

DISS. ETH NO. 24099

THE EFFECTS OF EXPLOSIONS ON SNOW

A thesis submitted to attain the degree of

DOCTOR OF SCIENCES of ETH Zurich

(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

STEPHAN SIMIONI

MSc ETH Civil Eng, ETH Zurich

born on 10 February 1984

citizen of Winterthur ZH

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Jürg Dual

Dr. Jürg Schweizer

2017

Zusammenfassung

In den allermeisten Gebirgsregionen mit ganzjähriger oder saisonaler Schneedecke stellen Lawinen eine grosse Gefahr dar. Grosse Lawinen, welche während oder direkt nach Grossschneefällen spontan abgleiten, können Infrastruktureinrichtungen wie Eisenbahn, Strassen oder Siedlungen gefährden. In Skigebieten können spontane oder durch Skifahrer ausgelöste Lawinen darunter liegende geöffnete Pisten erreichen. Diese Risiken konnten durch die künstliche Lawinenauslösung drastisch reduziert werden, indem Lawinen präventiv während Zeiten von geringer wirtschaftlicher Bedeutung durch Explosionen ausgelöst werden. Die durch die Explosion erzeugte Zusatzlast auf die Schneedecke, kann zum Bruch innerhalb der Schneedecke und folglich zu einer Lawine führen. Traditionellerweise wurden die Sprengladungen von Hand oder aus dem Helikopter in potentielle Anrissgebiete geworfen. Nicht zuletzt der Lawinenwinter 1999 in der Schweiz zeigte das grosse Potential der künstlichen Lawinenauslösung und führte zur Weiterentwicklung dieser Methode mit der Einführung fixer Sprenginstallationen. Mit diesen Systemen können Lawinen dann ausgelöst werden, wenn die Auslösewahrscheinlichkeit am höchsten ist: während oder kurz nach Grossschneefällen. Herkömmliche Methoden hingegen können in diesen Situationen kaum oder nur sehr spät eingesetzt werden. Die fixen Sprenginstallationen werden im Anrissgebiet aufgestellt. Eine Explosion erfolgt durch Zünden von Sprengstoff oder einer Gasmischung. Die Systeme sind typischerweise an einen festen Standort gebunden und es können nur einzelne oder wenige Sprengpunkte mit einem System bedient werden. Deshalb muss der Ort und die Wirkung des Systems sorgfältig analysiert werden. Bis jetzt ist aber die Wirkung verschiedener Explosionen auf die Schneedecke nicht genügend erforscht.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, die Prozesse bei der künstlichen Lawinenauslösung über und in der Schneedecke besser zu verstehen. Grossmassstäbliche Versuche wurden mit normalen Sprengladungen (spherical/solid explosives) und einem mobilen Gaszündrohr (directed gas explosion) durchgeführt und die Luftdrücke über der Schneedecke und die Beschleunigungen in der Schneedecke auf einem flachen Versuchsgelände gemessen. Zusätzlich haben wir Versuche an operationellen Lawinenauslösesystemen durchgeführt und auch die Bodenerschütterung gemessen. Um die Prozesse in der Schneedecke besser zu verstehen, haben wir in kleinmassstäbliche Versuchen sowohl die Beschleunigungen als auch die Ankunftszeit der Wellen gemessen. Wir haben daraus die elastischen Eigenschaften und Bruchausbreitungsgeschwindigkeiten bestimmt, welche für die

Auslösung von Schneebrettlawinen massgebend sind. Schliesslich haben wir die Messungen mit einem komplexen Modell verglichen, welches die Wellenausbreitung im Schnee modelliert.

Die Resultate der grossmassstäblichen Versuche zeigten, dass der Luftdruck und die davon abgeleiteten Parameter mit der Distanz vom Sprengpunkt stark abnahmen. Die Beschleunigungen in der Schneedecke und die daraus abgeleiteten Grössen nahmen mit der Distanz vom Sprengpunkt und der Tiefe in der Schneedecke stark ab. Die Beschleunigungen in einer gewissen Tiefe in der Schneedecke nahmen mit der Distanz ähnlich stark ab wie der Luftdruck über der Schneedecke. Die gerichtete Gasexplosion erzeugte eine ähnliche Wirkung innerhalb eines Sektors von ca. 70° um die Zündrohrachse. In einem Winkel von 90° zur Zündrohrachse waren die absoluten Luftdruckwerte nahe des Sprengpunktes tiefer als in der Achse, nahmen aber weniger stark ab. Dies führte zu Linien gleichen Druckes, welche nahe an der Sprengung eine elliptische Form und weit weg eine Kreisform hatten. Letzteres wird auch bei herkömmlichen Sprengladungen erwartet.

Wir beobachteten zwei verschiedene Arten des Bruches in der Schwachschicht in der Schneedecke, welche durch unterschiedliche Prozesse ausgelöst wurden: Die Brüche an einem Beobachtungsort wurden entweder durch die Bruchausbreitung oder durch die direkte Einwirkung der Sprengung über der Schneedecke verursacht. Die Experimente an einem operationellen Gaszündrohr zeigten, dass die Resultate der Versuche im Flachfeld gut mit denjenigen am operationellen System übereinstimmten. Flachfeldversuche sind demnach gut geeignet, um verschiedene Explosionsarten zu vergleichen. Die durch das operationelle System erzeugten Bodenbeschleunigungen waren klein im Vergleich zu den in der Schneedecke gemessenen Beschleunigungen. Die Wellenausbreitungsgeschwindigkeiten und die tiefen Amplituden lassen darauf schliessen, dass die Wellen hauptsächlich durch die Luft und anschliessend durch die Schneedecke auf den Boden übertragen wurden. Die Ausbreitung über das Fundament des Gaszündrohrs war demnach nicht massgebend.

Die Resultate der kleinmassstäblichen Versuche zeigen ähnliche Werte wie frühere Laborexperimente. Die Dämpfung war nicht abhängig von der Schneedichte im beobachteten Dichtebereich. Aufgrund der ausgeprägten Schichtung der Schneedecke und den daraus folgenden Änderungen der Eigenschaften benachbarter Schichten ergab sich eine grosse Streuung in den Resultaten. Da mit dem Hammerschlag keine perfekt ebenen Wellen erzeugt wurden, wurden vertikale und horizontale Dämpfungskomponenten gemessen. Die starke Schichtung ist wahrscheinlich ein weiterer Grund für die starke Dämpfung von Wellen im Schnee. Im Schnee breiten sich zwei Kompressionswellen, die eine durch das Eisgerüst und die andere durch den Porenraum, und eine Scherwelle durch das Eisgerüst aus. Die gemessene Dämpfung entsprach der Dämpfung der zweiten Kompressionswelle im Porenraum. Die gemessenen Geschwindigkeiten entsprachen der Kompressionswelle durch das Eisgerüst. Aufgrund der kurzen Distanzen zwischen den Messpunkten,

welche aufgrund der starken Dämpfung gewählt werden mussten, konnten die verschiedenen Wellentypen nicht unterschieden werden. Unsere Messausrüstung erlaubte es zum ersten Mal, die Bruchausbreitung in Stabilitätsversuchen direkt in der Schneedecke zu messen. Die Resultate lassen vermuten, dass verschiedene Wellen bei der Bruchausbreitung beobachtet werden: Die erste Welle, welche der tatsächlichen Bruchausbreitung entspricht und die zweite Welle, welche durch die Setzung des Schneebretts nach dem Bruch der Schwachschicht entspricht (Kollapswelle).

Die Daten der Feldexperimente wurden zudem für ein Modell verwendet, welches Schnee als poröses Material darstellt. Erste Resultate lassen darauf schliessen, dass die Modellierung der Wellenausbreitung in einem porösen Medium die vielversprechendste Methode ist. Das Modell überschätzte allerdings die Beschleunigungen in der Schneedecke, wahrscheinlich als Folge von Vereinfachungen in der Geometrie, welche zu einer zu geringen Dämpfung im Modell führte.

Diese vorliegende Arbeit hat zu einem besseren Verständnis der Wellenausbreitung in Schnee beigetragen. Wir haben die Unterschiede und Gemeinsamkeiten zwischen einer normalen Sprengladung und einer Explosion mit Gas aufgezeigt. Beide Arten der Explosion haben eine ähnliche Wirkung. Ein umfangreicher Datensatz zur Wirkung von Explosionen auf Schnee liegt nun vor. In einem weiteren Schritt sollten die Daten aus den Feldversuchen für die Verbesserung der Modellierung der Wellenausbreitung in und über dem Schnee verwendet werden.

Summary

Snow avalanches are a major hazard in mountainous regions with seasonal or perennial snowpacks. Large spontaneous avalanches during or after storms may reach and destroy vital infrastructures such as railway lines, roads or settlements. Ski areas are threatened by spontaneous or skier-triggered avalanches. Artificial triggering of avalanches by explosions has decreased these risks significantly. Avalanches can preventively be triggered during times of minor economic loss. The explosions create a surcharge on the snowpack that may lead to failure and consequently to an avalanche. During the past decades, charges have mainly been delivered by hand or helicopter. Past catastrophic avalanche winters as e.g. the year 1999 in Switzerland showed the high potential of the method and led to new developments: remotely controlled fixed installations. These systems allow triggering an avalanche at times when the triggering possibility is highest: during or directly after a storm – when usually conventional delivery methods cannot be employed. They are installed at fixed positions in avalanche starting zones. An explosion is created by remotely igniting solid explosives or a gas mixture. However, as the systems are limited to a single or a few detonation points per system, the location and effect of these systems need to be carefully chosen. Yet, the effect of different types of explosions on snowpacks is not sufficiently known.

This thesis aims at improving our understanding of the processes above and in the snowpack involved in artificial triggering of avalanches using explosions. We performed large scale field experiments using solid spherical explosives and a mobile gas exploder (directed gas explosion) as sources and measured air pressures and snowpack accelerations on flat terrain. We performed experiments near operational avalanche control systems to validate the importance of the flat field experiments and also measured ground accelerations. To better understand the processes within the snowpack, we conducted small scale experiments and measured accelerations and wave arrival times to assess snowpack attenuation and wave speeds. On small snow blocks ($< 1 \text{ m}^3$), we performed in situ measurements to derive elastic properties and crack propagation speeds relevant for slab avalanche release.

The results of the large scale field experiments showed that the air pressure and derived parameters were decreasing strongly with distance from the point of explosion. Snowpack accelerations and derived parameters strongly decreased with distance from the explosion and depth within the snowpack. Accelerations at a certain depth within the snowpack decreased similarly

with distance as the air pressure. The explosions produced by solid explosives showed similar results as those performed with a gas mixture. The directed gas explosion caused similar loading for angles within a forward cone of about 70° . At 90° from the exploder axis, the air pressure was lower close to the point of explosion but decreased less strongly with distance from the point of explosion. This resulted in elliptically-shaped isolines of air pressure close to the explosion and circle-shaped isolines at far distances as expected with unconfined solid explosives.

Far from the point of explosion, we observed different weak layer failure within the snowpack caused by different processes. They were either caused by crack propagation or the direct impact of the explosion above the snowpack. The experiments at the operational gas exploder showed that our flat field experiments were in good agreement with these systems and hence the flat field experiments were the correct choice to compare different types of explosions. Ground accelerations were small compared to the accelerations within the snowpack. The wave propagation speeds and the low amplitudes suggest that the waves were mainly transmitted from the air to the snowpack and hence the ground rather than over the foundation of the exploder or over areas with a lacking snowpack.

The small scale experiments resulted in similar attenuation values as observed in lab experiments. The attenuation was not depending on snowpack density in the observed density range. However, we observed large scatter in the results due to snowpack layering including changes in snow properties between adjacent layers. As the source using a hammer did not cause perfectly plane waves, vertical and horizontal components were measured. The effect caused by the strong layering may be an additional cause for the strong wave attenuation within snowpacks. Three different types of waves occur in snow: compressional waves in the ice skeleton and the pore space and shear waves in the ice skeleton. The measured attenuation was mainly attributed to the second compressional wave that is strongly attenuated. Wave speeds, however, were related to the fast wave within the ice skeleton. However, due to the short distances between the measuring locations required due to the strong attenuation, the different wave types could not be distinguished. First measurements at small snow blocks as used for crack propagation experiments showed that our method of acoustic wave measurement using accelerometers was suited to derive crack propagation speeds. Signal analysis suggests that there might be different types of waves in crack propagation experiments that could not be observed so far: One wave corresponding to the actual crack propagation and a second wave resulting from settling of the slab that follows weak layer failure – also called collapse wave.

A modeling approach that was based on our experimental data and considered snow as porous material was developed by other researchers. Preliminary results suggest that modeling wave propagation in a porous medium may be the most promising approach to assess the effect of

explosions for complex geometries. However, the model overestimated the observed accelerations due to the simplifications of the snowpack leading to too low attenuation.

With this thesis, we gained an increased understanding of the different waves propagating through the snowpack, and their behavior. We learnt about the effects of a directed gas exploder compared to spherical explosives. Further, we produced a comprehensive dataset on the effect of explosions on the snowpack. In a further step it will be required to use this data to improve modeling of explosions and snow.