



Doctoral Thesis

## **Radiative flux divergence in the surface boundary layer A study based on observations at Summit, Greenland**

**Author(s):**

Hoch, Sebastian Wilhelm

**Publication Date:**

2005

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005163546> →

**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. 16194

# **Radiative flux divergence in the surface boundary layer**

**A study based on observations 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

**Sebastian Wilhelm Hoch**

Dipl. Natw. ETH

born 17.11.1973

citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. A. Ohmura, examiner

Dr. P. Calanca, co-examiner

Prof. Dr. M. Kuhn, co-examiner

2005

# Abstract

The stability of the Greenland ice sheet largely depends on the existence of the dry snow zone. In this zone, which covers approximately 40 % of the ice sheet, 57 % of the annual net accumulation takes place. As the Greenland ice sheet incorporates an ice volume equivalent to a potential sea level rise of 6.7 m, detailed knowledge of the energy and mass balance in the dry snow zone is of greatest importance to evaluate the response of the ice sheet to a warming global climate.

The dry snow zone of the Greenland ice sheet is characterized by a homogeneous and smooth surface and has an almost unlimited fetch. With the frequent occurrence of stable conditions, it is an ideal site for studying fundamental processes in the stable atmospheric boundary layer. One of these processes, the divergence of the longwave radiative fluxes, has never been investigated in great detail. Although recognized as an important component of the thermodynamics of the stable atmospheric boundary layer, measurements of longwave radiative flux divergence are rare. Especially the vertical distribution of the induced radiative heating and cooling is largely unknown.

From June 2001 to July 2002, an extensive field campaign was carried out by ETH Zurich at the Greenland Summit Environmental Observatory, which lies in the center of dry snow zone (72°35'N, 38°28'W, 3203 m.a.s.l.). This thesis deals with two of the main objectives of the field program.

The first objective is the evaluation of the components of the surface energy balance over the entire 14-month period, covering all seasons. The main focus lies on the radiative fluxes that were monitored following the high standards set by the Baseline Surface Radiation Network (BSRN). The characteristic features of the radiation regime of the dry snow zone are determined. The annual mean albedo is as high as 0.82, and the annual mean net radiation amounts to  $-7 \text{ Wm}^{-2}$ . Subsurface heat fluxes are inferred from firn temperatures and fluxes of sensible and latent heat are derived from measurements of temperature, humidity and wind speed on eight levels of a 50 m meteorological tower. Positive net radiation during the three summer months leads to a development of a diurnal stability cycle, and sensible heat fluxes are directed upward on up to twelve hours per day.

The second part of this thesis deals with the process of longwave radiative flux divergence, which is derived from longwave fluxes measured at up to six levels within the lowest 50 m of the boundary layer. A careful relative calibration of the pyrgeometers reduces the uncertainty of net longwave flux differences to within  $\pm 0.75 \text{ Wm}^{-2}$ . The influences of the tower structure on the measurements are corrected. The cooling and heating rates that are induced by the divergence of the longwave radiative flux are in the order of the observed temperature change. Longwave radiative flux divergence thus effectively influences the evolution of the temperature profile. Measurements clearly indicate a dominating effect of the divergence of the outgoing flux for most situations. Between 2 m and 50 m, the mean diurnal variation of longwave radiative flux divergence in summer ranges from  $0.14 \text{ Wm}^{-3}$  ( $-13 \text{ Kd}^{-1}$ ) at night to  $-0.05 \text{ Wm}^{-3}$  ( $4.8 \text{ Kd}^{-1}$ ) at noon. During summer nights with fog formation, longwave radiative flux divergence of up to  $0.55 \text{ Wm}^{-3}$  ( $-53 \text{ Kd}^{-1}$ ) are observed. During stable conditions in winter, daily means of longwave radiative flux divergence as

large as  $0.31 \text{ Wm}^{-3}$  ( $-30 \text{ Kd}^{-1}$ ) are recorded. Monthly means of longwave radiative flux divergence vary between  $0.03 \text{ Wm}^{-3}$  ( $-3 \text{ Kd}^{-1}$ ) during summer and  $0.13 \text{ Wm}^{-3}$  ( $-12 \text{ Kd}^{-1}$ ) in fall, winter and early spring.

Longwave radiative flux divergence varies with height. During the summer months, when a diurnal stability cycle develops, observations reveal a characteristic profile of longwave radiative flux divergence related to stratification. When the surface is colder (warmer) than the overlying air, a thin layer (0.5 m-2 m) of heating (cooling) is induced. Above this layer, the sign of the divergence changes, and radiative cooling (heating) results. The sign change of radiative flux divergence within the first meters above the surface can be attributed to a changing relative importance of the divergence of the incoming and outgoing flux components. Model calculations with the radiative transfer model MODTRAN agree well with the observations and reveal the spectral characteristics of the process.

The observed fine structure of the temperature profile exhibits a characteristic pattern. During daytime, an elevated surface inversion is observed within the lowest meter, while nighttime inversions exhibit a layer of reduced stability between 0.3 m and 5 m. The profile of longwave radiative flux divergence is suggested to play a significant role in the formation of these patterns.

# Zusammenfassung

Die Stabilität des grönländischen Eisschildes steht in engem Zusammenhang mit der Existenz der Trockenschneezone. In dieser Zone, die 40% der Fläche Grönlands ausmacht, kommt es zu 57% der Jahresnettoakkumulation. Das Eisvolumen Grönlands entspricht einem theoretischen Meeresspiegelanstieg von 6.7m. Daher ist es sehr wichtig, den genauen Energie- und Massenhaushalt in der Trockenschneezone zu kennen, um eine Reaktion des Eisschildes auf das sich global erwärmende Klima abschätzen zu können.

Die Trockenschneezone Grönlands zeichnet sich durch ihre sehr flache Oberfläche aus. Da zusätzlich sehr häufig stabile Schichtungen auftreten, ist sie der geeignete Ort zur Untersuchung grundlegender Prozesse in der stabilen Grenzschicht. Einer dieser Prozesse, die Strahlungsstromdivergenz, wurde bis anhin noch nie detailliert untersucht. Obwohl die Bedeutung der langwelligen Strahlungsstromdivergenz als wichtige Komponente der Thermodynamik der stabilen Grenzschicht gilt, wurde sie selten gemessen. Insbesondere die Höhenverteilung der induzierten Strahlungserwärmung und -abkühlung ist nur in Ansätzen bekannt.

Von Juni 2001 bis Juli 2002 fand eine umfassende Messkampagne der ETH Zürich am Greenland Summit Environmental Observatory statt, welches sich im Zentrum der Trockenschneezone befindet (7235'N, 3830'W, 3203 m.ü.M.). Die vorliegende Arbeit behandelt zwei der Zielsetzungen des Projektes.

Das erste Ziel dieser Arbeit ist die Bestimmung aller Komponenten der Energiebilanz für die 14-monatige Zeitspanne, welche alle Jahreszeiten einschliesst. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf den Strahlungsflüssen, die den hohen Standards des Baseline Surface Radiation Network (BSRN) entsprechend gemessen wurden. Die Messungen ergeben ein umfassendes Bild des Strahlungsregimes der Trockenschneezone. Die jahresmittlere Albedo beträgt 0.82, die Nettostrahlung  $-7 \text{ Wm}^{-2}$ . Der Bodenwärmestrom wurde aus Firntemperaturen ermittelt und die fühlbaren und latenten Wärmeflüsse wurden anhand von Messungen der Temperatur, der Feuchte und der Windgeschwindigkeit an acht Niveaus eines 50 Meter hohen meteorologischen Mastes hergeleitet. Aufgrund der positiven Nettostrahlung während den drei Sommermonaten entwickelt sich ein Tagesgang des Stabilitätszustandes. An bis zu 12 Stunden ist daher ein nach oben gerichteter fühlbarer Wärmefluss zu beobachten.

Der zweite Teil dieser Arbeit beschäftigt sich mit der langwelligen Strahlungsstromdivergenz. Diese wurde aus Messungen des langwelligen Strahlungsstromes ermittelt, welcher an bis zu sechs Höhen innerhalb der untersten 50 m der planetaren Grenzschicht gemessen wurde. Die Unsicherheit der Messung der Differenzen zweier Nettostrahlungsflüsse konnte durch eine sorgfältige Relativeichung auf  $\pm 0.75 \text{ Wm}^{-2}$  reduziert werden. Der Einfluss des Mastes auf die Messungen wurde berücksichtigt. Die Heiz- und Kühlraten, die aus der Strahlungsstromdivergenz hervorgehen, sind von gleicher Grössenordnung wie die beobachtete Temperaturänderung. Die langwellige Strahlungsstromdivergenz wirkt sich deshalb deutlich auf die zeitliche Veränderung des Temperaturprofils der bodennahen Grenzschicht aus. In den meisten Situationen zeigt sich ein dominierender Effekt der Divergenz des ausgehenden Strahlungsflusses. Zwischen 2m und 50m überhalb der Oberfläche liegen die täglichen Schwankungen der langwelligen Strahlungsstromdivergenz im Sommer im

Mittel zwischen  $0.14 \text{ Wm}^{-3}$  ( $-13 \text{ Kd}^{-1}$ ) in der Nacht und  $-0.05 \text{ Wm}^{-3}$  ( $4.8 \text{ Kd}^{-1}$ ) am Mittag. In Sommernächten mit Nebelbildung werden langwellige Strahlungsstromdivergenzen von bis zu  $0.55 \text{ Wm}^{-3}$  ( $-53 \text{ Kd}^{-1}$ ) beobachtet. Im Winter können bei stabilen Bedingungen tagesmittlere Werte von bis zu  $0.31 \text{ Wm}^{-3}$  ( $-30 \text{ Kd}^{-1}$ ) erreicht werden. Im Monatsmittel schwankt die Strahlungsstromdivergenz zwischen  $0.03 \text{ Wm}^{-3}$  ( $-3 \text{ Kd}^{-1}$ ) im Sommer und  $0.13 \text{ Wm}^{-3}$  ( $-12 \text{ Kd}^{-1}$ ) im Herbst, Winter und Frühling.

Die langwellige Strahlungsstromdivergenz variiert mit der Höhe. Wenn sich während den Sommermonaten ein Tagesgang des Stabilitätszustandes ausbildet, ergibt sich ein charakteristisches Bild des Profils der Strahlungsstromdivergenz. Dieses steht im Zusammenhang mit der Stabilität. Ist die Oberfläche wärmer (kälter) als die darüberliegende Luft, so ist in einer dünnen Luftschicht (0.5-2 m) Strahlungserwärmung (-abkühlung) zu beobachten. Darüber ändert das Vorzeichen der Strahlungsstromdivergenz und bewirkt Strahlungsabkühlung (-erwärmung). Der beobachtete Vorzeichenwechsel innerhalb der ersten Meter überhalb der Oberfläche beruht auf einem Wechsel des Einflusses der Divergenz des einfallenden bzw. ausgehenden langwelligen Strahlungsstromes. Berechnungen mit dem Strahlungstransfermodell MODTRAN stimmen gut mit den Beobachtungen überein und zeigen die spektralen Charakteristiken des Prozesses auf.

Die beobachtete Feinstruktur des Temperaturprofils zeigt charakteristische Muster. Tagsüber kann eine abgehobene Bodeninversion innerhalb des untersten Meters beobachtet werden, während die nächtliche Inversion eine Schicht mit reduzierter Stabilität zwischen 0.3 m und 5 m aufzeigt. Das Profil der langwelligen Strahlungsstromdivergenz deutet auf seine wichtige Rolle bei der Ausbildung dieser Muster hin.