



Doctoral Thesis

Inverting seismic and georadar data with applications to the Muragl rock glacier

Author(s):

Musil, Martin

Publication Date:

2002

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-004311720> →

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](#).

INVERTING SEISMIC AND GEORADAR DATA WITH APPLICATIONS TO THE MURAGL ROCK GLACIER

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY
for the degree of

DOCTOR OF NATURAL SCIENCE

presented by

MARTIN MUSIL

M.Sc. University of Victoria (Canada)

born July 7, 1973

citizen of the Czech Republic and Canada

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Alan G. Green, examiner

Prof. Dr. Michael H. Worthington, co-examiner

Dr. Hansruedi Maurer, co-examiner

P.D. Dr. Klaus Holliger, co-examiner

Zürich, 2002

ZUSAMMENFASSUNG

Permafrost bedeckt grosse Gebiete der Schweizer Alpen über ~ 2500 m Seehöhe. Blockgletscher sind eine Form von Permafrost die aus Gesteinsblöcken, Eis, Wasser, und Luft bestehen. Sie entstehen an mässig bis stark geneigten Gebirgshängen wo sie, angetrieben von Gravitationskräften, langsam talwärts gleiten. Dieser Kriechvorgang wird durch die Anwesenheit von Eis beeinflusst. Globale Erwärmungsprozesse verringern den Eisgehalt der Blockgletscher und verursachen damit Instabilitäten bis zur Auslösung von Felsstürzen, welche angrenzende Siedlungen gefährden können.

Um unsere Kenntnisse über Blockgletscher zu erweitern wurde der Muragl Gletscher in der Ostschweiz zur Durchführung detaillierter, wissenschaftlicher Untersuchungen ausgewählt. Die Wahl basierte auf folgenden Kriterien: (i) die Verfügbarkeit von detaillierten, photogrammetrischen Analysen, (ii) die hohe Kriechgeschwindigkeit des Gletschers von ~ 0.5 m/Jahr macht ihn zu einem dynamisch sehr interessanten Studienobjekt und (iii) er stellt durch seine Grösse ein signifikante Gefahr dar, kann aber andererseits noch durch ein engagiertes Forscherteam untersucht werden. Die Ziele der geophysikalischen Untersuchungen waren die Abbildung der Felsoberfläche, die Begrenzung der lateralen Ausdehnung des Gletscherkörpers, Kartierung der Verteilung des Permafrosts und Abschätzung der petrophysikalischen Parameter des Gletschermaterials. Zu diesem Zweck wurden neben seismischer- und Georadaruntersuchungen an der Oberfläche auch Messungen zwischen Bohrlöchern durchgeführt. Aufgrund unterschiedlichster Probleme (z.B.: mangelhafte Kopplung der seismischen Quelle zum Gletscher und Streuungerscheinungen) lieferten die Georadaruntersuchungen von der Oberfläche aus sowie die seismischen Messungen zwischen Bohrlöchern keine brauchbaren Informationen.

Drei untefe 2D Seismikprofile von ~ 200 - 300 m Länge wurden erfolgreich an der schnee- und eisbedeckten Oberfläche des Muragl Blockgletschers aufgezeichnet. Aufgrund der unregelmässigen Oberflächenbeschaffenheit des Gletschers waren diese Bedingungen optimal für die Installation von Geophonen bzw. die Durchführung von Sprengungen zur Generierung von Quellsignalen. Die Parameter beider Profile wurden so gewählt, dass sowohl seismische Reflexions- als auf Refraktionsinformationen gewonnen werden konnte. Aufgrund der grossen Wellenlänge (~ 30 m) der seismischen Signale und der Dominanz von gestreuten Oberflächen- bzw. geführten Wellen, konnten keine Reflexionen zur Abbildung des seichten Untergrundes (oberen 50 m) aufgezeichnet werden. Im Gegensatz dazu lieferten tomographische Inversionen der Ersteinsätze brauchbare Informationen über den strukturellen Aufbau und petrophysikalische Parameter des Gletschers, wobei eine Auflösung von ~ 10 m erzielt wurde. Regionen mit hohem bzw. gerigem Eisgehalt in den obersten 50 m des Untergrundes konnten abgegrenzt werden. Entlang eines der Profile war es möglich, der Topographie des Grundgebirges zu folgen und somit die laterale Ausdehnung des

Blockgletschermaterials zu ermitteln. Eine bislang unbekannte Zone degradierten Permafrosts, in der das Eis bereits abgeschmolzen ist, wurde auf zwei der Profile detektiert. Zur Abschätzung der Auflösung der Tomogramme wurden Strahldiagramme verwendet. Um weitere Aussagen über die Zuverlässigkeit der Tomogramme treffen zu können, wurden Modellierungen basierend auf den vollen Wellenformen durchgeführt. Anschliessende Vergleiche der aufgezeichneten mit den synthetischen Daten wiesen die erhaltenen P-Wellengeschwindigkeitsmodelle als angemessene Darstellung der Struktur des Blockgletschers aus.

Zur Erhöhung der Datenabdeckung und Auflösung des Untergrundes wurden drei 2D Georadardatensätze zwischen vier 70 m tiefen Bohrlöchern unter Verwendung eines 22 MHz Radarsystem akquiriert. Daraus gewonnene Laufzeiten- und Amplitudeninformationen wurden zu elektromagnetischen Geschwindigkeits- bzw. Dämpfungstomogrammen invertiert, wobei die Laufzeitinversion einer Standardprozedur entsprach. Die Inversion der Amplituden jedoch erforderte die Einführung von Korrekturfaktoren für die Quellen- und Empfängerkopplung. Beide Inversionsschemen lieferten sowohl redundante als auch ergänzende Informationen, welche in einer Modellauflösung im Bereich von 5 m resultierten. Hauptsächlich konnten eisreiche, eisarme sowie wassergesättigte Zonen und das Grundgebirge abgebildet werden. Die Zone schmelzenden Permafrosts, welche bereits mit der seismischen Tomogramme ermittelt wurde, konnte wieder gefunden und bestätigt werden. Alle Untersuchungsergebnisse korrelierten mit bohrloch-geologischen Resultaten. Strahldiagramme und Resolutionsmatrizen dienten zur Abschätzung der Tomogrammauflösung. Synthetische Radarsektionen aus Wellenformmodellierungen zeigten sehr gute Übereinstimmung mit den aufgezeichneten Datensätzen und lieferten die Bestätigung der Korrektheit der erhaltenen kritischen Parameter.

Zu Beginn dieser Promotionsarbeit waren kombinierte Inversionen von seismischen- und Georadardatensätzen geplant. Die unzureichende Datenqualität der Oberflächenradar- bzw. Bohrlochseismikdaten verhinderten jedoch ein solches Vorgehen. Ungeachtet dessen wurde ein neuartiger Inversionsalgorithmus, geeignet für eine Reihe unterschiedlichster Anwendungen (z.B.: Hohlraumdetektion, Erzkörper, Schotter- und Eislinen), entwickelt. Entscheidend für diesen neuen Ansatz war die Annahme, dass die seismischen- bzw. Georadarwellengeschwindigkeiten limitiert auf einige wenige, enge Wertebereiche sind. Der Algorithmus basiert auf linearer Programmierung zur Suche nach zwei bzw. drei vordefinierten Geschwindigkeiten innerhalb der Modelldomäne (Seismik und Georadar). Korrespondierende Inversionszellen in den beiden Modelldomänen müssen demnach gleiches, geologisches Material enthalten. Dieses Vorgehen resultiert in vergleichbaren Strukturen im Georadar- und Seismikmodell. Abschliessend werden zur Demonstration der Einsatzmöglichkeiten des neuen Algorithmus synthetische Datenbeispiele zur Kartierung von Hohlräumen präsentiert.

ABSTRACT

Permafrost covers extensive areas of the Alps above ~ 2500 m elevation. Rock glaciers are a form of permafrost that are composed of boulders, ice, water and air. They aggregate on gently to steeply dipping mountain slopes. Subject to gravitational forces, they slowly creep downslope. The creep process is moderated by the presence of ice. Global warming degrades the ice content of rock glaciers, causing them to become unstable to the point where they may form rock avalanches that endanger life and property in nearby populated areas.

To increase our knowledge of Alpine rock glaciers, the Muragl rock glacier in eastern Switzerland was selected for detailed scientific investigation. The reasons for selecting this rock glacier were: (i) the availability of detailed photogrammetric analyses, (ii) its rapid ~ 0.5 m/year rate of creep makes it a dynamically interesting body, and (iii) its size represents a significant hazard, but it is small enough to be studied by a dedicated team of researchers. The objectives of the geophysical component of the investigation were to delineate the bedrock surface, determine the lateral extent of the rock glacier body, map the distribution of permafrost, and estimate the physical properties of the rock glacier material. To meet these objectives, surface and crosshole seismic and georadar data were acquired. For a variety of reasons (e.g., poor coupling of the sources to the rock glacier, excessive scattering), the surface georadar and crosshole seismic surveys did not provide useful information.

Three 2-D shallow seismic profiles ~ 200 - 300 m in length were successfully recorded on the snow- and ice-covered surface of the Muragl rock glacier. Due to the ruggedness of the terrain, snow and ice were optimum surfaces for planting geophones and detonating explosives. The parameters of the profiles were chosen to provide seismic reflection and refraction information. Unfortunately, reflections could not be exploited for imaging the shallow subsurface (upper 50 m) because of the long wavelength (~ 30 m) character of the signal and the dominance of back-scattered surface and guided waves. In contrast, tomographic inversions of first-arrival traveltimes yielded useful structural and physical property information. Resolution of the order of ~ 10 m was achieved. Ice-rich and ice-poor regions were delineated in the upper 50 m of the subsurface. Along one profile, it was possible to follow the undulating surface of the bedrock and thus establish the lateral extent of the rock glacier material. A previously unknown zone of degraded permafrost, where ice had already melted, was delineated along two of the profiles. Ray diagrams were used to judge the resolution of the tomograms. To check further the reliability of the tomograms, full-waveform modeling was performed. Comparisons of the observed and synthetic source gathers indicated that the derived P-wave velocity models were reasonable first-order representations of the rock glacier structure.

For improved subsurface coverage and resolution, three 2-D crosshole georadar data sets were

acquired within four 70-m deep boreholes using a powerful 22 MHz georadar system. Traveltimes and amplitudes of georadar first-arrivals were inverted to produce electromagnetic velocity and attenuation tomograms. Whereas the traveltimes were straightforward to invert, it was necessary to incorporate transmitter and receiver coupling correction factors in the amplitude inversion scheme. Inversions of the traveltimes and amplitudes provided redundant and complementary information. Resolution of the order of ~ 5 m was achieved. The main features identified in the tomograms were ice-rich and ice-poor zones, water-saturated zones, and the bedrock surface. The region of degraded permafrost previously identified in the seismic tomograms was also delineated. These findings could be correlated with borehole geological logs. Ray diagrams and formal resolution plots were used to assess the resolution of the tomograms. Full-waveform modeling resulted in synthetic radar sections that closely matched the observed radar sections, providing evidence for the reliability of the derived critical parameters.

At the beginning of this doctoral project, joint inversions of the seismic and georadar data sets were planned. Unfortunately, the low quality of the surface georadar and crosshole seismic data precluded such joint inversions. Nevertheless, a joint inversion algorithm suitable for a broad class of applications (e.g., cavities, ore bodies, gravel and ice lenses) was developed. Critical to the new scheme was the assumption that the seismic and georadar velocities were limited to a few narrow ranges of values. The algorithm makes use of mixed integer linear programming to search for two or three predefined velocity values within the model domains (seismic and georadar). Corresponding inversion cells in the two model domains must contain the same material. This approach yields seismic and georadar models that have the same structure. For demonstration purposes, synthetic examples for cavity mapping were presented.