

Lawinenbildung und Lawinengefahrenbeurteilung

Jürg Schweizer

1 Einleitung

Lawinen gehören im winterlichen Gebirge 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 in Ort und Zeit ist aber nicht möglich, insbesondere weil die komplexe Mikrostruktur des Schnees und insbesondere seine ausgeprägte Variabilität auf verschiedenen Skalen einem rein deterministischen Ansatz nicht zugänglich sind.

Die Schneebrettlawine ist die häufigste und zugleich bedrohlichste Lawinenart. So gut wie alle Katastrophenlawinen reissen als Schneebrettlawinen an – charakteristisch ist der linienförmige Anriss. Die meist nur oberflächennahe Schichten umfassenden Lockerschneelawinen haben hingegen einen punktförmigen Anriss und sind meist harmlos.

Die Schneebrettlawine 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 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 deren Stabilität verknüpft ist.

Bei von Schneesportlern ausgelösten Schneebrettlawinen ist es kaum möglich, derartige Vorläufer-Signale zu definieren, da die Störung direkt, von aussen, und in der Regel unmittelbar vor dem Lawinenabgang erfolgt; es ist primär die Schichtung der Schneedecke (Schneebrett über Schwachschicht), die eine notwendige – aber nicht hinreichende Voraussetzung darstellt. Die Eigenschaften der Schneesichten entscheiden

darüber, ob Brüche entstehen und sich ausbreiten; sie hängen von der Mikrostruktur des Schnees ab. Am Anfang steht also das hochporöse Gebilde des Schnees – ein Gerüst aus Eis. Die Lawinen entstehen im Kleinen; die Bruchprozesse umfassen aber letztlich mehrere Grössenordnungen vom Schneekristall bis zum Lawinenhang – was die Prognose derart herausfordernd macht.

2 Schneeeigenschaften

Die Mikro-Computertomographie hat in den letzten zehn Jahren einen ganz neuen Blick auf die Schneeeigenschaften und insbesondere die Schneeumwandlung erlaubt. Letztere ist das Resultat der hohen Porosität und der hohen thermischen Aktivität des Schnees, der als heisses Material, stets nur wenige Grad vom Schmelzpunkt entfernt, betrachtet werden kann. Es ist nun möglich, erste mechanische Schneeeigenschaften aus der Mikrostruktur abzuleiten. Diese Erkenntnisse dienen vorerst vor allem der Modellbildung. Es lässt sich damit bestimmen, wie verschiedene Parameter, zum Beispiel die Elastizität, die Bruchbildung und -ausbreitung beeinflussen.

Die wesentlichsten Fortschritte im Hinblick auf die Lawinenbildung ergaben sich in den letzten Jahren, seit die Wissenschaft die Schneebrettlawine konsequent als eine Abfolge von Bruchprozessen betrachtet (Abb. 1). Die entscheidenden Prozesse sind dabei die Bruchbildung, die Bruchausbreitung und letztlich der Bruchstillstand. Ausschlaggebend für die beiden ersten Prozesse, also ob es zum Bruch kommt und ob sich ein solcher auch ausbreitet, ist das komplexe Zusammenspiel zwischen Schwachschicht und den darüber liegenden Schichten, dem Schneebrett (Abb. 2). Dabei spielen Dicke, Dichte, Elastizität und Zugfestigkeit des Schneebrettes und die spezifische Bruchenergie (oder Bruchzähigkeit) der Schwachschicht eine Schlüsselrolle. Die Festigkeit einer bestimmten Schneeart ist umso geringer je schneller die Belastung ist und hängt auch von der Richtung der Belastung ab. Schneesportler oder Sprengungen lösen Lawinen besonders effizient aus, da sie die Schneedecke lokal impulsartig, schnell und heftig, belasten.

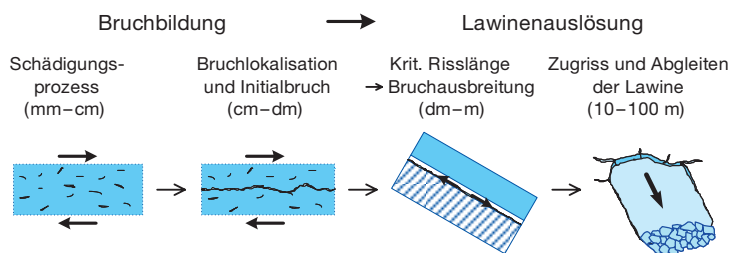


Abb. 1: Schematische Darstellung der Entstehung einer spontanen Schneebrettlawine als Folge mehrerer Bruchprozesse: Schädigung, Bruchinitialisierung, Bruchausbreitung bei Erreichen der kritischen Risslänge und letztlich Bruchstillstand in der Schwachschicht, wenn der Zugriss sich öffnet und die Schneemasse in Bewegung gerät.



Abb. 2: Mit dem PST, 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.

3 Bruchprozesse

Gibt es innerhalb der Schneedecke einen Bereich mit nur wenigen und auch noch schwachen Verbindungen zwischen den Eiskörnern, spricht man von einer Schwachschicht, die letztlich wie ein Kartenhaus zusammenbrechen kann. Bei Überlastung ausgehend von natürlichen Schwachstellen kann es nämlich innerhalb der Schwachschicht zu einem Schädigungsprozess kommen. Zuerst einzelne, dann lokal immer mehr Bindungen brechen und werden nicht durch neue kompensiert. Dadurch entstehen am Rand des geschädigten Bereichs immer grössere Spannungsspitzen, und die Schädigung wird immer grösser. Schliesslich, wenn der geschädigte Bereich gross genug wird –

man geht von mehreren Dutzenden von Quadratdezimetern aus –, kommt es sozusagen zu einem Dammbruch, 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 sich am oberen Rand des Hanges schliesslich ein Riss öffnet, der Zugriss, und die ganze abgelöste Schneesicht, 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. 3).



Abb. 3: Von Schneeschuhläufern ausgelöste Schneebrettlawine im Grialetschgebiet.

4 Zusammenspiel Schneebrett-Schwachschicht

Damit die oben beschriebenen Bruchprozesse der Initialisierung und Ausbreitung stattfinden können und eine ganze Schneetafel abgleitet, braucht es also über der Schwachschicht das Schneebrett, eine mindestens leicht verfestigte Schicht, die verformbar, ja in gewissem Sinne elastisch ist. Der Bruchprozess, der zur Schneebrettlawine führt, braucht 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 spürbar. Diese Verformung des Schneebrettes liefert zusätzlich Energie zur Bruchausbreitung.

5 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 Beispiel am Übergang zu kantigen 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 für eine bestimmte Höhenlage und Exposition häufig nur kurze Zeit, die Gefahr nimmt schnell zu, klingt dann aber auch wieder ab. Für eine halbwegs zuverlässige Prognose, muss die Energiebilanz an der Schneeoberfläche und der Wassergehalt in der Schneedecke berücksichtigt werden. Eine Schneedecke, die einmal komplett durchfeuchtet ist, das heisst aus welcher freies Wasser abgelaufen ist und welche durchgehend aus Schmelzformen besteht, ist dann relativ stabil.

Besteht die Schneedecke nur aus einer Schicht oder enthält keine Schwachschichten, so gibt es kaum Lawinen – ausser 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. Durch Gleitschnee können auch sehr grosse Kräfte entstehen, wenn zum Beispiel eine mächtige Schneetafel auf den Masten einer Seilbahn wirkt.

6 Variabilität – Wind und Wetter

Ein weiteres für die Lawinenbildung wichtiges Charakteristikum der Schneedecke, neben der vertikalen Schichtung, ist die flächige Variabilität. Die Eigenschaften der Schichten, zum Beispiel in einem Hang, ändern sich: Die Schicht wird dünner oder härter oder verschwindet gegen den Rand des Hanges hin ganz. Nur wenn die für die Lawinenbildung kritische Schichtung («elastisches» Schneebrett über Schwachschicht) über eine grössere Fläche vorkommt, können Lawinen überhaupt entstehen. Ist die Variabilität der Schneedecke sehr gross, das heisst ändern sich die Schneeeigenschaften alle paar Meter, dann können kaum Lawinen entstehen. Die viel gefürchtete Variabilität kann also auch günstig sein. Aktuelle flächige Untersuchungen mit dem Schnee-Mikro-penetrometer (SMP) (Abb. 4) haben gezeigt, dass die Variationen in einem Hang weit weniger gross und zufällig sind, als einzelne Testresultate das in der Vergangenheit vermuten liessen, da vor allem kritische Schwachschichten häufig verbreitet vorkommen.

Wie jedoch entsteht die Variabilität der Schneedecke? Wind ist sicherlich der prominenteste Einflussfaktor und sorgt in Wechselwirkung mit der Topographie primär für unterschiedlich mächtige Schneeablagerungen. Die Strahlung, die je nach Exposition und Hangneigung verschieden stark ist, 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.

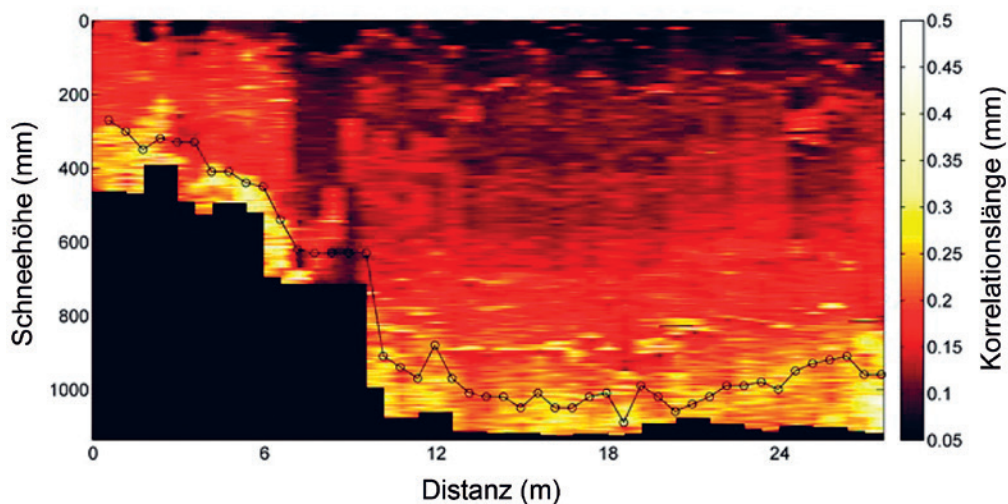


Abb. 4: Mit dem Schnee-Mikropenetrometer (SMP) (oben, Messspitze, Durchmesser 5 mm) kann der Eindringwiderstand in die Schneedecke innerhalb weniger Stunden an vielen Orten gemessen werden, sodass die flächige Verbreitung von Schneeigenschaften untersucht werden kann. Ein mit dem SMP gemessenes Transekt (Querprofil entlang einer Höhenlinie) (unten) zeigt, dass wesentliche Schichten über viele Meter ähnlich sind, auch wenn die Schneehöhe sich stark ändert (links eine Rippe). Dargestellt ist die Korrelationslänge des Eisgerüsts als Mass für die Korngrösse. Die grossen Werte der Korrelationslänge korrespondieren mit einer grobkörnigen, mächtigen Schwimmschneeschiicht an der Basis der Schneedecke (Grafik: Martin Proksch/SLF).

7 Prognostizierbarkeit

Aufgrund der Topographie und der Wechselwirkung von Gelände und Wetter (Strahlung, Wind usw.) können die Eigenschaften der Schneedecke also räumlich und zeitlich stark variieren. Auch wenn diese Variationen zu einem guten Teil nicht zufällig sind, sind sie dem menschlichen Auge trotzdem verborgen. Eine präzise Prognose in Raum und Zeit, das heisst wann und wo genau eine Lawine anbricht, ist daher heute – und wohl noch längere Zeit – nicht möglich. Möglich ist es

allerdings, die Wahrscheinlichkeit eines Abganges 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 «Lawinenorte», das heisst 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 be-

trachtete 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 Prozent. Bereits deutlich schwieriger ist es zu beurteilen, wie gefährdet ein Strassenabschnitt ist. Und letztlich unmöglich ist es, zu prognostizieren, wo und wann sich eine Lawine in einem einzelnen Lawinenzug löst. Trotz der unweigerlich geringen Trefferquote heisst das aber keinesfalls, dass Massnahmen, zum Beispiel eine Sperrung oder Evakuierung, bei entsprechend hoher Gefahr deswegen nicht angezeigt sind. Dazu sind die Konsequenzen eines Lawinenabganges zu hoch – zu viel steht auf dem Spiel. Ein derartiges Ereignis wird denn auch als «low probability, high consequences» beschrieben.

8 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 in den vergangenen Jahren bezüglich der Entstehung von Lawinen 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, die Bildung einer trockenen Schneebrettlawine 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 Schneebrettlawine entstehen. Dies gilt sowohl für sich spontan lösende 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 einen gebührenden Platz bei der Lawinengefahrenbeurteilung beizumessen. Selbstverständlich variieren die Schichteigenschaften in Raum und Zeit, aber gerade in Zeiten höherer Lawinenaktivität lässt sich beobachten, dass wesentliche Schneedeckeneigenschaften über weite Gebiete der Schweizer 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

(Schneebrett-Schwachschicht) vorhanden ist, ob sich ein Bruch in der Schwachschicht initiieren lässt und ob der Bruch sich dann auch ausbreitet. Verbindet man die strategischen Methoden, die Hangsteilheit und Lawinengefahrenstufe berücksichtigen, mit derartigem Prozessdenken und kombiniert beides mit Risikoüberlegungen (Was würde passieren, wenn?) lassen sich heute wohl doch bessere Entscheide zur Beurteilung der Lawinengefahr fällen als früher. Trotzdem ist es auch nach fast 80 Jahren Schnee- und Lawinenforschung aber nicht möglich, den genauen Ort und Zeitpunkt eines Lawinenabganges zu prognostizieren. Der Berücksichtigung dieser Unsicherheit kommt bei Entscheiden von grosser Tragweite daher grosse Bedeutung zu.

9 Literatur (Auswahl)

- HARVEY, S.; RHYNER, H.; SCHWEIZER, J., 2012: Lawinenkunde. Bruckmann Verlag GmbH, München, Germany, 192 S.
- MITTERER, C.; SCHWEIZER, J., 2013: Gleitschneelawinen. bergundsteigen – Zeitschrift für Risikomanagement im Bergsport. Österreichischer Alpenverein, Innsbruck, Austria, 22, 4: 42-49.
- MITTERER, C.; SCHWEIZER, J., 2014: Nassschneelawinen. bergundsteigen – Zeitschrift für Risikomanagement im Bergsport. Österreichischer Alpenverein, Innsbruck, Austria, 23, 1: 52-57.
- SCHWEIZER, J., 2008. Russisches Roulette? bergundsteigen – Zeitschrift für Risikomanagement im Bergsport. Österreichischer Alpenverein, Innsbruck, Austria, 17, 1: 66-69.
- SCHWEIZER, J.; REUTER, B., 2011: Einfluss von Erwärmung und Strahlung auf die Schneedecke. bergundsteigen – Zeitschrift für Risikomanagement im Bergsport. Österreichischer Alpenverein, Innsbruck, 20, 4: 80-83.
- SCHWEIZER, J.; BARTELT, P.; VAN HERWIJNEN, A., 2015: Snow avalanches. In: HAEBERLI, W.; WHITEMAN, C. (Editors), Snow and Ice-Related Hazards, Risks and Disasters. Hazards and Disaster Series. Elsevier, 395-436.

Dr. **Jürg Schweizer** studierte Umweltphysik an der ETH Zürich und promovierte in Glaziologie. Er ist langjähriger leitender wissenschaftlicher Mitarbeiter am SLF mit den Forschungsschwerpunkten Schneemechanik, Lawinenbildung, Schneedeckenstabilität und Lawinenprognose. Die Erkenntnisse aus der Forschung setzt er um in der Ausbildung und als Sachverständiger bei Lawinenunfällen. Seit 2011 ist er Leiter des SLF.

Résumé: Formation des avalanches et appréciation du danger d'avalanches

En hiver, les avalanches de plaque sèches constituent le principal danger en montagne. L'évaluation de la stabilité du manteau neigeux liée au déclenchement des avalanches de plaque reste une entreprise complexe. Il est vrai que nous avons aujourd'hui une bien meilleure compréhension du processus de formation des avalanches, mais les processus essentiels ne peuvent être directement mesurés, et la variation temporelle et spatiale du manteau neigeux limite naturellement la prévisibilité.

Le départ d'une plaque de neige sèche est le résultat de plusieurs processus de rupture. Au sein d'une couche fragile située sous ce qu'on appelle une plaque, un processus de dégradation se développe en cas de surcharge à partir d'une zone fragile spécifique. Certaines liaisons se rompent dans la structure de glace très poreuse et complexe, d'autres se créent, mais moins fréquemment et moins rapidement. La déformation progresse et la dégradation également, jusqu'à ce qu'une fissure apparaisse. Si la fissure dans la couche fragile est suffisamment importante, le processus, qui se déroulait jusqu'alors lentement et localement, bascule brusquement dans une propagation spontanée et rapide de la rupture. En quelques secondes, la fissure se propage le long de la couche fragile sur tout le versant, semblable à un effet domino, de telle sorte qu'une partie importante des couches supérieures se détache, avant que l'on arrive à une rupture en traction dans toute la largeur de la plaque. La plaque se brise et dévale de plus en plus rapidement la pente si l'inclinaison de celle-ci dépasse environ 30 degrés. Ainsi, les processus essentiels lors de la formation d'une avalanche de plaque sèche sont l'initiation de la rupture, la propagation de la rupture, et finalement l'arrêt de la rupture, qui correspond à la fissure de traction. Lors de ces trois processus, les caractéristiques de la couche fragile et celle de la plaque de neige jouent un rôle déterminant. Ce n'est que lorsque la couche fragile et la plaque sont pour ainsi dire compatibles qu'une avalanche de plaque peut se déclencher. Cela s'applique aussi bien aux avalanches spontanées qu'aux avalanches déclenchées artificiellement. Les amateurs de sports de neige ou les explosives sont particulièrement aptes à déclencher, car ils surchargent rapidement et fortement le manteau neigeux. La stratification joue également un rôle plus important qu'on ne le pensait auparavant dans la anches de neige humide. Ce n'est que lorsque l'eau de fonte qui s'infiltre peut fragiliser une couche sur une surface assez étendue, notamment en s'accumulant à une interface, qu'une avalanche de neige mouillée peut se déclencher.

La formation d'une avalanche dépend donc en premier lieu de la stratification du manteau neigeux. Cette meilleure connaissance de la contribution de la stratification à la formation des avalanches permet aujourd'hui de rendre à la compréhension des processus la place qu'elle mérite dans l'appréciation du danger d'avalanche. Bien sûr, les caractéristiques des couches varient dans le temps et l'espace, mais c'est justement lorsque l'activité avalancheuse est élevée que l'on

constate une similarité des propriétés essentielles du manteau neigeux sur de larges régions des Alpes suisses – souvent après un début d'hiver peu enneigé, ou après une période de beau temps.

Tenir compte du manteau neigeux signifie que l'on se pose les questions suivantes: une stratification plaque – couche fragile existe-t-elle?, Est-ce qu'une rupture initiale peut se produire dans la couche fragile? Est-ce que cette rupture peut éventuellement se propager? Si on combine les méthodes stratégiques avec la compréhension du processus, et si on associe les deux avec une prise en compte du risque (que se passerait-il, si?), on arrive aujourd'hui à de bien meilleures prises de décision pour l'appréciation du danger d'avalanches. Malgré cela, même après quelques 80 années de recherches en nivologie, il n'est toujours pas possible de prévoir l'emplacement et l'instant exact d'un départ d'avalanche. La prise en compte de cette incertitude joue un rôle important pour les prises de décision d'envieure.

Jürg Schweizer a étudié la physique de l'environnement à l'ETH Zurich et il est porteur d'une thèse en glaciologie. Collaborateur de longue date du SLF dans les domaines de recherche de la mécanique de la neige, de la stabilité du manteau neigeux, de la formation et de la prévision des avalanches, il est instructeur avalanches et expert en cas d'accident d'avalanche. Il est directeur du SLF depuis 2011.

Riassunto: Formazione di una valanga e valutazione del pericolo di valanghe

In ambiente invernale innevato, le valanghe asciutte di neve a lastroni rappresentano la fonte principale di pericolo. La valutazione della stabilità del manto nevoso in riferimento al distacco di valanghe di neve a lastroni continua a essere un'impresa non facile. Anche se oggi conosciamo molto meglio i processi che causano la formazione di una valanga, quelli principali non si lasciano misurare direttamente e le variazioni temporali e spaziali del manto nevoso limitano in modo naturale la prevedibilità.

Il distacco di una valanga asciutta di neve a lastroni è il risultato di vari processi di frattura. Quando viene sollecitato un punto particolarmente debole di uno strato fragile situato sotto il cosiddetto lastrone di neve, inizia un processo di destabilizzazione. Singoli legami della struttura di giacchio altamente porosa e complessa si rompono. Contemporaneamente si formano anche nuovi legami, ma con minore frequenza e velocità. La deformazione aumenta e la lesione si espande, sino a causare una crepa. Quando la crepa all'interno dello strato fragile è sufficientemente grande, il processo di destabilizzazione – che sino a ora si è svolto lentamente ed è rimasto confinato a livello locale – si trasforma improvvisamente in una propagazione della rottura spontanea e fulminea. Nel giro di pochi secondi la frattura si propaga nello strato fragile lungo tutto il pendio come un effetto domino, causando il distacco degli strati sovrastanti e quindi la rottura trasversale del

lastrone di neve dovuta a trazione. Il lastrone di neve va in frantumi e, se il pendio è più ripido di 30 gradi, precipita a valle con velocità progressivamente sempre più alta.

I principali processi che causano la formazione di una valanga asciutta di neve a lastroni sono quindi l'innesco della frattura, la sua propagazione e infine il suo arresto, quando cioè il lastrone si rompe in seguito a trazione. In tutti e tre i processi giocano un ruolo fondamentale sia le caratteristiche dello strato fragile, sia quelle del lastrone di neve. Una valanga di neve a lastroni può infatti formarsi solo se lo strato fragile e il lastrone di neve sono per così dire «compatibili» tra di loro. Ciò vale sia per le valanghe spontanee e per quelle artificiali. Gli appassionati di sport invernali o le cariche esplosive sono particolarmente efficienti nel provocare il distacco di una valanga, perché sollecitano il manto nevoso in modo rapido e violento. La stratificazione del manto è importante anche per le valanghe bagnate, più di quanto si pensasse in passato. Una valanga bagnata può infatti formarsi solo quando l'acqua da disgelo è in grado di destabilizzare in modo esteso uno strato, ad esempio quando si accumula in una superficie di separazione fra due strati.

La probabilità che si formi una valanga dipende quindi in primo luogo dalla stratificazione del manto nevoso. Capire meglio in che modo la stratificazione contribuisca alla formazione di valanghe permette oggi di dare al pensiero sistemico il meritato posto nella valutazione del pericolo di valanghe. Anche se ovviamente le carat-

teristiche di stratificazione variano nel tempo e nello spazio, proprio quando si verificano numerosi incidenti da valanga è generalmente possibile osservare che le principali caratteristiche del manto nevoso sono simili in ampie regioni delle Alpi svizzere, soprattutto dopo un inizio inverno con poca neve o in generale dopo un periodo di bel tempo senza precipitazioni.

Valutare il manto nevoso significa domandarsi se è presente una stratificazione «compatibile» (lastrone di neve-strato fragile), se lo strato fragile può innescare una frattura e se la frattura è in grado di propagarsi. Se i metodi strategici vengono uniti a un simile pensiero sistemico e se entrambi vengono combinati con le riflessioni sul rischio (cosa succederebbe se ...?), è oggi sicuramente possibile prendere decisioni migliori sulla valutazione del pericolo di valanghe. Naturalmente continua a non essere possibile, neanche dopo quasi 80 anni di ricerca nel settore della nivologia, prevedere il punto e il momento esatto in cui si distaccherà una valanga. Saper considerare questa incertezza assume quindi una grande importanza nelle decisioni di vasta portata.

Il dott. **Jürg Schweizer** si è laureato in fisica ambientale al Politecnico di Zurigo e ha conseguito il dottorato in glaciologia. Per molti anni è stato collaboratore scientifico dell'SLF specializzato in meccanica della neve, formazione di valanghe, stabilità del manto nevoso e previsione valanghe, nonché formatore e perito di incidenti da valanga. Dal 2011 dirige l'SLF.