



Doctoral Thesis

Measurement of fracture mechanical properties of snow and application to dry snow slab avalanche release

Author(s):

Sigrist, Christian

Publication Date:

2006

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005282374> →

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. 16736

Measurement of Fracture Mechanical Properties of Snow and Application to Dry Snow Slab Avalanche Release

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZÜRICH
for the degree of
DOCTOR OF SCIENCES

presented by

CHRISTIAN SIGRIST

Master of Science in Physics, University of Bern

born 24.03.1976

citizen of Sigriswil, Bern

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Jürg Dual, examiner
Dr. Jürg Schweizer, co-examiner
Dr. Hans-Jakob Schindler, co-examiner

2006

Abstract

A dry snow slab avalanche is released by a sequence of failure processes in the snow cover. When a weak layer in the snow cover is damaged over a certain area, the weak layer starts to fail progressively in slope parallel direction. This shear failure disconnects the overlaying slab from the basal layer. Finally, a tensile fracture occurs in slope normal direction across the layering which releases the slab. For a better understanding of these mechanisms a well founded understanding of the fracture mechanical properties of homogeneous and layered snow is essential.

The aim of this work was to investigate the fracture mechanical properties of snow under tension (mode I) and under shear (mode II) with homogeneous and layered snow samples on the basis of experiments in the cold laboratory and in the field and to relate the results to dry slab avalanche release. The experimental work was structured in three groups of fracture experiments: experiments in mode I with homogeneous snow samples in the cold laboratory, experiments in mode II with layered snow samples in the cold laboratory and mode II experiments with in-situ snow beams in the field.

For the mode I experiments, beam-shaped snow specimens cut from homogeneous layers of naturally deposited snow were subjected to three-point bending and cantilever beam tests. Uncracked specimens were used to determine the tensile strength of snow and notched specimens to determine the critical stress intensity factor in mode I. The three-point bending tests provided higher values than the cantilever beam tests. Furthermore the cantilever beam tests depended on cantilever length. The differences between the test methods were significant and were attributed to non-negligible size and shape effects. The fracture process zone was experimentally determined and was estimated to be in the order of several centimeters, implying that snow has to be considered as a quasi-brittle material at the scale of our experiments. For a quasi-brittle material linear elastic fracture mechanics is applicable only with a size correction. As a method to correct the critical stress intensity factor to the size-independent fracture toughness, K_{Ic} , which is a material property, the equivalent fracture toughness, K_{Ic}^e , was determined according to Bazant and Planas (1998) and a size correction function was proposed. The results for K_{Ic}^e ranged from $0.8 \text{ kPa}\sqrt{\text{m}}$ for a density of $\rho = 150 \text{ kg/m}^3$ up to $6 \text{ kPa}\sqrt{\text{m}}$ for a density of $\rho = 350 \text{ kg/m}^3$ for typical slab layers. It was confirmed that snow has an extremely low value of K_{Ic} . Fracture toughness is expected to be size dependent up to

the scale of a slab avalanche.

Layered snow samples including a weak layer were tested in mode II to determine the energy release rate of a crack propagating along the weak layer. A new experimental setup based on a cantilever beam experiment was designed and proved to be applicable for layered snow samples. In absence of an analytical solution, the finite element method (FEM) was used to simulate the experiments and determine the energy release rate numerically. A critical energy release rate $G_f = 0.04 \pm 0.02 \text{ J/m}^2$ was found for the tested weak layers. G_f was primarily a material property of the weak layer. For similar snow densities, mode I fracture toughness results were about two times as large as for the tested weak layers in mode II. Two analytical approaches were tested and compared to the FEM results. Both analytical approaches, a homogeneous cantilever beam with a deep crack, and a bilayer beam with interface crack were highly correlated with the results obtained from the FE model. The analytical results of both approaches were too large by a factor of about two. Due to the higher coefficient of determination, the cantilever beam approach should be preferred. In addition, the dynamic Young's modulus of the tested snow samples was determined. The results for the Young's modulus were strongly correlated with an index for the Young's modulus derived from a penetration resistance profile recorded with a snow micro-penetrometer SMP.

A field test was developed in which a weak layer in an isolated snow beam was tested in mode II in-situ on a slope. The critical energy release rate G_f was determined numerically in a FEM simulation. The result for the tested weak layers was $G_f = 0.07 \pm 0.01 \text{ J/m}^2$. It was found that slope normal bending of the slab contributed considerably to the energy release rate G of our tests and was more important than the component due to shear loading for angles between 30° and 45° . Critical crack sizes of about 25 cm were required to start fracture propagation along the weak layer of the isolated beams.

By applying new test methods to snow and acquiring a considerable data set of fracture mechanical properties of snow in laboratory and field tests, it was possible to improve the knowledge and the understanding of the fracture mechanical behaviour of snow. It could be shown that for fracture propagation the material properties of the weak layer as well as of the overlaying slab play an important role. Whereas the energy to fracture a weak layer depends on the material properties of the weak layer, the available energy for crack propagation depends mainly on the material properties of the overlaying slab and the slope normal collapse height of a weak layer. It is expected that this behaviour holds also for the scale of a slab avalanche.

Zusammenfassung

Bevor eine Schneebrettlawine abgleitet, kommt es in der Schneedecke zu einer Reihe von Bruchprozessen. Sobald eine genügend grosse Fläche einer Schwachschicht in der Schneedecke geschädigt ist, kommt es zu einer selbstständigen Bruchausbreitung entlang dieser Schwachschicht in hangparalleler Richtung. Durch diesen Scherbruch wird das Schneebrett von der darunter liegenden Schicht getrennt. Unter der zunehmenden Last kommt es zu einem Zugbruch senkrecht zur Hangrichtung der zum abgleiten des Schneebrettes führt. Um diese Mechanismen besser verstehen zu lernen ist es wichtig, vorerst einmal die bruchmechanischen Eigenschaften von homogenem und geschichtetem Schnee zu kennen.

Die Zielsetzung dieser Arbeit war es, in Labor- und in Feldexperimenten die bruchmechanischen Eigenschaften von Schnee unter Zugbelastung (Mode I) und unter Scherbelastung (Mode II) experimentell zu bestimmen und die Resultate auf die Auslöseprozesse einer Schneebrettlawine zu übertragen. Die experimentelle Arbeit wurde in drei Gruppen unterteilt: Mode I Experimente mit homogenen Schneeproben im Kältelabor, Mode II Experimente mit geschichteten Schneeproben im Kältelabor und Mode II Experimente mit Schneeblöcken im Gelände.

Für die Mode I Tests wurden balkenförmige Schneeproben aus einer homogenen Schicht der Schneedecke ausgestochen. Diese wurden in Drei-Punkt-Biegeversuchen und in Balkenversuchen mit einem Ausleger (Cantilever beam tests) getestet. Dabei wurden ungekerbte Proben verwendet um die Zugfestigkeit zu bestimmen und vorgekerbte Proben zur Bestimmung der kritischen Spannungsintensitätsfaktoren. Die Resultate der Drei-Punkt-Biegeversuchen fielen höher aus als diejenigen der Balkenversuche. Die Resultate der Balkenversuche wurden zudem durch die Länge des Auslegers beeinflusst. Die signifikanten Unterschiede zwischen den verschiedenen Testmethoden wurden nicht vernachlässigbaren Grössen- und Formabhängigkeiten zugeordnet. Die Grösse der Bruchprozesszone wurde aus Experimenten auf einige Zentimeter geschätzt. Dies zeigt, dass für die Grössenordnung unserer Experimente Schnee als quasi-brüchiges Material angesehen werden muss. Handelt es sich um ein quasi-brüchiges Material, ist die linear elastische Bruchmechanik nur mit einer Grössenkorrektur anwendbar. Um die gemessenen kritischen Spannungsintensitätsfaktoren auf die grössenunabhängige Bruchzähigkeit, K_{Ic} , zu korrigieren, wurde die äquivalente Bruchzähigkeit K_{Ic}^e , nach Bazant und Planas (1998) bestimmt. Für ty-

pische Schneeschichten reichten die Resultate für K_{Ic}^e von $0.8 \text{ kPa}\sqrt{\text{m}}$ für eine Dichte von $\rho = 150 \text{ kg/m}^3$ bis $6 \text{ kPa}\sqrt{\text{m}}$ für eine Dichte von $\rho = 350 \text{ kg/m}^3$. Damit konnte bestätigt werden, dass Schnee eine extrem niedrige Bruchzähigkeit hat. Es wird erwartet, dass die Bruchzähigkeit bis hin zur Grösse eines Schneebrettes Grössenabhängig ist.

Aus Experimenten mit geschichteten Schneeproben die eine Schwachschicht enthielten wurde die Energiefreisetzungsrate in Mode II bestimmt. Dafür wurde ein neuer experimenteller Aufbau entwickelt, der auf einem Balkenexperiment beruht. Da keine analytische Lösung für die Bestimmung der Energiefreisetzungsrate zur Verfügung stand, wurde diese numerisch, mittels der finiten Element Methode (FEM) bestimmt. Für die getesteten Schwachschichten wurde eine kritische Energiefreisetzungsrate von $G_f = 0.04 \pm 0.02 \text{ J/m}^2$ bestimmt. G_f war in erster Linie eine Materialeigenschaft der Schwachschicht. Für Schnee vergleichbarer Dichte war die Bruchzähigkeit in Mode I etwa doppelt so gross wie in Mode II. In der Folge wurden die FEM Resultate mit den Resultaten zweier adaptierter analytischer Lösungen verglichen. Es handelte sich dabei um eine analytische Lösung eines homogenen Auslegerbalkens mit einem tiefen Riss und einer Lösung für einen Balken bestehend aus zwei Schichten mit einem Schichtgrenzriss. Die Resultate der analytischen Lösungen waren gut korreliert mit den FEM Resultaten, aber überstiegen diese für beide Lösungen um einen Faktor zwei. Auf Grund des höheren Bestimmtheitsmasses, sollte die Auslegerbalken-Lösung vorgezogen werden. Zusätzlich wurde das Elastizitätsmodul der getesteten Schneeproben bestimmt. Die Resultate waren gut korreliert mit einem Elastizitätsindex der aus einem Eindringwiderstandsprofil eines Schnee-Mikro-Penetrometers (SMP) bestimmt wurde.

Ein Feldtest wurde entwickelt in dem Schwachschichten in allseitig isolierten Schneeblöcken direkt im Hang in Mode II getestet wurden. Die kritische Energiefreisetzungsrate wurde numerisch in einer FEM Simulation bestimmt. Für die getesteten Schwachschichten lag die kritische Energiefreisetzungsrate bei $G_f = 0.07 \pm 0.01 \text{ J/m}^2$. Ein Durchbiegen des Schneebrettes rechtwinklig zum Hang trägt erheblich zu G bei und kann für Hangneigungen zwischen 30° und 45° den Beitrag auf Grund der Scherbelastung sogar überwiegen. Kritische Schnittlängen von 25 cm waren nötig, um eine selbstständige Bruchausbreitung entlang der Schwachschicht auszulösen.

Mit den neuen Testmethoden konnte im Labor und im Feld eine repräsentative Datenmenge der bruchmechanischen Eigenschaften von Schnee gesammelt werden. Damit war es möglich das Wissen und Verständnis um die Bruchmechanik von Schnee zu erweitern. Es konnte gezeigt werden, dass für die Bruchausbreitung im Schnee sowohl die Schwachschicht als auch das darüber liegende Schneebrett eine entscheidende Rolle spielen. Während die Energie die benötigt wird um eine Schwachschicht zu brechen von den Eigenschaften der Schwachschicht abhängt, hängt die für den Bruchprozess zur Verfügung stehende Energie vor allem vom Schneebrett ab. Es wird angenommen, dass dies nicht nur für den experimentellen Fall, sondern auch für den Fall eines Schneebrettes gilt.