

Tomography-based observation of heat and mass transfer in snow under advective conditions

Doctoral Thesis**Author(s):**

Ebner, Pirmin P.

Publication date:

2015

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010558691>

Rights / license:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#)

DISS. ETH NO. 22958

TOMOGRAPHY-BASED OBSERVATION OF
HEAT AND MASS TRANSFER IN SNOW
UNDER ADVECTIVE CONDITIONS

A thesis submitted to attain the degree of

DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

PIRMIN PHILIPP EBNER

MSc ETH ME

born June 22, 1985

citizen of Germany

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Aldo Steinfeld, examiner
Prof. Dr. Markus Ammann, co-examiner
Dr. Martin Schneebeli, co-examiner

2015

Abstract

Transport phenomena in porous media are of interest in a wide range of areas in both science and industry. For example, to study the microstructure of snow is essential for the comprehension of natural phenomena. In nature, snow serves as an insulator, trace gas absorber, reactant, radiation shield, and important water resource. The analysis of the complex interactions between heat transfer, multiphase flow, and mass exchange is fundamental to understand the snow structure observed in polar and alpine regions which has a significant impact on climate and ecosystems. For this purpose, the observation of the structural change of snow and the determination of the effective transport properties used in volume averaging models are of crucial significance to a wide range of environmental processes. Therefore, this thesis analyzed the ongoing processes in snow through controlled laboratory experiments and simulations.

The quantification of heat and mass transport of snow metamorphism under advective conditions were experimentally determined by the exact 3D geometry of the complex snow structure. In-situ time-lapse experiments in a micro computer tomograph (micro-CT) were used to get the 3D geometrical representations of the snow samples. Direct discrete-scale simulations were used for morphological characterization and determination of the effective heat and mass transport properties. Morphological characteristics were obtained by morphology operations. Finite volume techniques were used to numerically solve the mass and momentum conservation equation to determine mass transport properties. The effect of advective and diffusive heat and mass transport were analyzed under quasi-isothermal and temperature gradient conditions.

An instrumented sample holder was developed for time-lapse microtomography of snow samples to enable in-situ nondestructive spatial and temporal measurements under controlled advective airflows, temperature gradients, and air humidities. Computational fluid dynamics simulations were used to improve the design

and to evaluate the airflow uniformity in the snow sample. Signal transition, morphological and mass transport properties were evaluated during a 4-day test run.

The effect of diffusion and advection across the snow pores on the snow microstructure were analyzed for isothermal snow metamorphism exposed to an advective airflow. Morphological parameters and solving of the second order extension of Darcy's law to determine the permeability were calculated to discuss the possible effects of isothermal advective flow on natural snowpacks. The results showed that isothermal advection with saturated air has no influence on the coarsening rate that is typical for isothermal snow metamorphism. Isothermal snow metamorphism is driven by sublimation deposition caused by the Kelvin effect and is the limiting factor independently of the transport regime in the pores. Peclet number, defined to be the ratio of advective and diffusive transport rates inside the pore space, higher than one are not realistic in surface snow due to the destruction of the snow structure and the rapid decrease of the air velocity in the first centimeters.

Inducing a temperature gradient along to the advective flow, the effect of sublimation and deposition of water vapor on the ice structure were experimentally analyzed. In addition, an analysis of the ice-air interface dynamics was carried out using a macroscopic equivalent model of heat and water vapor transport through a snowpack. The results indicated that sublimation of the ice matrix dominates for flow rates $< 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ while during increased mass flow rates the water vapor deposition supplied by the advective flow counteracted sublimation. A flow rate dependence of water vapor deposition at the ice interface was observed, asymptotically approaching a maximum deposition rate of $1.05 \cdot 10^{-4} \text{ kg m}^{-3} \text{ s}^{-1}$. Growth of micro-sized whisker-like crystals on larger ice crystals were detected on microscope photographs. An increase of the specific surface area occurred and, thus, a change of the physical and optical properties of the snow. The estimated values of the curvature effect of the ice crystals and the interface kinetic coefficient were in good agreement with previously published values.

Reversing the temperature gradient, so it is opposed to the advective flow, sublimation of ice structures were analyzed for various air velocities. The results showed that the kinetic phase-change from gas to solid is preferable as energy is released compared to solid to gas where energy is required, thus leading to

more water molecule deposition than water molecule sublimation. Sublimation has a marked effect on the structural change of the ice matrix but diffusion of water vapor in the direction of the temperature gradient counteracted the mass transport of advection. Therefore, the total net ice change was negligible leading to a constant porosity profile. However, the strong reposition process of water molecules on the ice grains may have a significant impact on chemical processes, relevant for atmospheric chemistry.

A numerical model was set up to simulate the effect of deposition and sublimation of a saturated airflow and an induced temperature gradient on a large scale packed bed of snow obtained by micro-CT scan. The heat and mass transfer with phase change in the complex geometry of snow pack was simulated directly with adequate precision by adding a source function representing the heat and mass flux caused by deposition or sublimation. The simulation results showed the impact of release and absorption of latent heat due to deposition and sublimation on the temperature, mass, and velocity distribution of the flow field. The model is not restricted to porous snow simulations, but can also be used for other heat and mass transfer cases with phase change in complex porous structures.

Finally, the influence on the isotopic composition of airflow through a snow pack was analyzed. In paleo-research, stable water isotopes ($\delta^{18}\text{O}$) from snow and ice in Polar Regions are used to reconstruct and derive past variability in local air temperatures. However, several processes influencing the isotopic composition of the snow also after deposition exists. Mechanisms like curvature effects (Kelvin-effect), sublimation and deposition on the $\delta^{18}\text{O}$ interaction in snow and air were analyzed and the corresponding overall mass transfer coefficients were extracted. The results showed a significant influence of airflow on the $\delta^{18}\text{O}$ signal stored in snow. Disequilibrium between snow and air results in a high exchange rate of isotopes between snow and air. The flow was found to change the isotopic composition ($\delta^{18}\text{O}$) of the snowpack by up to 7.64 ‰ (64.2 %) and 15.06 ‰ (144.5 %) after 24 h and 84 h. Our results were not consistent with the normal assumption that sublimation occur without changing the isotopic composition of the snow. Our observations are expected to influence the climatic interpretation of ice core stable water isotope records.

Concluding, micro-CT is a promising concept to directly observe the process of deposition and sublimation of ice and allows to calculate the mass flux, re-

crystallization rate, and residence time of ice voxels. The obtained results of our experiments and simulations can be used to improve models of firn compaction and evolution, for understanding evolution of the snowpack in arctic regions. It helps to elucidate the flux mechanism of trace gases and stable water isotopes exchanged between the ground and atmospheric air. Finally, it helps to provide more accurate effective transport properties to forecasting models of late-stage alpine snowpack responsible for large scale avalanches.

Zusammenfassung

Transportphänomene in porösen Materialien sind sowohl in der Wissenschaft als auch in der Industrie von großer Bedeutung. Zum Beispiel spielt die Mikrostruktur des Schnees eine entscheidende Rolle für das Verständnis von Naturphänomenen. Schnee dient in der Natur als Isolator, Spurengasabsorber, Reaktionspartner, Schutz vor Sonnenstrahlung und ist ein wichtiges Wasservorkommen. Das Verständnis der komplexen Interaktionen zwischen dem Wärmetransport, mehrphasige Strömungen und Stoffaustausch sind grundlegend um die Schneestruktur in polaren und alpinen Regionen zu verstehen. Sie haben einen erheblichen Einfluss auf Klima- und Ökosysteme. Deshalb spielt die Strukturveränderung des Schnees und die Bestimmung der effektiven Transporteigenschaften, in volumengemittelten Modellen, eine entscheidende Rolle bei Umweltprozessen. Die vorliegende Arbeit untersucht die spezifischen Prozesse im Schnee durch kontrollierte Laborexperimente und Simulationen.

Die Bestimmung der Wärme- und Stofftransportmenge in der Schneemetamorphose unter advektive Bedingungen wurde durch die exakte 3D Geometrie der komplexen Schneestruktur experimentell bestimmt. In-situ Zeitraffer-Experimente in einem mikro-Computertomograph (mikro-CT) wurden angewendet um die genaue 3D Darstellung des Schnees zu erhalten. Simulationen, auf Größenskalen der Poren, wurden für die morphologische Charakterisierung und Bestimmung der effektiven Wärme- und Stofftransporteigenschaften angewendet. Morphologische Operationen wurden benützt um die Morphologie des Schnees zu bestimmen. Basierend auf das finite-volumen-Verfahren, wurden die Stofftransporteigenschaften berechnet. Dabei wurden numerisch die Massen- und Impulserhaltungsgleichungen gelöst. Der Einfluss von advektive und diffusive Wärme- und Stofftransporte wurde dann unter quasi-isothermische und Temperaturgradient-Bedingungen beobachtet.

Ein Probeträger für Zeitraffer-Computertomographie wurde entwickelt. Dieser

ermöglicht in-situ, zerstörungsfreie räumliche und zeitliche Änderungen der Eiskristalle unter kontrollierten advektiven Strömungen, Temperaturgradienten und Luftfeuchtigkeit zu untersuchen. Strömungssimulationen wurden durchgeführt um das Design zu verbessern und um die Gleichförmigkeit der Luftströmung in der Schneeprobe zu visualisieren. In einer viertägigen Testphase wurden die Signalübertragung der Sensoren getestet und die morphologischen- und Stofftransporteigenschaften einer Schneeprobe ermittelt.

Der Einfluss von Diffusion und Advektion auf die Mikrostruktur des Schnees bei einer isothermen Schneemetamorphose wurde analysiert. Berechnungen der morphologischen Eigenschaften und der Permeabilität, durch das Lösen der Darcy-Gleichung zweiter Ordnung, wurden benutzt um möglichen Auswirkungen einer isothermen Strömung auf natürlichen Schneedecken zu eruieren. Isotherme Schneemetamorphose ist angetrieben durch Sublimation und Ablagerung von Wassermolekülen. Dies wird verursacht durch den Kelvin-Effekt und ist dabei die limitierende Größe, unabhängig vom Transportregime, in den Poren. Die Peclet-Zahl definiert das Verhältnis von advektiven und diffusiven Transportraten im Porenraum. Peclet Zahl höher als eins ist in Oberflächenschnee nicht möglich, da entweder die Schneestruktur zerstört wird oder die Geschwindigkeit der Luft in den ersten Zentimeter rapide abnimmt.

Der Einfluss von Sublimation und Ablagerung von Wasserdampf auf die Eisstruktur wurde experimentell untersucht, indem ein Temperaturgradient entlang der advektiven Strömung hervorgerufen wurde. Zusätzlich wurde die Eis-Luft Grenzfläche durch ein makroskopisch äquivalentes Modell für Wärme- und Wasserdampftransport in der Schneesicht analysiert. Die Resultate zeigen, dass Sublimation in der Eismatrix für Volumenströmungen unter $10^{-6} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ dominant ist. Für größere Volumenströme wirkt die Ablagerung von Wasserdampf der Sublimation entgegen. Eine Strömungsabhängigkeit der Wasserdampfablagerung auf der Eisoberfläche wurde beobachtet. Asymptotisch wird eine maximale Ablagerungsrate von $1.05 \cdot 10^{-4} \text{ kg m}^{-3} \text{ s}^{-1}$ für hohe Volumenströme erreicht. Das Wachstum von nadel-ähnlichen Mikrokristallen auf großen Eiskristallen wurde auf Mikroskop-Bilder entdeckt. Die innere Oberfläche vergrößerte sich dadurch und veränderte die physikalischen und optischen Eigenschaften des Schnees. Die ermittelten Werte für Krümmungseffekte und des kinetischen Grenzfläche-Koeffizient stimmten gut mit publizierten Werte überein.

Sublimation von Eisstrukturen wurde für verschiedene Strömungsgeschwindigkeiten, durch ein Temperaturgradient entgegengesetzt zur Strömungsrichtung, untersucht. Die Resultate zeigen, dass der kinetische Phasenübergang von gas- zu festförmig bevorzugt wird. Es wird Energie freigesetzt wohingegen ein Übergang von fest- zu gasförmig Energie benötigt würde. Deshalb lagerten sich mehr Wassermoleküle ab als die Wassermoleküle sublimierten. Sublimation hat einen deutlichen Einfluss auf die strukturelle Veränderung der Eismatrix. Dennoch wirkt Diffusion von Wasserdampf entlang des Temperaturgradienten dem advektiven Stofftransport entgegen. Dies führt zu einer konstanten Porosität des Schnees und der totale Wasserdampfaustausch ist vernachlässigbar. Jedoch können die starken Umlagerungen von Wassermolekülen auf den Eiskristallen einen wesentlichen Einfluss auf chemische Prozesse, die relevant in der Atmosphärenchemie sind, haben.

Die Auswirkung von Ablagerung und Sublimation von Wassermolekülen wurde in einem numerischen Modell untersucht. Dabei wurde die Interaktion einer gesättigten Strömung unter einem Temperaturgradient mit der exakten 3D Geometrie des Schnees simuliert. Wärme- und Stofftransport mit Phasenübergang in der komplexen Schneegeometrie wurde analysiert. Dabei wurde die Wärme- und Stoffstromdichte, verursacht durch Ablagerung oder Sublimation, durch ein Quellterm beschrieben. Die Simulationen zeigen einen Einfluss der freiwerdenden oder benötigten latenten Wärme, erzeugt durch Ablagerung oder Sublimation, auf die Temperatur-, Massen- und Geschwindigkeitsverteilung im Strömungsfeld. Das Modell ist nicht nur auf Schnee beschränkt, sondern kann auch für andere Wärme- und Stofftransportfälle mit Phasenübergang in komplexen porösen Strukturen verwendet werden.

Abschliessend wurde der Einfluss von Luftströmung auf die isotopische Zusammensetzung einer Schneedecke untersucht. In der Paläoforschung werden stabile Wasserisotopen ($\delta^{18}\text{O}$) in Schnee und Eis dazu benutzt, um lokale Lufttemperaturen zu rekonstruieren und herzuleiten. Jedoch wird die isotopische Zusammensetzung des Schnees nach der Ablagerung durch mehrere Prozesse beeinflusst. Vorgänge wie Kelvin-Effekt, Sublimation und Ablagerung wurden auf den $\delta^{18}\text{O}$ Wert im Schnee und in der Luft untersucht und die Stoffübergangskoeffizienten wurden dabei bestimmt. Die Resultate zeigen einen erheblichen Einfluss einer Strömung auf das $\delta^{18}\text{O}$ Signal im Schnee. Das Ungleichgewicht zwischen Schnee und

Luft führt zu einem starken Austausch der Isotopen. Die Luft verändert den Isotopengehalt ($\delta^{18}\text{O}$) in der Schneeschicht um bis zu 7.64 ‰ (64.2 %) und 15.06 ‰ (144.5 %) nach 24 h und 84 h. Des Weiteren stimmen unsere Resultate nicht mit den gängigen Annahmen überein, dass Sublimation kein Einfluss auf die isotopische Zusammensetzung des Schnees hat. Voraussichtlich werden unsere Beobachtungen die klimatische Interpretation der stabilen Wasserisotope aus Eisbohrkernen beeinflussen.

Mikro-CT ist ein vielversprechendes Konzept um direkt die Ablagerungs- und Sublimationsprozesse im Eis zu beobachten. Es ermöglicht die Berechnung von Stoffstromdichte, Rekristallisationsrate und Verweilzeiten von Eiskristallen. Die erhaltenen Resultate aus den Experimenten und Simulationen können dafür benutzt werden, um Modelle für Firnverdichtung und Entwicklung zu verbessern, und um die Entwicklung von Schneedecken in arktischen Regionen zu verstehen. Des Weiteren hilft es die Durchflussmenge von Spurengasen und den Austausch von stabilen Wasserisotopen zwischen dem Grund und der atmosphärischer Luft zu erklären. Letztendlich können Vorhersagemodelle für spätalpine Schneedecken sowie grossflächiger Lawinen verbessert werden, da genauere und effektivere Transporteigenschaften des Schnees bestimmt werden können.