

Geoelektrik an Blockgletschern

– Erfassung globaler Klimaerwärmung

E. Niesner¹, M. Schreilechner², R. Morawetz²

¹ *Lehrstuhl für Geophysik, Montanuniversität Leoben*

² *Joanneum Research, Institut für WasserRessourcenManagement, Leoben*

Home/Kontakt: www.unileoben.ac.at/~geophwww/niesner.htm, niesner@unileoben.ac.at,
www.joanneum.at, marcellus.schreilechner@joanneum.at, rainer.morawetz@joanneum.at

Einleitung: Gefahren durch Klimaerwärmung, Instabilitäten der Moränen – Permafrost – Blockgletscher - GLOF

Bedingt durch die globale Klimaerwärmung kann weltweit ein Rückzug und Abschmelzen der Gletscher beobachtet werden. Verbunden damit ist auch ein Rückzug der Frostgrenze und damit der Permafrostbereiche in größere Höhenlagen. Diese Entwicklungen führen zu vielfältigen Veränderungen in den Gebirgen, die sehr häufig auch zu einer Erhöhung der Gefahrensituation beitragen.

Ein Rückgang der Frostgrenze führt, bedingt durch das Auftauen von meist stabilen Permafrostzonen, durch den entstehenden Eisdruck beim Einfrieren von Wasser in Gesteinsklüften, sowie durch verstärkte Erosion meist zu einer Schwächung der mechanischen Stabilität von Gebirgsstöcken. Die Auswirkungen reichen von erhöhtem Steinschlag bis zum Zusammenbruch ganzer Gebirgsflanken (z.B. Eiger 2006, Thurwieser 2004 (Ortlergruppe), Eiblschrofen 1999 (Tirol), Bischofmütze 1993 (Sbg.), u.v.m.).

Weiters führt das Abschmelzen der Gletscher zu einem erhöhten Wasserangebot, und die nach dem Rückzug der Gletscher verbleibenden Moränen bzw. Blockgletscher bilden Dämme, die diese Wassermassen temporär zurückhalten. Es kommt damit lokal zur Bildung von Gebirgsseen, die bei Instabilitäten in den Dämmen plötzlich ausbrechen können. Diese Ausbrüche führen oft zu verheerenden Folgen im Talbereich. Fachlich bezeichnet man diese Ausbrüche als GLOF (Glacier Lake Outburst Flood).

Vorrangiges Ziel ist daher die Untersuchung der Stabilität dieser Dämme um Gefahrensituationen frühzeitig erkennen zu können. Die Stabilität dieser Dämme ist zu Beginn des Gletscherrückzugs meist noch durch die bestehend bleibenden Permafrostzonen gewährleistet. Bei einem weiteren Rückzugs der Permafrostgrenze kommt es nach und nach zur Auflösung dieser Permafrostbereiche und dies führt zu einer deutlichen Verringerung der mechanischen Stabilität dieser Dämme und zu einer steigenden Gefahr eines Durchbruchs, mit meist katastrophalen Folgen.

Im vorliegenden Artikel werden die Forschungsarbeiten in zwei Messgebieten zur Untersuchung von Blockgletschern und Dämmen von Gletscherseen vorgestellt. Ein Messgebiet liegt in Österreich am Blockgletscher im Hochreichhartkar in den Seckauer Alpen und als zweites Messbeispiel werden Messungen an Endmoränen in Bhutan vorgestellt.

Zu der Arbeitsweise der Geophysik und den geophysikalischen Verfahren, insbesondere der geoelektrischen Messmethoden, deren Ergebnisse hier vorgestellt werden, sei auf den ebenfalls in diesem Band erschienenen Artikel „Magnesitprospektion in der Türkei“ (Niesner) verwiesen. Für die vorliegenden Untersuchungen sind nur einige Ergänzungen in Bezug auf das Verhalten der elektrischen Widerstände in Abhängigkeit von der Temperatur notwendig.

Einfluss der Temperatur auf die elektrischen Widerstände von Gesteinen und Sedimenten

Einen wesentlichen Beitrag zur Leitfähigkeit von Gesteinen und Sedimenten liefert das in den Poren vorhandene Formationswasser. Die Gesteinsmatrix wirkt dagegen wie ein Isolator mit Ausnahme von Erzen, Graphit o. ä. . In Sedimenten liefern auch noch Tone einen signifikanten Beitrag zur elektrischen Leitfähigkeit. Der Ladungstransport erfolgt daher vorwiegend über Ionenleitung, und damit ist die Leitfähigkeit je nach Mobilität dieser Ionen stark temperaturabhängig. Besonders stark reduziert sich die Ionen-Mobilität beim Übergang des Formationswassers in den gefrorenen Zustand. Daher nimmt die Leitfähigkeit bei Temperaturen unter Null Grad sprunghaft ab – bzw. kommt es zu einer signifikanten Erhöhung des elektrischen Widerstandes. Die *Abbildung 1* zeigt diese starke Zunahme des elektrischen Widerstandes für verschiedene Gesteine und Sedimente.

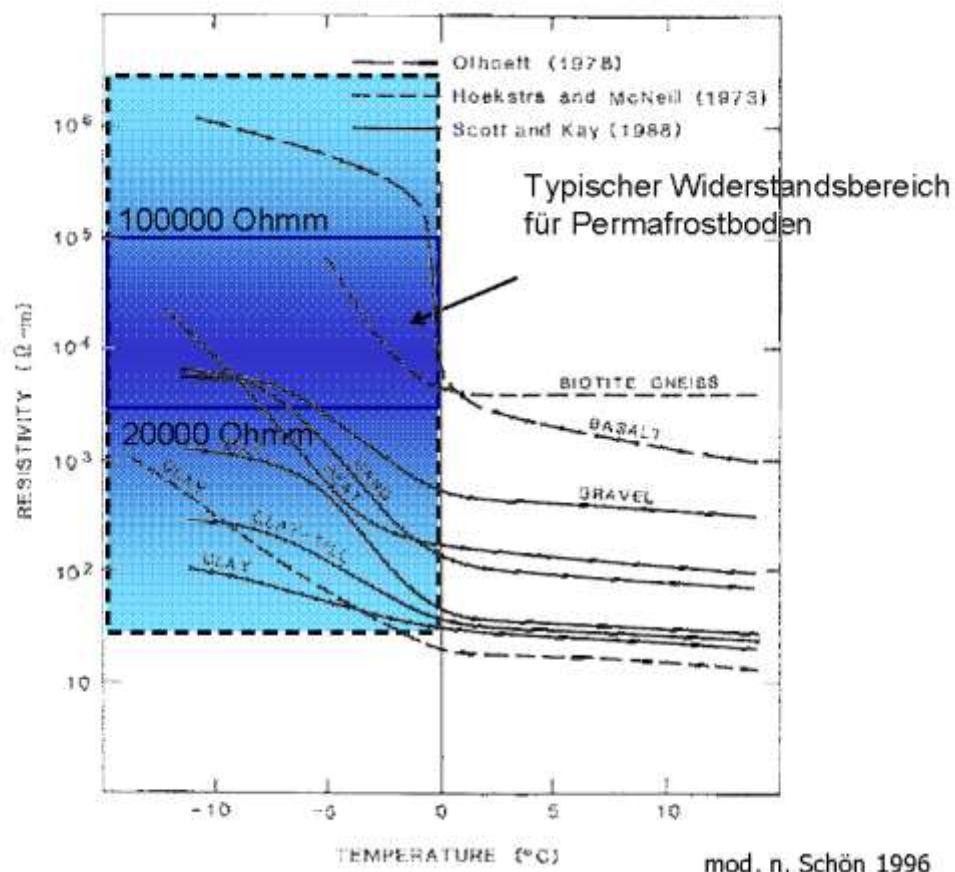


Abb. 1: Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes von Gesteinen und Sedimenten (mod. n. Schön 1996) – hervorgehoben ist der typische Widerstandsbereich für Permafrostboden.

Diese starke relative Widerstandszunahme lässt sich, wie auch die *Abbildung 1* zeigt, generell beobachten. Da jedoch die Absolutwerte der Widerstände von Tonen, Sedimenten und Festgestein bereits im normalen Temperaturbereich stark unterschiedlich sind, streuen die absoluten Widerstandswerte für Permafrost in einem größeren Bereich. Dieser Bereich wurde in der *Abbildung 1* hervorgehoben. Bei extrem hohen Widerständen kommt es wiederum zu einer Überlappung des Permafrostbereiches mit den Widerständen von trockenem Festgestein. Der typische Widerstandsbereich für Permafrostboden in mittleren Breiten liegt, wie in der *Abbildung 1* eingezeichnet, etwa zwischen 20 000 und 100 000 Ohmm. Dieser Bereich wurde auch für die Interpretation der nachfolgend beschriebenen Geoelektrikmessungen verwendet.

Beispiele für Geoelektrikmessungen in Permafrostgebieten

Nachfolgend werden, wie eingangs beschrieben, die geoelektrischen Messungen in den beiden Messgebieten in Österreich und in Bhutan vorgestellt.

Messbeispiel 1: Österreich – Hochreichhart

Im Jahr 2008 wurden am Fuße des Hochreichharts – im Hochreichhartkar – geoelektrische Messungen zur Untersuchung des dort ausgebildeten Blockgletschers durchgeführt. Die Messungen wurden in Kooperation der Universität Graz – Lieb & Kellerer-Pirklbauer (2008) und der Montanuniversität im Rahmen des ALPCHANGE Projektes durchgeführt. Die Messungen wurden vom Messteam der KNGeoelektrik ausgeführt. Es handelt sich im vorliegenden Fall um den östlichsten und einen der tiefstliegenden Blockgletscher in den Alpen. In dieser abgeschatteten Lage treten Permafrostzonen bereits knapp unter 2000 m Seehöhe auf. Dieser Bereich ist vor allem deshalb interessant, weil der allmähliche Rückgang der Permafrostbereiche genauer studiert werden kann. Die vorliegenden Messungen dienten dazu, die aktuell noch vorhandenen vereisten Zonen im Untergrund genau zu erfassen. Begleitend zu diesen Messungen wurden auch detaillierte Messreihen der Bodentemperatur und die jahreszeitlichen Veränderungen der Schneedeckenausdehnung und Dicke erfasst. (Kellerer-Pirklbauer 2006-2008). Die *Abbildung 2* zeigt die Lage des geoelektrischen Messprofils im



Abb. 2: Hochreichhart (2416 m) und Lage des geoelektrischen Messprofils über den Blockgletscher im Hochreichhartkar (Aufnahme: Kellerer-Pirklbauer)

Blockgletscher treten im Hochgebirge meist in relativ unzugänglichen Lagen auf. Eine direkte Zufahrt über Forststraßen ist in den meisten Fällen nicht möglich. Die Messausrüstung musste daher auch für diese Messungen ins Messgebiet hochgetragen werden. Ein Bild aus dem Messgebiet mit dem grobblockigen Material des Blockgletschers und einen Teil des Messprofils zeigt die *Abbildung 3*. Um bei diesem blockigen Festgestein einen Messstrom mit ausreichender Stärke in den Untergrund zu schicken, ist ein erhöhter Aufwand bei der Kontaktierung der Elektroden notwendig, damit ein guter Kontakt zum Untergrund gewährleistet ist.



Abb. 3: Teil des Messprofils am Blockgletscher.

Nach entsprechender Qualitätskontrolle und der Inversion der Messdaten erhält man als Ergebnis eine 2-dimensionale Verteilung der elektrischen Widerstände im Untergrund. Besonders hilfreich für eine Zuordnung der elektrischen Widerstände zu Geologie und Permafrostzonen ist ein Histogramm der Widerstandsverteilung (*Abbildung 4*).

Über das Histogramm lassen sich entsprechende „Elektrofaziestypen“ zuordnen, wobei im vorliegenden Fall Widerstände zwischen 50 000 und 100 000 Ohmm Permafrostboden anzeigt. Grobblockiges trockenes Gestein zeigt noch höhere Widerstände und die Widerstände von Hangschutt liegen darunter – wobei es natürlich Überlappungen dieser Bereiche gibt.

Die Farbzunordnung der Widerstände wurde nun so gewählt, dass sich die einzelnen lithologisch ähnlichen Bereiche voneinander farblich unterscheiden. Für den Permafrostboden wurden blau-weiss-graue Farbtöne verwendet. Das Ergebnis der Messungen auf diesem Profil ist in der *Abbildung 5* dargestellt. Auf diesem Profil sind zwei markante Permafrostzonen erkennbar – zwischen Profilmeter 10 und 50 und von 75 bis 90 m. Das oberflächennahe, grobblockige, sehr hochohmige Festgestein in der Mitte des Profils (rote Bereiche) tritt ebenfalls deutlich hervor. Wie auch das nächste Beispiel aus Bhutan zeigt, lassen sich mittels der Geoelektrik gefrorene Zonen im Untergrund gut erkennen. Im nächsten Untersuchungsschritt werden Wiederholungsmessungen durchgeführt, um die zeitlichen Änderungen in den Permafrostzonen zu beobachten und zu analysieren.

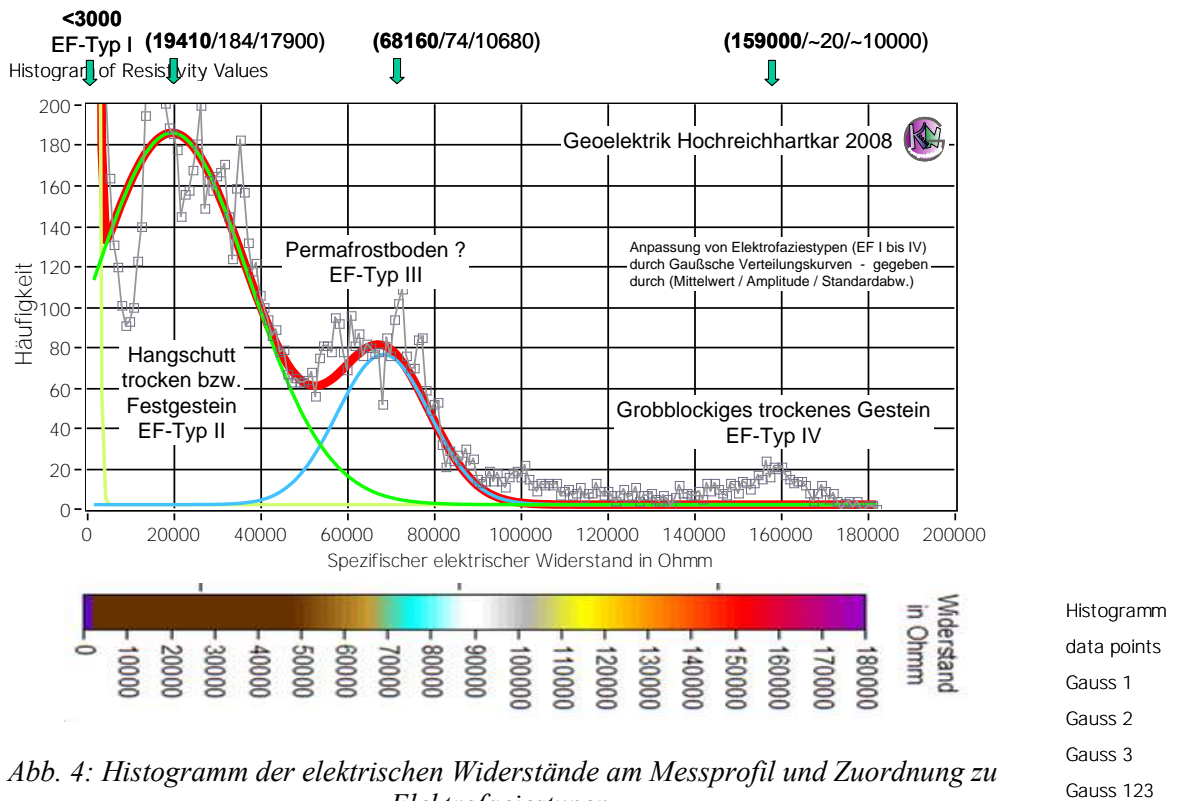


Abb. 4: Histogramm der elektrischen Widerstände am Messprofil und Zuordnung zu Elektrofaciestypen.

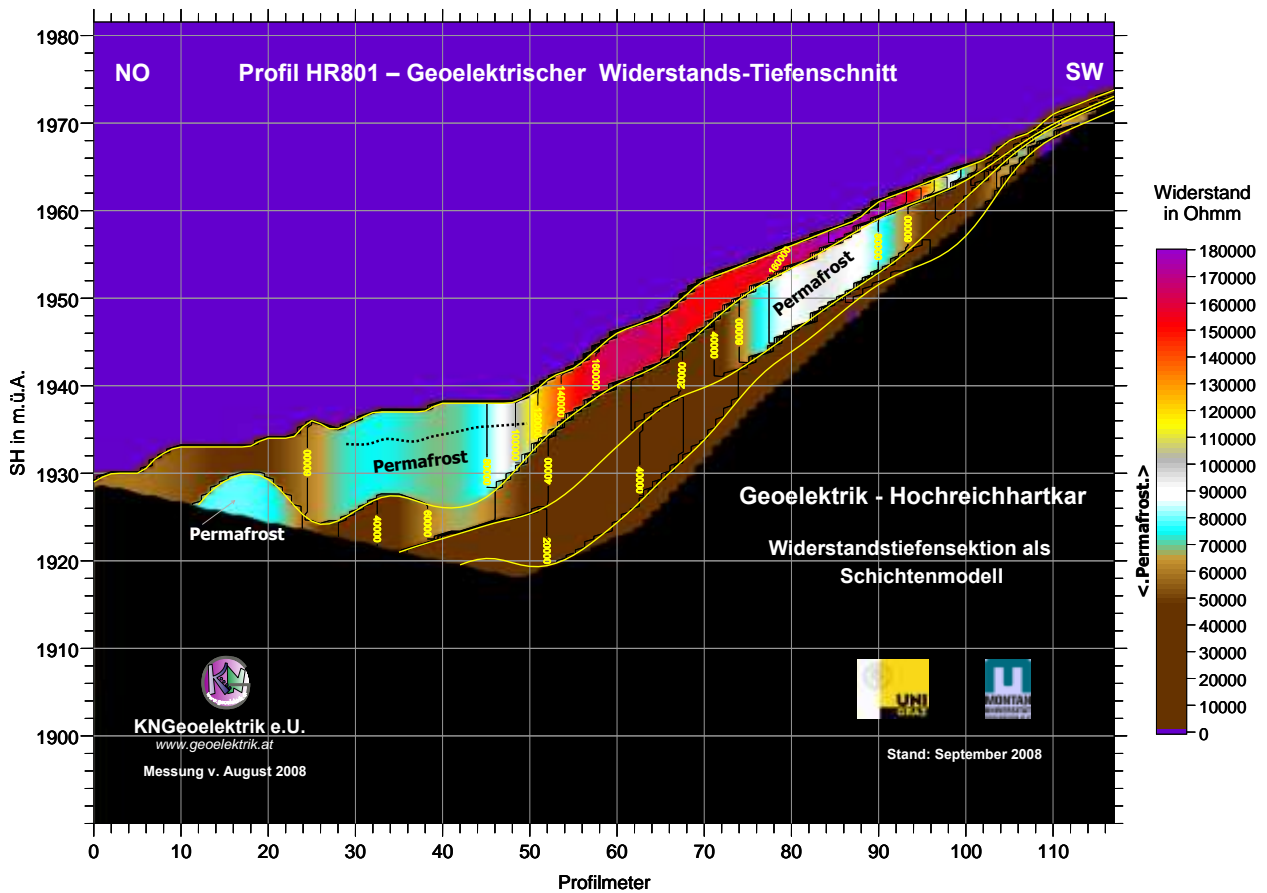


Abb. 5: Ergebnis der Geoelektrikmessungen im Rahmen des ALPCHANGE Projektes: Widerstandstiefensektion des geoelektrischen Profils HR801. (KNGeoelektrik)

Messbeispiel 2: Bhutan- Gletscher Raphstreng und Thorthormi

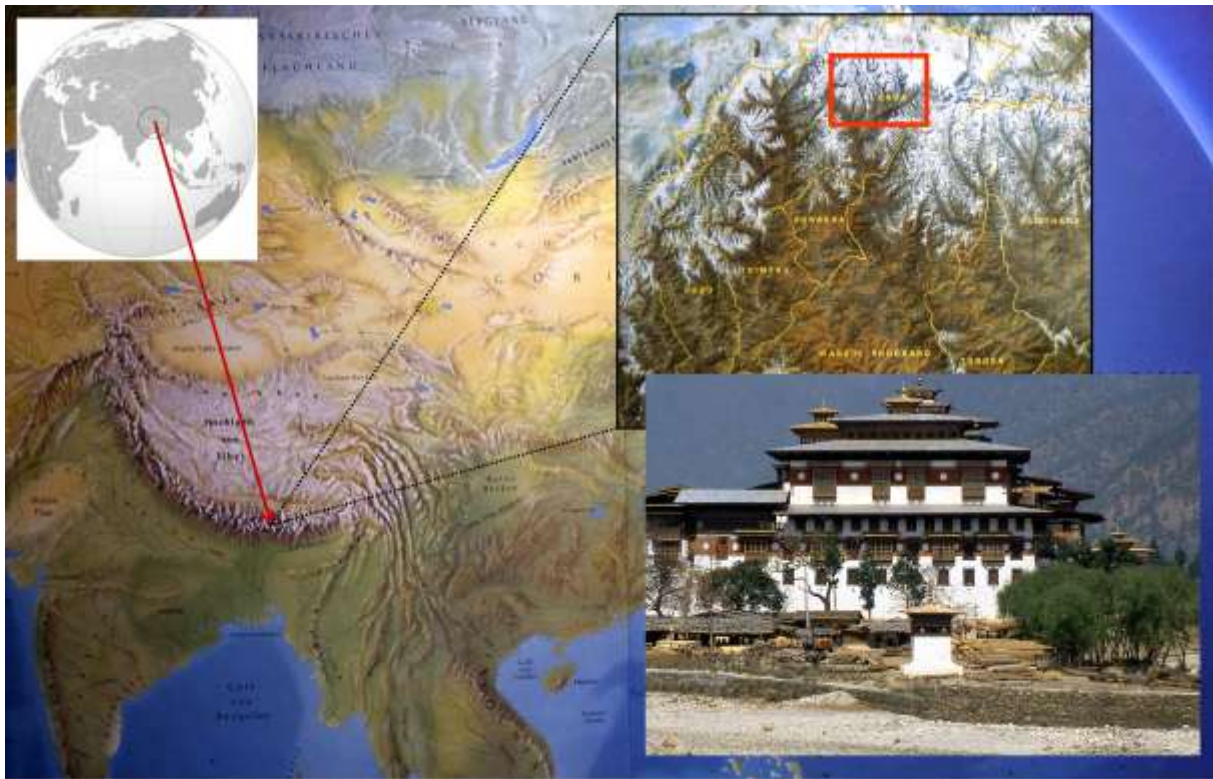


Abb. 6: Lage des Messgebietes in Bhutan und der Krönungspalast „Punakha Dzong“
(Photos Wikipedia, Morawetz)

Die Lage des Messgebietes im Himalaya Gebirgszug ist aus der *Abbildung 6* ersichtlich. Das Messgebiet befindet sich im Norden des Königreiches Bhutan nahe der Grenze zu Tibet. *Abbildung 6* zeigt den im landestypischen Baustil errichteten Palast „Punakha Dzong“ der früheren Krönungsstätte der bhutanesischen Könige. Dieser Palast wurde durch die Schlammlawine des GLOF's vom Oktober 1994 teilweise zerstört. Der Zugang zum Messgebiet, das in etwa 4500 m Höhe liegt, ist extrem schwierig. In dieses Gebiet führt KEINE Straße. Der einzige Weg, der aber nur zu Fuß oder von Tragetieren begangen werden kann, beginnt in den regenreichen Monsunwäldern und führt über Bergpässe von über 5000 m Seehöhe. Allein der Anmarsch zum Messgebiet dauerte insgesamt 14 Tage. Die gesamte Ausrüstung inklusive Verpflegung und die Messgeräte mussten mittels Träger und Yaks (92 Yaks und 10 Träger) ins Messgebiet gebracht werden. Auch das Zeitfenster, in dem einigermaßen erträgliche klimatische Bedingungen herrschen, ist sehr knapp. Gestartet wurde die Expedition knapp vor dem Ende der Monsunzeit, um die kurze Zeit bis zum Wintereinbruch bestmöglich auszunützen. Im Winter ist dieses Gebiet vollkommen von der Außenwelt abgeschnitten. Tritt man den Rückweg nicht rechtzeitig an, bzw. kommt ein frühzeitiger Wintereinbruch, dann besteht erst wieder im nächsten Jahr eine Rückkehrmöglichkeit. Da die Bevölkerung nur über Vorräte für das eigene Überwintern, und damit über keine zusätzlichen Lebensmittelreserven verfügt, käme man in ernsthafte Schwierigkeiten.

Die *Abbildung 7* zeigt Bilder vom Anmarsch ins Messgebiet über den sogenannten „Snowmen – Track“.



Abb. 7: Anmarsch zum Messgebiet über den „Snowmen – Track“ – Monsunregen im Tal und eisiger Wind und unwirtliche Bedingungen in 5000 m Höhe (Fotos Morawetz, Schreilechner)

Ein 2008 aufgenommenes Satellitenbild (JAXA) des Untersuchungsgebietes mit dem 7094 m hohen Table Mountain, Gletschern und Gletscherseen zeigt die *Abbildung 8*.

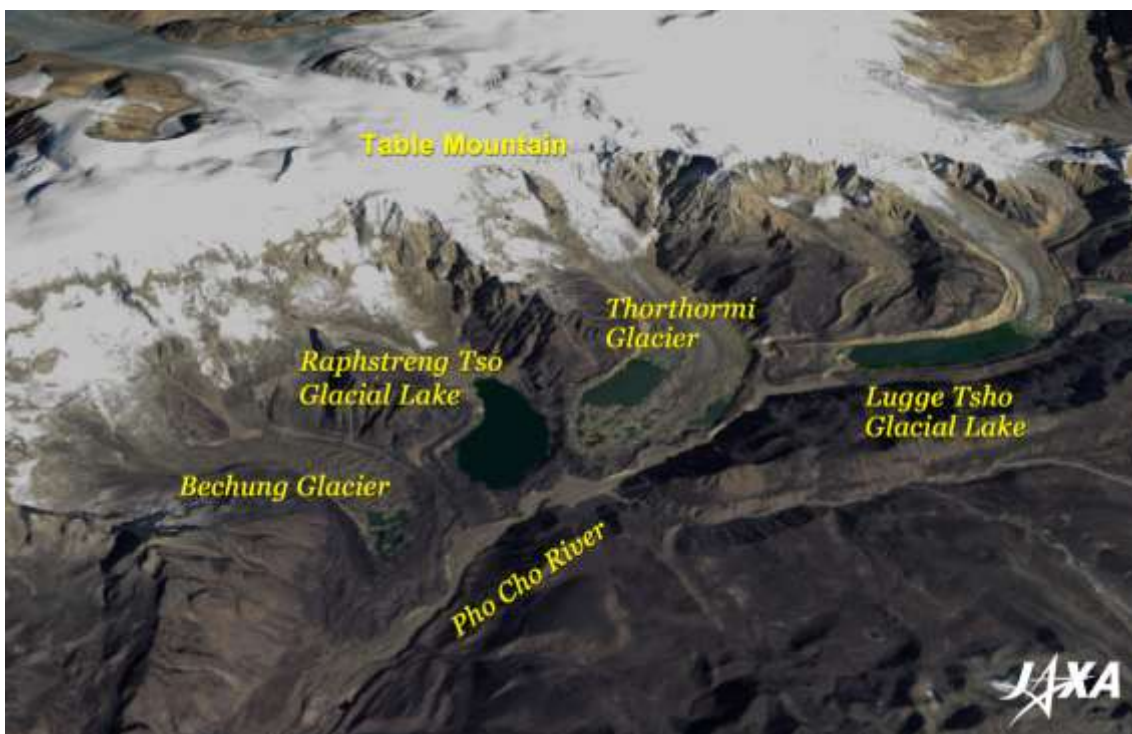


Abb. 8: Table Mountain – Bhutan – an der Grenze zu Tibet - Satellitenbild (JAXA Japan Aerospace Exploration Agency) des Untersuchungsgebietes von 2008, (www.eorc.jaxa.jp, www.jaxa.jp).

Das Untersuchungsgebiet liegt am Fuße des Table Mountains auf ca. 4500m Seehöhe! Das Messprogramm der Messkampagne vom Jahr 1999 umfasste, neben geoelektrischen und seismischen Messungen auch Radar, Temperatur, Wasserschüttungs- und Wasserleitfähigkeitsmessungen.

Für die vorliegenden Ausführungen werden nur die Ergebnisse der geoelektrischen Messungen gezeigt. Bezüglich der Ergebnisse der anderen Messverfahren und einer detaillierteren Darstellung sei auf den Projektbericht (Häusler et.al. 1999) verwiesen. Wie bereits eingangs ausgeführt und wie auch das bereits vorgestellte Ergebnis der Messungen am Hochreichhart zeigt, eignen sich geoelektrische Messungen auf Grund der starken Widerstandserhöhung bei Temperaturen unter Null Grad sehr gut zur Erkennung von gefrorenen Bereichen bzw. Permafrostzonen im Untergrund.

Die beiden Profile, deren Ergebnisse gezeigt werden, liegen am Fuße des Thorthormi Gletschers. Die genaue Lage der beiden Profile R3 und R4 ist in der *Abbildung 9* eingezeichnet. Insgesamt wurden 4 geoelektrische Profile gemessen, wobei aber nur die Ergebnisse der Profile R3 und R4 gezeigt werden.

Ein Bild einer Basisstation für die seismischen und geoelektrischen Messungen in dieser landschaftlich imposanten aber sehr rauen Gegend zeigt die *Abbildung 10*.



Abbildung 9: Lage der Geoelektrikprofile – die Ergebnisse der rot eingezeichneten Profile R3 und R4 sind in den Abbildungen 11 und 12 dargestellt. (NASA/ISS Okt. 2009 – earthobservatory.nasa.gov)



Abbildung 10: Basisstation für die Messungen (SH4500m) mit Blick zur Südwand des Table Mountains (7094m) (Foto: Morawetz)

Messergebnisse:

Die Ergebnisse der Messungen auf den beiden Profilen R3 und R4 sind in den *Abbildungen 11* und *12* dargestellt. Die Profile zeigen bereits die invertierten Widerstands-Tiefenprofile – also die 2-dimensionale Verteilung des wahren elektrischen Widerstandes im Untergrund.

Deutlich erkennbar sind die Unterschiede zwischen den beiden Profilen. Während die Widerstände am Profil R3 generell unter 10 000 Ohmm bleiben, tritt am Profil R4 ein großer Bereich mit sehr hohen Widerständen über 20 000 Ohmm auf. Dies ist eine deutliche Indikation für Permafrost. Am Profil R4 sind demnach große Teile des Untergrundes gefroren, während bei dem Profil R3 die gemessenen Widerstände keinen Permafrostboden anzeigen. Die rot hervorgehobenen Bereiche zeigen die Permafrostzonen am Profil R4.

Nach den Ergebnissen der geoelektrischen Untersuchungen hat damit der Untergrund im Bereich des Profils R4 durch die noch gut ausgebildete Permafrostzone eine höhere Stabilität als der Untergrund am Profil R3. Diese vorerst nur qualitativen Ergebnisse müssen allerdings noch kalibriert werden, um die mechanische Stabilität genauer zu quantifizieren.

Ergebnisse der Geoelektrik am Profil R3:

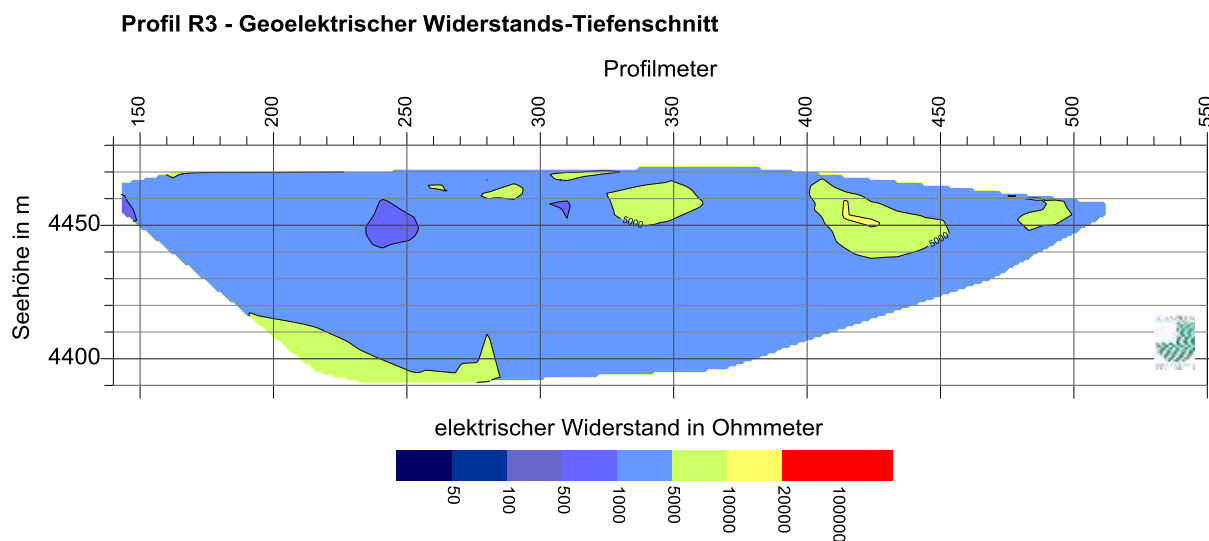


Abbildung 11: Widerstandstiefensektion der geoelektrischen Messungen am Profil R3 – dieses Profil zeigt keinen Permafrostbereich. (Joanneum Research 1999)

Ergebnisse der Geoelektrik am Profil R4:

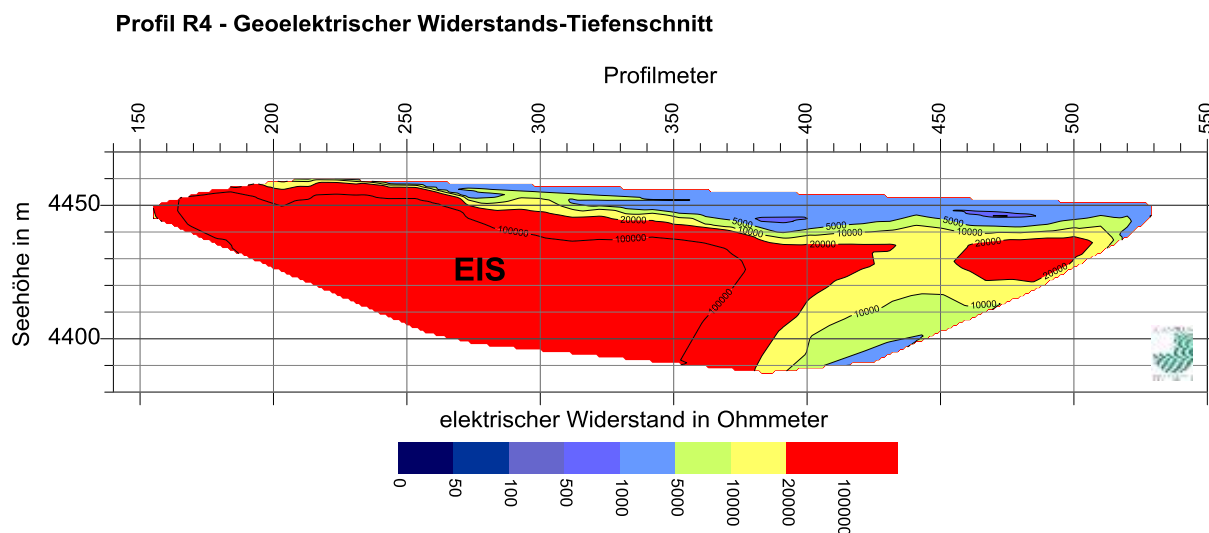


Abbildung 12: Widerstandstiefensektion der geoelektrischen Messungen am Profil R4 – ein ausgedehnter Permafrostbereich, erkennbar an den sehr hohen Widerständen von über 20 000 Ohmm tritt deutlich hervor. (Joanneum Research 1999)

Rückweg und Ausblick:

Die *Abbildung 13* zeigt einen Vergleich der Satellitenbilder von 1999 mit den 2009 aufgenommenen Bildern.

In beiden Bildern ist der Ausbruchsbereich des Luggye Gletschersees von 1994 (mit einem Pfeil in den Satellitenbildern (*Abbildung 13*) markiert) und die Spur der mitgeschwemmten und teilweise abgelagerten Sedimente gut erkennbar. Bei diesem katastrophalen Ereignis kamen leider 21 Menschen ums Leben – und auch der Krönungspalast der Bhutanesischen Könige (s. a. *Abbildung 6*) wurde durch die Wasser-Schlammlawine von etwa 18 Millionen Kubikmetern massiv zerstört.

Sicherungsmaßnahmen gestalten sich, bedingt durch die extrem exponierte Lage und der begrenzten finanziellen Mittel, äußerst schwierig. Ab 2008 konnte, finanziert durch den „Least Developed Countries Fund“ (LDCF), mit Arbeiten zur Senkung des Wasserspiegels am Thorthormi See begonnen werden. Die Arbeiten bestanden darin, die Auslässe des Gletschersees durch händisches Entfernen des Gerölls und der Gesteinsblöcke zu vergrößern, damit Wasser abfließen kann. Baumaschinen konnten sowohl aus technischen als auch aus ideologischen Gründen („Gross National Happiness“) nicht eingesetzt werden (Nayar 2009). Den Erfolg der Arbeiten zeigt ein Vergleich der Satellitenbilder von 2008 (*Abbildung 8*) und 2009 (*Abbildung 13*). Die Größe des Gletschersee am Fuße des Thorthormi Gletschers konnte deutlich reduziert werden.

Allerdings zeigt der Vergleich der Satellitenaufnahmen von 1999 und 2009 (s. markierter Bereich 1) (*Abbildung 13*) auch einen deutlichen Anstieg des Wasserspiegels mit einer entsprechenden Zunahme der gestauten Wassermenge im Luggye See. Der Ausflussbereich dieses Sees hat sich demnach nach dem GLOF v. 1994 wieder verlegt und das Risiko eines neuerlichen Ausbruchs ist damit signifikant gestiegen, wobei von einer weiteren permanenten Erhöhung des Risikos, bedingt durch die globale Erwärmung, im Himalayagebiet (0.15 bis 0.6 Grad pro Dekade (Bajracharya 2007)) ausgegangen werden muss.

Entsprechende Sicherungsmaßnahmen zu einem kontrollierten Ablassen der zusätzlichen Wassermenge bzw. genauere geophysikalische Untersuchungen im Auslassbereich des Luggye Sees wären daher auch am Luggye See dringend notwendig.

Wie die Messungen von 1999 gezeigt haben, ist es mittels geophysikalischer, im speziellen mittels der geoelektrischen Messungen möglich zu erkennen, ob im Untergrund bzw. Dammbereich noch stabilere Permafrostzonen vorhanden sind.

Auch im Bereich 2 am Fuße des Bechun Gletschers hat sich mittlerweile bereits ein weiterer Gletschersee gebildet. Der Gletschersee des Raphstreng Gletschers ist zwar von der Größe her stabil geblieben, die gestaute Wassermenge ist aber ebenfalls groß.

Nach einer Untersuchung von Bajracharya et.al. (2007) gibt es in Bhutan 2794 Gletscherseen wobei bei einigen die Gefahr eines katastrophalen Ausbruchs besteht.

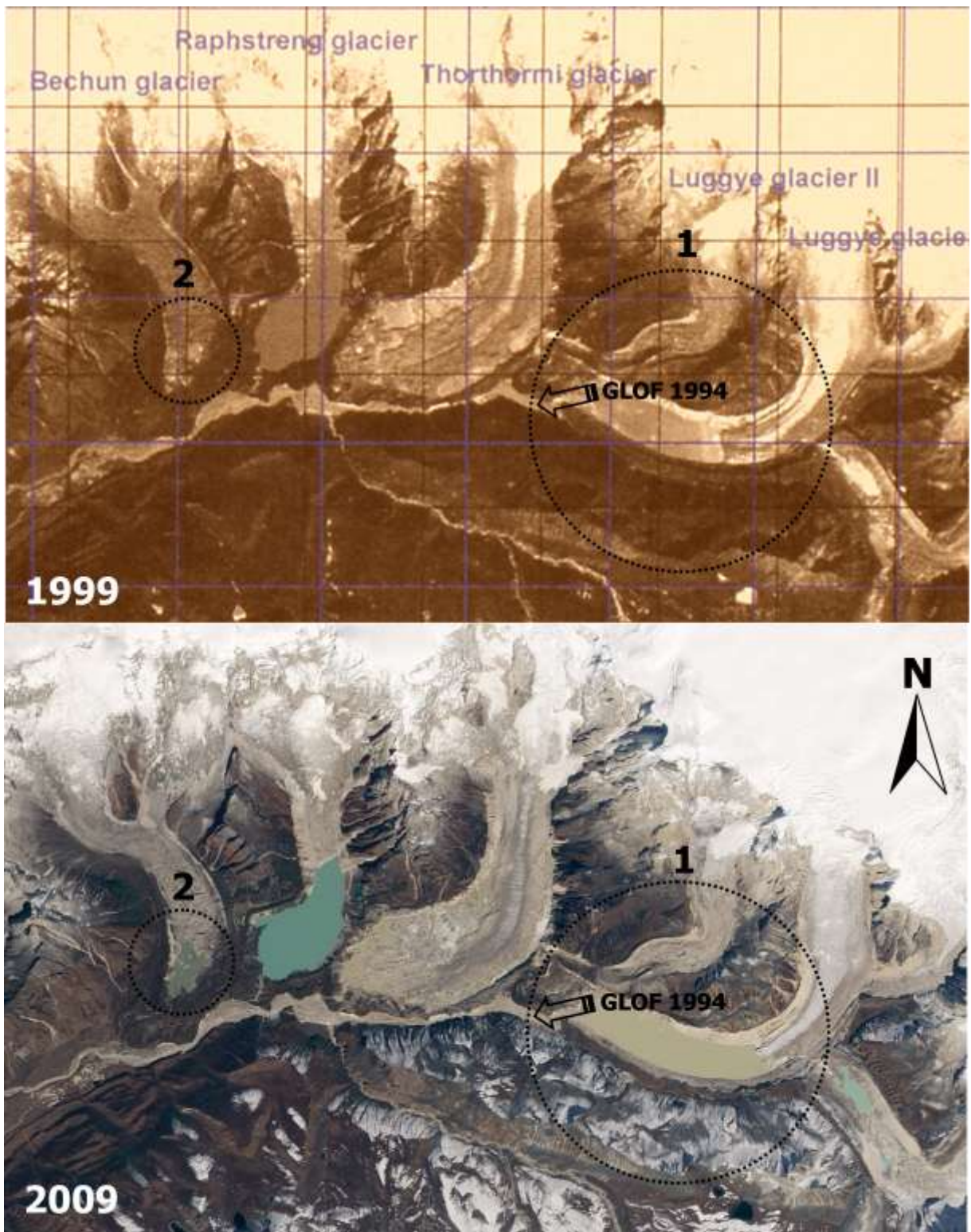


Abb. 13: Vergleich der Satellitenaufnahmen von 1999 (Indischer Satellit) und 2009 (NASA-ISS) – Markiert ist der Ausbruchbereich des Gletschersees (GLOF) von 1994 – Bereiche 1 und 2 zeigen bereits wieder eine beträchtliche Zunahme der gestauten Wassermengen.

Die Abbildung 14 zeigt einen Blick in eine bhutanesische Schule die das Expeditionsteam am Rückweg besucht hat.

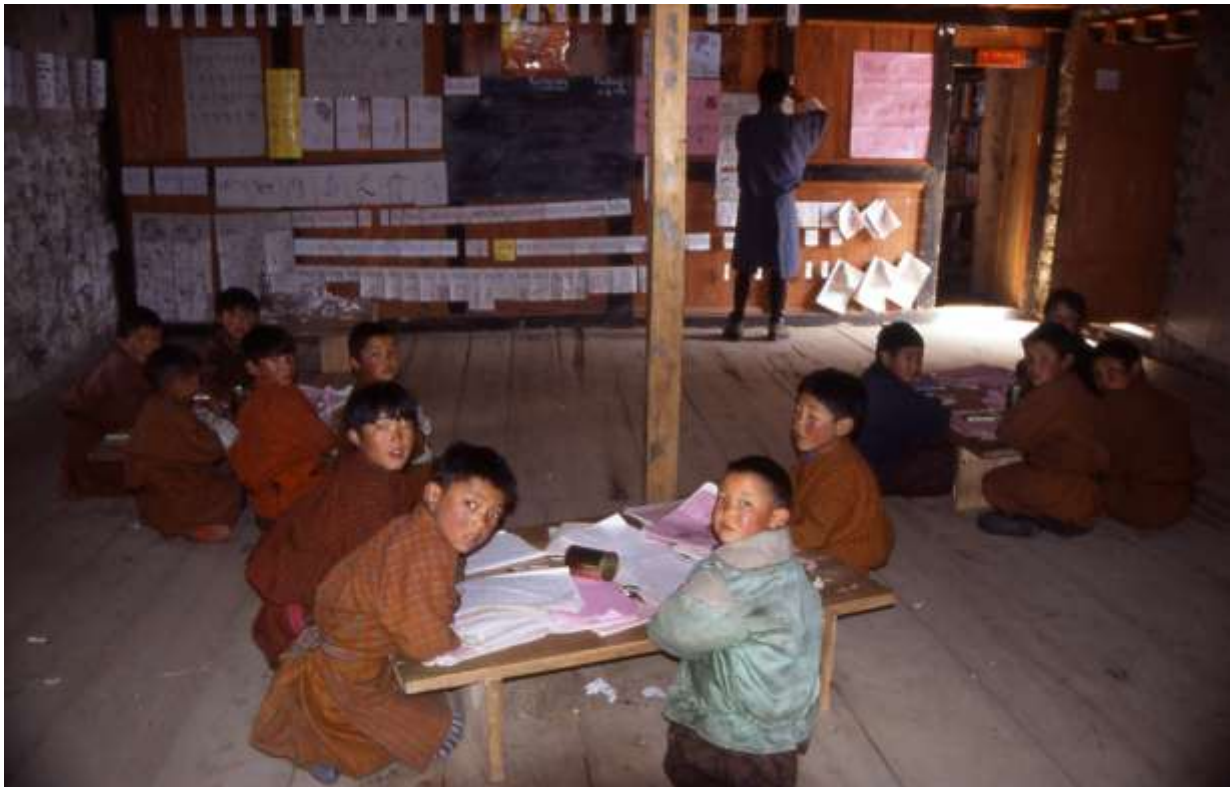


Abb. 14: Schule in Bhutan (Foto: Schreilechner)

Forschungen im Permafrostbereich liefern einen wichtigen Beitrag zur Sicherheit der Bevölkerung und sind dringend notwendig. Daher werden diese Arbeiten intensiv im In- und Ausland weiterverfolgt.

Literatur

- Bajracharya, S.R., Mool, P.K., Shrestha, B., 2007: Impact of Climate Change on Himalayan Glacier and Glacial Lakes (ICIMOD), Kathmandu, Nepal.
- Häusler H., Leber M., Schreilechner M., Morawetz R., Lentz H., Skuk St., Meyer M., Janda Ch., Burgschweiger E., (2000): Final Report of Raphstreng Tsho Outburst Flood Mitigatory Project (Lunana; Northwestern Bhutan): Phase II, Institute of Geology, University of Vienna, Vienna, Austria
- Kellerer-Pirklbauer A., Kühnast B., (2009): Permafrost at its limits: The most easterly evidence of existing permafrost in the European Alps as indicated by ground temperature and geoelectrical measurements, Geophysical Research Abstracts, Vol 11, EGU 2009-2779, EGU General Assembly 2009 Vienna
- Lieb G., Kellerer-Pirklbauer A., (2008): ALPCHANGE-Projekt – Universität Graz, www.alpchange.at
- Nayar A., (2009): When the ice melts, Nature, Vol 461, Okt.09, 1042-1046, Macmillan Publishers Ltd.
- Niesner E., Kühnast B., (2008): Geoelektrische Messungen im Hochreichhartkar, unveröff. Bericht für Projekt AlpChange KNGeoelektrik, Leoben
- Schön J., (2006): Physical Properties of Rocks: Fundamentals and Principles of Petrophysics, Elsevier Ltd., ISBN: 008044346X.