

Diss. ETH No 13406

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL  
INVESTIGATION OF A  
FIRN COVERED COLD GLACIER  
AND A  
POLYTHERMAL ICE STREAM

CASE STUDIES AT COLLE GNIFETTI AND  
JAKOBSHAVNS ISBRÆ

A dissertation submitted to the

SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH

for the degree of  
Doctor of Natural Sciences

presented by  
Martin Peter Lüthi  
Dipl. Phys. ETH  
born 7. May 1967  
citizen of Rüderswil (BE)

accepted on the recommendation of  
Prof. Dr. H.-E. Minor, examiner  
Dr. M. Funk, co-examiner  
Dr. J. Meyssonier, co-examiner  
Prof. Dr. H. Blatter, co-examiner

1999

# Zusammenfassung

Diese Dissertation besteht aus zwei Teilen. Der erste Teil umfasst die Modellierung des Fliessens von kaltem Firn, der zweite die Dynamik eines polaren Eisstromes. Die Resultate von Feldmessungen am Colle Gnifetti (Schweizer Alpen) und am Jakobshavn Isbræ (Grönland) sowie dazugehörige Modellrechnungen werden dargestellt.

Im ersten Teil wird ein dreidimensionales Fliessmodell eines firnbedeckten kalten Gletschers entwickelt. Dabei liegt der Schwerpunkt auf der korrekten Behandlung der Kompressibilität von Firn. Das Modell wird erfolgreich zur Berechnung der Alters-Tiefen Beziehung der auf dem Colle Gnifetti erbohrten Eiskerne angewandt. Die Kompressibilität von Firn wird durch geeignete Konstitutivgleichungen berücksichtigt, die in zwei Finite Elemente Programmen implementiert wurden. In dieser Studie wird eine von Gagliardini and Meysonnier (1997) vorgeschlagene Fliessgesetz-Parametrisierung verwendet.

Die Eisdicken des Colle Gnifetti wurden mittels eines Eisradars gemessen und mit Hilfe digitaler Signalverarbeitung sowie seismischer Migrationstechniken interpretiert. Die so bestimmten Eisdicken stimmen mit den Tiefen von Bohrlöchern innerhalb der Messgenauigkeit der Methode überein ( $< 4$  m). Messungen der Bohrloch-Temperaturen, der Oberflächengeschwindigkeiten sowie der Akkumulationsraten bilden die Grundlage für Fliessmodelle in zwei und drei Dimensionen. Die Dichte des Firns und die Eistemperaturen werden entweder vorgeschrieben oder in gekoppelten Modellen berechnet. Die gemessenen Oberflächengeschwindigkeiten, Dichteprofile, die Alter chemisch datierter Schichten in Eiskernen und die Schliessrate eines 100 m tiefen Bohrlochs dienen der Überprüfung der Modelle. Die gute Übereinstimmung von modellierten und gemessenen Grössen zeigt, dass die Modelle die wesentlichen physikalischen Prozesse beinhalten, und insbesondere, dass das gewählte Fliessgesetz von Firn für diese Art von Gletschern geeignet ist. Diese Arbeit liefert neue Abschätzungen des Alters des Eises nahe der Gletscherbasis sowie der Quellgebiete des Eises in den Kernen.

Ein aussergewöhnliches Fliessverhalten des basalen Eises wurde in den Messungen der Bohrloch-Schliessung und -Neigung festgestellt. Die gemessenen Deformationsraten übertreffen die mit Modellen gewonnenen Abschätzungen und werden daher veränderten rheologischen Eigenschaften zugeschrieben.

Die markante Krümmung der Temperaturprofile zweier neuer Bohrlöcher wurde mit einem Wärmefluss-Modell interpretiert, welches zeitabhängig mit einer Temperaturgeschichte rechnet. Das Ergebnis zeigt, dass eine markante Erwärmung der mittleren Oberflächentemperatur während der letzten Jahrzehnte stattfand. Eine solche Erwärmung konnte bisher in keiner Firnregion der Alpen nachgewiesen werden. Die modellierten Wärmeflüsse im Monte Rosa-Massiv werden stark von der Topographie beeinflusst, welche einen räumlich variablen Temperaturgradienten an der Gletscherbasis hervorrufen. Eine solche Variation wurde in tiefen Bohrlöchern beobachtet. Die obigen Modellresultate beruhen auf der Annahme eines sehr kleinen vertikalen Wärmeflusses in der Tiefe. Modell-Läufe mit einer Temperaturgeschichte seit der letzten Eiszeit zeigen, dass dies ein paläoklimatischer Effekt ist, der möglicherweise von einer schmelzenden Permafrostbasis verstärkt wird.

Im zweiten Teil der Arbeit wird die interne thermale Struktur und das Fliessverhalten eines schnellen, polythermalen polaren Eisstromes untersucht. Messungen von Bohrloch-Temperaturen sowie ergänzende Modellrechnungen ergaben die Existenz einer temperierten Schicht von 200 bis 400 m Dicke an der Basis des Eisstromes. Um die Ursachen des schnellen Fliessens zu untersuchen, wurden im Jahre 1995 weitere Bohrlochexperimente in der Mitte sowie in unmittelbarer Nachbarschaft des Jakobshavn Eisstromes durchgeführt. Die Messungen in acht Bohrlöchern zum Gletscherbett ergaben folgende Resultate:

- Eine temperierte Schicht von 30 Metern Dicke (3.7% der Eisdicke) existiert an der Basis des Eisschildes in der Nachbarschaft des Eisstromes.
- Die Messungen der Bohrloch-Neigung bestätigten die vom Fliessmodell berechnete Tiefe des Übergangs von holozänem zu eiszeitlichem Eis. Das tiefer liegende Eis ist eine Grössenordnung weniger viskos. Die Messungen ergeben, dass basales Gleiten zu etwa 60% der gemessenen Eisgeschwindigkeit an der Oberfläche beiträgt.
- Mit Messungen des elektrischen Stromes zwischen Elektroden in benachbarten Bohrlöchern wurden Schichten mit erhöhter Leitfähigkeit festgestellt. Ein Vergleich der Tiefen dieser Schichten mit gleichartigen Messungen im Eisstrom zeigen, dass die vertikale Dehnung des Eises ungleichmässig ist, wie dies in früheren Studien vermutet wurde.
- Die Analyse von Wasserständen in Bohrlöchern zeigt die Existenz eines hydraulisch aktiven subglazialen Abfluss-Systemes bei der Bohrstelle .

Diese experimentellen Ergebnisse werden mit Hilfe eines thermomechanisch gekoppelten Fliessmodelles interpretiert. Diese Arbeit liefert wichtige experimentelle Befunde zur Rheologie von Eis und zur Dynamik tief erodierter Eisströme im grönländischen Eisschild.

## Abstract

This dissertation consists of two parts. The first deals with flow modeling of cold firn, and the second focuses on ice stream dynamics. Field work and modeling studies of Colle Gnifetti (Swiss Alps) and Jakobshavns Isbræ (Greenland) are presented.

In the first part, a three-dimensional flow model of a firn-covered, cold glacier is developed with emphasis on the firn compressibility. The model proves to be very successful in calculating the age-depth relation of several ice cores drilled on Colle Gnifetti, Monte Rosa, Swiss Alps. The compressibility of firn is taken into account by appropriate constitutive equations which are implemented in two finite element codes. A flow law parameterization proposed by Gagliardini and Meysonnier (1997) is used throughout this study.

Ice thicknesses of Colle Gnifetti have been measured with radio echo soundings and are interpreted with digital signal processing and seismic migration techniques. The resulting ice thicknesses match borehole depths within the accuracy of the method ( $< 4$  m). Measurements of borehole temperatures, surface velocities and accumulation rates provide the basis for glacier flow models in two and three dimensions. Firn density and englacial temperatures are either prescribed or calculated in coupled models. Measured surface velocities, density profiles, the ages of chemically dated layers in ice cores and the closure of a 100 m deep borehole provide benchmarks for the models. The good agreement of modeled and measured quantities corroborates that the models include the relevant physical processes and particularly that the firn flow law is well suited for this type of glaciers. This study provides new constraints on the age of the basal ice as well as the source regions of the ice cores.

An exceptional flow behaviour of the basal ice layer was detected in measurements of borehole closure and inclination. Measured deformation rates exceed upper bounds derived from the flow models and are thus attributed to altered rheological properties.

Marked bends observed in the temperature profiles from two recent boreholes are interpreted with help of a transient heat flow model, driven with a temperature history. The conclusion is that substantial warming of the mean firn surface temperature has taken place over the last decades. This has not been observed so far in cold firn regions of the Alps. Modeled heat fluxes in the massif of Monte Rosa are strongly influenced by topographic effects, leading to a spatial variability of the temperature gradient near the glacier base. Such a variation has been observed in deep boreholes. These model results rely on the assumption of an extremely low vertical heat flux at depth. Driving the transient heat flow model with the temperature history since the last ice age shows, that this is merely a paleoclimatic effect, possibly enhanced by a degrading permafrost base.

In the second part of the thesis the internal temperature structure and the flow behaviour of a fast, polythermal polar ice stream are addressed. Eight boreholes to the bedrock have been drilled in the ice sheet adjacent to Jakobshavns Isbræ. Borehole temperature measurements and complementary modeling studies revealed the existence of a substantial temperate layer (some 200-400 m thick) at the base

of the ice stream. To investigate the causes of the fast flow of Jakobshavn Isbrae further, additional borehole experiments were accomplished in 1995 at a centerline of the ice stream and on the ice sheet 5 km north of it. They provided the following results:

- A substantial temperate layer (30 m thick or 3.7% of the ice thickness) was detected at the base of the ice sheet bordering the ice stream.
- Borehole tilt measurements confirmed the depth of the Holocene/Wisconsin transition predicted by flow modeling. Beneath this depth (approximately 80% of the total ice thickness), a decrease in ice viscosity by an order of magnitude was detected. The tiltmeter data also suggest that basal sliding contributes about 60% to the total velocity measured at the surface.
- Measurements of electrical current between electrodes in adjacent boreholes revealed distinct layers of enhanced conductivity. A comparison of the depth arrangement of these layers in the ice sheet and in Jakobshavn Isbrae seems to corroborate the special vertical stretching in the ice stream, proposed in a previous study.
- Borehole water level measurements proved that a hydraulically active sub-glacial drainage system exists at the drill site.

These experimental facts are interpreted with help of a thermo-mechanically coupled flow model. The study contributes important evidence on the rheology of ice and the dynamics of a deeply eroded ice stream in the Greenland Ice Sheet.