



Doctoral Thesis

Borehole analysis and flow modeling of firn-covered cold glaciers

Author(s):

Schwerzmann, Aurel A.

Publication Date:

2006

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005114924> →

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. 16380

BOREHOLE ANALYSES AND FLOW MODELING OF
FIRN-COVERED COLD GLACIERS

Dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH

for the degree of
Doctor of Natural Sciences

presented by

AUREL ARTUR SCHWERZMANN

Dipl. Physiker, Universität Zürich

born 23 January 1972

citizen of Zug/ZG, Switzerland

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. H. Blatter, examiner

Prof. Dr. M. Funk, co-examiner

Prof. Dr. H.-E. Minor, co-examiner

Dr. O. Eisen, co-examiner

2006

Abstract

In this thesis, the dynamics of cold, firn-covered glaciers is investigated. Extensive field studies on two alpine glaciers in Switzerland (Fieschergletscher and Vadret da Morteratsch) are placed in context with theoretical considerations and model calculations. Practical solution methods are developed for the interpretation of data sets. In the context of global climate change research these methods can contribute to the reconstruction of the past climate. The thesis consists of four parts: (1) Presentation of field observations; (2) Knowledge of horizontal borehole deformation in firn and ice enables an interpretation of the horizontal strain and stress fields; (3) Determination of vertical borehole deformation in cold ice provides the means to reconstruct past accumulation rates; (4) Ice cores from a borehole of a firn-covered glacier can be dated on the basis of a three- or two-dimensional, density dependent flow model.

High alpine, firn-covered glaciers with year-round temperatures below the pressure melting point ("cold" glaciers) can represent an important archive of the local climatic conditions. Core drills enable the retrieval of firn and ice samples from different depths. Chemical and physical analyses of the ice core or the surrounding borehole contribute to the reconstruction of the local climate history. The Laboratory for Radiochemistry and Environmental Chemistry of the Paul Scherrer Institute (PSI) in collaboration with the University of Bern has acquired substantial expertise in the drilling and chemical analysis of ice cores. As a glaciological contribution, this study presents physical interpretations in and around four boreholes drilled on high alpine glaciers and in South America.

The first part summarizes collected data from more than 17 expeditions. Fieldwork has been performed on four different high altitude glaciers: namely on Piz Zupò in the accumulation area of Morteratsch glacier in the south-eastern part of Switzerland (3846 m a.s.l.), on Fiescherhorn glacier in central part of Swiss Alps (3923 m a.s.l.), on Colle Gnifetti (4452 m a.s.l.) in the Monte Rosa area in the southern Swiss Alps and on Mercedario (6075 m a.s.l.), close to Aconcagua in Argentina.

Established physical properties are shown as well as first interpretations of repeated measurements.

In the second part, the possibilities of a newly developed borehole probe to detect horizontal deformation in the ice is described. Gradients in the local stresses in the ice lead to shear, converging or diverging flow. An initially circular borehole can respond to these differences with isotropic or anisotropic deformation. Conversely, observed borehole deformations can be used to deduce the strain field in the ice.

A caliper probe with eight arms was used to determine the borehole diameter and the shape of a borehole as a function of depth. Repeated measurements enable us to observe the horizontal borehole deformation. It is noted that the measurement accuracy is better than 0.5 mm. Possible error sources are the roughness of the borehole wall (scratch markings, hoarfrost, refreezing meltwater) and the mechanics of the probe itself. A regression ellipse through the eight determined points quantifies the deformation as a function of time and depth.

The third part describes a new technique to reconstruct past accumulation rates. Annual precipitation in form of a layer of snow will be covered by further layers in subsequent years. With time, the firm layer moves to greater depths and thins due to the overlaying weight and densifies gradually to firn and ice. This layer thinning has to be taken into account when reconstructing the past accumulation rate.

Immediately after drilling an ice core, markings are scratched every few meters into the borehole wall using a specially designed steel brush. Repeated loggings with a caliper probe allow the exact positioning of the markings as a function of time and depth. The resulting vertical velocity profile can be used to determine a depth dependent factor, with which the annual layer thicknesses measured in the ice core can be corrected. These corrected accumulation data are compared with results obtained by applying other correction methods.

In the fourth part a method is described for dating ice along a borehole using a physically-based flow model. For chemical dating of ice cores without modeling, absolute methods in which annual layers are associated with a specific time are distinguished from relative methods by counting annual layers starting from the surface. As a means of independent age determination, physical dating by modeling the flow field offers an additional control. Furthermore, this method does not require ice samples and, thus, can be applied to evaluate potential drilling sites.

Temperature- and density dependent three-dimensional flow models require substantial computing power. The approach presented here aims at optimizing quality of results and computational time. In a first step, a three-dimensional flow field is calculated by applying an incompressible flow model. Along selected flowlines, a two-dimensional model is applied to recalculate the temperature- and density dependent flow field. Integration along individual flowlines then yields the desired depth-age relation. In contrast to the three-dimensional incompressible flow model, this two-step dating leads to a substantially better agreement with dated layers from chemical analyses.

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit behandelt die Dynamik von kaltem, Firn bedecktem Eis. Umfangreiche Feldstudien von zwei alpinen Gletschern (Fieschergletscher und Vadret da Morteratsch) werden in den Kontext von theoretischen Überlegungen, bzw. Modellrechnungen gestellt. Dabei werden praxisorientierte Lösungsansätze zur Dateninterpretation entwickelt. Diese können im Kontext des globalen Klimawandels einen relevanten Beitrag zur Rekonstruktion des vergangenen Klimas leisten. Die Arbeit gliedert sich dabei in drei Teile: 1) Kenntnis der horizontalen Bohrlochdeformation in Firn und Eis ermöglicht eine Interpretation des horizontalen Spannungsfeldes. 2) Die Bestimmung vertikaler Bohrlochdeformation in kaltem Eis bietet die Basis zur Rekonstruktion von historischen Akkumulationsraten. 3) Eiskerne aus einem Bohrloch von Firn bedeckten Gletschern können auf Grund einer drei-, bzw. zweidimensionale, Dichte abhängigen Fließmodellierung physikalisch datiert werden.

Hochalpine, Firn bedeckte Gletscher, deren Temperaturen ganzjährig unter dem Gefrierpunkt liegen (sogenannte "kalte" Gletscher) repräsentieren ein wichtiges Archiv des örtlichen Klimas. Spezielle Kernbohrer ermöglichen den Zugang zu Firn- und Eisproben aus verschiedenen Tiefen. Chemische und physikalische Analysen des Eiskernes, bzw. des Bohrlochs und seiner Umgebung tragen zur Rekonstruktion der lokalen Klimageschichte bei.

Das Labor für Radio- und Umweltchemie des Paul Scherrer Instituts (PSI) hat sich in Zusammenarbeit mit der Universität Bern und der Glaziologie der ETH Zürich darauf spezialisiert, solche Eiskerne zu bohren und chemisch zu analysieren. Als glaziologischer Beitrag präsentiert die vorliegende Arbeit physikalische Interpretationen in und rund um vier Bohrlöcher, die auf hochalpinen Gletschern und in Südamerika gebohrt wurden.

Der erste Block fasst alle gemessenen Daten von mehr als 17 Expeditionen zusammen. In vier verschiedenen Gebieten im Hochgebirge wurde Feldarbeit gemacht: namentlich beim Piz Zupò im Akkumulationsgebiet des Morteratsch Gletschers, in der Südostschweiz (3846 m.ü.M.), beim Fieschersattel auf dem Fiescher Gletscher im Berner Oberland (3923 m.ü.M.), auf dem Colle Gnifetti (4452 m.ü.M) im Monte-Rosa Masiv und auf dem Mercedario (6075 m.ü.M) nördlich vom Aconcagua in Argentinien.

Sowohl Messresultate als auch erste Interpretationen werden präsentiert.

Im zweiten Teil werden die Möglichkeiten einer neu entwickelten Bohrloch-Sonde beschrieben, um horizontale Deformationen im Eis zu detektieren. Unterschiede der lokalen Spannungen (oder Geschwindigkeiten, Dichten) im Eis, führen zu Scherungen, Stauchungen oder Streckungen des Eiskörpers. Ein im Querschnitt ursprünglich kreisrundes Bohrloch reagiert darauf durch radialsymmetrische oder anisotrope Verformungen. Umgekehrt lassen beobachtete Bohrloch-Deformationen auf die Deformationen im Eis schliessen.

Mit einer acht armigen Kaliper-Sonde kann nicht nur der Durchmesser, sondern auch die Form des Bohrloches als Funktion der Tiefe registriert werden. Wiederholungsmessungen ermöglichen die Beobachtung der horizontalen Bohrloch-Deformation. Eine Regressionsellipse durch die acht bestimmten Punkte quantifiziert diese Verformung als Funktion der Tiefe und Zeit. Dabei kann festgestellt werden, dass die Messgenauigkeit – gegeben durch Unebenheiten an der Bohrlochwand (Kratzspuren, Reif, wiedergefrorenes Schmelzwasser) und durch die Mechanik der Sonde selber – genügt, um Deformationen in der Grössenordnung von 0,5 mm pro Jahr zu detektieren.

Der dritte Block beschreibt eine neue Technik zur Rekonstruktion früherer Akkumulationsraten. Jahresniederschlag in Form einer Schicht Schnee wird im darauf folgenden Jahr von einer weiteren Schicht überdeckt. Mit fortschreitender Zeit sinkt die Firnschicht immer tiefer ein, und wird – bedingt durch das überlagerte Gewicht kontinuierlich zu Eis komprimiert. Dabei verdünnt sich die ursprüngliche Schicht, was bei der Rekonstruktion historischer Akkumulation berücksichtigt werden muss. Die Entwicklung einer neuen Messtechnik ermöglicht mit geringen Aufwand diesen früheren Jahresniederschlag zu rekonstruieren:

Unmittelbar nach einer Eiskern-Bohrung werden mittels einer speziell dafür entwickelten Stahlbürste alle paar Meter Markierungen in die Wand des Bohrlochs gekratzt. Wiederholungsmessungen mit einer Kaliper-Sonde (Instrument zur Bestimmung des Bohrloch-Durchmessers) dienen der exakten Positionsbestimmungen der Markierungen als Funktion der Zeit und der Tiefe. Aus dem daraus gewonnenen vertikalen Geschwindigkeitsprofil wird ein tiefenabhängiger Faktor bestimmt, mit welchem die im Eiskern gemessenen Jahresschichtdicken korrigiert werden. Diese korrigierten Akkumulationsdaten werden verglichen mit anderen möglichen Korrekturmethode.

Im vierten Teil wird eine Variante beschrieben, wie das Eis entlang einem Bohrloch auf Grund eines physikalischen Fliessmodells datiert werden kann. Bei chemischer Datierung von Eisbohrkernen ohne Modellierung wird zwischen absoluten Methoden, in der einzelne Jahresschichten einem genauen Zeitpunkt zugeordnet werden können, und relativen Verfahren durch Abzählen der Jahresschichten von der Oberfläche her unterschieden. Als unabhängige Altersbestimmung ermöglicht die physikalische Datierung mittels Fliessfeld eine zusätzliche Kontrolle. Sie ist zudem als einzige Methode nicht auf Eisproben angewiesen und kann daher auch

der Standortevaluation von möglichen Eisbohr-Projekten dienen.

Temperatur- und Dichteabhängige dreidimensionale Modelle benötigen grosse Rechenleistungen. Die hier vorgestellte Lösung zielt eine Optimierung von Qualität und Rechenleistung an. In einem ersten Schritt wird mit einem inkompressiblen Fließfeld das dreidimensionale Fließfeld berechnet. Entlang ausgewählten Fließlinien wird danach ein zweidimensionales Modell generiert, welches das Fließfeld neu Temperatur und Dichte abhängig bestimmt. Integration entlang einzelner Fließlinien führt zur gesuchten Alters-Tiefen Beziehung. Diese zweistufige Datierung zeigt im Gegensatz zum dreidimensionalen inkompressiblen Modell eine wesentlich bessere Übereinstimmung mit der Altersbestimmung aus chemischen Analysen.