

Lawinen: Entstehung und Gefahrenbeurteilung

Jürg Schweizer

1 Einleitung

Lawinen gehören zu den meteorologisch bedingten Naturgefahren. Jeden Winter kommt es in den Alpen zu Tausenden von Lawinenabgängen, meist natürlich, aber auch künstlich ausgelöst durch Personen oder Explosionen. In wenigen Fällen kommt es zu Schäden. Das Verständnis, wie, wann und wo Lawinen entstehen, ist heute weit fortgeschritten. Die durch das Wetter im winterlichen Gebirge bedingte Variation der Schneedecke macht es allerdings schwierig bis unmöglich absolut verlässliche Prognosen für einzelne Lawinenhänge zu machen. Da Lawinen jedoch seltene Ereignisse sind, ist eine probabilistische Einschätzung möglich, was es erlaubt, im winterlichen Gebirge abseits gesicherter Zonen unterwegs zu sein, ohne unverhältnismässige Risiken einzugehen.

Aufgrund der Art der Entstehung, des Aussehens und der Schneequalität können Lawinen als Schneebrettlawinen, Lockerschneelawinen, Nass- oder Gleitschneelawinen bezeichnet werden (Abb. 1). Bei Nass- und Gleitschneelawinen führt Wasser zum Festigkeits- resp. Reibungsverlust. Für Lockerschneelawinen, die punktförmig anreissen, muss der Schnee nahezu kohäsionslos sein, was sowohl bei frischem, kaltem Schnee

als auch bei nassem Schnee der Fall sein kann. Schneebrettlawinen entstehen in der trockenen Schneedecke und stellen die wichtigste Lawinenart dar. Sowohl die allermeisten Lawinenunfälle mit Personen als auch sehr grosse, verheerende Staublawinen sind auf Schneebrettlawinen zurückzuführen.

2 Bildung einer Schneebrettlawine

Die Entstehung einer Schneebrettlawine stellt man sich am besten als eine Abfolge von Bruchprozessen vor. Voraussetzung ist eine Schneedecke, die aus Schichten mit markant unterschiedlichen Eigenschaften besteht. In einer Schicht mit geringen Festigkeit, einer sogenannten Schwachschicht, die von einer festeren Schicht, dem Schneebrett, überlagert wird, bildet sich durch eine lokale Überlastung ein Initialbruch. Sobald der wachsende Bruch eine kritische Grösse erreicht, breitet er sich schlagartig innerhalb der Schwachschicht über den ganzen Hang aus. Ist der Hang steil genug, löst sich das Schneebrett, zerfällt und bewegt sich als Lawine talwärts. Bei der natürlichen Lawinenauslösung bildet sich der Initialbruch eher langsam, z. B. während eines Schneefalls, und wächst zur kritischen Grösse, wohin-



Abb. 1. Lawinenarten: Schneebrettlawine (trockener Schnee; oben links), Nassschneelawine (oben rechts), Locker- schneelawine (unten links), und Gleitschneelawine (unten rechts) (Fotos: J. Schweizer).

gegen bei der künstlichen Auslösung durch, z.B. Schneesportler, so gut wie immer direkt ein Bruch entsteht, der sofort gross genug ist, dass er sich blitzartig über den Hang ausbreitet.

Die wichtigen Zutaten für eine Schneebrettawine sind als ein ungünstiger Schneedeckenaufbau mit einem Schneebrett über einer Schwachschicht, ein auslösendes Moment, eine im Hang verbreitet auftretende ungünstige Schichtung, und eine Hangsteilheit grösser als 30 Grad. Dann kann es zur Abfolge der zur Bildung einer Schneebrettawine nötigen Prozesse kommen, die da sind: Bruchbildung, Bruchausbreitung und Abgleiten.

Schwachschichten sind Schichten in der Schneedecke, die zumeist aus vergleichsweise grossen, kantigen Kristallen bestehen, die ein fragiles, poröses Eisgerüst bilden. Diese Schwachschichten entstehen häufig an der Schneeoberfläche während kalten niederschlagsfreien Perioden. Sie werden nach ihrer Entstehung eingeschneit. Da die Kristalle in einer Schwachschicht bereits gross sind, verändern sie sich nach dem Einschneien zumeist nur langsam, die Festigkeit nimmt nur allmählich zu. Die ungünstige Schichtkombination kann demnach über längere Zeit (Tage bis Wochen) bestehen bleiben. Man beschreibt eine derartige Lawinensituation mit einem «Altschnee-Problem». Die über der Schwachschicht liegenden Schichten, die das Schneebrett bilden, bestehen meist aus kleinen Körnern, die festere und meist auch etwas härtere Schichten bilden. Die für die Bruchausbreitung in der Schwachschicht nötige Energie liefert das Schneebrett, indem Deformationsenergie freigesetzt wird. Die Geschwindigkeit der Bruchausbreitung kann vor allem in Fallrichtung des

Hanges sehr hoch, gegen 100 m/s sein. Quer zum Hang und im Flachen ist sie weniger schnell, etwa 30 m/s. Bei der Fernauslösung aus wenig geneigtem Gelände ist das durch den Bruch entstehende leichte Absenken des Schneebrettes, das eine Folge der Zerstörung des fragilen Eisgerüstes der Schwachschicht ist, die wohl entscheidende Energiequelle für die Bruchausbreitung. Der lokale initiierte Bruch entsteht durch die kombinierte Druck-Scherbelastung in der geschichteten Schneedecke. Am Hang entstehen durch die Bruchinitiierung hingegen sofort grosse Scherspannungen, die die weitere Bruchausbreitung vorantreiben.

Die Prozesse der Bruchinitiierung, der Bruchausbreitung und des Abgleitens lassen sich heute mit der MPM-Methode (Materialpunktmethode) realitätsnah modellieren. Ein Modell, das anhand einer realen Schneedecke einen Lawinenabgang simuliert, und für die Prognose taugt, existiert jedoch noch nicht. Andererseits ist es möglich, einen simulierten Schneedeckenaufbau in Bezug auf die Stabilität grob einzuschätzen. Reale Stabilitätstest im Feld gelten zwar als zuverlässiger als Modellresultate, deren räumliche und zeitliche Auflösung ist allerdings viel geringer als diejenige simulierter Profile mit einer mit der Methode des Maschinellen Lernes (ML)-basierter Stabilitätseinschätzung.

3 Nass- und Gleitschneelawinen

Das Verständnis von Nass- und Gleitschneelawinen ist weniger umfassend als dasjenige von trockenen Schneebrettawinen. Bei Nass- und Gleitschneelawinen spielt Wasser die entscheidende Rolle. Im Falle von

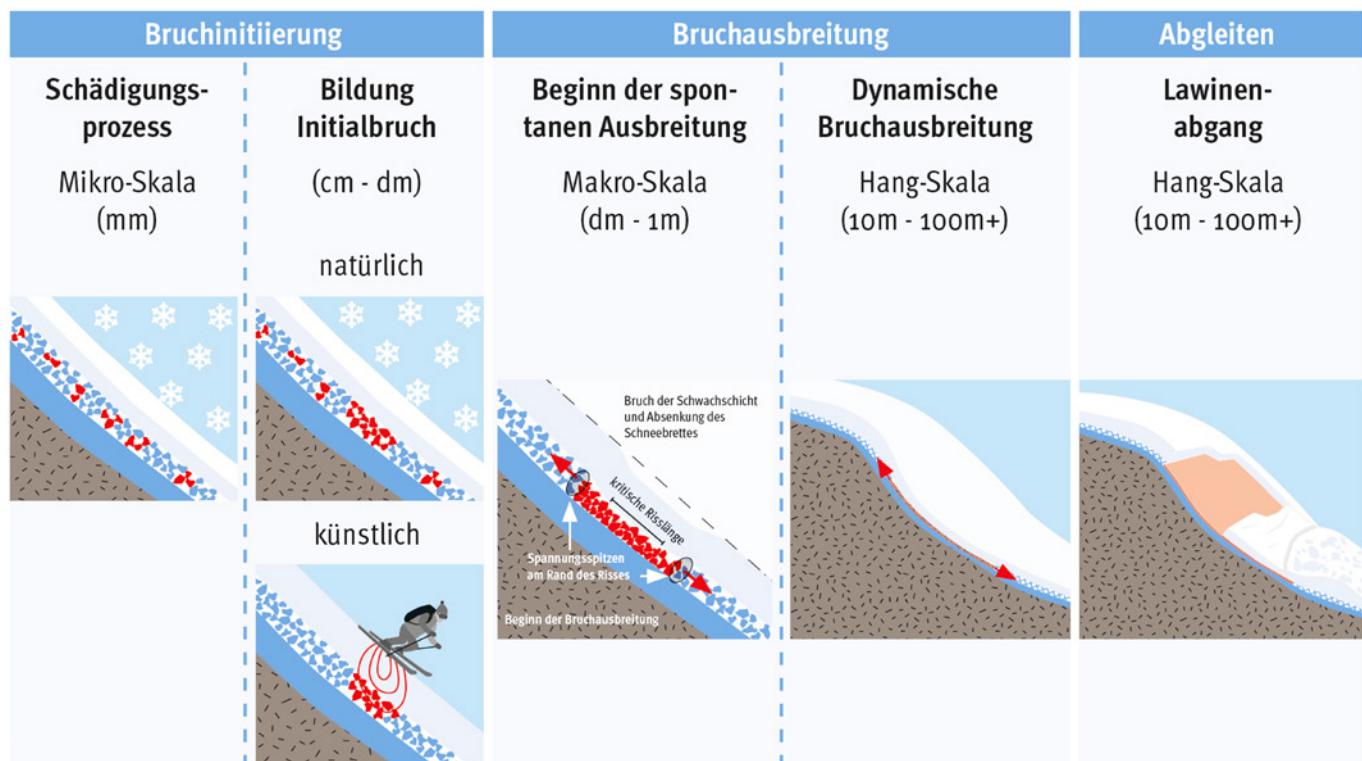


Abb. 2. Abfolge der Bruchprozesse bei der Bildung einer Schneebrettawine (aus Harvey et al. 2023).

Nassschneelawinen führt Regen oder Schmelze zum Eindringen von Wasser in die Schneedecke. Im Hochwinter oder zu Beginn des frühjährlichen Schmelzens, wenn die Schneedecke oft noch markant geschichtet ist, staut sich das eindringende Wasser an undurchlässigen Schichten oder sogenannten kapillaren Barrieren, also häufig am Übergang von feinkörnigen zu grobkörnigen Schichten. Durch den Stau des Wassers nimmt die Festigkeit in diesem Bereich der Schneedecke rasch ab, und falls die Schwächung grossflächig ist, führt der Festigkeitsverlust zu einer Nassschneelawine. Da der nasse Schnee die Fähigkeit hat, sehr viel Energie zu dissipieren, also rasch abzubauen, ist die künstliche Auslösung von Nassschneelawinen zumeist nicht möglich. Das Schneebrett vermag auch keine Energie für die Bruchfortpflanzung zu liefern, da im nassen Schnee kaum Deformationsenergie gespeichert wird. Mit zunehmender Durchfeuchtung und damit der Nassschnee-Metamorphose lösen sich die Unterschiede zwischen den Schichten auf. Fehlen schwache Schichten an der Basis, so läuft das Wasser mit zunehmender Durchfeuchtung einfach ab, ohne dass es zu einem Lawinenabgang kommt. Werden hingegen die Schichten an der Basis stark geschwächt, kann es zum Abgleiten einer Nassschneelawine auf dem Boden kommen. Der Lawinenabgang erfolgt demnach durch den Kohäsionsverlust in den untersten Schichten der Schneedecke.

Ebenfalls auf dem Boden gehen Gleitschneelawinen ab. In diesem Fall führt die Anfeuchtung der bodennahen Schneeschicht zu einem Reibungsverlust und die gesamte Schneedecke beginnt zu gleiten. Das Wasser für das Anfeuchten der untersten Schicht kann wie bei Nassschneelawinen (1) eindringendes Schmelzwasser sein, (2) durch Anschmelzen der untersten Schicht aufgrund der Bodenwärme entstehen, oder (3) aus dem Boden angesaugt werden, was in der Regel nur bei hohem Wassergehalt im Boden möglich ist. Entsteht das Wasser an der Oberfläche durch Schmelze spricht man von «warmen» Gleitschneelawinen, während bei «kalten» Gleitschneelawinen das Wasser am Übergang vom Boden zum Schnee entsteht. Das Gleiten setzt bei einem bestimmten Wassergehalt ein und führt oft unmittelbar zum Lawinenabgang, oder aber es öffnet sich am oberen Rand des gleitenden Bereichs lediglich ein Riss, ein Gleitschneeriss oder Fischmaul. Nach dem Öffnen des Risses führt das Gleiten innerhalb von 72 Stunden in den meisten Fällen (93 %) zum Lawinenabgang (Abb. 3). Zuweilen kann aber auch noch nach Tagen eine Lawine abgehen. Während meist bekannt ist, wo es zum Schneegleiten kommt, ist es schwierig abzuschätzen, wann und wo der Wassergehalt in der bodennahen Schicht den kritischen Wert für den Beginn des Gleitens erreicht. Häufig sind in gewissen Wintern die Bedingungen für Gleitschneelawinen verbreitet günstig, es kommt zu vielen Lawinenabgängen, während Gleitschneelawinen in anderen Wintern eher selten sind. Die Bedingungen für Gleitschneelawinen werden gemeinhin als eher günstig bezeichnet, wenn zu Beginn des Winters bereits eine relativ mächtige Schneedecke liegt. Wie erwähnt ist es schwierig,

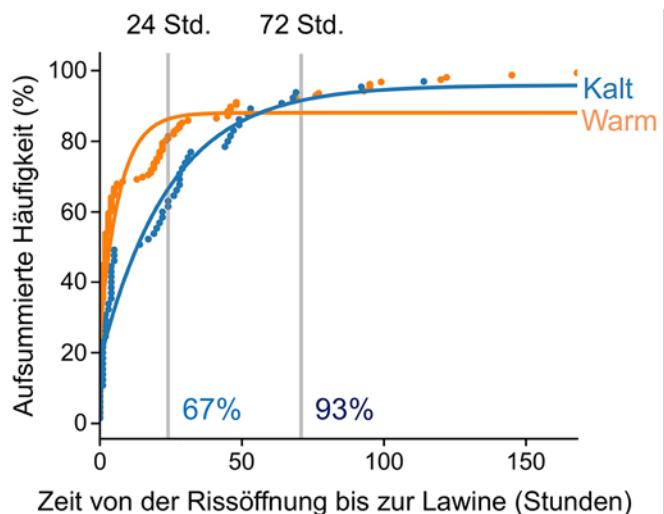


Abb. 3. Zeitdauer vom Aufgehen eines Fischmauls bis zum Lawinenabgang (Daten vom Dorfberg, Davos). Bei zwei von drei Gleitschneerissen, folgt in den meisten Fällen sehr rasch eine Lawine. Ein Abgang erst nach drei Tagen ist eher selten. Beim restlichen Drittel kommt es trotz Gleitschneeriss nicht zur Lawine (aus Fees et al. 2025).

den Abgang einer Gleitschneelawine zu prognostizieren, was für Sicherungsdienste eine grosse Herausforderung darstellt, wenn zum Beispiel oberhalb eines Verkehrsweges (oder einer Piste) die Schneedecke gleitet. Die unsichere Prognose spiegelt sich auch im Lawinenbulletin. So wurde zum Beispiel im Winter 2023/24 für die Region Davos an 159 von 195 Tagen (82 %) vor der Gefahr von Gleitschneelawinen gewarnt. Dies zeigt deutlich, dass es oft schwierig ist, Zeiten akuter Gefährdung einzugrenzen.

4 Prognostizierbarkeit

Die Prognostizierbarkeit trockener Schneebrettlawinen ist hingegen grundsätzlich gegeben, indem es möglich ist, Zeiten und Orte erhöhter Lawinengefahr vorherzusagen. Es gibt also sogenannte Vorläufersignale, zum Beispiel Schneefall, anhand denen man eine erhöhte Wahrscheinlichkeit für Lawinenereignisse prognostizieren kann. Auf dieser Prognostizierbarkeit basiert das Lawinenbulletin. Im Lawinenbulletin wird eine bestimmte Lawinenaktivität für eine Region prognostiziert, also wie viele, wie grosse, welche Art von Lawinen sind zu erwarten. Sind viele grosse natürliche Schneebrettlawinen zu erwarten, wird die Gefahr als «gross» (Stufe 4) eingeschätzt, sind in der Region nur vereinzelte von Personen ausgelöste Lawinen zu erwarten, ist die Gefahr «mässig» (Stufe 2). Es wird im Lawinenbulletin also nicht prognostiziert, wo genau eine Lawinenauslösung zu erwarten ist, sondern im Wesentlichen, wie häufig natürliche oder künstlich ausgelöste Lawinen einer bestimmten Grösse zu erwarten sind. Eine Prognose der Auslösewahrscheinlichkeit im Einzelhang ist nicht Gegenstand des Lawinenbulletins – und nach heutigem Stand des Wissens nicht möglich. Das Lawi-

nenbulletin kann im besten Fall die Information liefern, dass im Mittel die Lawinenauslösewahrscheinlichkeit im Einzelhang bei «mässig» geringer als bei «erheblich» ist. Ob dem im konkreten Fall so ist, ist ungewiss und hängt von den lokalen Verhältnissen im Hang ab.

5 Risikomanagement

Für die detaillierte Beurteilung der Auslösewahrscheinlichkeit kann man sich die Frage stellen, ob an dieser Schlüsselstelle eine ungünstige Schneedecke vorliegt, ob es wahrscheinlich ist, einen Bruch zu initiieren und ob ein solcher sich auch ausbreiten könnte. Da sich diese Fragen oft nur mit erheblicher Unsicherheit beantworten lassen, ist es entscheidend sich zu überlegen, was passieren könnte, falls es zu einer Lawine kommt. Also, sich zu fragen, wie gross wird die Lawine, wieviel Schnee kommt, und wie sieht das Gelände in der Sturzbahn und im Ablagerungsgebiet aus. Die Analyse der Konsequenzen ist oft schlüssiger und entscheidender für die Beurteilung des Risikos als die Auslösewahrscheinlichkeit. Auf jeden Fall sind für eine echte Risiko-beurteilung beide Elemente, Auslösewahrscheinlichkeit und Konsequenzen, explizit zu berücksichtigen, wobei sich durch geeignete Verhaltensmassnahmen, das Risiko dann noch verringern lässt.

6 Fazit

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass wir heute ein gutes Verständnis haben, wie trockene Schneebrettlawinen entstehen, wobei der Fortschritt vor allem auf eine konsequente Betrachtung der Lawinenauslösung als Bruchprozess zurückzuführen ist. Die Art der ungünstigen Schichtung, Schneebrett über Schwachschicht, beeinflusst die Prozesse der Bruchinitierung und der Bruchausbreitung. Das Zusammenspiel entscheidet, ob es letztlich zur Lawine kommt. Bei Nass- und Gleitschneelawinen ist der Wassergehalt innerhalb der Schneedecke oder an deren Unterseite entscheidend. Den Wassergehalt und wie er die Stabilität beeinflusst, abzuschätzen ist vergleichsweise deutlich schwieriger, indirekter, und die Prognostizierbarkeit daher generell geringer. Bei den trockenen Schneebrettlawinen ist die Prognostizierbarkeit auf regionaler Skala gegeben, im Gegensatz zur Hangskala. Bei der Beurteilung auf der Hangskala geht die Richtung klar hin zu einer echten Beurteilung des Risikos unter Berücksichtigung Auslösewahrscheinlichkeit einer Lawine und deren möglicher Konsequenzen.



Abb. 4. Bei der Beurteilung auf der Skala eines Hanges, gilt es neben der Wahrscheinlichkeit einer Lawinenauslösung, vor allem auch abzuschätzen, was passieren könnte, falls man von einer Lawine erfasst wird. Die Konsequenzen können je nach Lawinengrösse und Gelände sehr unterschiedlich sein und beeinflussen das Risiko massgebend (Foto. J. Schweizer).

7 Literatur (Auswahl)

- Bobillier G., Trottet B., Bergfeld B., Simenhois R., van Herwijnen A., Schweizer J., Gaume J. (2025) Supershear crack propagation in snow slab avalanche release: new insights from numerical simulations and field measurements. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 25: 2215–2223. doi.org/10.5194/nhess-25-2215-2025
- Fees A., van Herwijnen A., Altenbach M., Lombardo M., Schweizer J. (2025) Glide-snow avalanche characteristics at different time scales extracted from time-lapse photography. *Ann. Glaciol.* 65: e3. doi.org/10.1017/aog.2023.3
- Gaume J., van Herwijnen A., Gast T., Teran J., Jiang C. (2019) Investigating the release and flow of snow avalanches at the slope-scale using a unified model based on the material point method. *Cold Reg. Sci. Technol.* 168: 102847. doi.org/10.1016/j.coldregions.2019.102847
- Harvey S., Rhyner H.U., Schweizer J. (2023) Lawinen – Verstehen, beurteilen und risikobasiert entscheiden, Bruckmann Verlag GmbH, München, 319 pp.
- Schweizer J., Bartelt P., van Herwijnen A. (2021) Snow avalanches, in: *Snow and Ice-Related Hazards, Risks, and Disasters* (Second Edition), 2nd ed., edited by: Haeberli W., Whiteman C., Elsevier, Amsterdam, Netherlands, 377–416.
- Schweizer J., Reuter B., van Herwijnen A., Gaume J. (2016) Avalanche release 101, Proceedings ISSW 2016. International Snow Science Workshop, Breckenridge CO, U.S.A., 3–7 October 2016, 1–11.

Prof. 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

Les avalanches font partie des dangers naturels d'origine météorologique. Chaque hiver, des milliers d'avalanches se produisent dans les Alpes, la plupart naturellement, mais aussi artificiellement, déclenchées par des personnes ou des explosions. Dans certains cas, elles causent des dégâts. On comprend aujourd'hui de façon détaillée la manière, le moment et le lieu où se produisent les avalanches, en particulier en ce qui concerne la formation des avalanches de plaque de neige sèche, qui sont considérées comme une succession de processus de rupture. Le type de stratification défavorable, une plaque de neige sur une couche fragile, influence les processus d'initiation et de propagation de la rupture. C'est l'interaction entre ces deux facteurs qui détermine si finalement une avalanche se produit. Dans le cas des avalanches de neige humide et des avalanches de glissement, la teneur en eau à l'intérieur du man-

teau neigeux ou à sa base est déterminante. Comparativement, il est nettement plus difficile d'évaluer la teneur en eau et de ce fait son influence sur la stabilité, ce qui rend généralement la prévisibilité d'un déclenchement plutôt faible. En revanche, dans le cas des avalanches de plaque de neige sèche, la prévisibilité est donnée à l'échelle régionale et non à l'échelle de la pente, où il n'est actuellement pas possible de prévoir le lieu et le moment exacts de départ d'une avalanche. Lors de l'évaluation à l'échelle de la pente, la tendance est clairement à une véritable évaluation du risque, tenant compte à la fois de la probabilité de déclenchement d'une avalanche et de ses conséquences possibles.

Prof. Dr. Jürg Schweizer a étudié la physique de l'environnement à l'ETH Zurich et il est détenteur 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

Le valanghe rientrano tra i pericoli naturali determinati dalle condizioni meteorologiche. Ogni inverno, sulle Alpi si verificano migliaia di distacchi: questi ultimi hanno prevalentemente un'origine naturale, ma possono anche essere provocati dal passaggio di persone o dall'impiego di cariche esplosive. In un numero limitato di casi, essi producono danni. Attualmente, la capacità di comprendere come, quando e dove si verifichino i distacchi è molto avanzata, in particolare per quanto riguarda la formazione di valanghe di neve a lastroni asciutti, considerata come una sequenza di processi di frattura. Il tipo di stratificazione sfavorevole (uno strato fragile ricoperto da un lastrone di neve asciutta) influenza i processi di innesco e propagazione delle fratture. È questa interazione a determinare se si verificherà o meno un distacco. Nel caso delle valanghe di neve bagnata e di slittamento, è invece decisivo il contenuto in acqua del manto nevoso o del suo strato basale. Stimare tale valore, e il modo in cui esso influisce sulla stabilità, risulta molto più difficile e indiretto. Di conseguenza, il grado di prevedibilità di tali valanghe è generalmente piuttosto scarso. Ad ogni modo, per le valanghe a lastroni di neve asciutta, la prevedibilità viene espressa su scala regionale, che si contrappone alla scala di pendio, per la quale attualmente non è disponibile alcuna previsione esatta, in quanto non risulta possibile prevedere il luogo ed il momento esatto in cui si verificherà un distacco. Per l'analisi su scala di pendio si preferisce piuttosto una valutazione effettiva del rischio, in considerazione tanto della probabilità di un distacco, quanto delle possibili conseguenze da esso generate.

Il prof. 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 in qualità di esperto 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.

