

## **Blockgletscher in den Kristallingebieten der Ostalpen, Abflussdynamik und Speicherverhalten**

<sup>1</sup>Gerfried Winkler, <sup>1</sup>Thomas Wagner

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

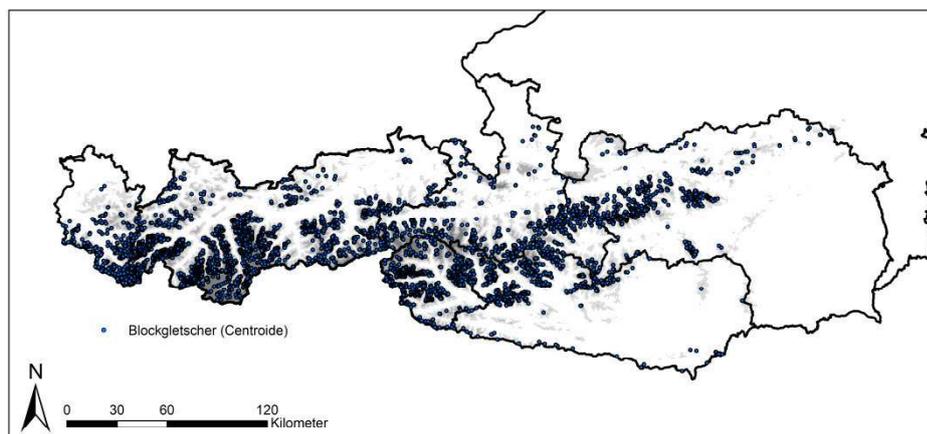
### **Abstract**

Rock glaciers are the most prominent periglacial landforms and in the Austrian Alps 5770 rock glacier suspected landforms were identified in recent studies. Climate warming and related degradation of permafrost ice in intact rock glaciers and the transformation into relict rock glaciers is expected to increase the storage capacity of these landforms and thus change the discharge pattern of related springs. It is assumed that in alpine catchments peak discharges during snowmelt and summer thunderstorms become less pronounced, while the baseflow (e.g. during winter period) increases. These processes have a high relevance particularly for local water resources management when landforms such as relict rock glaciers are considered as reservoirs for drinking water or for artificial snow-making. However, a number of challenges remain still unsolved and further interdisciplinary research is needed. Dye tracer tests, isotope studies, permafrost ice and water chemistry and geophysical investigations in combination with studies related to the thermal behavior of the subsurface will lead to a better understanding of melting processes of the permafrost ice on the one hand and of the hydro(geo)logical processes in such alpine landforms and their impact on alpine catchments on the other hand.

### **Einleitung**

Alpine Einzugsgebiete sind durch periglaziale Landschaftsformen wie bspw. Blockgletscher als deren prägendste Landschaftsformen beeinflusst. In den letzten Jahren wurde ein einheitliches Blockgletscherinventar für den gesamten österreichischen Alpenraum erstellt, in dem 5770 Blockgletscher verdächtige Formen ausgewiesen wurden (Abbildung 1). Blockgletscher können morphologisch in intakte (aktiv und inaktiv; beinhalten Permafrosteis) und reliktsche (fossile) Blockgletscher untergliedert werden (z.B. Barsch, 1996), wobei die Gesamtfläche der Blockgletscher für Österreich 303 km<sup>2</sup> umfasst. Die Fläche der hydrologischen Einzugsgebiete der Blockgletscher und ihrer Quellen liegt bei ca. 1280 km<sup>2</sup>, wobei in manchen Regionen / Gebirgszügen über einer Seehöhe von 2000 m die anteilige Fläche der über Blockgletscher entwässernden Einzugsgebiete über 50% der Gesamtfläche liegt.

Die Klimaerwärmung bedingt im Alpenraum ein rascheres Abschmelzen der Gletscher und einen Anstieg der alpinen Permafrostuntergrenze, was zum Abschmelzen des Permafrosteises führt. Rogger et al. (2017) zeigten in einem alpinen Einzugsgebiet (5 km<sup>2</sup>) in den Ötztaler Alpen, dass sich die Abflussdynamik und das Speicherverhalten in alpinen Regionen durch das Verschwinden des Permafrosteises ändern wird. Daraus resultieren mehrere wasserwirtschaftliche Fragen in Bezug auf die Speicherfähigkeit und Abflussdynamik von Blockgletschern und ihre Auswirkung auf unterstromige Oberflächengerinne. Diese und weitere Fragen zum internen Aufbau von Blockgletschern wurden in den letzten zwei Jahrzehnten und speziell in den letzten Jahren intensiv in den österreichischen Alpen an Blockgletschern in Kristallingebieten untersucht. Die Ergebnisse werden in diesem Beitrag zusammenfassend vorgestellt.



**Abbildung 1:** Lage (Centroid-Punkte) aller Blockgletscher verdächtigen Formen im österreichischen Alpenraum (modifiziert nach Winkler et al., 2018)

### **Blockgletscher – Aquifere und ihr Aufbau**

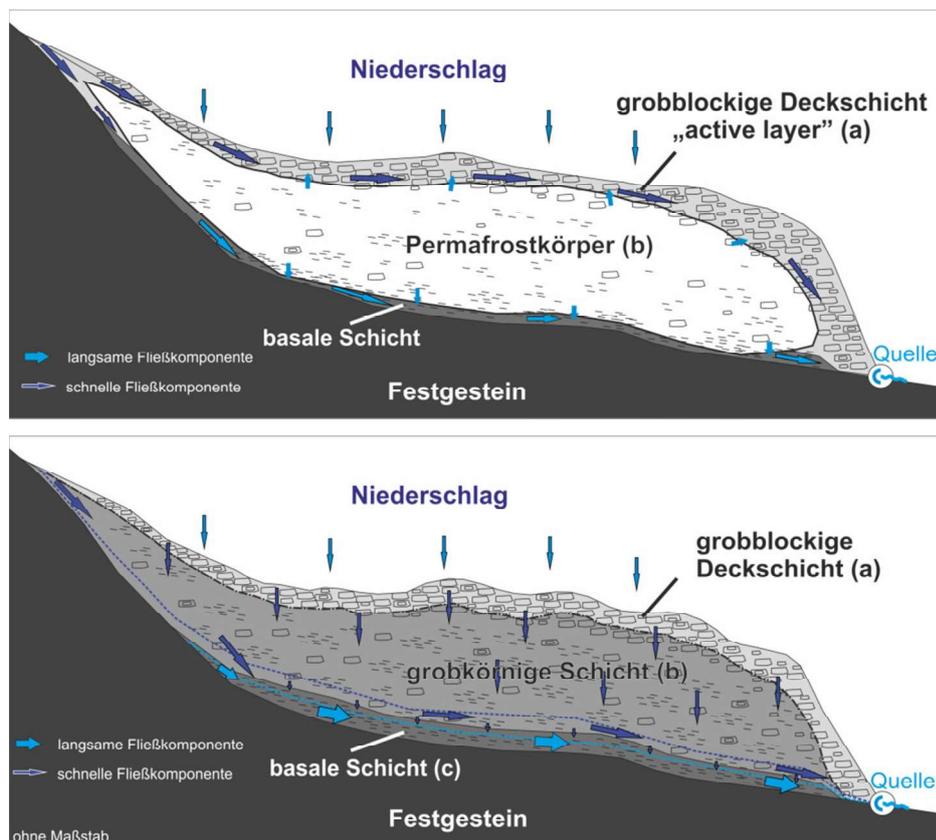
Bereits vor über 40 Jahren zeigte Corte (1976) die hydrologische Relevanz von intakten Blockgletschern in den Anden, zahlreiche weitere Studien bestätigen die hydrologische Bedeutung auch in den anderen Großgebirgen weltweit. Die weltweite Bedeutung dieser Wasserspeicher (in der Form von Permafrosteis und dessen Schmelzwasser) wurde jüngst von Jones et al. (2018) zusammengefasst. In den Alpen wurden v.a. in den letzten zwei Jahrzehnten Blockgletscher intensiver untersucht. Unterschiedliche Methoden, die verschiedene geophysikalische Methoden wie Refraktionsseismik, Georadar oder Geoelektrik aber auch isopenhydrologische, hydrochemische und hydrologische Methoden umfassen, wurden angewandt, um den internen Aufbau sowie die Abflussdynamik und ihr Speicherverhalten zu erfassen. Blockgletscher sind komplexe und mehrschichtige Aquifere (Abbildung 2), die sich in mehreren Abflusskomponenten widerspiegeln (z.B. Krainer & Mostler, 2002; Krainer et al., 2007; Winkler et al., 2016a).

Der Aufbau von **intakten Blockgletschern** besteht im Wesentlichen aus a) einer mehreren Meter dicken oberflächigen ungefrorenen Schicht („active layer“), und darunter b) einer Schicht (Permafrostkörper), die entweder aus einem Gemisch von Permafrosteis und Schutt („ice-cemented“) oder einem weniger häufig auftretenden reinem Eiskern („ice-cored“) mit Mächtigkeiten von mehreren Zehnermetern besteht. Zwischen dem Permafrostkörper und dem darunter liegenden Festgestein liegt im Allgemeinen c) eine feinkörnige basale ungefrorene Schicht, die bis über 15 Meter mächtig sein kann und im Wesentlichen den Hauptaquifer repräsentiert. Dieser Aufbau konnte auch an einer Bohrung im Blockgletscher Lazaun bestätigt werden (Krainer et al., 2015). Erste Zwischenergebnisse eines derzeit laufenden österreichweiten Projekts zeigen, dass der gut gespeicherte Grundwasseranteil relativ zum Gesamtabfluss saisonal schwankend zwischen 20-30 % zur Schneeschmelze sowie bei Niederschlagsereignissen und nahezu 100% kurz vor der einsetzenden Schneeschmelze beträgt.

Der Dreischichtaufbau konnte bei **reliktischen Blockgletschern** bestätigt werden (Winkler et al., 2016a, b), wobei die Schicht b) kein Permafrosteis mehr beinhaltet und aus feinkörnigem bis grobblockigem Schutt aufgebaut ist. Aufgrund der basalen Schicht c) zeigt sich eine gute Speicherkapazität. Bei einem Niederschlagsereignis wird primär „altes“ Grundwasser hinausgedrückt, sodass die Schüttungsmenge

während und nach einem Regenereignis zu einem Großteil aus gut gespeichertem Grundwasser (ca. 80%) und nur zu ca. 20% aus rasch durchströmenden Niederschlagswasser gebildet wird.

Reliktische wie auch intakte Blockgletscher zeigen eine schnelle Abflusskomponente sowie einen Basisabfluss (speziell in den Wintermonaten sichtbar), die durch Verweilzeiten von einigen wenigen Stunden bzw. mehreren Monaten bis fast einem Jahr gekennzeichnet sind. Jedoch sind signifikante Unterschiede zwischen reliktschen und intakten Blockgletschern in Bezug auf Abflussdynamik und Speicherfähigkeit erkennbar. Intakte und v.a. aktive Blockgletscher sind in den Sommermonaten im Gegensatz zu den reliktschen durch starke Tagesschwankungen der Schüttung geprägt.



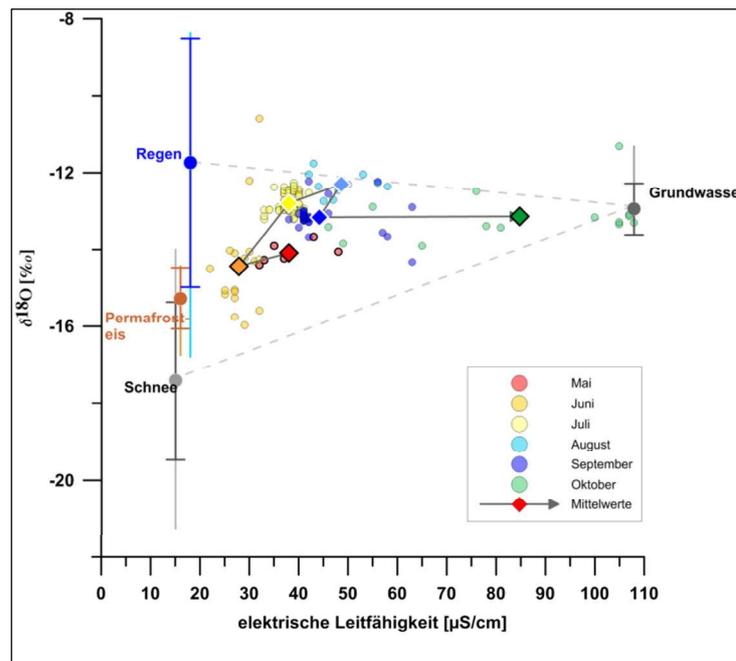
**Abbildung 2:** konzeptionelles hydrogeologisches Modell von intakten (oberes Bild) und reliktschen (unteres Bild) Blockgletschern (modifiziert nach Winkler et al., akzeptiert, basierend auf Winkler et al., 2016a, b und Burger et al., 1999)

Der Abfluss einer Quelle aus einem aktiven Blockgletscher setzt sich aus den Abflusskomponenten Niederschlag in Form von Regen, Schmelzwasser von Schnee und Permafrosteis und dem länger gespeicherten Grundwasser zusammen. Zudem infiltrieren sehr oft in den Blockgletscher Schmelzwässer von Kargletschern, die sich noch oberhalb des Blockgletschers befinden.

Neben den Niederschlägen erhöhen die Schmelzwässer des Permafrost- sowie Kargletschereises die Schüttungswerte deutlich. Tendenziell zeigen aktive Blockgletscher daher niedrigere jährliche Schüttungsquotienten ( $Q_{\min}/Q_{\max}$ ), da einerseits zur Zeit der Schneeschmelze zusätzlich Schmelzwässer des Permafrosteises hinzukommen (Erhöhung von  $Q_{\max}$ ) und andererseits in den Wintermonaten geringere Schüttungswerte beim Basisabfluss auftreten (Verringerung von  $Q_{\min}$ ), welche auf eine geringer mächtige basale Schicht (Basis-Layer) zurückgeführt werden können. Das Verhältnis gut gespeichertes Grundwasser zu rasch durchfließendes Niederschlagswasser scheint bei reliktschen Blockgletschern mit

einem Verhältnis von ca. 80:20 vorzuliegen, wo hingegen in den Sommermonaten intakte Blockgletscher eine nahezu umgekehrt Verteilung aufweisen. Ca. 20% Grundwasser gegenüber ca. 80% Niederschlags- und Abschmelzwasser deuten auf eine andere Entwässerungsdynamik hin. Bei reliktschen Blockgletschern wird durch den Neubildungspuls im Zuge von Niederschlagsereignissen „altes“ gespeichertes Grundwasser aus dem System gedrückt, bei intakten sind es rasch infiltrierende Wässer die nach kurzer Zeit an der Quelle ankommen und vorwiegend die Schüttungszunahme bewirken. Hierbei muss, wie oben bereits erwähnt, berücksichtigt werden, dass sehr oft bei intakten Blockgletschern kleine Kargletscher im Einzugsgebiet vorliegen, deren Schmelzwässer durch den Blockgletscher fließen und entsprechend zum Gesamtabfluss an der Blockgletscherquelle wesentlich beitragen.

Mit Hilfe von natürlichen Tracern (stabile Isotope  $\delta D$  und  $\delta^{18}O$ , elektrische Leitfähigkeit) konnten an zwei aktiven Blockgletschern (Bergli und Ölgrube Süd; Nordtirol) die saisonal variierenden dominanten Abflusskomponenten erfasst und bereichsweise quantifiziert werden. Es konnte die Dominanz der Schneeschmelze im frühen Sommer (über 80%), der massive Einfluss der Schmelzwässer v.a. des oberhalb befindlichen Kargletschers im Sommer (ca. 40-60%) und der starke Anstieg des Grundwasseranteils im Spätherbst und während der Zeit des Basisabflusses (bis 100%) gezeigt werden (z.B. Daten des Bergli Blockgletschers in Abbildung 3). Des Weiteren ist zu beobachten, dass im Spätherbst bei und nach Regenereignissen der Anteil des Ereigniswassers bis ca. 50% ausmachen kann.



**Abbildung 3:** saisonale Schwankung der Isotopensignatur sowie der elektrischen Leitfähigkeit des Quellwassers des Blockgletschers Bergli. Basierend auf den Signaturen der Abflusskomponenten Regen, Schnee, Eis und Grundwasser. Kreise=Messwerte der Einzelmessungen, Rauten=Mittelwerte der Monate Mai bis Oktober.

### Einfluss auf die alpine Hydro(geo)logie

Erste quantitative Untersuchungen zum Einfluss von intakten Blockgletschern auf das alpine Abflussverhalten wurden von Geiger et al. (2014) publiziert. Sie zeigten an zwei Einzugsgebieten in den La Sal Mountains (Utah, USA), dass ein Einzugsgebiet mit intakten Blockgletschern im Vergleich zu einem vergleichbaren Einzugsgebiet ohne intakte Blockgletscher einen höheren Oberflächenabfluss und stärker

ausgeprägte Hochwasserspitzen aufweisen. Rogger et al., (2017) untersuchten in einem 5 km<sup>2</sup> großen Einzugsgebiet in den Öztaler Alpen (Tirol, Österreich) die Änderung des Abflussverhaltens nach den Wegfall von Permafrosteis in vier unterschiedlichen Schuttformen (Hangschutt, Blockgletscher, Moränenmaterial der „kleinen“ Eiszeit und älteres Moränenmaterial). Ihre Ergebnisse deuten auf eine Verringerung der Hochwasserspitzen und eine Zunahme der Schüttung während des Basisabflusses hin. Dies bestätigt im Wesentlichen die Ergebnisse von Geiger et al. (2014). Wagner et al. (2016) konnten erstmals auch den Einfluss von reliktschen Blockgletschern auf darunterliegende Flusssysteme in den Niederen Tauern (Steiermark, Österreich) basierend auf einem globalen Niederschlags-Abflussmodell quantifizieren. Die Ergebnisse zeigen, dass der Abflussanteil der Blockgletschereinzugsgebiete bei einer Modellierung auf Tagesbasis an den unterstromigen Pegelstationen von einem Drittel bis zu mehr als dem Vierfachen des Flächenanteils der übergeordneten Einzugsgebiete beträgt. Es zeigten sich saisonale Schwankungen der Abflussanteile, wobei die höchsten gegen Ende der Schneeschmelze und im Spätsommer auftraten. In jüngster Zeit wurden erste Niederschlag-Abflussmodellierungen des Einzugsgebietes der Blockgletscherquelle Ölgrube Süd simuliert. Basierend auf dem globalen Niederschlags-Abflussmodell in Wagner et al. (2016) und unter Berücksichtigung eines zusätzlichen „Eisspeichers“ zeigen erste Zwischenergebnisse, dass der Schmelzwasseranteil des Kargletschereises und des Permafrosteis gesamt ca. 40% beträgt. Dies bestätigt die Ergebnisse der Untersuchungen der natürlichen Tracer (EC und stabile Isotope). Jüngste Untersuchungen in den Kanadischen Rocky Mountains an einem inaktiven Blockgletscher (Helen Creek, National Park Banff), zeigen, dass gespeichertes Grundwasser aus dem Blockgletscher 50% des Gesamtabflusses des übergeordneten Einzugsgebiets im Sommer und 100% im Winter ausmachen (Harrington et al., 2018). Dies bestätigt die Ergebnisse der in den österreichischen Alpen durchgeführten bisherigen Untersuchungen.

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse der letzten Jahre, dass die Speicherwirkung von Blockgletschern (v.a. von reliktschen Blockgletschern) bedeutende Größenordnungen erreichen kann und somit das Abflussverhalten alpiner Einzugsgebiete beeinflusst. Vor allem während längerer Trockenzeiten können an Blockgletscherquellen in kristallinen Gebieten noch hohe Schüttungswerte gemessen werden, wohingegen andere Quellen bereits trocken gefallen sind. Beobachtungen im Zuge von Quellkartierungen und Geländearbeiten während und nach einer längeren Trockenperiode im Sommer 2018 im ganzen Alpenraum und im Speziellen bspw. in der Silvrettagruppe in Vorarlberg bestätigen, dass bei Blockgletscherquellen noch Schüttungswerte von mehreren Zehnerlitern pro Sekunde gemessen werden konnten, wo hingegen andere Quellen bereits trocken gefallen waren.

## **Schlussfolgerungen – Ausblick**

Die hier zusammen gefassten Ergebnisse zeigen, dass Blockgletscher sehr komplexe heterogen aufgebaute Grundwasserleiter sind und bedeutende Grundwasserspeicher in alpinen Einzugsgebieten darstellen können. Das Abflussverhalten reliktscher Blockgletscher hat wesentliche Auswirkungen auf die unterstromigen Gerinne, und der anteilige Abfluss kann weit über die rein flächenbezogenen Anteile der Blockgletscher im Einzugsgebiet hinaus gehen (vorübergehend bis über dem Vierfachen). Es ist auch davon auszugehen, dass sich das Abflussverhalten in alpinen Einzugsgebieten deutlich aufgrund des Permafrostrückgangs ändern wird, wobei erste Studien zeigen, dass die Speicher- bzw. Pufferfähigkeit der

Schuttmassen in alpinen Einzugsgebieten steigen und somit die Hochwasserspitzen niedriger werden können. Ihre wasserwirtschaftliche Bedeutung wird unter anderem daran ersichtlich, dass auch während Trockenzeiten aus diesen Schuttmassen Wasserressource zur Verfügung stehen, was auch für das sensible Ökosystem in alpinen Regionen von hoher Bedeutung ist. Die interne Struktur und der Aufbau von Blockgletschern (im Speziellen von intakten Blockgletschern) haben vor allem bei Fragestellungen in Bezug auf Stofftransport hohe Relevanz. Die Mobilisierung von Stoffen, die an Permafrosteis gebunden sind, hängt primär vom Abschmelzprozess des Eises ab. Das thermische Verhalten dieser Schuttmassen und der Abschmelzprozess innerhalb der Schuttmassen sind daher wichtige Grundlagen und sollen künftig auch verstärkt untersucht werden.

## Referenzen

Barsch, D. (1996): Rock Glaciers: Indicators for the Present and Former Geocology in High Mountain Environments. - Springer Series in Physical Environment 16, 331 S, Springer Verlag.

Burger, K.C., Degenhardt, J.J., Giardino, J.R. 1999. Engineering geomorphology of rock glaciers. - *Geomorphology* 31, 93-132.

Corte, A.E. 1976. Rock glaciers. - *Biuletyn Peryglacjalny* 26, 175-197.

Geiger, S.T., Daniels, J.M., Miller, S.N., Nicholas, J.W. 2014. Influence of rock glaciers on stream hydrology in the La Sal Mountains, Utah. - *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* 46(3), 645-658.

Harrington, J.S., Mozil, A., Hayashi, M., Bentley, L.R. (2018): Groundwater flow and storage processes in an inactive rock glacier. - *Hydrological Processes*. 2018;1–19. DOI: 10.1002/hyp.13248

Jones, D. B., Harrison, S., Anderson, K., Betts, R. A. (2018): Mountain rock glaciers contain globally significant water stores. - *Scientific Reports*, 8, 2834.

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., Spötl, C. (2007): Discharge from active rock glaciers, Austrian Alps: a stable isotope approach. - *Austrian Journal of Earth Sciences* 100, 102-112.

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-yearold permafrost core from the active rock glacier Lazaun, southern Ötztal Alps (South Tyrol, northern Italy). - *Quaternary Research*, 83(2), 324-335.

Rogger, M., Chirico, 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, 1288-1308. DOI: 10.1002/2016WR019341

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, doi: 10.17738/ajes.2016.0006.

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

Winkler G., Pauritsch M., Wagner T. & Kellerer-Pirklbauer, A. (2016b): Grundwasserspeicherung und Entwässerungsdynamik reliktscher Blockgletscher. - *Berichte der wasserwirtschaftlichen Planung Steiermark*, Bd. 87, S. 134, Graz.

Winkler, G., Wagner, T., Pleschberger, R., Krainer, K., Kellerer-Pirklbauer A., Ribis, M. (2018): 2. Zwischenbericht - Wasserwirtschaftliche Aspekte von Blockgletschern in Kristallingebieten der Ostalpen - Speicherverhalten, Abflusssdynamik und Hydrochemie mit Schwerpunkt Schwermetallbelastungen (RGHeavyMetal), unveröffentl. Bericht, S.65, Graz

Winkler, G., Wagner, T., Krainer, K., Ribis, M., Hergarten, S. (akzeptiert): Hydrogeology of Rock Glaciers - Storage Capacity and Drainage Dynamics - an Overview (Гидрогеология горных ледников - емкость и динамика дренажа – обзор). - In: Müller, L. & Sychev, V.S.: *Novel Methods and Results of Landscape Research in Europe, Central Asia and Siberia (НОВЫЕ МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ЛАНДШАФТОВ В ЕВРОПЕ, ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ И СИБИРИ)*, Vol.II Understanding and Monitoring in Soils and Water Bodies. Chapter II/7.1.