

Projekt Permaqua

PERMAFROST UND SEINE AUSWIRKUNGEN AUF
WASSERHAUSHALT UND GEWÄSSERÖKOLOGIE IM HOCHGEBIRGE



IMPRESSUM

AUTOREN

Mair, Volkmar (LP – Amt für Geologie und Baustoffprüfung, Autonome Provinz Bozen-Südtirol)

Lang, Kathrin (LP – Amt für Geologie und Baustoffprüfung, Autonome Provinz Bozen-Südtirol)

Tonidandel, David (LP – Amt für Geologie und Baustoffprüfung, Autonome Provinz Bozen-Südtirol)

Thaler, Bertha (P1 – Biologisches Labor der Umweltagentur, Autonome Provinz Bozen-Südtirol)

Alber, Renate (P1 – Biologisches Labor der Umweltagentur, Autonome Provinz Bozen-Südtirol)

Lösch, Birgit (P1 – Biologisches Labor der Umweltagentur, Autonome Provinz Bozen-Südtirol)

Tait, Danilo (P1 – Biologisches Labor der Umweltagentur, Autonome Provinz Bozen-Südtirol)

Nickus, Ulrike (P2 – Institut für Atmosphären- und Kryosphärenwissenschaften, Universität Innsbruck)

Krainer, Karl (P2 – Institut für Geologie, Universität Innsbruck)

Thies, Hansjörg (P2 – Institut für Geologie, Institut für Ökologie, Universität Innsbruck)

Hirnsperger, Mathias (Institut für Atmosphären- und Kryosphärenwissenschaften, Institut für Geologie, Universität Innsbruck)

Sapelza, Astrid (Amt für Gewässernutzung, Autonome Provinz Bozen-Südtirol)

Tolotti, Monica (IASMA Research and Innovation Centre, E. Mach Foundation)

LAYOUT UND DRUCK

Kraler | **Grafik**, Brixen

Kraler | **Druck** GmbH, Vahrn

Oktober 2015 © Alle Rechte bei Amt für Geologie und Baustoffprüfung, Autonome Provinz Bozen-Südtirol

TITELBILD

Wannenkarsee im Windachtal (Ötztaler Alpen). Foto: Karl Krainer

DOWNLOAD

www.permaqua.eu

Diese Broschüre wurde im Rahmen des Projektes permaqua realisiert und finanziert. Das Projekt permaqua wird vom Programm Interreg IV Italien-Österreich, Europäischer Fond für regionale Entwicklung der Europäischen Union, kofinanziert.

1. Einleitung 4

2. Permafrostverbreitung in Süd- und Nordtirol 5

3. Auswirkungen des Klimawandels auf die Permafrostverbreitung 9

4. Permafrost und Wasserhaushalt 12

5. Permafrost und Wasserqualität 14

6. Permafrost und Gewässerökologie 17

7. Blockgletscher, Moore und Seesedimente als Umweltarchive 23

8. Permafrost und Naturgefahren 27

9. Schlussbetrachtung und Ausblick 29

10. Literatur 31

Permafrost ist in den Alpen oberhalb von 2.500 m häufiger verbreitet als vielfach angenommen. In Südtirol sind etwa 440 km² bzw. 6 % der Landesfläche von Permafrost bedeckt, in Österreich ca. 2.000 km². Aufgrund seiner Temperatur von nahe 0 °C ist Permafrost besonders anfällig auf Klimawandel. Klimamodelle prognostizieren für die Alpen eine Erwärmung von etwa 4 °C bis 2100, was u.a. zu einem verstärkten Abschmelzen des Permafrosts führen wird. In diesem Zusammenhang sind als Folge zunehmender Hanginstabilität auch verstärkte Steinschlag- und Felssturzaktivität, sowie Murgefahr bzw. Veränderungen im hydrologischen Regime mit Auswirkungen auf die Ökologie im hochalpinen Raum zu erwarten.

Erste Ergebnisse aus verschiedenen Projekten zeigten, dass Wässer aus abschmelzendem Permafrost hohe Gehalte an Schwermetallen enthalten können. Diese Werte liegen mancherorts weit über dem Grenzwert für Trinkwasser. Zu Projektbeginn war bereits nachgewiesen, dass diese hohen Schwermetallkonzentrationen nicht aus dem Felsuntergrund oder von den Gesteinsblöcken und dem Schuttmaterial in den Blockgletschern stammen konnten. Über ihre genaue Ursache oder Herkunft gab es zu Projektbeginn aber noch keine fundierten Ergebnisse. Fest stand lediglich, dass das Eis der Bohrkerne die hohen Schwermetallkonzentrationen aufweist. Ebenso wenig bekannt waren die Auswirkungen der hohen Schwermetallkonzentrationen auf Flora und Fauna in Gewässern im Hochgebirge.

Im Zeitraum von 2011 bis 2015 haben die Projektpartner im Zuge des Interreg IV Italien-Österreich Projekts permaqua intensiv nach Antworten zu diesen Fragestellungen geforscht. Die Projektteilnehmer – das Amt für Geologie und Baustoffprüfung in der Rolle des Lead Partners und das Biologische Labor der Autonomen Provinz Bozen-Südtirol, sowie die Universität Innsbruck – haben die Eiskerne aus den Blockgletschern Lazaun und Murfrei untersucht. Dabei wurden die chemische Zusammensetzung

und das Alter der Eislagen bestimmt. Zudem wurden verschiedene Gewässer im Einflussbereich des Permafrosts in Süd- und Nordtirol auf ihre chemischen und biologischen Eigenschaften analysiert. Es wurde ein Zustandsbericht der von Permafrost beeinflussten und unbeeinflussten Gewässer erarbeitet. Das bestehende international vernetzte Permafrostmonitoring in Nord- und Südtirol wurde zur Erfassung der klimabedingten Veränderung im Permafrost weitergeführt und ausgebaut. Weiters wurden Wasseranalysen mit bereits vorhandenen Informationen verglichen, um in geeigneter Weise auf die aktuellen Änderungen in Permafrostgebieten reagieren zu können.

Die Ergebnisse der im Projekt permaqua durchgeführten Untersuchungen werden in 7 Kapiteln dieser Infobroschüre präsentiert. Während in den Kapiteln 2 und 3 die Grundlagen von Permafrost, dessen Verbreitung und die Auswirkungen des Klimawandels in Süd- und Nordtirol beschrieben werden, wird in den Kapiteln 4 bis 8 konkret auf verschiedene Themen wie Wasserhaushalt, Wasserqualität, Gewässerökologie, Umweltarchive im Hochgebirge und Naturgefahren eingegangen.

Den Autoren ist bewusst, dass diese Arbeiten nur wenige Antworten auf verschiedene Fragen zum alpinen Permafrost und seiner Bedeutung für den Wasserhaushalt und die Gefährdung der Gebirgsbereiche durch abschmelzendem Permafrost geben können. Immerhin ist ein Anfang gemacht und es konnten wichtige Fragenkomplexe erörtert und erste Lösungen angedacht werden. Nun kommt es darauf an, gezielt in die aufgezeigten Richtungen weiter zu forschen und die installierten Monitoringsysteme für eine Langzeitbeobachtung auszubauen. Erst eine kontinuierliche Datenreihe erlaubt es, die tatsächlichen Entwicklungen des Hochgebirgspermafrosts zu dokumentieren, die Auswirkungen der Klimaerwärmung zu bewerten und geeignete Strategien zu entwickeln.

Volkmar Mair

Alpiner Permafrost ist in den Alpen, insbesondere in den Tiroler Alpen ab einer Seehöhe von ca. 2.500 m weit verbreitet, wobei intakte (aktive und inaktive) Blockgletscher die häufigste und morphologisch auffälligste Form sind. In Nordtirol konnten über 3.000, in Südtirol mehr als 1.700 Blockgletscher erfasst werden. Diese große Zahl an intakten Blockgletschern unterstreicht deren Bedeutung als Permafrosterscheinung im Hochgebirge. Im Rahmen des Forschungsprojektes permaqua wurden in Nord- und Südtirol mehrere Blockgletscher im Detail untersucht, um Informationen über die Zusammensetzung, den internen Aufbau, Eisgehalt, Dynamik und Entstehung zu erhalten. Die Untersuchungsmethoden reichen von geologischer Kartierung über Korngrößenanalyse, Temperaturmessungen, hydrogeologischen Untersuchungen, Bewegungsmessungen mit GPS, geophysikalischen Untersuchungen (Georadar, Seismik) bis zu Kernbohrungen und Analyse des Eises der Bohrkern.

Grundsätzlich bestehen deutliche Unterschiede zwischen Blockgletschern in kalkalpinen Gebieten (Dolomiten, Nördliche Kalkalpen) und Gebieten mit metamorphen Gesteinen wie Glimmerschiefern und Gneisen (z.B. Ötz-

taler Alpen), vor allem hinsichtlich Korngröße, Oberflächenmorphologie und Hydrogeologie. Blockgletscher in kalkalpinen Gebieten sind deutlich feinkörniger, besitzen eine weniger deutlich ausgeprägte Oberflächenmorphologie und einen deutlich geringeren oberflächlichen Abfluss, da ein Großteil des Wassers unterirdisch über Kluft- und Störungssysteme oder Karsthohlräume abfließt. Auch die chemische Zusammensetzung der Wässer zeigt deutliche Unterschiede zwischen Blockgletschern in kalkalpinen Gebieten und Bereichen mit metamorphen Gesteinen im Einzugsgebiet.

Das Abflussverhalten der Blockgletscher in Gebieten aus metamorphen Gesteinen, beispielsweise in den Öztaler Alpen, ist geprägt durch markante saisonale und tägliche Schwankungen.

Der Abfluss der Blockgletscher ist während der Schneeschmelze (Juni) am höchsten und nimmt im Spätsommer und Herbst kontinuierlich ab, um in den Wintermonaten ein Minimum zu erreichen.

Die Wassertemperatur von Blockgletscherquellen ist bei intakten Blockgletschern konstant sehr niedrig und liegt unter 1,5 °C, meist unter 1 °C.

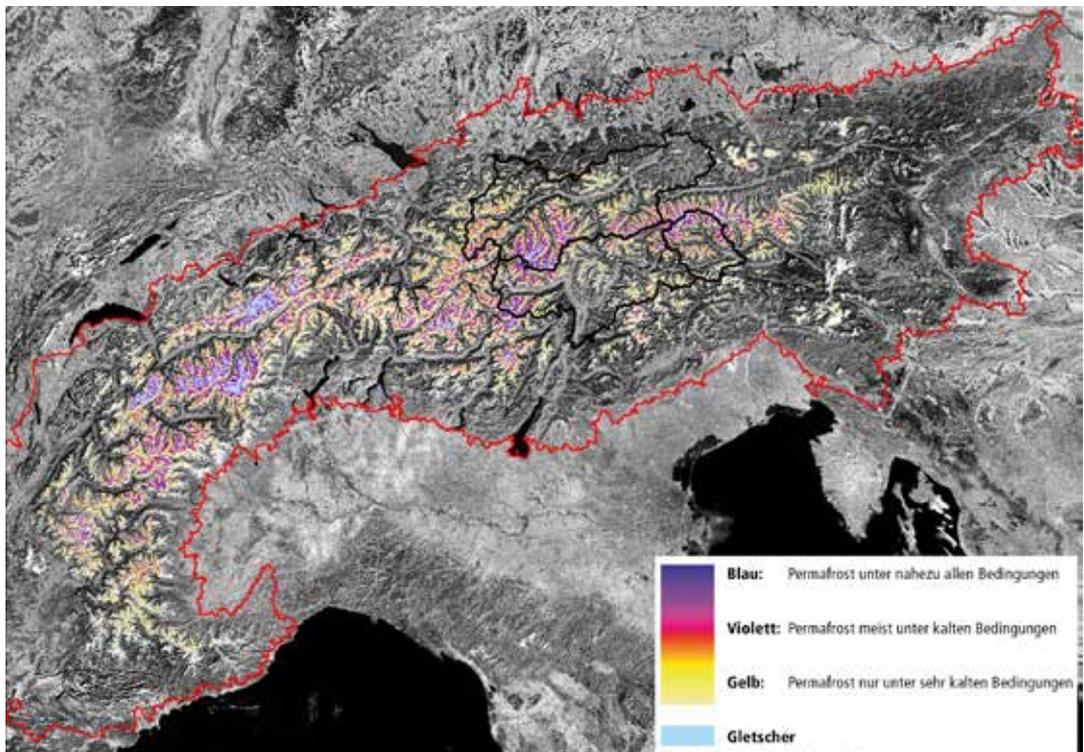


Abb. 2.1 – Karte der modellierten Permafrostverbreitung des Alpenbogens (Quelle: Alpine Space Projekt PermaNET).

In den Öztaler Alpen sind viele Blockgletscherquellen durch eine auffallend hohe elektrische Leitfähigkeit gekennzeichnet, die meisten dieser Quellen enthalten auch hohe Konzentrationen an Nickel und anderen Metallen. Bewegungsmessungen haben gezeigt, dass die meisten aktiven Blockgletscher jährliche Bewegungsraten von einigen Zentimetern bis einigen Dezimetern aufweisen. Es gibt aber einige wenige Blockgletscher mit jährlichen Bewegungsraten von bis zu mehreren Metern. Auffallend ist auch, dass die Bewegungsraten bei einigen Blockgletschern, auch beim Lazaun-Blockgletscher in Schnals, in den letzten Jahren deutlich zugenommen haben. Sensationelle Ergebnisse haben zwei Kernbohrungen am Blockgletscher Lazaun geliefert.

Die Bohrung Lazaun I lieferte einen 40 m langen Bohrkern. Die aktive, ungefrorene Schuttlage war 2,8 m mächtig, darunter folgte ein durchgehend gefrorener Kern bis in eine Tiefe von 14,7 m. Zwischen 14,7 m und 16,8 m wurde eine eisfreie Lage durchbohrt, darunter folgte bis 25 m wieder ein durchgehend gefrorener Kern. Zwischen 19,5 und 25 m war der Eisanteil hoch und das Eis zeigte eine deutliche Bänderung. Von 25 bis 28 m Tiefe wurde grobblockiges Material durchbohrt, zwischen 28 m und 40 m wurde Schutt mit einem hohen Feinanteil erbohrt. Im gefrorenen Kern lag der Eisanteil zwischen 1 und 98 %, der durchschnittliche Anteil lag bei 43 %. Ein höherer Eisanteil wurde zwischen 2,8 und 14 m (48 %) sowie zwischen 19,5 und 25 m (51 %) festgestellt.

Bei der Bohrung Lazaun II war die aktive Lage 4,5 m mächtig. Der Eisgehalt war im Vergleich zu Bohrung Lazaun I deutlich geringer. Eis wurde zwischen 4,5 und 5 m, zwischen 6,6 und 7,7 m, zwischen 9,1 und 10,5 m sowie zwischen 15,5 und 18,5 m angetroffen. Von 18,5 bis 24,5 m wurde grobblockiges Material mit wenig Feinmaterial durchbohrt, darunter folgte bis zur Endteufe von 32 m grobblockiges Material mit einem hohen Feinanteil. Der durchschnittliche Eisgehalt der gefrorenen Kernabschnitte betrug 22 %.

Insgesamt 11 Eisproben aus dem Kern Lazaun I und 2 Eisproben aus dem Kern Lazaun II enthielten eine genügend große Menge an eingewehten Pflanzenresten (1,1 – 9,7 mg Trockengewicht) für Radiokarbondatierungen (AMS-Methode). Aus dem Kern Lazaun I ergaben die Pflanzenreste in den Eisproben Alter von 2.240 Jahren vor heute in 2,82 m Tiefe bis 8.960 Jahren vor heute in 23,50 m Tiefe. Nach dem Altersmodell liegt das Alter des Eises an der Basis des Blockgletschers in 25 m Tiefe bei ca. 10.300 Jahren vor heute. Die eisfreie Lage zwischen 14,70 und 16,82 m entspricht dem Zeitraum von ca. 3.740 – 4.300 Jahren vor heute.

Im Kern Lazaun II wurden für das Eis in 7,27 m und 9,47 m Alter von 5.257 und 5.873 Jahren vor heute gemessen (Krainer et al. 2015).

Interessante Daten lieferten auch die Temperaturmessungen im Bohrloch. Im Jahr 2011 lag die niedrigste Temperatur im Bohrloch Lazaun I im Abschnitt zwischen 10 und



Abb. 2.2 – Stirnbereich des aktiven Blockgletschers Murfreit an der Sella Nordseite (Dolomiten).



Abb. 2.3 – Orthofoto des Lazaunkares im hinteren Schnalstal: im zentralen Bildbereich ist der in Richtung Nordosten fließende Blockgletscher Lazaun mit den charakteristischen Kriechformen zu erkennen.

25 m zwischen $-0,9$ und $-0,1$ °C. Die höchsten Temperaturen lagen bis 10 m Tiefe > 0 °C und zwischen 10 und 35 m Tiefe zwischen $-0,1$ und $-0,4$ °C. Auch im Bohrloch Lazaun II wurden im Bereich des gefrorenen Kernes nie Temperaturen unter -1 °C gemessen, die Temperaturen lagen immer nahe am Gefrierpunkt (Krainer et al. 2015). Inklinometermessungen im Bohrloch Lazaun I zeigten einen deutlichen Scherhorizont zwischen 20 und 25 m Tiefe, also an der Basis des Blockgletschers, mit einem Deformationsbetrag von 12 cm in 36 Tagen (3,3 mm/Tag). Ein weiterer Scherhorizont wurde in 14 m Tiefe, an der Basis des oberen gefrorenen Körpers festgestellt mit Deformationsraten von 6 cm in 36 Tagen. Deformationen sind ausschließlich an diese Scherhorizonte an der Basis der beiden gefrorenen Körper gebunden, innerhalb der gefrorenen Körper wurden keine Deformationen gemessen.

Die Bohrungen haben einen ausgezeichneten Einblick in den internen Aufbau und die Zusammensetzung des Blockgletschers und dessen Verhalten geliefert. Die Bohrungen haben auch gezeigt, dass der Blockgletscher aus



Abb. 2.4 – Die markante Stirn eines Blockgletschers unmittelbar oberhalb des Wannensees im Windachtal: das Schmelzwasser des Blockgletschers fließt direkt in den Hochgebirgssee.

zwei gefrorenen Körpern besteht, die durch eine eisfreie Lage getrennt sind. Überraschende Ergebnisse lieferten die Radiokarbondatierungen an Makroplanzenresten im

Permafrosteis, die für das Eis an der Basis des Blockgletschers ein Alter von ca. 10.300 Jahren ergaben. Demnach hat sich der Blockgletscher im Lazaunkar unmittelbar nach dem Rückzug des Egesen-Gletschers zu bilden begonnen und das Eis des Blockgletschers ist seither, geschützt durch die oberflächliche Schuttlage, erhalten geblieben. Derzeit ist der Blockgletscher sehr aktiv mit jährlichen Bewegungsraten von bis zu 1,7 m. Diese aktiven Phasen können in den letzten 10.000 Jahren aber nur relativ kurz gedauert haben, die meiste Zeit muss der Blockgletscher, der nur rund 660 m lang ist, inaktiv gewesen sein. Inklinometermessungen im Bohrloch haben gezeigt, dass der Blockgletscher an der Basis der beiden gefrorenen Körper einen Scherhorizont aufweist und sich somit durch basales Gleiten bewegt. Innerhalb der gefrorenen Körper konnte keine nennenswerte Deformation gemessen werden.

Trotz des hohen Alters des Eises an der Basis befindet sich die Temperatur des Eises im Bohrloch nahe am Gefrierpunkt. Dieses „warme“ Permafrosteis ist auf die Klimaerwärmung zurückzuführen und, zusammen mit einem höheren Anteil an Schmelzwasser, wohl auch verantwortlich für die derzeit hohen Bewegungsraten.

Die eisfreie Lage konnte mit ca. 4.300 bis 3.740 Jahren vor heute datiert werden und weist auf eine rund 500 Jahre lange trockene, warme Klimaphase. Eisanalysen haben gezeigt, dass das Nickel, das im Wasser der Blockgletscherquelle in hohen Konzentrationen enthalten ist, aus dem Eis des Blockgletschers freigesetzt wird.

Karl Krainer

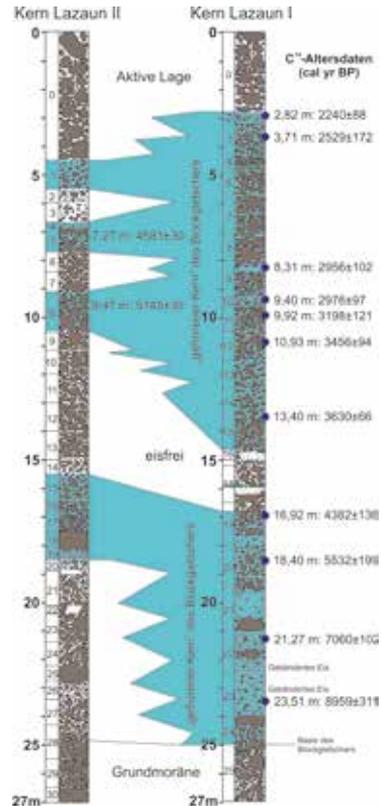


Abb. 2.6 – Bohrprofile der Bohrungen am Blockgletscher Lazaun mit den jeweiligen Altersdaten in den verschiedenen Tiefen.



Abb. 2.5 – Dieser Eiskern des Blockgletschers Lazaun stammt aus einer Tiefe von 20 m.

Um die Entwicklung von Permafrostgebieten im Zuge von Klimaänderungen abschätzen und interpretieren zu können, ist ein Blick in die Vergangenheit unumgänglich. Nur so können aus Analogieschlüssen mögliche Entwicklungen in der näheren Zukunft prognostiziert werden.

Die Klimaentwicklung der letzten 50.000 Jahre ist im Wesentlichen durch den letzten maximalen Vorstoß der Würmeiszeit und die folgende Klimaerwärmung geprägt. Dieser Vorstoß mit dem Maximum vor 20.000 Jahren hat im Hochgebirge alle früheren Permafrostspuren wie Blockgletscher, perennierende Schneeflecken usw. verwischt. Permafrost beschränkte sich in dieser Zeit nur auf die höchsten Gipfel, welche aus dem Eisschild herausragten. Bei einer rekonstruierten Höhe des Eisschildes von ca. 2.500 – 2.600 m kommen dafür nur höher gelegene Areale in Frage. Mit dem Rückzug der Gletscher aus den Tal- und Hangbereichen in Folge der Klimaerwärmung konnte sich wieder ein Temperatur- und Niederschlagsregime einrichten, das die Bildung von Permafrost in Zonen oberhalb von 1.700 m ermöglichte. Zudem ist die Bildung von Permafrost an das Vorhandensein von eisfreien Gebieten gebunden.

Da Blockgletscher die markanteste morphologische Er-

scheinung von alpinem Permafrost sind, wurden die im Rahmen der Projekte PROALP und PermaNET erstellten Blockgletscherkataster für Süd- und Nordtirol einer statistischen Auswertung unterzogen. Eine Analyse der Höhenlage von Blockgletschern hat ergeben, dass weniger als 1 % der 4.888 erhobenen Blockgletscher unter einer Höhe von 2.000 m liegen (tiefster Blockgletscher Stirnbereich Quote 1.700 m). Diese tief gelegenen Blockgletscher sind fossil und eisfrei und belegen damit, dass sie in einem kälteren Klima als heute gebildet wurden. Da Blockgletscher die unterste Grenze einer relevanten Permafrostschicht markieren, kann man daraus schließen, dass die klimatischen Bedingungen der letzten 20.000 Jahre die Bildung von Permafrost unter 1.700 m nicht erlaubten.

Die Beobachtung der Blockgletscherentwicklung nach der kleinen Eiszeit (Maximum 1850) zeigt, dass sich bereits in 150 Jahren größere Blockgletscher aus den Rand- und Stirnmoränen dieses Gletschervorstoßes gebildet haben. Daraus lässt sich schließen, dass die minimale Reaktions- bzw. Bildungszeit der Blockgletscher lediglich einige 100 Jahre beträgt. Die ausgedehnten und mächtigen Blockgletscher in den Höhenlagen um ca. 2.200 m lassen vermuten, dass neben einer grundsätzlichen geomorpho-

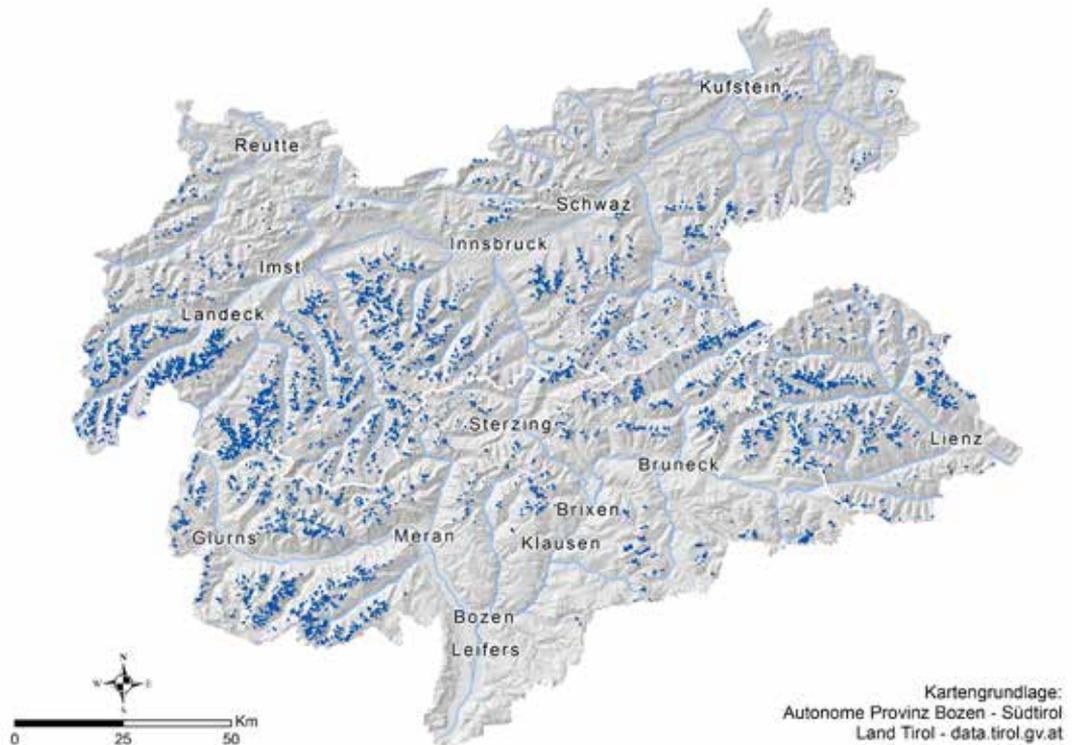


Abb. 3.1 – Blockgletscherkataster von Süd-, Nord- und Osttirol (Datenquelle: Krainer & Ribis, 2012; Bollmann et al., 2012).

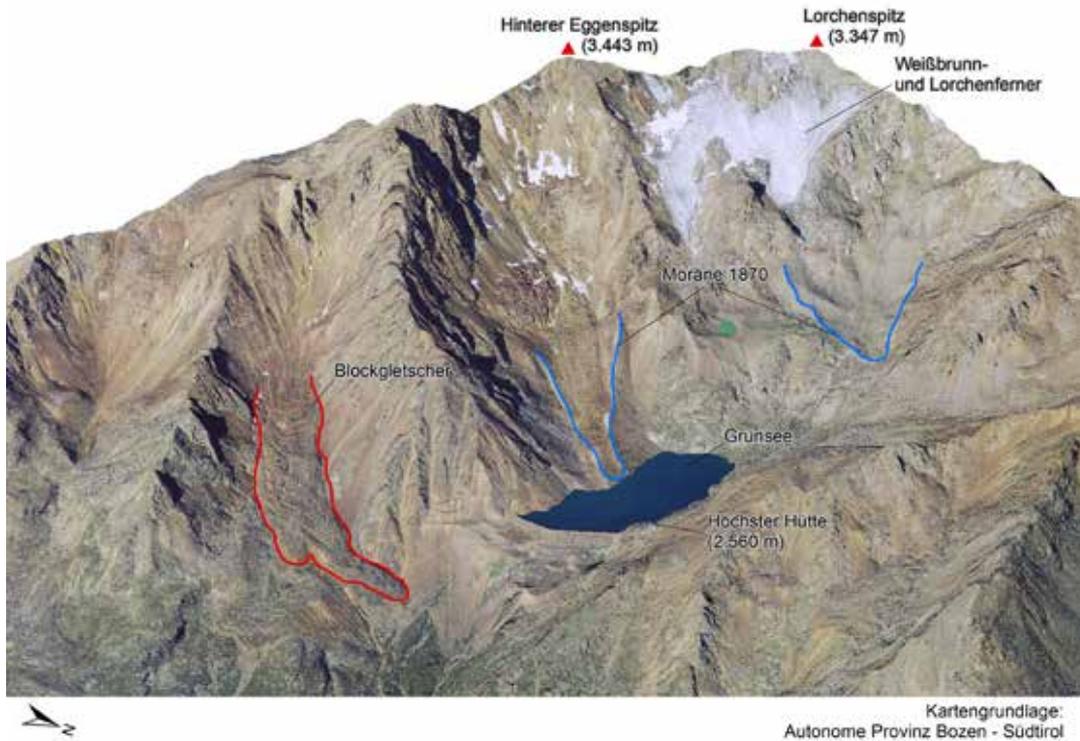


Abb. 3.2 – Dieses 3D-Orthofoto des hinteren Ultentales zeigt den Rossbänk Blockgletscher (rote Linie), den aktuellen Stand des Weißbrunnferners und den maximalen Vorstoß des Gletschers während der kleinen Eiszeit um 1870 (blaue Linien).

logischen und topographischen Disposition über längere Zeit Klimaverhältnisse geherrscht haben müssen, die ideal für die Bildung von Blockgletschern gewesen sind.

Derzeit gibt es nur wenige aktive Blockgletscher in extrem abgeschatteten und niederschlagsreichen Gebieten, welche auf eine Höhe von 2.300 m herunterreichen (z.B. am Laugen, Südtirol). Die meisten aktiven Blockgletscher mit hohem Eisgehalt und Bewegungsraten von Zentimetern bis Dezimetern pro Jahr liegen über 2.500 m. Die Klimaerwärmung der letzten 20.000 Jahre hat somit zu einem Anstieg der Permafrostuntergrenze von 300 bis 500 m geführt. Vorstoß- und Ausschmelzphasen von Blockgletschern konnten am Beispiel Lazaun im Schnalstal und Langsee im Ultental dokumentiert werden.

Derzeit sicht- und messbare Auswirkungen des Klimawandels auf Permafrostphänomene sind z.B. schnellere Fließgeschwindigkeiten von Blockgletschern, größere Einsinkbeträge ihrer Oberfläche, Kollapsstrukturen und das Entleeren von unterirdischen Seen.

Die weltweit längste Messreihe, dokumentiert am Blockgletscher Äußeres Hochebenkar (Nordtirol), umfasst über

75 Jahre. Überdurchschnittliche Temperaturen hatten jeweils eine Zunahme der Fließgeschwindigkeit zur Folge. Insbesondere warme und feuchte Sommer beschleunigen die Prozesse im Hochgebirge, wobei der Blockgletscher im Zeitraum von 1938 bis 1997 insgesamt 165 Meter vorgestoßen ist. Daraus lässt sich eine mittlere Bewegungsgeschwindigkeit von ca. 2,7 m pro Jahr berechnen (Schneider & Schneider 2001).

Durch das Abschmelzen des Eises werden die steilen Stirn- und Seitenböschungen von Blockgletschern instabil und rutschen vermehrt im Zuge von Niederschlagsereignissen ab. Es entstehen Steinschläge und Murgänge, welche im Kapitel 8 erörtert werden.

Konkrete Auswirkungen der Klimaerwärmung auf Felsmassen können noch nicht eindeutig bestätigt werden, da die Messung der Felstemperatur (z.B. Grawand und Ortler) in Südtirol erst seit Ende 2009 bzw. 2011 erfolgt. Eine erste Analyse hat ergeben, dass es v.a. im Bereich zwischen Felsoberfläche und einer Tiefe von max. 15 m große Temperaturschwankungen gibt. Dieser Bereich wird daher als „aktive Zone“ (active layer) bezeichnet. Hier

schwanken die Temperaturen mit verschiedenen Rhythmen: Tag und Nacht, saisonal, manchmal auch innerhalb weniger Stunden, z.B. wenn Wetterstürze eintreten. Die Schwankungen können bis zu 30 °C zwischen Tag und Nacht ausmachen. Die aktive Zone erstreckt sich nordseitig bis in eine Tiefe von ca. 8 m, südseitig bis in eine Tiefe von ca. 15 m. Im Inneren der Felsmasse herrschen konstant negative Temperaturen von ca. -2,6 °C auf einer

Höhe von 3.200 m (Grawand) und -2,8 °C auf einer Höhe von 3.800 m (Ortler). Die Mächtigkeit der aktiven Zone nimmt voraussichtlich mit der erhöhten Temperatur im Zuge der Klimaerwärmung zu.

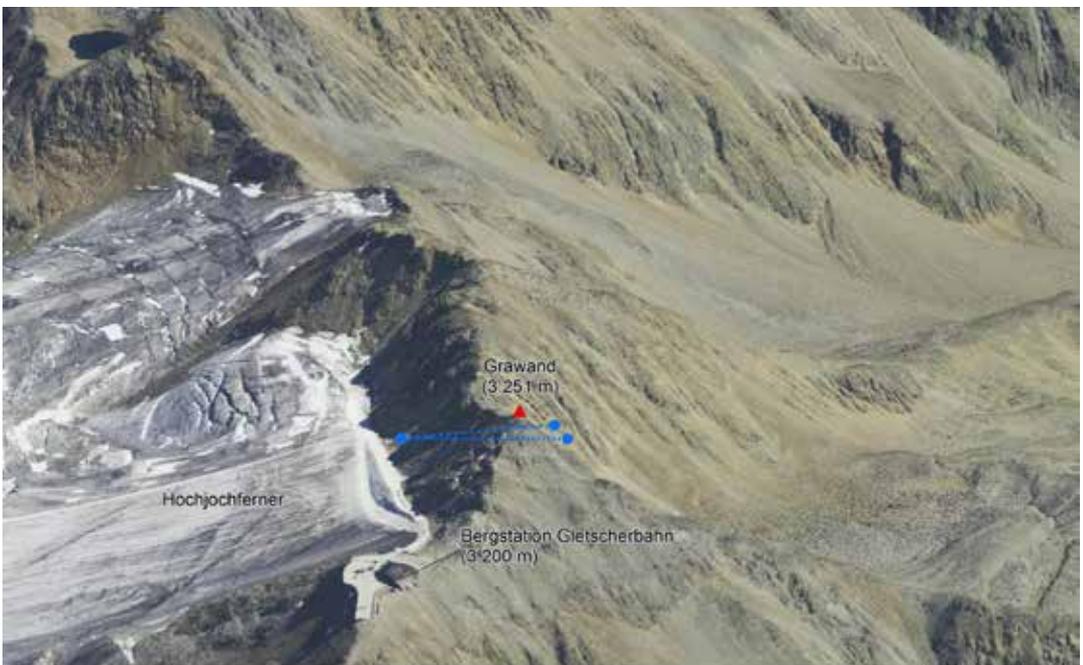
Volkmar Mair
Kathrin Lang
David Tonidandel



Abb. 3.3 – Mehrere Blockgletscher oberhalb des Langsees im hinteren Ultental dokumentieren Vorstoß- und Ausschmelzphasen.



Abb. 3.4 – Der Stirnbereich des aktiven Blockgletschers Äußeres Hochebenkar.



Kartengrundlage:
Autonome Provinz Bozen - Südtirol

Abb. 3.5 – Im Inneren der Felsmassen an der Grawand im hinteren Schnalstal werden im ganzen Jahr konstant -2,6 °C gemessen.

In den letzten Jahren wurden an einigen Bächen, die aus aktiven Blockgletschern entspringen, nahe der Blockgletscherstirn Pegelmessstellen errichtet, um das hydrogeologische Regime (insbesondere das Abflussverhalten) aktiver Blockgletscher genauer zu untersuchen. Dabei wurde auch der Frage nachgegangen, wie sich die Klimaerwärmung auf den Wasserhaushalt im Hochgebirge auswirkt, insbesondere in Einzugsgebieten mit Permafrost (aktive Blockgletscher).

In Südtirol wurden die Blockgletscher Lazaun (Ötztaler Alpen) und Napfen (Rieserferner Gruppe), in Nordtirol die Blockgletscher Äußeres Hochebenkar bei Obergurgl (Ötztaler Alpen), Reichenkar (westliche Stubai Alpen), Ölgrube und Kaiserberg (Kauernatal, Ötztaler Alpen) im Hinblick auf den Wasserhaushalt analysiert.

Das Abflussverhalten der Blockgletscher in Gebieten aus metamorphen Gesteinen, beispielsweise in den Ötztaler Alpen, ist gekennzeichnet durch ausgeprägte saisonale und tägliche Schwankungen und wird stark vom Witterungsablauf gesteuert. Ein Großteil des Wassers, das an der Blockgletscherquelle entspringt, stammt von der Schneeschmelze der winterlichen Schneedecke und von Niederschlägen, die in den Sommermonaten meist als Regen fallen. Ein sehr geringer Teil des Wassers ist Grundwasser mit einer höheren Verweildauer und entsprechend höherer elektrischer Leitfähigkeit. Auch der Anteil an Wasser, der durch das verstärkte Abschmelzen des Permafrosteises zusätzlich freigesetzt wird, ist sehr gering. Die Schneeschmelze setzt Ende April/Anfang Mai ein. Hohe Abflüsse werden während der Schneeschmelze im Juni und Juli sowie unmittelbar nach stärkeren Niederschlagsereignissen gemessen. Schlechtwettereinbrüche mit kalter Witterung und Schneefall können den Abfluss im Sommer stark reduzieren. An warmen und sonnigen

Tagen ist der Abfluss von starken täglichen Schwankungen geprägt mit den geringsten Durchflusswerten um die Mittagszeit und den Abflussspitzen in den späten Abendstunden. Ab Ende Juli/Anfang August geht der Abfluss kontinuierlich zurück, nur unterbrochen von einzelnen, durch Niederschlagsereignisse ausgelösten Abflussspitzen. Von Ende November bis zum Beginn der Schneeschmelze im Frühjahr beträgt der Abfluss nur wenige Liter pro Sekunde. Einige Blockgletscherquellen versiegen im November völlig.

Der Abfluss der Blockgletscher ist während der Schneeschmelze (Juni) am höchsten und nimmt im Spätsommer und Herbst kontinuierlich ab, um in den Wintermonaten ein Minimum zu erreichen.

Durch den hohen Anteil an Schmelzwasser sind die Werte der elektrischen Leitfähigkeit während der Hauptschneeschmelze Ende Mai bis Anfang Juli sehr niedrig (meist zwischen 30 und 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$) und steigen zum Herbst hin durch die Zunahme des Grundwasseranteiles bzw. die Abnahme des Schmelzwasseranteiles kontinuierlich an. Im Spätherbst werden die höchsten Werte erreicht, die bei vielen Blockgletschern in metamorphen Gebieten zwischen 100 und 150 $\mu\text{S}/\text{cm}$ liegen. Inzwischen sind aber einige Blockgletscherquellen bekannt, die deutlich höhere Werte der elektrischen Leitfähigkeit aufweisen (200 – 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ während der Hauptschneeschmelze, bis zu über 1.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ im Spätherbst). Diese Blockgletscherquellen weisen meist auch stark erhöhte Konzentrationen an Nickel und anderen Metallen auf. Die Analyse des Bohrkerns vom Blockgletscher Lazaun hat gezeigt, dass das Nickel und andere Metalle aus dem Permafrosteis des Blockgletschers freigesetzt werden.

Die Wassertemperatur von Blockgletscherquellen ist bei intakten Blockgletschern konstant sehr niedrig und liegt unter 1,5 °C, meist unter 1 °C. Der Grund liegt darin, dass das Wasser im Blockgletscher in Kontakt mit Eis fließt und dadurch stark abkühlt.

Die gegenwärtige Klimaerwärmung hat zur Folge, dass verstärkt auch Permafrosteis der Blockgletscher abschmilzt. Allerdings sind die Abschmelzraten sehr gering, weil die oberflächliche Schuttlage mit einer Mächtigkeit von meist 2 – 4 m das darunterliegende Permafrosteis schützt. Am Blockgletscher Lazaun zeigen GPS-Messungen, dass die Oberfläche des Blockgletschers durch das Abschmelzen von Permafrosteis jährlich um ca. 10 cm einsinkt. Dies bedeutet einen jährlichen Verlust von ca. 10.000 m³ Eis, was in den Sommermonaten (Mai bis Oktober) eine zusätzliche durchschnittliche Abflussmenge von 0,6 l/s ergibt. Das ist deutlich weniger als 5 % des Gesamtabflusses.

Erste Modellierungsversuche haben auch gezeigt, dass das



Abb. 4.1 – Pegelmessstelle zur Untersuchung des Abflussverhaltens des Lazaun Blockgletscherbaches.

verstärkte Abschmelzen des Permafrosts den Wasserhaushalt deutlich verändern wird. Durch das Abschmelzen des Permafrosteises in den Lockersedimenten (Blockgletscher, Hangschutt) werden das Porenvolumen der Sedimente und damit auch das Speichervolumen für Wasser größer.

Es kann mehr Wasser im Sediment gespeichert werden. Dadurch werden die Abflussspitzen abgeschwächt, während der Abfluss in der Trockenwetterphase im Herbst und Winter leicht ansteigt.

Karl Krainer

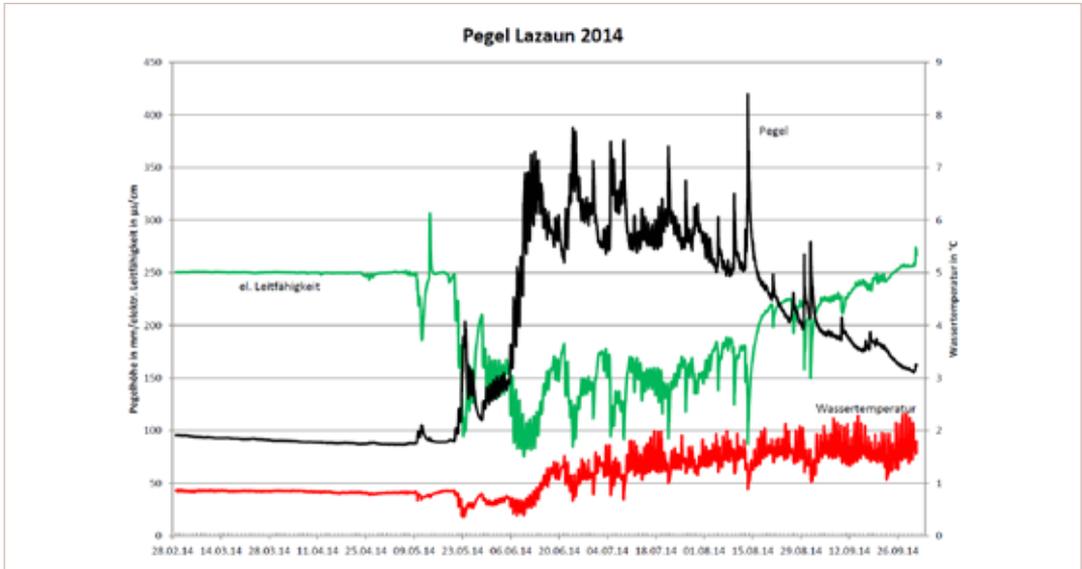


Abb. 4.2 – Grafik des Abflusses, der elektrischen Leitfähigkeit und der Wassertemperatur gemessen am Pegel des Lazaun Blockgletscherbaches.

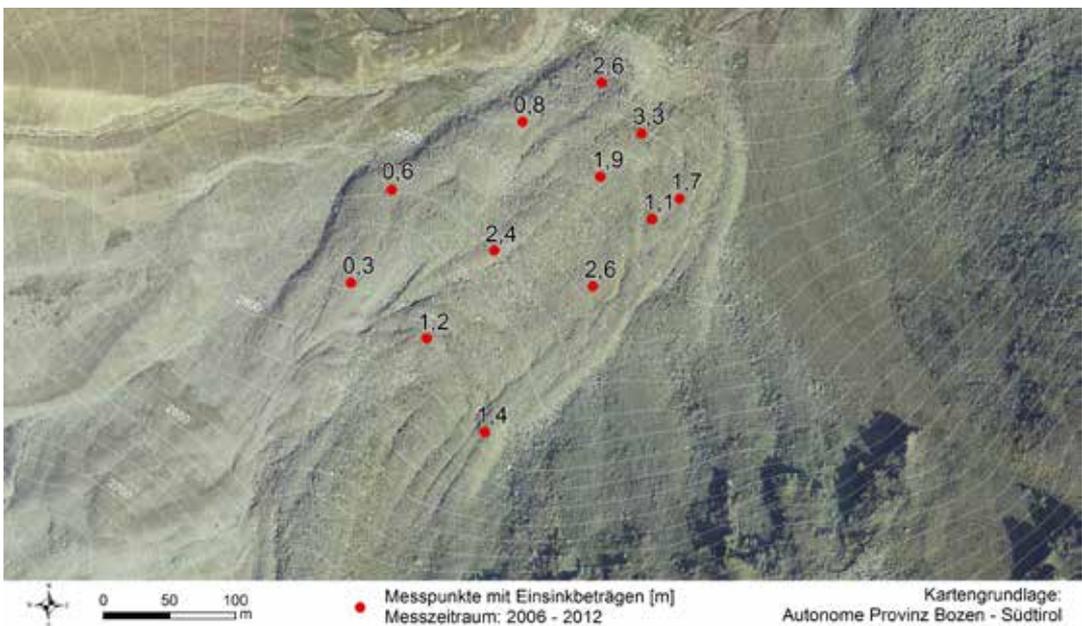


Abb. 4.3 – Orthofoto mit den im Zeitraum von 6 Jahren gemessenen Einsinkbetragen am Blockgletscher Lazaun.

Die Qualität von Hochbergsgewässern, die im Einflussbereich von alpinem Permafrost liegen, kann vor allem durch aktive Blockgletscher beträchtlich verändert werden.

5.1 | Einfluss des abschmelzenden Permafrosts auf die Wasserchemie

Veränderungen in der chemischen Zusammensetzung eines Hochbergsgewässers im Vinschgau (Rasass See, 2.682 m) waren der Anlass, Abflüsse von aktiven Blockgletschern genauer zu untersuchen. Innerhalb von 20 Jahren hatte in diesem See die elektrische Leitfähigkeit des Wassers, die ein Maß für die Menge an gelösten Stoffen darstellt, fast um das 20-fache zugenommen. Die einzig plausible Erklärung für diese Zunahme war das vermehrte Einsickern von hoch konzentriertem Wasser aus dem sich direkt über dem See befindlichen aktiven Blockgletscher (Thies et al. 2007).

Um den Einfluss von abschmelzendem Permafrost auf Oberflächenwässer feststellen zu können, wurde im Rahmen des Projekts permaqua die Wasserchemie von Bächen mit und ohne direkten Einfluss von aktiven Blockgletschern untersucht. Im Bereich zweier Nordtiroler Blockgletscher – im Äußeren Hohebenkar (Ötztaler Alpen) und im Krummgampental (Kaunertal) (Abb. 5.1) wurden zwischen Juli und Oktober 2007–2013 Wasserproben entnommen (Abb. 5.2 und 5.3). Die chemische Analyse umfasste pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit, Ionenkon-

zentrationen und den Gehalt an Schwermetallen.

Im Allgemeinen nahm die Menge an gelösten Stoffen in den Blockgletscherabflüssen im Verlauf des Sommers zu. Die Konzentrationen waren im Herbst etwa zwei- bis dreimal so hoch wie am Ende der Schneeschmelze (Abb. 5.4). Zum Beispiel stiegen die Monatsmittel der elektrischen Leitfähigkeit am Hohebenkarbach im Sommer 2012 von 140 $\mu\text{S}/\text{cm}$ im Juli auf 320 $\mu\text{S}/\text{cm}$ im September an (Nickus et al. 2015). Ein Grund für die zunehmenden Stoffkonzentrationen liegt in den Beiträgen, die Schneeschmelze, Niederschlagsereignisse, Eisschmelze sowie Zwischen- und Basisabfluss zum Gesamtabfluss eines Blockgletscherbachs liefern. Diese Anteile ändern sich im Verlauf eines Sommers, und so wird der stark mineralisierte Basisabfluss zwischen Juni und Herbst unterschiedlich stark verdünnt. Am stärksten ist die Verdünnung im Frühsommer während der Schmelze der Winterschneedecke, sie kann aber auch hoch sein als Folge von starken Regenereignissen im Sommer. Im Herbst, wenn der Abfluss vorwiegend vom Basisabfluss geprägt ist, sind die Stoffkonzentrationen meist am höchsten

und können potentiell durch Schmelzwasser, das aus dem Eiskörper des aktiven Blockgletschers stammt, noch verstärkt werden. Die Untersuchung eines Bohrkerns vom Lazaunblockgletscher (Südtirol) hat gezeigt, dass im Eis Schichten mit sehr hohen Stoffkonzentrationen auftreten (vgl. Kapitel 7). Auch die Aktivität von Mikroorganismen kann Stoffe wie Kalzium, Magnesium oder Mangan freisetzen und damit einen Beitrag zur Erhöhung der Konzentration in Oberflächenwässern liefern (Sonleitner et al. 2011).

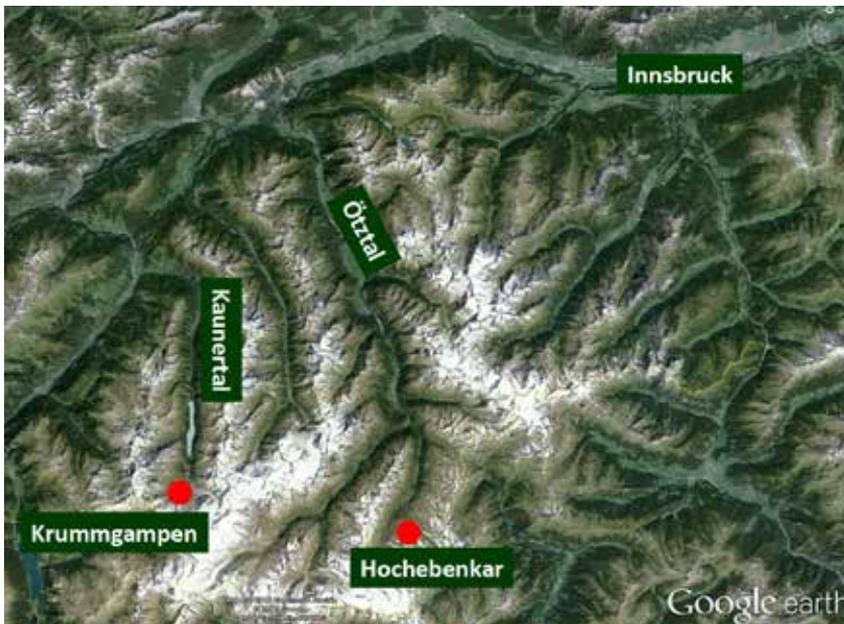


Abb. 5.1 – Orthofoto mit der Lokalisierung der Nordtiroler Untersuchungsgebiete Krummgampental und Hohebenkar (Kartengrundlage: Google Earth).



Abb. 5.2 – Pegelstation unterhalb des Blockgletschers Hochebenkar zur Messung des Abflusses des Blockgletscherbaches.



Abb. 5.3 – Automatischer Wasserprobensammler an der Pegelstation Hochebenkar.

In Bächen, die nicht von aktiven Blockgletschern beeinflusst sind, war die Konzentration an gelösten Stoffen deutlich geringer. Mit Leitfähigkeiten unter $30 \mu\text{S}/\text{cm}$ lagen die Werte im Mittel eine Größenordnung unter denen der Blockgletscherbäche. Zudem schwankten die Konzentrationen kaum im Verlauf eines Sommers.

Neben hohen Konzentrationen ionischer Komponenten können Blockgletscherbäche auch einen hohen Gehalt an Schwermetallen aufweisen (Thies et. al. 2013). Vor allem in Bächen, deren pH-Wert sich im sauren Bereich befand,

wie die Abflüsse des Krummgampen Blockgletschers, lagen die Konzentrationen einzelner Elemente (wie Nickel, Mangan, Zink oder Aluminium) deutlich über den entsprechenden Grenzwerten der EU-Wasserrahmenrichtlinie. In Bächen ohne Blockgletschereinfluss wurden hingegen kaum Schwermetalle gemessen, die Werte lagen um bzw. unter der Nachweisgrenze von wenigen $\mu\text{g}/\text{L}$.

Ulrike Nickus
Hansjörg Thies

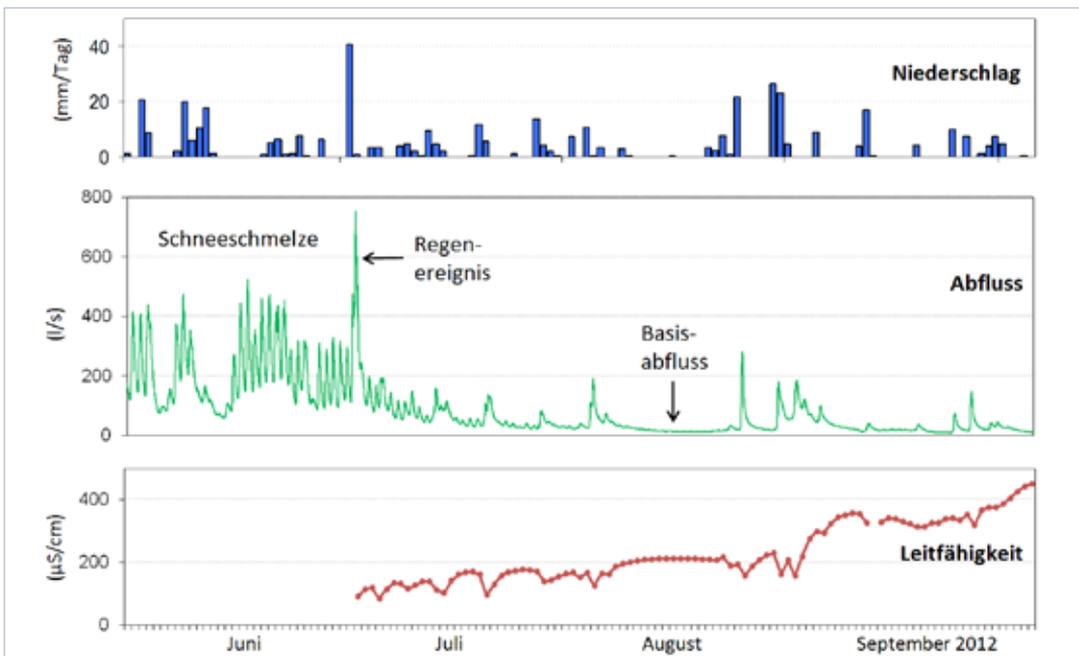


Abb. 5.4 – Der Abfluss und die elektrische Leitfähigkeit des Blockgletscherbaches gemessen an der Pegel Station Hochebenkar im Sommer 2012.

5.2 | Trinkwasserquellen in der Nähe von Blockgletschern in Südtirol

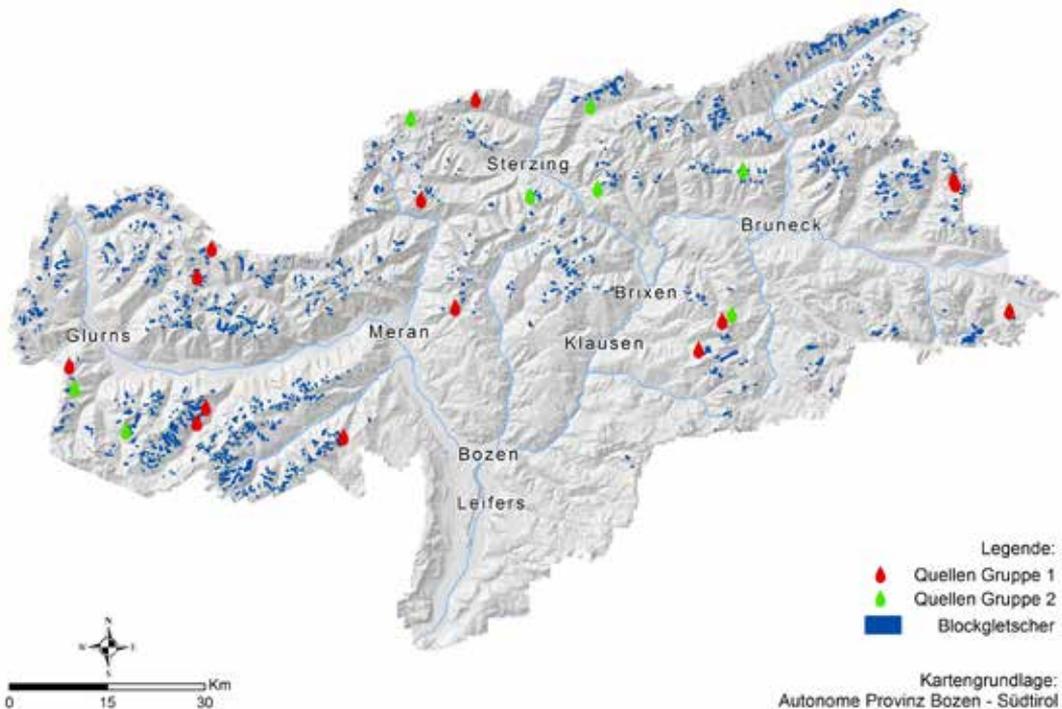


Abb. 5.5 – Digitales Geländemodell Südtirols mit den Blockgletschern und den untersuchten Trinkwasserquellen im Hochgebirge (Datenquelle Blockgletscherkataster: Bollmann et al., 2012).

Im Jahr 2014 wurde eine Serie von chemischen Analysen an Quellen durchgeführt, die für die öffentliche Trinkwasserversorgung in Südtirol genutzt werden. Damit sollte ein eventuelles Ansteigen von Schwermetallen durch Abschmelzen von Permafrost bzw. Blockgletschern geprüft werden. In 22 Quellgebieten wurden 32 Proben genommen, wobei die Quellen in 2 Gruppen eingeteilt wurden: jene in Gruppe 1 liegen weniger als 100 m Luftlinie von Blockgletschern entfernt und jene in Gruppe 2 bis zu 500 m.

Die Analysen zeigen in vielen Fällen ein Vorhandensein von Schwermetallen bzw. Spurenelementen in meist sehr geringer Konzentration (unter 10 µg/l). Bei einigen Quellen wurde ein etwas geringerer Gehalt als bei den Analysen der letzten Jahre festgestellt. Vermutlich kann dies auf einen Verdünnungseffekt durch die häufigen Niederschläge im Sommer 2014 zurückgeführt werden. Nur bei einigen wenigen Quellen ist ein Anstieg von Nickel, Zink oder Aluminium festgestellt. Den höchsten Wert für Nickel weist die Lazaunbachquelle mit 66 µg/l auf, während die anderen Quellen Werte um bzw. unter 20 µg/l

zeigen. Die höchsten gemessenen Zinkwerte liegen bei 90 µg/l. Aluminium kommt bei einigen Quellen in höheren Mengen vor, liegt aber noch unter dem Grenzwert für Trinkwasser von 200 µg/l, außer bei der Lazaunbachquelle (220 µg/l). Die bereits mehrfach untersuchte Lazaunbachquelle zeigte 2014 gleichbleibend hohe Werte. Bei der niederschlagsreichen Witterung in diesem Jahr kann aber nicht ausgeschlossen werden, dass ein Ansteigen der Konzentrationen erfolgt, möglicherweise wird dieses vom Verdünnungseffekt der Niederschläge überlagert. Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen dem Abschmelzen von Permafrost und dem Anstieg von Schwermetallen bzw. Spurenelementen in den genutzten Trinkwasserquellen in Südtirol kann zu diesem Zeitpunkt nicht festgestellt werden. Die Lazaunbachquelle wird aufgrund der hohen Nickel- und Aluminiumgehalte nicht mehr für Trinkwasser verwendet. Für die anderen Quellen sind in den nächsten Jahren weitere Analysen geplant, um einen eventuellen Einfluss nachweisen zu können.

Astrid Sapelza

Kapitel 6 | Permafrost und Gewässerökologie

Im Rahmen des Arbeitspaketes 4 wurden die Auswirkungen von abschmelzendem Permafrost, insbesondere von Blockgletschern, auf die Ökologie von Fließgewässern und Seen untersucht. 2012 und 2013 wurden daher in Südtiroler und Nordtiroler Permafrostgebieten chemisch-physikalische und biologische Untersuchungen von Quellen, Bächen und Seen durchgeführt (Abb. 6.1).

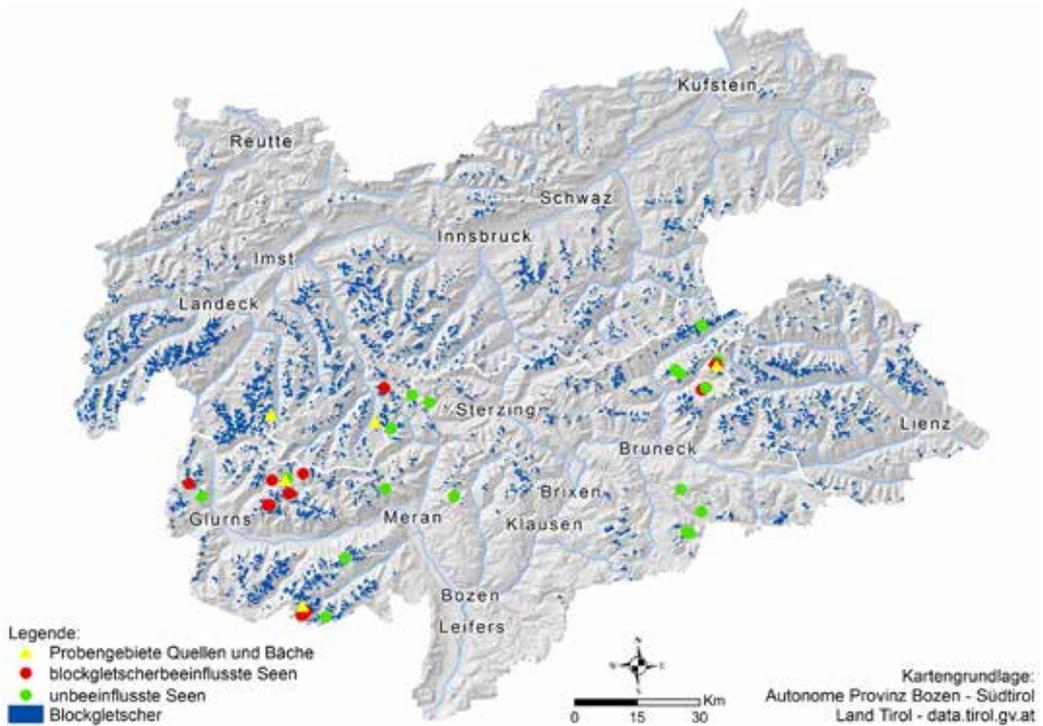


Abb. 6.1 – Untersuchungsgebiete in Süd- und Nordtirol (Datenquelle Blockgletscherkataster: Krainer & Ribis, 2012; Bollmann et al., 2012).

6.1 | Quellen und Bäche

Ziel der Untersuchung war es festzustellen, ob sich die chemischen Verhältnisse und die Zusammensetzung der Lebewesen in Bächen, die von Blockgletschern beeinflusst sind, von Bächen ohne diesen Einfluss (so genannten Referenzbächen) unterscheiden.

Außerdem sollte untersucht werden, ob und welchen Einfluss verschiedene chemische Parameter bzw. das Vorkommen von Metallen auf die Gewässerlebewesen haben. In den fünf Projekt-Untersuchungsgebieten Rossbänk (Ulten), Lazaun (Schnals), Napfen (Reintal), Hochebenkar (Ötztal) und Krummgampen (Kauental) erfolgte jeweils im Frühsommer und im Herbst die chemisch-physikalische und biologische Beprobung von Blockgletscherquellen und -bächen sowie von Referenzbächen (Abb. 6.2,



Abb. 6.2 – Quellaustritt an Blockgletscherstirn (Standort Napfen, Reintal).



Abb. 6.3 – Blockgletscherbach, im Hintergrund der Blockgletscher Rossbänk (Ulten).

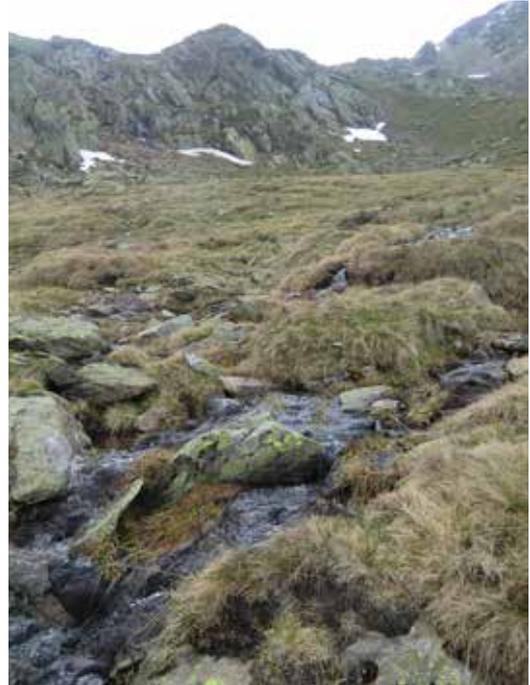


Abb. 6.4 – Referenzbach in Lazaun (Schnals).

6.3, 6.4). Temperatur, Leitfähigkeit und Sauerstoffgehalt wurden vor Ort gemessen. PH-Wert und chemische Zusammensetzung (Hauptionen und Nährstoffe) wurden im Biologischen Labor der Landesagentur für Umwelt bestimmt. Die Analyse der Metalle erfolgte durch die Universität Innsbruck. Für die biologische Charakterisierung der Quellen und Bäche wurden Kieselalgen-Proben sowie Zoobenthos-Proben entnommen.

Kieselalgen sind einzellige Algen, die in Gewässern auf Steinen, Pflanzen und dem Sediment vorkommen (Abb. 6.5). Mit Hilfe einer Zahnbürste werden sie entnommen (Abb. 6.6), unter dem Mikroskop werden sie bestimmt. Aus der Artenzusammensetzung kann man Rückschlüsse auf den ökologischen Zustand eines Gewässers ziehen.

Als Zoobenthos werden kleine wirbellose Tiere, die am Gewässergrund leben, bezeichnet. Nach der Größe unterscheidet man Makrozoobenthos (> 1 mm), Meiozoobenthos (0,063 – 1 mm) und Mikrozoobenthos (< 0,063 mm). Im Rahmen dieser Untersuchung wurden das Makro- und das Meiozoobenthos erfasst. Zum Makrozoobenthos (Abb. 6.7) zählen u. a. Ringelwürmer, Strudelwürmer und Insektenlarven (z.B. Steinfliegen, Eintagsfliegen, Köcherfliegen, Zweiflügler, Käfer). Wichtige Vertreter des Meiozoobenthos sind Fadenwürmer, Kleinkrebse und Rädertiere.

Bei der Beprobung wird der Gewässergrund aufgewühlt und die Tiere werden mit einem feinmaschigen Netz gefangen (Abb. 6.8). Die Bestimmung der Arten erfolgt unter dem Mikroskop.

Die chemische Zusammensetzung des Wassers von blockgletscherbeeinflussten Gewässern und Referenzgewässern ist sehr unterschiedlich: in den beeinflussten Gewässern sind Magnesium, Kalzium und Sulfat um ein Vielfaches höher als in unbeeinflussten Gewässern (Abb. 6.9). Einzig der Referenzpunkt am Standort Ulten weist ähnlich hohe Werte wie die beeinflussten Gewässer auf, was darauf schließen lässt, dass auch er in Verbindung mit dem Blockgletscher steht.

Die Analyse des Metallgehalts im Wasser ergab teilweise hohe Werte in blockgletscherbeeinflussten Gewässern. So weisen die beeinflussten Gewässer in Ulten hohe Aluminium-, Mangan- und Nickelwerte auf, die beeinflussten Gewässer in Schnals hohe Nickelwerte. Im Kaunertal sind in den beeinflussten Gewässern Aluminium, Cobalt, Mangan, Nickel und Zink auffallend hoch. In Rein gibt es keine Auffälligkeiten. Alle Referenzgewässer sind frei von hohen Metallgehalten (Tab. 6.1).

Bezüglich der untersuchten Lebewesen kann gesagt werden, dass in den blockgletscherbeeinflussten Gewässern



Abb. 6.5 – Kieselalgen unter dem Mikroskop.



Abb. 6.6 – Beprobung von Kieselalgen mit Hilfe einer Zahnbürste.

die Arten- und Individuenanzahl meist niedriger ist als in den unbeeinflussten Referenzgewässern. Dies trifft sowohl für Kieselalgen als auch für das Zoobenthos zu (Abb. 6.10).

Larven verschiedener Zuckmücken (Chironomidae) sind die häufigsten Tiere in Hochbergsgewässern. In den blockgletscherbeeinflussten Gewässern machen sie rund 90 % aller Individuen aus. In den Referenzgewässern treten hingegen auch andere Tiergruppen stärker auf (Abb. 6.11). Die statistische Auswertung der Südtiroler Probenstellen ergibt bezüglich der Artenzusammensetzung eine Ähn-

lichkeit aller Referenzstellen, die vor allem durch die höhere Wassertemperatur zustande kommt. Die von Blockgletschern beeinflussten Gewässer sind hingegen eher individuell bezüglich ihrer Artenzusammensetzung, was wohl vor allem auf die unterschiedlich starke Belastung von verschiedenen Metallen zurückzuführen ist.

Birgit Lösch
Renate Alber
Danilo Tait



Abb. 6.7 – Makrozoobenthos.



Abb. 6.8 – Beprobung des Makro- und Meiozoobenthos.

	Al	Ba	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Sr	Zn
UL_BGO	802	< 5	4	< 5	5	3	259	15	29	8
UL_BGB	636	< 5	4	< 5	5	3	193	12	28	8
UL_REF	< 5	< 5	< 5	< 5	3	< 5	< 5	< 5	57	4
SCH_BGO	< 5	2	6	< 5	3	< 5	3	59	65	30
SCH_BGB	< 5	2	4	< 5	3	< 5	9	33	71	15
SCH_REF	7	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	10	4
RE_BGO	< 1	5	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	1	62	< 1
RE_BGB	< 1	2	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	62	< 1
RE_REF	4	< 5	< 5	< 5	3	3	< 5	< 5	23	4
HK_BGO	< 1	5,1	< 1	< 2	< 1	< 1	< 1	7,3	141,7	2,7
KG_BGO	4736	13	50	< 2	13	< 1	438	246	63	181
KG_BGB	4668	17	56	< 2	13	1	491	333	71	189
KG_REF	93	2	< 1	< 2	< 1	78	3	1	4	2
Großer Malersee	< 1	4	< 1	< 2	< 1	5	11	9	45	4
Zufluss Gr. Malersee	3025	13	13	< 2	2	1954	83	45	16	36
Hungerschartensee	1896	1	41	< 1	< 1	< 1	293	133	49	34
Wilder Pludersee	< 1	28	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	276	< 1
Upiasee	< 1	< 1	2	< 2	1	< 1	2	20	37	3
Wannenkarsee	117	6	14	< 2	2	15	50	64	43	39
Schwarze (Ulten)	< 1	17	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	137	< 1

Tab. 6.1 – Metallgehalte (µg/l) im Wasser verschiedener Blockgletscherquellen, Blockgletscherbäche, Referenzbäche sowie der untersuchten Seen. Erhöhte Werte sind orange hervorgehoben, Referenzstellen sind grün unterlegt (BGO=Blockgletscherquelle, BGB=Blockgletscherbach, REF=Referenzbach, UL=Ulten, SCH=Schnals, RE=Reintal, HK=Ötztal, KG=Kauertal).

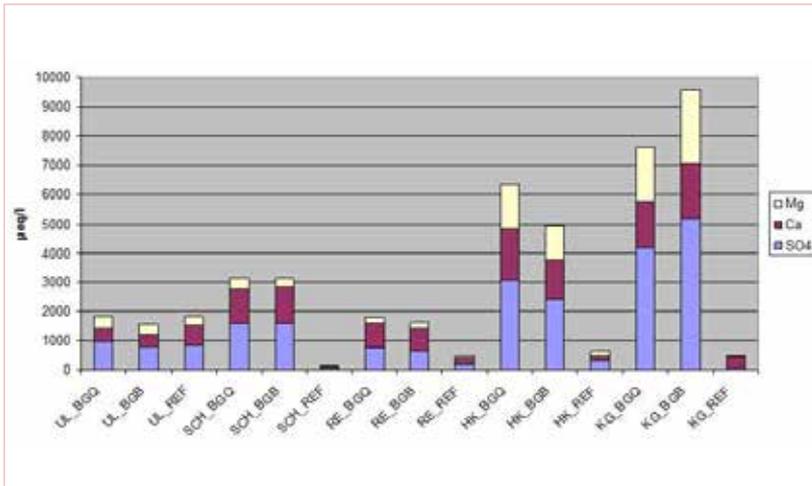


Abb. 6.9 – Einige chemische Parameter an den verschiedenen Probestellen. Magnesium (Mg), Kalzium (Ca) und Sulfat (SO₄) sind an den blockgletscherbeeinflussten Probestellen viel höher als in den unbeeinflussten Referenzbächen (Ausnahme Standort Ulten: dort konnte kein unbeeinflusstes Gewässer gefunden werden). BGQ=Blockgletscherquelle, BGB=Blockgletscherbach, REF=Referenzbach, UL=Ulten, SCH=Schnals, RE=Reintal, HK=Ötztal, KG=Kauental.

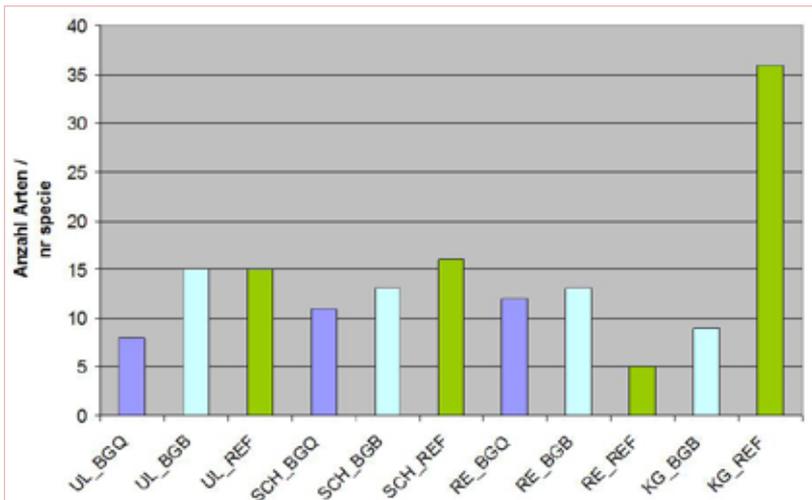


Abb. 6.10 – Artenanzahl der Kieselalgen an den verschiedenen Probestellen (BGQ=Blockgletscherquelle, BGB=Blockgletscherbach, REF=Referenzbach, UL=Ulten, SCH=Schnals, RE=Reintal, KG=Kauental).

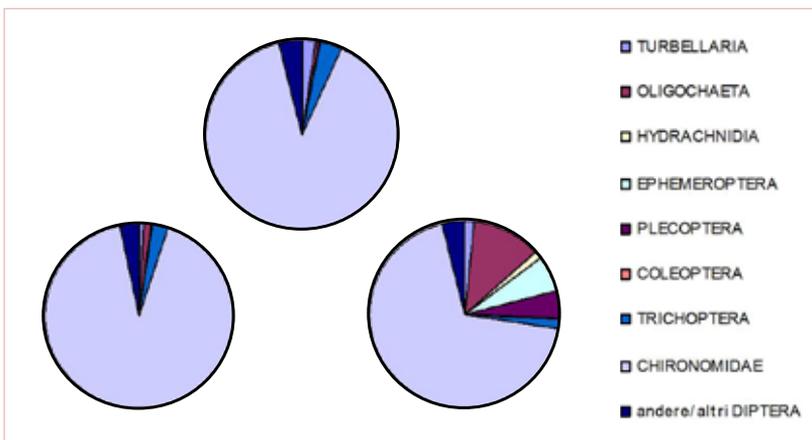


Abb. 6.11 – Prozentuelle Aufteilung der verschiedenen Tiergruppen (nur Makrozoobenthos) in Blockgletscherquellen (oben), Blockgletscherbächen (links) und Referenzbächen (rechts).

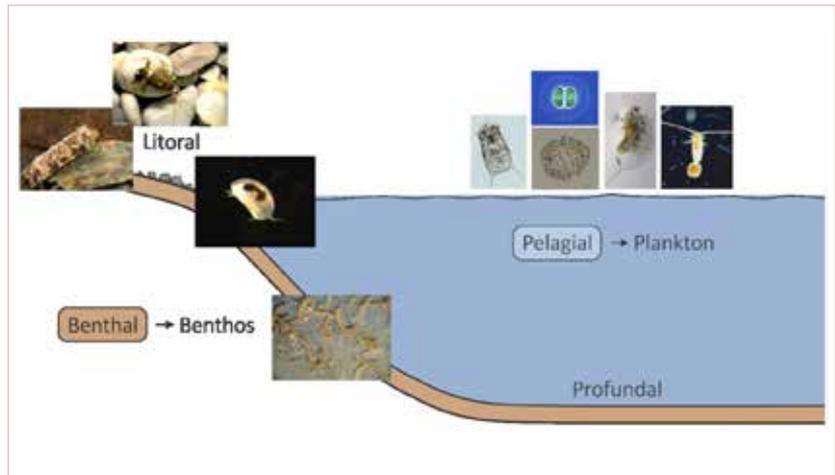
6.2 | Seen

Für die Untersuchung der Auswirkungen von abschmelzenden Blockgletschern auf Seen wurden die Daten von insgesamt 33 Hochgebirgsseen verwendet. 15 davon waren in unterschiedlichem Ausmaß von Blockgletschern beeinflusst. Die biologische Beprobung erfolgte jeweils einmal, und zwar im Spätsommer oder im Herbst. Fünf von Blockgletschern beeinflusste Seen, der Hungerschartensee, der Upiasee, der Wilde Pludersee, der Wannenkarsee (Abb. 6.12) und der Große Malersee, wurden genauer untersucht. Dabei wurden die wichtigsten chemisch-physikalischen Parameter in der gesamten Wassersäule sowie Pflanzen und Tiere der Hauptlebensräume (Abb. 6.13) erfasst.



Abb. 6.12 – Wannenkarsee (2.639 m ü.N.N) im Windachtal mit Blockgletscher im Hintergrund.

Abb. 6.13 – In einem See können grundsätzlich zwei Hauptlebensräume unterschieden werden: die Freiwasserzone, das Pelagial, und der Gewässerboden, das Benthos. Das Benthos umfasst die ufernahen Bereiche (Litoral) und die Tiefenzone (Profundal). Die Lebewelt der Freiwasserzone wird von den treibenden Arten des Planktons gebildet. Das pflanzliche Plankton (Phytoplankton) setzt sich aus einer Vielzahl einzelliger oder Kolonien bildender Algen zusammen. Zum tierischen Plankton (Zooplankton) zählen Einzeller und Mehrzeller. Letztere werden fast ausschließlich von Rädertieren und Kleinkrebsen gebildet. Die Pflanzen des Gewässerbodens sind verschiedene Algen (Phytobenthos) und höhere Wasserpflanzen (Moose, Blütenpflanzen). Zu den am Gewässerboden lebenden Tieren (Zoobenthos) gehören Einzeller und Mehrzeller, wobei letztere durch zahlreiche Großgruppen vertreten sind.



Außerdem wurde der Metallgehalt des Seewassers bestimmt (Tab. 6.1). In den übrigen Seen erfolgte die Analyse der Hauptionen und der Nährstoffe einer Oberflächenwasserprobe sowie die Beprobung der Uferfauna und des Zooplanktons.

Die Hauptkomponentenanalyse der chemischen Zusammensetzung der untersuchten Seen ergab drei Gruppen: eine Gruppe von Seen mit hohem Sulfat-, Magnesium- und Kalziumgehalt (mehr oder weniger stark von Blockgletschern beeinflusste Seen), eine Gruppe von Seen mit dolomitischem Einzugsgebiet und eine Gruppe von Seen aus überwiegend kristallinen Gebieten mit geringem Sulfat-, Magnesium- und Kalziumgehalt (Abb. 6.14).

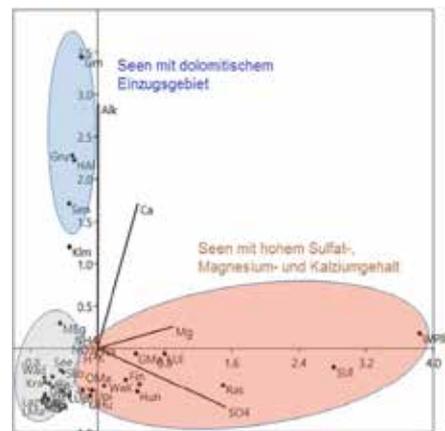


Abb. 6.14 – Hauptkomponentenanalyse der chemischen Zusammensetzung der untersuchten Seen.

Die chemische Zusammensetzung des Wassers der Hochgebirgsseen wird in erster Linie von der Geologie ihres Einzugsgebietes und von der chemischen Zusammensetzung der Niederschläge bestimmt. Normalerweise ändert sich die Hauptionenzusammensetzung auch über längere Zeiträume hinweg kaum (Abb. 6.15, links). In Hochgebirgsseen, die von abschmelzenden Blockgletschern beeinflusst werden, kann sich die chemische Zusammensetzung des Wassers sehr stark ändern (Abb. 6.15 rechts). Wie groß die Veränderungen in der Wasserchemie sind, hängt vor allem von der Größe des Blockgletschers und vom Wasser-austausch des Sees ab.

Ein wichtiges Ziel der Untersuchung war es festzustellen, ob und wie sich die Änderungen in der Wasserchemie auf die Lebewesen auswirken. Zu diesem Zweck erfolgte die Beprobung von Pflanzen und Tieren, die in den verschiedenen Seezonen (Abb. 6.13) leben. Insgesamt konnte im Rahmen des vorliegenden Projekts eine große Fülle von biologischen Daten gesammelt werden, die den Istzustand der Tiroler Hochgebirgsseen dokumentieren und als Basis für zukünftige Untersuchungen, vor allem in Hinblick auf den Klimawandel, dienen können.

Da die biologische Beprobung nur ein einziges Mal durchgeführt wurde, ist die Aussagekraft der Ergebnisse eingeschränkt. Weitere Untersuchungen, vor allem zu verschiedenen Jahreszeiten, wären erforderlich. Trotzdem konnten einige Unterschiede zwischen Seen mit und Seen ohne Blockgletschereinfluss festgestellt werden. Während für die Zusammensetzung des Planktons vor allem pH-Wert und Nährstoffverhältnisse bestimmend zu sein scheinen, ergaben sich bei der Zusammensetzung der Uferfauna Unterschiede zwischen Seen mit und Seen ohne Blockgletschereinfluss.

Das Makrozoobenthos des Ufers der unbeeinflussten Seen wies im Durchschnitt eine höhere Diversität auf, vor allem weil auch empfindliche Arten wie Eintagsfliegen und Köcherfliegen anzutreffen waren, die in den beeinflussten Seen fehlten. Außerdem waren die Arten gleichmäßiger verteilt und zeigten niedrigere Dominanzwerte. Unter ungünstigen Umweltbedingungen dominieren häufig einige wenige Arten, die unempfindlich sind und eine hohe Anpassungsfähigkeit besitzen.

Neben der Verringerung der Artenvielfalt in Seen mit Blockgletschereinfluss konnten auch Unterschiede in der Zusammensetzung der Lebensgemeinschaften festgestellt werden, die sich vor allem durch das Vorherrschen von unempfindlichen Arten ergaben. Bei den Zuckmückenlarven (Chironomidae), die die arten- und individuenreichste Gruppe der Uferfauna von Hochgebirgsseen darstellen, konnten zwei Charakterarten beobachtet werden. *Paratanytarsus austriacus* dominierte im Großteil der blockgletscherbeeinflussten Seen mit alkalischem oder nur leicht saurem pH-Wert. Diese Art bevorzugt pH-Werte im alkalischen Bereich und höhere Nährstoffbedingungen und scheint unempfindlich gegenüber niedrigen Sauerstoffkonzentrationen zu sein. Möglicherweise bedingen indirekte Einflüsse des hohen Sulfatgehalts und anderer Substanzen der Blockgletscherabflüsse gute Nahrungsbedingungen und schlechte Sauerstoffverhältnisse am Seeboden. Die zweite für Seen mit Blockgletschereinfluss charakteristische Art, *Corynoneura arctica*, ist ebenfalls relativ unempfindlich, bevorzugt aber saures Milieu. Drei Seen mit Blockgletschereinfluss, die außerdem erhöhte Nickelwerte aufwiesen, unterschieden sich in der Zusammensetzung der Chironomidengemeinschaften völlig von den übrigen Seen.

Auch die Zusammensetzung des Meiozoobenthos – es wurden nur die Crustaceen erfasst – wies Unterschiede zwischen Seen mit und ohne Blockgletschereinfluss auf. Die beiden für beeinflusste Seen charakteristischen Arten, *Cypria ophthalmica*, ein Muschelkrebs, und *Chydorus sphaericus*, ein Blattfußkrebs, sind unempfindlich und können auch unter extremen Umweltbedingungen noch überleben.

Abschmelzende Blockgletscher haben in Hochgebirgsseen zu starken Veränderungen der Wasserchemie geführt, die sich zum Teil auch auf die Lebewelt auswirken. In Niederungsseen, in deren Einzugsgebiet sich Blockgletscher befinden, haben ebenfalls – wenn auch nur geringfügige – Veränderungen in der Wasserchemie stattgefunden. So sind im Haidersee und im Antholzer See die Sulfatkonzentrationen in den letzten 10 Jahren leicht angestiegen. Im Vernagter Stausee hat neben einem Anstieg des Sulfatgehalts auch eine Zunahme des Nickelgehalts stattgefunden. Diese Entwicklung gilt es im Auge zu behalten.

Bertha Thaler
Danilo Tait

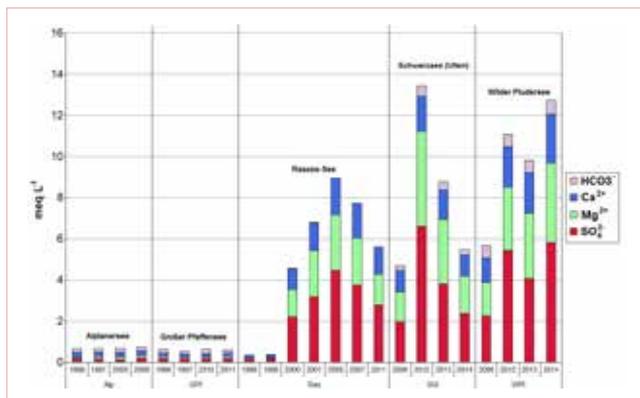


Abb. 6.15 – Langzeitentwicklung der Hauptionenzusammensetzung in blockgletscherbeeinflussten (Rasass-See, Schwarzsee und Wilder Pludersee) und unbeeinflussten Seen (Alpanersee und Großer Pfaffensee).

Unter Umweltarchiven verstehen wir gut datierbare Ablagerungen, aus denen die Umweltbedingungen bestimmter Zeiträume rekonstruiert werden können. Seesedimente und Moorablagerungen sind beispielsweise hoch auflösende Umweltarchive, die uns einen detaillierten Blick in die Klimageschichte zur Zeit ihrer Entstehung ermöglichen. Aktive Blockgletscher liefern Hinweise auf Permafrostbedingungen.

7.1 | Blockgletscher

Aktive Blockgletscher enthalten in ihrem Kern so viel Eis, dass sie sich langsam hangabwärts bewegen. Dieser Eisanteil kann als Gemisch aus Eislinsen und Lockermaterial oder als reiner Eiskörper bestehen. Stoffe, die in gelöster und partikulärer Form im Eis enthalten sind, können Aufschluss geben über Geschichte, Alter oder Entstehung des Blockgletschers. Am Lazaun-Blockgletscher

wurden deshalb im Zungenbereich im Sommer 2010 zwei Bohrkern entnommen (Abb. 7.1 und 7.2) (Krainer et al. 2015). Sie waren 32 bzw. 40 m lang und wurden auf ihre chemische Zusammensetzung und ihr Alter untersucht.

Kleine Pflanzenreste im Eis der Bohrkern wurden mit der Radiokarbonmethode untersucht. Sie deuten auf ein Alter

der oberen Eisschichten von etwa 2.200 Jahren hin. Für die Untergrenze des Eiskörpers bei 25 Metern Tiefe wurde ein Alter von 10.300 Jahren abgeleitet. Die Bildung des Lazaunblockgletschers dürfte damit bis zum Beginn des Holozän zurückreichen, sein Eisanteil dürfte auch Warmperioden überstanden haben.

Im Eis des Blockgletschers wurden gelöste Stoffe in wechselnder, teils sehr hoher Konzentration gefunden (Abb. 7.3). Ionische Komponenten waren über den gesamten Eiskern verteilt mit den höchsten Werten im unteren Teil des Kerns ab etwa 18 m Tiefe. Hohe Schwermetallkonzentrationen kamen hingegen nur bis in eine Tiefe von 13 Metern vor, in Eisschichten, die nicht älter als 4.000 Jahre sind.



Abb. 7.1 – Lokalisierung der Bohrpunkte am Blockgletscher Lazaun.



Abb. 7.2 – Im Sommer 2010 wurden am Blockgletscher Lazaun zwei Kernbohrungen abgeteuft.

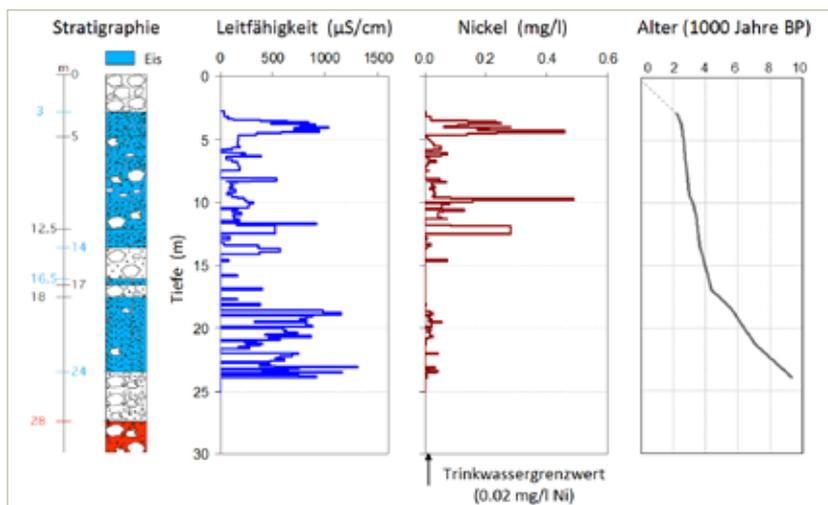


Abb. 7.3 – Diese Grafik zeigt elektrische Leitfähigkeit, Nickelgehalt und Alter in den jeweiligen Tiefen des Eiskernes Lazaun I.

Ulrike Nickus
Hansjörg Thies



Abb. 7.4 – Bohrsonde im Lazaun Moor, unweit vom Blockgletscher.

Im Oktober 2011 wurde im zentralen Bereich des Lazaunmoores, ungefähr 600 m von der Stirn des Lazaun-Blockgletschers entfernt, eine Kernbohrung durchgeführt. Ziel war die Gewinnung eines Bohrkernes durch die Sediment- und Torfablagerungen des Lazaunmoores. Der Bohrkern mit einem Durchmesser von 100 mm wurde sedimentologisch und geochemisch analysiert. An 4 Torfproben wurden absolute Altersdatierungen (Radiokarbonmethode) durchgeführt, auch das Pollenspektrum des Kernes wird derzeit untersucht. Die Daten dieses Bohrkernes sollen mit jenen des Bohrkernes vom Lazaun-Blockgletscher verglichen werden. Insbesondere das Pollenprofil soll Aufschluss über die klimatischen Verhältnisse während der Ablagerung der Sedimente und der Torflagen geben. Außerdem sollte untersucht werden, ob es auch in den Sedimenten oder im Torf zu Metallanreicherungen gekommen ist, ähnlich wie im Bohrkern des Blockgletschers.

Der Bohrkern besteht bis 7,6 m aus siltigen bis feinsandigen Sedimenten mit Einschaltungen von Torflagen und feinkiesigen Sedimenten. In einzelnen Horizonten wurden Pflanzenreste gefunden (Holzreste). Bis in 4 m Tiefe sind Torflagen häufig, darunter selten. Diese Sedimente werden unterlagert von einer kompakten Grundmoräne. Die C¹⁴-Datierungen an Torflagen haben ergeben, dass der Bohrkern in einer Tiefe von 8 m ein Alter von ca. 11.000 Jahren vor heute aufweist. Demnach ist die unterlagernde Grundmoräne dem Egesen-Stadium zuzuordnen (Höhepunkt der Egesen-Vereisungsphase war vor ca. 12.500 Jahren vor heute). Die Sedimente und Torflagen über der Grundmoräne weisen somit dasselbe Alter auf wie der gefrorene Kern des Blockgletschers, beide stammen aus dem Holozän.

An insgesamt 66 Proben wurden mittels RFA (Röntgenfluoreszenzanalyse) die Hauptelemente (SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MnO, MgO, CaO, Na₂O, K₂O, TiO₂ und P₂O₅) sowie 29 Spurenelemente (u.a. As, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn) gemessen. Dabei sollte

geklärt werden, ob es ähnlich wie im Bohrkern des Blockgletschers auch in den Sedimenten und Torflagen des Lazaunmoores zur Anreicherung bestimmter Spurenelemente (z.B. Nickel) gekommen ist. Tatsächlich konnte in 133 cm Tiefe eine erhöhte Konzentration an Nickel festgestellt werden. Diese Probe besitzt ein Alter von ca. 3.400 Jahren vor heute. In einer Eisprobe aus dem Bohrkern des Blockgletschers mit einem ähnlichen Alter wurden ebenfalls hohe Nickelkonzentrationen gemessen. Einzelne Proben zeigten auch erhöhte Konzentrationen an Cobalt (157 ppm), Chrom (293 ppm), Kupfer (128 ppm) und Zink (192 ppm).

Das Schwermineralspektrum der Sedimente des Bohrkernes ist wie nicht anders zu erwarten typisch für die Gesteine

Bohrung Lazaunmoor

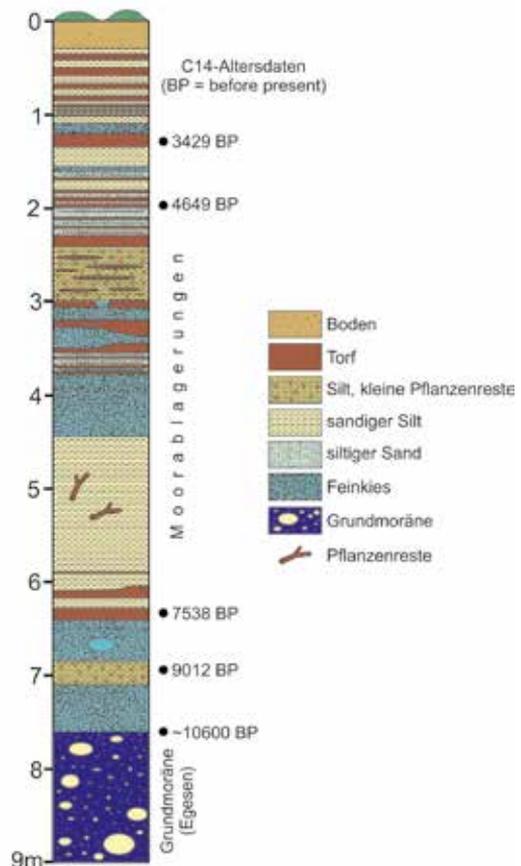


Abb. 7.5 – Bohrprofil der durchgeführten Kernbohrung im Lazaun Moor mit den jeweiligen Altersdaten.

des Einzugsgebietes (Paragneise und Glimmerschiefer) und setzt sich aus Granat (ca. 60 %), Staurolith (20 %), Turmalin (8 %), Apatit (4 %), Disthen (3 %) sowie Zirkon und Rutil zusammen.

Bei den Sedimenten des Lazaunmoores handelt es sich nicht um typische Seeablagerungen (Bändertone), sondern um siltige, vor allem sandige und kiesige Sedimente. Die siltigen Sedimente stellen vermutlich Stillwasserablagerungen dar, entstanden in flachen Tümpeln. Sandige und kiesige Lagen stellen einzelne Ablagerungsereignisse dar, ausgelöst durch Starkniederschläge. Vor allem die kiesigen Lagen stellen distale Murschuttablagerungen dar, die weit in das Lazaunmoor gereicht und dieses flächenhaft bedeckt haben. Torfhorizonte repräsentieren dagegen etwas länger anhaltende Zeitabschnitte mit günstigen (vermutlich wärmeren und etwas trockeneren) klimatischen Bedingungen mit intensiver Torfbildung und entsprechender Vegetation.



Abb. 7.6 – Bohrkern zwischen 14 und 16 m Tiefe: es handelt sich hierbei um Ablagerungen der Grundmoräne.

Mathias Hirnsperger
Karl Krainer

25

7.3 | Seesedimente

Physikalische, chemische und biologische Ereignisse, die im Verlauf der Jahreszeiten in Seen aufeinander folgen, hinterlassen Spuren und Reste, die Tag für Tag auf den Seeboden sinken und langsam das Seesediment bilden. Aus diesem Grund stellt die Untersuchung von Seesedimenten – auch Paläolimnologie genannt – den Zugang zum historischen Archiv von Seen dar. Das Hauptziel der Paläolimnologie ist die Rekonstruktion der Entwicklung von Seen in Beziehung zu lokalen und globalen Veränderungen während der letzten Jahrhunderte bis Jahrtausende. Das Wissen über die langfristige ökologische Entwicklung von Seen wird dann für die Prognose der zukünftigen Entwicklung der Seen eingesetzt. Das ist besonders wichtig für jene zahlreichen Seen, wo der menschliche Einfluss früher anfang als die Untersuchung ihrer ökologischen Bedingungen, die üblicherweise erst vor zwei, drei Jahrzehnten gestartet wurde.

Hochgebirgsseen sind optimale Studienobjekte für die Untersuchung der Auswirkungen des Klimawandels auf Binnengewässer, denn der direkte menschliche Einfluss ist im Hochgebirge gering. Allerdings sind auch die Kenntnisse über die ökologische Entwicklung von Hochgebirgsseen oft gering, vor allem wegen logistischer Schwierigkeiten und der extremen klimatischen Bedingungen. Rezente Studien haben gezeigt, dass auch Hochgebirgsseen von atmosphärischer Verschmutzung belastet werden, und dass sie gegenüber direkten und indirekten Auswirkungen des Klimawandels (z.B. globale Erwärmung, Schmelzen der Gletscher und des Permafrosts) sehr sensitiv sind.

Die Untersuchung der Seesedimente innerhalb des Projekts permaqua wurde mit den folgenden Zielen durchgeführt: a) die ökologische Entwicklung von Seen in Permafrostgebieten seit

Ende der kleinen Eiszeit (zwischen ~1850 und 1900) zu dokumentieren; b) die direkten und indirekten Auswirkungen des Klimawandels auf die biologischen Gemeinschaften in von Permafrost beeinflussten Hochgebirgsseen zu untersuchen; c) Seesedimente mit Vertikalkernen aus Blockgletschern und Moorsedimenten zu vergleichen. Im Herbst 2012 und 2013 wurden aus fünf Hochgebirgsseen in Nord- und Südtirol Sedimentkerne entnommen. Die meisten Seen befinden sich entlang des Alpenhauptkamms zwischen 2.500 und 2.700 m (Tab. 7.1). Alle Kerne wurden anhand der radioaktiven Isotopen ²¹⁰Pb und ¹³⁷Cs datiert und auf verschiedene Indikatoren untersucht (Tab. 7.2).

See	Gebiet	Seehöhe [m ü.d.M.]	Beprobungsdatum	Kernlänge [cm]
Hungerschartensee	Schnalstal (ST)	2700	06/09/2012	18
Wilder Pludersee	Ultental (ST)	2483	11/09/2012	26
Großer Malersee	Reintal (ST)	2501	22/10/2012	60
Wannenkarsee	Windachtal (NT)	2636	22/08/2013	13
Upiasee	Matschertal (ST)	2552	04/09/2013	4,5

Tab. 7.1 – Untersuchte Seen mit Angabe des Beprobungsdatums und der Kernlänge.

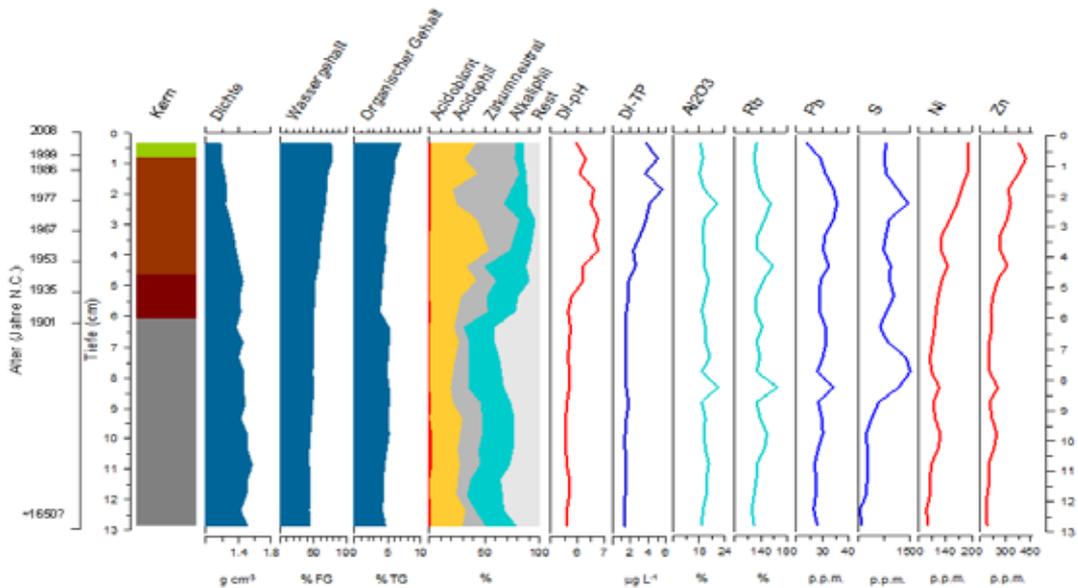


Abb. 7.7 – Tiefenprofile einiger geochemischen Indikatoren und der Kieselalgen pH-Präferenzen im Sedimentkern aus dem Wannenkarsee (Nordtirol). Kern = Kernausssehen und Textur, grün = wässrige Schicht mit Wassermoosen und Chironomidenröhren, braun = braunes weiches bis kompaktes Gel mit abnehmenden Moosresten, grau = zunehmend kompaktes und mineralisches Sediment, FG = Frischgewicht, TG = Trockengewicht, Acidobiont = nur in Gewässern mit pH<7 vorkommend, Acidophil = vorwiegend in leicht sauren Gewässern vorkommend, Zirkumneutral = um pH 7 vorkommend, Alkaliphil = vorwiegend in Gewässern mit pH>7 vorkommend, Rest = keine Präferenz für Wasser pH, DI-pH und DI-TP = durch sub-fossile Kieselalgen rekonstruierter Wasser pH, beziehungsweise Konzentrationen des Gesamtphosphors im Seewasser.

Die Ergebnisse der Sedimentuntersuchung werfen einen Blick auf die ökologische Entwicklung der Projektseen während der letzten Jahrhunderte bis Jahrtausende. Die Sedimente der untersuchten Seen zeigen eine deutliche stratigraphische Veränderung (Abnahme der Sedimentdichte, Zunahme des organischen Gehaltes und Veränderung der Zusammensetzung und Abundanz der Kieselalgenarten), die die Übergangsperiode zwischen dem Maximum der Kleinen Eiszeit (um 1850) und dem Abschmelzen der Gletscher Anfang des 20. Jahrhunderts markiert (Abb. 7.7). Dank dem sehr geringen menschlichen Einfluss auf die Untersuchungsgebiete sind dagegen die Veränderungen seit dem Wirtschaftsboom der 1960-1970er Jahre, die man in Niederungsseen üblicherweise beobachten kann, nicht erkennbar.

Die Indikatoren der atmosphärischen Belastung (z.B. Blei und Schwefel) nehmen während der letzten 2 Jahrhunderte zu, seit der Einführung von bleifreiem Benzin und Abgaskatalysatoren in den mittleren 1970er Jahren aber durchgehend wieder ab. Die Konzentrationen der Schwermetalle (z.B. Nickel, Zink, Kobalt, Kupfer, Arsen) steigen in den meisten untersuchten Seen während der letzten 200 Jahre durchgehend an und erreichen die höchsten Werte zwischen den 1990er und den 2000er Jahren.

Die durch die subfossilen Kieselalgen rekonstruierten pH-Werte des Seewassers zeigen nur in dem wenig gepufferten Wannenkarsee (Nordtirol) eine rezente Abnahme, die möglicherweise mit dem Abschmelzen des Permafrosts in Zusammenhang steht. In

den übrigen untersuchten Seen sind die Auswirkungen auf die benthischen Kieselalgen schwer erkennbar.

Monica Tolotti

Indikator	Information
Visuelles Aussehen und Textur	Veränderungen im Einzugsgebiet des Sees
Radionuclide (²¹⁰ Pb, ¹³⁷ Cs, ²²⁹ Ra, ²⁴¹ Am)	Altersdatierung
Sedimentationsrate	Akkumulation vom Sediment auf dem Seeboden
Dichte	Hydrologische Veränderungen
Wasser- und organischer Gehalt	Chemische und tropische Entwicklung des Sees
Spurenelemente und Schwermetalle	Atmosphärische Belastung und Auswirkung des Klimawandels auf Permafrost
Kieselalgen (Artenzusammensetzung, ökologische Präferenzen und Abundanz)	Historische Umweltveränderungen
	Rekonstruktion von Wasser-pH (Abschmelzen des Permafrosts) Rekonstruktion von Gesamtphosphor als Indikator der Seetrophie
Chrysophyceen Zysten	Seetrophie

Tab. 7.2 – Geochemische und biologische Indikatoren der untersuchten Seesedimente.

Beobachtungen der letzten Jahre haben gezeigt, dass die Häufigkeit von Naturgefahren ausgehend aus Permafrostgebieten zugenommen hat. Dabei handelt es sich meist um Prozesse, welche sekundär aus Permafrostgebieten entstehen, wie z.B. Steinschlag, Rutschungen oder Murgänge. Die Auswirkungen der Klimaerwärmung sowie



Abb. 8.1 – Aus dem Stirnbereich dieses Blockgletschers im hinteren Suldental lösten sich aufgrund einer Kombination von Wärme und heftigem Niederschlag mehrere hundert Kubikmeter an Lockermaterial und mitunter auch zahlreiche Gesteinsblöcke. (Abteilung Wasserschutzbauten, Autonome Provinz Bozen-Südtirol).

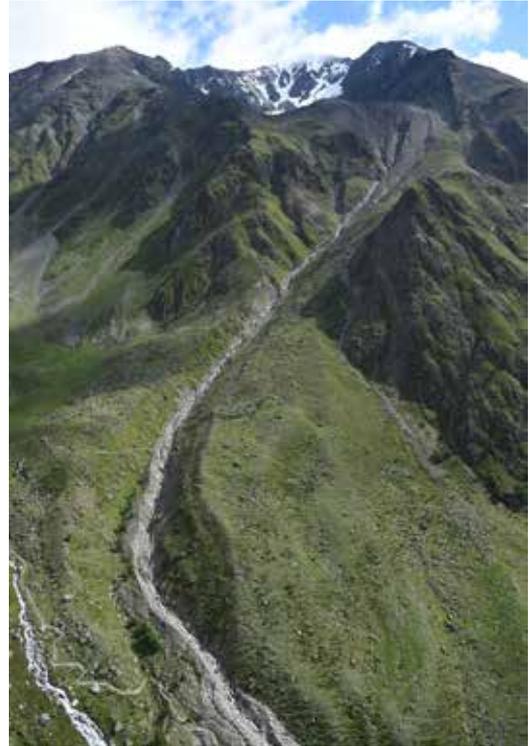


Abb. 8.2 – Ähnliche Situation im Schnalstal: durch ein heftiges Gewitter wurde die Stirn des Blockgletschers in der Similaungrube instabil und in der Folge kam es zu einem Murgang. (Abteilung Wasserschutzbauten, Autonome Provinz Bozen-Südtirol).



Abb. 8.3 – Die Folgen von Murgängen sind besonders im Tal ersichtlich. (Abteilung Wasserschutzbauten, Autonome Provinz Bozen-Südtirol).



Abb. 8.4 – Am 18. September 2004 lösten sich aus dem Gipfelbereich des Thurwiesers 1 Mio. Kubikmeter Gesteinsmassen, welche als Gesteinslawine zu Tal donnerten.



Abb. 8.5 – Klassisches Beispiel eines Steinschlagereignisses im Hochgebirge (Krummgampental).

von sommerlichen Niederschlagsereignissen, wie Starkregen oder lang andauernde Regenperioden, führen zu einer starken Mobilisierung des Lockermaterials im Permafrost. Anfällig dafür sind insbesondere Gebiete mit Blockgletschern und gefrorenen Schutthalden. Einige gut dokumentierte Ereignisse in Südtirol in den Jahren 2013 und 2014 haben gezeigt, dass v.a. die Kombination von Starkniederschlägen mit hohen Temperaturen zu außergewöhnlichen Ereignissen geführt hat. Dabei können mehrere grundsätzliche Ausgangsszenarien unterschieden werden:

a) In zwei Fällen (Sulden und Schnals) lösten sich aus dem Stirnbereich eines aktiven Blockgletschers große Mengen von Schutt und Steinmassen und waren als Geschiebelieferanten maßgeblich an der Entstehung von Murgängen beteiligt.

b) In zwei weiteren Fällen (Trafoi und Sella) kam es zum Ausbruch eines unterirdischen Sees, in Trafoi entstand dabei ein großer Murgang. Der Ausbruch erfolgte dabei zeitversetzt einige Stunden später als das Niederschlagsereignis.

c) Steinschlag aus Blockgletschern betrifft zum Glück keine bewohnten Gebiete, wohl aber sehr viele Wanderwege, Steige und Hüttenzugänge in nahezu allen Hochgebirgsbereichen Tirols. Mehrfach wurden diese Wege gesperrt oder aufgrund von länger andauernden Steinschlägen verlegt (Sulden, Martell, Ahrntal, Sella).

Die Analyse dieser Ereignisse hat gezeigt, dass nicht nur warme Temperaturen derartige Ereignisse auslösen können, sondern dass v.a. die Kombination von hohen Temperaturen und Niederschlagsereignissen das Auftreten solcher Phänomene im Hochgebirge begünstigt. Eine Erklärung dafür muss wohl die gute Wärmeleitfähigkeit von Wasser liefern, da erst durch den Niederschlag die „Wärme“ effektiv in den Untergrund geleitet wird.

Die Messung der Felstemperatur erfolgt in Südtirol erst seit einigen Jahren, somit können die konkreten Auswirkungen der Klimaerwärmung auf Felsmassen noch nicht eindeutig bestätigt werden (vgl. Kapitel 3). Während Steinschläge und Felsstürze in Folge von Temperaturschwankungen der aktiven Zone leicht erklärbar und verständlich sind, sind die Bewegungsprozesse in eisgefüllten Klüften im Inneren der Felsgrate noch weitgehend ungeklärt. Die Mächtigkeit der aktiven Zone nimmt mit der erhöhten Temperatur im Zuge der Klimaerwärmung zu. Dementsprechend sollten auch Steinschlag- und Felssturzereignisse häufiger werden.

Volkmar Mair
Karl Krainer
Kathrin Lang
David Tonidandel

Den Projektteilnehmern ist bewusst, dass die im Rahmen des Projektes permaqua durchgeführten Arbeiten nur einige Antworten auf verschiedene Fragen zum alpinen Permafrost und seiner Bedeutung für die Umwelt und die Gefährdung der Gebirgsbereiche durch abschmelzenden Permafrost geben können. Immerhin konnten wichtige Fragenkomplexe erörtert und erste Lösungen angedacht werden.

Die folgende Zusammenfassung gibt einen Überblick über die wichtigsten Ergebnisse:

- Laut dem erstellten Altersmodell aus den Datierungen des Eiskernes vom Lazaun Blockgletscher im Schnalstal (Südtirol) liegt das Alter des Eises an der Basis des Blockgletschers in 25 m Tiefe bei ca. 10.300 Jahren vor heute. Dies entspricht in etwa dem Ende der letzten Kaltzeit (Jüngere Dryas) bzw. dem Ende der Altsteinzeit. Demnach hat sich dieser Blockgletscher unmittelbar nach dem Rückzug des Egesen-Gletschers (Egesen = die letzte Abfolge von Gletschervorstößen des Spätglazials) zu bilden begonnen und das Eis ist seither - geschützt durch den auflagernden Schuttmantel - erhalten geblieben.
- Die Beobachtung der Blockgletscherentwicklung nach der kleinen Eiszeit (Maximum 1850) zeigt, dass sich bereits in 150 Jahren größere Blockgletscher aus den Rand- und Stirnmoränen dieses Gletschervorstößes gebildet haben. Somit beträgt die minimale Reaktions- bzw. Bildungszeit der Blockgletscher lediglich einige 100 Jahre.
- Seesedimente und Moorablagerungen sind hoch auflösende Umweltarchive, die uns einen detaillierten Blick in die Klimageschichte zur Zeit ihrer Entstehung ermöglichen. Die Daten des Bohrkernes aus dem Lazaun Moor wurden mit jenen des Bohrkernes vom Lazaun-Blockgletscher verglichen. Der Bohrkern aus dem Moor ergab in einer Tiefe von 8 m ein Alter von ca. 11.000 Jahren vor heute. Demnach ist die unterlagernde Grundmoräne dem Egesen-Stadium zuzuordnen. Die Sedimente und Torflagen über der Grundmoräne weisen somit dasselbe Alter auf wie der gefrorene Kern an der Basis des Blockgletschers. In einer Tiefe von 133 cm konnte im Torfkern eine erhöhte Konzentration an Nickel festgestellt werden. Diese Probe besitzt ein Alter von ca. 3.400 Jahren vor heute. In einer Eisprobe aus dem Bohrkern des Blockgletschers mit einem ähnlichen Alter wurden ebenfalls hohe Nickelkonzentrationen gemessen.
- Die Bewegungsraten einiger der untersuchten Blockgletscher haben in den letzten Jahren deutlich zugenommen, gleichzeitig sind sie durch das verstärkte Abschmelzen des Eises eingesunken, es entstehen Kollapsstrukturen und unterirdische Seen entleeren sich.
- Durch das Abschmelzen des Eises werden die steilen Stirn- und Seitenböschungen von Blockgletschern instabil und rutschen vermehrt im Zuge von Niederschlagsereignissen ab. Es entstehen Steinschläge und Murgänge. Die Analyse dieser Ereignisse hat gezeigt, dass nicht nur warme Temperaturen derartige Ereignisse auslösen können, sondern dass v.a. die Kombination von hohen Temperaturen und Niederschlagsereignissen das Auftreten solcher Phänomene im Hochgebirge begünstigt.
- Die hydrogeologische Gefahr, welche von Blockgletschern ausgeht, muss von Fall zu Fall definiert werden. Eine allgemeine Aussage, wonach Steinschlag und Murrereignisse mit zunehmender Klimaerwärmung häufiger auftreten, ist nicht zulässig, denn sie hängt ganz wesentlich von den morphologischen Gegebenheiten im unmittelbaren Bereich eines Blockgletschers ab. So z.B. geht vom Blockgletscher oberhalb des Langsees im hinteren Ultental oder vom Blockgletscher in Lazaun keinerlei Gefahr aus, da sie im flachen Gelände liegen. Andere Blockgletscher wie jener am Hintergrat in Sulden oder in der Similaungrube im Schnalstal bewegen sich in steilen Lagen und haben bereits zu dokumentierten Steinschlägen und Murabgängen geführt.
- Konkrete Auswirkungen der Klimaerwärmung auf Felsmassen können noch nicht eindeutig bestätigt werden. Eine erste Analyse hat aber ergeben, dass es v.a. im Bereich zwischen Felsoberfläche und einer Tiefe von max. 15 m große Temperaturschwankungen gibt. Die aktive Zone erstreckt sich nordseitig bis in einer Tiefe von ca. 8 m, südseitig bis in einer Tiefe von ca. 15 m. Im Inneren der Felsmasse herrschen konstant negative Temperaturen von ca. -2,6 °C auf einer Höhe von 3.200 m (Grawand) und -2,8 °C auf einer Höhe von 3.800 m (Ortler).
- Durch das Abschmelzen des Permafrostes in den Lockersedimenten (Blockgletscher, Hangschutt) werden das Porenvolumen der Sedimente und damit auch das Speichervolumen für Wasser größer. Es kann mehr Wasser im Sediment gespeichert werden. Dadurch werden die Abflussspitzen abgeschwächt, während der Abfluss in der Trockenwetterphase im Herbst und Winter leicht ansteigt.
- Viele Blockgletscherquellen sind durch eine auffallend hohe elektrische Leitfähigkeit (bis zu über 1.000 µS/cm im Spätherbst) sowie durch hohe Konzentrationen von Nickel und anderen Metallen gekennzeichnet.
- Vor allem in Bächen, deren pH-Wert sich im sauren Bereich befindet, liegen die Konzentrationen einzelner

Elemente (wie Nickel, Mangan, Zink oder Aluminium) deutlich über den entsprechenden Grenzwerten der EU-Wasserrahmenrichtlinie. In Bächen ohne Blockgletschereinfluss werden hingegen kaum Schwermetalle gemessen, die Werte liegen um bzw. unter der Nachweisgrenze von wenigen µg/L.

- In den blockgletscherbeeinflussten Gewässern ist die Arten- und Individuenanzahl niedriger als in den unbeeinflussten Referenzgewässern. Dies trifft sowohl für Kieselalgen als auch für das Zoobenthos zu. Larven verschiedener Zuckmücken (Chironomidae) sind die häufigsten Tiere in Hochgebirgsgewässern. In den blockgletscherbeeinflussten Gewässern machen sie rund 90 % aller Individuen aus.
- Die Untersuchung von ausgewählten Hochgebirgsseen hat ergeben, dass das Makrozoobenthos des Ufers der unbeeinflussten Seen im Durchschnitt eine höhere Diversität aufweist, vor allem weil auch empfindliche Arten wie Eintagsfliegen und Köcherfliegen anzutreffen sind, die in den beeinflussten Seen fehlen. Außerdem sind die Arten gleichmäßiger verteilt und zeigen niedrigere Dominanzwerte. Unter ungünstigen Umweltbedingungen dominieren häufig einige wenige Arten, die unempfindlich sind und eine hohe Anpassungsfähigkeit besitzen. Drei Seen mit Blockgletschereinfluss, die außerdem erhöhte Nickelwerte aufweisen, unterscheiden sich in der Zusammensetzung der Chironomiden-gemeinschaften völlig von den übrigen Seen.
- Hochgebirgsseen sind optimale Studienobjekte für die

Untersuchung der Auswirkungen des Klimawandels auf Binnengewässer, denn der direkte menschliche Einfluss ist im Hochgebirge gering. Die Sedimente der untersuchten Seen zeigen eine deutliche stratigraphische Veränderung (Abnahme der Sedimentdichte, Zunahme des organischen Gehaltes und Veränderung der Zusammensetzung und Abundanz der Kieselalgenarten), die die Übergangsperiode zwischen dem Maximum der Kleinen Eiszeit (um 1850) und dem Abschmelzen der Gletscher Anfang des 20. Jahrhunderts markiert. Die Konzentrationen der Schwermetalle (z.B. Nickel, Zink, Cobalt, Kupfer, Arsen) stiegen in den meisten untersuchten Seen während der letzten 200 Jahre durchgehend an und erreichten die höchsten Werte zwischen den 1990er und den 2000er Jahren.

Das Projekt permaqua konnte viele interessante Aspekte der Auswirkungen von abschmelzendem Permafrost auf Wasserhaushalt und Gewässerökologie im Hochgebirge aufzeigen. Nun kommt es darauf an, gezielt in die aufgezeigten Richtungen weiter zu forschen und die bestehenden Monitoringsysteme für eine Langzeitbeobachtung zu erhalten und auszubauen. Erst kontinuierliche Datenreihen erlauben es, den IST-Zustand zu dokumentieren und in der Folge die zukünftigen Entwicklungen des Hochgebirgspermafrosts einzuschätzen und daraus Schlussfolgerungen im Hinblick auf den Klimawandel zu ziehen.

Volkmar Mair

Bollmann, E., Rieg, L., Spross, M., Sailer, R., Bucher, K., Maukisch, M., Monreal, M., Zischg, A., Mair, V., Lang, K. & Stötter, J. (2012) Blockgletscherkataster Südtirol – Erstellung und Analyse. *Innsbrucker Geographische Studien* 39, *Permafrost in Südtirol*: 147–171.

Gabrielli, P., Barbante, C., Carturan, L., Cozzi, G., Dalla Fontana, G., Dinale, R., Dragà, G., Gabrieli, J., Kehrwald, N., Mair, V., Mikhalenko, V.N., Piffer, G., Rinaldi, M., Sepi, R., Spolaor, A., Thompson, L.G. & Tonidandel, D. (2012) Discovery of cold ice in a new drilling site in the Eastern European Alps. *Geogr. Fis. Dinam. Quat.* 35: 101–105.

Krainer, K. & Ribis, M. (2012) A Rock Glacier Inventory of the Tyrolean Alps (Austria). *Austria Journal of Earth Sciences* 105/2, 32–47.

Krainer, K. (2015) Der aktive Blockgletscher im Äußeren Hochebenkar. *Forschung am Blockgletscher – Methoden und Ergebnisse*, Schallhart, N. & Erschbamer, B., *Alpine Forschungsstelle Obergurgl 4*, innsbruck university press: 55–75.

Krainer, K., Bressan, D., Dietre, B., Haas, J.N., Hajdas, I., Lang, K., Mair, V., Nickus, U., Reidl, D., Thies, H. & Tonidandel, D. (2015) A 10,300-year-old permafrost core from the active rock glacier Lazaun, southern Ötztal Alps (South Tyrol, northern Italy). *Quaternary Research* 83: 324–335.

Mair, V., Zischg, A., Lang, K., Tonidandel, D., Krainer, K., Kellerer-Pirklbauer, A., Deline, P., Schoeneich, P., Cremone, E., Pogliotti, P., Gruber, S., Böckli, L. (2011) PermaNET – Permafrost Long-term Monitoring Network. Synthesis report. *INTERPRAEVENT Journal series 1*, Report 3.

Mair, V., Lang, K., Zischg, A. & Tonidandel, D. (2012) PROALP und die Erforschung des Permafrosts in Südtirol. *Innsbrucker Geographische Studien* 39, *Permafrost in Südtirol*: 9–14.

Nickus, U., Krainer, K., Thies, H. & Tolotti, M. (2015) Blockgletscherabflüsse am Äußeren Hochebenkar – Hydrologie, Wasserchemie und Kieselalgen. *Forschung am Blockgletscher – Methoden und Ergebnisse*, Schallhart, N. & Erschbamer, B., *Alpine Forschungsstelle Obergurgl 4*, innsbruck university press: 117–134.

Reinthaler, J. (2014) Permafrostforschung an der Grauwand (Schmalstal, Südtirol). Bachelorarbeit an der Universität Innsbruck.

Schneider, R., Schneider, H. (2001) Zur 60-jährigen Messreihe der kurzfristigen Geschwindigkeitsschwankungen am Blockgletscher im Äußeren Hochebenkar (Ötztaler Alpen, Tirol). *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie* 37: 1–33.

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.

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.

Zischg, A., Mair, V., Tonidandel, D. & Lang, K. (2012) Berücksichtigung von Permafrost in der Gefahrenzonenplanung in Südtirol. *Innsbrucker Geographische Studien* 39, *Permafrost in Südtirol*: 173–187.

