

Diss. ETH No. 20662

# Formation of wet-snow avalanches

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

for the degree of

Doctor of Sciences

presented by

**Christoph Mitterer**

Mag. rer. nat., Universität Innsbruck

born 13 August 1981

citizen of Germany

Accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Dani Or (ETH Zurich)

Dr. Jürg Schweizer (SLF Davos)

Dr. Manfred Stähli (WSL Birmensdorf)

2012

# Summary

Wet-snow avalanches are a natural hazard affecting infrastructure and communication lines in seasonally snow-covered mountainous regions. As the entire snowpack may fail, their volume is often large and they can be very destructive. Presently, the formation of wet-snow avalanches is poorly understood and consequently predicting periods with wet-snow avalanche activity remains difficult.

The objective of this PhD thesis was to improve our understanding of wet-snow avalanche formation. Since water is a prerequisite and strongly affects snow stratigraphy and stability, we focused on (a) modelling water production and (b) infiltration, and (c) monitoring water movement with upward-looking ground-penetrating radar (upGPR). In addition, we performed concurrent observations of snow stratigraphy and wet-snow avalanche activity.

The energy balance at the snow surface was analyzed to establish which terms contribute most to the production of water shortly before and during periods of wet-snow avalanche activity. The largest term contributing to the energy input was generally the net shortwave radiation, although on some days the sensible heat flux dominated. Latent heat and net longwave radiation were always energy sinks. For wet-snow avalanches, low negative longwave radiation values are essential as these will not counterbalance the energy input due to solar radiation and sensible heat flux. In a next step we compared the predictive power of wet-snow avalanche forecasting models based on the energy balance to models based on commonly measured meteorological parameters. Univariate and multivariate statistics were used to build the prediction models. Predictive skills for both types of models were comparable - probably since the models using meteorological parameters mainly included terms closely related to the radiation balance. Best prediction results were obtained, if information on the energy input (i.e. net shortwave radiation, air temperature) was combined with the internal state of energy (i.e. snow temperatures). The combination indicates whether the energy input is still used for warming the snowpack or already for melting snow.

The analysis of the energy balance revealed that as soon as the snow cover was isothermal and with the first presence of water wet-snow avalanche probability will increase. Hence, small variations in water content may already cause instability. Due to this fact, it is important to know how water moves through the snow. Consequently we

compared modelled snow stratigraphy and water flow using two different water transport codes implemented in the 1–D snow cover model SNOWPACK to observed values. Results showed that snow stratigraphy in combination with the advance of the wetting front have to be considered in order to obtain good forecasting results. Since water movement, especially on slopes is a very complex phenomenon, the water transport codes that are presently implemented within SNOWPACK cannot depict the full complexity of flowing water within the snowpack which is responsible for wet-snow avalanche formation. Both approaches have benefits, but compared to observations substantial deviations were found. In addition, a simple hydro-mechanical model was developed which linked water flow to wet-snow stability. Results suggest that if the snowpack is in a sub-critical state prior to wetting, i.e. a weak layer is present, a small increase in liquid water content may cause instability. Ponding of water due to hydraulic or capillary barriers is also of critical importance since the increased liquid water content will locally decrease the strength of snow. Since the snow-soil interface is a prominent barrier and carries the largest load, this transition often represents a prominent weakness. This is in line with the observations made in the course of this thesis that most wet-snow avalanches released on the ground.

Model results suggest that in order to correctly forecast periods of wet-snow avalanche activity, it is important to precisely know the water content and its evolution over time. Exact measurements of water in snow are difficult since most methods are destructive. To avoid these limitations, we utilized an upward-looking ground-penetrating radar which recorded the evolution of the snowpack over the entire season. The radar allowed tracking changes in snow stratigraphy due to infiltrating water. We successfully monitored the advance of a uniform wetting front. With a second measurement for snow height, it was also possible to determine the amount of water within the snowpack. Radar technology provides a non-destructive method for measuring changes within the snowpack and has great potential for future analysis.

Though we have shed light on many aspects of wet-snow instability, we have not tackled the problem of how wet snow fails. Combining our findings with controlled laboratory experiments as well as field measurements (e.g. upGPR) may help to further improve our understanding of wet-snow mechanics and thus stability. Exploiting energy balance modelling has great potential for improving wet-snow avalanche forecasting.

# Zusammenfassung

Nassschneelawinen sind Naturgefahren, die in schneebedeckten Gebirgsregionen Infrastruktur und Verkehrsverbindungen gefährden können. Da bei Nassschneelawinen meist die komplette Schneedecke an der Grenzschicht zum Boden versagt, können diese sehr gross und zerstörerisch werden. Gegenwärtig sind die Entstehungsprozesse von Nassschneelawinen weitgehend unbekannt. Folglich ist die Vorhersage von Perioden mit hoher Nassschneelawinenaktivität schwierig.

Die vorliegende Doktorarbeit soll dazu beitragen, die Entstehungsprozesse von Nassschneelawinen genauer zu verstehen. Flüssiges Wasser, das in die Schneedecke eindringt, verändert die Stratigraphie und dadurch Stabilität der Schneedecke. Deshalb modellierten wir die Prozesse, die für die Wasserproduktion verantwortlich sind. Der Wasserfluss in der Schneedecke wurde ebenfalls simuliert und mit einem aufwärtsschauendem Bodenradar (upGPR) gemessen. Zusätzlich wurde die Schneedecke mit traditionellen Schneeprofilaufnahmen charakterisiert und die Nassschneelawinenaktivität in der Umgebung verfolgt.

Um herauszufinden, welche Teile der Energiebilanz am meisten für die Wasserproduktion verantwortlich sind, analysierten wir für Tage vor erhöhter Nassschneelawinenaktivität die Energiebilanz an der Schneeoberfläche. Der höchste Anteil des Energieeintrages in die Schneedecke geht auf die Netto kurzwellige Einstrahlung zurück. An einigen Tagen wird diese aber durch den sensiblen Wärmestrom übertroffen. Latente Wärme und Netto langwellige Strahlung stellen immer Energieverluste dar. Allerdings scheint es wichtig zu sein, wie gross diese Senke ist. Geringe Energieverluste bilden nur einen kleinen Gegenpol zum Energieeintrag und führen somit zu einer erhöhten Wahrscheinlichkeit von Nassschneelawinen. Darauf aufbauenden wollten wir wissen, ob Vorhersagemodelle, die mit Energiebilanzwerten erstellt wurden, für eine bessere Vorhersagequalität sorgen konnten, als Modelle, die gewöhnliche meteorologische Messgrössen zur Verfügung hatten. Univariate und multivariate statistische Methoden wurden benutzt um die Modelle zu trainieren. Die Vorhersagequalität für beide Arten von Modellen war ähnlich, da das Modell, welches meteorologische Daten benutzen durfte, meist auf Terme der Strahlungsbilanz zurückgriff. Die beste Vorhersage wurden gemacht, wenn Informationen über den Energieeintrag (d.h. Netto kurzwellige Strahlung, Lufttemperatur) und Informationen über den Wärmehaushalt der Schneedecke (d.h. Schneetemperaturen) kom-

biniert wurden. Dadurch konnte man feststellen, ob der überschüssige Energieeintrag noch zum Wärmen der Schneedecke verbraucht wurde, oder ob schon Wasser produziert werden konnte.

Die Ergebnisse aus der Analyse der Energiebilanz zeigten, dass mit dem ersten grösseren Wassereintrag die Wahrscheinlichkeit für Nassschneelawinenabgänge steigt. Nur kleine Veränderungen im Wassergehalt der Schneedecke scheinen eine grosse Auswirkung auf die Stabilität der Schneedecke zu haben. Es ist deshalb wichtig zu wissen, wie das Wasser durch die Schneedecke fliesst. Wir nutzen zwei verschiedene Wassertransportmodelle, die im 1-D Schneedeckenmodell SNOWPACK implementiert sind, um diese mit gemessenen Werten zu vergleichen. Ergebnisse zeigen klar, dass eine gute Abbildung der Schneestratigraphie und des Voranschreitens der Nässe in der Schneedecke wichtig sind, um gute Vorhersagewerte zu bekommen. Wassertransport - vor allem am Hang - ist sehr komplex. Dies erschwert es, die natürlichen Prozesse des Wassertransports in der Schneedecke mit dem Model genau nachzubilden. Beide Wassertransportcodes haben Vor- und Nachteile, aber zeigen doch grössere Abweichungen, wenn man sie mit Feldmessungen vergleicht. Zusätzlich konnten wir ein einfaches hydro-mechanischen Modell erstellen, das den Wasserfluss (1-D) mit nasser Schneedeckenstabilität verband. Simulationsergebnisse zeigen, dass wenn die Schneedecke schon in einem vorkritischen Stadium ist, d.h. eine trockene Schwachschicht ist vorhanden, schon geringe Mengen an zusätzlichem Wasser genügen, um die komplette Schneedecke zu destabilisieren. Stauhorizonte auf sog. kapillaren Barrieren, oder weniger durchlässigen Schichten konzentrieren den Wassergehalt und schwächen dort den Schnee. Der Boden stellt dabei oft die prominentest Stauschicht dar. Da an diesem Punkt die grösste Überlast herrscht, ist dies die offensichtlichste Schwachstelle. Beobachtungen von Lawinenabgängen bestätigen diese Annahme.

Obwohl wir einige Fragen zur Entstehung von Nassschneelawinen klären konnten, verstehen wir die genauen Versagensprozesse noch nicht richtig. Auf unseren Ergebnissen aufbauend, können kontrollierte Labor- und Feldversuche helfen, dieses Problem anzugehen, und somit unser Wissen über Nassschneelawinen zu vergrössern. Die Ergebnisse aus der Energiebilanzmodellierung haben grosses Potenzial für praktische Umsetzungen und können dadurch die Vorhersage von Nassschneelawinen verbessern.