

Diss. ETH No. 13053

**Blowing and Drifting Snow in Alpine Terrain:  
A Physically-Based Numerical Model  
and Related Field Measurements**

A dissertation submitted to the  
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH

for the degree of  
Doctor of Technical Sciences

presented by

**Peter Gauer**

Dipl. Ing. TH-Darmstadt  
born August 19th, 1963  
citizen of Germany

accepted on the recommendation of  
Prof. L. Kleiser, examiner  
Dr. D. Issler, co-examiner

1999

## Abstract

Blowing and drifting snow influences human activities in various ways. For example, in mountainous regions, snow drift is a key factor in the formation of slab avalanches; the quality of avalanche danger mapping and land-use planning depends significantly on the correct assessment of snow redistribution by drift in the avalanche release zones.

Conceptually, drifting snow is a turbulent multi-phase flow which consists of a continuous and a dispersed phase. For each phase—air as the continuous phase and the snow particles as the dispersed phase—the principles of mass and linear momentum balance ought to be formulated and to be solved numerically; however, for simulations of extended areas with complex topography which have to be considered in practical applications, the computational effort becomes too large. Essentially, two transport modes contribute to snow drift: saltation and suspension. Whereas in the suspension mode the particle concentration is small and a simple mixture theory is applicable, the concentration within the so-called saltation layer is much higher and the particle–air flow interaction needs to be considered. This interaction is of importance as it leads to a self-regulation of the mass flux. For steady-state conditions, a saturated transport is established.

A physically-based numerical model of snow drift has been developed, where the involved processes are separated into two layers. One describes the transport in suspension and the wind field. The wind field is modeled by the Reynolds averaged Navier-Stokes equations, using  $e-\epsilon$  ( $k-\epsilon$ ) model for the turbulent closure. Suspended snow is modeled by an additional scalar equation. The second layer describes the transport due to saltation, including erosion and deposition of snow. Here, the conservation of mass and momentum is formulated for the mixture of snow and air. Parameterizing of quantities defining the saltation layer is founded on particle trajectory calculations. Both layers are mutually coupled by boundary conditions. A two-way coupling between particles and air flow is taken into account.

To validate the model, simulations were compared with wind tunnel experiments and real snow-drift events. For this purpose, the wind field and the redistribution features of the snowpack in a complex Alpine terrain have been investigated. To this end, an experimental site 2 km north from the SFISAR Institute building at Weissfluhjoch, Gaudergrat ridge (2300 m a.s.l.), was equipped with instruments to measure meteorological and snow parameters. Wind profile measurements were carried out at five points in the surrounding of the ridge with a high time resolution to determine the wind field during snow drift episodes. The areal snow redistribution was determined by taking soundings before and after drift episodes.

A comparison between simulations and wind tunnel experiments gives good agreement. The comparison with the field measurements at Gaudergrat shows that the model is suitable to predict the new-snow distribution in extended alpine areas ( $\approx 6 \cdot 10^5 \text{ m}^2$ ).

## Kurzfassung

Schneeverfrachtung beeinflusst die Lebensbedingungen im Gebirgsraum auf verschiedenste Weise. So ist zum Beispiel Schneeverfrachtung ein Faktor für die Entstehung von Schneebrettlawinen; die Qualität von Lawinengefahrenkarten und Raumnutzungsplänen hängt entscheidend von der korrekten Abschätzung der durch den Wind beeinflussten Schneeverteilung in der Lawinenanrisszone ab.

Physikalisch gesehen handelt es sich beim Schneefegen und -treiben um eine Mehrphasenströmung, bestehend aus einer kontinuierlichen und einer dispergierten Phase. Für jede der beiden Phasen – Luft als kontinuierliche und Schneepartikel als dispergierte – sind die Prinzipien der Massen- und Impulsbilanz zu formulieren und numerisch zu lösen. Dies führt aber bei der Simulation von ausgedehnten Gebieten in einer komplexen Topographie, wie sie für praktische Anwendungen zu beurteilen sind, zu einem zu großen Rechenaufwand. Im wesentlichen tragen zwei Transportmechanismen zur Schneeverfrachtung bei: die Suspension und die Saltation. Im Gegensatz zur Suspension, in der die Partikelkonzentration so gering ist, daß eine einfache Mischungstheoretische Beschreibung anwendbar ist, ist die Konzentration in der sogenannten Saltationsschicht wesentlich größer und die Wechselwirkung zwischen Partikel und Luft muß berücksichtigt werden. Diese Wechselwirkung ist verantwortlich für eine Selbstregulierung des Massenflusses. Im Fall einer stationären Strömung stellt sich eine Sättigung des Massentransportes ein.

Es wurde ein physikalisch basiertes Zweischichtenmodell entwickelt. Eine Schicht beschreibt den Transport in Suspension und das Windfeld. Die Beschreibung des Windfeldes basiert auf den Reynolds-gemittelten Navier-Stokes Gleichungen, wobei zur „Schließung“ das  $e-\epsilon$  ( $k-\epsilon$ ) Modell verwendet wird. Der suspendierte Schnee wird durch eine zusätzliche skalare Gleichung beschrieben. Die zweite Schicht beschreibt den Transport in der Saltation sowie die Erosion und Deposition von Schnee. Dazu wird die Massen- und Impulsbilanz für die Mischung von Schnee und Luft formuliert. Eine Parameterisierung der die Saltationsschicht bestimmenden Größen beruht auf der Berechnung von Partikeltrajektorien. Beide Schichten sind wechselseitig über Randbedingungen gekoppelt. Eine Zweiwegekopplung zwischen Partikel und Luft wird berücksichtigt.

Um das Modell zu validieren, wurden Simulationen mit Windkanalexperimenten und mit natürlichen Schneeverfrachtungsereignissen verglichen. Zu diesem Zweck wurden das Windfeld und die Schneeverteilung in einem alpinen Gebiet untersucht. Dazu wurde ein Testgebiet 2 km nördlich des SLF-Institutsgebäude Weissfluhjoch (Gaudergrat 2300 m N.N.) instrumentiert. Zur Bestimmung des Windfeldes während Verfrachtungsepisoden wurden an fünf Punkten in der Umgebung des Grates Windprofilmessungen durchgeführt. Die räumliche Schnee(um)verteilung wurde durch Abstiche vor und nach Verfrachtungsperioden bestimmt.

Ein Vergleich zwischen numerischen Simulationen und Windkanalexperimenten zeigt gute Übereinstimmung. Der Vergleich mit den Feldmessungen am Gaudergrat zeigt, daß das Modell geeignet ist die Neuschneeverteilung in ausgedehnten alpinen Gelände ( $\approx 6 \cdot 10^5 \text{ m}^2$ ) zuberechnen.