



Doctoral Thesis

## Monitoring Rock Glaciers by Combining Photogrammetric and GNSS-Based Methods

**Author(s):**

Neyer, Fabian

**Publication Date:**

2016

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010865360> →

**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. 23964

# Monitoring Rock Glaciers by Combining Photogrammetric and GNSS-Based Methods

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

presented by

FABIAN MATTHIAS NEYER

MSc Erdw, ETH Zurich

born on 10.06.1985

citizen of Flums-Kleinberg (SG)

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. A. Geiger, examiner

Prof. Dr. M. Rothacher, co-examiner

Prof. Dr. R. Delaloye, co-examiner

2016

# Abstract

Rock glaciers are creeping landforms of perennially frozen ground and belong to the permafrost creeping phenomena. They are mainly composed of rock debris that accumulate in areas of high natural erosion. Ice particles between the rocks cause the moving accumulation in steep terrain to dynamically flow downslope. In the Alpine region, these morphological landforms mainly occur at north-facing mountain slopes in high altitudes above the forest boundary and are known for their sensitivity to climate change.

For several decades, rock glaciers have been monitored for scientific aims, while advances in surveying technologies increased the interest in such studies since the 1990s. Modern technologies in remote sensing (e.g., airborne imagery or satellite-based measurement techniques) are often combined with measurements from field campaigns, i.e., measurements taken directly on a rock glacier (e.g., GNSS, laser-scanning, ground temperature measurements, etc). The high-level goal is to enhance the process understanding, specially with respect to the changing climate: various studies indicate an extended risk of slope failures in steep frozen bedrock due to the global temperature increase. Early recognition of increased activities help to inform local authorities in the endangered areas about the potential hazard before such an event.

The present work is part of the *X-Sense* project (Nano-Tera.ch), with an interdisciplinary team of scientists that build and operate new low-cost devices for data acquisition, develop new data processing pipelines and algorithms for evaluation, and also gain new insight of natural processes in these regions. Autonomous measurement systems, developed within other work packages in the *X-Sense* project, observe different permafrost creep areas with high resolution in space and time. Combined with multi-year observations, the derived surface motions are used to obtain an improved process understanding.

This work focuses on the photogrammetric image processing in order to retrieve precise surface displacement estimates. More precisely, image sequences, acquired with two permanently installed commercial digital single-reflex cameras, are used to measure topographic changes in the observed permafrost area. By the combination with high resolution GNSS positioning results, the goal is to obtain precise time series of moving rock boulders at different positions within the field of view. Challenges arising from the combination of different data sets, the development of an automatic processing pipeline, and an improvement of the processing strategy in general, are the main tasks of this thesis.

The study site is the bordering area above the Grabengufer rock glacier (Mattervalley VS, Switzerland), known as the Grabengufer rock slide. Local topographic conditions allowed only a partially good installation geometry for the photogrammetric reconstruction. With

---

respect to a 3D reconstruction without the use of GNSS coordinates, an accuracy increase of about one order of magnitude could be achieved in case these high-precision solutions were integrated. More specifically, respective standard deviations for the East, North, and Height components of 6, 5, and 2 cm were achieved. The stated accuracy, maintained throughout the measurement period of nearly four years (summer months), was obtained in an area of approximately  $80\text{ m} \times 80\text{ m}$ , with a mean distance of 80 m from the two cameras.

Position time series of moving rock boulders were filtered using the principles of collocation. Analyzing the correlation characteristics of the stochastic signal, an optimal correlation length was computed and used to extract relevant signals from the noise contaminated time series. Velocity was directly estimated as a derived quantity in the collocation process. Furthermore, the techniques of the adaptive collocation approach is presented. This iterative method uses the principles of a dynamically adjusting anisotropic covariance metric. In an example of 2-dimensional velocity fields it is shown that regional compression and extension areas can be extracted.

Results indicate that the observed permafrost area has experienced a mean annual acceleration of about  $0.1\text{ m/year}$  between the years 2013 and 2015. During the late summer months of 2015, a prominent temporal acceleration was observed. The mean displacement rate was found to be  $0.67\text{ m/year}$ , whereas the 3-dimensional displacement is dominated by a translation following the gliding surface. An area in the front of the observed field of view was found to have higher displacement rates, specially during the late summer months, thus it detaches from the otherwise relatively homogeneous flow field.

The methods and principles presented in this work show the potential of monitoring permafrost surface displacements using permanently installed optical cameras in combination with positioning results from permanently mounted GNSS stations. These principles can easily be transferred to other monitoring applications and thus contribute to a better understanding of such processes.

# Zusammenfassung

Blockgletscher sind kriechende Schuttmassen in Gebieten mit mehrjährig gefrorenem Untergrund und gehören somit zu den Permafrost-Kriechphänomenen. Sie bestehen im wesentlichen aus Gesteinsmaterial, welches durch erhöhte natürliche Erosionsprozesse angehäuft wurde. Eispartikel zwischen den Gesteinsbrocken bewirken, dass sich diese Masse im steilen Gelände dynamisch talabwärts bewegt. Oft sind Blockgletscher unterhalb von Endmoränen bei Eisgletschern anzutreffen. Im Alpenraum sind sie hauptsächlich an nach Norden ausgerichteten Berghängen in grossen Höhen oberhalb der Waldgrenze zu finden. Sie sind als empfindliche Indikatoren für den Klimawandel bekannt.

Seit einigen Jahrzehnten werden Blockgletscher wissenschaftlich untersucht, wobei Fortschritte in der Messtechnik seit den 1990er Jahren zu einer starken Zunahme solcher Studien geführt haben. Moderne Techniken der Fernerkundung (z.B. Luftaufnahmen oder satellitengestützte Messtechniken) werden oft mit Messungen von Feldkampagnen, d.h. Messungen vor Ort auf den Blockgletschern (z.B. GNSS, Laserscans, Temperaturmessungen etc.) ergänzt. Das übergeordnete Ziel ist ein besseres Prozessverständnis, speziell im Zusammenhang mit dem sich ändernden Klima: Diverse Studien deuten darauf hin, dass Destabilisierungsprozesse in steilen Berghängen mit Dauerfrost, ausgelöst durch die globale Temperaturzunahme, zu erhöhten Risiken von Hangrutschungen führen. Die frühzeitige Erkennung solcher Abläufe ermöglicht es, die Behörden der betroffenen Gebiete rechtzeitig über die potentielle Gefahr zu informieren.

Die vorliegende Arbeit ist Teil des Projektes *X-Sense* (Nano-Tera.ch), in welchem ein interdisziplinäres wissenschaftliches Team neue sogenannte 'low-cost' Sensoren baut und betreibt, neue Algorithmen zur Datenverarbeitung entwickelt und daraus neue Erkenntnisse über die ablaufenden Prozesse in diesen Regionen erhält. Autonome Messsysteme, entwickelt in anderen Arbeiten innerhalb des *X-Sense* Projektes, werden zur Messung diverser Permafrost-Kriechprozesse mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung eingesetzt. Mittels mehrjähriger Beobachtungen werden die damit errechneten Oberflächenverschiebungen für ein verbessertes Prozessverständnis genutzt.

Schwerpunkt dieser Arbeit ist die photogrammetrische Bildverarbeitung in Bezug auf die präzise Messung von Oberflächenverschiebungen. Konkret sollen Bildsequenzen, aufgenommen mit zwei permanent installierten, kommerziellen Spiegelreflexkameras, für die Vermessung von Oberflächenveränderungen im beobachteten Permafrostgebiet genutzt werden. Durch Kombination mit zeitlich hochaufgelösten GNSS-Positionsmessungen sollen präzise Zeitserien von sich bewegenden Steinblöcken an unterschiedlichen Positionen innerhalb des beobachteten Bereiches berechnet werden. Zu den Hauptaufgaben dieser Arbeit gehören die Bewältigung von Schwierigkeiten bei der Kombination verschiedener Datensätze, die

---

Automatisierung der Informationsverarbeitung sowie eine optimierte Verarbeitungsstrategie im Allgemeinen.

Standort der Studie ist das angrenzende Gebiet oberhalb des Grabengufer Blockgletschers (Mattertal, VS, Schweiz), auch bekannt als die Felsrutschung am Grabengufer. Lokale Gegebenheiten führten zu einer Installationsanordnung, welche für die photogrammetrische Auswertung als nur teilweise gut bezeichnet werden kann. Im Vergleich zur 3D Rekonstruktion ohne Nutzung präziser GNSS Positionen konnte durch deren Integration eine Genauigkeitssteigerung von etwa einer Größenordnung erreicht werden. Konkret wurden für die Komponenten Ost, Nord und Höhe Standardabweichungen von 6, 5 und 2 cm erreicht. Diese Messgenauigkeit, geltend für ein ca.  $80\text{ m} \times 80\text{ m}$  grosses Gebiet in einer mittleren Entfernung von 80 m von den beiden Kamerastandorten, konnte über die gesamte Messperiode von knapp vier Jahren (Sommermonate) beibehalten werden.

Zur Filterung der gewonnenen Positionszeitreihen von Gesteinsblöcken wurden die Prinzipien der Kollokation angewandt. Mittels Analyse des stochastischen Signals auf Korrelation wurden optimale Korrelationslängen bestimmt. Diese wurden genutzt, um relevante Signale aus den mit Rauschen behafteten Zeitreihen zu erhalten. Die Geschwindigkeit wurde direkt als abgeleitete Grösse im Kollokationsprozess mitbestimmt. Des Weiteren wird die Technik der adaptiven Kollokation vorgestellt. Die iterative Methode nutzt das Prinzip einer sich dynamisch anpassenden, anisotropen Korrelationsmetrik. Im Beispiel von 2-dimensionalen Verschiebungsfeldern wird gezeigt, wie sich damit auch regionale Kompressions- und Extensionsgebiete bestimmen lassen.

Die Resultate zeigen, dass sich das beobachtete Permafrostgebiet zwischen 2013 und 2015 im Mittel um jährlich ca.  $0.1\text{ m/Jahr}$  beschleunigt hat. Im Spätsommer 2015 wurde zudem eine ausgeprägte temporäre Zunahme der Verschiebungsgeschwindigkeit festgestellt. Die durchschnittliche Verschiebungsrates beträgt  $0.67\text{ m/Jahr}$ , wobei die 3-dimensionale Verschiebung als eine dem Rutschhorizont folgende Translation beschrieben werden kann. Ein Gebiet im Frontbereich des beobachteten Ausschnitts zeigt eine erhöhte Verschiebungsrates, speziell in den späten Sommermonaten, was zu einer Ablösung von dem sonst relativ homogenen Verschiebungsfeld führt.

Die Methoden und Prinzipien, welche in dieser Arbeit präsentiert werden, zeigen das Potential der Überwachung von Oberflächenverschiebungen in Permafrostgebieten mittels permanent installierten optischen Kameras in Kombination mit Positionslösungen von permanent aufgebauten GNSS Stationen. Diese Prinzipien lassen sich auch leicht auf andere Überwachungsaufgaben anwenden und tragen so zum besseren Verständnis solcher Phänomene bei.