



Doctoral Thesis

## The radiative properties of snow at Summit, Greenland

**Author(s):**

Bourgeois, C. Saskia

**Publication Date:**

2006

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005319702> →

**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. 16758

# **The radiative properties of snow at Summit, Greenland**

A dissertation submitted to the  
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY (ETH)  
ZURICH

for the degree of  
DOCTOR OF NATURAL SCIENCE

presented by  
C. SASKIA BOURGEOIS  
Dipl. Natw. ETH  
born 14 May, 1973  
citizen of Ballaigues, VD (Switzerland)

accepted on the recommendation of  
Prof. Dr. A. Ohmura, examiner  
Prof. Dr. M. Kuhn, co-examiner  
Prof. Dr. K. Steffen, co-examiner  
Dr. P. Calanca, co-examiner

Zürich, 2006

# Abstract

The amount of solar radiation reflected at the earth surface is one of the primary parameters controlling the surface radiation balance which determines the heat and water exchange processes. Snow and ice cover a seasonally varying area of up to 15% on this planet. Therefore a profound knowledge of the snow radiative processes is needed to calculate the planetary radiation balance. Among all surfaces snow in particular shows high reflectance and complex absorption features. However, snow properties influencing the magnitude of reflectance and absorption are not constant over time. For example the anisotropic reflectance of a snow cover over the hemisphere varies with the solar incident angle. Presently, most general circulation models use a fixed snow albedo value over the globe or they apply a simple parametrization to calculate the surface reflectance based on two broadband radiation ranges (e.g. visible and near infrared). In remote sensing on the other hand, the broadband hemispherical albedo has to be extrapolated from a discrete and small number of confined spectral bands, and usually measured from a single viewing direction. Both applications generally fail to resolve the fine spectral and directional reflectance properties of snow, which in fact determine the broadband albedo.

As a first step in mitigating this unsatisfying situation and improving the understanding of the snow radiative properties, the Summit Environmental Observatory on the ice sheet in the dry snow zone of Greenland has been chosen to carry out detailed studies on absorption, transmittance and reflectance properties of snow. The research focuses on the penetration depth of solar radiation into the snow and on the directional reflectance of solar radiation back to the hemisphere. The specially developed measuring instrumentation is presented which was used during three field campaigns, in 2001, 2004 and 2005.

In the first part of this work the climatological conditions at the measuring site are shown. The relevant snow radiative processes are then summarized. A detailed literature review demonstrates the complexity of the involved problem and shows the present state of research. The experiments of 2001, investigating on the penetration and extinction of solar radiation within the snow cover, confirm the selective spectral absorption of snow and the exponential pattern of the decreasing intensity with depth. Results of this study show that a large portion of the absorbed radiation does not penetrate deep into the snow and it is assumed to be removed in the form of latent heat flux. However, processes at the snow-atmosphere interface are still not well understood.

The second part of this work presents the new *IACETH* field Gonio-Spectrometer developed at the Institute for Atmospheric and Climate Science. It measures directional reflected radiation with high spectral and spatial resolution and a hemispherical directional reflectance factor can be calculated. The goniometer is fully automatic and the two robotic arms are controlled with step motors. A spectrometer equipped with a 3° foreoptic is used for taking spectrums of the reflected radiation in the range of 350 to

1050 nm. The time needed to collect one complete hemispherical dataset ( $15^\circ$  resolution in both view zenith and view azimuth angle) is 11 minutes, corresponding to a change of less than  $4^\circ$  in solar zenith and azimuth angle.

The datasets collected with the *IACETH* Gonio-Spectrometer are presented and used in the third part of this work. The Hemispherical Directional Reflectance Factor (HDRF) is used as a means to exploit the directional reflectance properties of snow. The observations were carried out for two prevailing snow surface types: a smooth surface with windbroken small snow grains and a surface covered with rime causing a higher surface roughness. The HDRF distribution was nearly isotropic at noon. It varied with increasing solar zenith angle, resulting in a strong forward scattering peak. Smooth surfaces exhibited stronger forward scattering than surfaces covered with rime. At a solar zenith of  $85^\circ$ , an HDRF of  $\sim 13$  was observed in the forward scattering direction for  $\lambda=900$  nm. Spectral albedos were then calculated by interpolating the HDRF datasets on a  $2^\circ$  grid and integrating individual wavelengths. Spectral albedos showed variations depending on the solar illumination geometry and were sensitive to snow surface properties. Broadband albedos were calculated by integrating the spectral albedos over all wavelengths. The broadband albedos derived from directional measurements reproduced the diurnal pattern measured with two back-to-back broadband pyranometers.

Finally, a laboratory experiment allowed to carry out investigations on the spectral snow reflectance. Using tomography, snow samples taken in the area of Davos were analyzed in detail with respect to their small scale structure and the specific surface area (SSA). The SSA correlates well with the measured reflectance. However, low values in the visible range which might be caused by impurities, could not be explained since in this study impurities have not been measured.

In summary, this study shows that the snow radiative processes are highly dependent on small and medium scale snow physical characteristics. It exemplifies that snow radiative properties can be determined by use of a consistent measurement framework which integrates surface radiative processes, snow physics and snow morphology. Ultimately snow chemistry, surface roughness and further snow physical parameters should be concurrently measured as part of a future field experiment. This study presents a foundation for further investigations of this kind with the ultimate aim of incorporating the radiative characteristics of snow into energy balance studies and climate models with complex topography.

# Zusammenfassung

Die an der Erdoberfläche absorbierte Sonnenstrahlung ist der wichtigste Parameter in der Oberflächenenergiebilanz und bestimmt somit Wärme- und Wasseraustauschprozesse. 15% der Erde sind je nach Jahreszeit mit Schnee oder Eis bedeckt. Um eine umfassende Energiebilanz für die Erde zu berechnen, müssen die Strahlungseigenschaften von Schnee bekannt sein. Verglichen mit anderen Erdoberflächen besitzt Schnee sehr hohe Reflektanzwerte, aber auch komplexe Absorptionseigenschaften. Diese Eigenschaften sind zeitlich jedoch nicht konstant. Die anisotropen Reflektanzeigenschaften einer Schneedecke ändern je nach Sonneneinfallswinkel. Die zurzeit verwendeten 'General Circulation Models' verwenden entweder einen fixen Wert für Schneeralbedo oder eine einfache Parameterisation aufgetrennt für den sichtbaren Bereich und den nahinfraroten Bereich der Sonnenstrahlung. In der Fernerkundung wird die Reflektanz von einer beschränkten Anzahl von spektralen Bändern abgeleitet, welche oft nur aus einem bestimmten Winkel zur Oberfläche gemessen werden.

Um diese unbefriedigende Situation zu verbessern und um das Wissen der Strahlungseigenschaften von Schnee zu verbessern, wurden in der Trockenschneezone von Grönland auf dem 'Summit Environmental Observatory' Studien über die Absorptions-, Transmissions- und Reflexionseigenschaften von Schnee durchgeführt. Die Inhalte dieser Arbeit fokussieren einerseits auf die Eindringtiefe von Sonnenstrahlung in die Schneedecke und andererseits auf die directionale Reflektanz. Die speziell dafür entwickelten Instrumente und die damit erhobenen Daten werden vorgestellt.

Im ersten Teil dieser Arbeit werden die klimatischen Bedingungen an der Messstation beschrieben. Im Folgenden ist die Theorie über Strahlungsprozesse im Schnee zusammengefasst. Ein detaillierter Überblick der existierenden Literatur zeigt die Komplexität des Problems und den aktuellen Stand der Forschung. Die Experimente die für diese Studie die Eindringtiefe von Strahlung in den Schnee messen, bestätigen die selektive spektrale Absorption von kurzwelliger Strahlung im Schnee und die exponentielle Abnahme der Strahlung mit der Tiefe. Die Prozesse an der Grenze Schnee-Atmosphäre können jedoch immer noch nicht befriedigend erklärt werden. Ein grosser Teil der absorbierten Sonnenstrahlung dringt nicht in die Schneedecke ein. Es wird vermutet, dass dieser unverzüglich in Form von sensiblem Wärmefluss wegtransportiert wird.

Der zweite Teil dieser Arbeit erklärt den neuen Gonio-Spectrometer, welcher am Institut für Atmosphäre und Klima entwickelt wurde. Der *IACETH* Gonio-Spectrometer misst directionale Reflektanz mit hoher spektraler und räumlicher Auflösung. Das ganze geschieht vollautomatisch, wobei zwei Roboterarme mit Schrittmotoren gesteuert werden. Der Spectrometer misst mit einer 3° Voroptik im Wellenlängenbereich von 350 bis 1050 nm. Die Zeit für einen vollständigen hemisphärischen Messdurchgang (15° Auflösung für Zenit- und Azimutwinkel) beträgt 11 Minuten. Dies entspricht einer Änderung des

Sonnenzenit und -azimutwinkels von weniger als  $4^\circ$ .

Die mit dem *IACETH* Gonio-Spectrometer gemessenen Daten werden im dritten Teil dieser Arbeit vorgestellt. Die Daten werden bezüglich des Hemisphärisch-Direktionalen-Reflektanz-Faktors (HDRF) aufgezeigt. Messungen wurden vorwiegend auf den zwei vorherrschenden Schneeoberflächentypen durchgeführt: einerseits eine feinkörnige Oberfläche mit wind-gebrochenen Schneekristallen und andererseits einer mit grobem Reif bedeckten Schneeoberfläche. Die HDRF Verteilung erwies sich am Mittag als fast isotrop. Sie variierte mit grösser werdendem Sonnenzenitwinkel, was sich in einer starken Vorwärtsstreuung resultierte. Feinkörnige Oberflächen zeigten eine stärkere Vorwärtsstreuung als reifbedeckte Oberflächen. Bei einem Sonnenzenit von  $85^\circ$  wurde, für die Vorwärtsrichtung und die Wellenlänge von  $\lambda = 900$  nm, ein maximaler HDRF von  $\sim 13$  gemessen. Im Folgenden wurden spektrale Albedowerte berechnet, indem die Daten der HDRF Verteilung auf ein  $2^\circ$  Netz interpoliert wurden und dann für jede Wellenlänge integriert. Die spektralen Albedodaten zeigten Abhängigkeiten vom Sonnenstand und von den Schneeoberflächenbeschaffenheiten. Zum Schluss wurden auf Grund der spektralen Daten auch noch Breitbandalbedodaten ermittelt. Die Breitbandalbedo zeigt den Tagesgang, welcher auch mit Pyranometermessungen beobachtet wird.

Im Anhang werden die Resultate von Labormessungen der spektralen Schneeralbedo gezeigt. In Zusammenarbeit mit dem Eidgenössischen Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF wurden die Schneeproben mit Hilfe von tomographischen Methoden analysiert, um Informationen über die kleinskalige Struktur und die spezifische Oberfläche (SSA) zu erhalten. Die SSA korreliert stark mit den gemessenen Reflektanzen. Tiefe Reflektanzwerte im sichtbaren Bereich für gewisse Schneetypen sind wahrscheinlich auf Verunreinigungen im Schnee zurückzuführen. In dieser Studie wurden die Verunreinigungen jedoch nicht gemessen.

Zusammenfassend: Diese Studie zeigt, dass die Strahlungsprozesse im Schnee stark von den klein- aber auch von den mittelskaligen physikalischen Schneeeigenschaften abhängig sind. Weitere Feldstudien sind jedoch nötig, welche die Schneeeigenschaften und die Oberflächen-Unebenheiten gleichzeitig messen. Diese Arbeit stellt eine Basis dar für weitere Studien dieser Art mit dem Endziel die Strahlungseigenschaften von Schnee in Energiebilanzmodelle und komplexe Topographien einfügen zu können.