

# Kapitel 1 | Blockgletscher: Einführung

Karl Krainer

## *Zusammenfassung*

Blockgletscher sind lappen- bis zungenförmige Körper aus ständig gefrorenem Lockermaterial, die sich langsam hangabwärts bewegen. Der gefrorene Permafrostkörper wird von einer bis zu mehreren Metern mächtigen, saisonal ungefrorenen Schuttlage bedeckt. Blockgletscher sind die häufigste Form des alpinen Permafrostes und in den Alpen, insbesondere auch in den Ötztaler Alpen weit verbreitet. Sie sind gekennzeichnet durch eine auffallende Morphologie mit einer steilen Stirn und steilen Flanken und einer meist grobblockigen Oberfläche mit oft ausgeprägten Rücken und Vertiefungen. Am Fuße der steilen Stirn entspringen häufig eine oder mehrere Blockgletscherquellen. Die Wassertemperatur aktiver Blockgletscher ist den ganzen Sommer über sehr niedrig, meist unter 1,5 °C. Das Abflussverhalten aktiver Blockgletscher wird vor allem vom Witterungsablauf gesteuert und ist durch ausgeprägte saisonale und tägliche Schwankungen gekennzeichnet. Das Wasser zeigt meist eine geringe elektrische Leitfähigkeit, einige Blockgletscherquellen sind durch auffallend hohe elektrische Leitfähigkeiten charakterisiert mit teilweise extrem hohen Konzentrationen an Nickel und anderen Schwermetallen. Das Eisvolumen der

Blockgletscher ist im Vergleich zum Volumen der Gletscher gering. Sowohl aktive als auch inaktive und reliktsche Blockgletscher haben einen gewissen Einfluss auf das Abflussgeschehen im Hochgebirge. Die jährlichen Bewegungsraten aktiver Blockgletscher liegen meist im Zentimeter- bis Dezimeterbereich, einige wenige Blockgletscher bewegen sich mit Geschwindigkeiten von bis zu wenigen Metern pro Jahr. Ein Großteil der Blockgletscher in den Alpen sind reine Permafrosterscheinungen und besitzen einen Kern aus Lockermaterial und Eis, das im Wesentlichen den Porenraum ausfüllt („Eis-zementierte Blockgletscher“). Einige wenige, meist große Blockgletscher besitzen einen Kern aus fast reinem, grobkörnigen, gebänderten Eis und haben sich offensichtlich aus einem schuttbedeckten Kargletscher entwickelt. Die heute aktiven Blockgletscher liegen innerhalb der maximalen Eisausdehnung des Egesen-Stadiums (ca. 12.700 BP) und müssen entsprechend jünger sein. Reliktsche (fossile) Blockgletscher können auch ein spätglaziales Alter von maximal ca. 16.000 Jahren aufweisen. Naturgefahren in Zusammenhang mit Blockgletschern sind extrem selten und aus den österreichischen Alpen nicht bekannt.

### *Abstract*

Rock glaciers are lobate- to tongue-shaped bodies composed of permanently frozen, unconsolidated material that moves slowly downslope. The frozen permafrost body is covered by an up to several meters thick and seasonally unfrozen debris layer. Rock glaciers are the most common form of alpine permafrost and widespread in the Alps, especially in the Ötztal Alps. They are characterised by a striking morphology with a steep front and steep sides, and a commonly coarse-grained surface, often displaying a pronounced morphology of ridges and furrows. At the foot of the steep front of many rock glaciers one or several rock glacier springs rise. The water temperature of springs of active rock glaciers is very low during the entire summer, usually below 1.5 °C. The discharge of active rock glaciers is controlled by the weather conditions and is characterised by pronounced seasonal and diurnal fluctuations. The water usually shows a low electrical conductivity, however, few rock glacier springs are characterised by remarkably high electrical conductivities with locally extremely high concentrations of nickel and other heavy metals. The ice volume of rock glaciers is small compared to the volume of the glaciers. Active, inactive and relict rock glaciers have some influence on the runoff patterns in high alpine regions. The annual displacement rates of active rock glaciers are mostly in the order of centimeters to decimeters, a few rock glaciers display flow velocities of up to a few meters per year. Most rock glaciers in the Alps are pure permafrost phenomena composed of a core of debris

and ice, which essentially fills the pore space (“ice-cemented rock glaciers”). A few, mostly large rock glaciers have a core of almost pure, coarse-grained, banded ice and have obviously developed from debris covered cirque glaciers. The present active rock glaciers are located within the maximum ice extent of the Egesen Stage (ca. 12,700 BP) and therefore must be younger. Relict (fossil) rock glaciers may also be of late glacial age (ca. 16,000 BP). Natural hazards related to rock glaciers are extremely rare and not known from the Austrian Alps.

## 1. Einleitung

---

In den letzten 20 Jahren hat die Bedeutung des Permafrostes in den Alpen, bedingt durch die Klimaerwärmung und die damit verbundenen Naturgefahren, stark zugenommen. Permafrost ist in den Alpen weit verbreitet und bedeckt in Österreich immerhin eine Fläche von bis zu 1.600 km<sup>2</sup> (Ebohon & Schrott 2008) bzw. 2.000 km<sup>2</sup> (Lieb 1998). Blockgletscher zählen zu den auffallendsten und häufigsten Formen des Permafrostes in den Alpen. Allein das Blockgletscherinventar für das Bundesland Tirol umfasst über 3.000 Blockgletscher mit einer Gesamtfläche von 167 km<sup>2</sup> (Krainer & Ribis 2012). Daneben tritt Permafrost auch in Lockersedimenten außerhalb der Blockgletscher, vor allem im Hangschutt und in Moränenablagerungen sowie im Festgestein auf.

Die Untersuchung von Blockgletschern in den österreichischen Alpen begann 1928 mit einer Beschreibung des Blockgletschers in der Inneren Ölgrube (Kaunertal) durch Finsterwalder (1928). In den letzten 30 Jahren wurden einige Blockgletscher im Detail untersucht (siehe Krainer et al. 2012b) und alle Blockgletscher inventarmäßig erfasst (Vorarlberg: Stocker 2012a, 2012b; Tirol: Krainer & Ribis 2012; Salzburg, Oberösterreich, Steiermark, Kärnten und Osttirol: Kellerer-Pirklbauer et al. 2012). Dagegen existieren über den Permafrost außerhalb der Blockgletscher nach wie vor nur wenige Daten.

Die Untersuchung von Blockgletschern umfasst eine geomorphologische und geologische Detailkartierung einzelner Blockgletscher einschließlich deren Einzugsgebiete, Korngrößenanalyse, Bodentemperaturmessungen, Messungen der Fließbewegung sowie hydrologische und geophysikalische Untersuchungen. Der aktive Blockgletscher im Äußeren Hochebenkar ist einer jener Blockgletscher, die in den letzten Jahren intensiv untersucht wurden. An diesem Blockgletscher werden auch bereits seit 1938 Bewegungsmessungen durchgeführt. Damit weist dieser Blockgletscher auch die weltweit längste Messreihe auf. Bevor der Blockgletscher im Äußeren Hochebenkar im Detail vorgestellt wird, soll in diesem Beitrag ein allgemeiner Überblick über die Morphologie, Dynamik und Entstehung von Blockgletschern präsentiert werden. Ausführliche Darstellungen finden sich bei Haerberli 1985, Vitek & Giardino 1987 und Barsch 1996 (siehe auch Haerberli et al. 2006, 2010; Gärtner-Roer et al. 2010).

## Definition

Vitek & Giardino (1987) schlagen vor, Blockgletscher nach ihrer Morphologie und nicht nach ihrer Genese zu definieren. Sie bezeichnen Blockgletscher als lappen- bis zungenförmige, langsam kriechende Körper aus einem Gemisch von Schutt und Eis mit steilen Rändern und einer steilen Stirn, die sich hangabwärts bewegen.

Die gängigste Definition für Blockgletscher stammt von Barsch (1996): Blockgletscher sind lappen- bis zungenförmige Körper aus ständig gefrorenem, unverfestigtem Material, übersättigt mit interstitiellem Eis (Eiszement) und Eislinsen, die sich kriechend hang- oder talabwärts bewegen als Folge der internen Deformation des Eises (siehe auch Haerberli 1985; Whalley & Martin 1992; Haerberli et al. 2006; Kääh 2007).

## Morphologie

Blockgletscher, vor allem wenn sie aktiv sind, heben sich morphologisch deutlich von ihrer Umgebung ab, sind an den Rändern und im Stirnbereich scharf begrenzt und meist 15–30 m, selten bis über 50 m mächtig (Abb. 1). Der Böschungswinkel im Bereich der Stirn und der Flanken liegt aufgrund der Aktivität häufig zwischen 40 und 45° und damit deutlich über dem natürlichen Böschungswinkel. Die Stirn ist bei aktiven Blockgletschern frisch und der Schutt enthält neben den Blöcken auch viel Feinmaterial. Aufgrund der Aktivität fehlt Bewuchs.

Die Oberfläche von Blockgletschern besteht meist aus einer bis zu mehreren Metern mächtigen, grobblockigen Schuttlage, die im Sommer nicht gefroren ist und als Auftauschicht („active layer“) bezeichnet wird. Diese Schuttlage ummantelt den gefrorenen Körper des Blockgletschers und schützt das Permafrosteis des gefrorenen Körpers in den Sommermonaten vor verstärktem Abschmelzen. Die Oberfläche aktiver Blockgletscher zeigt häufig eine markante Morphologie in Form von transversalen und longitudinalen Rücken

und Vertiefungen mit Höhenunterschieden von bis zu mehreren Metern (Abb. 1). Diese Rücken und Vertiefungen entstehen durch die Fließbewegung des Blockgletschers. In der Wurzelzone ist bei vielen Blockgletschern eine Depression ausgebildet, in der sich in den Sommermonaten Schmelzwässer sammeln und kleine Seen bilden. Bei fossilen Blockgletschern sind dagegen aufgrund des völligen Abschmelzens des Eises eine unregelmäßige Oberflächenmorphologie und Einsinkstrukturen zu beobachten. Bei aktiven Blockglet-

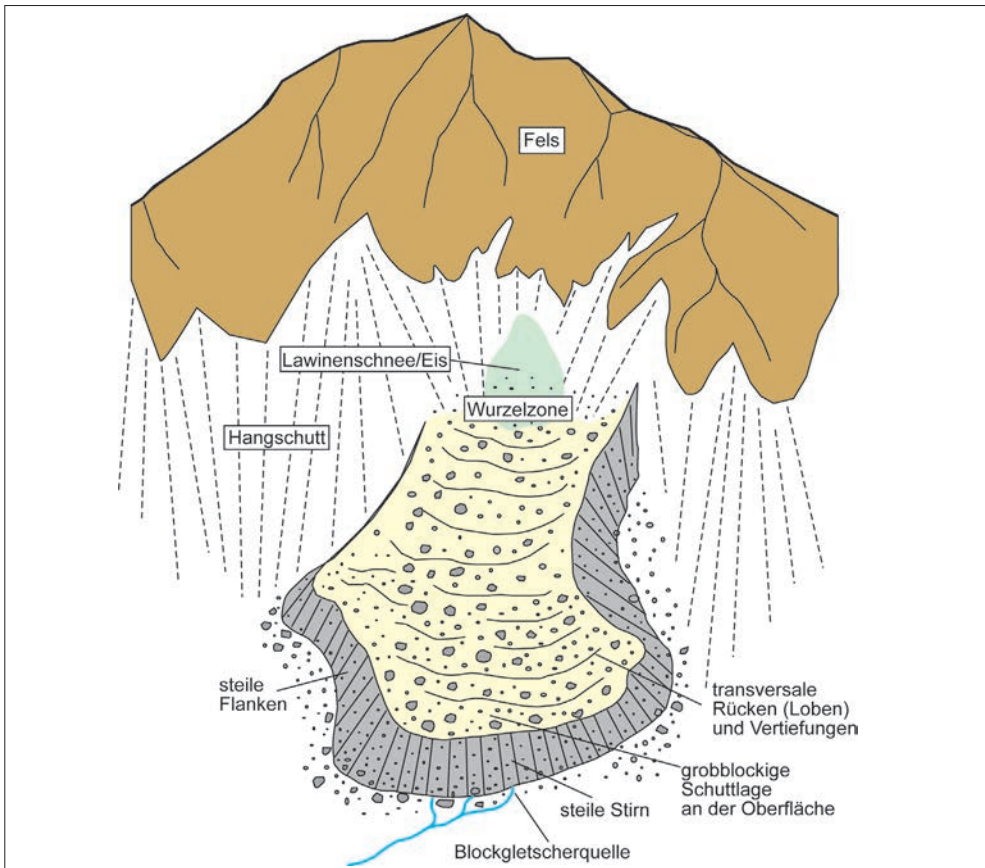


Abb. 1: Schematische Darstellung eines Blockgletschers mit den typischen morphologischen Merkmalen

schern zeigt die oberflächliche Schuttlage nur wenig Vegetation, während fossile Blockgletscher meist stärker bewachsen sind.

Hinsichtlich ihrer Form werden zungenförmige, lappenförmige und komplexe Blockgletscher unterschieden. Bei zungenförmigen Blockgletschern ist das Verhältnis Länge zu Breite  $> 1$  und bei lappenförmigen Blockgletschern  $< 1$ . Komplexe Blockgletscher besitzen zwei oder mehrere Zungen oder bestehen aus mehreren, übereinanderliegenden Blockgletschergenerationen unterschiedlicher Aktivität. Die meisten Blockgletscher in den österreichischen Alpen sind 100 bis 700 m lang, 50 bis 200 m breit und bedecken eine Fläche zwischen 0,01 und 0,1 km<sup>2</sup>. Die größten aktiven

Blockgletscher in Österreich sind bis zu 1,7 km lang, mehrere 100 m breit und bedecken eine Fläche von bis zu 0,6 km<sup>2</sup>.

### Klassifikation

Hinsichtlich ihrer Aktivität können aktive, inaktive und fossile Blockgletscher unterschieden werden (siehe ausführliche Diskussion in Barsch 1996).

Aktive Blockgletscher (Abb. 2) enthalten Eis und bewegen sich langsam abwärts mit Fließgeschwindigkeiten von meist einigen Zentimetern bis einigen Dezimetern pro Jahr.



Abb. 2: Die Zunge des aktiven Blockgletschers im Inneren Reichenkar (westliche Stubaier Alpen) mit steiler Stirn und transversalen Rücken und Vertiefungen auf der grobblockigen Oberfläche



Inaktive Blockgletscher enthalten ebenfalls Eis, sind aber stationär. Es können zwei Arten von inaktiven Blockgletschern unterschieden werden, nämlich a) klimatisch inaktive und b) dynamisch inaktive Blockgletscher. Bei klimatisch inaktiven Blockgletschern führt das klimatisch bedingte zunehmende Abschmelzen des Permafrosteises zu einer Ausdünnung des gefrorenen Körpers. Die Mächtigkeit des gefrorenen Körpers reicht nicht mehr aus, um interne Deformationen im Eis und damit Kriechbewegungen auszulösen, der Blockgletscher kommt zum Stillstand.

Bei dynamisch inaktiven Blockgletschern reicht die Neigung des Untergrundes nicht aus, oder die Schutzzufuhr in der Wurzelzone ist zu gering, um den Blockgletscher in Bewegung zu halten.

Fossile (oder reliktsche) Blockgletscher enthalten kein Eis mehr und sind meist schon stärker bewachsen (Abb. 3). Die Unterscheidung von aktiven und inaktiven Blockgletschern ist schwierig, daher werden diese beiden Typen auch als intakte Blockgletscher zusammengefasst. Eine Unterscheidung ist oft nur durch aufwendige Bewegungsmessungen möglich. Zwischen den einzelnen Typen bestehen fließende Übergänge.

Betreffend Eisgehalt können zwei Typen unterschieden werden: eiszementierte Blockgletscher und Blockgletscher mit einem reinen Eiskern. Bei eiszementierten Blockgletschern besteht der gefrorene Eiskörper aus einem Gemisch aus Schutt und Eis, wobei das Eis häufig den Porenraum zwischen den Gesteinskomponenten ausfüllt. Bei den allermeisten



Abb. 3: Zwei kleine, reliktsche (fossile), bereits stark bewachsene Blockgletscher im hinteren Ultental (Südtirol)

Blockgletschern in den österreichischen Alpen handelt es sich um eiszementierte Blockgletscher, die reine Permafrosterscheinungen darstellen.

Einzelne, meist größere Blockgletscher besitzen einen Kern aus reinem, grobkörnigen, gebänderten Eis (Gletschereis) wie zum Beispiel der Blockgletscher im Reichenkar (westliche Stubai Alpen; Krainer & Mostler 2000a, 2000b; Krainer et al. 2002; Hausmann et al.

2007) oder im Gletscherkar im Bereich der Hohen Gaisl in den Dolomiten (Krainer et al. 2010). Am Blockgletscher Murfreit in der nördlichen Sellagruppe (Krainer et al. 2012a) wurde ein ungefähr 40 m langer, reiner Eiskern erbohrt. Blockgletscher mit einem reinen Eiskern entstehen aus zurückschmelzenden, schuttbedeckten Kargletschern (siehe Shroder et al. 2000).

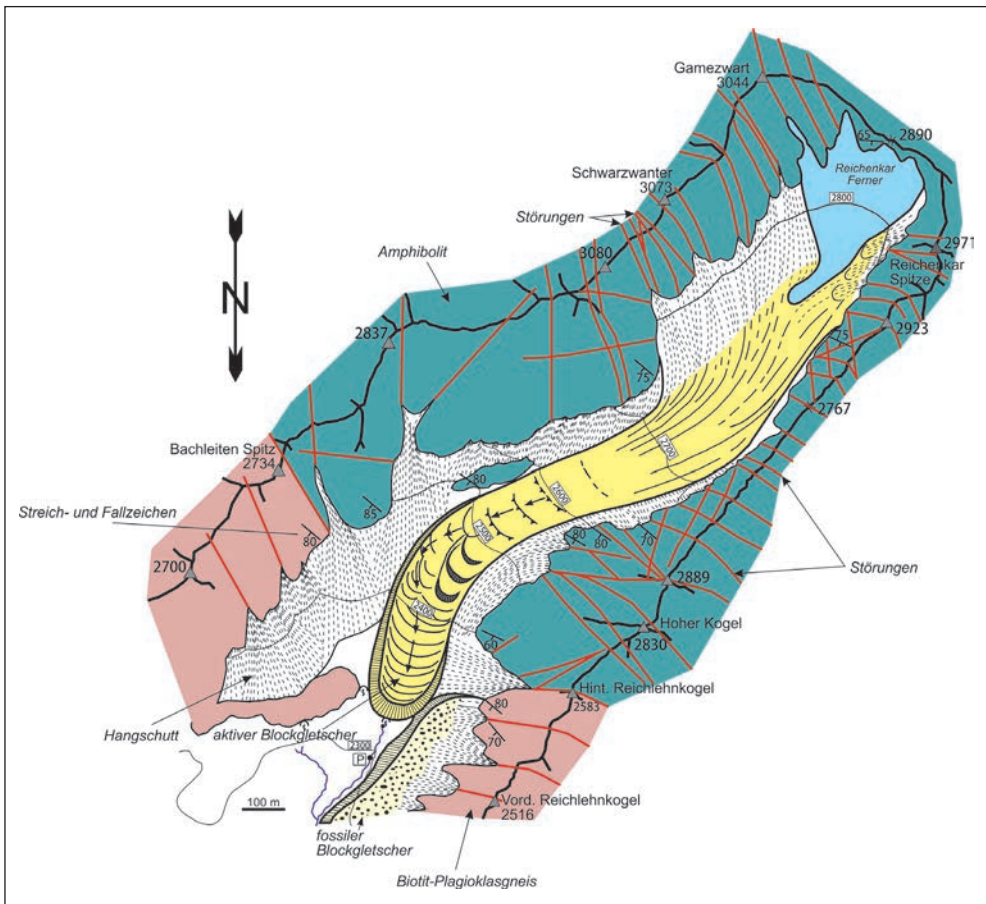


Abb. 4: Geologisch-geomorphologische Karte des aktiven Blockgletschers im Inneren Reichenkar (westliche Stubai Alpen)

## 2. Untersuchungsmethodik

Zum Verständnis der Entstehung und Dynamik aktiver Blockgletscher sind umfangreiche Untersuchungen notwendig. Dazu stehen unterschiedliche, teilweise aufwendige und kostenintensive Methoden zur Verfügung. Eine wichtige Grundlage für das Verständnis der Entstehung und Dynamik eines Blockgletschers ist eine detaillierte geologische und geomorphologische Kartierung des Blockgletschers und seines Einzugsgebietes. Die Kartierung soll sowohl die Locker- als auch die Festgesteine einschließlich Lagerungsverhältnisse,

Klüfte und Störungen beinhalten (Abb. 4). Untersucht wird auch die Korngrößenverteilung.

Bodentemperaturmessungen an der Basis der winterlichen Schneedecke (BTS) und in verschiedenen Tiefen in der Schuttlage geben Auskunft darüber, ob ein Blockgletscher Eis enthält. Auch die Mächtigkeit der ungefrorenen Schuttlage lässt sich daraus abschätzen. Dazu werden Temperatursensoren an der Oberfläche des Blockgletschers oder in einer bestimmten Tiefe in der Schuttlage installiert, die dann in einem bestimmten Zeitintervall (meist im Abstand von 1 oder 2 Stunden) die Temperatur messen und speichern.



Abb. 5: GPS-Basisstation, eingerichtet auf einem Fixpunkt auf anstehendem Fels neben der Zunge des aktiven Blockgletschers in der Inneren Ölgrube (Kaunertal)



Fließbewegungen eines aktiven Blockgletschers können entweder durch photogrammetrische Methoden (Vergleich von Luftbildern oder hochauflösenden Laserscan-Aufnahmen von unterschiedlichen Aufnahmezeitpunkten) oder durch terrestrische Vermessungsmethoden (Theodolit) erfasst werden (siehe auch Kapitel 7 in diesem Buch). Heute wird die Fließgeschwindigkeit meist mit differentiellem GPS gemessen (Abb. 5). Für die Vermessung mit Theodolit oder GPS muss zunächst ein Messnetz am Blockgletscher eingerichtet werden in Form von Messmarken auf großen Felsblöcken. Zusätzlich sind einige Fixpunkte neben dem Blockgletscher notwendig. Die Messpunkte werden dann in bestimmten Zeitabständen eingemessen (z.B. im Jahresintervall).

Zur Untersuchung des Abflussverhaltens wurden bei mehreren Blockgletschern in den Öztaler Alpen am Bach nahe der Blockgletscherstirn Pegelmessstationen eingerichtet (Abb. 6). Diese sind mit einem Drucksensor ausgestattet, der stündlich die Wasserhöhe aufzeichnet, sowie mit einem Temperatursensor zur Messung der Wassertemperatur. An einigen Pegelmessstellen wird auch die elektrische Leitfähigkeit gemessen. Die Durchflussmenge wird bei verschiedenen Pegelständen mit der Salzverdünnungsmethode bestimmt. Die Quelltemperatur wird mit Temperatursonden gemessen, die direkt am Quellaustritt installiert werden.

Wasserproben wurden für chemische Analysen (Anionen, Kationen, Schwermetalle, pH-Wert, stabile Isotopen) entnommen. Mit automatischen Probensammlern kön-



Abb. 6: Pegelmessstelle am Blockgletscherbach vor der steilen Stirn des aktiven Blockgletschers im Inneren Reichenkar (westliche Stubai Alpen)

nen Blockgletscherquellen in bestimmten Zeitintervallen (z.B. einmal täglich) beprobt werden, um saisonale Schwankungen in der Wasserchemie zu untersuchen (siehe Kapitel 6 in diesem Buch). Markierungsversuche mit Farbtacern geben Auskunft über die Fließgeschwindigkeit des Wassers im Blockgletscher. Geophysikalische Untersuchungsmethoden wie Georadar, Seismik, Gravimetrie und Geoelektrik sind aufwendig und teuer, liefern aber Daten über die interne Struktur von Blockgletschern (Gesamtmächtigkeit, Mächtigkeit des gefrorenen Körpers, Eisanteil, interne Strukturen wie z.B. Scherbahnen).

Kernbohrungen zählen zu den aufwendigsten und kostenintensivsten Methoden (Abb. 7),



Abb. 7: Kernbohrung am aktiven Blockgletscher im Bereich der Lazaunalm im hinteren Schnalstal (südliche Ötztaler Alpen, Südtirol)

liefern aber einen direkten Einblick in den Aufbau und die Zusammensetzung eines Blockgletschers im Bereich des Bohrlochs. Außerdem können die Eiskerne mit verschiedensten Methoden analysiert werden (z.B. geochemische Analysen, Isotopen- und Pollenanalysen,  $^{14}\text{C}$ -Datierungen) und im Bohrloch können Messinstrumente (z.B. Temperatursensoren, Inklinometer) installiert werden. Kernbohrungen auf Blockgletschern wurden bislang in Österreich nicht durchgeführt, in Südtirol wurden in den letzten Jahren gleich mehrere Bohrungen abgeteuft, die sensationelle Ergebnisse über das Alter und die chemische Zusammensetzung des Eises lieferten.

### 3. Bestimmende Parameter in Blockgletschern

---

#### Korngrößenverteilung

Die Korngrößenverteilung der ungefrorenen Schuttlage ist vor allem für das thermische Verhalten eines Blockgletschers wichtig, sie beeinflusst aber auch dessen Hydrologie: je feinkörniger das Material, umso langsamer fließt das Wasser durch den Schutt und umso größer ist das Rückhalte- bzw. Speichervermögen. Die Korngrößenverteilung bestimmt Porosität und Permeabilität des Schuttmantels, davon hängt es ab, wie rasch die atmosphärische Luft in den Schuttmantel eindringen kann.

Aktive und inaktive Blockgletscher besitzen einen bis zu mehrere Meter mächtigen ungefrorenen Schuttmantel. Aufgrund der Korngröße unterscheiden Ikeda & Matsuoka (2006) „bouldery rock glaciers“ (grobblockige Blockgletscher) und „pebbly rock glaciers“ (feinblockige Blockgletscher). Bei grobblockigen Blockgletschern besteht die Schuttlage häufig aus zwei Lagen: a) einer grobblockigen Lage mit wenig bis keinem Feinanteil an der Oberfläche (meist um 1 m mächtig), unterlagert von b) einer Schuttlage mit einem höheren Feinanteil. Feinblockige Blockgletscher sind deutlich feinkörniger und auch an der Oberfläche ist Feinmaterial vorhanden. Bei grobblockigen Blockgletschern liegt die durchschnittliche Korngröße meist zwischen 20 und 100 cm, auch Blöcke mit einem Durchmesser von über 100 cm sind nicht

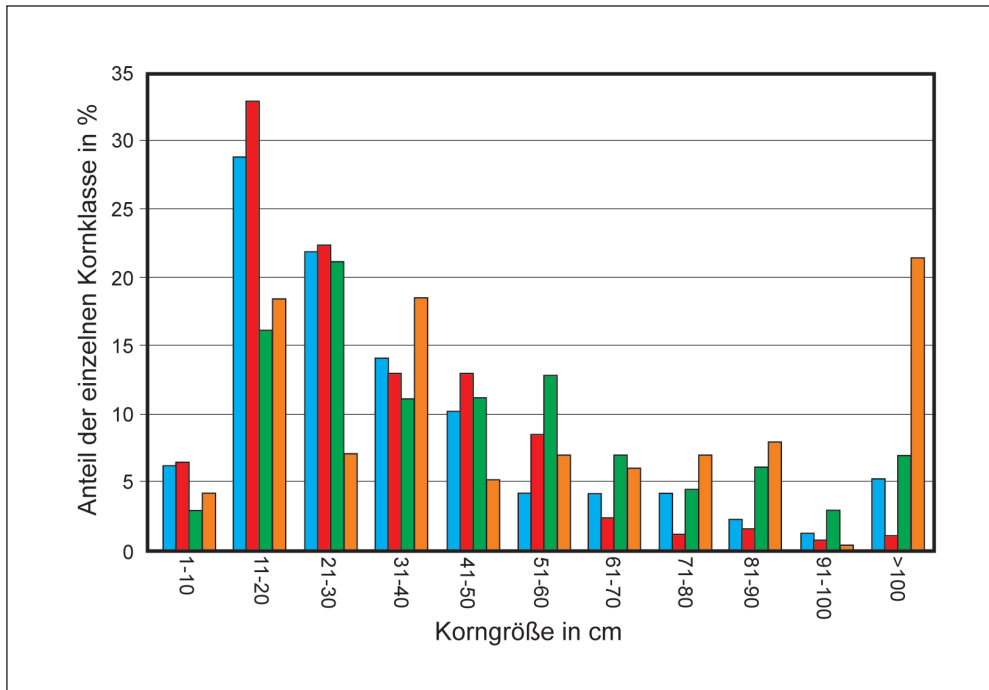


Abb. 8: Korngrößenverteilung der grobkörnigen, oberflächlichen Schuttlage auf einem aktiven Blockgletscher im Wannenkare (Windachtal, westliche Stubai Alpen), gemessen auf vier verschiedenen Flächen (siehe unterschiedliche Farben). Die Korngröße bewegt sich meist zwischen 11 und 50 cm, auch Blöcke mit einem Durchmesser von > 100 cm sind nicht selten.

selten (Abb. 8). Auf feinblockigen Blockgletschern liegt die durchschnittliche Korngröße unter 20 cm.

Die Oberflächenrauigkeit hat auch einen wesentlichen Einfluss auf das thermische Regime. Grobblockige Oberflächen führen im Gegensatz zu feinkörnigen Substraten zu einer sehr deutlichen Herabsetzung der durchschnittlichen Untergrundtemperatur.

Die Korngröße der Schuttlage hängt im Wesentlichen von a) der Gesteinsart im Liefergebiet und b) dem Grad der Deformation der Gesteine (Lagerungsverhältnisse, Klüfte, Störungen) ab.

In den Ötztaler Alpen, die im Wesentlichen aus Glimmerschiefern, Paragneisen, Orthogneisen und Amphiboliten aufgebaut sind, handelt es sich fast durchwegs um grobblockige Blockgletscher (z.B. Berger et al. 2004; Krainer & Mostler 2000a, 2004). Feinblockige Blockgletscher findet man beispielsweise in den Hohen Tauern im Bereich der Oberen Schieferhülle, die aus diversen Phylliten und Kalkglimmerschiefern besteht, welche feinsplättrig verwittern. Auch in den Dolomiten und in den Nördlichen Kalkalpen ist die Schuttlage der Blockgletscher meist deutlich feinkörniger als in den Ötztaler Alpen (Krai-

ner et al. 2010, 2012). Auf vielen Blockgletschern schwankt die Korngröße auf der Oberfläche sehr stark und feinkörnige Bereiche grenzen oft an sehr grobkörnige Bereiche.

Kornsummenkurven von Proben, die im Bereich der Stirn entnommen wurden und einen höheren Feinanteil aufweisen, zeigen durchwegs einen flachen Verlauf, ähnlich wie bei Grundmoränen. Die Werte der Sortierung, berechnet nach der „Inclusive Graphic Standard Deviation“ (Folk & Ward 1957) liegen

durchwegs  $> 2 \phi$  (sehr schlecht bis extrem schlecht sortiert; z.B. Berger et al. 2004, Krainer & Mostler 2004, Krainer et al. 2010).

### Temperatur in der Schuttlage

Die Temperatur an der Oberfläche der Schuttlage bzw. an der Basis der winterlichen Schneedecke (BTS: Bottom Temperature of Winter Snowcover; Haeberli 1973) gibt Aus-

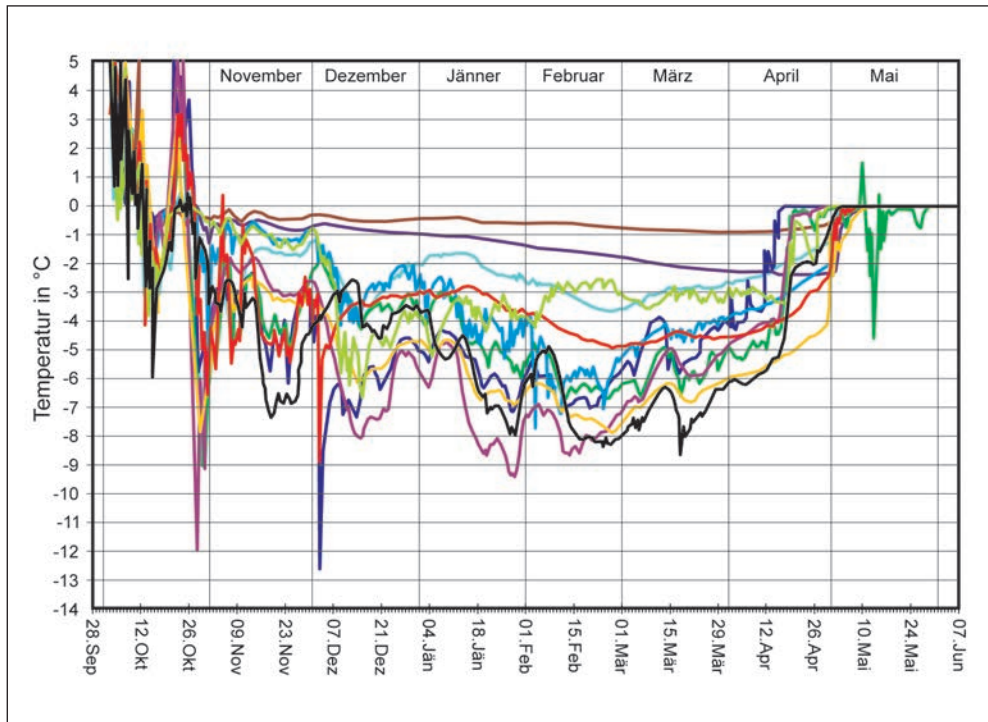


Abb. 9: Temperaturen an der Basis der winterlichen Schneedecke an mehreren Stellen auf einem aktiven Blockgletscher im Wannenkarn (Windachtal, westliche Stubaier Alpen) und neben dem Blockgletscher (oberste 2 Linien: braun und lila). Die BTS-Werte am Blockgletscher sind unterschiedlich (je nach Mächtigkeit der Schneedecke, Korngröße und Mächtigkeit der Schuttlage), zeigen aber für den Zeitraum Jänner bis März Temperaturen, die meist zwischen  $-3$  und  $-8$  °C liegen, was auf das Vorhandensein von Permafrosteis im Untergrund hinweist. Die BTS-Werte, gemessen neben dem Blockgletscher auf permafrostfreiem Untergrund, sind deutlich höher.



kunft darüber, ob im Untergrund Permafrostbedingungen vorherrschen oder nicht. Eine Schneedecke von ca. 1 m Mächtigkeit wirkt wie eine Isolierschicht, die von der atmosphärischen Luft nicht mehr durchdrungen wird. Entsprechend wird die Temperatur an der Basis der winterlichen Schneedecke im Wesentlichen vom thermischen Verhalten des Untergrundes beeinflusst. Ist Eis im Untergrund vorhanden, sind die Temperaturen an der Basis der winterlichen Schneedecke deutlich tiefer als an Stellen, wo im Untergrund kein Eis vorhanden ist.

Inzwischen liegen von zahlreichen Blockgletschern, auch in den Ötztaler Alpen BTS-Messungen vor. Auf aktiven Blockgletschern liegen in den Wintermonaten (Jänner bis März) die Temperaturen an der Basis der winterlichen Schneedecke fast immer unter  $-3\text{ °C}$ , z.T. sogar unter  $-10\text{ °C}$ . Sobald die Schneedecke etwa 1 m erreicht, sind an der Basis auch keine Tagesschwankungen im Temperaturgang zu beobachten (Abb. 9). Längerfristige Schwankungen sind sehr wohl zu erkennen. Wärmere Phasen oder extrem kalte Phasen im Winter sind oft auch an der Basis der winterlichen Schneedecke zu erkennen, meist mit einer zeitlichen Verzögerung. Dies hängt vermutlich mit der Oberflächenmorphologie der Blockgletscher zusammen. Von den Rücken wird im Winter der Schnee oft weggeweht, sodass die atmosphärische Luft langsam in den Blockgletscher eindringen kann.

In der Schuttlage ist die Temperatur an der Oberfläche (= Basis der Schneedecke) am tiefsten. Mit zunehmender Tiefe nimmt die Temperatur innerhalb der Schuttlage leicht

zu, bis in eine Tiefe von 2 m um rund  $1\text{--}2\text{ °C}$ . Temperaturschwankungen werden mit zunehmender Tiefe zunehmend gedämpft.

Mit Beginn der Schneeschmelze, die meist Ende April bis Anfang Mai einsetzt, steigt die Temperatur an der Basis der Schneedecke innerhalb weniger Tage rasch auf  $0\text{ °C}$  an und verbleibt bei diesem Wert, bis die Schneedecke über dem Temperatursensor völlig abgeschmolzen ist.

Bei fehlender Schneebedeckung in den Sommermonaten sind dagegen in der obersten Schuttlage deutliche Tageszyklen (v.a. bei Schönwetter) zu beobachten, die mit zunehmender Tiefe immer undeutlicher werden. Die Temperatur nimmt innerhalb der Schuttlage in den Sommermonaten rasch ab, in 2 m Tiefe ist kein Tagesgang mehr zu erkennen und die Temperatur liegt in dieser Tiefe im Sommer meist bei max.  $2\text{--}3\text{ °C}$  (Krainer & Mostler 2000a, 2000b, 2004; Berger et al. 2004; Krainer et al. 2010, 2012a).

## Fließbewegungen

Bewegungsmessungen an Blockgletschern werden seit fast 100 Jahren durchgeführt. In Österreich wurden solche Messungen erstmals am Blockgletscher im Äußeren Hochebenkar und in der Inneren Ölgrube (Kauertal) durchgeführt (Pillewizer 1938, 1957).

Die meisten aktiven Blockgletscher bewegen sich mit Geschwindigkeiten von einigen cm bis 1 m pro Jahr (Haerberli 1985, Whalley & Martin 1992). Laut Barsch (1996) liegen die Bewegungsraten zwischen  $1\text{--}2\text{ cm}$  und

1–2 m pro Jahr. Meist liegen die Bewegungen unter 1 m pro Jahr (siehe z.B. Calkin et al. 1987; Benedict et al. 1986; Kaufmann 1996, 2012; Koning & Smith 1999; Isaksen et al. 2000; Kaufmann & Ladstädter 2002, 2004; Lambiel & Delaloye 2004; Janke 2005; Kaufmann et al. 2006, 2007; Krainer et al. 2010, 2012a). Einige wenige Blockgletscher zeigen höhere Bewegungsraten von bis zu 2 m pro Jahr (Blockgletscher Innere Ölgrube – Abb. 10 – und Kaiserberg) und 3 m pro Jahr (Blockgletscher Reichenkar, Krainer & Mostler 2006). Der Blockgletscher im Äußeren Hochebenkar bewegte sich mit Geschwindigkeiten von bis zu 5 m pro Jahr (Schneider & Schneider 2001). Der Blockgletscher

im Reichenkar zeigt das ganze Jahr hindurch konstante Bewegungsraten, während der Blockgletscher in der Inneren Ölgrube im Sommer deutlich höhere Fließgeschwindigkeiten aufweist als im Winter (Krainer & Mostler 2006). Bei einigen Blockgletschern haben die Fließgeschwindigkeiten von 1990 bis 2003 deutlich zugenommen, danach wieder leicht abgenommen (Krainer & Mostler 2006, Delaloye et al. 2008).

Die Bewegung von aktiven Blockgletschern erfolgt ähnlich wie bei Gletschern durch interne Deformation. Zusätzlich spielt bei einigen Blockgletschern auch basales Gleiten eine wichtige Rolle (Hausmann et al. 2007, 2012; Krainer & Mostler 2006). Durch Deforma-

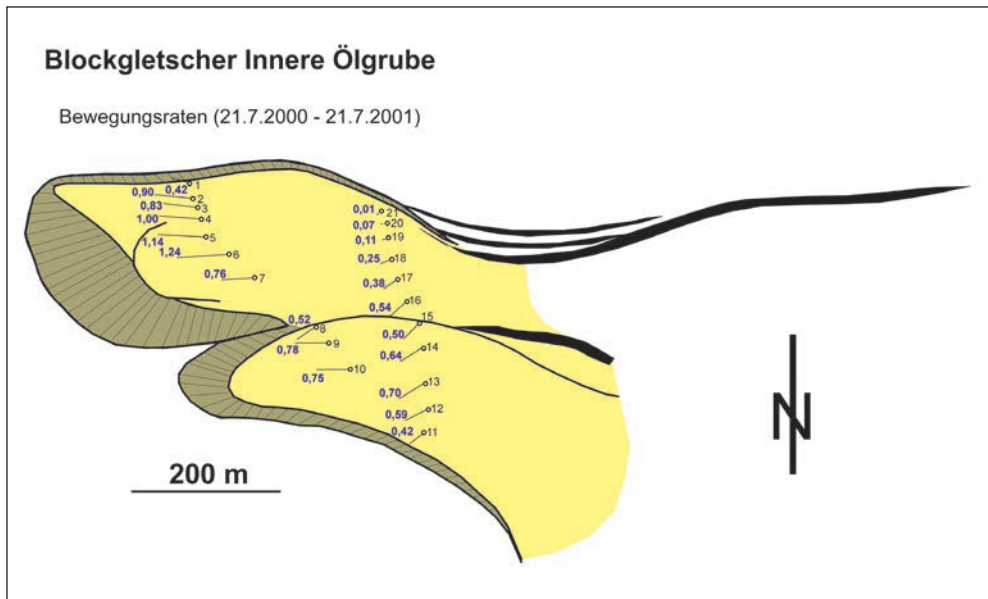


Abb. 10: Bewegungsraten am aktiven Blockgletscher der Inneren Ölgrube (Kauental) für den Zeitraum 21. Juli 2000 bis 21. Juli 2001, gemessen mit differentiellm GPS. Die Kreise zeigen die Positionen der Messmarken am Beginn der Messungen, Länge und Richtung der Pfeile die relative Geschwindigkeit und Fließrichtung des Blockgletschers an diesen Positionen. Die Zahlen (blau) zeigen die tatsächliche Fließbewegung während des Messzeitraums in m an.

tionsmessungen in Bohrlöchern auf aktiven Blockgletschern konnten auch tatsächlich basale Gleithorizonte nachgewiesen werden (Arenson et al. 2002, Krainer et al. 2014).

## Hydrologie

Aktive Blockgletscher sind durch sehr komplexe hydrologische Verhältnisse charakterisiert. Lange Zeit war über die Hydrologie von Blockgletschern nur wenig bekannt, es existierten nur Einzelmessungen betreffend Abflussmenge und Wassertemperatur an der Blockgletscherquelle (siehe Zusammenfassung in Haeberli 1985, Whalley & Martin 1992, Barsch 1996). Krainer & Mostler (2002) haben erstmals bei mehreren aktiven Blockgletschern Pegelmessstellen eingerichtet, um Dauermessungen durchzuführen. Neben dem Abfluss wurden auch Wassertemperatur, elektrische Leitfähigkeit und andere Parameter gemessen (Krainer et al. 2007).

Generell fließt Wasser von Beginn der Schneeschmelze bis zum Wiedergefrieren im Spätherbst hauptsächlich in der ungefrorenen Schuttlage entlang von Kanälen an der Oberfläche des gefrorenen Permafrostkörpers. Ähnlich wie bei Gletschern können diese Kanäle auch tief in den gefrorenen Körper eingeschnitten sein, auch entlang von Spalten kann Wasser in den gefrorenen Körper eindringen und an der Basis des Blockgletschers im feinkörnigen Schutt weiterfließen. Meist tritt das Wasser in Form einer oder mehrerer Blockgletscherquellen am Fuße der steilen Stirn zutage und fließt als oberflächliches Ge-

rinne ab. Viele Blockgletscher zeigen keinen oberflächlichen Abfluss, das Wasser fließt im Schutt des Blockgletschers ab.

Da das Wasser in aktiven Blockgletschern in Kontakt mit dem Eis fließt, liegt die Wassertemperatur an der Quelle typischerweise den gesamten Sommer hindurch konstant unter 1,5 °C, meist zwischen 0,5 und 1 °C.

Die bisherigen Untersuchungen zeigen, dass das Abflussverhalten von aktiven Blockgletschern vor allem vom lokalen Wettergeschehen, vom thermischen Verhalten und den physikalischen Eigenschaften (Korngrößenverteilung, Mächtigkeit der Schuttlage), der Größe des Einzugsgebietes und den Festgesteinen im Einzugsgebiet gesteuert wird.

Generell ist der Abfluss aktiver Blockgletscher gekennzeichnet durch ausgeprägte saisonale und tägliche Schwankungen (Abb. 11). Während der Hauptschneesmelze im Frühling und Frühsommer (Mitte Mai bis Anfang Juli) sowie während sommerlicher Starkniederschläge fließt ein Großteil des Wassers auf der Oberfläche des gefrorenen Permafrostkörpers im Schutt rasch ab und verursacht Spitzenabflüsse. Warme Schönwetterphasen während der Schneeschmelze verursachen bei mittelgroßen bis großen Blockgletschern einen ausgeprägten Tagesgang im Abfluss mit den niedrigsten Abflusswerten um die Mittagszeit und Abflussspitzen in den späten Abendstunden. Die Tagesschwankungen können bis zu 150 l/s betragen. Im Spätsommer und Herbst geht der Abfluss kontinuierlich zurück, wird nur durch einzelne niederschlagsinduzierte Spitzen unterbrochen. Ab dem Spätherbst bis zum Beginn der Schneeschmelze ist der Ab-

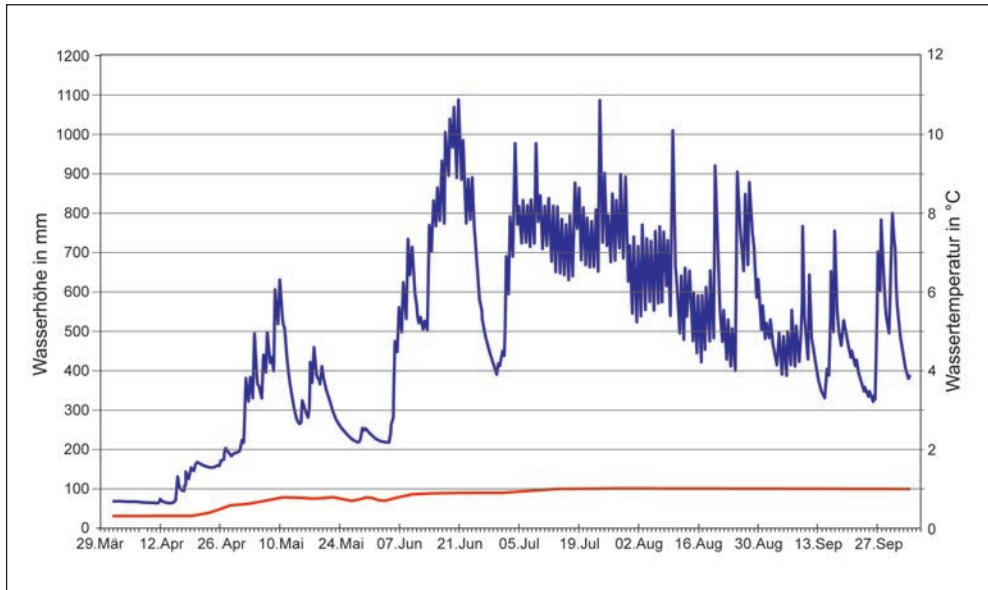


Abb. 11: Abflussmenge (blaue Linie) und Wassertemperatur (rote Linie) des Blockgletschers im Inneren Reichenkar für das Jahr 2013. Die Schneeschmelze setzte Mitte April zögerlich ein und erreichte um den 10. Mai einen ersten Höhepunkt. Anschließend ging der Abfluss, bedingt durch die kühle Witterung stark zurück und erst Anfang Juni kam es zu einem starken Anstieg des Abflusses mit Abflussspitzen um den 21. Juni. Von Juli bis Ende September ist ein kontinuierlicher Rückgang der Abflussmenge zu beobachten. Dieser wurde immer wieder durch einzelne Abflussspitzen unterbrochen, ausgelöst durch Niederschlagsereignisse. Im Juli und August sind auch deutliche Tageszyklen erkennbar.

fluss entweder sehr gering (maximal wenige Liter pro Sekunde) oder die Blockgletscherquelle liegt überhaupt trocken. Bei mittelgroßen und großen Blockgletschern mit einem Einzugsgebiet von 1 bis 1,5 km<sup>2</sup> liegen die Abflussspitzen während der Hauptschneeschmelze meist zwischen 300 und 500 l/s, im heißen Sommer 2003 wurden extreme Abflussspitzen von knapp über 1 m<sup>3</sup>/s gemessen. Deutlich geringere oberflächliche Abflüsse zeigen Blockgletscher in Gebirgsgruppen, die hauptsächlich aus Kalk- und Dolomitgesteinen aufgebaut sind (Dolomiten, Nördliche Kalkalpen). Dort fließt ein Großteil des Was-

sers unterirdisch über Kluft- und/oder Karstsysteme ab (Krainer et al. 2010, 2012a).

Von Mitte Mai bis Anfang Juli setzt sich der Gesamtabfluss zum Großteil aus Schmelzwasser des winterlichen Schnees sowie aus Niederschlagswasser zusammen. Der Anteil an Wasser, das durch das Abschmelzen des Permafrostes freigesetzt wird, sowie der Anteil an Grundwasser sind sehr gering. Zum Herbst hin steigt dann der Anteil an Eisschmelze und Grundwasser (und damit auch die elektrische Leitfähigkeit) an.

Markierungsversuche mit Farbtracern haben gezeigt, dass das Wasser mit einer Fließgeschwin-



digkeit von 1 bis 5 m pro Minute durch den Blockgletscher fließt, je nach Korngröße und Gefälle.

In den Gebirgsgruppen, die aus Altkristallin bestehen (Glimmerschiefer, Paragneise, Orthogneise, Amphibolite) ist die elektrische Leitfähigkeit der Blockgletscherquellen meist niedrig, wobei deutliche saisonale Schwankungen zu beobachten sind. Am niedrigsten ist die elektrische Leitfähigkeit bei hohen Abflüssen während der Schneeschmelze im Frühling und Frühsommer sowie bei sommerlichen Starkniederschlägen, bedingt durch den hohen Anteil an Schmelzwasser und Niederschlagswasser. Meist liegen die Werte zwischen 20 und 80  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Zum Herbst hin steigt die elektrische Leitfähigkeit an, weil auch der Anteil an Grundwasser, das generell eine höhere elektrische Leitfähigkeit aufweist, am Gesamtabfluss kontinuierlich ansteigt. Im November werden meist Werte zwischen 100 und 200  $\mu\text{S}/\text{cm}$  erreicht. Auch das durch Abschmelzen von Permafrosteis freigesetzte Wasser kann lokal eine deutlich höhere elektrische Leitfähigkeit aufweisen. Daneben gibt es aktive Blockgletscher, deren Quellen außergewöhnlich hohe elektrische Leitfähigkeiten aufweisen mit Werten von einigen 100  $\mu\text{S}/\text{cm}$  im Frühjahr bis zu mehr als 1000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  im Herbst. Diese Quellen zeigen auch eine interessante Wasserchemie und weisen z.T. außergewöhnlich hohe Konzentrationen an Schwermetallen wie Nickel, Mangan, Zink und Cobalt auf. Geochemische Untersuchungen am Eiskern der Bohrung am Blockgletscher Lazaun im Schnalstal (Südtirol), dessen Blockgletscherquelle ebenfalls eine erhöhte

elektrische Leitfähigkeit und hohe Konzentration an Nickel aufweist, haben gezeigt, dass das Nickel aus dem Eis des Permafrostkörpers freigesetzt wird. Vermutlich ist das auch bei anderen Blockgletscherquellen mit erhöhten Nickel-Konzentrationen der Fall.

#### 4. Alter und Entstehung

---

Das Alter von Blockgletschern ist schwer zu bestimmen, die besten Daten liefern absolute Altersdatierungen ( $^{14}\text{C}$ -Alter) an organischem Material im Permafrosteis (z.B. in das Eis eingetragene kleine Pflanzenreste).

Aktive Blockgletscher in den meisten Gebirgsgruppe liegen altersmäßig innerhalb der maximalen Eisausdehnung während des Egesen-Stadiums mit dem Höhepunkt vor ca. 12.700 Jahren und müssen daher jünger sein. Reliktische (fossile) Blockgletscher können älter sein, müssen aber nach dem Höhepunkt der letzten großen Vereisungsphase (Würm) mit ihrem Höhepunkt vor ca. 20.000 Jahren, also im Spätglazial entstanden sein. Für die reliktsichen Blockgletscher in den östlichen Ostalpen diskutieren Kellerer-Pirklbauer et al. (2012) eine Entstehung im Spätglazial. Viele dieser Blockgletscher entwickelten sich zu reliktsichen (fossilen) Blockgletschern in der Übergangszeit vom Spätglazial zum Holozän oder bereits früher.

Von Blockgletschern liegen bislang nur wenige absolute Altersdaten vor. Zuletzt konnten  $^{14}\text{C}$ -Datierungen an Pflanzenresten im Eis des

Blockgletschers Lazaun im Schnalstal (Südtirol) durchgeführt werden, die an der Basis ein Alter von bis zu 10.300 Jahren ergaben. Demnach begann sich dieser Blockgletscher unmittelbar nach dem Egesen-Stadium zu bilden und blieb bis heute intakt, auch in den wärmeren Perioden ist das Eis nicht vollständig geschmolzen (Krainer et al. 2014).

Einige aktive Blockgletscher sind aber deutlich jünger und haben sich beispielsweise aus stark schuttbedeckten, zurückschmelzenden Kargletschern der Kleinen Eiszeit mit ihrem Höhepunkt um 1850 entwickelt (Berger et al. 2004; Krainer et al. 2010, 2012a).

In den österreichischen Alpen wurden bislang einige Blockgletscher nach der Schmidt-Hammer-Methode datiert (Kellerer-Pirklbauer 2009, Rode & Kellerer-Pirklbauer 2012). Demnach setzte die Entstehung der 5 derart untersuchten intakten Blockgletscher nach dem Egesen-Stadium, sehr wahrscheinlich nach dem Präboreal ein. Die 4 reliktierten (fossilen) Blockgletscher begannen sich vermutlich während des Senders/Clavadel oder Daun-Stadiums, aber sehr wahrscheinlich nicht während des Gschnitz-Stadiums zu bilden (Rode & Kellerer-Pirklbauer 2012).

Im Larstigtal in den Stubai Alpen wurden an zwei fossilen Blockgletschern Expositionsalter von 10.500 bis 10.800 Jahren ermittelt (Ivy-Ochs et al. 2009).

Die Entstehung von Blockgletschern wurde lange unterschiedlich interpretiert. Barsch (1992, 1996) und Haerberli (1985, 1989) haben Blockgletscher ausschließlich als Erscheinungen des alpinen Permafrostes aufgefasst und andere Entstehungsmöglichkeiten strikt

abgelehnt. Diese Auffassung basiert auch auf der klassischen Arbeit von Wahrhaftig & Cox (1959) über Blockgletscher in der Alaska Range. Erstmals haben Potter (1972) und in der Folge Ackert (1998), Clark et al. (1996, 1998) und Potter et al. (1998) am Beispiel des Galena Creek Blockgletschers in Wyoming (USA) gezeigt, dass Blockgletscher auch einen Kern aus massivem, reinem, geschichtetem Eis besitzen können. Inzwischen konnten auch in den Alpen einige Blockgletscher mit einem Kern aus grobkörnigem, gebändertem Gletschereis nachgewiesen werden.

## 5. Bedeutung der Blockgletscher

---

Permafrost ist in den Alpen oberhalb der Waldgrenze weit verbreitet, kann lokal Mächtigkeiten von über 100 m erreichen und hat im Allgemeinen eine stabilisierende Wirkung für große Schuttmassen und steile Felswände. Über Veränderungen des Permafrostes (z.B. Blockgletschereis unter Schuttauflage) liegen nur vereinzelte Punktinformationen vor, da Bohrlochtemperaturmessungen die einzige Möglichkeit darstellen, die Permafrostbedingungen direkt zu untersuchen.

Zahlreiche Beobachtungen in den letzten Jahren weisen im Alpenraum auf eine Zunahme von Felssturzereignissen als direkte Folge der gegenwärtigen Erwärmung hin.

Steile, nordexponierte Flanken (z.B. Bligg Spitze und Weißsee Spitze im Kaunertal) scheinen in diesem Zusammenhang beson-

ders stark betroffen zu sein. Naturgefahren (Muren, Steinschlag), die von Blockgletschern ausgehen, sind allerdings aus den österreichischen Alpen bislang nicht bekannt. Beispiele dafür sind auch alpenweit gesehen sehr selten (z.B. Blockgletscher Murfreit auf der Nordseite der Sella, Krainer et al. 2012a).

Das Eisvolumen der zahlreichen inaktiven und aktiven Blockgletscher ist im Vergleich zum Eisvolumen der Gletscher in Österreich gering. Die bisherigen Untersuchungen haben gezeigt, dass die Menge an Wasser, die durch das verstärkte Abschmelzen des Permafrostes der Blockgletscher freigesetzt wird, im Vergleich zum Gesamtabfluss sehr gering ist (< 5 %). Aus hydrologischen Untersuchungen im Krummgampental (hinteres Kaunertal) geht hervor, dass das vollständige Abschmelzen des Permafrostes in den Blockgletschern und im Hangschutt die Speicherkapazität der Sedimente erhöht, was zu einer Reduktion der Abflussspitzen um bis zu 20 % sowie einer Zunahme des Abflusses während der Trockenwetterphase im Spätherbst und Winter führen wird (Hausmann et al. 2013, Rogger et al. in Vorb.).

In den letzten Jahren wurden im Wasser einiger Blockgletscherquellen in Südtirol (Lazaunalm im Schnalstal, Rossbänk im Ultental) und in Nordtirol (Krummgampental und Wurmetal im Kaunertal, Windachtal und Inneres Hochebenkar bei Obergurgl) teilweise extrem hohe Konzentrationen an Schwermetallen (v.a. Nickel, auch Mangan, Cobalt, Zink) gemessen, die oft weit über dem Grenzwert für Trinkwasser liegen (Thies et al. 2007, Nickus et al. 2014). Detailuntersuchungen an

einigen Quellen haben auch ergeben, dass die Konzentration der Schwermetalle während der Hauptschneesmelze am geringsten ist und mit abnehmender Quellschüttung zum Herbst hin kontinuierlich ansteigt. Dies wurde als Hinweis gewertet, dass die Schwermetalle aus dem Permafrostes freigesetzt werden. Die Analyse des Eiskernes vom Blockgletscher Lazaun hat diese Annahme bestätigt, in einzelnen Horizonten des Kernes wurden im Eis extrem hohe Konzentrationen an Schwermetallen, v.a. Nickel, gemessen. Die Herkunft des Nickels konnte bislang nicht geklärt werden. Bisherige Analysen zeigen, dass die Festgesteine im Einzugsgebiet der Blockgletscher mit erhöhten Nickel-Gehalten im Wasser keine erhöhten Konzentrationen an Nickel aufweisen.

## Literatur

---

- Ackert, R.P. (1998) A rock glacier/debris-covered glacier system at Galena Creek, Absaroka Mountains, Wyoming. *Geografiska Annaler* 80: 267-276.
- Arenson, L., Hoelzle, M. & Springman, S. (2002) Borehole deformation measurements and internal structure of some rock glaciers in Switzerland. *Permafrost and Periglacial Processes* 13: 117-135.
- Barsch, D. (1992) Permafrost Creep and Rockglaciers. *Permafrost and Periglacial Processes* 3: 175-188.
- Barsch, D. (1996) Rockglaciers. Indicators for the Present and Former Geocology in

- High Mountain Environments. Springer Verlag, Berlin, 331 pp.
- Benedict, J.B., Benedict, R.J. & Sanville, D. (1986) Arapaho Rock Glacier, Front Range, Colorado, U.S.A.: A 25-year Resurvey. *Arctic and Alpine Research* 18: 349-352.
- Berger, J., Krainer, K. & Mostler, W. (2004) Dynamics of an active rock glacier (Ötztal Alps, Austria). *Quaternary Research* 62: 233-242.
- Calkin, P.E., Haworth, L.A., & Ellis, J.M. (1987) Rock glaciers of Central Brooks Range, Alaska, U.S.A. In: Giardino, J.R., Shroder, J.F. & Vitek, J.D. (eds), *Rock Glaciers*. Allen & Unwin, London: 65-82.
- Clark, D.H., Steig, E.J., Potter, N., Fitzpatrick, J., Updike, A. & Clark, G.M. (1996) Old ice in rock glaciers may provide long-term climate records. *Eos, Transactions, American Geophysical Union* 77: 217, 221-222.
- Clark, D.H., Steig, E.J., Potter, N. & Gillespie, A.R. (1998) Genetic variability of rock glaciers. *Geografiska Annaler* 80A: 175-182.
- Isaksen, K., Odegard, R.S., Eiken, T & Sollid, J.L. (2000) Composition, flow and development of two tongue-shaped rock glaciers in the permafrost of Svalbard. *Permafrost and Periglacial Processes* 11: 241-257.
- Delaloye, R., Perruchoud, E., Avian, M., Kaufmann, V., Bodin, X., Ikeda, A., Hausmann, H., Kääh, A., Kellerer-Pirklbauer, A., Krainer, K., Lambiel, C., Mihajlovic, D., Staub, B., Roer, I. & Thibert, E. (2008) Recent interannual variations of rockglaciers creep in the European Alps. In: Kane, D.L. & Hinkel, K.M. (eds), *Proceedings, Ninth International Conference on Permafrost (NICOP)*, University of Alaska, Fairbanks, 343-348.
- Ebohon, B. and Schrott, L. (2008) Modelling Mountain Permafrost Distribution. A New Permafrost Map of Austria. In: Kane D.L. & Hinkel K.M. (eds), *Proceedings of the Ninth International Conference on Permafrost (NICOP)*, University of Alaska, Fairbanks, USA, pp. 397-402.
- Finstervalder, S. (1928) Begleitworte zur Karte des Gepatschferners. *Zeitschrift für Gletscherkunde* 16: 20-41.
- Folk, R.L. & Ward, W.C. (1957) Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology* 27: 3-26.
- Gärtner-Roer, I. (2010) Permafrost. In: Voigt, Th., Füssel, H.-M., Gärtner-Roer, I., Huggel, Ch., Marty, Ch., & Zemp, M. (eds), *Impacts of climate change on snow, ice, and permafrost in Europe: Observed trends, future projections, and socioeconomic relevance*, ETC/ACC Technical Paper 2010/13, 66-76.
- Haerberli, W. (1973) Die Basistemperaturen der winterlichen Schneedecke als möglicher Indikator für die Verbreitung von Permafrost in den Alpen. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie* 9: 221-227.



- 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. (1989) Glacier ice-cored rock glaciers in the Yukon Territory, Canada? *Journal of Glaciology* 35: 294-295.
- Haerberli, W., Hallet, B., Arenson, L., Elcochin, R., Humlum, O., Käab, A., Kaufmann, V., Ladanyi, B., Matsuoka, N., Springman, S. & Vonder Mühll, D. (2006) Permafrost Creep and Rock Glacier Dynamics. *Permafrost and Periglacial Processes* 17: 189-214.
- Haerberli, W., Noetzli, J., Arenson, L., Delafoye, 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; special issue): 1043-1058.
- Hausmann, H., Krainer, K., Brückl, E. & Mostler, W. (2007) Internal structure and ice content of Reichenkar rock glacier (Stubai Alps, Austria) assessed by geophysical investigations. *Permafrost and Periglacial Processes* 18: 351-367.
- Hausmann, H., Krainer, K., Brückl, E. & Ullrich, C. (2012) Internal structure, ice content and dynamics of Ölgrube and Kaiserberg rock glaciers (Ötztal Alps, Austria) determined from geophysical surveys. *Austrian Journal of Earth Sciences* 105/2: 12-31.
- Hausmann, H., Krainer, K., Brückl, E., Rogger, M., Chirico, G.B. & Blöschl, G. (2013) Sediment and water storage in an Alpine permafrost catchment area, Krummgampen Valley, Ötztal Alps, Austria. *Austrian Academy of Sciences - ISDR Final Report 2007 - 2011*: 40-51.
- Ikeda, A. & Matsuoka, N. (2006) Pebbly versus boulder rock glaciers: Morphology, structure and processes. *Geomorphology* 73: 279-296.
- Ivy-Ochs, S., Kerschner, H., Maisch, M., Christl, M., Kubik, P.W. & Schlüchter, C. (2009): Latest Pleistocene and Holocene glacier variations in the European Alps. *Quaternary Science Reviews* 28: 2137-2149.
- Janke, J.R. (2005) Long-term flow measurements (1961 – 2002) of Arapaho, Taylor, and Fair rock glaciers, Front Range, Colorado. *Physical Geography* 26: 313-336.
- Käab, A. (2007) Rock Glaciers and Protalus Forms. In: Elias, S.A. (ed), *Encyclopedia of Quaternary Sciences*. Elsevier: 2236-2242.
- Kaufmann, V. (1996) Der Dösener Blockgletscher – Studienkarten und Bewegungsmessungen. *Arbeiten aus dem Institut für Geographie der Univ. Graz* 33: 141-162.
- Kaufmann, V. (2012) The evolution of rock glacier monitoring using terrestrial photogrammetry: the example of Äußeres Hochebenkar rock glacier (Austria). *Austrian Journal of Earth Sciences* 105/2: 63-77.

- Kaufmann V. & Ladstädter R. (2002) Spatio-temporal analysis of the dynamic behaviour of the Hohebenkar rock glaciers (Oetztal Alps, Austria) by means of digital photogrammetric methods. *Grazer Schriften der Geographie und Raumforschung* 37: 119-140.
- Kaufmann, V. & Ladstädter, R. (2004) Documentation of the movement of the Hinteres Langtalkar Rock Glacier. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 35, Part B7, Proceedings, 20th Congress of ISPRS, 12-23 July 2004, Istanbul, Turkey, 893-898.
- Kaufmann, V., Ladstädter, R. & Lieb, G.K. (2006) Quantitative assessment of the creep process of Weissenkar rock glacier (Central Alps, Austria). In: Kaufmann, V. & Sulzer, W. (eds), *Proceedings of the 8th International Symposium on High Mountain Remote Sensing Cartography (HMRSC-VIII)*, Kathmandu, La Paz, Bolivia, March 2005), 77-86.
- Kaufmann, V., Ladstädter, R. & Kienast, G. (2007) 10 years of monitoring of the Doesen rock glacier (Ankogel group, Austria) – A review of the research activities for the time period 1995-2005. In: Petrovič, D. (ed), *Proceedings of the 5<sup>th</sup> Mountain Cartography Workshop*, Bohinj, Slovenia, 29 March-April 2006, pp. 129-144.
- Kellerer-Pirklbauer, A. (2008) The Schmidt-hammer as a relative age dating tool for rock glacier surfaces: Examples from Northern and Central Europe. *Proceedings of the Ninth International Conference on Permafrost (NICOP)*, University of Alaska, Fairbanks, June 29 – July 3, 2008: 913-918.
- Kellerer-Pirklbauer, A. (2009) Wie alt sind Blockgletscher in den Österreichischen Alpen? Das Beispiel der Blockgletscher im Dösenertal, Ankogelgruppe, datiert mit Hilfe der Schmidt-Hammer Methode. *alpine space – man & environment*, Vol. 6, *Klima im Wandel - 20 000 Jahre Klimaentwicklung in Österreich*, 65-76.
- Kellerer-Pirklbauer, A., Lieb, G.K. & Kleinfurchnner, H. (2012) A new rock glacier inventory of the eastern European Alps. *Austrian Journal of Earth Sciences* 105/2: 78-93.
- Koning, D.M. & Smith, D.J. (1999) Movement of King's Throne Rock Glacier, Mount Rae area, Canadian Rocky Mountains. *Permafrost and Periglacial Processes* 10: 151-162.
- Krainer, K. & Mostler, W. (2000a) Reichenkar rock glacier: a glacier derived debris-ice system in the Western Stubai Alps, Austria. *Permafrost and Periglacial Processes* 11: 267-275.
- Krainer, K. & Mostler, W. (2000b) Aktive Blockgletscher als Transportsysteme für Schuttmassen im Hochgebirge: Der Reichenkar Blockgletscher in den westlichen Stubaiern. *Geoforum Umhausen*, Bd. 1: 28-43, Innsbruck.
- 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. (2004) Aufbau und Entstehung des aktiven Blockgletschers im Sulzkar, westliche Stubaier Alpen. *Geo.Alp* 1: 37-55.
- Krainer, K. & Mostler, W. (2006) Flow velocities of active rock glaciers in the Austrian Alps. *Geografiska Annaler* 88A: 267-280.
- Krainer, K. & Ribis, M. (2012) A rock glacier inventory of the Tyrolean Alps (Austria). *Austrian Journal of Earth Sciences* 105(2): 32-47.
- Krainer, K., Mostler, W. & Span, N. (2002) A glacier-derived, ice-cored rock glacier in the Western Stubai Alps (Austria): Evidence from ice exposures and ground penetrating radar investigation. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie* 38: 21-34.
- Krainer, K., Lang, K. & Hausmann, H. (2010) Active rock glaciers at Croda Rossa/Hohe Gaisl, eastern Dolomites (Alto Adige/South Tyrol, northern Italy). *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria* 33: 25-36.
- 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., Mussner, L., Behm, M. & Hausmann, H. (2012a) Multi-disciplinary investigation of an active rock glacier in the Sella Group (Dolomites; Northern Italy). *Austrian Journal of Earth Sciences* 105(2): 48-62.
- Krainer, K., Kellerer-Pirklbauer, A., Kaufmann, V., Lieb, G.K., Schrott, L. & Hausmann, H. (2012b) Permafrost research in Austria: History and recent advances. *Austrian Journal of Earth Sciences* 105/2: 2-11.
- Krainer, K., Bressan, D., Dietre, B., Haas, J.N., Hajdas, I., Lang, K., Mair, V., Nickus, U., Reidl, D., Thies, H. & Tonidandel, D. (2014) A 10300-year old ice core from the active rock glacier Lazaun, southern Ötztal Alps (South Tyrol, northern Italy) (eingereicht).
- Lambiel, C. & Delaloye, R. (2004) Contribution of real-time kinematic GPS in the study of creeping mountain permafrost: Examples from the Western Swiss Alps. *Permafrost and Periglacial Processes* 15: 229-241.
- Lieb, G.K. (1998) High-mountain permafrost in the Austrian Alps (Europe). In: Lewkowicz, A.G. & Allard, M. (eds), *Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Permafrost Conference, Yellowknife, Canada*, pp. 663-668.
- Nickus, U., Abermann, J., Fischer, A., Krainer, K., Schneider, H., Span, N. & Thies, H. (2014) Rock Glacier Äußeres Hochebenkar (Austria) – Recent results of a monitoring network. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie* (im Druck).
- Pillewizer, W. (1938) Photogrammetrische Gletscheruntersuchungen im Sommer 1938. *Zeitschrift der Gesellschaft für Erdkunde* 1938(9/19): 367-372.
- Pillewizer, W. (1957) Untersuchungen an Blockströmen der Ötztaler Alpen. *Geomorphologische Abhandlungen des*

- Geographischen Institutes der FU Berlin (Otto-Maull-Festschrift) 5: 37-50.
- Potter, N. (1972) Ice-cored rock glacier, Galena Creek, northern Absaroka Mountains, Wyoming. Geological Society of America, Bulletin 83: 3025-3058.
- Potter, N., Steig, E.J., Clark, D.H., Speece, M.A., Clark, G.M. & Updike, A.B. (1998) Galena Creek rock glacier revisited – new observations on an old controversy. *Geografiska Annaler* 80A: 251-265.
- Rode, M. & Kellerer-Pirklbauer, A. (2012) Schmidt-hammer exposure-age dating (SHD) of rock glaciers in the Schöderkogel-Eisenhut area, Schladminger Tauern Range, Austria. *The Holocene* 22: 761-771.
- Rogger, M., Chirico, G.B., Hausmann, H., Krainer, K., Brückl, E. & Blöschl, G. (eingereicht) Impact of mountain permafrost on flow path and runoff response in a high alpine catchment.
- Schneider, B. & Schneider, H. (2001) Zur 60jährigen Messreihe der kurzfristigen Geschwindigkeitsschwankungen am Blockgletscher im Äusseren Hochebenkar, Öztaler Alpen, Tirol. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie* 37(1): 1-33.
- Shroder, J.F., Bishop, M.P., Copland, L. & Sloan, V.F. (2000) Debris-covered glaciers and rock glaciers in the Nanga Parbat Himalaya, Pakistan. *Geografiska Annaler* 82A: 17-31.
- Stocker, K. (2012a) Geologie und Blockgletscher der Madererspitze (Vorarlberg). Unveröff. Masterarbeit, Institut für Geologie und Paläontologie, Universität Innsbruck, 134 Seiten.
- Stocker, K. (2012b) Blockgletscher in Vorarlberg und in der Verwallgruppe. Museumsverein Jahrbuch Vorarlberger Landesmuseum 2012: 124-139.
- 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.
- Vitek, J.D. & Giardino, J.R. (1987) Rock glaciers: a review of the knowledge base. In: Giardino, J.R., Shroder, J.F. & Vitek, J.D. (eds), *Rock Glaciers*. Allen & Unwin, London: 1-26.
- Wahrhaftig, C. & Cox, A. (1959) Rock glaciers in the Alaska Range. *Geological Society of America, Bulletin* 70: 383-436.
- Whalley, W.B. & Martin, H.E. (1992) Rock glaciers, Part 2: models and mechanisms. *Progress in Physical Geography* 16: 127-186.

## Verzeichnis des Autors

---

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