

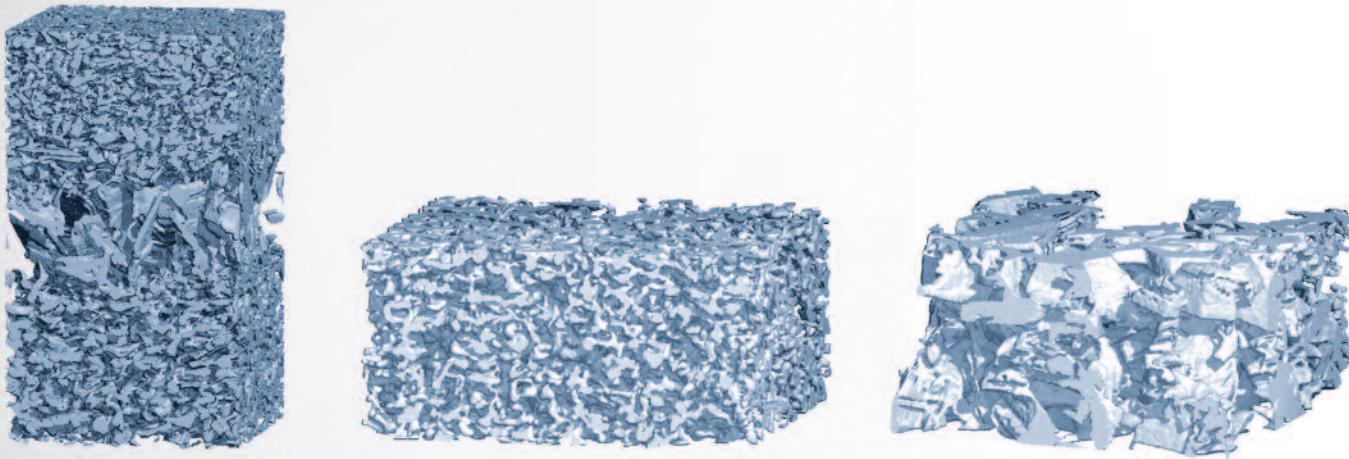
Lawinenbildung

Immer wieder sehen wir uns mit der Kritik konfrontiert, dass manche Beiträge in bergundsteigen zu komplex sind, besonders was die Schnee- und Lawinenkunde betrifft. Wir denken, dass es hier für manche tatsächlich schwierig ist, tiefergehenden Überlegungen zu folgen, ganz einfach weil die Grundlagen fehlen. Und so haben Jürg Schweizer und Ben Reuter einen Beitrag geschrieben, der zwar auch nicht ganz einfach zu verstehen ist, der aber versucht all die Prozesse unter einen Ski zu bringen. Sie stellen dabei die Basics vor, liefern aber meist auch gleich die Hintergründe dazu. Den aktuellen Stand des Wissens - oder des Irrtums ...





Abb. 1 Schnee-Mikrostruktur wie man sie im Computertomographen sichtbar machen kann. Links eine Schwachschicht aus grossen, kantig aufgebauten Kristallen zwischen zwei Schichten aus eher kleinen Kristallen. In der Mitte und rechts zwei Schneeproben vor (Mitte) und nach (rechts) einem 28 Tage dauernden Metamorphose-Experiment. Aus den kleinen Kristallen (Mitte) sind grosse Becherkristalle gewachsen; der Temperaturgradient betrug 50 °C pro Meter. Grafik: Thomas Kämpfer/Margret Matzl, SLF



von Jürg Schweizer und Benjamin Reuter

Im winterlichen Gebirge zählen Lawinen zu den Hauptgefahren. Sie sind rasche, von der Schwerkraft getriebene Massenbewegungen und werden gemeinhin zu den meteorologisch bedingten Naturgefahren gezählt. Im Gegensatz zu anderen Massenbewegungen, wie Steinschlag oder Murgang, kann prognostiziert werden, wie wahrscheinlich sie auftreten, und es ist sogar möglich, im Gelände Tests der Schneedeckenstabilität zu machen. Eine genaue Prognose zu Ort und Zeit ist aber nicht möglich, vor allem auf Grund der komplexen Mikrostruktur des Schnees und seiner ausgeprägten Variabilität auf verschiedenen Skalen.

Die Schneebrettawine ist die häufigste und zugleich bedrohlichste Lawinenart. So gut wie alle Katastrophenlawinen reissen als Schneebrettawinen an, Skifahrerlawinen sowieso. Charakteristisch ist der linienförmige Anriss. Die meist nur oberflächennahe Schichten umfassenden Lockerschneelawinen haben hingegen einen punktförmigen Anriss und sind meist harmlos. Die Schneebrettawine entsteht als Folge einer Reihe von Bruchprozessen in der Schneedecke, und ihr Auftreten kann als ein plötzlicher Wechsel von einem stabilen zu einem instabilen Zustand interpretiert werden. Nur wenn dieser Wechsel nicht abrupt, also aus heiterem Himmel, erfolgt, sondern er sich vorher abzeichnet, ist das Ereignis prognostizierbar. Man spricht in diesem Zusammenhang von sogenannten „Vorläufer-Signalen“. Bei grossen spontanen Lawinen benutzt man für die Prognose zum Beispiel die Neuschneemenge oder den Schneehöhenzuwachs als Vorläufer-Signal. Eleganter wäre natürlich eine Grösse, die direkter mit den mechanischen Eigenschaften der Schneedecke und damit mit deren Stabilität verknüpft ist.

Bei von Schneesportlern ausgelösten Schneebrettawinen ist es kaum möglich, derartige Vorläufer-Signale zu definieren. Diese sind aber auch kaum relevant, da der Lawinenabgang ja primär nicht die Folge eines internen Prozesses ist, sondern durch eine direkte, von aussen wirkende Störung, in der Regel unmittelbar vor dem Lawinenabgang, initiiert wird: die Zusatzlast des Schneesportlers. Eine notwendige, aber nicht hinreichende Voraussetzung ist auch in diesem Fall eine halbwegs labile Schichtung der Schneedecke: Eine kritische Schwachschicht ist von einem geeigneten Schneebrett überlagert. Die Eigenschaften der Schneeschichten entscheiden darüber, ob Brüche entstehen und sich ausbreiten; sie hängen von der Mikrostruktur des Schnees ab. Am Anfang der Lawinenbildung steht also das hochporöse Gebilde des Schnees. Die Lawine beginnt im Kleinen mit einzelnen Brüchen im Eisgerüst. Die sich bis zum Lawinenabgang folgenden Bruchprozesse umfassen letztlich mehrere Größenordnungen, die vom Schneekristall bis zum Lawinenhang reichen. Auf Grund dieser grossen Spanne von Skalen ist die Prognose des Lawinenabgangs derart herausfordernd.

Schnee-Eigenschaften

Schnee besteht zum grössten Teil aus Luft und ist sozusagen ein sehr luftiger Schaum aus Eis. Die Mikro-Computertomographie (Abb. 1) erlaubte während der letzten zehn Jahre einen ganz neuen Blick auf diesen luftigen Schaum, dessen Eigenschaften und insbesondere auf die Schneeeumwandlung. Letztere ist das Resultat der hohen Porosität und der hohen thermischen Aktivität des Schnees. Will heissen, dass im Gerüst aus Eis eifrig hier und da umgebaut wird. Das liegt u. a. daran, dass Schnee ein heisses Material ist, da

Abb. 2 Schematische Darstellung der Entstehung einer spontanen Schneebrettlawine als Folge mehrerer Bruchprozesse:
Schädigung, Bruchinitiierung, Bruchausbreitung bei Erreichen der kritischen Risslänge und letztlich Bruchstillstand in der Schwachschicht, wenn der Zugriss sich öffnet und die Schneemasse in Bewegung gerät. Grafik: Jürg Schweizer

Bruchbildung → Lawinenauslösung

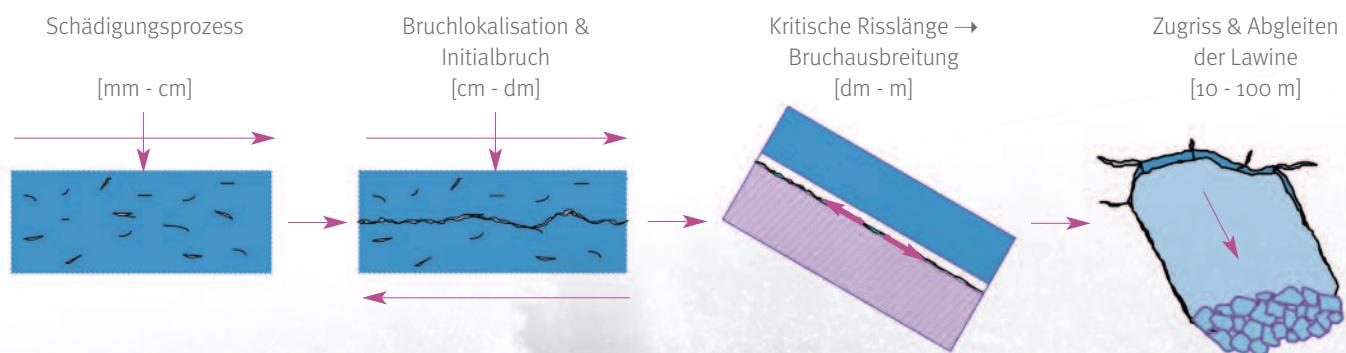


Abb. 3 Schwachschicht aus eingeschneitem Oberflächenreif.

Links im Bild ist die Schwachschicht gebrochen, rechts ist sie noch intakt. Der Bruch hat sich von links her kommend durch die Schwachschicht ausgebreitet. In der Bildmitte kam es zum Zugriss quer durch das Schneebrett und damit zum Rissstillstand. In der Folge hat sich das Schneebrett links im Bild deutlich abgesenkt, da die hochporöse Schwachschicht zusammengebrochen ist.

Foto: ASARC/Bruce Jamieson

Abb. 4 Mit dem PST (Propagation Saw Test), einem bruchmechanischen Test zur Bestimmung der kritischen Risslänge, lässt sich die Neigung der Schneedecke zur Bruchausbreitung bestimmen. Letztere hängt von der komplexen Wechselwirkung zwischen den Eigenschaften der Schwachschicht und der überlagernden Schichten, dem Schneebrett, ab. Man sägt entlang einer Schwachschicht, erzeugt also einen künstlichen Bruch, bis der Riss sich selbst auszubreiten beginnt. Das Experiment wird gefilmt, um nachher genau bestimmen zu können, wann die Bruchausbreitung erfolgte und wie das Schneebrett sich verformte; dazu dienen die schwarzen Marker. Foto: Jürg Schweizer



er stets nahe an seinem Schmelzpunkt existiert und daher Wassermoleküle munter zwischen Dampf und Eis hin- und herwechseln. Aufgrund der detaillierten Kenntnis der Mikrostruktur ist es nun möglich, erste mechanische Schneeeigenschaften aus dem komplexen Eisgerüst abzuleiten. Diese Erkenntnisse dienen vorerst vor allem der Entwicklung von Modellen. So lässt sich nun bestimmen, wie gewisse Parameter - zum Beispiel die Elastizität - die Bruchbildung beeinflussen. Von der Mikrostruktur abgeleitete Größen machen es aber auch möglich, im Feld anwendbare Messmethoden, wie das Schnee-Mikropenetrometer, zu eichen.

Lawinenbildung

Die wesentlichsten Fortschritte im Hinblick auf die Lawinenbildung haben sich in den letzten Jahren vor allem dadurch ergeben, dass man begann, die Bildung der Schneebrettawine als eine Abfolge von Bruchprozessen zu betrachten (Abb. 2). Die beiden wichtigsten Prozesse sind die Bruchinitiierung und die Bruchausbreitung. Ausgehend von einem Schädigungsprozess - zum Beispiel durch zunehmende Belastung während eines Schneefalls - kommt es zur Bruchlokalisation und dem sogenannten Initialbruch. Erreicht der langsam wachsende Initialbruch eine kritische Größe, beginnt schlagartig die schnelle Bruchausbreitung, welche sich über den ganzen Hang erstrecken kann, bis ein Zugriss entsteht, der Bruch in der Schwachschicht zum Stillstand kommt und die abgelöste Schneetafel sich talwärts zu bewegen beginnt.

Ebenso zur neuen Sichtweise auf die Lawinenbildung beigetragen hat auch ein Bild einer gebrochenen Schwachschicht, das sozusa-

gen um die Welt ging und die Phantasie der Forscher befeuerte (Abb. 3). So konnten in der Folge Experimente und Methoden für die bruchmechanische Betrachtungsweise entwickelt werden, die es erlauben, bruchmechanische Eigenschaften von Schnee zu bestimmen (Abb. 4).

Neben den experimentellen Entwicklungen trugen auch theoretische Überlegungen, wie das „Anticrack“-Modell, zu den Fortschritten bei. Dieses Modell der Lawinenauslösung geht davon aus, dass eine Schneebrettawine durch den Kollaps einer Schicht entsteht - hervorgerufen durch eine Kraft senkrecht zur Schicht. Es ermöglicht eine quantitative Auswertung der Verformung des Schneebrettes in den Feldexperimenten zur Bruchausbreitung. Allerdings zeichnet sich ab, dass der vielbeschworene Kollaps eher Folge und nicht Ursache des Bruches in der Schwachschicht ist. Der Initialbruch ist in der Regel also nicht eine Druckbruch, sondern eher eine Kombination von Scher- und Druckbruch, und zwar auch bei einer Fernauslösung im Flachen. Die Scherkomponente spielt eine wichtige, wenn nicht die entscheidende Rolle, nicht zuletzt weil. Die Scherkomponente spielt zweifellos eine wichtige Rolle, nicht zuletzt weil die Schneefestigkeit nicht nur von der Belastungsgeschwindigkeit, sondern auch stark von der Belastungsrichtung abhängt. Viele der typischen Schwachschichten haben eine säulenartige Struktur, die unter Scherbelastung leichter bricht als unter Druck. Wie schon früher angenommen, hat die Hangneigung also einen Einfluss auf die Lawinenauslösung.

Bei der Bruchbildung macht das komplexe Zusammenspiel zwischen der Schwachschicht und den darüber liegenden Schichten - dem ei-





Abb. 5 Von Schneeschuhläufern ausgelöste Schneebrettlawine im Grialetschgebiet. Foto: Jürg Schweizer

gentlichen Schneebrett - die Musik. Dabei spielen Dicke, Dichte, Verformbarkeit und Zugfestigkeit des Schneebrettes und die spezifische Bruchenergie oder Bruchzähigkeit, eine Festigkeitseigenschaft der Schwachschicht die erste Geige. Sie entscheiden darüber, ob es zum Bruch kommt und ob sich ein solcher auch ausbreitet. Mithilfe eines eigens entwickelten Bruchausbreitungstests, dem sogenannten PST (Propagation Saw Test), kann die Neigung der Schneedecke zur Bruchausbreitung abgeschätzt werden. Dabei erzeugt man einen künstlichen Bruch, indem man entlang einer Schwachschicht sägt, bis der Riss sich selbst auszubreiten beginnt.

Schwachschichten

Gibt es innerhalb der Schneedecke einen Bereich mit nur wenigen und noch dazu dünnen Verbindungen zwischen den Eiskörnern, spricht man von einer Schwachschicht, die letztlich wie ein Kartenhaus zusammenbrechen kann. Derartige Schwachschichten bestehen meistens aus eher grossen, kantigen Körnern. Es handelt sich um Kristalle, die bei einem großen Überangebot an Wasserdampf, aufgrund großer lokaler Temperaturunterschiede, rasch gewachsen sind. Die Entstehung kantiger Schichten geschieht in den meisten Fällen an der Schneeoberfläche bei länger andauerndem Strahlungswetter. Die Schneeoberfläche ist dann aufgrund der langwelligen Abstrahlung sehr kalt, ihre Temperatur ist geringer als die Lufttemperatur. Unter diesen Bedingungen kann sich auch Oberflächenreif bilden, vorausgesetzt Luftfeuchtigkeit und Wind lassen es zu. Werden derartige, an der Oberfläche gebildete Schichten eingeschneit, bescheren uns diese Schwachschichten häufig eine „Altschnee“-Situation und beeinflussen die Schneedeckenstabilität über

längere Zeit negativ. Daher auch der Spruch: „Die Schneeoberfläche von heute ist die Schwachschicht von morgen.“ Ganz klar keine Schwachschichten sind Krusten. Aber häufig beobachtet man Schwachschichten aus kantigen Kristallen ober- oder unterhalb von Schmelzharsch- oder Regenkrusten. Krusten können die Bildung von derartigen Schwachschichten begünstigen. Zum Beispiel kann es oberhalb und vor allem unterhalb von Krusten lokal zu grossen Temperaturgradienten in der Schneedecke kommen. Solch starke Temperaturunterschiede auf kleinem Raum sind bekanntlich der Motor für die Bildung kantiger Formen.

Von der Schädigung zur Lawine

Innerhalb der Schneedecke am Hang kann es in der Schwachschicht zu einer Konzentration der Verformung, des „Kriechens“, kommen: Ausgehend von natürlichen Schwachstellen beginnt innerhalb der Schwachschicht ein Schädigungsprozess. Die erhöhte Verformung führt zunächst zum Brechen einzelner Bindungen. Der Schädigungsprozess schreitet voran, indem lokal immer mehr Bindungen brechen, die nicht durch neu entstehende Bindungen kompensiert werden. Am Rand des geschädigten Bereichs entstehen immer grössere Spannungsspitzen. Der geschädigte Bereich wird grösser und grösser. Erreicht die Schädigung oder eben der Initialbruch eine kritische Grösse - man geht von mehreren Dutzenden von Quadratdezimetern aus –, kommt es sozusagen zu einem „Dammbruch“ und ein laufender Riss entsteht. Dieser Bruch breitet sich schnell, mit einer Geschwindigkeit von mehreren Zehnern von Metern pro Sekunde innerhalb der Schwachschicht über den ganzen Hang aus, oft begleitet von einem „Wumm“ -Geräusch. Häufig sieht man davon nichts, bis



Abb. 6 Rissbildung. Ein von einem Skifahrer erzeugter Bruch in einer Schwachschicht hat zum deutlichen Absenken des Schneebrettes geführt - begleitet von einem eindrücklichen Wumm-Geräusch. Fotos: Jürg Schweizer

sich am oberen Rand des Hanges schliesslich ein Riss öffnet - der Zugriss - und die ganze abgelöste Schneeschicht - das Schneebrett - abzugleiten beginnt, sofern der Hang steiler als 30 Grad ist. Die Schneetafel zerbricht und donnert mit schnell zunehmender Geschwindigkeit zu Tale. Eine Schneebrettlawine ist entstanden (Abb. 5).

Zusammenspiel Schneebrett - Schwachschicht

Damit die oben beschriebenen Bruchprozesse der Initiierung und Ausbreitung stattfinden können und eine ganze Schneetafel abgleitet, muss die Schwachschicht von einem Schneebrett überlagert sein, also von einer mindestens leicht verfestigten Schicht, die verformbar, ja in gewissem Sinne elastisch ist. Der Bruchprozess, der zur Schneebrettlawine führt, benötigt nämlich Energie, und diese Energie wird vom Schneebrett geliefert. Nur wenn das Schneebrett genügend gespeicherte Deformationsenergie abgeben kann, kommt es zum laufenden Riss: Die Schwachschicht wird lokal zerstört, es entstehen zwei neue Oberflächen. Und durch die Zerstörung der hochporösen Schwachschicht senkt sich das Schneebrett ganz leicht ab, meist nur um wenige Zehntelmillimeter – aber zuweilen doch spür- und sichtbar (Abb. 6). Diese Verformung des Schneebretts liefert zusätzlich Energie zur Bruchausbreitung.

Häufig existiert zwar eine Schwachschicht, aber das überlagernde Schneebrett vermag die für die Bruchausbreitung nötige Energie nicht zu liefern. Wenn zum Beispiel über mehrere Tage Strahlungswetter herrscht, sodass das Schneebrett zunehmend zu kantigen Formen umgewandelt wird, nimmt die Neigung zur Bruchausbreitung selbst bei ausgeprägter Schwachschicht in der Regel markant ab. Umgekehrt kann ein Triebsschneebrett entstehen, ohne dass es

zu einer kritischen Situation kommt, da sich darunter keine ausgeprägte Schwachschicht befindet. Die Eigenschaften des Schneebretts beeinflussen nicht nur die Bruchausbreitung, sondern auch die Bruchinitiierung bei der Auslösung durch Schneesportler. Offensichtlich nimmt die Auslösewahrscheinlichkeit ab, je tiefer die Schwachschicht in der Schneedecke ist, das heisst je dicker das Schneebrett ist. Die Härte der Schichten und ihre Abfolge innerhalb des Schneebretts bestimmen mit, wie gross die Spannungen sind, die ein Schneesportler in der Tiefe der Schwachschicht initiiert. Auch bei der viel diskutierten Schneebrettauslösung durch Erwärmung ist die Ursache im Schneebrett zu suchen. Die oberflächliche Erwärmung führt zu einer Veränderung der Verformungseigenschaften des Schneebretts und beeinflusst so die Bruchinitiierung wie die Bruchausbreitung. Da der tägliche Temperaturlanglauf die tiefer liegende Schwachschicht nicht erreicht, ändert sich ihre Temperatur hingegen so gut wie nicht. Die Veränderung der Stabilität hängt also nicht mit einer Veränderung der Schwachschicht zusammen, sondern röhrt in diesem Fall vom Schneebrett her. Allerdings muss es natürlich eine halbwegs kritische Schwachschicht geben, dass sich eine Erwärmung auf die Schneedeckenstabilität überhaupt negativ auswirken kann.

Nassschnee- und Gleitschneelawinen

Dringt Wasser in die Schneedecke ein, ändern sich die Schneeeigenschaften rasch und insbesondere die Festigkeit nimmt ab. Dies ist ganz besonders ausgeprägt, wenn in einer 0 °C isothermen Schneedecke das Wasser zum ersten Mal durch den Schnee sickert. Das Wasser kann sich an markanten Schichtgrenzen stauen - zum Bei-

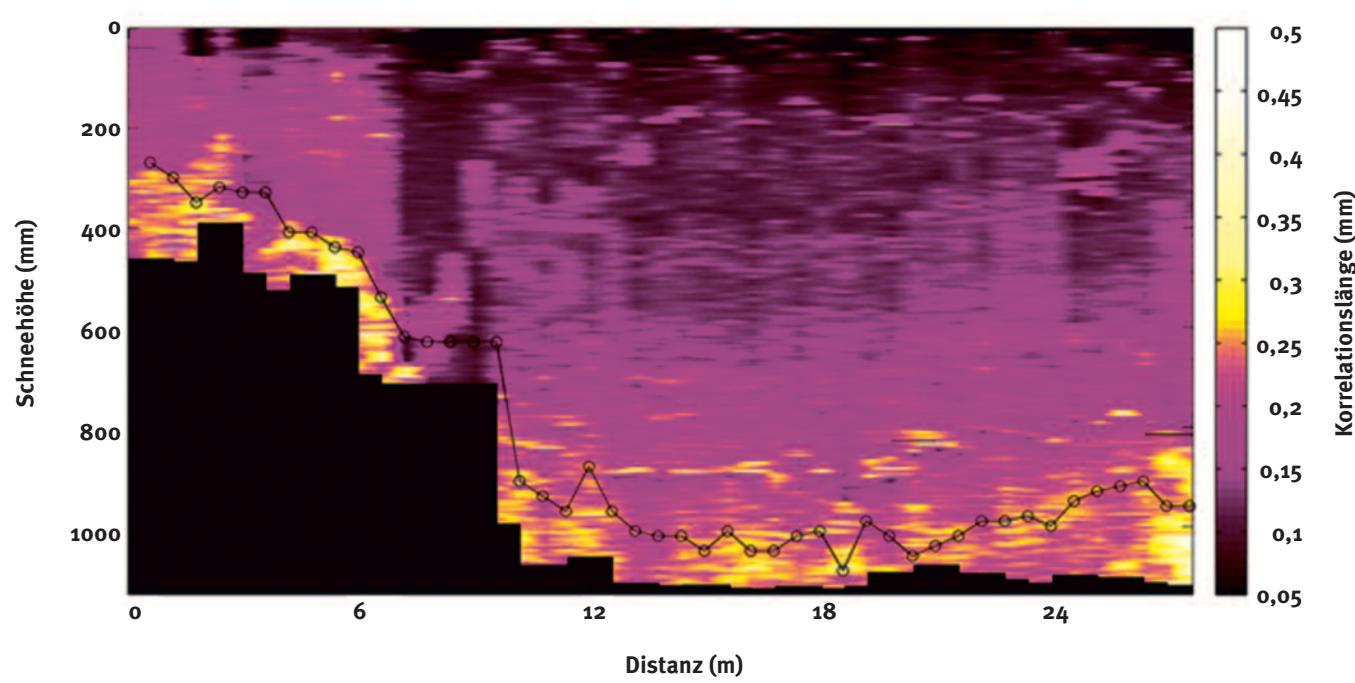


Abb. 7 Mit dem Schnee-Mikropenetrometer (SMP) – Messspitzendurchmesser 5 mm - kann der Eindringwiderstand in die Schneedecke innerhalb weniger Stunden an vielen Orten gemessen werden, so dass die räumliche Verbreitung von Schneeeigenschaften untersucht werden kann. Foto: Jürg Schweizer

Ein mit dem SMP gemessenes Transekt entlang einer Höhenlinie quer durch einen Hang von einem schneearmen zu schneereicheren Bereichen. Dargestellt ist die Korrelationslänge des Eisgerüsts als Mass für die Struktur des Schnees. Grobkörnige, grosse Kristalle zeigen hohe Werte, rundkörnige, kleine Formen niedrigere Werte. Im Wesentlichen sind Schichten über viele Meter ähnlich, auch wenn die Schneehöhe sich ändert. So kommt die mächtige Schwimmschneeschicht an der Basis der Schneedecke überall entlang des Profils vor.

Grafik: Martin Proksch, SLF

spiel am Übergang zu kantig aufgebauten Schichten, über einem Schmelzharschdeckel oder am Boden. Dort wird der Wassergehalt mitunter sehr hoch und die Festigkeit der Schichtgrenze nimmt kurzzeitig deutlich ab. Diese speziellen Bedingungen herrschen in einer bestimmten Höhenlage und Exposition häufig nur kurze Zeit vor: Die Gefahr nimmt schnell zu, klingt dann aber auch wieder ab. Für eine halbwegs zuverlässige Prognose muss die Energiebilanz an der Schneoberfläche und der Wassergehalt in der Schneedecke berücksichtigt werden. Diese wichtigen Größen können nicht einfach aus der Lufttemperatur abgeschätzt, sondern müssen mit Modellen berechnet werden. Eine Schneedecke, die einmal komplett durchfeuchtet wurde, d.h. durch welche frei laufendes Wasser sickerte und die nun durchgehend aus Schmelzformen besteht, ist dann relativ stabiler.

Besteht die Schneedecke aus nur einer Schicht oder enthält keine Schwachschichten, so bilden sich kaum Lawinen - es sei denn die ganze Schneedecke rutscht auf dem Boden ab. Man spricht dann von einer Gleitschneelawine. Gleitschneelawinen entstehen vor allem dann, wenn nach einem warmen Herbst der Boden beim Einschneien im Frühwinter noch nicht gefroren ist und es gleich zu Beginn des Winters viel schneit. Treten Gleitschneelawinen bei derartigen Bedingungen im Früh- oder Hochwinter auf, wenn die Schneedecke noch kalt und nur die allerunterste Schicht leicht feucht ist, spricht man von kalten Gleitschneelawinen. Im Frühjahr hingegen entstehen Gleitschneelawinen, ähnlich wie Nassschneelawinen, durch einsickerndes Schmelzwasser, das sich an der Grenzschicht Schnee - Boden staut, und so zum Gleitprozess führt.

Gleitschneelawinen sind schwierig zu prognostizieren und können Verkehrswege oft über längere Zeit gefährden. Nicht immer kündigt

sich eine Gleitschneelawine über ein sich vorgängig öffnendes „Fischmaul“ an – und nicht jedes Fischmaul führt zu einer Gleitschneelawine. Doch bereits durch die gleitende Schneedecke kann es zu einer Gefährdung kommen. Drückt eine mächtige, gleitende Schneetafel auf den Masten einer Seilbahn, wirken grosse Kräfte, die den Masten beschädigen können.

Variabilität - Wind und Wetter

Ein weiteres für die Lawinenbildung wichtiges Charakteristikum der Schneedecke, neben der vertikalen Schichtung, ist die räumliche Variabilität. Die Eigenschaften der Schichten ändern sich in einem Hang: So kann zum Beispiel eine Schicht dünner oder härter werden oder gar zum Rand des Hanges hin verschwinden. Nur wenn die für die Lawinenbildung kritische Schichtung (Schneebrett über Schwachschicht) über eine grössere Fläche vorkommt, können Lawinen überhaupt entstehen. Ist die Variabilität der Schneedecke sehr gross, d.h. die Schneeeigenschaften ändern sich alle paar Meter, dann können kaum Lawinen entstehen. Die viel gefürchtete Variabilität kann also auch einen günstigen Einfluss auf die Stabilität haben. Aktuelle Untersuchungen mit dem Schnee-Mikropenetrometer (Abb. 7) haben gezeigt, dass die Variationen in einem Hang weit weniger gross und zufällig sind, als einzelne Testresultate das in der Vergangenheit vermuten liessen: Vor allem kritische Schwachschichten kommen häufig verbreitet vor.

Wie entsteht jedoch die Variabilität der Schneedecke? Wind ist sicherlich der prominenteste Einflussfaktor und sorgt in Wechselwirkung mit der Topographie primär für unterschiedlich mächtige Schneearlagerungen. Die Strahlung, deren Stärke sich mit Ausrich-

Literatur (Auswahl)

- Harvey, S., Rhyner, H. und Schweizer, J., 2012. Lawinenkunde. Bruckmann Verlag GmbH, München, Germany, 192.
- Heierli, J., Zaiser, M. und Gumbisch, P., 2010. Der Knall im Lawinenhang. Die Ursache von Schneebrettlawinen. Physik in unserer Zeit, 41(1): 31-34.
- Mitterer, C. und Schweizer, J., 2013. Gleitschneelawinen. bergundsteigen - Zeitschrift für Risikomanagement im Bergsport. Österreichischer Alpenverein, Innsbruck, Austria, 22(4): 42-49.
- Mitterer, C. und Schweizer, J., 2014. Nassschneelawinen. bergundsteigen - Zeitschrift für Risikomanagement im Bergsport. Österreichischer Alpenverein, Innsbruck, Austria, 23(1): 52-57.
- Schneebeli, M., 2015. Warum alter Schnee jung ist. Physik in unserer Zeit, 46(3): 126-130.
- Schweizer, J., 2008. Russisches Roulette? bergundsteigen - Zeitschrift für Risikomanagement im Bergsport. Österreichischer Alpenverein, Innsbruck, Austria, 17(1): 66-69.
- Schweizer, J., 2003. Rutschblock 73 - Verifikation der Lawinengefahr. Bergundsteigen - Zeitschrift für Risikomanagement im Bergsport. Österreichischer Alpenverein, Innsbruck, Austria, 12(4): 56-59.
- Schweizer, J. und Reuter, B., 2011. Einfluss von Erwärmung und Strahlung auf die Schneedecke. bergundsteigen - Zeitschrift für Risikomanagement im Bergsport. Österreichischer Alpenverein, Innsbruck, Austria, 20(4): 80-83.
- Schweizer, J., Bartelt, P. and van Herwijnen, A., 2015. Snow avalanches. In: W. Haeberli and C. Whiteman (Editors), *Snow and Ice-Related Hazards, Risks and Disasters. Hazards and Disaster Series*. Elsevier, Amsterdam, Netherlands, S. 395-436.
- SLF (Editor), 2013. Schnee. Primus Verlag, Darmstadt, Germany, 160 pp.

tung und Neigung des Hanges ändert, beeinflusst die Schneedecke vor allem nach der Ablagerung der Schichten. Der Schneedeckenaufbau ist demnach zu einem guten Teil nicht zufällig, sondern das Produkt von Witterung und Gelände - während und nach der Ablagerung. Auch wenn wir einen grossen Teil der Schneeschichtung begreifen, wird ein Teil der Variation ungewiss bleiben, denn unsere Messgeräte und Modelle sind nicht beliebig genau.

Prognostizierbarkeit

Aufgrund der Wechselwirkung von Gelände und Wetter (Strahlung, Wind etc.) können die Eigenschaften der Schneedecke also räumlich und zeitlich stark variieren. Auch wenn diese Variationen zu einem guten Teil nicht zufällig sind, liegen die Schwierigkeiten für deren Vorhersage darin, die Schneedeckeneigenschaften mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung zu modellieren. Eine präzise Prognose zu Raum und Zeit, d.h. wann und wo genau eine Lawine anbricht, ist daher heute – und wohl noch längere Zeit – nicht möglich. Möglich ist es allerdings, die Wahrscheinlichkeit eines Abgangs in etwa abzuschätzen, insbesondere für ein grösseres Gebiet. Darauf beruht die Lawinenwarnung. Die Prognose der Lawinengefahr beinhaltet die Wahrscheinlichkeit für Lawinen in einer bestimmten Region. Es gibt also „Lawinenzeiten“. Daneben gibt es auch „Lawinorte“, d.h. es ist weitgehend voraussehbar, wo grosse Lawinen entstehen und bis ins Tal vorstossen können. Darauf beruht die Gefahrenzonierung. Zusammenfassend lässt sich also sagen, dass die Prognostizierbarkeit abnimmt, je kleiner das betrachtete Gebiet ist - ein nur scheinbar paradoxes Resultat, das in der probabilistischen Natur der Prognose begründet ist.

Die Lawinengefahr kann für eine Region einigermassen zuverlässig beurteilt werden, die Trefferquote ist je nach Situation zwischen 70 und 90 %. Bereits deutlich schwieriger ist es, zu beurteilen, wie gefährdet ein Strassenabschnitt ist. Und letztlich unmöglich ist es, zu prognostizieren, ob sich eine Lawine in einem einzelnen Lawinenzug lösen wird. Trotz der unweigerlich geringen Trefferquote heisst das aber keinesfalls, dass Massnahmen - zum Beispiel eine Sperrung oder eine Evakuierung - bei entsprechend hoher Gefahr deswegen nicht angebracht seien. Dazu sind die Konsequenzen eines Lawinenabgangs zu schwerwiegend; zu viel steht auf dem Spiel. Derartige Ereignisse werden demnach auch mit „low probability, high consequences“ beschrieben.

Gefahrenbeurteilung und Fazit

Die Schneedeckenstabilität im Hinblick auf die Auslösung von Schneebrettlawinen zu beurteilen, ist nach wie vor kein einfaches Unterfangen. Zwar ist unser Prozessverständnis bezüglich der Entstehung von Lawinen in den vergangenen Jahren gewachsen, dennoch verschliessen sich die wesentlichen Prozesse einer direkten Messung, und die zeitliche und räumliche Variation der Schneedecke schränkt die Vorhersehbarkeit naturgemäß ein.

Wesentlich für das Verständnis ist es, den Abgang einer trockenen Schneebrettawine als das Resultat mehrerer Bruchprozesse zu betrachten, bei denen sowohl die Eigenschaften der Schwachschicht wie auch des Schneebrettes eine entscheidende Rolle spielen. Nur wenn Schwachschicht und Schneebrett sozusagen „zusammenpassen“, kann überhaupt eine Schneebrettawine entstehen. Dies gilt



sowohl für sich spontan bildende Lawinen, als auch für künstlich ausgelöste Lawinen. Ob sich eine Lawine bildet, hängt also in erster Linie von der Schichtung der Schneedecke ab. Das bessere Verständnis, wie die Schichtung zur Lawinenbildung beiträgt, erlaubt es heute, dem Prozessdenken wieder den gebührenden Platz bei der Lawinengefahrenbeurteilung einzuräumen. Selbstverständlich variieren die Schichteigenschaften in Raum und Zeit, aber gerade in Zeiten höherer Lawinenaktivität lässt sich beobachten, dass wesentliche Schneedeckeneigenschaften über weite Gebiete der Alpen ähnlich sind – nicht selten nach einem schneearmen Frühwinter oder nach einer niederschlagsfreien Schönwetterperiode. Die Schneedecke zu berücksichtigen heisst, sich zu überlegen, ob die passende Schichtung vorhanden ist. Ist die Schwachschicht verbreitet vorhanden? Ist sie von einem Schneebrett überlagert? Lässt sich ein Bruch in der Schwachschicht initiieren und wird er sich ausbreiten? Neben der Analyse dieser lawinenbildenden Prozesse, bleiben uns noch zwei weitere Herangehensweisen zur Beurteilung der Gefahr und letztlich des Risikos. Einerseits gibt es die strategischen Methoden, die Hangsteilheit und Lawinengefahrenstufe berücksichtigen, andererseits Risikoüberlegungen, welche die Konsequenzen eines Lawinenabgangs betrachten: Was würde passieren wenn? Verknüpfen wir die strategischen Methoden mit den lawinenbildenden Prozessen und den Risikoüberlegungen sind wir heute wohl im Stande bessere, risikobasierte Entscheide im Bezug auf die Lawinengefahr zu fällen als früher. Trotzdem ist es auch nach fast 80 Jahren Schnee- und Lawinenforschung aber nicht möglich, den genauen Ort und Zeitpunkt eines Lawinenabgangs zu prognostizieren. Der Berücksichtigung dieser Unsicherheit kommt bei Entscheiden von grosser Tragweite daher grosse Bedeutung zu.



GALAXY

Vielseitiger Helm entworfen für Alpinismus, Klettergärten, Eisklettern und Klettersteige. Das kompakte Gehäuse zeichnet sich durch Leichtigkeit und gute Passform aus und bietet optimale Belüftung durch die zahlreichen Öffnungen auf der Helmoberfläche. Einstellbare Größe cm 50+61. 350 g



BE UP

Sicherungs- und Abseilgerät. Es ist intuitiv und einfach zu verwenden und ermöglicht das Sichern des Vorsteigers auf flüssige Weise und die wirksame Abbremseung des Seiles durch "V"-förmige Rillen. Für den Gebrauch mit: EN 892- Halb- und Zwillingssseile, Ø 7,3+9,0 mm und Einfachseilen, Ø 8,6+10,5 mm. 85 g



NUPTSE EVO

Zwölfzackige Steigeisen für Hochtouren, Steileis-Begehung und Firnflanken. Gerippte Frontzacken für einen besseren Halt auf dem Eis. Innovatives und ultraschnelles System zur Macro-Regulierung der EU-Größen-einheiten 36+43 / 42+47. Gewicht Variante Semiautomatic: 1000 g.

