

Reliktische Blockgletscher – Grundwasserkörper in alpinen, kristallinen Einzugsgebieten

Relict Rock Glaciers – Aquifers in Alpine Crystalline Catchments

G. WINKLER¹⁾, A. KELLERER-PIRKLBAUER²⁾, M. PAURITSCH³⁾ & S. BIRK⁴⁾

Inhalt

	Seite
1. Einleitung.....	119
2. Arbeitsgebiet.....	121
3. Methoden.....	123
4. Ergebnisse und Diskussion.....	125
4.1. Wasserbilanz.....	126
4.2. Auslaufkoeffizienten.....	128
4.3. Traceranalysen.....	129
5. Schlussfolgerungen und Ausblick.....	132
Zusammenfassung.....	133
Literatur.....	133
Summary.....	136
Dank.....	136

1. Einleitung

Die Wasserversorgung der Steiermark erfolgt zu rund 35 % mit Quellwasser, wobei in alpinen Regionen der Quellwasseranteil deutlich höher liegt (T. HARUM et al., 2001, AMT DER STEIERMÄRKISCHEN LANDESREGIERUNG, 2002). Große Gebiete der Steiermark wie etwa der steirische Anteil der Niederen Tauern werden vorwiegend aus

¹⁾ VAss. Mag. Dr. Gerfried WINKLER, Institut für Erdwissenschaften, Karl-Franzens-Universität Graz, Heinrichstraße 26, A-8010 Graz, Österreich. E-Mail: gerfried.winkler@uni-graz.at

²⁾ MMag. Dr. Andreas KELLERER-PIRKLBAUER, Institut für Erdwissenschaften, Karl-Franzens-Universität Graz, Heinrichstraße 26, A-8010 Graz, Österreich. E-Mail: andreas.kellerer@uni-graz.at sowie Institut für Fernerkundung und Photogrammetrie, Technische Universität Graz, Steyregasse 30, A-8010 Graz, Österreich. E-Mail: andreas.kellerer@tugraz.at

³⁾ MSc. Marcus PAURITSCH, Institut für Erdwissenschaften, Karl-Franzens-Universität Graz, Heinrichstraße 26, A-8010 Graz, Österreich. E-Mail: marcus.pauritsch@uni-graz.at

⁴⁾ Prof. Dr. Steffen BIRK, Institut für Erdwissenschaften, Karl-Franzens-Universität Graz, Heinrichstraße 26, A-8010 Graz, Österreich. E-Mail: steffen.birk@uni-graz.at

kristallinen Gesteinen aufgebaut und sind durch Gletscher, Permafrost und Frostwechsel bedingte Prozesse im Quartär morphologisch wesentlich überprägt worden (z. B. H. NAGL, 1976). Frühere wasserwirtschaftliche Studien ergaben, dass in den steirischen Niederen Tauern über 450 vorwiegend reliktsche Blockgletscher und Blockgletscher verdächtige Formen vorliegen, an die oft Quellen mit hohen Schüttungsmengen und Grundwasserleiter mit guten Speicherkapazitäten gebunden sind (T. UNTERSWEIG & A. SCHWENDT, 1995, 1996). Vor allem im östlichen Teil der Niederen Tauern liegt ein an reliktsche Blockgletscher gebundenes hohes Potenzial an Wasserreserven vor. Durch die Speicherung von Niederschlagswasser sind sie auch für die Erhaltung des sensiblen Ökosystems in den Gebirgsregionen von großer Bedeutung. Die hydraulischen Eigenschaften reliktscher Blockgletscher sind bis dato weitgehend unbekannt, sind aber für eine nachhaltige Planung dieser Wasserressourcen, Vorhersagen, Auswirkungen und Verringerungen von Einflüssen aufgrund klimatischer Änderungen essentiell. In den letzten Jahren wurde mit Untersuchungen zum Speicherverhalten, der Entwässerungsdynamik und der Fließ- und Transportprozesse am Beispiel des reliktschen Blockgletschers Schöneben am Institut für Erdwissenschaften der Universität Graz begonnen (M. PAURITSCH, 2011, G. WINKLER et al., 2010). Seit 2011 laufen weiterführende Forschungsarbeiten im Zuge eines EFRE-Projektes (Europäischer Fond für Regionale Entwicklung). Der Forschungsansatz sowie erste Ergebnisse über die hydraulischen Eigenschaften reliktscher Blockgletscher und ihre Bedeutung werden in diesem Artikel erläutert.

Blockgletscher sind die markanten Leitformen des Gebirgspermafrostes und zeigen Permafrostbedingungen während ihrer Bildungs- und Aktivitätszeit an. Aktive Blockgletscher sind gefrorene Schutt- und Eismassen, welche sich langsam lavastromartig talwärts bewegen und dabei häufig wulstartige, durch Stauchung bedingte Formen an der Oberfläche bilden. Reliktsche Formen sind ähnlich wie die aktiven Formen an dieser markanten Fließstruktur erkennbar, zeigen jedoch einstige Permafrostbedingungen an, welche im Pleistozän z.T. auch in tieferen Lagen geherrscht haben (D. BARSCH, 1996).

Die hydrologische Bedeutung von intakten Blockgletschern als Wasserspeicher wurde unter anderen von G. F. AZOCAR & A. BRENNING (2010), A. BRENNING (2005), von A. E. CORTE (1976), K. KRÄINER & M. RIBIS (2009) und L. SCHROTT (1998) untersucht. Untersuchungen zum Abflussverhalten intakter Blockgletscher werden seit den 1980er Jahren intensiver durchgeführt (z. B. J. S. GARDNER & I. BAJEWSKI, 1987, S. A. HARRIS et al., 1994, P. G. JOHNSON, 1981). Die Erforschung der Entwässerungsdynamik von aktiven Blockgletschern in den österreichischen Alpen wurden von z. B. K. KRÄINER & W. MOSTLER (2002) und K. KRÄINER et al. (2007) vorangetrieben.

Die Forschungsergebnisse über reliktsche Blockgletscher beschränken sich im Wesentlichen auf den Kenntnisstand ihrer Verbreitung (z. B. S. HARRISON et al., 2008, A. E. PUTNAM & D. E. PUTNAM, 2009, G. K. LIEB et al., 2010) oder auf die Bedeutung als Indikatoren und „Marker“ für Auswirkungen abrupter Klimawechsel nach der letzten Eiszeit (P. D. HUGHES et al., 2003, Ø. PAASCHE et al., 2007, A. E. PUTNAM & D. E. PUTNAM, 2009). Über den Aufbau und ihre Genese liegen bis dato nur wenige Forschungsergebnisse vor (z. B. C. K. BALLANTYNE et al., 2009, T. UNTERSWEIG & H. PROSKE, 1996, R. ZURAWEK, 2002). Das hydrologische Verhalten, die Speicherefähigkeit und das Entwässerungsverhalten von reliktschen Blockgletschern sind bis dato weitgehend unbekannt. Eine erste grobe Beschreibung des Auslaufverhaltens von Quellen aus reliktschen Blockgletschern erfolgte von S. GÖDEL (1993) und T. UNTERSWEIG & A. SCHWENDT (1995, 1996) vorwiegend in den Seckauer Tauern (Fig. 1).

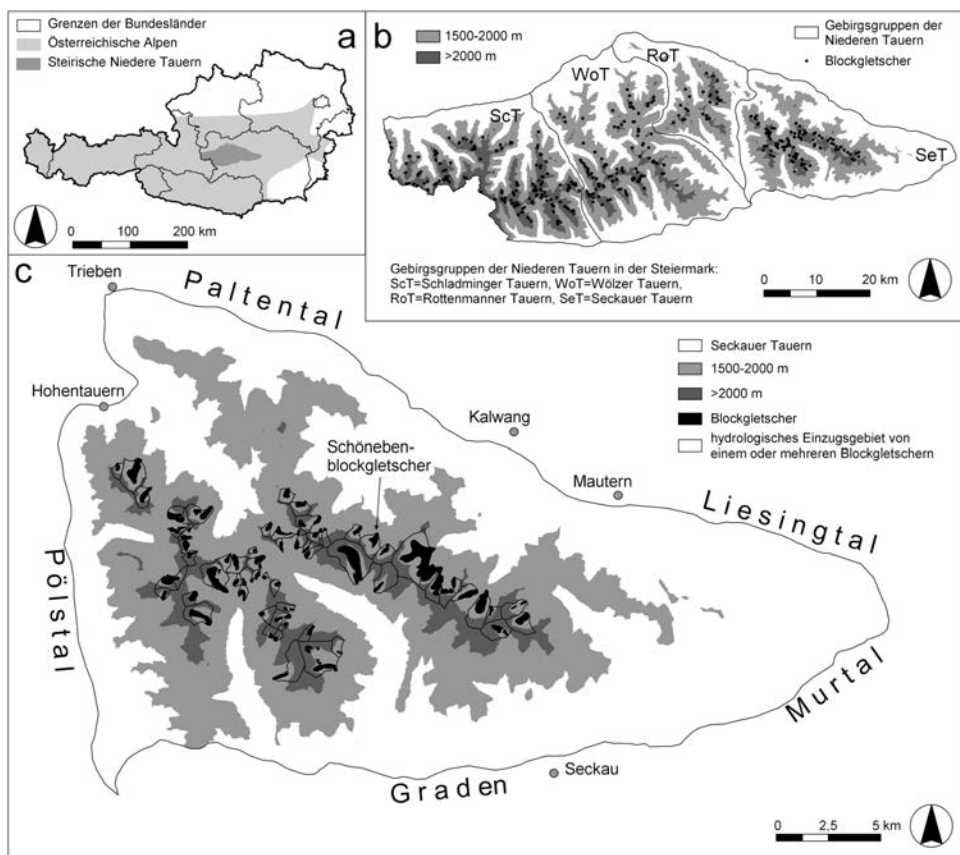


Fig. 1: Karten über die Lage der steirischen Niederen Tauern innerhalb von Österreich und der österreichischen Alpen (a), die einzelnen Gebirgsgruppen der steirischen Niederen Tauern, markante Höhenzonen sowie Verteilung von Blockgletschern, dargestellt als Punkte (b), sowie die Seckauer Tauern mit der Verbreitung der Blockgletscher als Polygone mit dazugehörigen hydrologischen Einzugsgebieten (c). Die Lage des Schönebenblockgletschers ist in (c) dargestellt. Verbreitung der Blockgletscher nach G. K. LIEB et al. (2010).

Maps of the Styrian part of the Niedere Tauern Range and the Austrian Alps (a), the different sub-units of the Niedere Tauern Range in Styria, relevant elevation zones and rock glacier distribution indicated as dots (b), and the Seckauer Tauern Range including the rock glacier distribution and their hydrological catchments (c). The location of the Schöneben rock glacier is shown in (c). Rock glacier distribution according to G. K. LIEB et al. (2010).

2. Arbeitsgebiet

Das regionale Arbeitsgebiet dieser Studie umfasst den steirischen Anteil der Niederen Tauern mit den zentralen und östlichen Schladminger Tauern sowie den Wölzer, Rottenmanner und Seckauer Tauern (Fig. 1a, b). Das Arbeitsgebiet erstreckt sich dabei über rund 2440 km² und lässt sich durch das Ennstal im N, das Palten-Liesingtal im E, das Murtal im S und das obere Murtal und die Landesgrenze zu Salzburg im W abgrenzen (Fig. 1). Nahezu die Hälfte der Gesamtfläche liegt über einer Seehöhe von 1500 m ü.A. und zumindest noch 10% überragen die 2000 m Höhengrenze (Tab. 1).

Tab. 1: Die Flächenverteilung der einzelnen Gebirgsgruppen der steirischen Niederen Tauern für die gesamte Fläche sowie die Areale über einer Höhe von 1500 m ü.A. bzw. 2000 m ü. A.
Area distribution of the different subunits of the Styrian part of the Niedere Tauern Range related for the total area and the areas above 1500 m a.s.l. and, respectively, 2000 m a. s. l.

Gebirgsgruppe	Fläche gesamt		Fläche > 1500 m ü.A.		Fläche > 2000 m ü.A.	
	[km ²]	[%]	[km ²]	[%]	[km ²]	[%]
Seckauer Tauern	626,3	25,7	261,2	41,7	40,2	6,4
Rottenmanner Tauern	324,1	13,3	136,5	42,1	16,4	5,1
Wölzer Tauern	826,2	33,8	425,3	51,5	61,6	7,5
Schladminger Tauern	664,9	27,2	426,0	64,1	155,3	23,4
Steirische Niedere Tauern	2441,5	100,0	1249,0	49,8	273,5	10,6

Entsprechend dem neuen Blockgletscherinventar von Zentral- und Ostösterreich (siehe G. K. LIEB et al., 2010) konnten für das Arbeitsgebiet in den steirischen Niederen Tauern 376 Blockgletschereinheiten erfasst werden (Fig. 1b). Lediglich acht dieser Blockgletschereinheiten sind gegenwärtig weitflächig von Permafrost beeinflusst und wurden folglich im Inventar als intakt ausgewiesen. Die 376 Blockgletschereinheiten bilden 307 monomorphe Blockgletscher (sensu R. FRAUENFELDER & A. KÄÄB, 2000) und die restlichen 69 Blockgletschereinheiten bilden 31 polymorphe Blockgletscher, wodurch in Summe 338 Blockgletscher im Inventar vorliegen.

Tabelle 2 listet verschiedene Flächenangaben mit Blockgletscherbezug auf. Beispielsweise befinden sich die meisten – jedoch im Mittel kleinsten – Blockgletschereinheiten in den Schladminger Tauern, wohingegen die mit Abstand größten Blockgletschereinheiten in den Seckauer Tauern kartiert wurden. In den Seckauer Tauern nehmen die Blockgletscher 4,3 % der Areale über 1500 m ü. A. ein, im Mittel sind es 2,3 %, über 2000 m ü. A. sind es im Mittel 2,7 %. Die mittlere Größe der Blockgletscher nimmt von W nach E zu (A. KELLERER-PIRKLBAUER et al., 2012 a, b). Geologisch werden die Niederen Tauern vorwiegend aus Gesteinen der kristallinen Basement-Einheiten und der Grauwackenzone im N und NE aufgebaut (z. B. H. W. FLÜGEL & F. NEUBAUER, 1984, S. M. SCHMID et al., 2004, R. SCHUSTER et al., 2004, N. FROITZHEIM et al., 2008, D. GASSER et al., 2009).

Die Untersuchungen der hydraulischen Eigenschaften werden beispielhaft am reliktschen Blockgletscher im Schönebenkar (Schönebenblockgletscher, in Folge SBG) in den zentralen Seckauer Tauern durchgeführt (Fig. 1, 2). Der reliktsche SBG ist etwa 1,2 km nordwestlich des Hochreichhartgipfels an der Nordostseite des Hauptkammes der Seckauer Tauern gelegen. Er befindet sich in einem Kar über der Schönebenalm in Nord- bis Nordostexposition, erstreckt sich von 1720 m ü. A. bis 1905 m ü. A. und ist ringsum von steilen Felswänden umgeben. Er kann als reliktsche Form eines „talus rock glacier“ angesprochen werden (Klassifikation nach D. BARSCH, 1996). Der Blockgletscher bedeckt mit einer Länge von 750 m und einer maximalen Breite von 200 m eine Fläche von 0,11 km² und entwässert hauptsächlich über eine an der Blockgletscherstirn entspringende Quelle. Das hydrologische Einzugsgebiet der Quelle umfasst eine Fläche von ca. 0,75 km². Das Einzugsgebiet wird geologisch aus granitoiden Gneisen des kristallinen Grundgebirges mit innerhalb weniger Meter wechselndem Biotit- und Kalifeldspatgehalt aufgebaut (T. UNTERSWEIG & A. SCHWENDT, 1995).

Die Quelle an der Stirn des reliktschen Blockgletschers wurde vom Hydrographischen Dienst Steiermark als Messstelle ausgebaut und ins hydrographische Messstellennetz als



Fig. 2: Schönebenblockgletscher, etwa 1,2 km nordwestlich des Hochreichhartgipfels an der Nordostseite des Hauptkammes der Seckauer Tauern. Blickrichtung W zum Geierhaupt (2417 m ü. A.), dem höchsten Berg der Seckauer Tauern. (Foto: A. KELLERER-PIRKLBAUER.)
 Schöneben rock glacier, approximately 1.2 km northwest of the summit of Hochreichhart, located to the NE of the main ridge of the Seckauer Tauern Range. View direction towards W to the Geierhaupt (2417 m a. s. l.). (Photograph: A. KELLERER-PIRKLBAUER.)

„Schönebenquelle“ (HZB-Nummer 396762) übernommen. Seit 2004 werden an der Messstelle zeitlich hoch aufgelöst kontinuierlich die Parameter Schüttung (l/s) und Wassertemperatur (°C) gemessen, seit 2008 werden zusätzlich die elektrische Leitfähigkeit und Wassertemperatur am Quellaustritt erfasst (G. WINKLER et al., 2010, M. PAURITSCH, 2011).

3. Methoden

In einem ersten Untersuchungsschritt wurden die hydrologischen Einzugsgebiete aller Blockgletscher der steirischen Niederen Tauern erfasst, um die Größenordnung der Gebirgsareale aufzuzeigen, deren Entwässerung durch Blockgletscherformen beeinflusst ist. Auf Basis des bestehenden polygonbasierten Blockgletscherinventars von G. K. LIEB et al. (2010) wurde für jeden der 307 monomorphen und 31 polymorphen Blockgletscher das hydrologische Einzugsgebiet oberhalb des Stirnbereichs definiert. Dies erfolgte im Programm ArcGIS10 unter Verwendung eines digitalen Geländemodells (räumliche Auflösung 10×10 m, BEV) sowie der amtlichen topografischen Karte Österreichs im Maßstab 1:50000. Jedes hydrologische Einzugsgebiet wurde mit einem Code versehen, wobei das Codierungssystem an jenes im Blockgletscherinventar angelehnt wurde. So erhielt beispielsweise das Einzugsgebiet des Blockgletschers „mu277“ die Codierung „ezg_mu277“. Teilweise befinden sich innerhalb eines hydrologischen Einzugsgebietes eines Blockgletschers

zwei oder mehrere Blockgletscher weiter taleinwärts, wobei in diesen Fällen nur das größere, übergeordnete hydrologische Einzugsgebiet abgegrenzt wurde. Die Entwässerungsdynamik und das Speicherverhalten eines Aquifers können über die Wasserbilanz, Hydrographanalysen, natürliche und/oder künstliche Tracer, hydrochemische oder isotopehydrologische Untersuchungsmethoden erfasst und quantifiziert werden. Durch die Kombination mehrerer Methoden können Unsicherheiten einzelner Untersuchungsmethoden minimiert werden. Die verwendeten Methoden werden im Folgenden kurz erläutert.

Eine Wasserbilanz über mehrere Jahre ermöglicht für ein klar abgrenzbares Einzugsgebiet die Ermittlung der zeitlichen Änderung des gespeicherten Wasservolumens Δs und eine Abschätzung seiner Größenordnung. Hierfür wird der Niederschlag N der Evapotranspiration ET und dem Abfluss A (ober- und unterirdischer) gegenübergestellt ($N = ET + A + \Delta s$). Die monatliche (potenzielle) Evapotranspiration wurde hierbei nach C. W. THORNTHWAIT (1948) ermittelt, und diese wurde aufgrund der hohen Niederschlagsmengen im Einzugsgebiet der tatsächlichen Evapotranspiration gleichgesetzt. Der Vergleich des über die Wasserbilanz theoretisch ermittelten Abflusses aus einem Einzugsgebiet mit dem tatsächlich gemessenen Abfluss ermöglicht Aussagen über das saisonale Verhalten des Speichers. Die meteorologischen Daten zur Erstellung einer Wasserbilanz wurden von der Klimastation „Hochreichhart“ des Hydrographischen Dienstes (HZB-Nummer 123274) am Fuße des Hochreichhartblockgletschers auf einer Höhe von 1500 m ü. A. im östlich benachbarten Hochreichhartkar übernommen. An dieser Klimastation werden Lufttemperatur und Niederschlag seit dem Jahr 2000 kontinuierlich gemessen.

Im Schönebenkar erfolgt die Entwässerung vorwiegend über die Blockgletscherquelle, d. h. auch der oberirdische Abfluss der umliegenden Karwände reicht das Grundwasser im Blockgletscher an und fließt über diesen an der Blockgletscherquelle ab. Erste Untersuchungen der Quellschüttung von Blockgletschern zeigten, dass sie der Entwässerungsdynamik von Karstquellen ähneln (S. GÖDEL, 1993). Daher wurden Hydrographanalysen mit analytischen Lösungen angewendet, die für komplexe Entwässerungssysteme wie Karstaquifere entwickelt wurden. Die Hydrographanalysen wurden als erste Annäherung unter der Annahme eines exponentiellen Leerlaufens (Gleichung 1 und 2) des Grundwasserspeichers basierend auf E. MAILLET (1905) durchgeführt.

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

$$\alpha = \frac{\ln(Q_0/Q_t)}{t} \quad (2)$$

wobei

$Q_{(t)}$ der Quellschüttung zum Zeitpunkt $t > 0$,
 $Q_{(0)}$ der Quellschüttung zum Zeitpunkt $t = 0$,
 α dem Auslaufkoeffizienten [Tag^{-1}]

entspricht. Mögliche Abweichungen vom exponentiellen Leerlaufen in der Frühphase der Hydrographen nach einem Niederschlagsereignis können mit Lösungsansätzen unter Berücksichtigung von Mehrfachspeichern, d. h. Überlappung von mehreren Exponentialfunktionen (z. B. T. C. ATKINSON, 1977, A. PADILLA et al., 1994, S. J. BAEDKE & N. C. KROTHER, 2001, T. GEYER et al., 2008), oder mit dem Ansatz eines Potenzgesetzes (z. B. S. BIRK & S. HERGARTEN, 2010) untersucht werden.

Die physiko-chemischen Parameter (z. B. Wassertemperatur und/oder elektrische Leitfähigkeit) wurden als natürliche Tracer verwendet, um das Speicherverhalten des Aquifers zu untersuchen. Im konkreten Fall kann die elektrische Leitfähigkeit als konservativer

und die Wassertemperatur als reaktiver Tracer angesehen werden. Hierbei wird die zeitliche Differenz zwischen der maximalen hydraulischen Anregung (höchste Grundwasserneubildungsrate) eines Niederschlagsereignisses und dem Durchgang des Niederschlagswassers, welcher sich durch die maximale Abweichung der physiko-chemischen Parameter ausdrückt, untersucht (z. B. M. SAUTER, 1992, S. BIRK et al., 2004).

Der Einsatz von künstlichen Tracern stellte eine wichtige Ergänzung dar, um über definierte punktuelle Einbringung das Fließ- und das Speicherverhalten des Aquifers zu bestimmen (z. B. C. LEIBUNDGUT et al., 2009). Bei den gegenständlichen Untersuchungen wurde der Tracer Uranin im oberen Bereich des Blockgletschers (Wurzelzone), ca. 600 m oberhalb der Quelle, eingespeist. Ein zweiter Injektionspunkt, bei dem Naphthionat als Tracer gewählt wurde, befand sich ca. 200 m oberhalb des Quellaustrittes (Fig. 2). Dabei wurde jeweils 1 kg der Tracer in ca. 100 l Wasser gelöst und mit ca. 200 l Wasser nachgespült, was zusätzlich durch leichte Regenschauer in den folgenden Tagen unterstützt wurde. Die Probenahme erstreckte sich über einen Zeitraum von ca. 7 Monaten und wurde schrittweise von einem Zeitintervall anfangs von wenigen Stunden auf bis ca. 2 Monate erweitert, um den Durchgang des Tracers an der Blockgletscherquelle zu erfassen. In der Anfangsphase wurden Wasserproben genommen, und anschließend erfolgte die Probenahme mittels Aktivkohlesäckchen über längere Zeiträume.

4. Ergebnisse und Diskussion

Die Ergebnisse der Regionalstudie zeigen, dass die 376 Blockgletschereinheiten 295 hydrologischen Einzugsgebieten zugewiesen werden können. In den Seckauer Tauern sind

Tab. 2: Die Anzahl und Flächen der 376 Blockgletschereinheiten (basierend auf G. K. LIEB et al., 2010) und der 295 hydrologischen Einzugsgebiete (A. KELLERER-PIRKLBAUER et al., 2012b) mit einem oder mehreren Blockgletschern im Einzugsgebiet der Gebirgsgruppen der steirischen Niederen Tauern, absolut und bezogen auf die Gebirgsflächen über 1500 m ü. A. und 2000 m ü. A. Number and areas of the 376 rock glacier units (based on G. K. LIEB et al., 2010) and of the 295 catchments (A. KELLERER-PIRKLBAUER et al., 2012b) including one or more rock glaciers in the catchment of the different subunits of the Styrian part of the Niedere Tauern Range, absolute and related to the elevation areas above 1500 m a. s. l. and 2000 m a. s. l.

Gebirgsgruppe	Anzahl [n]	Gesamtfläche [km ²]	Anteil an Flächen > 1500 m ü. A. [%]	Anteil an Flächen > 2000 m ü. A. [%]
Blockgletschereinheiten				
Seckauer Tauern	93	11,4	4,3	1,4
Rottenmanner Tauern	25	1,8	1,3	0,9
Wölzer Tauern	104	7,0	1,6	2,6
Schladminger Tauern	154	8,4	2,0	3,3
Steirische Niedere Tauern	376	28,6	2,3	2,7
Hydrologische Einzugsgebiete der Blockgletscher				
Seckauer Tauern	68	40,7	15,6	42,0
Rottenmanner Tauern	22	8,6	6,3	27,3
Wölzer Tauern	86	24,0	5,7	20,4
Schladminger Tauern	119	34,6	8,1	18,1
Steirische Niedere Tauern	295	108,0	8,6	22,7

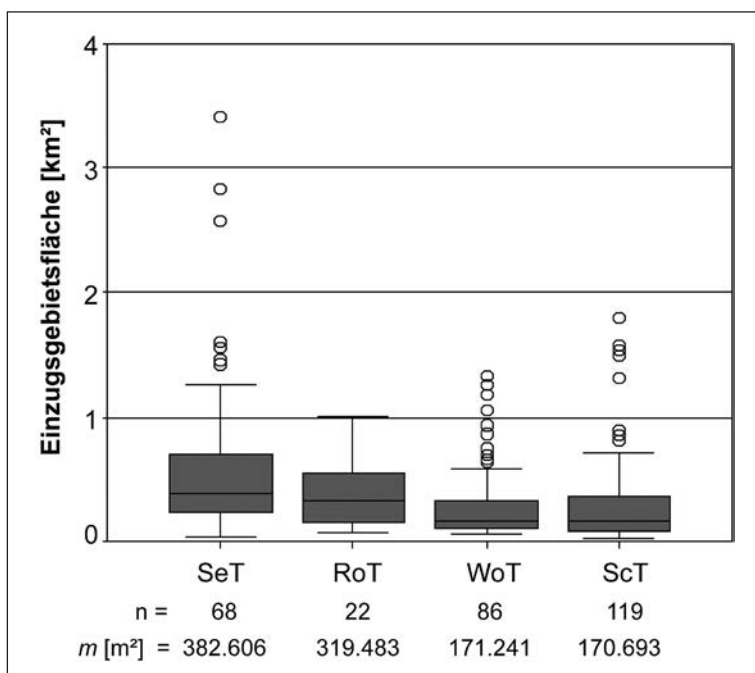


Fig. 3: Boxplot zur Flächenverteilung der hydrologischen Einzugsgebiete mit Blockgletschern in den einzelnen Gebirgsgruppen der steirischen Niederen Tauern. SeT – Seckauer Tauern, RoT – Rottenmanner Tauern, WoT – Wölzer Tauern, ScT – Schladminger Tauern; o – statistische Ausreißer, n – Anzahl der Einzugsgebiete, m – Median der Einzugsgebietsfläche.

Box plot of the surface distribution of the catchments with rock glaciers for the subunits of the Styrian part of the Niedere Tauern Range. SeT – Seckauer Tauern Range, RoT – Rottenmanner Tauern Range, WoT – Wölzer Tauern Range, ScT – Schladminger Tauern Range; o – outliers, n – number of catchments, m – median of the catchment areas.

ca. 16% der Fläche über der Höhenzone von 1500 m ü.A. und über 40% der Fläche über der Höhenzone von 2000 m ü.A. hydrologischen Blockgletschereinzugsgebieten zuzuordnen (Fig. 1c, Tab. 2). Der Mittelwert für die gesamten steirischen Niederen Tauern beträgt ca. 9% über der Höhenzone von 1500 m ü.A. und ca. 23% über der Höhenzone von 2000 m ü.A. Für diese Flächen erfolgt die Entwässerung über Blockgletscher als „Zwischenspeicher“. In absoluten Zahlen stechen wiederum die Seckauer Tauern hervor; in dieser Gebirgsgruppe existieren 68 Blockgletschereinzugsgebiete, welche nahezu 41 km² entwässern. In den Schladminger Tauern wurden 119 Blockgletschereinzugsgebiete abgegrenzt, die jedoch tendenziell kleiner sind als jene in den Seckauer Tauern (Median nur 45% von jenem der Seckauer Tauern), jedoch durch ihre große Zahl noch rund 35 km² entwässern (Fig. 3). Fasst man die vier relevanten Gebirgsgruppen zusammen, so sind über 100 km² der steirischen Niederen Tauern in ihrem Abflussverhalten von Blockgletschern beeinflusst.

4.1. Wasserbilanz

Die jährlichen Wasserbilanzen und daraus berechneten theoretischen Abflussmengen ergeben für den Zeitraum 2003 bis 2010 (Datenlücken von 2005 bis 2007) ein

Abflussdefizit (Q_{gem} minus Q_{theor}) von durchschnittlich ca. 180 mm/Jahr (Tab. 3). Dies entspricht ca. 15% des gemessenen Abflusses oder einer durchschnittlichen Schüttung von 4,2 l/s. Daraus lässt sich ableiten, dass ca. 85% der Entwässerung des Schönebenkaras über die Schönebenquelle erfolgen.

Tab. 3: Die Wasserbilanzparameter des Schönebenblockgletscher-Einzugsgebietes für die hydrologischen Jahre von 2003 bis 2010 (Datenlücke zwischen 2005 und 2007).

Water balance parameters of the Schöneben rock glacier catchment for the hydrological years from 2003 to 2010 (data gap between 2005 and 2007).

Hydrologisches Jahr	Niederschlag [mm]	Evapotranspiration [mm]	Abfluss [mm]		Abflussdifferenz	
			berechnet	gemessen	[mm]	[%]
2002/2003	1397	397	1000	895	105	12
2003/2004	1692	373	1319	1110	209	19
2004/2005	1711	389	1323	1042	281	27
2007/2008	1592	396	1197	1136	60	5
2008/2009	2151	407	1744	1518	226	15
2009/2010	1702	315	1387	1165	222	19

In den Monaten Oktober bis April kommt es zu Defiziten von durchschnittlich 38 bis 93 mm/Monat, da in dieser Zeit der Großteil des gemessenen Niederschlages in fester Form fällt und in der Schneedecke gespeichert wird (Fig. 4). In den Monaten Mai und Juni kommt es aufgrund der Schneeschmelze zu einer erheblichen Grundwasserneubildung, wodurch es zu einem deutlichen Überschuss von durchschnittlich 123 mm des tatsächlichen gegenüber dem theoretisch aus der Wasserbilanz errechneten Abflusses kommt (Fig. 4). Die Monate Juli bis September zeigen einen Überschuss von bis zu ca. 40 mm/Monat.

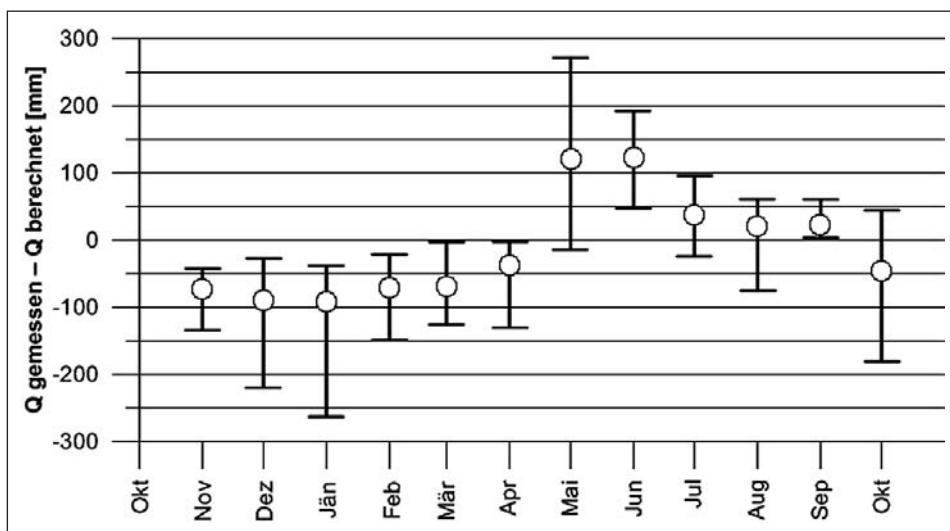


Fig. 4: Verteilung (Minimum und Maximum) der monatlichen Differenzen des gemessenen und berechneten Abflusses (Q) und die Mittelwerte (Kreise) für die Wasserbilanzjahre von 2003 bis 2011.

Range (minimum and maximum) of the monthly differences between measured and calculated discharge (Q) and the means (circles) of the water balances from 2003 to 2011.

Die für die Wasserbilanz verwendeten Daten stammen von der Wetterstation im benachbarten Hochreichhartkar, welche in einer Höhe von ca. 1500 m ü. A. installiert ist. Die Lufttemperatur und die Niederschlagsmengen wurden mittels Höhengradienten auf die mittlere Seehöhe des Einzugsgebietes (1987 m ü. A.) des SBG korrigiert (W. TAUCHER, 2010). Hieraus ergeben sich Unsicherheiten für diese Eingangsparameter, wodurch die Ergebnisse der Wasserbilanz eher als Größenordnungen zu sehen sind und für detaillierte Aussagen nur eingeschränkt verwendet werden können. Im November 2011 wurde eine Klimastation direkt am SBG installiert, welche Niederschlag, Lufttemperatur und -feuchte, Globalstrahlung und Strahlungsbilanz sowie Windgeschwindigkeit erfasst. Somit können in Zukunft die Wasserbilanzparameter wesentlich umfassender und genauer berechnet werden.

4.2. Auslaufkoeffizienten

Die Schüttungszahl (Q_{\min}/Q_{\max}) der hydrologischen Jahre 2006 bis 2011 zeigen Werte bis zu 0,01. Nach Grundwasserneubildungsereignissen (Schneesmelze oder Niederschlagsereignissen) zeigt sich in Abhängigkeit von den Neubildungspulsen bereits nach

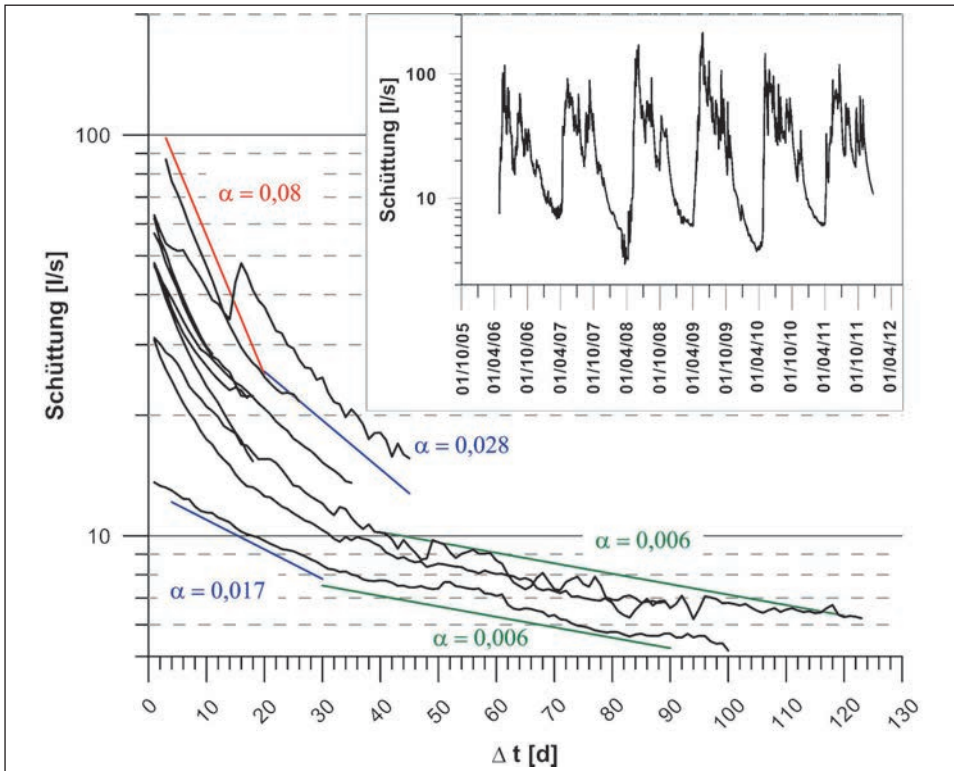


Fig. 5: Schüttungsganglinie und ausgewählte Auslaufkurven der Schönebenquelle; unterschiedliche Auslaufkoeffizienten α [Tag⁻¹] (E. MAILLET, 1905) in Abhängigkeit der Schüttung. Δt [d] – Zeitdauer in Tagen beginnend mit Q_0 zum Zeitpunkt $t=0$.

Hydrograph and selected run off curves of the Schöneben spring. Differing recession coefficients α [day⁻¹] (E. MAILLET, 1905) depending on the discharge. Δt [d] – elapsed time in days starting at Q_0 at time $t=0$.

wenigen Stunden bis maximal einigen wenigen Tagen ein exponentielles Auslaufverhalten. Anhand der Hydrographenanalysen können im Wesentlichen drei unterschiedliche Auslaufkoeffizienten festgestellt werden (Fig. 5). Der Auslaufkoeffizient bei Schüttungen über ca. 30 l/s liegt bei etwa $\alpha = 0,08 \text{ Tag}^{-1}$, nach ca. 10 Tagen zeigt sich eine deutliche Verflachung des Auslaufkoeffizienten auf etwa $\alpha = 0,02 \text{ Tag}^{-1}$. Dieses Auslaufverhalten ergibt sich bei Schüttungswerten zwischen ca. 30 l/s und ca. 10 l/s. Der Basisabfluss (Schüttungswerte unter ca. 10 l/s) zeigt sich nach rund 30–40 Tagen mit einem Auslaufkoeffizienten von $\alpha = 0,006 \text{ Tag}^{-1}$ und ist ausschließlich in den Wintermonaten zu beobachten, wo über längere Zeiträume keine Grundwasserneubildung erfolgt. Diese Entwässerungsdynamik ähnelt der Quellschüttungsdynamik von Karstquellen und kann als Superposition mehrerer linearer Speicher mit unterschiedlichen hydraulischen Eigenschaften interpretiert werden (z. B. M. SAUTER, 1992).

4.3. Traceranalysen

Die absoluten saisonalen Schwankungsbreiten der elektrischen Leitfähigkeit und Wassertemperatur betragen 35–61 $\mu\text{S}/\text{cm}$ bzw. 1,7–2,4 °C. Nach Niederschlagsereignissen im Sommer reagieren sowohl die elektrische Leitfähigkeit als auch die Wassertemperatur auf die Zunahme der Abflussmenge fast zeitgleich mit einem raschen Abfall ihrer Werte. Beide Parameter zeigen bereits 3–4 Stunden nach dem ersten Anstieg der Schüttung und 1–2 Stunden vor der maximalen Grundwasserneubildung eine Reaktion (Fig. 6). Die Differenzen können dabei bis zu 25 $\mu\text{S}/\text{cm}$ und 0,07 °C betragen, was einer relativen Änderung der beiden Parameter um 40 bzw. 3% zu den Ausgangswerten entspricht. Die Zeitverzögerung der maximalen Änderung (Extremwert der Durchgangskurven) beider natürlicher Tracer zur maximalen Grundwasserneubildung beträgt ca. 2 Stunden. Der rasche Durchbruch der Tracer zeigt, dass ein Großteil des Neubildungswassers innerhalb dieser Zeit wieder aus dem System rinnt. Während sich die elektrische Leitfähigkeit erst nach mehreren Tagen erholt, erfolgt dies bei der Wassertemperatur deutlich schneller, sodass bereits nach 12 Stunden wieder die ursprüngliche Temperatur erreicht wird. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass die Wassertemperatur als reaktiver Tracer neben der Vermischung mit länger gespeichertem Wasser auch thermisch mit dem Untergrund in Wechselwirkung steht und sich somit schneller an die Ausgangstemperatur angleichen kann.

Beim Tracerversuch Mitte Juni 2009 wurden zwei fluoreszierende Farbstoffe als Tracer an zwei unterschiedlichen Injektionspunkten in den Untergrund injiziert (Fig. 2). Die Ergebnisse zeigen erst ab August den Beginn des Tracerdurchgangs von Uranin und erst zwischen dem 3. September und 2. Oktober, also 3–4 Monate nach der Eingabe, den maximalen Durchgang (Fig. 7). Der Tracer Naphthionat konnte über den gesamten Beobachtungszeitraum nicht nachgewiesen werden. Die Ursache hierfür könnte die mächtige ungesättigte Zone beim Einspeisungspunkt sein, sodass der Tracer die gesättigte Zone gar nicht oder nur stark verzögert und verdünnt erreichte. Dadurch lag möglicherweise die Tracermenge in den Wasserproben unter der Nachweisgrenze und konnte nicht detektiert werden.

Vergleicht man die Ergebnisse des Tracers Uranin mit den Auslaufkoeffizienten des Basisabflusses, so können zeitliche Parallelen festgestellt werden. Die reziproken Werte der Auslaufkoeffizienten passen hierbei mit 60–100 Tagen recht gut mit den Maximalkonzentrationen der künstlichen Tracer mit ca. 80–110 Tagen nach der Einspeisung zusammen.

Der Farbstoff Uranin konnte auch im ca. 600 m nordwestlich der Schönebenquelle gelegenen Postlleitenbach (Lokalität der Messstelle siehe Fig. 2) in sehr geringen Mengen nachgewiesen werden. Dies zeigt, dass der SBG nicht zur Gänze über die Schönebenquelle entwässert. Der Tracer erreichte die Messstelle des Postlleitenbaches etwa zur selben Zeit

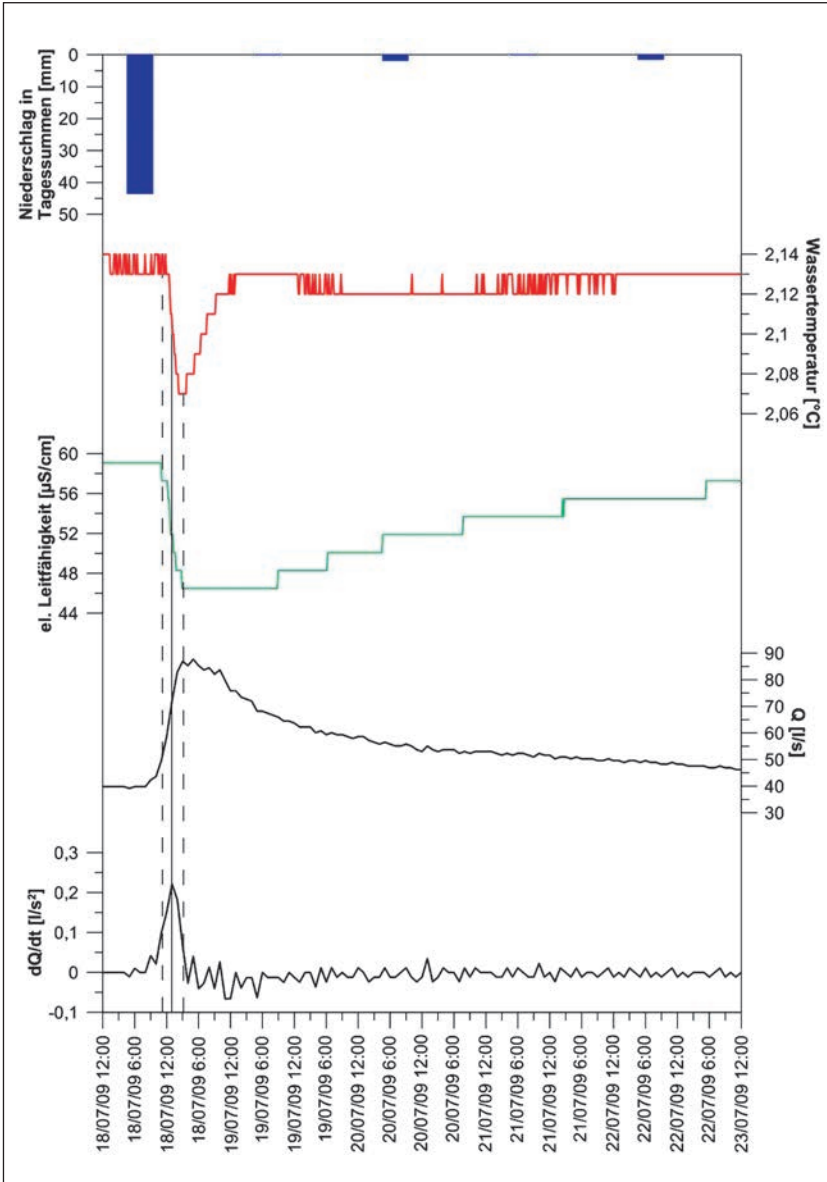


Fig. 6: Gangliniendarstellung eines Einzelereignisses für die elektrische Leitfähigkeit und Wassertemperatur, die Quellschüttung sowie die erste Ableitung der Schüttungsänderung dQ für die Zeitschritte dt .
Time series of a single event of the electric conductivity, the water temperature, the discharge and the first derivative of the discharge change dQ for the time steps dt .

wie die Schönebenquelle. Aufgrund fehlender weiterer Proben konnte keine Tracerdurchbruchskurve erstellt werden. Der qualitative Nachweis am Postlleitenbach bestätigt die Ergebnisse der Wasserbilanz, dass das Schönebenkar nicht zu 100 % von der Schönebenquelle entwässert wird und ein geringer Prozentsatz über den Postlleitenbach abfließt.

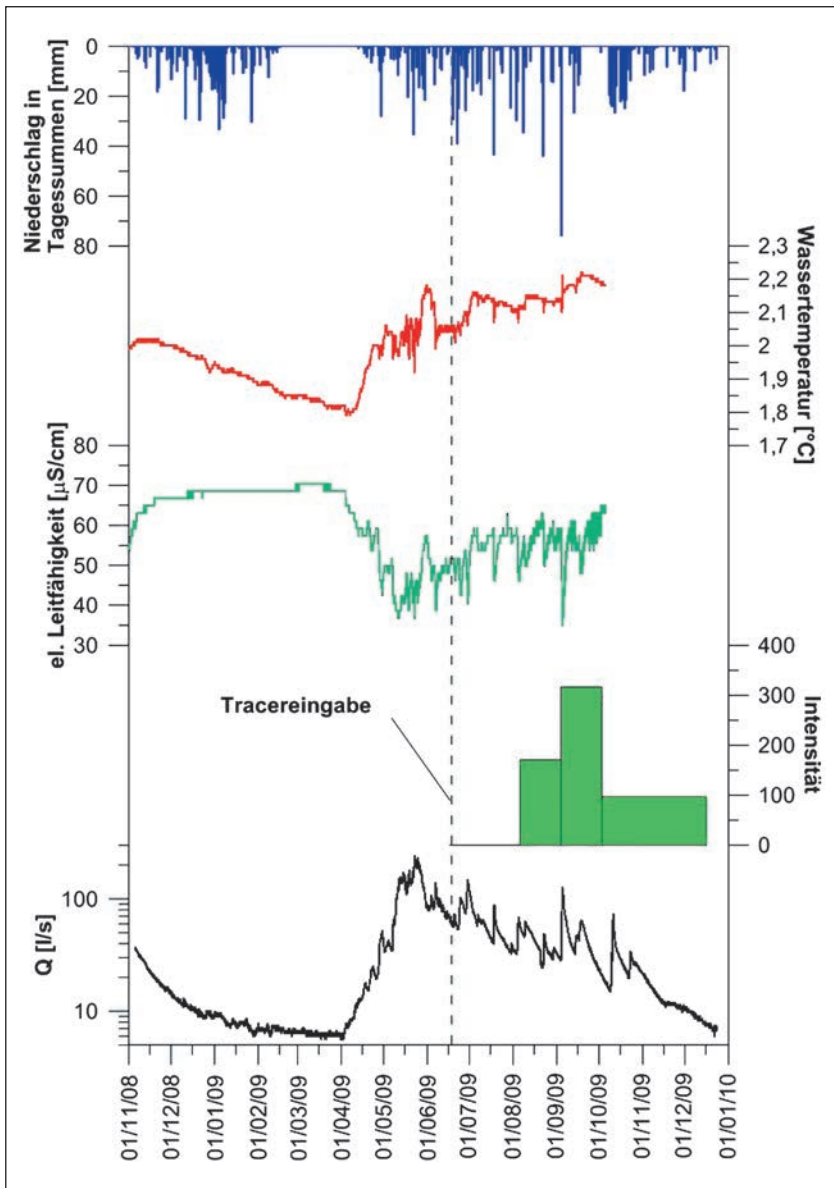


Fig. 7: Durchgangskurve des Tracers Uranin im Vergleich zu den Ganglinien der Quellschüttung, der elektrischen Leitfähigkeit, der Wassertemperatur sowie des Niederschlags.
Break through curve of the tracer fluorescein compared to the time series of the discharge, the electric conductivity, the water temperature and the precipitation rate.

5. Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Untersuchungen zur regionalen, flächenanteiligen Verteilung der periglazialen Landschaftsformen sowie ihrer zuordenbaren hydrologischen Einzugsgebiete ergaben, dass ca. 9 % der Hochgebirgsflächen über 1500 m ü. A. und 23 % über 2000 m ü. A. der steirischen Niederen Tauern über reliktsche Blockgletscher als temporäre Grundwasserspeicher entwässern. Bezogen auf die einzelnen Gebirgsgruppen ergaben sich Werte bis ca. 16 % über 1500 m ü. A. und über 40 % über 2000 m ü. A., die höchsten Werte werden hierbei in den Seckauer Tauern erreicht. Diese hohen Prozentsätze unterstreichen die große Bedeutung der Blockgletscher für die Entwässerungsdynamik im kristallinen Hochgebirge.

Die Ergebnisse der Hydrographanalyse an der Schönebenquelle weisen auf eine mögliche Superposition von mehreren linearen Speichern mit unterschiedlichen hydraulischen Eigenschaften innerhalb des SBG hin. Die Auslaufkoeffizienten des Basisabflusses und der raschen Durchflusskomponente streuen über eine Größenordnung von einer Zehnerpotenz, was dem Entwässerungsverhalten von Karstquellen entspricht. Die Verweildauer des Basisabflusses als Kehrwert des Auslaufkoeffizienten entspricht mit ca. 3–4 Monaten den Tracerversuchsergebnissen. Die rasche Entwässerungskomponente könnte aus Aquiferbereichen stammen, die einen sehr geringen Anteil an feinkörnigem Material beinhalten, wohingegen der Hauptteil des Blockgletschers aufgrund des höheren Feinkornanteils ein höheres Retentionsvermögen aufweist. Korngrößenuntersuchungen des Blockgletschermaterials im Zuge der Quellfassung an der Stirn des Hochreichhartblockgletschers ergaben, dass im Quellbereich der feinkörnige Anteil ausgeschwemmt worden war (T. UNTERSWEIG & H. PROSKE, 1996). Es kann vermutet werden, dass somit ausgeschwemmte Bereiche auch weiter in den Blockgletscher reichen und gut durchlässige „Kanäle“ bilden, die eine rasche Entwässerung ermöglichen. Zusammengefasst entspricht dies einem konzeptionellen Aufbau eines Zweispeichersystems, wobei der Hauptspeicher eine geringe Durchlässigkeit und ein hohes Speichervermögen und der deutlich kleinere Speicher eine hohe hydraulische Durchlässigkeit, aber ein geringes Speichervolumen aufweisen.

Aufgrund fehlender zeitlich hoch aufgelöster Klimadaten im Einzugsgebiet konnte die konzeptionelle Vorstellung, dass das Entwässerungsverhalten auf verschieden lange Niederschlagspulse (S. BIRK & S. HERGARTEN, 2010) zurückgeführt werden kann, noch nicht detailliert untersucht werden. Seit Herbst 2011 kann auf Daten einer neu eingerichteten Klimastation am Blockgletscher zurückgegriffen werden, um neben einer detaillierten Wasserbilanz auch die Intensität und Dauer der Niederschlagspulse zu erfassen. Somit kann zukünftig die rasche hydraulische Reaktion der Blockgletscherquelle auf Niederschlagspulse zeitlich hoch aufgelöst untersucht werden.

Die ergänzend zu den Hydrographanalysen durchgeführten physiko-chemischen Parameterstudien untermauern vorerst die konzeptionelle Vorstellung eines Zweispeichersystems. Vor allem der rasche Durchgang der elektrischen Leitfähigkeitsänderung zeigt die schnelle Reaktion auf Niederschlagsereignisse. Die Ganglinie der Wassertemperatur unterstützt im Wesentlichen diese Beobachtungen, wobei berücksichtigt werden muss, dass die Wassertemperatur sich wie ein reaktiver Tracer verhält. Bemerkenswerterweise zeigt sich in der ersten Phase einer hydraulischen Anregung eine Abnahme der Wassertemperatur. Dies ist vor allem im Sommer bemerkenswert, da aufgrund der warmen Niederschlagstemperaturen im Vergleich zu den Wassertemperaturen ein „positiver“ Wärmepuls zu erwarten wäre. Eine mögliche Erklärung könnten Reste von Permafrost-

linsen im Blockgletscher sein, wobei nähere Untersuchungen derzeit laufen. Sporadisches bis inselhaftes Auftreten von Permafrost ist aus Untersuchungen im benachbarten Hochreichhartkar sowie am Hochreichhart bekannt (A. KELLERER-PIRKLBAUER, 2011). Im Zuge des derzeit laufenden EFRE-Projektes wird auch versucht, mittels zeitlich hoch aufgelöster Probenahme bei Niederschlagsereignissen die Abflusskomponenten anhand isotopenhydrologischer und hydrochemischer Informationen näher zu beschreiben und zu differenzieren. Eine genauere Beschreibung und ein besseres Verständnis der Abflusskomponenten, vor allem der rasch durchfließenden Komponente, ermöglichen ein besseres Prozessverständnis des Grundwasserspeichers reliktscher Blockgletscher. Dadurch ergeben sich auch wichtige Informationen über den Aufbau und letztendlich über die Genese reliktscher Blockgletscher.

Zusammenfassung

Große Gebiete der Steiermark werden aus kristallinen Gesteinen aufgebaut und sind durch Gletscher, Permafrost und Frostwechsel bedingte Prozesse im Quartär morphologisch wesentlich überprägt worden. Untersuchungen in den steirischen Niederen Tauern (2440 km²) zur flächigen Verteilung von vorwiegend reliktschen Blockgletschern sowie ihrer zuordenbaren hydrologischen Einzugsgebiete ergaben, dass ca. 9 % der Hochgebirgsflächen über 1500 m ü. A. und 23 % über 2000 m ü. A. über reliktsche Blockgletscher als Grundwasserspeicher entwässern. Auswertungen in den Seckauer Tauern ergaben sogar Werte bis ca. 16 % über 1500 m ü. A. und über 40 % über 2000 m ü. A. Diese hohen Prozentsätze unterstreichen die große Bedeutung der Blockgletscher für die Entwässerungsdynamik und in weiterer Folge für die Wasserwirtschaft und Ökologie im kristallinen Hochgebirge. Die hydraulischen Eigenschaften von reliktschen Blockgletschern wurden und werden zurzeit am Beispiel Schönebenblockgletscher und der an dessen Stirn austretenden Schönebenquelle untersucht. Die Quelle zeigt eine rasche Reaktion auf einen hydraulischen Puls innerhalb weniger Stunden, der Basisabfluss zeigt aber Verweilzeiten von 3–4 Monaten. Mit Hilfe von Hydrographanalysen und der Auswertung natürlicher und künstlicher Tracerdurchgänge konnte ein konzeptionelles Entwässerungsmodell eines Zweispeichersystems mit daraus resultierenden drei unterschiedlichen Auslaufkoeffizienten erarbeitet werden. Berechnungen über die Wasserbilanzen von 2003 bis 2010 bestätigen im Wesentlichen die Größenordnung des temporären Speicherverhaltens. Analysen der Wassertemperaturganglinien weisen auf mögliche Reste von Permafrostlinsen hin, was aber mit isotopenhydrologischen und hydrochemischen Methoden zukünftig noch untersucht wird.

Literatur

- AMT DER STEIERMÄRKISCHEN LANDESREGIERUNG (Hrsg., 2002): Wasserversorgungsplan Steiermark. Kurzfassung.– Berichte der wasserwirtschaftlichen Planung, **83**, 231 S., Amt d. Steiermärk. Landesregierung, Fachabt. 19A, Wasserwirtschaftl. Planung u. Hydrographie, Graz.
- ATKINSON, T. C. (1977): Diffuse flow and conduit flow in limestone terrain in the Mendip Hills, Somerset (Great Britain).– *Journal of Hydrology*, **35** (1-2), 93–110.
- AZÓCAR, G. F. & A. BRENNING (2010): Hydrological and geomorphological significance of rock glaciers in the dry Andes, Chile.– *Permafrost and Periglacial Processes*, **21** (1), 42–53.

- BAEDKE, S. J. & N. C. KROTHER (2001): Derivation of effective hydraulic parameters of a karst aquifer from discharge hydrograph analysis.– *Water Resources Research*, **37** (1), 13–19.
- BALLANTYNE, C. K., C. SCHNABEL & S. XU (2009): Exposure dating and reinterpretation of coarse debris accumulations ('rock glaciers') in the Cairngorm Mountains, Scotland.– *Journal of Quaternary Science*, **24**, 19–31.
- BARSCHE, D. (1996): *Rock Glaciers: Indicators for the Present and Former Geocology in High Mountain Environments*.– Springer Series in Physical Environment, **16**, 331 S., Berlin (Springer).
- BIRK, S. & S. HERGARTEN (2010): Early recession behaviour of spring hydrographs.– *Journal of Hydrology*, **387** (1-2), 24–32, doi:10.1016/j.jhydrol.2010.03.026.
- BIRK, S., R. LIEDL & M. SAUTER (2004): Identification of localised recharge and conduit flow by combined analysis of hydraulic and physico-chemical spring responses (Urenbrunnen, SW-Germany).– *Journal of Hydrology*, **286** (1-4), 179–193.
- BRENNING, A. (2005): Geomorphological, hydrological and climatic significance of rock glaciers in the Andes of Central Chile.– *Permafrost and Periglacial Processes*, **16**, 231–240.
- CORTE, A. E. (1976): Rock glaciers.– *Biul. Peryglacjalny*, **26**, 175–197.
- FRAUENFELDER, R. & A. KÄÄB (2000): Towards a palaeoclimatic model of rock-glacier formation in the Swiss Alps.– *Annals of Glaciology*, **31**, 281–286.
- FROITZHEIM, N., D. PLASIENKA & R. SCHUSTER (2008): Alpine tectonics of the Alps and Western Carpathians.– In: McCANN, T. (Ed., 2008): *The Geology of Central Europe. Volume 2: Mesozoic and Cenozoic*.– 1141–1232, London (Geological Society).
- FLÜGEL, H. W. & F. NEUBAUER (1984): *Erläuterungen zur Geologischen Karte der Steiermark, 1:200.000*.– Geologische Bundesanstalt, Wien.
- GARDNER, J. S. & I. BAJEWSKI (1987): Hilda rock glacier stream discharge and sediment load characteristics, Sunwapta Pass area, Canadian Rocky Mountains.– In: GIADINO, J. R., J. F. SHRODER & J. D. VÍTEK (Eds., 1987): *Rock Glaciers*, 161–174, London (Allen & Unwin).
- GASSER, D., J. GUSTERHUBER, O. KRISCHE, B. PUHR, L. SCHEUCHER, T. WAGNER & K. STÜWE (2009): *Mitteilungen des Naturwissenschaftlichen Vereines für Steiermark*, **139**, 5–36.
- GEYER, T., S. BIRK, R. LIEDL & M. SAUTER (2008): Temporal distribution of groundwater recharge in karst systems from spring hydrographs.– *Journal of Hydrology*, **348** (3-4), 452–463, doi:10.1016/j.jhydrol.2007.10.015.
- GÖDEL, S. (1993): *Geohydrologie der Blockgletscher im Hochreichhart-Gebiet (Seckauer Tauern, Steiermark)*.– Unveröffentl. Diplomarbeit, 165 S., Universität Wien.
- HARRIS, S. A., K. WAYNE, D. BLUMENSTENGEL, H. COOK, R. KROUSE & G. WHITLEY (1994): Comparison of the water drainage from an active near slope rock glacier and a glacier, St. Elias Mountains, Yukon Territory.– *Erdkunde*, **48**, 81–91.
- HARRISON S., B. WHALLEY & E. ANDERSON (2008): Relict rock glaciers and protalus lobes in the British Isles: implications for Late Pleistocene mountain geomorphology and palaeoclimate.– *Journal of Quaternary Science*, **23**, 287–304.
- HARUM, T., C. HOLLER, P. SACCON, I. ENTNER & J. HOFRIECHTER (2001): *Abschätzung des nachhaltig nutzbaren Quellwasserangebots im alpinen Raum Österreichs*.– *Wasserwirtschaftskataster*, 77 S., Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.
- HUGHES, P. D., P. L. GIBBARD & J. C. WOODWARD (2003): Relict rock glaciers as indicators of Mediterranean palaeoclimate during the Last Glacial Maximum (Late Würmian) in northwest Greece.– *Journal of Quaternary Science*, **18** (5), 431–440.
- JOHNSON, P. G. (1981): The structure of a talus-derived rock glacier deduced from its hydrology.– *Canadian Journal of Earth Sciences*, **18**, 1422–1430.
- KELLERER-PIRKLBAUER, A. (2011): Chapter 3.2: Case studies in the European Alps – Hochreichart, Eastern Austrian Alps.– In: KELLERER-PIRKLBAUER, A., G. LIEB, P. SCHÖNEICH, P. DELINE & P. POGLIOTTI (Eds., 2011): *Thermal and geomorphic permafrost response to present and future climate change in the European Alps. PermaNET project, final report of Action 5.3*.– 35–44, on-line publication, ISBN 978-2-903095-58-1.
- KELLERER-PIRKLBAUER, A., G. K. LIEB & H. KLEINFERCHNER (2012a): A new rock glacier inventory for the eastern-most part of the European Alps.– *Austrian Journal of Earth Sciences (in Begutachtung)*.

- KELLERER-PIRKLBAUER, A., M. PAURITSCH & G. WINKLER (2012b): Rock glacier drainage catchments in Central Austria and their hydrogeological relevance.– *Central European Journal of Geosciences* (eingereicht).
- KRAINER, K. & W. MOSTLER (2002): The discharge of active rock glaciers: examples from the Eastern Alps (Austria).– *Artic, Antarctic and Alpine Research*, **34**, 142–149.
- KRAINER, K. & M. RIBIS (2009): Blockgletscher und ihre hydrologische Bedeutung im Hochgebirge.– *Mitteilungsblatt des hydrographischen Dienstes in Österreich*, **86**, 65–78.
- KRAINER, K., W. MOSTLER & C. SPOETL (2007): Discharge from active rock glaciers, Austrian Alps; a stable isotope approach.– *Mitteilungen der Österreichischen Geologischen Gesellschaft*, **100**, 102–112.
- LEIBUNDGUT, C., P. MALOSZEWSKI & C. KÜLLS (2009): *Tracers in Hydrology*.– 432 S., Chichester (Wiley-Blackwell).
- LIEB, G. K., A. KELLERER-PIRKLBAUER & H. KLEINFERCHNER (2010): Blockgletscherinventar von Zentral- und Ostösterreich erstellt im Rahmen des Projektes PermaNET (digitaler Datensatz).– Institut für Geographie und Raumforschung, Graz.
- MAILLET, E. (1905): *Mécanique et physique du globe. Essai d'hydraulique souterraine et fluviale*.– 218 S., Paris.
- NAGL, H. (1976): Die Raum-Zeit-Verteilung der Blockgletscher in den Niederen Tauern und die eizeitliche Vergletscherung der Seckauer Tauern.– *Mitteilungen des Naturwissenschaftlichen Vereines für Steiermark*, **106**, 95–118.
- PAASCHE, Ø., S. O. DAHL, R. LØVLIE & A. NESJE (2007): Rockglacier activity during the Last Glacial–Interglacial transition and Holocene spring snowmelting.– *Quaternary Science Reviews*, **26**, 793–807.
- PADILLA, A., A. PULIDO-BOSCH & A. MANGIN (1994): Relative importance of baseflow and quickflow from hydrographs of karst spring.– *Ground Water*, **32** (2), 267–277, doi:10.1111/j.1745-6584.1994.tb00641.x.
- PAURITSCH, M. (2011): Die Hydrodynamik reliktscher Blockgletscher am Beispiel des Schönebenblockgletschers (Seckauer Tauern, Steiermark).– Unveröffentl. Diplomarbeit, 143 S., Karl-Franzens-Universität, Graz.
- PUTNAM, A. E. & D. E. PUTNAM (2009): Inactive and relict rock glaciers of the Deboullie Lakes Ecological Reserve, northern Maine, USA.– *Journal of Quaternary Science*, **24**, 773–784.
- SAUTER, M. (1992): Quantification and forecasting of regional groundwater flow and transport in a karst aquifer (Gallusquelle, Malm, SW Germany).– *Tübinger Geowissenschaftliche Arbeiten, Reihe C*, **13**, 150 S., Tübingen.
- SCHMID, S. M., B. FÜGENSCHUH, E. KISSLING & R. SCHUSTER (2004): Tectonic map and overall architecture of the Alpine orogen.– *Eclogae Geologicae Helveticae*, **97**, 93–117.
- SCHROTT, L. (1998): The hydrological significance of high mountain permafrost and its relation to solar radiation: a case study in the high Andes of San Juan, Argentina.– *Bamberger Geographische Schriften*, **15**, 71–84.
- SCHUSTER, R., F. KOLLER, V. HOECK, G. HOINKES & R. BOUSQUET (2004): Explanatory notes to the map: Metamorphic structure of the Alps – Metamorphic evolution of the Eastern Alps.– *Mitteilungen der Österreichischen Geologischen Gesellschaft*, **149**, 175–199.
- TAUCHER, W. (2010): Climatic conditions of six selected sites in the Hohe and Niedere Tauern Range 1961–2006.– Unpublizierte Masterarbeit, 156 S., Karl-Franzens-Universität Graz.
- THORNTHWAITE, C. W. (1948): An approach toward a rational classification of climate.– *Geogr. Rev.*, **38**, 55–94.
- UNTERSWEIG, T. & H. PROSKE (1996): Untersuchungen an einem fossilen Blockgletscher im Hochreichhartgebiet (Niedere Tauern, Steiermark).– *Grazer Schriften der Geographie und Raumforschung*, **33**, 201–207.
- UNTERSWEIG, T. & A. SCHWENDT (1995): Die Quellen der Blockgletscher in den Niederen Tauern.– *Bericht der wasserwirtschaftlichen Planung* **78**, S. 76, Graz.
- UNTERSWEIG, T. & A. SCHWENDT (1996): Blockgletscher und Quellen in den Niederen Tauern.– *Mitteilungen der Österreichischen Geologischen Gesellschaft*, **87**, 47–55.
- WINKLER, G., M. PAURITSCH & S. BIRK (2010): Die Hydrodynamik fossiler Blockgletscher am Beispiel des Schönebenblockgletschers, Österreich.– *Journal of Alpine Geology*, **52**, 254–255.
- ZURAWEK, R. (2002): Internal Structure of a Relict Rock Glacier, Sleza Massif, Southwest Poland.– *Permafrost and Periglacial Processes*, **13**, 29–42.

Summary

Large areas of Styria are built up by crystalline rocks and were morphologically influenced by glaciers, permafrost and frost weathering during the Quaternary. The spatial distribution of periglacial landscape forms such as relict rock glaciers and their hydrological catchments were investigated in the Styrian part of the Niedere Tauern Range (2,440 km²). Results show that the drainage of approximately 9% of the area above 1,500 m a. s. l. and 23% above 2,000 m a. s. l. is influenced by relict rock glaciers as aquifers. Results of the subunit Seckauer Tauern Range even show approximately 16% above 1,500 m a. s. l. and more than 40% above 2,000 m a. s. l. confirming the high relevance of relict rock glaciers for the drainage system in this high-alpine region and in further consequence for the water economy and ecology. The hydraulic properties of relict rock glaciers were – and still are – investigated at the example of Schöneben rock glacier and its spring at the rock glacier front. The Schöneben spring shows a response to hydraulic pulses within a few hours but residence times of 3–4 months of the base flow. Hydrograph analyses and the analyses of natural and artificial tracer breakthrough curves suggest the conceptual model of a double porosity system with three different recession coefficients. Water balance calculations for the years from 2003 to 2010 confirm the order of magnitude of the temporary changes of the aquifer storage. Analyses of the water temperature indicate some remaining permafrost lenses which will be proved by additional isotopic and hydrochemical investigations in the future.

Dank

Die Forschungsarbeiten werden aus Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung und aus Mitteln des Landes Steiermark sowie Investition in ihre Zukunft (EFRE) finanziert. Barbara STROMBERGER wird, stellvertretend für den Hydrographischen Dienst Steiermark, für die Bereitstellung der Daten der Schönebenquelle sowie der Klimadaten der Station Hochreichhart gedankt. Das Institut für Geographie und Raumforschung der Karl-Franzens-Universität Graz stellte Lufttemperaturdaten aus dem Hochreichhartkar zur Verfügung.

Schlüsselwörter: reliktsche Blockgletscher, Grundwasserleiter in kristallinen Einzugsgebieten, Niedere Tauern

Keywords: relict rock glacier, aquifer in crystalline catchments, Niedere Tauern Range