

Kapitel 6 | Blockgletscherabflüsse im Äußeren Hochebenkar – Hydrologie, Wasserchemie und Kieselalgen

Ulrike Nickus, Karl Krainer, Hansjörg Thies, Monica Tolotti

Zusammenfassung

Der Blockgletscher im Äußeren Hochebenkar ist einer der am längsten und intensivsten untersuchten aktiven Blockgletscher in Österreich. Seit 2007 werden dort auch die Hydrologie und die chemische Zusammensetzung von Abflüssen untersucht. Der Abfluss zeigt die für Blockgletscherbäche typische Saisonalität mit sehr hohen Werten zur Zeit der Schneeschmelze und abnehmenden Werten zum Herbst hin. Sekundäre Abflussmaxima im Sommer werden durch Niederschlagsereignisse verursacht. Die Konzentration gelöster Stoffe im Abfluss des Hochebenkars zeigt eine zur Abflussmenge gegenläufige zeitliche Entwicklung mit den niedrigsten Werten während der Schneeschmelze und zunehmenden Konzentrationen gegen Herbst hin. Die Arbeit zeigt auch erste Ergebnisse über Unterschiede in der Diversität von epilithischen Diatomeen in Bächen mit und ohne Einfluss eines aktiven Blockgletschers.

Abstract

Hochebenkar rock glacier is one of the most intensively investigated active rock glaciers of the Austrian Alps with first measurements of flow velocities by Pillewizer in 1938. Since 2007 the discharge of the rock glacier outflows has been studied quantitatively by automatic gauges and chemical analysis is used to determine the water quality of the discharge. Runoff of an active rock glacier reveals a high seasonal variability with varying contributions of snowmelt, precipitation events, groundwater and melting of the internal ice body. Peak values of runoff generally occur in late spring caused by the melting of the seasonal winter snow pack. The major melt phase is characterised by a high daily course of runoff values with maxima at night and minima in the late morning. Cold spells generally interrupt the melt phase several times a year causing runoff and its daily course to decrease. Secondary peaks are linked to summer precipitation events when quickflow causes runoff to increase. By late summer or fall, runoff generally decreases and often ceases in November when air temperatures fall below zero.

Solute concentrations tend to increase between the onset of major snowmelt and fall. Electrical conductivity – as a measure of the total ion content of a solution – varies from about 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ in early summer to some 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ in fall at the automatic gauge run by the Hydrographic Service of Tyrol (2,220 m). Conductivity values may even be higher and reach $> 500 \mu\text{S}/\text{cm}$ when measured directly at the rock glacier outflow. Heavy summer precipitation events cause a dilution of the highly concentrated rock glacier streams, and secondary runoff peaks coincide with conductivity minima. The same accounts for those ions that dominate the ion content of the brooks, i.e. sulfate, calcium and magnesium. The seasonal course of the solute concentrations reflects the varying contributions of snowmelt, precipitation, groundwater and melting of the internal ice body. So called reference brooks, i.e. brooks without any impact of an active rock glacier revealed substance concentrations that ranged one order of magnitude below values found in rock glacier impacted brooks.

Epilithic diatom assemblages were investigated in rock glacier impacted and not impacted streams at two sites (Hochebenkar and Krummgampen) with varying chemical properties. First results indicated that rock glacier outflows may affect species composition and abundance of epilithic diatoms. In particular, increasing acidity caused the substitution of circumneutral taxa by acidophilous and acidobiontic taxa.

1. Einleitung

Blockgletscher stellen eine Form des alpinen Permafrosts dar. Laut einem Inventar der Tiroler Alpen gibt es hier mehr als 3.000 Blockgletscher mit einer Gesamtfläche von fast 170 km^2 (Krainer & Ribis 2012). Davon sind 517 als aktive Blockgletscher eingestuft, d.h. als lappen- oder zungenförmige Körper aus gefrorenem Lockermaterial mit Eiskörpern oder Eislinen, die sich aufgrund ihres Eisanteils langsam hangabwärts bewegen (Barsch 1996). Ein Jahresmittel der Lufttemperatur von $-3 \text{ }^\circ\text{C}$ kann als untere Grenze für verbreitetes Vorkommen von Permafrost angesehen werden, an einzelnen Stellen wird Permafrost auch bei einer langjährigen Jahresmitteltemperatur von $-1 \text{ }^\circ\text{C}$ beobachtet (Haerberli et al. 2010). Durch diese Nähe zur $0 \text{ }^\circ\text{C}$ -Grenze reagieren Blockgletscher sehr sensibel auf Klimaveränderungen bzw. eine Zunahme der Lufttemperatur (Harris et al. 2003).

Der Abfluss von aktiven Blockgletschern weist in der Regel starke Schwankungen mit der Tages- und Jahreszeit auf (Krainer & Mostler 2002, Krainer et al. 2007). Schneeschmelze, Regenereignisse, Grundwasser und Schmelzwasser vom Eiskörper des Blockgletschers tragen dabei in zeitlich wechselnden Anteilen zum Gesamtabfluss bei. Die höchsten Abflusswerte sind zur Zeit der Hauptschneeschmelze zu erwarten. Sekundäre Spitzen während der Sommer- und Herbstmonate stammen von ergiebigen Regenereignissen. Im Verlauf des Herbstes nimmt der Abfluss ab und kommt gegen November, wenn die Lufttemperaturen

in diesen Höhen negative Werte erreichen, oft ganz zum Erliegen.

Starke Veränderungen in der Wasserchemie eines Südtiroler Hochgebirgssees (Rasass See, 2.682 m) waren der Anlass, die Chemie von Blockgletscherabflüssen näher zu untersuchen. In diesem See hat die elektrische Leitfähigkeit zwischen 1985 und 2005 um den Faktor 18 zugenommen, die Konzentrationen von Sulfat und Magnesium stiegen im gleichen Zeitraum um den Faktor 26 bzw. 68 an (Thies et al. 2007). Auch hohe Konzentrationen von Schwermetallen wie Nickel wurden im Seewasser gemessen. Diese Veränderungen in der Seechemie wurden dem vermehrten Freisetzen von Stoffen aus dem Eis eines Blockgletschers im Einzugsgebiet des Rasass Sees zugeschrieben – als eine Folge des Temperaturanstiegs in den Alpen (Auer et al. 2006).

Hochalpine Fließgewässer sind charakterisiert durch instabile bzw. physikalisch extreme Verhältnisse, wie ein stark wechselndes Abflussverhalten im Tages- und Jahresverlauf, verbunden mit einem geringen Nährstoffangebot (Rott et al. 2006, Füreder 2010). Spezialisierte, an die extremen Bedingungen angepasste Organismen wie Kieselalgen sind gewöhnlich aber trotzdem in diesen Ökosystemen zu finden. Kieselalgen (Diatomeen), die sich z. B. auf Steinen oder dem Sediment ansiedeln, reagieren oft sensibel auf die chemische Zusammensetzung von Wasser (Rott et al. 2006). Daher werden sie als Bioindikatoren für Veränderungen von pH-Wert, elektrischer Leitfähigkeit oder Metallkonzentration im Wasser verwendet (Falasco et al. 2009, Stevenson et al. 2010). Bisher gibt es

allerdings nur wenige Arbeiten, die sich mit Auswirkungen von Blockgletscherabflüssen auf die Diversität und Ökologie von hochalpinen Gewässern befassen (Thies et al. 2013, Ilyashuk et al. 2014).

Der Blockgletscher im Äußeren Hochebenkar ist einer der am längsten und intensivsten untersuchten aktiven Blockgletscher in Österreich mit ersten Messungen der Fließgeschwindigkeit (z. B. Pillewizer 1957) im Jahr 1938. In der vorliegenden Arbeit werden die Hydrologie und Chemie von Abflüssen des Blockgletschers im Äußeren Hochebenkar beschrieben, mit deren Untersuchung 2007 begonnen wurde (Nickus et al. 2014). Bisherige Ergebnisse werden mit jenen von Blockgletscherbächen im Krummgampental (Kaunertal) verglichen. An beiden Stellen werden sogenannte Referenzbäche, d.h. von Blockgletschern unbeeinflusste Bäche, mit Blockgletscherabflüssen auf Unterschiede in der Stoffkonzentration und in der Zusammensetzung und Diversität von Kieselalgen untersucht.

2. Untersuchungsgebiet und Methoden

Informationen zu Lage, Größe und Exposition des Blockgletschers im Äußeren Hochebenkar finden sich in Kapitel 3 dieses Buchs. Aus dem Blockgletscher entspringt am östlichen Rand auf 2.575 m Höhe ein Bach. Dort wurde 2007 in etwa 100 m Entfernung vom Quellaustritt eine Pegelstation errichtet (HK-P, Abb. 1). Mit einer Druckpegelsonde

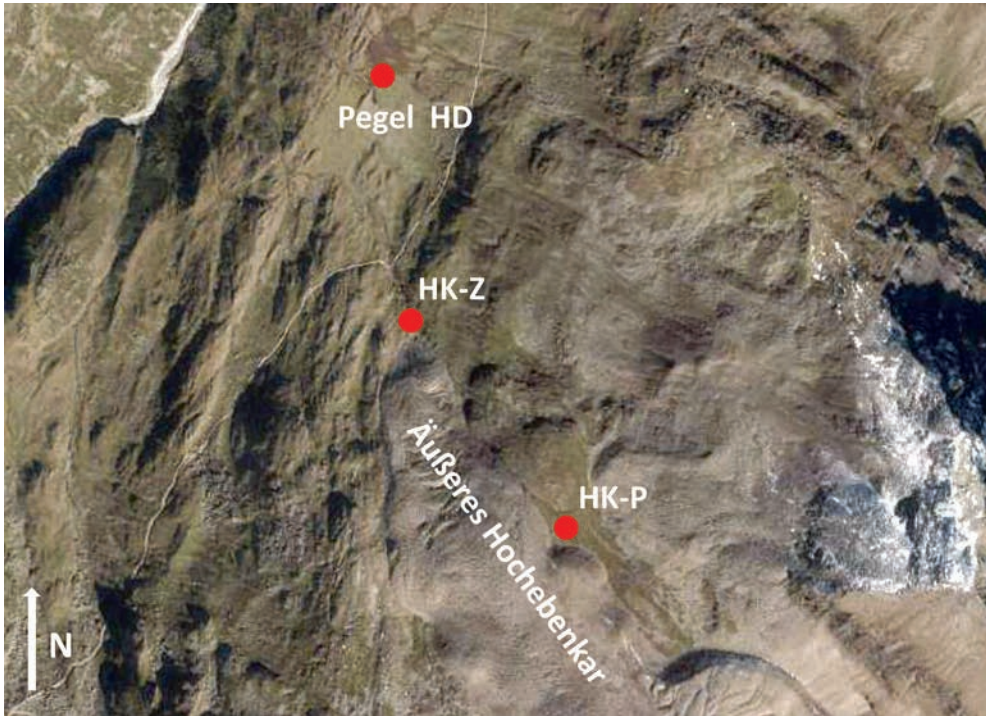


Abb. 1: Lage der Probestellen HK-P (2.575 m Meereshöhe) und HK-Z (2.360 m) am Blockgletscher Äußeres Hochebenkar und des Abflusspegels (2.220 m, Pegel HD), der vom Hydrographischen Dienst des Landes Tirol betrieben wird (Quelle: Land Tirol – data.tirol.gv.at, tiris)

wird stündlich der Wasserstand registriert. Die Eichkurve des Pegels, d.h. der Zusammenhang zwischen Wasserstand und Durchflussmenge, wurde nach der Salzverdünnungsmethode bestimmt. Dabei wurde aus der Menge eines eingebrachten Tracers (Kochsalz) und dem zeitlichen Verlauf der Tracerkonzentration die jeweilige Durchflussmenge bei verschieden hohen Wasserständen bestimmt. Im September 2009 wurde am Hochebenkarbach in 2.220 m Höhe vom Hydrographischen Dienst (Amt der Tiroler Landesregierung, Abteilung Wasserwirtschaft) ein Durchflusspegel mit einer automatischen Pegelstation errichtet

(Pegel HD, Abb.1 und 2A). Dieser Pegel liefert seit 2011 kontinuierliche Daten während des Sommerhalbjahrs, die für diese Arbeit dankenswerter Weise vom Hydrographischen Dienst zur Verfügung gestellt wurden.

Mit der Untersuchung der chemischen Zusammensetzung von Blockgletscherquellen wurde 2007 begonnen. An den Stellen HK-P (am östlichen Rand des Blockgletschers auf 2.575 m) und HK-Z (an der Zunge auf 2.360 m; Abb. 1) wurden jährlich Wasserproben zwischen Juli und Oktober entnommen. Ab 2011 kam am Pegel HD ein automatischer Probesammler zum Einsatz, mit dem

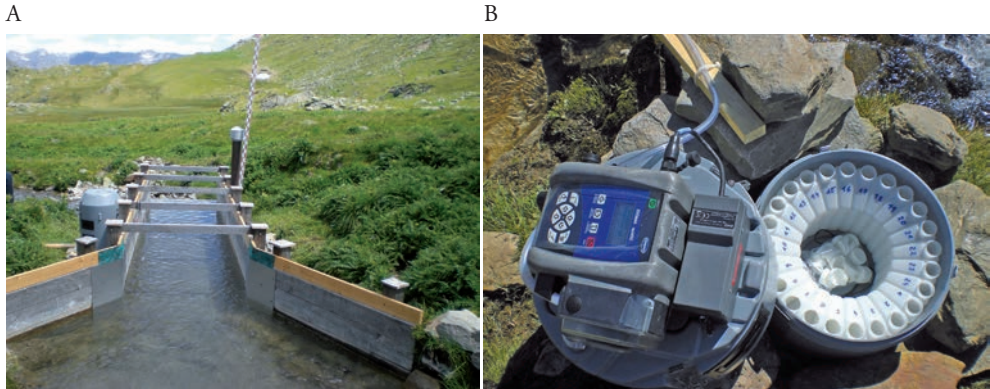


Abb. 2: Pegel des Hydrographischen Dienstes (Land Tirol) am Hochebenkarbach auf 2.220 m Höhe (A), Automatischer Probesammler (B). Fotos: Hansjörg Thies

zwischen Juli und Oktober Tagesproben des Abflusses genommen wurden (Abb. 2B). Die automatische Probennahme erfolgte jeweils um 16 Uhr. Alle Wasserproben wurden auf pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit, Ionenkonzentration und stichprobenhaft auch auf den Gehalt von Schwermetallen untersucht. Die elektrische Leitfähigkeit wurde mit einem tragbaren Messgerät entweder vor Ort oder im Labor bestimmt.

Kieselalgen, die auf Steinen im Gewässer angesiedelt sind (epilithische Diatomeen), wurden gemäß den Empfehlungen des Europäischen Komitees für Standardisierung (2004) beprobt. Die Diatomeen wurden von 10, innerhalb einer Strecke von 10 m im Bach zufällig ausgesuchten Steinen abgebürstet und in 70 % Ethanol konserviert. Je 500 gereinigte Kieselalgenschalen pro Probe wurden mikroskopisch bestimmt. Genauere Details über Reinigung und Bestimmung sind in Tolotti (2001) und Thies et al. (2013) beschrieben. Der Krummgampen Blockgletscher (N46°

52', O10°42', WGS 84), der für Vergleiche in dieser Arbeit herangezogen wird, liegt im Krummgampental, einem Seitental des Kautertals (Abb. 3). Er erstreckt sich zwischen 2.465 und 2.700 m Höhe auf einer Fläche von 0,1 km². Die Festgesteine im Einzugsgebiet gehören wie im Hochebenkar zum Ötztal-Stubai Komplex. Die Beprobung und Analyse von Blockgletscher- und Referenzbächen erfolgte mit den gleichen Methoden, wie sie für das Hochebenkar beschrieben wurden.

3. Ergebnisse

Abfluss

Der Abfluss des Hochebenkarbachs zeigte die für Blockgletscherabflüsse typische zeitliche Variabilität mit maximalen Werten zur Zeit



Abb. 3: Lage der untersuchten Blockgletscher Hochebenkar und Krümmgampen (rote Punkte). (Quelle: Land Tirol – data.tirol.gv.at, tiris)

Tab. 1: Monatsmittel (Juni–August) der Wasserführung (l/s) an der östlichen Blockgletscherquelle HK-P (2007–2010) und am Pegel Hochebenkarbach HD (2011, 2012)

	HK-P (2.575 m)				Pegel HD (2.220 m)	
	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Juni		94	107	87	161	207
Juli	17	34	57	22	57	92
August	24	16	17	22	29	33
September	14	12	12	5	39	31

der Schneeschmelze und abnehmenden Mengen gegen Herbst hin. Die Monatsmittel im Durchfluss lagen beim Pegel HD im Juni 2011 und 2012 bei etwa 160 bzw. 210 Liter pro Sekunde (l/s). Im Juli betragen die Monatsmittel für die beiden Jahre 57 l/s bzw. 92 l/s und sanken im August und September auf 30 bis 40 l/s (Tab. 1). An der Stelle HK-P lagen die Monatsmittel wegen des kleineren Einzugsgebietes um den Faktor 2 bis 3 niedriger, wobei die Unterschiede zwischen den beiden Pegeln im Herbst größer zu sein scheinen (Tab. 1). Ein unmittelbarer Vergleich der gemessenen Abflüsse ist leider nicht möglich, da die vorliegenden Daten unterschiedliche Zeiträume umfassen.

Die Saisonalität des Blockgletscherabflusses soll am Beispiel des Jahres 2012 am Pegel HD gezeigt werden (Abb. 4). Die Hauptabtauschmelzphase der winterlichen Schneedecke begann Anfang Juni und dauerte bis Anfang Juli. Sie war gekennzeichnet durch ausgeprägte Tagesgänge im Abfluss des Hochebenkarbachs. Abflussmaxima (15-Minuten Daten) wurden am Abend, Minima am späten Vormittag registriert, der mittlere Tagesgang lag bei ~200 l/s. Das absolute Abflussmaximum während der Schneeschmelze wurde am 17.6.2012 mit ~520 l/s gemessen. Anfang Juli klang das Abschmelzen der saisonalen Schneedecke allmählich aus, was sich im geringer werdenden Tagesgang der Abflusswer-

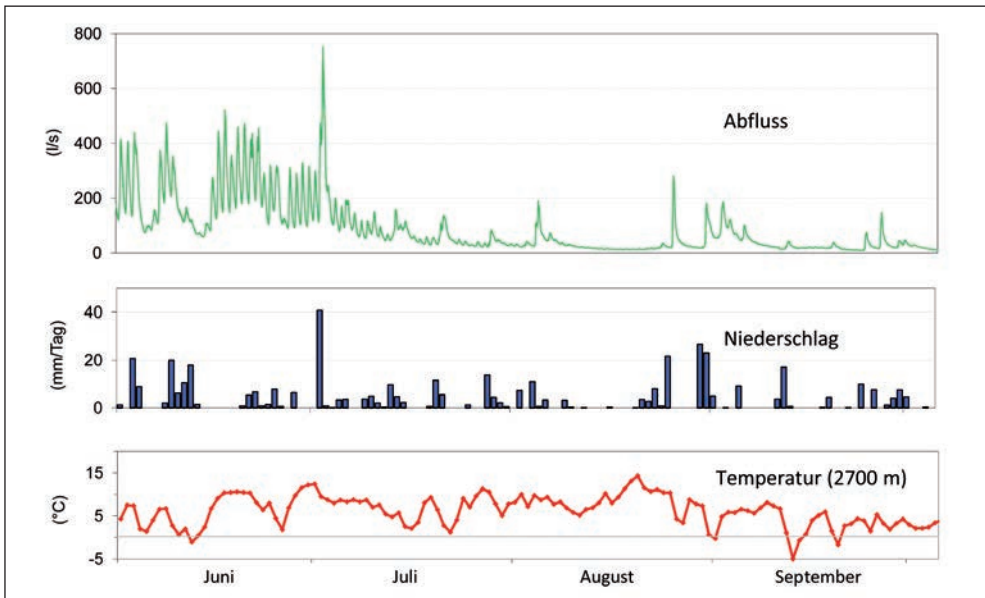


Abb. 4: Abfluss des Hochebenkarbachs (2.220 m Meereshöhe) in l/s als 15-Minuten-Werte (oben); Tagessummen des Niederschlags in Obergurgl (mm/Tag) (Mitte) und gerechnete Tagesmittel der Lufttemperatur in 2.700 m Meereshöhe (°C) zwischen 1.6.2012 und 5.10.2012 (unten). Die Temperatur in 2.700 m wurde mit einem mittleren vertikalen Gradienten von 0,6 °C/100 m ausgehend von der Tagesmitteltemperatur in Obergurgl (1.938 m Meereshöhe) berechnet.

te bemerkbar machte. Unterbrochen war das Abschmelzen der winterlichen Schneedecke 2012 durch einzelne kältere Phasen. Am markantesten war die Periode zwischen 9.6. und 14.6.2012 mit dem Durchgang einer Kaltfront und der Ausbildung eines Tiefs über der Adria. Negative Lufttemperaturen und Schnee im Höhenbereich des Äußeren Hochebenkar-Blockgletschers führten zu einem starken Rückgang im Tagesabfluss auf Werte unter 100 l/s.

Der Einfluss von starken Niederschlagsereignissen auf die Abflussmenge zeigte sich 2012 am deutlichsten am 2. Juli (Abb. 4). In Obergurgl wurden an diesem Tag 41 mm Niederschlag gemessen bei einer Tagesmitteltemperatur von 14,5 °C (die Daten wurden dankenswerter Weise von der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik ZAMG zur Verfügung gestellt). Der Niederschlag fiel demnach bis in große Höhen in Form von Regen auf Reste der winterlichen, feuchten Schneedecke. Die Kombination aus starkem Niederschlag und Schmelzen führte zu einem extremen Ansteigen im Abfluss des Hochebenkarbachs. Das Abflussmaximum lag am Pegel HD am 2.7.2012 bei 750 l/s, der Tagesmittelwert betrug 420 l/s. Mehrere Regenereignisse im Sommer und Herbst 2012 bewirkten kurzfristige Spitzen im Abfluss, die mit einer Ausnahme alle unter 200 l/s blieben. Die Abflussspitzen am Pegel HD traten in der Regel innerhalb von wenigen Stunden bis 1 Tag nach dem Regenereignis ein.

Wasserchemie

Seit 2007 werden Abflüsse vom Äußeren Hochebenkar auf chemische Inhaltsstoffe untersucht. Während an den Stellen HK-P und HK-Z direkt am Blockgletscher (Abb. 1) einzelne Proben verteilt über die Sommerperiode genommen werden, ermöglicht seit 2011 ein automatischer Probensammler am Pegel HD eine kontinuierliche Beprobung auf Tagesbasis. Damit können Veränderungen in der chemischen Zusammensetzung im Abfluss zwischen Juli und Anfang Oktober gut verfolgt werden.

Die Menge an gelösten Stoffen im Hochebenkarbach ist jahreszeitlich variabel. Generell nehmen die Konzentrationen im Abfluss zwischen Schneeschmelze und Herbst zu. Der zeitliche Verlauf der elektrischen Leitfähigkeit, die ein Maß für den gesamten Gehalt an Ionen im Wasser ist, zeigt das recht deutlich. Am Pegel HD stiegen 2012 die Monatsmittel der elektrischen Leitfähigkeit zwischen Juli und September von 138 auf 318 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Tab. 2). Ähnlich stark (d.h. etwa um den Faktor 2,3) nahm die Konzentration von Sulfat, Kalzium und Magnesium zu. Die Monatsmittel von Sulfat stiegen von 55 auf 122 mg/l, Kalzium und Magnesium nahmen von 12 auf 28 mg/l bzw. von 7 auf 15 mg/l zu. Die Konzentration von Natrium, Kalium und Nitrat lag etwa eine Größenordnung unter der von Sulfat, Kalzium und Magnesium. Deutlich geringer war auch der Anstieg der Monatsmittel von Juli auf September – Natrium, Kalium und Nitrat nahmen nur etwa um den Faktor 1,5 zu. Kaum Veränderung war hingegen beim

pH-Wert zu beobachten mit Monatsmitteln zwischen 6,0 und 6,1 (Tab. 2).

Von den beiden höher gelegenen Probestellen am östlichen Rand (HK-P) und an der Zunge (HK-Z) des Hochebenkars gab es pro Jahr nur wenige Proben. Die Einzelproben aller 6 Jahre wurden deshalb zu einer saisonalen Zeitreihe zusammengefügt. Durch die Nähe zum Blockgletscher waren im Mittel zwischen Juli und September die Konzentrationen an der Stelle HK-P etwa 20–30 % höher als am Pegel HD (Tab. 2 und 3). Die Probestelle HK-Z, die ebenfalls in unmittelbarer Nähe des Blockgletschers liegt und von der man

deshalb annehmen würde, dass das aus dem Blockgletscher abfließende Wasser eine ähnliche chemische Zusammensetzung wie HK-P aufweist, unterschied sich hingegen stark in der Menge an gelösten Stoffen. Die Konzentrationen von Sulfat, Kalzium und Magnesium an der Zunge HK-Z lagen im Mittel etwa 1 Größenordnung unter jenen von HK-P. Die mittleren Stoffkonzentrationen an der Stelle HK-Z ähnelten vielmehr denen eines sogenannten Referenzbaches westlich von Obergurgl (als Referenzbach wird hier ein Bach bezeichnet, in dessen Einzugsgebiet kein aktiver Blockgletscher liegt; Tab. 3). Ungeachtet der

Tab. 2: Monatliche Mittelwerte und Gesamtmittelwerte für die Periode Juli–September 2012 der elektrischen Leitfähigkeit (EL), des pH-Werts und der Ionenkonzentrationen im Hochebenkarbach am Pegel HD

	EL	pH	Cl ⁻	[NO ₃] ⁻	[SO ₄] ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
	µS/cm		mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Juli	138	6,0	0,2	0,9	55	0,8	1,5	7	12
August	190	6,1	0,2	1,3	71	1,1	2,0	10	17
September	318	6,1	0,3	1,4	122	1,3	2,3	15	28
Mittel	216	6,1	0,2	1,2	82	1,1	1,9	11	19

Tab. 3: Mittelwerte von elektrischer Leitfähigkeit (EL), pH-Wert und Ionenkonzentrationen an den Probestellen HK-P und HK-Z, Juli–September 2007–2012 sowie an einem von Blockgletschern unbeeinflussten Referenzbach (1.950 m) westlich von Obergurgl, September 2010

	EL	pH	Cl ⁻	[NO ₃] ⁻	[SO ₄] ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
	µS/cm		mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
HK-P	250	6,8	0,3	0,8	100	1,4	1,4	14	25
HK-Z	33	6,1	0,1	1,6	9	0,4	1,6	1,2	3,1
Referenzbach	27	5,9	0,1	0,8	8	0,7	0,5	0,8	2,7

großen Unterschiede in der Menge an gelösten Stoffen nahmen aber sowohl bei HK-P als auch bei HK-Z die Stoffkonzentrationen im Verlauf des Sommers bis zum Oktober hin zu (Abb. 5). Der Anstieg lag in der gleichen Größenordnung wie im Hochebenkarbach am Pegel HD.

Die Zunahme der im Blockgletscherabfluss gelösten Stoffmenge von Sommerbeginn bis zum Herbst hängt mit den zeitlich variierenden Anteilen von geschmolzenem Schnee, Grundwasser, Schmelzwasser vom Eiskörper des Blockgletschers sowie mit dem Einfluss von starken Regenereignissen zusammen. Niederschlagswasser, entweder in Form von Schmelzwasser der winterlichen Schneedecke oder von starken Regenereignissen, wirkt dabei immer verdünnend auf die Stoffkonzentration im Abfluss. Eine typische Winterschneedecke im Hochgebirge – hier am Beispiel des Hintereisferners (Nickus et al. 1998) – weist eine elektrische Leitfähigkeit von unter 10 $\mu\text{S}/\text{cm}$ auf und liegt damit gut ein bis zwei Größenordnungen unter den im Abfluss des Blockgletschers gemessenen Werten. Daher ist ein Anstieg in der Abflussmenge als Folge eines Regenereignisses im Sommer in der Regel mit einer Abnahme der Stoffkonzentrationen verbunden, und je höher der relative Anteil von Niederschlagswasser über dem direkten Abfluss ist, desto geringer sind elektrische Leitfähigkeit und Stoffkonzentrationen im Abfluss des Hochebenkars (Abb. 6).

Untersuchungen an verschiedenen Blockgletscherabflüssen in Tirol haben gezeigt, dass diese neben hohen Konzentrationen ionischer

Komponenten auch einen hohen Gehalt an Schwermetallen aufweisen können (Thies et al. 2013). So wurden z. B. in Abflüssen vom Krummgampental Blockgletscher Konzentrationen von bis zu 3 mg/l Aluminium (Abb. 7) bei pH-Werten im sauren Bereich (i.e. 4,3–5,3) sowie von bis zu 0,2 mg/l Nickel und Mangan gemessen. In den vom Äußeren Hochebenkar Blockgletscher beeinflussten Bächen lagen die Schwermetallkonzentrationen im Allgemeinen unter bis knapp über der Nachweisgrenze von wenigen $\mu\text{g}/\text{l}$ (z.B. für Al, Co, Mn, Ni oder Zn).

Im September 2010 wurden Bäche mit und ohne Blockgletschereinfluss im Gebiet von Hochebenkar und Krummgampen auf potentielle Unterschiede in der Diatomeenpopulation untersucht. Chemisch unterschieden sich die Blockgletscherabflüsse in den beiden Gebieten einerseits in der Menge an gelösten Stoffen – die Konzentrationen waren durchwegs höher im Krummgampenabfluss, was sich in der höheren elektrischen Leitfähigkeit von fast 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ gegenüber ~ 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ in HK-P ausdrückte (Tab. 4). Die größten Unterschiede traten aber beim pH-Wert und in der Konzentration von Schwermetallen auf. Während HK-P einen neutralen pH-Wert von 6,9 und Schwermetallkonzentrationen um die Nachweisgrenzen aufwies, lag der Krummgampen-Abfluss deutlich im sauren Bereich (pH 5,2) und zeigte Schwermetallkonzentrationen zwischen ~ 50 $\mu\text{g}/\text{l}$ (Mn) und ~ 900 $\mu\text{g}/\text{l}$ (Al). Die Referenzbäche in beiden Gebieten wiesen hingegen eine ähnliche chemische Zusammensetzung auf mit pH-Werten im neutralen bzw. schwach sauren Bereich

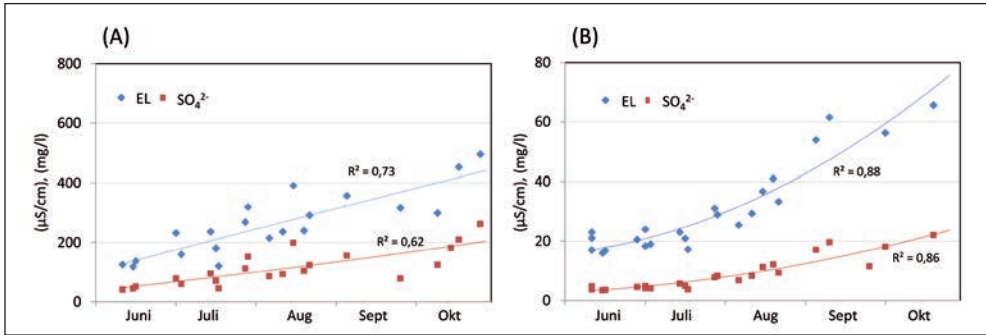


Abb. 5: Elektrische Leitfähigkeit (EL, $\mu\text{S}/\text{cm}$) und Sulfatkonzentration $[\text{SO}_4]^{2-}$ (mg/l) im Abfluss an den Stellen HK-P (A) und HK-Z (B). Einzelproben Juni–Oktober, 2007–2012, wurden zu einer Serie zusammengefügt.

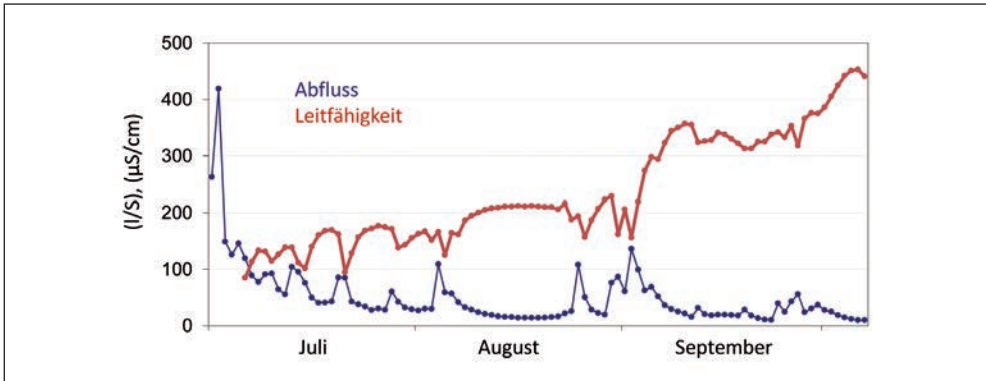


Abb. 6: Mittlerer Tagesabfluss (l/s) und elektrische Leitfähigkeit ($\mu\text{S}/\text{cm}$) am Pegel HD zwischen 1.7. und 7.10.2012

Tab. 4: Konzentration einzelner Ionen und Schwermetalle im Abfluss des Blockgletschers im Äußeren Hochebenkar (HK) und Krummgampental (KG) und in entsprechenden Referenzbächen (= kein Einfluss von Blockgletschern), September 2010. (n.n. = unter der Nachweisgrenze)

	EL	pH	$[\text{SO}_4]^{2-}$	$[\text{NO}_3]^-$	Ca^{2+}	Al	Ni	Mn	Zn
	$\mu\text{S}/\text{cm}$		mg/l	mg/l	mg/l	$\mu\text{g}/\text{l}$	$\mu\text{g}/\text{l}$	$\mu\text{g}/\text{l}$	$\mu\text{g}/\text{l}$
HK-P	295	6,9	124	1,0	30	10	4	8	3
HK-Referenz	27	5,9	8	0,8	3	10	n.n.	n.n.	3
KG	395	5,2	183	1,5	38	911	167	54	99
KG-Referenz	26	7,2	3	0,8	5	5	n.n.	n.n.	n.n.

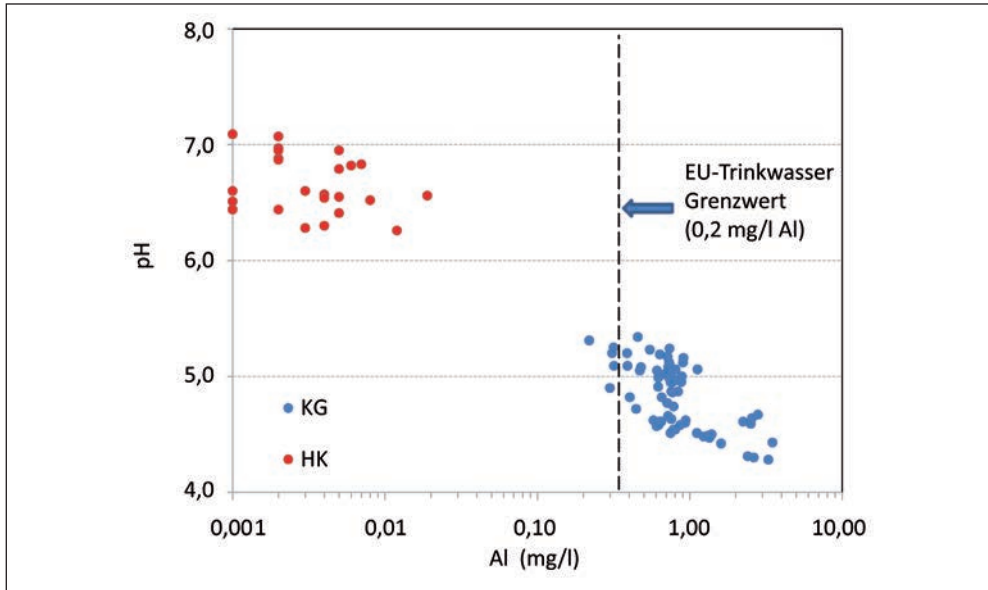


Abb. 7: Aluminiumkonzentration (mg/l) und pH-Wert für Blockgletscherbäche, Hochebenkar (HK) und Krummgampen (KG), 2007–2010

und Schwermetallkonzentrationen um die Nachweisgrenzen.

Kieselalgen

Die oben beschriebenen Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung verschiedener Blockgletscherabflüsse könnten sich auf die Ökologie dieser Bäche auswirken. Im September 2010 wurden deshalb erste Untersuchungen über die Biodiversität von Kieselalgen, die auf Steinen angesiedelt sind (epilithische Diatomeen), im Bereich der aktiven Blockgletscher im Äußeren Hochebenkar (HK) und im Krummgampental (KG) durchgeführt.

Die Kieselalgenpopulation war in allen un-

tersuchten Bächen geprägt von Arten, die typisch sind für alpine Bäche im Silikatgestein mit schwacher Mineralisierung und geringem Nährstoffangebot (z.B. Cantonati et al. 2001, Tolotti 2001, Geserich & Rott 2012). Die häufigsten Diatomeen waren *Achnantheidium minutissimum* var. *minutissimum*, *Psammothidium helveticum*, *Eunotia exigua*, *Psammothidium marginulatum* (Abb. 8) und *Psammothidium bristolicum* (Lange-Bertalot & Metzeltin 1996).

Die Referenzbäche wiesen eine geringe Diversität an Diatomeen auf durch das Vorherrschen jeweils einer Art, nämlich von *Eunotia intermedia* im HK-Referenzbach und *A. minutissimum* im KG-Referenzbach. *A. minutissimum* war auch die absolut dominierende Kieselalge im Abfluss des Hochebenkar

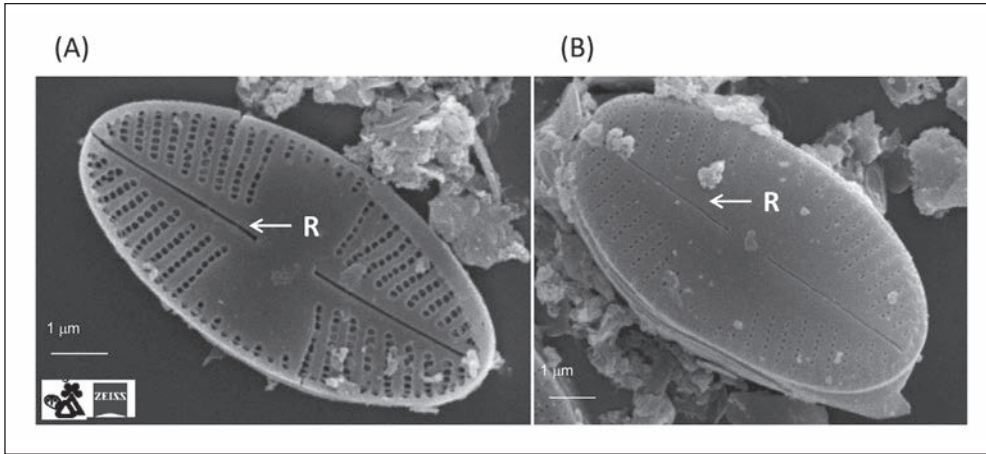


Abb. 8: Elektronenmikroskopische Aufnahmen von *Psammothidium marginulatum* Grunow (A, Innenseite der Raphenschale) und *Psammothidium acidoclinatum* Lange-Bertalot (B, Außenseite der Raphenschale), die im HK-Referenzbach und in den KG-Blockgletscherbächen gefunden wurden. R = Raphe, eine schlitzförmige Durchbrechung der Schalenwand, die als Bewegungsorganell der pennaten Diatomeen dient. Fotos: Nicola Angeli (MUSE, Trento, Italy)

Blockgletschers. Der Shannon-Index, der ein Maß für die durch Artenzahl und -Abundanz (d.h. Anzahl der Individuen pro Art) ausgewertete Biodiversität ist und hohe Werte erreicht, wenn die Individuen gleichmäßig auf alle Arten verteilt sind, lag deshalb bei HK-P nur bei 0,7. Im Abfluss des KG-Blockgletschers war – im Vergleich zum Referenzbach – *A. minutissimum* großteils ersetzt durch *P. bristolicum*, *P. marginulatum*, *E. exigua* und *P. acidoclinatum* (Abb. 8), d.h. durch säureliebende Kieselalgen. Der Shannon-Index lag hier bei 2,6 aufgrund der höheren Anzahl von Arten.

Die Diversität von epilithischen Diatomeen in allen untersuchten HK- und KG-Bächen (mit und ohne Blockgletschereinfluss) war bestimmt durch die Abundanz von *A. minutissimum*, die wiederum positiv korreliert war mit

dem pH-Wert und negativ mit der Konzentration von Schwermetallen (Thies et al. 2013). D. h. der Unterschied in der Zusammensetzung der Kieselalgenpopulation zwischen Bächen mit und ohne Blockgletschereinfluss schien umso größer, je höher Säuregehalt und Schwermetallkonzentrationen in den Bächen waren.

4. Diskussion und Schlussfolgerungen

Die Wasserführung des Hochebenkarbachs, der den Hauptabfluss des Blockgletschers im Äußeren Hochebenkar darstellt, zeigte die für Blockgletscherabflüsse typischen jahreszeitlichen Veränderungen mit Spitzenabflüssen von

etwa 500 l/s während der Hauptabschmelzphase der winterlichen Schneedecke. Noch höhere Werte werden erreicht, wenn, wie am 2.7.2012, Regen bis in große Höhen auf eine feuchte Schneedecke fällt. Höhe und zeitliches Auftreten von Maximalabflüssen sind, ebenso wie die Dauer des Abschmelzens, stark von der Witterung während der Schneeschmelze geprägt und können von Jahr zu Jahr stark variieren, wie z.B. Berger et al. (2004) für den Blockgletscher Innere Ölgrube (Kaunertal) zeigten. Jährliche Spitzenabflüsse während der Schmelzphase variierten dort zwischen 300 und 1000 l/s. Während des Sommers wird das Abflussverhalten des Hochebenkarbachs von Niederschlagsereignissen geprägt, die über eine Erhöhung des direkten Abflusses zu sekundären Spitzen führen. Dieses Phänomen wurde auch für eine Reihe anderer aktiver Blockgletscher in den Alpen gezeigt (Haerli 1985, Krainer & Mostler 2002, Berger et al. 2004). Abflüsse von aktiven Blockgletschern unterscheiden sich chemisch von Bächen ohne Blockgletschereinfluss. Sie weisen, wie hier am Beispiel Äußeres Hochebenkar und Krummgampen gezeigt wurde, deutlich höhere Stoffkonzentrationen auf als sogenannte unbeeinflusste Referenzbäche in der Umgebung der Blockgletscher. Die in den Blockgletscherbächen am HK und KG gemessenen elektrischen Leitfähigkeiten lag über den in der Literatur angegebenen Werten von < 100 bis 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ für alpine Blockgletscher (Krainer & Mostler 2002, Berger et al. 2004, Krainer et al. 2007). Ein Grund für die im Verlauf des Sommers zunehmenden Stoffkonzentrationen im Hoch-

ebenkarbach ist die abnehmende Verdünnung von stark mineralisiertem Grundwasser aus dem Blockgletscher durch Niederschlagswasser zwischen Frühsommer und Herbst (entweder in Form der schmelzenden Winterschneedecke oder als Niederschlagsereignis im Sommer). Auch Williams et al. (2006) fanden für einen Blockgletscherabfluss in der Front Range (Colorado, US) eine starke Zunahme von Ionenkonzentrationen zwischen Juni und September. Die Autoren hatten mit einem hydrologischen Mischmodell die relativen Beiträge von Schmelz- und Bodenwasser sowie Basisabfluss zum Blockgletscherabfluss abgeschätzt. Schmelzwasser lieferte den überwiegenden Beitrag im Juni, von Mitte Juni bis August war Bodenwasser (bzw. der Zwischenabfluss) und ab Mitte September der Basisabfluss der Hauptlieferant für den Gesamtabfluss. Isotopenanalysen ließen vermuten, dass Schmelzwasser vom Eiskörper des Blockgletschers, das viele Schmelz-/Gefrierzyklen durchlaufen hat, ein wichtiger Bestandteil vom Basisabfluss des Blockgletschers ist. Mechanische und chemische Verwitterung im Blockgletscher liefern nach Williams et al. (2006) einen weiteren wichtigen Beitrag zum hohen Ionengehalt des Blockgletscherabflusses im Herbst. Beide Beiträge – Schmelzen des Eiskörpers und mechanische bzw. chemische Verwitterung – könnten erklären, warum Blockgletscherabflüsse wie der in der Front Range (Colorado) oder hier der Hochebenkarbach eine starke saisonale Veränderung der Ionenkonzentrationen aufweisen, während unbeeinflusste Referenzbäche wenig bis keine Konzentrationsänderung im Verlauf des

Sommers zeigen. Einen zusätzlichen Beitrag zu den hohen Konzentrationen im Blockgletscherabfluss könnte aus bakterieller Aktivität stammen. Sonnleitner et al. (2011) haben in Laborversuchen gezeigt, dass Mikroorganismen das Potential haben, durch ihre chemolithotrophe Aktivität Kalzium, Magnesium oder Mangan aus Gestein freizusetzen und dadurch deren Konzentration in Oberflächenwässern zu erhöhen.

Die Untersuchung von Kieselalgen in Blockgletscherbächen und Referenzbächen zeigte, dass Abflüsse aus Blockgletschern die Diversität von epilithischen Diatomeen verändern können. Eine Schlüsselrolle spielten dabei die Veränderungen der Abundanz von *A. minutissimum*. Das Dominieren von *A. minutissimum* in diesen kalten und oligotrophen Bächen kann durch ihren Pioniercharakter und ihre hohe Toleranz gegenüber Stress erklärt werden (e.g. Peterson & Stevenson 1992, Van Dam et al. 1994, Potapova & Hamilton 2007). Der Säuregehalt in den KG-Bächen scheint der Grund für das Ersetzen von circumneutralen Arten durch säureliebende Taxa. Einige dieser Diatomeen (z.B. *E. exigua* und *P. acidoclinatum*) gelten auch als Indikatoren für Versauerung (Lange-Bertalot et al. 2011).

Literatur

- Auer, I., Böhm, R., Jurkovic, A., Lipa, W., Orlik, A., Potzmann, R., Schöner, W., Ungersböck, M., Matulla, C., Briffa, K., Jones, P.D., Efthymiadis, D., Brunetti, M., Nanni, T., Maugeri, M., Mercalli, L., Mestre, O., Moisselin, J.-M., Begert, M., Müller-Westermeier, G., Kveton, V., Bochnicek, O., Stastny, P., Lapin, M., Szalai, S., Szentimrey, T., Cegnar, T., Dolinar, M., Gajic-Capka, M., Zaninovic, K., Majstorovic, Z., Nieplova E. (2006) HISTALP – Historical instrumental climatological surface time series of the Greater Alpine Region. *International Journal of Climatology* 27: 17-46, DOI: 10.1002/joc.1377.
- Barsch, D. (1996) *Rockglaciers: indicators for the present and former geocology in high mountain environments*. Springer Verlag, Berlin.
- Berger, J., Krainer, K. & Mosler, W. (2004) Dynamics of an active rock glacier (Ötztal Alps, Austria). *Quaternary Research* 62: 233-242.
- Cantonati, M., Corradini, G., Jüttner, I. & Cox, E.J. (2001) Diatom assemblages in high mountain streams of the Alps and the Himalaya. *Nova Hedwigia* 123: 37-61.
- European Committee for Standardization (2004) *Water Quality-guidance Standard for the Identification, Enumeration and Interpretation of Benthic Diatom Samples From Running Waters*, EN 14407. European Committee for Standardization, Geneva.
- Falasco, E., Bona, F., Badino, G., Hoffmann, L. & Ector, L. (2009) Diatom teratological forms and environmental alterations: a review. *Hydrobiologia* 623: 1-35.

- Füreder, L. (2010) Hochalpine Flusslandschaft Rotmoos. In: Koch, E.M. & Erschbamer, B. (eds), *Glaziale und periglaziale Lebensräume im Raum Oberurgl*, Alpine Forschungsstelle Oberurgl 1, Innsbruck university press, Innsbruck, 181-198.
- Gesierich, D. & Rott, E. (2012) Is diatom richness responding to catchment glaciation? A case study from Canadian headwater streams. *Journal of Limnology* 71 (1): 72-83.
- Haerberli, W. (1985) Creep of mountain permafrost: Internal structure and flow of alpine rock glaciers. *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich* 77: 1-142.
- Haerberli, W., Noetzi, J., Arenson, L., Delaloye, R., Gärtner-Roer, I., Gruber, S., Isaksen, K., Kneisel, C., Krautblatter, M. & Phillips, M. (2010) Mountain permafrost: development and challenges of a young research field. *Journal of Glaciology* 56: 200, 1043-1058.
- Harris, C., Vonder Mühl, D., Isaksen, K., Haerberli, W., Sollid, J.L., King, L., Holmlund P., Dramis, F., Guglielmin, M. & Palacios, D. (2003) Warming permafrost in European mountains. *Global and Planetary Change* 39 (3-4): 215-225.
- Ilyashuk, B. P., Ilyashuk, E. A., Psenner, R., Tessadri, R. & Koinig, K. A. (2014) Rock glacier outflows may adversely affect lakes: lessons from the past and present of two neighboring water bodies in a crystalline-rock watershed. *Environmental Science & Technology* 48: 6192-6200.
- 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. & Ribis, M. (2012) A rock glacier inventory of the Tyrolean Alps (Austria). *Austrian Journal of Earth Sciences* 105/2: 32-47.
- Lange-Bertalot, H. & Metzeltin, D. (1996) Indicators of oligotrophy. In: Lange-Bertalot, H. (ed), *Iconographia Diatomologica* 2, Koeltz, Koenigsstein.
- Lange-Bertalot, H., Witkowski, A., Bak, M. (2011) *Eunotia* and some related genera. In: Lange-Bertalot, H. (ed), *Diatoms of Europe*. A.R.G. 6, Gantner Verlag, K.G., Ruggell, pp. 1-780.
- Nickus, U., Abermann, J., Fischer, A., Krainer, K., Schneider, H., Span, N. & Thies, H. (2014) Rock glacier Äußeres Hochebenkar – Recent results of a monitoring network. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie* (im Druck).
- Nickus, U., Kuhn, M., Novo, A. & Rossi G.C. (1998) Major element chemistry in alpine snow along a north-south transect in the Eastern Alps. *Atmospheric Environment* 32: 4053-4060.
- Peterson, C.G. & Stevenson, R.J. (1992) Resistance and resilience of lotic algal communities: importance of disturbance timing and current. *Ecology* 73: 1445-1461.

- Pillewizer, W. (1957) Untersuchungen an Blockströmen der Ötztaler Alpen: Geomorphologische Abhandlungen des Geographischen Institutes der FU Berlin (Otto-Maull-Festschrift) 5: 37-50.
- Potapova, M.G. & Hamilton, P.B. (2007) Morphological and ecological variation within the *Achnantheidium minutissimum* (Bacillariophyceae) species complex. *Journal of Phycology* 43: 561-575.
- Rott, E., Cantonati, M., Füreder, L. & Pfister, P. (2006) Benthic algae in high altitude streams of the Alps – a neglected component of the aquatic biota. *Hydrobiologia* 562: 195-216.
- Sonnleitner, R., Redl, B. & Schinner, F. (2011) Microbial mobilization of major and trace elements from catchment rock samples of a high mountain lake in the European Alps. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* 43: 465-473.
- Stevenson, R. J., Yangdong, P. & Van Dam, H. (2010) Assessing environmental conditions in rivers and streams with diatoms. In: Smol, P. & Stroemer, E. F. (eds), *The Diatoms. Applications for the Environmental and Earth Sciences*. II Ed., Cambridge University Press, 667 p.
- Thies, H., Nickus, U., Mair, V., Tessadri, R., Tait, D., Thaler, B. & Psenner, R. (2007) Unexpected response of high alpine lake waters to climate warming. *Environmental Science and Technology* 41: 7424-7429.
- Thies, H., Nickus, U., Tolotti, M., Tessadri, R. & Krainer, K. (2013) Evidence of rock glacier melt impacts on water chemistry and diatoms in high mountain streams. *Cold Regions Science and Technology* 96: 77-85.
- Tolotti, M. (2001) Littoral diatom communities in high mountain lakes of the Adamello-Brenta Regional Park (Trentino, Italy) and their relation to acidification. In: Jahn, R., Kociolek, J.P., Witkowski, A. & Compère, P. (eds), *Lange-Bertalot Festschrift, Studies on Diatoms*, pp. 327-352.
- Van Dam, H., Mertens, A. & Sinkeldam, J. (1994) A coded checklist and ecological indicator values of freshwater diatoms from the Netherlands. *Netherlands Journal of Aquatic Ecology* 28: 117-133.
- Williams, M.W., Knauf, M., Caine, N., Liu, F. & Verplanck, P.L. (2006) Geochemistry and Source Waters of Rock Glacier Outflow, Colorado Front Range. *Permafrost and Periglacial Processes* 17: 13-33.

Verzeichnis der AutorInnen

Ulrike Nickus
 Universität Innsbruck
 Institut für Meteorologie und Geophysik
 Innrain 52, 6020 Innsbruck, Österreich
 Ulrike.Nickus@uibk.ac.at

Karl Krainer
 Universität Innsbruck
 Institut für Geologie
 Innrain 52, 6020 Innsbruck, Österreich
 Karl.Krainer@uibk.ac.at

Hansjörg Thies
Universität Innsbruck
Institut für Geologie
Innrain 52, 6020 Innsbruck, Österreich
Hansjoerg.Thies@uibk.ac.at

Monica Tolotti
IASMA Research and Innovation Centre,
Sustainable Agro-ecosystems and
Bioresources Department
Edmund Mach Foundation,
Via E. Mach 1, 38010 S. Michele all'Adige,
Italien
Monica.Tolotti@fmach.it