

Christian Halla, Jan Blöthe, Dario Trombotto Liaudat, Lothar Schrott

Permafrost in Argentinien Anden – eine bedeutende hydrologische Ressource

Die semi-ariden Zentralanden Argentinien werden durch eine weitflächige Verbreitung von Permafrost und eine große vertikale Erstreckung von periglazialen Formen und Prozessen charakterisiert. Große Blockgletscherkomplexe mit eisreichem Permafrost werden in den Trockengebieten der Anden als bedeutende Wasserspeicher für die Zukunft angesehen. Die argentinische Regierung hat 2010 ein Gesetz zum Schutz der Gletscher und der periglazialen Höhenstufe erlassen, um diese Naturressourcen zu schützen. Die vorliegende Studie hat das Ziel, die Verbreitung der Blockgletscher aufzuzeigen und die wenig bekannten Eisgehalte dieser Periglazialformen zu quantifizieren.

■ Textbox 1

Periglaziale Höhenstufe und Permafrost

Das Periglazial bezeichnet Prozesse, Landformen und unvergletscherte Gebiete der kalten Klimate (hohe Breiten und alpine Regionen) (Barsch 1996). Zwei Kriterien werden zur Abgrenzung herangezogen: 1) Das Vorhandensein von Permafrost und 2) intensive Frostaktivität (Gefrier-Tau-Zyklen).

Permafrost ist definiert als Untergrund (Fest- und Lockergestein, Wasser, Eis und organisches Material), der für mindestens zwei aufeinander folgende Jahre Temperaturen unter 0 °C aufweist. Die Definition beruht auf einem thermischen und einem zeitlichen Kriterium. In einem vertikalen Profil wird die Untergrenze des dauerhaft gefrorenen Permafrostkörpers als Permafrostbasis bezeichnet, die Permafrosttafel bildet die Obergrenze. Die darüber liegende Auftauschicht ist von saisonalen Temperaturschwankungen beeinflusst und taut im Sommer auf.

Die Untergrenze intakter Blockgletscher markiert in guter Näherung auch die Untergrenze des Permafrostes. Blockgletscher gelten als Permafrostindikatoren. Die periglaziale Höhenstufe wird in den Anden nach oben durch die unvergletscherten Grate und Gipfel bestimmt und hat zwischen 25° und 35° Süd eine vertikale Ausdehnung bis 2 000 Höhenmeter (Schrott und Götz 2013).

Die argentinischen Anden erstrecken sich über 3700 km von der ariden Hochebene (Puna) an der chilenischen und bolivianischen Grenze im Nordwesten bis nach Feuerland im subarktischen äußersten Süden. Besonders spektakuläre Landformen zeigen sich im zentralen Andenabschnitt um den 30. Grad südlicher Breite. Hier sind neben dem höchsten Gebirgsmassiv der amerikanischen Kordillere, dem Aconcagua (6 961 m ü. d. M.), mehr als 4000 Blockgletscher in der periglazialen Höhenstufe (vgl. Textbox 1) zwischen 3 500 und 5 500 m ü. d. M. bei Jahresmitteltemperaturen um und unter 0 °C anzutreffen. Intakte Blockgletscher sind Schutt-Eis-Gemische, die sich ähnlich wie Eisgletscher unter plastischer Verformung hangabwärts bewegen und zungen- oder lobenförmige Landformen ausbilden. Die hohe Aridität und Schuttverfügbarkeit haben zur Folge, dass nicht nur die Anzahl, sondern auch die Gesamtfläche der Eisgletscher im Vergleich zu Blockgletschern häufig kleiner ist und Blockgletscher Ausmaße von mehreren Kilometern Länge annehmen können. Die Bedeutung der Blockgletscher für den heutigen und zukünftigen Wasserhaushalt in der semi-ariden Region ist noch unbekannt.

Schmelzwasser, künstliche Bewässerung und Gletscherinventar

Das saisonal freiwerdende Wasser durch schmelzende Schnee- und Eismassen sowie auftauenden Permafrost speist die Flüsse (z. B. Rio Mendoza, Rio San Juan) an der semiariden Andenostabdachung und ermöglicht – dank künstlicher Bewässerung – ertragreichen Weinbau sowie Oliven- und Zitrusplantagen rund um die Oasenstädte Mendoza, San Juan und San José de Jáchal (vgl. Fotos 1 und 2 und Abb. 1). Die argentinische Regierung hat in diesem Zusammenhang 2010 ein weltweit einzigartiges Gesetz zum Schutz der Gletscher und des Periglazialraums erlassen, um die hydrologischen Ressourcen zu schützen (Schrott und Götz 2013). Diese Gesetzgebung wurde ermöglicht, nachdem Bergbauaktivitäten in den Hochregionen der Anden in der Provinz San Juan zu hochtoxischen Belastungen in den

Gebirgsflüssen führten. Die argentinische Regierung hat daraufhin ein Forschungsprojekt zur Inventarisierung aller Gletscher und Blockgletscher initiiert (www.glaciaresargentinos.gob.ar). In der Folge wurden für die gesamte Andenkordillere Argentiniens über 16 000 Gletscher und Blockgletscher inventarisiert.

Auch in der Andenregion macht sich der Klimawandel durch einen Rückgang der Gletscherflächen in den letzten Jahrzehnten bemerkbar (Zemp et al. 2009). Neben den schmelzenden Gletschern kommt es auch in den Permafrostarealen durch die Temperaturzunahme zur Permafrostdegradation. Dies hat nicht nur eine Vergrößerung der saisonalen Auftaumächtigkeiten und eine sukzessive Verschiebung der Permafrostuntergrenzen in höhere Lagen zur Folge, sondern wirkt sich auch unmittelbar auf die saisonal freiwerdenden Wassermengen aus. Bislang ist jedoch wenig darüber bekannt, welche Eis- respektive Wasserpotenziale in den großen Blockgletschern der semiariden Anden gespeichert vorliegen. In der vorliegenden Studie wird dieser Frage mithilfe modernster Geländemethoden nachgegangen. Hochauflösende geophysikalische Methoden ermöglichen die interne Struktur von diesen Schutt-Eis-Gemischen zu erfassen und in zweidimensionalen Schnitten zu visualisieren (vgl. Textbox 1). Ziel ist es, die räumliche Variation der Eisgehalte in Blockgletschern abzubilden und zu quantifizieren. In Verbindung mit dem bereits vorliegenden Gletscherinventar können damit bestehende Wasserressourcen hochgerechnet und zukünftige Anpassungsstrategien wirksam gestaltet werden.

Permafrostverbreitung und Blockgletscher in den Zentralanden Argentiniens

Entlang der Andenkordillere finden sich die größten Permafrostareale der südlichen Hemisphäre außerhalb der Antarktis (Gruber 2012). Vor allem Blockgletscher sind weit verbreitet. Im Bereich von 30° bis 33° sind sie die dominierende Landform der periglazialen Höhenstufe und bedecken zusammen mit schuttbedeckten Gletschern anteilig mehr Flächen als die Hochgebirgsgletscher (vgl. Abb. 2). Dabei nehmen die von glazialen und periglazialen Formen eingenommen Flächen von Süden in Richtung Norden und von Westen in Richtung Osten ab, was durch zunehmende Aridität und steigende Jahresmitteltemperaturen äquatorwärts sowie die abnehmende Reliefhöhe in Richtung Andenostabdachung erklärt werden kann. Die geringen Niederschläge gepaart mit einer hohen solaren Strahlungsintensität limitieren hier die Bildung von Eis und Gletschern an der Oberfläche. Durch die Schuttauflage reagiert das isolierte Eis des Permafrosts im Untergrund verzögert auf Lufttemperaturänderungen (Trombotto und Borzotta 2009). Im Zuge des globalen

Klimawandels ist mit einer Zunahme der saisonalen Auftaumächtigkeiten und damit einer Degradation von eisreichen Permafrost nahe der Permafrosttafel zu rechnen.

Für die semi-ariden Anden wird seit langem vermutet, dass die Permafrostareale der periglazialen Höhenstufe einen bedeutenden Einfluss auf den Wasserhaushalt der Region und dem vom Schmelzwasser abhängigen Andenvorland haben (Corte 1976). Die Bedeutung des Permafrosts als Wasserressource wird im Zuge des globalen Klimawandels noch zunehmen. Da das Gesamtvolumen der periglazialen Wasserspei-



Fotos: L. Schrott



Fotos: C. Halla

Fotos 1 und 2: Das Schrägluftbild (oben) zeigt die charakteristische Dreigliederung an der Andenostabdachung nahe der Stadt Mendoza auf 33° südlicher Breite von Ost nach West. Im Vordergrund kontrastieren die wüstenhafte spärliche Strauchvegetation mit ausgetrockneten Flussbetten mit Weinbau, Zitrus- und Olivenplantagen in einem schmalen Streifen entlang der Andenkordillere (Bildmitte). Im Hintergrund erheben sich die Anden und zeigen nur in den Hochlagen über 5 000 m Höhe eine Vergletscherung.

Das Foto unten zeigt den Blick Richtung Osten von etwa 4 200 m Höhe aus der Cordillera Frontal zum Stausee von Potrerillos (1 380 m ü. d. M), der die Agglomeration rund um die Provinzhauptstadt Mendoza (fast 1. Mio. Einwohner) mit Wasser versorgt. In der Bildmitte ist der untere Teil des Morenas Coloradas Blockgletschers (ca. 3 700 m ü. d. M) zu sehen

cher in den zentralen Anden sowie deren Anteil am saisonalen Schmelzwasser nicht bekannt sind, ist es bedeutsam, die Eisgehalte von Permafrost-Landformen und die Schmelzwasseranteile aus der saisonalen Auftauschicht zu bestimmen.

In diesem Zusammenhang kommt großen Blockgletscher-Komplexen (>1 km²) eine besondere Rolle zu. Sie stellen Übergangs- und Mischformen aus vollkommen schuttbedeckten degradierten Gletschern und Blockgletschern dar und bilden mehrere große, meist zungenförmigen Loben aus, die mächtige Schutt-Eis-Gemische enthalten. Ein prominentes Beispiel ist der Morenas Coloradas Blockgletscher-Komplex (vgl. Abb. 2).

Morenas Coloradas Blockgletscher-komplex: Oberflächenbewegung und interne Struktur

Der Morenas Coloradas Blockgletscherkomplex liegt in der argentinischen Cordillera Frontal westlich von Mendoza (32° 56' S, 69° 23' W) und erstreckt sich von 3350 bis 4590 m ü. d. M. bei einer Gesamtlänge von über 5 km und einer maximalen Breite von 700 m (vgl. Abb. 1). Nur ein sehr kleiner Teil ist vergletschert, ganzjährige Schneefelder und Wandvereisungen kommen nur in den hochgelegenen (über 4500 m ü. d. M.), südexponierten, strahlungsarmen und damit kälteren Steilwänden vor (vgl. Abb. 2). Im oberen Abschnitt nordwestlich von Querprofil II wird der Blockgletscherkomplex durch einen schuttbedeckten Gletscher aufgebaut. Der Abschnitt zwischen den Querpro-

filen I und II weist eine Vielzahl an Schmelzwasserseen (Thermokarst) auf, die durch Degradation von Permafrost und Ausschmelzen von Eislinsen entstehen. Die untere Hälfte ist durch markante Zungen mit steilen Stirnböschungen (>35° Hangneigung) gekennzeichnet, die an der Oberfläche ausgeprägte Rücken- und Rinnenstrukturen sowie Gesteinsortierungen aufweisen. Diese Formen und Strukturen werden durch plastische Deformation des eisreichen Permafrosts im Untergrund verursacht und sind Ausdruck der Blockgletscherbewegung, die hier bis zu 3 m pro Jahr beträgt (vgl. Abb. 3).

Die interne Struktur des Blockgletscherkomplexes wurde mit der geoelektrischen Widerstandstomographie erfasst (vgl. Textbox 2). Mithilfe der zweidimensionalen Visualisierung der spezifischen Widerstände im Untergrund können gut leitfähige, ungefrorene und feuchte Abschnitte, wie die Auftauschicht, von Aquiferen sowie sehr schlecht leitfähigen, gefrorenen und eisreichen Abschnitten des Permafrosts unterschieden werden. Damit können entlang der gemessenen Profile LI, QI und QII die potenziellen Eisgehalte und die Mächtigkeit der Auftauschicht innerhalb des Blockgletscherkomplexes bestimmt werden (vgl. Abb. 2). Aus Erfahrungswerten wird abgeleitet, dass Permafrost mit Eisgehalten kleiner als 35 % im Widerstandsbereich zwischen 104 und 105 Ωm auftreten (Farbbereich gelb bis grün). Eisreicher Permafrost mit Eisgehalten größer als 35 % ist im Widerstandsbereich zwischen 105 und 106 Ωm (Farbbereich grün bis blau) zu erwarten. Spezifi-

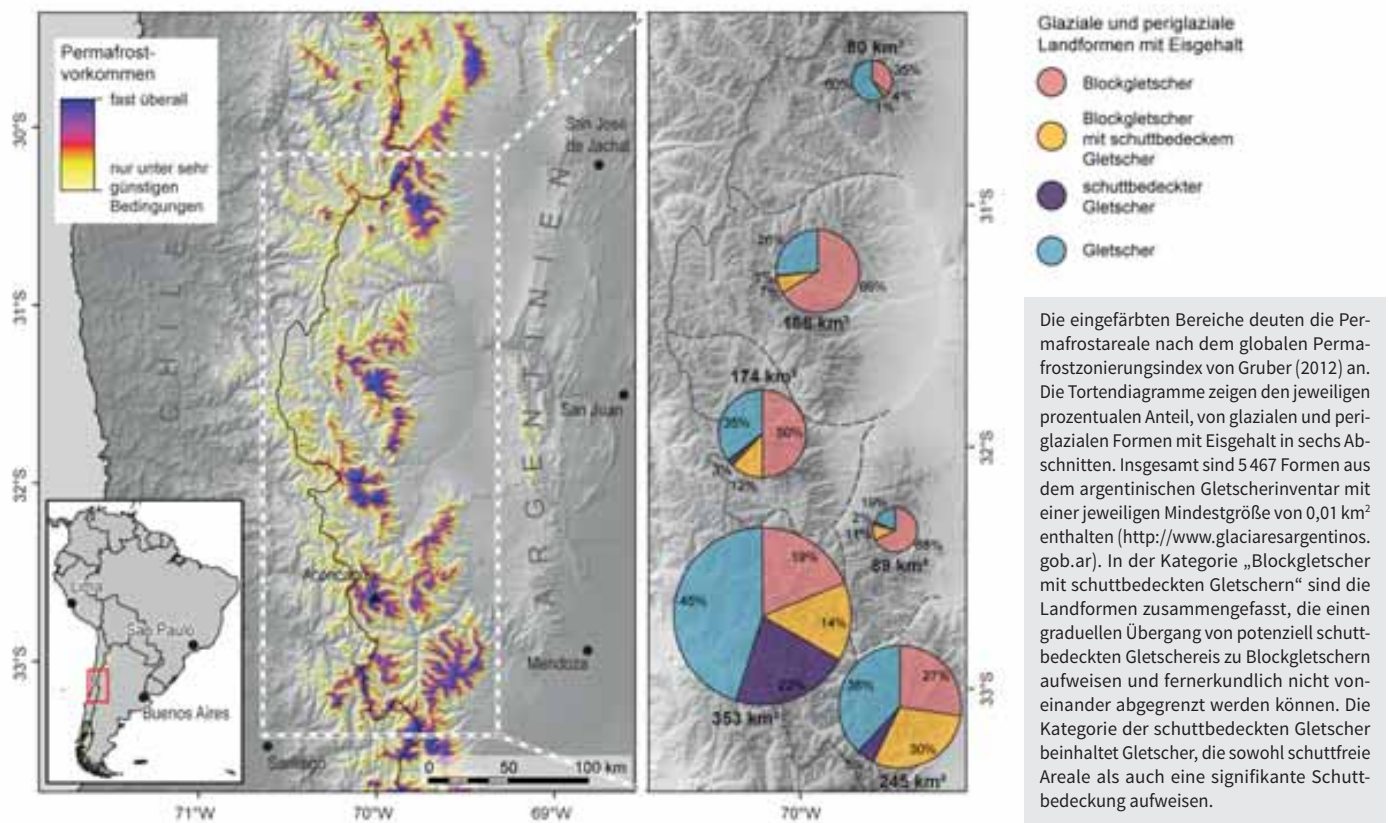


Abb. 1: Räumliche Ausdehnung des Untersuchungsgebiets in den Zentralanden Argentiniens.

sche Widerstände von 106 Ω m und größer werden als Untergrundeis mit 90–100 % Eisgehalt interpretiert (blaue Farbe).

Die Widerstandstomographien zeigen die Variabilität der internen Struktur des Blockgletscherkomplexes (vgl. Abb. 3). Eisreicher Permafrost dominiert die interne Struktur mit zunehmender Höhe, mit geringeren Anteilen im strahlungsreichen südlichen Talbereich. Dieser thermische Einfluss spiegelt sich auch in der Mächtigkeit der Auftauschicht wider und zeigt sich im südwestlichen Abschnitt von Profil QI in 3780 m ü. d. M., wo die Auftauschicht mit 20±5 m mächtiger ist, im Vergleich zum niedriger gelegenen Profil LI auf 3525 m ü. d. M. mit 7,5±5 m. Der Permafrost reicht in den Bereichen von QI und QII bis in Tiefen von über 50 m und enthält 10–40 m mächtigen eisreichen Permafrost. Der sehr gut leitfähige Bereich mit spezifischen Widerständen von ca. 102 Ω m (rote Färbung) in QI deutet auf ein großes Aquifer mit Schmelzwasser inmitten des Permafrostbereiches hin.

Im Profil LI zeigen die Wertebereiche relativ geringe Eisgehalte und lassen einen degradierten Permafrostkörper vermuten. Die hohen Bewegungsraten von rund 3 m pro Jahr auf der Oberfläche dieses Zungenbereiches werden daher als eine Folge der stark durchfeuchteten Auftauschicht und degradierendem Permafrost interpretiert, wohingegen die hohen Bewegungsbeträge im zentralen Abschnitt durch die massiven Eiskörper im Untergrund begünstigt werden (vgl. Abb. 2 und 3).

Textbox 2

Die geoelektrische Widerstandstomographie

Das Verfahren bezeichnet eine geophysikalische Messmethode zur Erkundung von Untergrundstrukturen mittels spezifischer elektrischer Widerstände: An jeweils zwei Elektroden wird Strom in den Untergrund geleitet und ein elektrisches Feld erzeugt. An zwei Spannungselektroden wird anschließend das Potenzial des elektrischen Feldes gemessen. Aus den Spannungs- und Stromwerten sowie den Elektrodenabständen wird der spezifische Widerstand ermittelt.

Spezifische Widerstände im Untergrund bzw. ihr Kehrwert, die elektrische Leitfähigkeit, sind näherungsweise abhängig von der elektrischen Leitfähigkeit des Sediments, der elektrolytischen Leitfähigkeit des Porenwassers sowie der Porosität und des Sättigungsgrades des Untergrundmaterials. Aufgrund des deutlichen Anstiegs des Widerstandes bei Erreichen des Gefrierpunktes von Wasser eignet sich die Geoelektrik sehr gut, um gefrorenes, eisreiches und ungefrorenes Untergrundmaterial tomographisch abzubilden (Hauk und Kneisel 2008).

Fazit

Die Ergebnisse am Morenas Coloradas Blockgletscherkomplex zeigen exemplarisch die große Variabilität der internen Struktur und somit des Eisgehaltes dieser periglazialen Formen auf. Während in den höheren Lagen nahezu das gesamte Profil von eisreichem Permafrost gekennzeichnet ist, deuten die Zunahme der sommerlichen Auftauschicht, die zunehmenden Bewegungsbeträge im Zungenbereich sowie die generelle Abnahme der gemessenen Widerstände in niederen Lagen

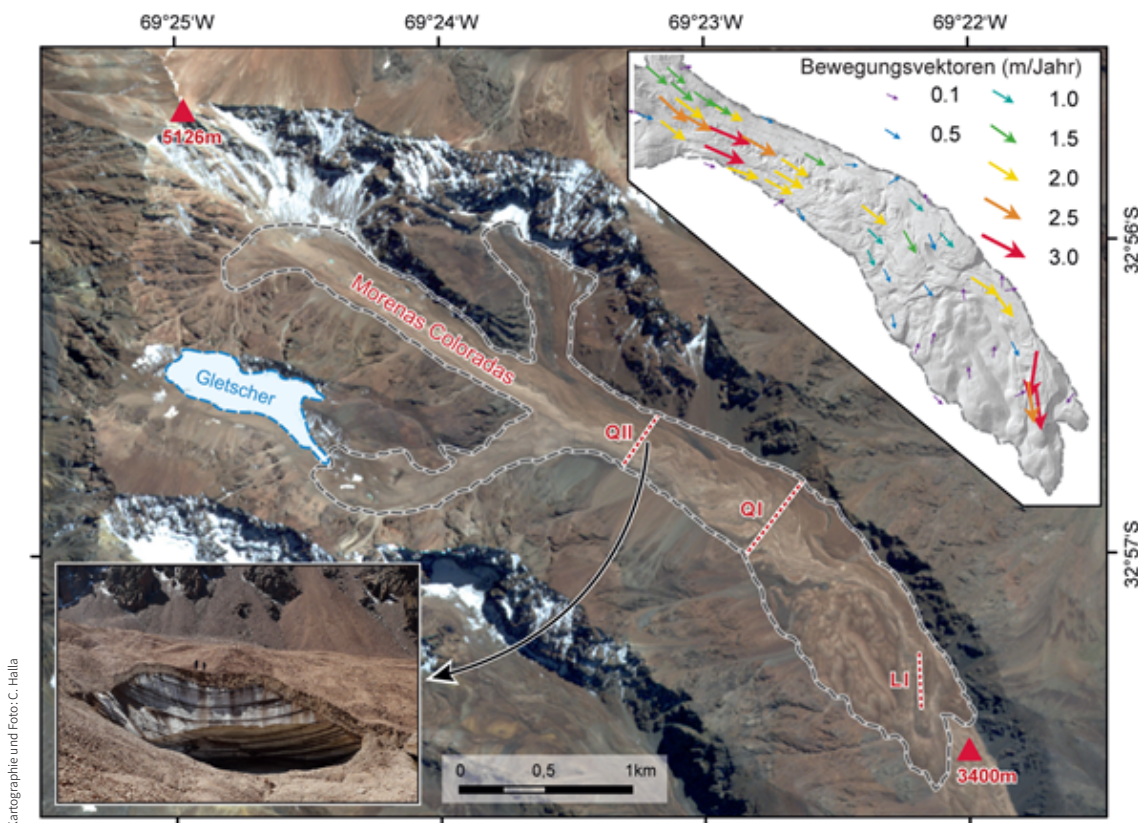


Abb. 2: Morenas Coloradas Blockgletscherkomplex mit Lage der Geoelektrikprofile LI, QI und QII. Das Foto (links unten, Aufnahme-richtung NO) zeigt den massiven Eiskern mit über 2 m Schuttauflage am Querprofil QII. Die Abbildung rechts oben zeigt die Bewegungsraten (m pro Jahr) von Blöcken an der Oberfläche des Blockgletschers, die mit Wiederholungsmessungen von differenziellen GPS-Punkten ermittelt wurden. Bewegungsraten von mehr als 3 m pro Jahr treten im oberen zentralen Bereich und auf der unteren Zunge auf (rote Pfeile)

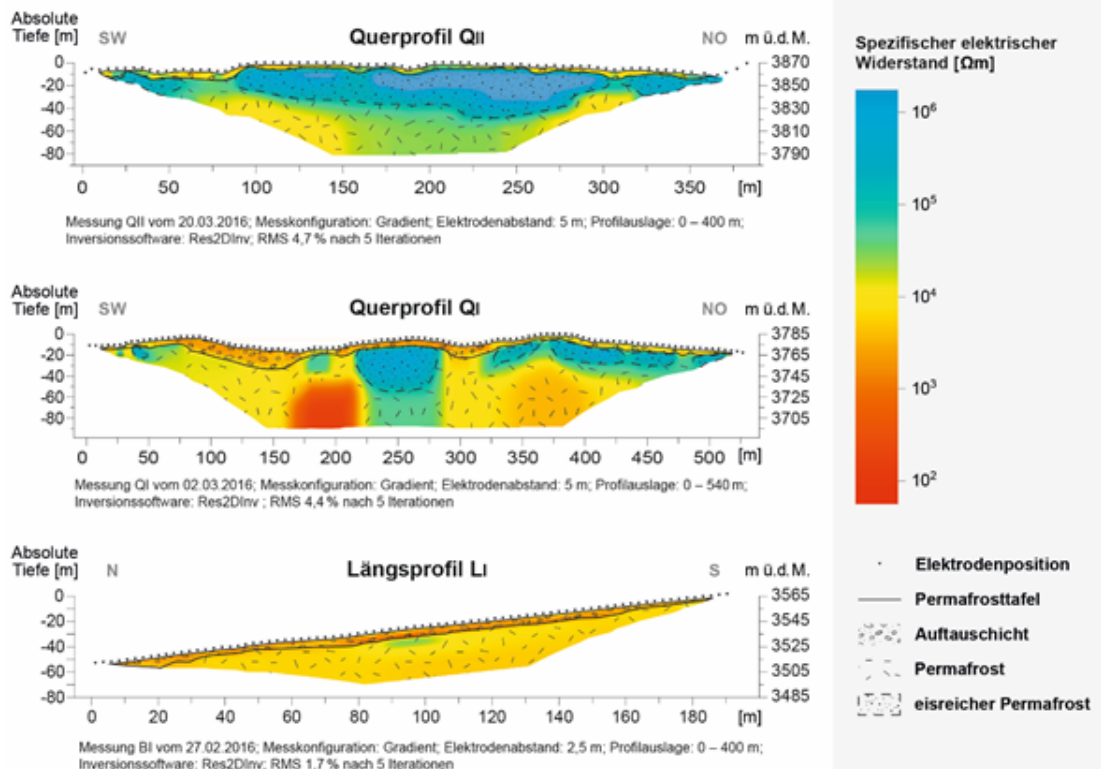


Abb. 3: Die Widerstandstomographien QII, QI und LI zeigen markante Unterschiede in den räumlichen Verteilungen der spezifischen Widerstände von 10² bis über 10⁶ in Ohmmeter (Ωm) (Farbskala im Zehnerlogarithmus). Die Signaturen zeigen die interpretierte interne Struktur (vgl. Abb. 2).

eine fortschreitende Permafrostdegradierung an. Vor dem Hintergrund des globalen Klimawandels und dem damit einhergehenden Abschmelzen der Andengletscher kommt den eisreichen Formen der periglazialen Höhenstufe in Zukunft eine immer wichtigere Rolle bei der Wasserspeicherung zu. Die Degradation des Permafrostes erfolgt im Vergleich zum Abschmelzen der Gletscher jedoch sehr viel langsamer.

LITERATUR

Barsch, D. (1996): Rockglaciers: indicators for the present and former geocology in high mountain environments. Berlin
 Corte, A. (1976): The hydrological significance of rock glaciers. Journal of Glaciology 17, S. 157–158
 Gruber, S. (2012): Derivation and analysis of a high-resolution estimate of global permafrost zonation. Cryosphere 6 (1), S. 221–233

Hauck, C. und C. Kneisel (2008): Applied Geophysics in Periglacial Environments. Cambridge
 Schrott, L. und J. Götz (2013): The periglacial environment in the semiarid and arid Andes of Argentina – hydrological significance and research frontiers. In: Borsdorf, A. (Hrsg.): Forschen im Gebirge. Wien, S. 53–62
 Trombotto, D. und E. Borzotta (2009): Indicators of present global warming through changes in active layer-thickness, estimation of thermal diffusivity and geomorphological observations in the Morenas Coloradas rockglacier, Central Andes of Mendoza, Argentina. Cold Region Science and Technology 55 (3), S. 321–330
 Zemp, M., Hoelzle, M. und W. Haeberli (2009): Six decades of glacier mass-balance observations: a review of the worldwide monitoring network. Annals of Glaciology 50, S. 101–111

AUTOREN

Dipl.-Geogr. Christian Halla, geb. 1983
 Geographisches Institut, Universität Bonn
 christian.halla@uni-bonn.de
 Schwerpunkte: Gebirgspermafrost, Geomorphologie, Zentralanden, Alpen

Dr. Jan Blöthe, geb. 1982
 Geographisches Institut, Universität Bonn
 jan.bloethe@uni-bonn.de
 Schwerpunkte: Sedimentdynamik, Geomorphologie, Himalaya, Anden

Dr. Dario Trombotto Liaudat, geb. 1957
 Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA), CONICET, Centro Científico Tecnológico Mendoza, Argentinien
 dtrombot@lab.cricyt.edu.ar
 Schwerpunkte: Geokryologie, Zentralanden, Patagonien

Prof. Dr. Lothar Schrott, geb. 1962
 Geographisches Institut, Universität Bonn
 lothar.schrott@uni-bonn.de
 Schwerpunkte: Prozessgeomorphologie, Permafrost in Gebirgsräumen, Naturgefahren und Risiken, Anden, Alpen

Summary

Permafrost in the Andes of Argentina – a significant hydrological resource

Christian Halla, Jan Blöthe, Dario Trombotto Liaudat, Lothar Schrott

The high semi-arid Central Andes of Argentina are characterised by a widespread occurrence of permafrost and a large vertical extension of periglacial forms and processes. Particularly large rock glacier complexes with ice rich permafrost can be considered as an important water resource in the dry regions of the Andes. The Argentinian government approved in 2010 a law to protect glaciers and the periglacial environment. This study aims to show the regional distribution of rock glaciers and to quantify the ice content of these periglacial landforms. Degradation of permafrost is much slower than melting of glaciers.