



Doctoral Thesis

Relating Spatial Patterns of Snow Instability to Meteorological Drivers

Author(s):

Reuter, Benjamin

Publication Date:

2015

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010585592> →

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. 23030

**RELATING SPATIAL PATTERNS OF
SNOW INSTABILITY TO
METEOROLOGICAL DRIVERS**

A thesis submitted to attain the degree of

DOCTOR OF SCIENCES OF ETH ZURICH

(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

BENJAMIN REUTER

Mag. rer. nat., University of Innsbruck

born on 18 March 1984

citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Konrad Steffen

ETH Zurich

Dr. Jürg Schweizer

WSL Institute for Snow and Avalanche Research SLF, Davos

Dr. Samuel Morin

Centre d'Etudes de la Neige, Météo France, Grenoble

2015

Abstract

In mountainous regions avalanche hazard threatens people and critical lifelines. In order to mitigate consequences, the avalanche release probability is forecasted for regions of 100 to several 1000 km². Currently, avalanche forecasting is limited to the regional scale and predicting for smaller areas is hampered by our limited understanding of the variable nature of the mountain snow cover and its ties with weather and terrain characteristics.

To relate spatial patterns of snow instability to meteorological drivers, field measurements at the basin scale were conducted providing quantitative measures and revealing spatial patterns of snow instability. Eventually, the meteorological drivers responsible for the patterns were identified for a specific avalanche situation. As a prerequisite for this approach, however, a quantitative measure to estimate snow instability based on snow mechanical properties had to be established.

As obvious signs of instability are often absent and stability testing is laborious, a promising option to acquire the snow mechanical properties related to instability is the snow micro-penetrometer (SMP). The quality of the SMP-derived snow properties was assessed in comparisons with two other common measurement techniques, modeling of micro-computed tomography derived snow structure and particle tracking of propagation saw tests. Results showed that all snow properties required to model failure initiation and crack propagation are obtained from one SMP signal, but especially with respect to the elastic properties future work is needed.

As a definition of snow instability along the lines of the current understanding of avalanche release processes is lacking, we developed two snow instability criteria for application with snow micro-penetrometer signals. For the first time we developed quantitative measures for failure initiation and crack propagation, the two relevant processes controlling point snow instability. The measures were validated with independent snow instability observations providing confidence in the mechanical approach based on micro-mechanical measurements. Moreover, our results highlight the dependence of snow instability on both, failure initiation and crack propagation.

Based on field data acquired in a basin above tree line (≤ 0.3 km²) Davos, Eastern Swiss Alps, during five sampling days we investigated the link between each

of the SMP-derived snow instability measures and simple drivers, such as terrain parameters and snow depth. Among the simple drivers, which explained variations of snow instability to a certain extent, slope aspect was certainly the most prominent driver with a significant influence on the variations under all conditions. The number and type of drivers varied between single days indicating that concluding on avalanche conditions on a specific day is not feasible solely based on terrain characteristics or snow depth. Results for the entire dataset, representing an average over the five sampling days, showed that variations of the propensity of failure initiation were driven by slope angle, while variations of the propensity for crack propagation were best explained by snow depth. Hence, given a specific avalanche situation simple drivers may support extrapolations of snow instability, if the relation between snow instability and simple drivers is known.

Extending the non-spatial analysis with robust geostatistical techniques snow instability variations at the basin scale were quantified. To do so, variations due to differences in terrain parameters and snow depth were modeled with a linear external drift model. The autocorrelation structure of the remaining variation was derived by restricted maximum likelihood estimation. The autocorrelation ranges of the snow instability criteria determined at the basin scale mainly ranged between 5 and 31 m and were comparable to previous studies at smaller scales, primarily at the slope scale. This finding confirmed that autocorrelation ranges of snow instability determined in smaller sampling arrays are meaningful despite often limited spatial extents in slope scale studies. Moreover, as the found autocorrelation ranges were shorter than typical autocorrelation ranges of terrain parameters and terrain induced variations were captured with the external drift model, this study suggests that the identified autocorrelation ranges of 5 to 31 m result from meteorological forcing at the basin scale.

For one exemplary situation (3 March 2011) the meteorological drivers influencing the distribution of snow instability at the basin scale were identified. To this end, the geostatistical analysis was repeated with snow cover model output instead of terrain and snow depth data as covariates. Changing the covariate data did not change the autocorrelation range, as the influence of terrain is implicitly considered in the snow cover model. Including snow cover model data, instead of terrain and snow depth data only, finally allowed searching the meteorological records to identify the parameters responsible for the meteorological forcing. In case of 3 March 2011 differences in precipitation and energy input at the snow surface had caused the observed variations of snow instability. Despite accounting for many micro-meteorological processes and interactions, the spatial snow cover modeling approach still showed deficiencies related to the representation of density and snow depth spatial variations.

To conclude, snow micro-penetrometry provides much needed field data enabling to study snow cover variations and also their temporal evolution, although some discrepancies remain to be solved. More general, data acquired with the SMP allows validating snow properties obtained with other approaches, such as snow cover modeling or remote sensing techniques. The developed snow instability criteria for SMP profiles represent a comprehensive and observer independent method to measure snow instability in the field. The snow instability algorithm may provide input for slope failure models or allow studying the reasons for crack arrest in avalanche prone slopes. Moreover, the approach is not limited to SMP data and may be enhanced with other criteria in future, such as a tensile failure criterion for slab fractures. The basin scale variations modeled with the robust geostatistical approach offer a comprehensive data set to validate the performance of spatial snow cover simulations and to identify weaknesses related to the representation of snow properties. This is certainly required as avalanche forecasting will need to rely on snow cover simulations to include spatial variations. With the benefit of including the meteorological history and characterizing spatial variability, snow cover modelling may enhance forecasting by providing local variations – opening the way for more detailed forecasts in the future.

Kurzfassung

Im Winter sind Verkehrswege und Siedlungen in Gebirgsregionen durch Lawinen bedroht. Um vor der Lawinengefahr zu warnen, beschreiben Lawinenwarndienste die Lawinensituation mit einer Gefahrenstufe, die für Regionen von 100 bis zu mehreren 1000 km² gilt. Momentan beschränkt sich die Lawinenwarnung auf derartige regionale Prognosen. Vorhersagen für kleinere Gebiete sind schwieriger, da nur wenig über die Variabilität der Schneedecke im Gebirge bekannt ist und man nicht genau weiss, wie Wetterbedingungen und Geländeeigenschaften die räumlichen Schneedeckeneigenschaften beeinflussen.

Um räumliche Variationen der Schneedeckenstabilität mit meteorologischen Einflüssen zu verknüpfen, wurden objektive Feldmessungen in einer kleinen Geländekammer durchgeführt, um die räumliche Verteilung der Schneedeckenstabilität zu untersuchen. Dadurch konnten die meteorologischen Einflüsse abgeleitet werden, die zu den beobachteten Schneedeckenstabilitätsmustern in einer bestimmten Situation geführt hatten. Eine Grundvoraussetzung für diese Vorgehensweise war jedoch die Entwicklung einer quantitativen Messgrösse für die Stabilität basierend auf schneemechanischen Eigenschaften.

Da Alarmzeichen als Anzeichen einer schwachen Schneedecke oftmals nicht beobachtet werden können und Stabilitätstests aufwendig sind, bietet sich das Schnee Mikro-Penetrometer (SMP) an, um mechanische Eigenschaften der Schneedecke zu messen. Die Zuverlässigkeit der mit dem SMP bestimmten Schneedeckeneigenschaften wurde in Vergleichen mit zwei anderen Methoden ermittelt. Eine der Methoden beruht auf der mechanischen Modellierung der mittels Computer-Tomographie bestimmten dreidimensionalen Schneestruktur, die andere auf Messungen der Deformation der Schneesichten bei einem Bruchausbreitungstest (Propagation Saw Test). Die Vergleiche zeigten, dass, wenn auch aus den SMP Messungen alle Eigenschaften für die Modellierung der Bruchinitialisierung und der Bruchausbreitung bestimmt werden können, noch Verbesserungen bei der Ableitung der Elastizität aus SMP Daten möglich sind.

Da es bisher an einer Definition der Schneedeckenstabilität, die unserem aktuellen Verständnis der Lawinenauslösung folgt, mangelt, wurden zwei quantitative Stabilitätskriterien für das SMP entwickelt. Zum ersten Mal wurden quantitative

Kriterien für die Bruchinitialisierung und für die Bruchausbreitung entwickelt, die die entscheidenden Prozesse für die Schneedeckenstabilität beinhalten. Beide Kriterien wurden mit unabhängigen Stabilitätsbeobachtungen validiert, die ein gewisses Vertrauen in die mechanischen Berechnungen basierend auf den mikro-mechanischen Eigenschaften vermitteln. Ausserdem unterstreichen unsere Ergebnisse die Bedeutung der Bruchinitialisierung und der Bruchausbreitung für die Schneedeckenstabilität.

Mit den während 5 Feldmesskampagnen in einer kleinen Geländekammer ($\leq 0.3 \text{ km}^2$) oberhalb von Davos, Schweiz, erhobenen Messdaten wurde der Zusammenhang zwischen den Stabilitätskriterien und den Geländeeigenschaften bzw. der Schneehöhe untersucht. Diese einfachen Einflussgrössen beschrieben die Stabilitätsverteilungen zu einem gewissen Grad. Die sicherlich wichtigste Einflussgrösse war die Exposition des Hanges, die in allen Situationen einen Grossteil der Variation erklärte. Welche und wie viele Einflussgrössen letztlich die Variation der Schneedeckenstabilität erklärten, variierte zwischen den Tagen. Das deutet darauf hin, dass man an einem bestimmten Tag – mit einem gewissen Lawinenproblem – nicht einfach von den Geländeeigenschaften oder der Schneehöhe auf die Gefahrenstellen schliessen kann. Die Gesamtheit aller Messtage stellt einen Durchschnittswert über verschiedene Lawinensituationen dar und zeigte, dass Variationen in der Anfälligkeit für die Bruchinitialisierung von der Hangneigung und Variationen in der Neigung zur Bruchausbreitung von der Schneehöhe abhängen. Demnach können einfache Einflussgrössen, wie Geländeeigenschaften, in einer gewissen Lawinensituation die Extrapolation der Schneedeckenstabilität erleichtern – vorausgesetzt die Verbindung zwischen Schneedeckenstabilität und den Einflussgrössen ist bekannt.

Um die Variationen der Schneedeckenstabilität auf der Grösse einer kleinen Geländekammer zu bestimmen, wurde die nicht-räumliche Analyse auf eine räumliche robuste geostatistische Analyse ausgeweitet. Die Unterschiede in der Schneedeckenstabilität auf Grund von Geländeeigenschaften oder Schneehöhenvariationen wurden mit einem linearen Modell beschrieben. Die Autokorrelationsstruktur der verbleibenden Fluktuationen wurde mittels der Maximum-Likelihood-Methode berechnet. Die räumliche Korrelationslänge der Schneedeckenstabilität lag meist zwischen 5 und 31 m und war vergleichbar mit den Ergebnissen früherer Studien, die Variationen auf kleineren Skalen, hauptsächlich auf der Grösse eines Hanges untersuchten. Dieses Ergebnis bestätigt, dass die Korrelationslängen der Schneedeckenstabilität, wie sie in früheren Studien ermittelt wurden, aussagekräftig waren, obwohl sie oftmals jenseits der Auflösung der Messanordnung lagen. Da ausserdem die Korrelationslängen kürzer waren als die typischen Korrelationslängen der Geländeeigenschaften und da Geländeeinflüsse bereits mit

dem linearen Modell erfasst wurden, liegt es nahe, dass die ermittelten Korrelationslängen von 5 bis 31 m das Ergebnis meteorologischer Einflüsse sind.

Für eine einzelne Lawinensituation (3. März 2011) wurden die meteorologischen Einflussgrößen abgeleitet, die Variationen in der Geländekammer bewirkten. Zu diesem Zweck wurde die geostatistische Analyse mit den modellierten Schneedeckeigenschaften an Stelle der einfachen Einflussgrößen, wie den Geländeeigenschaften, wiederholt. Dieser Wechsel der Kovariablen hatte keinen Einfluss auf die räumlichen Korrelationslängen, da der Einfluss des Geländes bereits implizit im Schneedeckenmodell berücksichtigt ist. Basierend auf den modellierten Schneedeckeneigenschaften konnte jedoch der meteorologische Datensatz nach den Größen durchsucht werden, die für die Herausbildung der Variationen verantwortlich waren. Im Fall des 3. März 2011 wurden die Variationen in der Schneedeckenstabilität von Niederschlag und der Energiebilanz an der Schneeoberfläche verursacht. Auch wenn die Schneedeckenmodellierung viele mikrometeorologische Prozesse und Rückkopplungen berücksichtigt, blieben mit unserem Modellierungsansatz noch einige Differenzen zwischen gemessener und modellierter Schneedichte bzw. Schneehöhe bestehen.

Schlussfolgernd lässt sich sagen, dass mit dem SMP zuverlässig Schneeeigenschaften gemessen werden können, um räumliche Variationen und deren zeitliche Entwicklung zu untersuchen, auch wenn noch Diskrepanzen zu anderen Messmethoden bestehen. Weitere Anwendungen für das SMP liegen in der Validierung anderer Methoden, z.B. die Validierung von Fernerkundungs- oder Schneedeckenmodelldaten. Die für das SMP entwickelten Stabilitätskriterien stellen eine erste umfassende und beobachterunabhängige Methode für die Bestimmung der Schneedeckenstabilität im Feld dar. Dieser Stabilitätsalgorithmus kann als Input für Stabilitätssimulationen von Hängen dienen oder verwendet werden, um den Halt eines laufenden Risses in Lawinhängen zu untersuchen. Darüber hinaus, sind die Stabilitätskriterien nicht auf die Verwendung mit SMP-Daten beschränkt und können in Zukunft mit weiteren Kriterien ergänzt werden, z.B. mit einem Zugbruchkriterium für das Schneebrett. Die auf der Grösse eines kleinen Hochtales mit dem geostatistischen Modell simulierten Variationen bieten einen vollständigen Datensatz mit dem die Güte von räumlichen Schneedeckensimulationen verifiziert und Schwächen in den modellierten mechanischen Eigenschaften aufgedeckt werden können. Dies ist sicherlich von Nöten, da die Lawinenwarnung sich in Zukunft vermehrt auf Schneedeckensimulationen stützen wird, um räumliche Variationen auch auf kleinem Raum erfassen zu können. Auf Grund ihres unbestechlichen Vorteils, die meteorologische Vorgeschichte und die räumlichen Unterschiede zu umfassen, werden Schneedeckensimulationen die Lawinenwarnung mit Informationen über lokale Variationen bereichern. Dies wird in Zukunft mehr Details in der Lawinenwarnung ermöglichen.