



Doctoral Thesis

Cold firn and ice in the Monte Rosa and Mont Blanc areas: spatial occurrence, surface energy balance and climatic evidence

Author(s):

Suter, Stephan

Publication Date:

2002

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-004288434> →

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. 14424

**Cold Firn and Ice in the
Monte Rosa and Mont Blanc Areas:
Spatial Occurrence,
Surface Energy Balance and
Climatic Evidence**

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH
for the degree of
Doctor of Natural Science

presented by
Stephan Suter
Dipl. Natw. ETH
born 25 April 1969
citizen of K lliken (AG)

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. H.-E. Minor, examiner
Prof. Dr. A. Ohmura, co-examiner
Dr. M. Hoelzle, co-examiner
Prof. Dr. M. Kuhn, co-examiner

2001

Abstract

Little knowledge exists to date on the complex glacier-atmosphere interactions leading to the formation of cold firn on high-elevation Alpine glaciers. Although cold firn and ice is not a wide-spread phenomenon on Alpine glaciers, it is of importance for many glaciological problems and has a major impact on glaciers as an environmental and climatic archive.

The present study is a contribution to a better and more quantitative understanding of the atmospheric and glaciological processes in cold firn areas. The study is divided into four main parts dealing with the atmosphere-ground interactions (surface energy-balance), the distribution of cold firn in space (spatial occurrence of cold firn), the thermometric evidence of observed firn- and ice-temperature profiles in terms of a climate signal (borehole thermometry) and the energy balance and the (future) englacial thermal conditions in space (coupled spatial energy-balance/firn-temperature model).

The atmospheric impact was investigated with the help of an energy-balance study at the cold 4300 m high Seserjoch firn saddle, Monte Rosa area (Italy and Switzerland). Measurements of short- and longwave radiation, wind speed and wind direction, air temperature, air humidity, snow height and snow- and firn temperatures were carried out between September, 1998 and August, 2000. A one-year time series of energy-balance measurements covering the period from May, 1999 to April, 2000 shows that the net radiation and turbulent heat fluxes are the major contribution to the energy balance. The heat fluxes due to surface melt in summer and re-freezing events (re-freezing of meltwater at the surface or rime accretion) have to be taken into account. Their precise magnitude is difficult to interpret as these fluxes also comprise the instrumental and methodological errors of the energy-balance calculation. Single surface melt events and the prevailing meteorological conditions favouring or preventing surface melt could be identified by precise high-resolution surface-temperature measurements.

Near-surface firn temperatures were measured in 22 steam-drilled boreholes in the summit region of Mont Blanc (France and Italy) between 3800 and 4800 m a.s.l. in June, 1998, and in 31 boreholes in the Monte Rosa area (Italy and Switzerland) between 3900 and 4500 m a.s.l. in May/July 1999. Borehole temperatures were sampled with removable thermistor chains to a depth of 22 m. The temperatures at 18 m depth ranged between temperate conditions and approximately -15°C . The thermal distribution pattern of cold firn suggests a strong influence of solar radiation and turbulent heat exchange. During the melt season in summer, these energy fluxes mainly determine the melt-energy input into the snow and firn and, thereby, the observed near-surface firn temperatures. Mean annual air temperature is of secondary importance for the spatial distribution pattern, although the observed mean annual firn temperatures generally increase with decreasing elevation. A statistical analysis of the measured firn temperatures revealed that the parameters elevation, potential direct solar radiation, slope and accumulation are able to explain more than 80 % of the variation of the mean annual firn temperatures. The aspect-dependent lower boundaries for cold firn in the Mont Blanc and Monte Rosa areas range between

3500 and 3700 m a.s.l. on north-facing and between 3800 and 4100 m a.s.l. on south-facing slopes.

Theoretical calculations, using a one-dimensional time-dependent thermo-mechanical firn-temperature model including the effect of latent heat originating from surface melt, show that the englacial thermal regime is extremely sensitive to the magnitude and duration of surface melt and that melt events perturb the pure surface-temperature signal, considerably. A typical surface-temperature perturbation penetrates a 100 m thick glacier within 18 to 30 years, only. Therefore, the possible time horizon for surface-temperature reconstructions using englacial temperature profiles is limited to a few centuries at best. Englacial temperature profiles were measured with an absolute accuracy of ± 0.01 – 0.03°C in a 29 m deep borehole at Seserjoch (4300 m a.s.l., Monte Rosa area), in a 25 m deep borehole at the saddle point of Colle Gnifetti (4450 m a.s.l., Monte Rosa area) and in a 40 m deep borehole on top of Dôme du Goûter (4300 m a.s.l., Mont Blanc area). These records suggest a surface-temperature increase on the order of 0.5 – 1°C for the last decade.

A spatial energy-balance model was coupled with a one-dimensional thermal firn-temperature model and applied to the Monte Rosa study area. Although the energy-balance model yielded some encouraging results, the errors in the calculated surface temperature turned out to be too large for a direct application in a coupled energy-balance/firn-temperature model. A simplified formulation of the upper boundary condition in terms of surface temperature and melt-energy input is proposed and coupled with the firn-temperature model. The model is considered robust enough to give a statement on the future thermal evolution of the cold firn saddles of Seserjoch and Colle Gnifetti.

Zusammenfassung

Wenig ist bis heute bekannt über die komplexen Austauschprozesse zwischen Gletscher und Atmosphäre, welche zur Bildung von kaltem Firn auf hochgelegenen Alpengletschern führen. Obwohl kalter Firn und kaltes Eis nicht ein weitverbreitetes Phänomen für Alpengletscher darstellt, ist es doch für viele glaziologische Fragestellungen wichtig und hat einen grossen Einfluss auf Gletscher als Umwelt- und Klimaarchiv.

Die vorliegende Arbeit versteht sich als Beitrag zu einem verbesserten quantitativen Verständnis der atmosphärischen und glaziologischen Prozesse in kalten Firngebieten. Die Studie ist in vier Hauptteile gegliedert, welche sich mit den Wechselwirkungen zwischen der Atmosphäre und dem Untergrund (Oberflächenenergiebilanz), der Verbreitung von kaltem Firn im Raum (räumliche Verbreitung von kaltem Firn), der thermometrischen Aussage beobachteter Firn- und Eistemperaturprofile im Sinne eines Klimasignals (Bohrlochthermometrie) und der Energiebilanz und den (zukünftigen) thermischen Bedingungen des Gletschers im Raum (gekoppeltes räumliches Energiebilanz-/Firntemperaturmodell) befassen.

Der Einfluss der Atmosphäre wurde mit Hilfe einer Energiebilanzstudie am 4300 m hohen, kalten Firnsattel des Seserjochs (Monte Rosa, Italien und Schweiz) untersucht. Messungen der kurz- und langwelligen Strahlung, der Windgeschwindigkeit und -richtung, der Lufttemperatur, der Luftfeuchte, der Schneehöhe und der Schnee- und Firntemperaturen wurden zwischen September 1998 und August 2000 durchgeführt. Eine einjährige Energiebilanzmessreihe von Mai 1999 bis April 2000 zeigt, dass die Nettostrahlung und die turbulenten Wärmeflüsse den Hauptanteil der Energiebilanz ausmachen. Die Wärmeflüsse aufgrund der Oberflächenschmelze im Sommer und von Wiedergefrierprozessen (Wiedergefrieren von Schmelzwasser oder Raureifbildung) können nicht vernachlässigt werden. Ihre exakte Grössenordnung ist schwierig zu bestimmen, da diese Flüsse auch die instrumentellen und methodischen Fehler der Energiebilanzberechnung beinhalten. Präzise, hochaufgelöste Oberflächentemperaturmessungen ermöglichten es, einzelne Oberflächenschmelzereignisse und die vorherrschenden meteorologischen Bedingungen zu identifizieren, welche Oberflächenschmelze begünstigen oder verhindern.

Oberflächennahe Firntemperaturen wurden in 22 Dampfbohrlöchern in der Gipfelregion des Mont Blanc (Frankreich und Italien) zwischen 3800 und 4800 m ü. M. im Juni 1998 und in 31 Dampfbohrlöchern im Monte Rosa Gebiet (Italien und Schweiz) zwischen 3900 und 4500 m ü. M. im Mai/Juli 1999 gemessen. Die Bohrlochtemperaturen wurden mit Hilfe mobiler Thermistorenketten bis in eine Tiefe von 22 m aufgezeichnet. Die Temperaturen in 18 m Tiefe variierten zwischen temperierten Bedingungen und ungefähr -15°C . Das Verbreitungsmuster von kaltem Firn legt einen starken Einfluss der Sonneneinstrahlung und des turbulenten Wärmeaustausches nahe. Während der Schmelzperiode im Sommer bestimmen diese Energieflüsse hauptsächlich den Schmelzenergieeintrag in den Schnee und Firn und damit die beobachteten, oberflächennahen Firntemperaturen. Die mittlere Jahrestemperatur der Luft ist eher zweitrangig für das räumliche Verbreitungsmuster, obwohl die beobachteten mittleren Firntemperaturen im allgemeinen mit abnehmender Höhe

zunehmen. Eine statistische Auswertung gemessener Firntemperaturen hat gezeigt, dass die Parameter Höhe, potentielle Direktstrahlung, Hangneigung und Akkumulation mehr als 80 % der Variation der mittleren Firntemperaturen erklären können. In den Mont Blanc und Monte Rosa Gebieten schwanken die expositionsabhängigen Untergrenzen für kalten Firn zwischen 3500 und 3700 m ü. M. in Nord- und 3800 und 4100 m ü. M. in Südhängen.

Theoretische Berechnungen mit Hilfe eines eindimensionalen, zeitabhängigen, thermomechanischen Firntemperaturmodells, welches den Einfluss der latenten Wärme durch wiedergefrierendes Schmelzwasser berücksichtigt, zeigen, dass die Temperaturverteilung im Gletscher extrem empfindlich auf den Umfang und die Dauer der Oberflächenschmelze reagiert und dass Oberflächenschmelzereignisse das reine Oberflächentemperatursignal empfindlich stören. Eine typische Oberflächentemperaturstörung hat einen 100 m dicken Gletscher innerhalb von nur 18 bis 30 Jahren durchquert, was im besten Fall zu einem möglichen Zeithorizont für Oberflächentemperaturrekonstruktionen mit Hilfe von Bohrlochtemperaturprofilen von einigen Jahrhunderten führt. Bohrlochtemperaturprofile wurden mit einer absoluten Genauigkeit von ± 0.01 – 0.03°C in einem 29 m tiefen Bohrloch am Seserjoch (4300 m ü. M., Monte Rosa Gebiet), in einem 25 m tiefen Bohrloch im Sattelpunkt des Colle Gnifetti (4450 m ü. M., Monte Rosa Gebiet) und in einem 40 m tiefen Bohrloch auf dem Gipfel des Dôme du Goûter (4300 m ü. M., Mont Blanc Gebiet) gemessen. Die Bohrlochtemperaturprofile zeigen dabei eine Erhöhung der Oberflächentemperatur in der Grössenordnung von 0.5 – 1°C für das letzte Jahrzehnt.

Ein räumliches Energiebilanzmodell wurde mit einem eindimensionalen thermischen Firntemperaturmodell gekoppelt und auf das Monte Rosa Studiengebiet angewendet. Obwohl das Energiebilanzmodell einige vielversprechende Resultate lieferte, hat es sich gezeigt, dass die Fehler in der errechneten Oberflächentemperatur zu gross waren für eine direkte Anwendung in einem gekoppelten Energiebilanz-/Firntemperaturmodell. Eine vereinfachte Formulierung der oberen Randbedingung im Sinne der Oberflächentemperatur und des Schmelzenergieeintrages wird vorgeschlagen und mit dem Firntemperaturmodell gekoppelt. Das Modell wird als soweit robust betrachtet, um eine Aussage über die zukünftige thermische Entwicklung der kalten Firnsättel am Seserjoch und am Colle Gnifetti machen zu können.