



Doctoral Thesis

## Ground-based and helicopter-borne geophysical characterization of an alpine rock glacier

**Author(s):**

Merz, Kaspar J.

**Publication Date:**

2015

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010492668> →

**Rights / License:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

DISS. ETH NO. 22759

***Ground-based and helicopter-borne geophysical  
characterization of an alpine rock glacier***

A thesis submitted to attain the degree of  
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH  
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

***KASPAR JOHANNES MERZ***

*MSc ETH Appl. Geophys., ETH Zürich*

born on 29.09.1982

citizen of St. Gallen / SG

accepted on the recommendation of

*Prof. Dr. Hansruedi Maurer, examiner*

*Prof. Dr. Sarah Springman, co-examiner*

*Dr. Bernd Kulesa, co-examiner*

*Dr. Lasse Rabenstein, co-examiner*

2015

## Abstract

To assess and predict hazards associated with degrading mountain permafrost, detailed knowledge about potentially dangerous structures is required. Of particular importance are rock glaciers, which are a mixture of debris having grain sizes ranging from clay to boulders, cemented by varying fractions of ice in the pore space. Since mountain permafrost is often close to or at the melting point, rock glacier movement rates react very sensitively to changes in the mean annual surface temperature.

Geophysical surveying provides a powerful means to investigate the structure of these very complex permafrost features at different scales. However, steep rugged surfaces and remote locations pose significant challenges when performing measurements on rock glaciers. Therefore, past geophysical investigations have relied mostly on sparse 2D lines. In this study I demonstrate how established geophysical measurement techniques can be improved. In particular, I show that helicopter-borne ground-penetrating radar (H-GPR) is a potent tool to image complex subsurface structures in the presence of rugged topography.

The study site comprises of a rock glacier located at the flank of the Furggwanghorn in the Turtmann Valley, Switzerland. Here, I performed extensive H-GPR measurements. Data acquired in different years showed a high degree of repeatability and radar reflections could be traced on closely spaced H-GPR lines. This would not have been possible with GPR data acquired on the ground under similar conditions. Results from the H-GPR survey allowed a 3D delineation of rock glacier structures, which was unattainable to date with ground-based surveys.

3D bodies and interfaces identified with H-GPR were verified with geotechnical measurements taken in boreholes and observations made at the surface and on aerial images. Inclinator measurements from seven ~25m deep boreholes at different locations on the rock glacier showed that downslope movements are mainly confined to one narrow shear zone, rather than being distributed over the entire rock glacier body. This shear zone coincides with a transition from high to low reflectivities on the H-GPR sections. This transition could be associated with the lower boundary of an ice-rich zone at 18-20m below the rock glacier surface. In the frontal part of the rock glacier, four distinct flow lobes, separated by minor shear zones that sole out into the main shear zone were identified. These lobes have been active at different times and have moved relative to each other. On the basis of these observations, I propose a novel rock glacier model. It is similar to the well-known thin skinned tectonic model, whereby the décollement corresponds to the main shear zone and the thrust nappes correspond to the flow lobes. Examples of other rock glaciers found in the literature suggest that this model is universal and can be applied elsewhere.

Additional ground based surveys complemented the larger scale structural model obtained from the H-GPR data. Four seismic refraction tomography (SRT) lines were acquired across the rock glacier to determine its P-wave velocity structure. By using structural information from the H-GPR surveys in the initial models for the tomographic inversion, the quality and consistency of the resulting velocity tomograms was improved compared to unconstrained inversions. To determine the distribution of electrical resistivities in the subsurface, two electrical resistivity tomography (ERT) profiles along and perpendicular to the main flow direction of the rock glacier were measured. In addition, a small 3D ERT survey was carried out. Similar to the SRT investigations, the bedrock topography determined by H-GPR was used as a hard

constraint during the ERT inversions. Resolution of deeper structure improved significantly by adding this information. The 3D ERT experiment showed the suitability of such surveys and proved that complex structures in the subsurface can only be identified and delineated correctly, when their 3D shape is taken into account. With a combined interpretation of the SRT and ERT results, I was able to identify ice-rich and degraded zones within the rock glacier.

Detailed information on a zone where surface depressions formed were obtained from a crosshole GPR study. Data were acquired in three tomographic planes between four collinear boreholes, and the resulting traveltimes were inverted using a standard tomographic algorithm. Since drilling on rock glaciers is challenging, the borehole trajectories were not known to sufficient accuracy for traveltime inversions. Therefore, the borehole trajectories were parametrized using low order polynomials and the polynomial coefficients were included as additional unknowns to solve for in the inversions. We found that a polynomial degree of two (parabola) is adequate to model the borehole trajectories to the required error level.

Based on the different datasets acquired for this study, I constructed a detailed geological model of the Furggwanhorn rock glacier. Structural information obtained from H-GPR was complemented by the ground-based geophysical and geotechnical observations. A joint interpretation of all results was essential to achieve this. The sensitivity of the different measurement methods to different physical parameters allowed the identification of the active layer, bedrock, ice-bearing and ice-free rock glacier material and degraded permafrost at different stages. The rock glacier exhibits a very heterogeneous 3D structure that could only be delineated with a multi-disciplinary approach. Traditional interpretation of single 2D lines would have been misleading and would have resulted in incorrect subsurface models.

Future rock glacier studies will benefit from the new model presented in this thesis. For example, it can be used as input to numerical thermo-hydro-mechanical models for a thorough assessment of geotechnical hazards associated with thawing mountain permafrost.

## Zusammenfassung

Um die von auftauenden alpinen Permafrostböden ausgehenden Risiken richtig einschätzen zu können, ist genaue Kenntnis über deren Aufbau nötig. Speziell wichtig sind Blockgletscher, welche sich aus einer komplexen Mischung von Lockergesteinen mit Korngrößen zwischen Ton und Blöcken und variierendem Eisanteil in den Porenräumen zusammensetzen. Weil alpiner Permafrost sich oft nahe oder am Gefrierpunkt befindet, reagiert er sehr empfindlich auf Änderungen in der durchschnittlichen Jahrestemperatur.

Geophysikalische Untersuchungen sind bewährte Methoden, um die Struktur dieser komplexen Permafrostböden auf verschiedenen Skalen zu untersuchen. Deren unebene Oberflächen und die gebirgige Lage stellen grosse Herausforderungen für solche Untersuchungen dar. Aus diesem Grund haben sich vergangene Studien auf wenige 2D Linien pro Untersuchungsgebiet beschränkt. In der vorliegenden Studie demonstriere ich, wie etablierte Messtechniken verbessert werden können. Im Speziellen zeige ich auf, dass helikoptergestütztes Georadar (H-GPR) ein geeignetes Instrument ist, um komplexe Strukturen im Untergrund zu vermessen, selbst bei sehr unebenen Oberflächen.

Diese Studie befasst sich mit einem Blockgletscher, welcher sich an der Flanke des Furggwanghorns im Turtmanntal, Kanton Wallis, Schweiz, befindet. Dort habe ich umfassende H-GPR Messungen gemacht. Daten aus verschiedenen Jahren zeigen eine hohe Wiederholbarkeit der Messungen und Reflektoren können in nahegelegenen H-GPR Linien korreliert werden. Dies wäre mit bodengestützten Georadar Messungen unter ähnlichen Bedingungen nicht möglich gewesen. Resultate aus den H-GPR Messungen erlaubten eine 3D Beschreibung der Strukturen des Blockgletschers, was bisher aus Bodenmessungen nicht gemacht werden konnte.

3D Körper und Trennflächen, welche mittels H-GPR identifiziert werden konnten, wurden durch geotechnische Messungen in Bohrlöchern und Beobachtungen auf Luftbildern verifiziert. Inklinometermessungen in sieben ~25 m tiefen Bohrlöchern an verschiedenen Stellen im Blockgletscher zeigten auf, dass seine talwärts gerichtete Bewegung hauptsächlich in einer schmalen Scherzone fokussiert ist und nicht über den gesamten Querschnitt verteilt ist. Diese Scherzone fällt mit dem Übergang von einer Eis reichen zu einer Eis armen Zone zwischen 18-20 m Tiefe unter der Oberfläche zusammen. Im frontalen Teil des Blockgletschers habe ich vier klar unterscheidbare Fliegsstrukturen identifiziert, welche durch kleinere Scherzonen getrennt sind. Diese Scherzonen laufen in der Hauptscherzone zusammen. Die Fliegsstrukturen waren zu unterschiedlichen Zeiten aktiv und haben sich relativ zueinander bewegt. Auf der Basis dieser Beobachtungen schlage ich ein neuartiges Blockgletscher Modell vor. Es ist ähnlich zur bekannten Dünnschicht-Tektonik, wobei der Abscherhorizont der Hauptscherzone und die Decken den Fliegsstrukturen entsprechen. Beispiele anderer Blockgletscher aus der Literatur lassen vermuten, dass sich dieses Modell auf andere Blockgletscher weltweit übertragen lässt.

Zusätzliche bodengestützte Messungen ergänzen die grossräumigen Strukturen, welche durch H-GPR bestimmt wurden. Vier seismische Refraktionstomographielinien (SRT) wurden auf dem Blockgletscher gemessen, um dessen seismische Geschwindigkeitsstruktur zu bestimmen. Indem strukturelle Informationen aus dem H-GPR in den Startmodellen für die Inversion verwendet wurden, konnte die Qualität und die Konsistenz der resultierenden Tomogramme verbessert werden. Um die Verteilung

des elektrischen Widerstandes im Boden zu messen wurden zwei Linien mittels elektrischer Resistivitätstomographie (ERT) vermessen. Eine Linie war parallel, die andere senkrecht zur Hauptfließrichtung des Blockgletschers. Ausserdem wurde eine kleine 3D ERT Messung gemacht. Ähnlich wie bei der SRT wurde die Oberfläche des Felsuntergrundes, welcher aus dem H-GPR bekannt war, als Grenze vorgegeben, was die Auflösung tieferer Strukturen erheblich verbesserte. Die 3D ERT Messung demonstrierte die Machbarkeit solcher Messungen und zeigte, dass komplexe Strukturen im Untergrund nur korrekt beschrieben werden können, wenn deren dreidimensionale Form in Betracht genommen wird. Mit einer kombinierten Interpretation der SRT und ERT Ergebnissen war es mit möglich, Eis reiche und degradierte Zonen im Blockgletscher abzubilden.

Eine Zone des Blockgletschers, wo sich tiefe Senken an der Oberfläche gebildet hatten, wurde mittels Bohrlochtomographie genauer untersucht. Die Daten wurden in drei tomographischen Ebenen zwischen vier kollinearen Bohrlöchern gemessen und die Laufzeiten mittels eines tomographischen Algorithmus invertiert. Da Bohrungen auf Blockgletschern ein schwieriges Unterfangen sind, waren die Verläufe der Bohrlöcher für eine Tomographie nicht ausreichend genau bekannt. Deshalb wurden die Bohrlöcher als Polynome mit niedrigem Grad parametrisiert und die Koeffizienten als Unbekannte in der Inversion bestimmt. Daraus ergab sich, dass ein Polynom zweiten Grades genügt, um die Bohrlöcher innerhalb der geforderten Fehlerschranken zu beschreiben.

Basierend auf den verschiedenen Ergebnissen meiner Untersuchungen habe ich ein detailliertes geologisches Modell des Blockgletschers am Furggwanghorn erstellt. Strukturelle Informationen aus dem H-GPR wurden ergänzt durch die bodengestützte geophysikalischen und geotechnischen Messungen. Eine kombinierte Interpretation aller Resultate war fundamental um dieses Ergebnis zu erreichen. Die verschiedenen physikalischen Parameter, für welche die unterschiedlichen Messungen sensitiv sind, ermöglichten es die aktive Zone, den Felsuntergrund, eishaltiges und eisfreies Blockgletschermaterial, sowie degradierten Permafrost in unterschiedlichen Stadien zu identifizieren. Der Blockgletscher zeigt eine sehr heterogene, dreidimensionale Struktur, welche nur mit einem multidisziplinären Ansatz beschrieben werden konnte. Die herkömmliche Interpretation von 2D Linien hätte in einem unvollständigen Modell des Untergrundes resultiert.

Zukünftige Studien auf Blockgletschern werden vom in dieser Studie vorgelegten Modell profitieren. Beispielsweise kann es als Ausgang für eine numerische thermo-hydro-mechanische Modellierung verwendet werden. Auf Grund dieser Modellrechnungen können Risiken im Zusammenhang mit auftauenden Permafrostböden fundiert eingeschätzt werden.