

Diss. ETH No. 26898

Improving numerical avalanche forecasting with spatial snow cover modeling

A thesis submitted to attain the degree of

DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH

(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

BETTINA RICHTER

M.Sc., LMU München

born on 15 August 1985

citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. K. Steffen

Dr. A. van Herwijnen

Prof. Dr. J. Schweizer

Prof. Dr. M. W. Rotach

Dr. M. Dumont

2020

Abstract

Snow avalanches are a natural hazard in mountainous areas which endanger roads, villages and human lives. To inform the public on the current avalanche situation, avalanche warning services regularly publish avalanche bulletins in winter. However, forecasting snow avalanches is very challenging. Currently, it is not possible to predict the exact timing, location or size of snow avalanches. Avalanche forecasters therefore estimate the degree of avalanche danger at the scale of a region, by linking point observations of the snowpack, consisting of observations of snow stratigraphy and snow instability, with past and future weather. While snowpack observations are very time consuming and thus rather scarce, numerical snow cover models can considerably increase the spatial and temporal resolution of such data, especially if they provide information on snow instability. In our current understanding of avalanche formation, avalanche release is a fracture mechanical problem and snow instability is best understood in terms of failure initiation and crack propagation. Detailed snow cover models exists which can simulate snow stratigraphy, but snow instability information is partly missing or inaccurate. In view of applying snow cover models for avalanche forecasting, the aim of this thesis was to model spatially distributed snow instability.

The snow cover model SNOWPACK simulates criteria for failure initiation and crack propagation for each snow layer, namely the stability index and the critical crack length. While the stability index had been validated with field observations and was related to the probability of skier triggering, this was not the case for the critical crack length, which was parameterized based on layer properties including density, shear strength and the elastic modulus. In a first step, we therefore validated the evolution of snow layer properties and the critical crack length in SNOWPACK with novel field measurements. Daily measurements with the snow micro-penetrometer allowed for direct comparison with SNOWPACK. Our results showed that the evolution of layer density was fairly well captured by the model, especially the first two months after deposition. For the validation of the critical crack length, we used results from the propagation saw test performed on a weekly basis over three winter seasons. A comparison to SNOWPACK highlighted some discrepancies, and we thus refined the parameterization with a fit factor depending on weak layer density and grain size. With the refined parameterization, spatially distributed modeling of snow instability in terms of failure initiation and crack propagation became tangible.

Spatially distributed snow cover simulations require interpolation and downscaling of

meteorological data, which may introduce uncertainties. How these uncertainties impact modeled snow stability remained mostly unknown. For the first time, we therefore investigated the sensitivity of modeled snow instability to meteorological input uncertainty with a global sensitivity analysis. Early in the season, during the period of weak layer formation, modeled instability metrics were mostly sensitive to air temperature and precipitation. After weak layer burial, during the period of slab formation, modeled instability metrics were mostly sensitive to precipitation. These results highlighted that accurate spatial snow depth distributions are required to obtain realistic snow instability patterns.

In a last step, we used the distributed snow cover model Alpine3D to simulate snow instability for the region of Davos, Switzerland. Meteorological data from automatic weather stations were interpolated to a grid with 100 m resolution. Precipitation was scaled with highly resolved snow depth measurements from airborne laser scanning to account for realistic snow depth patterns. Modeled snow instability patterns were plausible, e.g. south-facing slopes stabilized faster in spring. However, instability metrics were lower for south facing slopes during the winter months, which was not in line with the forecasted avalanche danger level. While spatial patterns of modeled snow instability still have to be validated, spatially distributed snow cover modeling can greatly improve numerical avalanche forecasting. However, given a lack of accurate input data, simple virtual slopes instead of highly resolved modeling approaches is probably enough at this point in time.

In this thesis we used novel measurement methods to validate snow cover models. We improved a new instability metric to exploit distributed snow instability modeling for avalanche forecasting. Our results showed that spatial modeling has great potential to improve numerical avalanche forecasting. However, there is still room for various improvements and our results suggest that a solid comparison of field measurements and model output is required to move forward. The representation of snow mechanical properties remains poor and instability metrics could still be further improved. More field data are required to validate spatial patterns of modeled snow instability and threshold have to be explored to distinguish between stable and unstable.

Kurzfassung

Lawinen sind eine Naturgefahr und können Straßen, Dörfer und Menschenleben in Bergregionen gefährden. Lawinenwarndienste veröffentlichen im Winter regelmässig Lawinenbulletins, um die Öffentlichkeit über die aktuelle Lawinensituation zu informieren. Jedoch ist die Vorhersage von Lawinen sehr anspruchsvoll. Gegenwärtig ist es nicht möglich, den genauen Zeitpunkt, Ort oder die Grösse einer Lawine vorherzusagen. Lawinenwarner schätzen daher den Grad der regionalen Lawinengefahr ab, indem sie Punktbeobachtungen der Schneedecke (Schichtung und Schneedeckenstabilität) mit vergangenem und zukünftigem Wetter verknüpfen. Schneedeckenbeobachtungen sind sehr zeitaufwendig und ihre Anzahl dadurch limitiert. Numerische Schneedeckenmodelle können die räumliche und zeitliche Auflösung deutlich erhöhen, vor allem wenn sie Informationen zur Schneedeckenstabilität liefern. In unserem gegenwärtigen Verständnis der Lawinenbildung ist die Lawinenauslösung ein bruchmechanisches Problem. Stabilität wird durch Bruchinitiierung und Bruchausbreitung beschrieben. Es gibt detaillierte Schneedeckenmodelle, die die Schichtung simulieren können, aber Informationen über die Schneedeckenstabilität fehlen teilweise oder sind ungenau. Im Hinblick auf die Anwendung von Schneedeckenmodellen zur Lawinenvorhersage war die Modellierung räumlicher Schneeeinstabilitäten das Ziel dieser Arbeit.

Das Schneedeckenmodell SNOWPACK simuliert für jede Schneesicht Kriterien für Bruchinitiierung und Bruchausbreitung, nämlich den Stabilitätsindex und die kritische Risslänge. Während der Stabilitätsindex durch Feldbeobachtungen validiert wurde, war dies für die kritische Risslänge nicht der Fall. Diese wurde basierend auf Schichteigenschaften wie Dichte, Scherfestigkeit und Elastizitätsmodul parametrisiert. In einem ersten Schritt validierten wir daher die Entwicklung der Schneeschichteigenschaften und der kritischen Risslänge in SNOWPACK mit modernen Feldmessungen. Tägliche Messungen mit dem Schnee-Mikropenetrometer zeigten, dass die Entwicklung der Dichte durch das Modell ziemlich gut erfasst wurde, insbesondere in den ersten zwei Monaten nach der Ablagerung. Zur Validierung der kritischen Risslänge verwendeten wir wöchentliche Feldmessungen über drei Wintersaisons hinweg. Ein Vergleich mit SNOWPACK zeigte einige Diskrepanzen auf, und so verbesserten wir die Parametrisierung mit einem Korrekturfaktor, der von der Dichte der Schwachschicht und ihrer Korngrösse abhängt. Mit der verbesserten Parametrisierung war die Grundlage für die modellierte Schneeeinstabilität in Bezug auf Bruchinitiierung und Bruchausbreitung geschaffen, sodass der Schritt zur räumlichen Modellierung möglich

wurde.

Räumliche Schneedeckensimulationen erfordern Interpolation von meteorologischen Daten, was zu Unsicherheiten führen kann. Wie sich diese Unsicherheiten auf die modellierte Schneestabilität auswirken, blieb weitgehend unbekannt. Deshalb untersuchten wir die Empfindlichkeit der modellierten Schneestabilität auf Unsicherheiten in den meteorologischen Eingangsgrößen mit einer globalen Sensitivitätsanalyse. Zu Beginn der Saison, während der Periode der Schwachschichtbildung, waren die modellierten Instabilitätsmetriken am empfindlichsten gegenüber Lufttemperatur und Niederschlag. Nachdem die Schwachschicht eingeschneit worden war, und sich das Schneebrett gebildet hatte, waren die modellierten Instabilitätsmetriken am empfindlichsten gegenüber Niederschlag. Diese Ergebnisse machten deutlich, dass genaue Schneehöhenverteilungen erforderlich sind, um realistische Instabilitätsmuster zu erhalten.

In einem letzten Schritt verwendeten wir das räumliche Schneedeckenmodell Alpine3D, um die Schneedeckenstabilität für die Region Davos, Schweiz, zu simulieren. Meteorologische Daten von automatischen Wetterstationen wurden auf 100 m Auflösung interpoliert. Die Niederschläge wurden mit hochaufgelösten Schneehöhenmessungen von flugzeuggestützten Laser Scanning skaliert, um realistische Schneehöhenmuster zu erhalten. Die modellierten Schneestabilitätsmuster waren plausibel, z.B. stabilisierten sich Südhänge im Frühjahr schneller. Allerdings waren die Instabilitätsmetriken für Südhänge in den Wintermonaten niedriger, was nicht mit der prognostizierten Lawinengefahr übereinstimmte. Während die räumlichen Muster der modellierten Schneedeckenstabilität noch validiert werden müssen, kann die räumliche Schneedeckenmodellierung die numerische Lawinenvorhersage erheblich verbessern. Da jedoch genaue meteorologische Eingangsgrößen fehlen, dürften zum jetzigen Zeitpunkt einfache virtuelle Hänge anstelle von hoch aufgelösten Modellierungsansätzen ausreichen.

In dieser Arbeit haben wir moderne Messmethoden zur direkten Validierung von Schneedeckenmodellen eingesetzt. Wir verbesserten eine neue Instabilitätsmetrik zur Nutzung von räumlich modellierter Schneedeckenstabilität für die Lawinenvorhersage. Unsere Ergebnisse zeigten, dass die räumliche Modellierung ein grosses Potenzial zur Verbesserung der numerischen Lawinenvorhersage hat. Es gibt jedoch noch Potential für Verbesserungen, und unsere Ergebnisse deuten darauf hin, dass ein solider Vergleich von Feldmessungen und Modeloutput erforderlich ist, um voranzukommen. Die mechanischen Eigenschaften von Schnee sind nach wie vor schlecht im Modell dargestellt und die Instabilitätsmetriken könnten noch weiter verbessert werden. Es sind mehr Feldmessungen erforderlich, um die räumlichen Muster der modellierten Schneedeckenstabilität zu validieren, und Schwellenwerte müssen untersucht werden, um zwischen stabil und instabil zu unterscheiden.