A-Modell erlaubt eine Trennung der Eingangswassermenge in Regen (~37 %), Schnee (~36 %) und Eis (~28 %) (Wagner et al., 2021). Es muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass die Abflusskomponente der Eisschmelzwässer zum Großteil den Kargletschern zuzurechnen ist und die Permafrosteis-Komponente mit dieser Datengrundlage und der Modellstruktur noch nicht differenziert werden kann.

Das Modell zeigt, dass auch intakte Blockgletscher eine durchaus relevante Grundwasserkomponente aufweisen können (Wagner et al., 2021), wie dies bereits bei reliktischen Blockgletschern aufgezeigt werden konnte (Winkler et al., 2016b). Diese Erkenntnis deckt sich auch mit den isotopenhydrologischen Untersuchungen und unterstreicht somit die wasserwirtschaftliche Relevanz von Blockgletschern (reliktisch und intakt) hinsichtlich Speicher- und Pufferwirkung. Eine Berücksichtigung des abschmelzenden Permafrosteises in intakten Blockgletschern ist derzeit noch nicht möglich und bedarf weiterführender Untersuchungen (idealerweise an intakten Blockgletschern ohne Kargletscheranteil in deren Einzugsgebiet).

Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse der N-A-Modellierung weisen deutlich auf die wasserwirtschaftliche Relevanz von Blockgletschern hinsichtlich Speicher- und Pufferwirkung hin. Eine relevante Grundwasserkomponente konnte beim reliktischen Schöneben Blockgletscher und dem intakten Blockgletscher Innere Ölgrube anhand der Modellierung nachgewiesen werden.

Außerdem stammt auch in unterstromigen Einzugsgebieten (Unterwald, Liesingbach; Hammerjäger, Ingeringbach; Tetter, Unterthalerbach) ein beträchtlicher Teil des Abflusses von Blockgletschern, die aber flächenmäßig nur einen kleinen Teil des Gesamteinzugsgebiets ausmachen.

Im Rahmen dieses Projekts wurden erstmals österreichweit einheitliche Inventare der Blockgletscher und deren Einzugsgebiete auf Basis hochaufgelöster Laserscan-Daten erstellt. Die Verteilung der Blockgletscher in den österreichischen Alpen wird stark von der Topographie und der Vergletscherungsgeschichte der Würm-Eiszeit (Hoch- und Spätglazial) sowie den holozänen Klimaschwankungen (Kleine Eiszeit) beeinflusst.

Es konnten insgesamt 5769 Blockgletscher und blockgletscherverdächtige Landschaftsformen identifiziert werden, die immerhin eine Fläche von 303 km² bedecken. Für wasserwirtschaftliche Aspekte ist die hydrologische Einzugsgebietsfläche der Blockgletscher von Bedeutung, die 1279 km² umfasst. Blockgletscher können Regenwasser sowie Schmelzwasser von Schnee und Eis zwischenspeichern und verzögert abgeben. Dadurch kann der Anteil der Abflüsse von Blockgletschern am Gesamtabfluss übergeordneter Einzugsgebiete temporär ein Vielfaches des flächenhaften Anteiles betragen.

Von besonderer hydrologischer Bedeutung ist die ungefrorene, feinkörnige Sedimentlage, die zwischen dem Festgesteinsuntergrund und dem gefrorenen Permafrostkörper bei einigen intakten Blockgletschern durch geophysikalische Messungen nachgewiesen wurde und vermutlich bei den meisten intakten Blockgletschern ausgebildet ist. Diese ungefrorene Basisschicht stellt einen

Beiträge zur Hydrogeologie	ISSN 0376-4826	Band 63	2021	95/100
0 , 0 0				

relevanten Grundwasserleiter dar, der für den Basisabfluss bei intakten Blockgletschern – vergleichbar mit reliktischen Blockgletschern - verantwortlich ist.

Intakte Blockgletscher sind durch ein komplexes Abflussverhalten charakterisiert, dass durch mehrere Abflusskomponenten – Grundwasser, Regenwasser, Schneeschmelzwasser, Schmelzwasser von Permafrosteis und lokal v. a. auch von kleinen Kargletschern – geprägt ist.

Es konnte gezeigt werden, dass auch bei intakten Blockgletschern ein relevanter Grundwasseranteil vorhanden ist. Dadurch weisen intakte Blockgletscher auch in den Wintermonaten einen, wenn auch geringen Basisabfluss auf, der ausschließlich aus Grundwasser besteht.

Es ist zu erwarten, dass durch die Klimaerwärmung das Permafrosteis in den intakten Blockgletschern verstärkt schmelzen kann, wodurch die Speicherkapazität und Pufferwirkung der Blockgletscher erhöht werden können.

Ein bereits für reliktische Blockgletscher (und übergeordnete Einzugsgebiete) angewandtes Niederschlags-Abflussmodell konnte mittels Eisspeichermodul erweitert werden und an einem alpinen Einzugsgebiet eines aktiven Blockgletschers mit dahinter liegenden Kargletschern erfolgreich eingesetzt werden. Das N-A-Modell erlaubt es, eine Trennung der Eingangsgrößen Schneeschmelze, Regen und Gletschereisschmelze durchzuführen und daraus abzuleiten, dass der Winter-Basisabfluss dieses aktiven Blockgletschers der Inneren Ölgrube durch Grundwasser (ungefrorene Basisschicht) bewerkstelligt wird. Auch ein fiktives Verschwinden der Kargletscher konnte simuliert werden und dadurch aufgezeigt werden, dass auch dann noch der Basisabfluss gegeben ist. Basierend auf diesen Grundlagen ist es möglich, 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 durch den Klimawandel verursachte Änderungen in alpinen Einzugsgebieten.

Nicht nur quantitative, sondern auch qualitative Aussagen über Blockgletscherquellen und deren Abfluss konnten anhand der hydrochemischen Analysen getroffen werden. Bei mit Schwermetallen belasteten Blockgletscherquellen konnten zwei Quelltypen unterschieden werden: ein Ni/Mn/Al-Typ und ein As/U-Typ. Die Untersuchungen der Wasserchemie der Blockgletscher haben ergeben, dass hohe Schwermetallbelastungen mit Ni und Mn auf die Ötztaler und Stubaier Alpen beschränkt und dort an Quellen intakter Blockgletscher gebunden sind. Eine großflächige, Österreich weite Verbreitung der Ni und Mn Belastungen konnte nicht nachgewiesen werden. In anderen Gebirgsgruppen wurden Schwermetallbelastungen des As/U-Typs in Blockgletscherquellen nur punktuell beobachtet und dürften an die zugrunde liegenden geologischen Verhältnisse gebunden sein. Sämtliche erhobenen hydrochemischen Daten wurden in die H2O-Datenbank des Bundesministeriums eingearbeitete und stehen somit bundesweit zur Verfügung.

Zusammenfassend können nachstehende **wasserwirtschaftliche Potentiale der Blockgletscher als Grundwasserleiter/-speicher** in alpinen Einzugsgebieten angeführt werden (siehe Endbericht Wagner et al., 2019):

- 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 relativ hohen Basisabfluss, wodurch auch nach längeren Trockenperioden oder Zeiten geringer Grundwasserneubildung eine entsprechend hohe Schüttung auftritt. 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

Beiträge zur Hydrogeologie	ISSN 0376-4826	Band 63	2021	96/100
----------------------------	----------------	---------	------	--------

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 des Weiteren die Nutzung bei der Schneeproduktion selbst, da die Wassertemperaturen 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. Es wurde ein erster wichtiger Schritt getan, um die künftigen Herausforderungen einer immer stärkeren und intensiveren Nutzung der alpinen Regionen wie bspw. durch Tourismus zu meistern.

Schlussendlich zeigen die Projektergebnisse, dass noch weitere Untersuchungen notwendig sind, vor allem im Hinblick auf die gegenwärtige Klimaerwärmung und den steigenden Bedarf an Trink- und Brauchwasser auch in höher gelegenen Gebieten (v. a. Schigebiete). Einem strukturierten Langzeitmonitoring (hydrologisch, hydrochemisch, isotopisch, Schuttbedeckung, usw.) kommt in dieser Fragestellung eine sehr hohe Bedeutung zu, weshalb dies auch konsequent umgesetzt werden soll.

Danksagung

Das Projekt wurde von den Bundesländer Vorarlberg, Tirol, Salzburg, Kärnten und Steiermark sowie dem Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus (BMLRT, vormals BMNT) finanziert. 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 BMLRT für die sehr gute Zusammenarbeit und ihre Unterstützung gedankt. Ein weiterer Dank gilt Dr. DI Leis für die hilfreichen Diskussionen bezüglich Isotopenauswertung.

Literaturverzeichnis

- Barsch D. (1996): Rockglaciers. Indicators for the present and former geoecology 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.
- GZÜV (2006): Gewässerzustandsüberwachungsverordnung.- StF: BGBI. II Nr. 479/2006 (i.d.g.F).
- 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.-Unveröffentlichte Masterarbeit, Technische Universität Graz.
- Jones D.B., Harrison S., Anderson K., Betts R.A. (2018): Mountain rock glaciers contain globally significant water stores.-Scientific Reports, 8 S.; 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 Review; doi:10.1016/j.earscirev.2019.04.001
- Kainz S. (2020): Characterizing groundwater flow dynamics and storage capacity in an active rock glacier.- Unveröffentlichte Masterarbeit, Karl-Franzens-Universität Graz.
- Kellerer-Pirklbauer A., Lieb G.K., Kleinferchner 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.
- 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., Bressan D., Dietre B., Haas J.N., Hajdas I., Lang K., Mair V., Nickus U., Reidl D., Thies H., Tonidandel D. (2015): A 10,300-year-old permafrost core from the active rock glacier Lazaun, southern Ötztal Alps (South Tyrol, northern Italy).-Quaternary Research, 83, 324-335; doi:10.1016/j.yqres.2014.12.005
- Kuhn M. (2012): Rain and snow at high elevation.- In: Lütz C. (Hg.): Plants in Alpine Regions, Springer Verlag Wien, New York, 1-10.
- Kuhn M., Dreiseitl E., Emprechtinger M. (2013): Temperatur und Niederschlag an der Wetterstation Obergurgl, 1953-2011.-In: Koch E.-M. (ed.): Publikationen Alpine Forschungsstelle Obergurgl.
- Lieb G.K., Kellerer-Pirklbauer A., Kleinferchner H. (2012): Second rock glacier inventory (RGI2) of Central and Eastern Austria.-PANGEA, https://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.869805
- 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
- Pfingstl S., Kurz W., Schuster R., Hauzenberger C. (2015): Geochronological constraints on the exhumation of the Austroalpine Seckau Nappe (Eastern Alps).- Austrian J Earth Sci., 108(1), 172–185.
- Ribis M. (2017): Geologisch-hydrogeologische und hydrochemische Untersuchungen in Permafrostbereichen der Ötztaler Alpen (Tirol, Österreich).- Unveröffentlichte Dissertation. Universität Innsbruck
- Rieder A. (2017): Geologische, geomorphologische und hydrogeologische Untersuchungen im Bereich Ölgrube, Kaunergrat, Ötztaler Alpen.- Unveröffentl. Masterarbeit, Universität Innsbruck, Innsburck.
- Rogger M., ChircobG.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
- Stocker K. (2012a): Geologie und Blockgletscher der Madererspitze (Vorarlberg).- Unveröffentlichte Masterarbeit, Institut für Geologie und Paläontologie, Universität Innsbruck, 134 S., Innsbruck.
- Stocker K. (2012b): Blockgletscher in Vorarlberg und in der Verwallgruppe.- Museumsverein Jahrbuch Vorarlberger Landesmuseum 2012, 124-139.
- Thies H., Nickus U., Tolotti M., Tessadri R., Krainer K. (2013): Evidence if rock glacier melt impacts on water chemistry and diatoms in high mountain streams.- Cold Regions Science and Technology, 96, 77-85.

Beitrage zur Hydrogeologie ISSN 0376-4826 Band 63	2021	98/100
---	------	--------

- 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
- Untersweg T. & Schwendt A. (1995): Die Quellen der Blockgletscher in den Niederen Tauern.- Bericht der wasserwirtschaftlichen Planung Nr. 78, Graz, 76 S.
- Untersweg T., Schwendt A. (1996): Blockgletscher und Quellen in den Niederen Tauern.- Mitteilungen der Österreichischen Geologischen Gesellschaft, 87, 47-55.
- 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., Kainz S., Wedenig M., Pleschberger R., Krainer K., Kellerer-Pirklbauer A., Ribis M., Hergarten S., Winkler, G. (2019): Wasserwirtschaftliche Aspekte von Blockgletschern in Kristallingebieten der Ostalpen – Speicherverhalten, Abflussdynamik und Hydrochemie mit Schwerpunkt Schwermetallbelastungen (RGHeavyMetal) – Endbericht.- 158 S.; (https://www.bmlrt.gv.at/wasser/gewaesserbewirtschaftung/forschungsprojekte/RG-HeavyMetal.html; letzter Zugriff: 12.05.2021).
- Wagner T., Pleschberger R., Kainz S., Ribis M., Kellerer-Pirklbauer A., Krainer K., Philippitsch R., Winkler G. (2020a): The first consistent inventory of rock glaciers and their hydrological catchments of the Austrian Alps.- Austrian Journal of Earth Sciences; 113/1, 1-23. DOI: 10.17738/ajes.2020.0001
- Wagner T., Ribis M., Kellerer-Pirklbauer A., Krainer K., Winkler G. (2020b): The Austrian rock glacier inventory RGI_1 and the related rock glacier catchment inventory RGCI_1 in ArcGis (shapefile) format.- PANGAEA; https://doi.org/10.1594/PANGAEA.921629
- Wagner T., Brodazc A., Krainer K., Winkler G. (2020c): Active rock glaciers as shallow groundwater reservoirs, Austrian Alps.-Grundwasser, 25(3), 215-230; https://doi.org/10.1007/s00767-020-00455-x
- Wagner T., Kainz S., Krainer K., Winkler G. (2021): Storage-discharge characteristics of an active rock glacier catchment in the Innere Ölgrube, Austrian Alps.- Hydrological Processes.
- 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, 87, 134 S.
- 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., Krainer K., Ribis M., Hergarten S. (2018): Hydrogeology of Rock Glaciers Storage Capacity and Drainage Dynamics – an Overview.- In: Sychev V.G., Mueller L. (ed.): Novel methods and results of landscape research in Europe, Central Asia and Siberia, Vol II(71), 329-334.