

Für Skitourenfahrer, Bergsteiger und -wanderer

Per l'alpinista, lo sciatore e l'escursionista

Pour l'alpiniste, le skieur et le randonneur

**Lawinenopfer im Wandel der Zeit**

**Früher: Der weisse Tod in den Dörfern**

Sieben, dreizehn und ein Todesopfer. Dies ist die Bilanz der Lawinen-niedergänge in den Jahren 1951, 1968 und 1984 im Raum Davos. Große Tallawinen stiessen jeweils bis in die Wohnquartiere vor. Die Spuren von damals sieht man noch heute: Waldschneisen und Lawinenverbauungen, Stahlzäune soweit das Auge reicht säumen die Bergflanken oberhalb von Davos. Lawinenereignisse mit Todesopfern im bewohnten Gebiet gab es in der Landschaft Davos seit 1984 glücklicherweise nicht mehr. Überhaupt sind solche Ereignisse im Schweizer Alpenraum seltener geworden, höchstwahrscheinlich als Folge der Verbauungen.

## Schneebrettauslösung durch Skifahrer

**Im Verlauf der letzten rund 30 Jahre hat sich das Bild der Lawinenopfer gewandelt. Früher waren nur gut die Hälfte der Lawinenopfer Skifahrer, heute sind es über 90%. Das SLF untersucht, wie Skifahrer Schneebrettlawinen auslösen. Messungen der von Skifahrern bewirkten zusätzlichen Kräfte in der Schneedecke zeigen, dass diese bedeutsam und sehr dynamisch sind: Skifahrer können direkt lokal einen spröden Bruch verursachen und damit eine Schneebrettawine auslösen.**

**Rutschblocktest.** Ein Schneeprofil kombiniert mit einem Rutschblocktest kann wertvolle Schneedecken-information zur Beurteilung der Schneedeckenstabilität liefern. Bei einem Rutschblockversuch wird nicht nur die Festigkeit getestet, sondern gleichzeitig auch, wie gut die Kräfte in der Schneedecke übertragen werden können. Entscheidend ist – neben der Festigkeit der schwachen Schicht – nämlich, ob in der Tiefe der Schwachschicht die durch die Zusatzkräfte verursachte Deformation (Verformung) noch gross und schnell genug ist, um einen Bruch zu erzeugen. Dies hängt wesentlich von den Eigenschaften des «Schneebretts» ab.



ISSN 0002-6336

**Les Alpes**  
Revue du Club Alpin Suisse

**Die Alpen**  
Revista del Club Alpino Svizzero

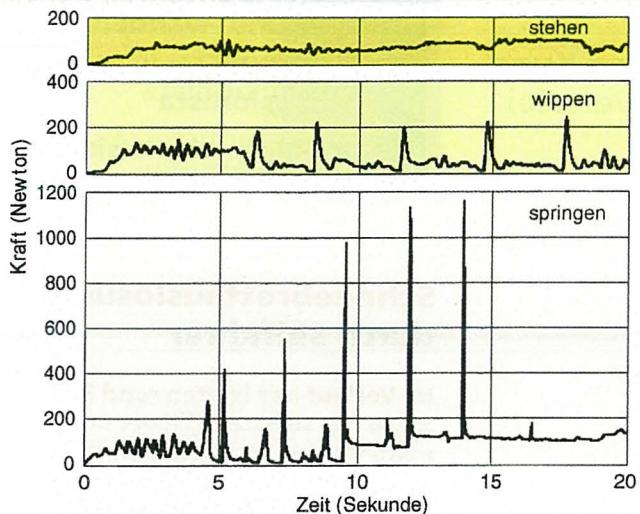
**SAC**: Vereinigung der Schweizer Alpinismus  
Zeitschrift des Schweizerischen Alpen-Clubs

Nr. 1 Januar 1998  
Ausgabe 74



**Fig. 1**  
Typische Werte der durch einen Skifahrer verursachten Zusatzkräfte in der Schneedecke für die drei Belastungsstufen Stehen, Wippen und Springen

Eine Messung dauert jeweils 20 Sekunden. Die Messapparatur befand sich zu Beginn 40 cm unterhalb der Schneeoberfläche. Beim Stehen sind die Zusatzkräfte gering. Mehrmaliges Wippen an Ort zeigt immer wieder ein ähnliches Resultat. Beim mehrmaligen Springen an Ort nehmen die Zusatzkräfte von Sprung zu Sprung hingegen wesentlich zu. Dies ist vor allem eine Folge der grössten Einsinktiefe, d.h. der geringeren Überdeckung.



### Heute: Lawinenopfer sind in erster Linie Skifahrer

Heute sind die allermeisten Lawinenopfer jedenfalls Skifahrer<sup>1</sup>, die ihre Schneebrettlawine selbst ausgelöst haben.

Sechs, zehn und sieben Todesopfer jeweils in wenigen Tagen in den Schweizer Alpen. Eine derartige Häufung von Lawinentoten, alles Skifahrer, war in den letzten drei Jahren zu beobachten, und zwar Anfang Januar 1995 und je Mitte Februar 1996 und 1997. Zudem sind zahlreiche weitere Lawinen durch Skifahrer ausgelöst worden, bei denen die Beteiligten nicht verschüttet wurden oder aber noch rechtzeitig aus der Lawine

befreit werden konnten. Ein ungünstiger Schneedeckenaufbau<sup>2</sup>, Neuschnee und schönes Wetter an einem Wochenende sind die wichtigsten Zutaten für diesen tödlichen Cocktail. Lawinen werden in den meisten Fällen nicht zufällig ausgelöst.

### Problemorientierte Forschung

#### Warten auf den nächsten Schneefall

Besser verstehen zu lernen, wie Skifahrer trockene Schneebrettlawinen auslösen, ist seit rund vier Jahren Ziel eines Forschungsprojektes am Eidgenössischen Institut für Schnee- und Lawinenforschung (SLF) in Davos. Mit Hilfe von Messplatten, be-

stückt mit Kraftsensoren, werden die durch einen Skifahrer verursachten Kräfte in der Schneedecke gemessen. Dazu werden vor einem Schneefall die Messplatten auf der Schneeoberfläche ausgelegt. Dann gilt es zu warten, bis sie genügend tief eingeschneit sind. Da die Versuchsbedingungen damit durch die Natur geschaffen werden, dauert es nicht selten Jahre, bis eine ausreichend grosse Anzahl von Resultaten aus Feldmessungen zur Verfügung steht.

#### Belastungsmessungen beim Stehen, Wippen, Springen

Ist die Überdeckung der Messplatten mit Schnee genügend dick (30 bis 60 cm), so werden sie belastet. Ein Skifahrer (oder auch einmal ein Snowboarder) belastet die Schneedecke, indem er sich – ähnlich wie bei einem Rutschblockversuch – genau oberhalb der Messapparatur hinstellt, wippt oder springt. Die durch den Skifahrer verursachten Kräfte werden in der Tiefe, in der sich die Messplatte befindet, gemessen (bis

**Aufnahme der Schneedeckeneigenschaften (Schneeprofil): Vor oder nach dem Versuch wird auch ein detailliertes Schneeprofil aufgenommen, weil Schneeart und Schichtung die Kräfteübertragung wesentlich beeinflussen.**



Foto: Martin Kern

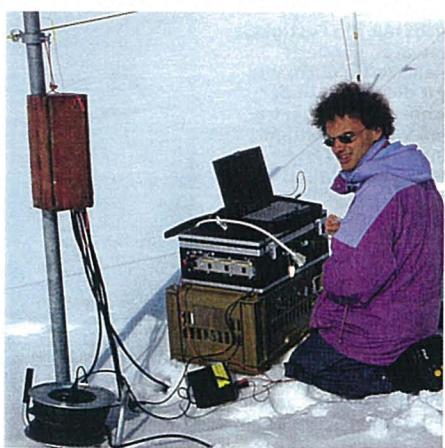


Foto: Jürg Schweizer

**Registrierung der Daten:**  
Die durch den Skifahrer verursachten Zusatzkräfte werden in der Tiefe, in der sich die Messplatte befindet, gemessen (bis zu 2000 mal pro Sekunde) und im Felde mit Hilfe eines Laptop-Computers direkt registriert.



Foto: Martin Kern

zu 2000mal pro Sekunde) und aufgezeichnet. Vor oder nach dem Versuch wird auch ein detailliertes Schneeprofil aufgenommen, weil Schneeart und Schichtung die Kräfteübertragung wesentlich beeinflussen. Biomedizinische Untersuchungen zeigen, dass die Belastungsstufe Wippen in etwa einem nicht zu ruppigen Skifahren entspricht.

## Welche Kräfte bewirkt ein Skifahrer in der Schneedecke?

### Dynamische Belastung: kurz, aber heftig

Während die durch einen Skifahrer verursachten Kräfte in stehender Position meist gering sind, schnellen diese beim Wippen und vor allem beim Springen an Ort kurzfristig markant nach oben. Die so vom Skifahrer ausgelösten Kräfte übersteigen das Eigengewicht der Schneedecke oft um ein Vielfaches. Beim Springen an Ort, das etwa mit einem Sturz eines Skifahrers verglichen werden kann, sind die Kräfte um einen Faktor 2 bis 3 grösser als beim Wippen. Dazu kommt, dass diese höchst dynamische Belastung der Schneedecke durch den Skifahrer nochmals schneller geschieht, nämlich innerhalb weniger hundertstel Sekunden. Die Zunahme der Belastung bei den Stufen Stehen,

Wippen und Springen ist nicht linear und hängt von den Schneedeckeneigenschaften ab (vgl. Fig. 1, S. 12).

### Abnahme der Kräfte bei zunehmender Tiefe

Die durch den Skifahrer verursachten Kräfte nehmen innerhalb der Schneedecke mit zunehmender Tiefe rasch ab. Je tiefer unter der Schneedeckoberfläche sich eine Schwachschicht befindet, desto geringer sind die hier noch wirkenden Kräfte. In 80 cm Tiefe beläuft sich die durch den Skifahrer verursachte Kraft nur noch etwa auf einen Viertel derjenigen, die 20 cm unter der Oberfläche wirkt. Ist die überlagernde Schicht doppelt so mächtig, verringert sich (bei sonst gleichbleibenden Verhältnissen) die Zusatzbelastung auf dem Niveau der Schwachschicht auf rund die Hälfte (vgl. Fig. 2, S. 14).

Eine wesentliche Rolle spielt die Einsinktiefe. Je tiefer ein Skifahrer im lockeren Schnee einsinkt, desto tiefer hinunter können sich die Kräfte noch auswirken. Falls der Skifahrer 20 cm einsinkt, sind die von ihm verursachten Kräfte 40 cm unterhalb der Schneedeckoberfläche etwa doppelt so gross, als wenn der Skifahrer nicht einsinken würde.

### Je härter, desto geringer die Tiefenwirkung und desto grösser die Breitenwirkung

Die Schichtung der Schneedecke spielt bei der Übertragung der Kräfte eine Schlüsselrolle.<sup>3</sup> Weiche Schichten an der Oberfläche führen u.a. als Folge des stärkeren Einsinkens in der Tiefe zu grösseren Kräften. Dafür ist aber deren flächige Auswirkung stär-

ker beschränkt. Härtere, tragende Schichten wirken wie Brücken und übertragen damit die Kräfte tendenziell eher in die Breite als in die Tiefe (vgl. Fig. 3, S. 15). Im Frühjahr beispielsweise ist morgens, wenn die Schneedecke gut gefroren ist, die Tiefenwirkung der Kräfte unbedeutend, während sie nachmittags um so grösser ist. Entsprechend nimmt die Auslösewahrscheinlichkeit nach dem Auftauen der Kruste wesentlich zu.<sup>4</sup>

### Wirkungszonen

Wie weit die Wirkung der von einem Skifahrer ausgelösten Kräfte in der Schneedecke reicht, ist abhängig vom Schneedeckenaufbau. Dieser Wirkungsbereich ist flächenmässig klein, üblicherweise umfasst er nur etwa 2 m<sup>2</sup>. Die Tiefenwirkung, die für eine Lawinenauslösung von Bedeutung ist, hängt vor allem von der Schichtung der Schneedecke und von der Schneedeckenstabilität ab. Allgemeingültige Zahlenangaben lassen sich deshalb nicht machen. Die Tiefenwirkung reicht bei Verhältnissen mit eher weichen Oberflächenschich-

<sup>1</sup> «Skifahrer» steht im folgenden für alle möglichen Schneesportler und -sportlerinnen, die sich im freien (ungesicherten) Gelände bewegen.

<sup>2</sup> Ein schwacher Schneedeckenaufbau findet sich nicht selten in grossen Teilen des Alpenraums, was jeweils aus den Schneeprofilen des Lawinenwarndienstes deutlich abgelesen werden kann. Obwohl diese Schneedeckentests nur Punktmessungen darstellen, zeigt sich klar, dass sie generell keine zufälligen Resultate liefern. Am häufigsten finden sich ausgeprägte Schwachschichten nach einer längeren Schönwetterperiode. Während einer solchen Schönwetterperiode werden die oberflächennahen Schichten stark umgewandelt. Werden sie beim nächsten Schneefall überdeckt, entsteht eine schwache Schicht innerhalb der Schneedecke. Eine derart entstandene Schwachschicht ist weitverbreitet und kann mit Schneedeckentests gefunden werden. Sie bleibt häufig über längere Zeit aktiv und muss auch noch Tage, ja vielleicht Wochen nach einem Schneefall bei der Gefahrenbeurteilung berücksichtigt werden.

<sup>3</sup> Bei einem Rutschblockversuch wird nicht nur die Festigkeit getestet, sondern gleichzeitig auch, wie gut die Kräfte in der Schneedecke übertragen werden können. Entscheidend ist – neben dem Belastbarkeitsgrad der schwachen Schicht –, ob auf dem Tiefenniveau der Schwachschicht die durch die Zusatzkräfte verursachte Deformation (Verformung) noch gross und schnell genug ist, um einen Bruch zu erzeugen. Dies hängt wesentlich von den Eigenschaften des «Schneebretts» ab.

<sup>4</sup> Gleichzeitig ändern sich während des Tages auch die Festigkeitseigenschaften der Schneedecke.

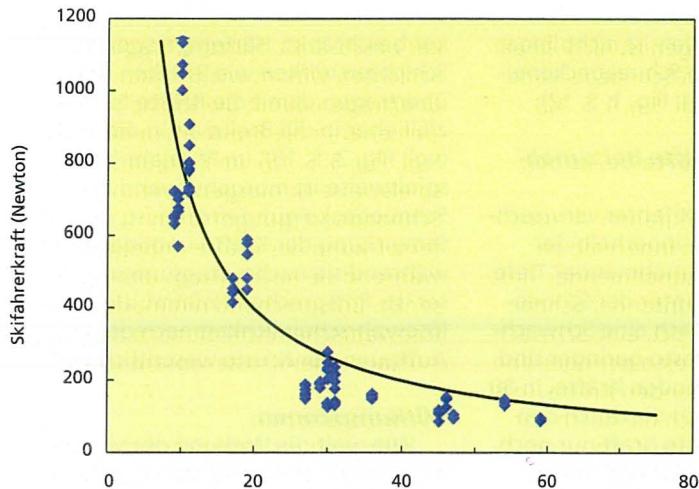


Foto: Martin Kern



Foto: Martin Kern

**Stehen, Wippen und Springen:** Ein Skifahrer (oder auch einmal ein Snowboarder) steht, wippt oder springt – ähnlich wie bei einem Rutschblockversuch – genau oberhalb der Messapparatur auf die Schneedecke.



**Fig. 2**  
Abnahme der Kräfte mit der Tiefe für die Belastungsstufe Wippen

Die Messpunkte stammen alle von Experimenten mit einer weichen Schicht an der Oberfläche (Neuschneeverhältnisse). Die Einsinktiefe ist bereits berücksichtigt, d.h. die angegebene Tiefe (resp. Überlagerung) entspricht der Distanz zwischen Skis und Messapparatur.

ten (z.B. nach einem Schneefall) und nur mässiger Schneedeckenstabilität ungefähr bis in eine Tiefe von 40 bis 60 cm, bei einem Sturz in der Abfahrt bis in eine Tiefe von ca. 1 m.

## Festigkeit der Schneedecke

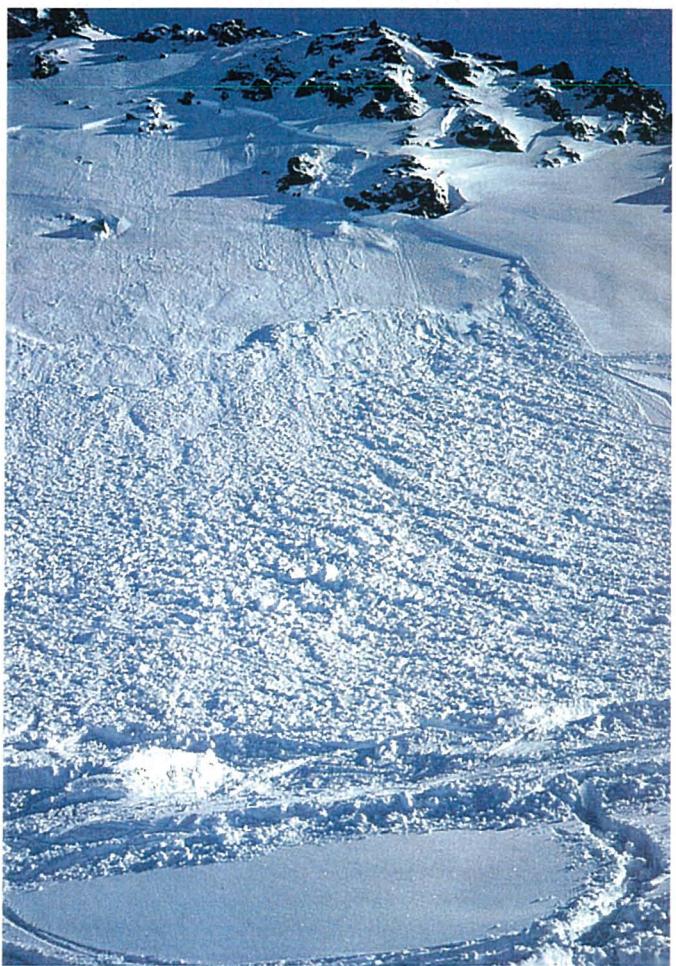
### Stark reduzierte Festigkeit bei schockartiger Einwirkung

Einen einzigen Wert für die Festigkeit von Schnee gibt es nicht. Je nach Schneeart, Temperatur und Belastung kann die Festigkeit leicht über zwei Größenordnungen variieren. Eine typische Eigenschaft von Schnee ist, dass er bei langsamer Belastung kaum oder erst bei sehr grossen Kräften und entsprechend grossen Deformationen (Verformungen) bricht, während dieselbe Schneeart bei schnell einwirkender, viel geringerer Belastung spröd bricht. Die Festigkeit ist also gering bei schockartiger Belastung. Genau so wirkt aber ein Skifahrer durch seine Schwünge oder bei einem Sturz.

### Kriterien der Schneedeckenstabilität

Das Verhältnis von Festigkeit zu Spannung (Belastung) bestimmt die Schneedeckenstabilität. Es genügt al-

Fotos: Jürg Schweizer



**Skifahrerlawine:** Von rechts ist eine Skifahrerin in diesen Hang gequert und hat oberhalb von ihr eine Schneebrettawine ausgelöst. Die Schwachschicht war ein einge-

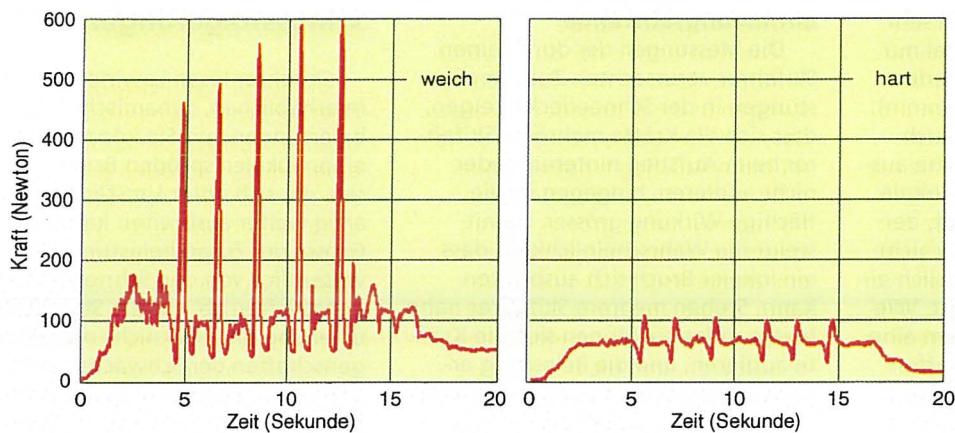
schneiter Oberflächenreif (vgl. nebenstehende Aufnahme). Dank schneller Kameradenrettung ist der Lawinenunfall glimpflich abgelaufen.

so nicht, die Kräfte in der Schneedecke zu bestimmen, um die Lawinenauslösung zu verstehen, sondern es müssen auch die Festigkeiten und deren Verteilung innerhalb der Schneedecke bekannt sein. Seit den frühen achtziger Jahren sind weltweit immer wieder Feldversuche zur flächigen Variabilität der Schneedecke und ihrer Parameter angesetzt worden.

### Variabilität: Die Schneedecke ein «Flickenteppich»?

Um die flächige Stabilitätsverteilung zu untersuchen, wurden ganze Hänge mit einem Netz von Rutschblockversuchen und Schermessungen überzogen. Die Studien, die außer in der Schweiz auch in Neuseeland und Kanada durchgeführt wurden, zei-

gen, dass die Scherfestigkeit ebenso wie andere Größen (z.B. die Schneehöhe) flächig variiert.<sup>5</sup> Typisch sind Streuungen von 15 bis 30%. Dabei hat sich gezeigt, dass Messstellen, die nah – bzw. ca. 1 bis 2 m – beieinander liegen, Resultate ergeben, die in einem gegenseitigen Bezug stehen: d.h. auf einen hohen Wert folgt eher wieder ein hoher Wert als ein tiefer.<sup>6</sup> Keine der Studien zeigte innerhalb weniger Meter abrupte Festigkeitsänderungen in der Form eines Sprungs von geringster Festigkeit zu hoher Festigkeit oder von minimaler Stabilität zu hoher Stabilität.<sup>7</sup>



**Fig. 3**  
Einfluss der  
Schichtung:  
weich – hart

In beiden Fällen befand sich die Messapparatur 35 cm unterhalb der Schneoberfläche. Im Bild links war der Schnee weich. Es handelte sich um Neuschnee. Im Bild rechts existierte an der Oberfläche eine Kruste. Im Fall der weichen Schicht (links) waren die durch den Skifahrer verursachten zusätzlichen dynamischen Kräfte beim Wippen in der Folge rund zehnmal grösser als im Falle mit der Kruste an der Oberfläche (rechts).



**Schwachschicht.** Deutlich ist die schwache Verbindung zwischen zwei Schneeschichten zu erkennen. Eine fast 6 mm dicke eingeschneite Oberflächenreisefischicht bildete die Schwachschicht.

## Wie kommt es zur Schneebrettawine?

### Lawinenauslösung: Schwachschichten und Superschwachzonen

Bevor eine Schneebrettawine abgleitet, kommt es innerhalb einer dünnen Schwachschicht oder an einer Schichtgrenze zu einem Scherbruch (Reibungs-/Haftungsverlust). Eine Schwachschicht oder eine schwache Schichtgrenze ist eine der notwendigen Voraussetzungen für eine Schneebrettawine. Alle Modelle

zur natürlichen Schneebrettawine gehen davon aus, dass zuerst irgendwo in der Schwachschicht lokal ein Bruch erfolgt, ein sogenannter Initialbruch.<sup>8</sup> Dieser kann sich dann unter Umständen blitzartig ausbreiten. Wird die Bruchfläche so gross, dass die Zugfestigkeit des «Schneebretts» erreicht wird, kommt es zum Zugriss, und die ganze Schneetafel gleitet als Schneebrettawine ab. Wie eine Initialbruchfläche auf natürliche Weise entsteht, ist allerdings nicht ganz geklärt.<sup>9</sup> Sicher ist lediglich, dass solche Initialbruchflächen nicht einfach da sind, und vor allem, dass sie – einmal entstanden – ihre Eigenschaft als Rissstelle nur während sehr kurzer Zeit behalten. Als Folge des Sinterungsprozesses verheilen solche Zonen sehr rasch. Dass solche superschwachen Zonen geringster Festigkeit in einem Hang Tage, ja Wochen bestehen bleiben, kann mit grosser Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden.

Damit ein Skifahrer eine Schneebrettawine auslösen kann, ist meist keine derartige superschwache Zone nötig. Dies wurde schon seit längerer Zeit vermutet, und durch Messungen jetzt erhärtet. Durch die Intensität der Belastung kann ein Skifahrer nämlich direkt einen lokalen Bruch erzeugen, ebenso wie dies durch Sprengungen oder bei gewissen Bedingungen sogar durch den Überschallknall eines Jets geschieht.

### Bedeutung des Bruchgeräusches: Wum oder Wuumm?

Bricht eine Schicht zusammen, entsteht durch die plötzliche Luftverdrängung meist das obgenannte dumpfe Geräusch. Wie weit sich ein

<sup>5</sup>Diese Unterschiede der Festigkeit, und damit meist auch der Stabilität, innerhalb einer Hangexposition bestimmter Höhenlage sind meist erklärbar und eine Folge der kleinräumigen Topographie und z.T. damit verbunden, unterschiedlicher klimatischer Bedingungen. In den kanadischen Untersuchungen mit Hilfe von Rutschblocktests waren jeweils innerhalb eines Hanges über 95 % der Resultate der Rutschblockversuche im Bereich des Mittelwertes  $\pm 1$  Stufe. Die Versuche in der Schweiz zeigen sehr ähnliche Resultate. Es ist aber durchaus möglich, wenn auch selten, dass einmal zwei benachbarte Rutschblockversuche sehr unterschiedliche Resultate zeigen. Es hat sich aber gezeigt, dass z.B. einzelne Punkte geringerer Stabilität (z.B. Rutschblockstufe Wippen) nicht ausreichend sind, um einen ganzen Hang zu destabilisieren.

<sup>6</sup>Aufeinanderfolgende Werte sind also sogenannt positiv korreliert.

<sup>7</sup>Zu diesem Schluss kommt man, wenn Versuchsinterpretation und -ausführung berücksichtigt werden. Dies gilt insbesondere für die häufig zitierte Studie der Neuseeländer H. Conway und J. Abrahams. Gemäss Aussage von H. Conway wurden nämlich missglückte Experimente, d.h. wenn während der Versuchsvorbereitung die Schneeprobe brach, als Werte mit verschwindend kleiner Stabilität interpretiert. Bei der angewandten Messmethode treten zudem hohe Momentkräfte auf.

<sup>8</sup>Derartige Initialbruchflächen werden auch superschwache Zonen genannt. Die Modelle besagen, dass solche Zonen praktisch keine Scherspannungen übertragen können. Die Festigkeit in solchen Zonen ist geringer als das Gewicht der darüberliegenden Schneeschicht.

<sup>9</sup>Offensichtlich scheint, dass ein derartiger Bruchprozess von einer natürlichen Schwachstelle ausgehen dürfte. Für einige Materialien wie Metalle oder Beton bilden sich Initialbrüche dort, wo sich Materialfehler befinden. Es ist allerdings nicht klar, ob in einem Material mit einer so hohen Porosität und Inhomogenität wie Schnee überhaupt von Materialfehlern gesprochen werden kann. Wo sich solche natürlichen Schwachpunkte befinden, ist grundsätzlich unbekannt. Sie werden dort vermutet, wo die Scherfestigkeit aufgrund der natürlichen Variabilität am geringsten ist. Lokal muss sich dort die Verformung irgendwie derart konzentrieren, dass überhaupt Bindungen brechen können. (Es müssen sogenannte hohe Deformationsraten entstehen. Dies ist eine notwendige Voraussetzung für die Entstehung von Initialbruchflächen.) Auch im derzeit besten Lehrbuch zur Schnee- und Lawinenkunde (*The Avalanche Handbook* von D. McClung und P. Schaefer) wird lediglich angedeutet, wie hohe Deformationsraten entstehen könnten. H. Gubler hat eine mögliche Abfolge der Ereignisse beschrieben (*Lawinen und Rechtsfragen, Schnee- und Lawinenforum Nr. 1, SLF*).

solcher Bruch ausbreitet, kann sehr unterschiedlich sein, manchmal nur einige Meter (Wum), dann wieder quer durch ganze Täler (Wuummm). Bei einer Fernauslösung, die auch von einer flachen Geländepartie ausgehen kann, wird durch eine lokale Überlastung ein Bruch erzeugt, der sich innerhalb einer Schwachschicht soweit ausbreitet, dass schliesslich eine Schneebrettawine entsteht. Wie die Schneedecke, und vor allem eine Schwachschicht, genau beschaffen sein muss, damit ein Bruch sich ausbreitet, ist weitgehend unbekannt. Generell kann aber gesagt werden, dass die Bereitschaft zur Bruchausbreitung mit der Grösse der belasteten und dadurch allenfalls geschädigten Fläche zunimmt.

### Entlastungsabstände

Die Messungen der durch einen Skifahrer verursachten Zusatzbelastungen in der Schneedecke zeigen, dass sich die Kräfte mehrerer Skifahrer beim Aufstieg hintereinander nicht addieren, hingegen ist die flächige Wirkung grösser. Damit steigt die Wahrscheinlichkeit, dass ein lokaler Bruch sich ausbreiten kann. Stehen mehrere Skifahrer nahe beieinander, so können sich die Kräfte addieren, und die Belastung erfolgt gleichzeitig auf einer grösseren Fläche – eine doppelt ungünstige Situation. Entlastungsabstände sind somit sinnvoll, nicht zuletzt, weil man auch nicht weiss, wie sich die mehrmägige Belastung in kurzen zeitlichen Abständen auswirkt, z.B. beim Aufstieg mehrerer Skifahrer in der gleichen Spur.

### Schlussfolgerungen

Skifahrer lösen Lawinen durch ihre erheblichen, dynamischen Zusatzbelastungen aus. Sie können direkt einen lokalen spröden Bruch initiieren, der sich unter Umständen blitzartig weiter ausbreiten kann. Die Grösse der Zusatzbelastungen hängt wesentlich von den Schneedeckeneigenschaften ab. Für die Stabilitätsbeurteilung sind also nicht nur die Eigenschaften der Schwachschicht, sondern auch jene der darüberliegenden Schicht, des eigentlichen «Schneebretts», zu berücksichtigen.

Die Kräfte auf Grund der Belastung durch Skifahrer nehmen mit der Tiefe rasch ab und wirken nur lokal. Befindet sich eine ausgeprägte Schwachschicht nicht allzu weit unterhalb der Schneeeoberfläche (ca. 40 cm), so ist die Auslösewahrscheinlichkeit hoch und eine Auslösung grossräumig möglich. Je tiefer unten sich eine Schwachschicht befindet, desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit,

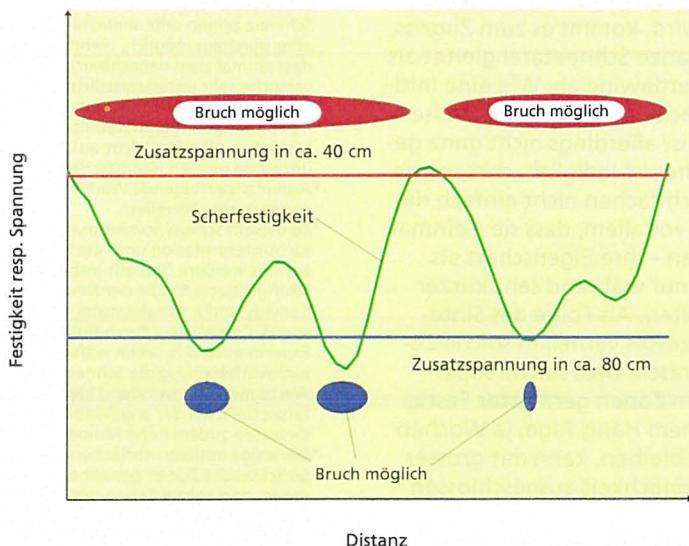


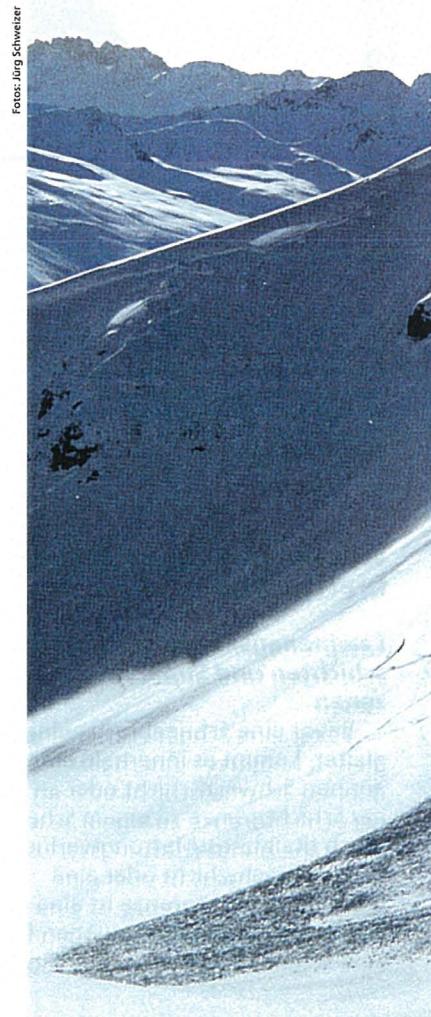
Fig. 4

Abnehmende (flächige) Auslösewahrscheinlichkeit mit zunehmender Tiefe der Schwachschicht – ein mögliches Modell

Die grüne Kurve zeigt eine fiktive Verteilung der Festigkeit (Streuung: 26%) in einer Schwachschicht quer durch einen Hang, wie sie verschiedentlich gemessen wurde. Die rote und die blaue Linie geben die ungefähre Grösse der durch einen Skifahrer verursachten Zusatzkräfte in zwei verschiedenen Tiefen an, wenn dieser den Hang befährt. Die Zusatzkräfte variieren natürlich ebenfalls; zur Vereinfachung sind lediglich Geraden gezeichnet. Es wird angenommen, dass in beiden Tiefen dieselbe Schwachschicht mit derselben Verteilung der Festigkeit (grü-

ne Kurve) vorkommt und dass die darüberliegenden Schichten dieselben Eigenschaften haben.

Befindet sich die Schwachschicht beispielsweise ca. 40 cm unterhalb der Schneeeoberfläche, so besagt das Diagramm, dass praktisch überall die durch den Skifahrer verursachten Kräfte die Festigkeit übersteigen, dass also praktisch überall im Hang der Skifahrer lokal einen Bruch erzeugen kann und damit eine Lawinenauslösung möglich ist. Befindet sich die Schwachschicht aber relativ weit unten, etwa 80 cm unter der Oberfläche, so sind die Zusatzkräfte relativ klein (nur noch rund halb so gross), und es wird wenig wahrscheinlich sein, dass ein Skifahrer eine Schneebrettawine auslösen kann. Es gibt in unserem fiktiven Beispiel lediglich zwei bis drei Stellen, wo allenfalls ein Skifahrer einen lokalen Bruch erzeugen kann und, falls es zu einer Bruchausbreitung kommt, allenfalls auch eine Lawine entstehen kann.



dass ein Bruch in der Schneedecke erfolgt, und gleichzeitig gibt es infolge der natürlichen Variation der Scherfestigkeit dann auch nur noch wenige Stellen, wo eine Schneebrettauslösung möglich ist. In diesem Fall wird die Lawinenauslösung zunehmend durch Zufälligkeiten bestimmt.

Wo eine Schwachschicht wenig überdeckt ist, ist also eher mit einer Lawinenauslösung zu rechnen als bei einer mächtigen Überdeckung. Dies ist häufig bei auskellender Schneedecke oder in der Nähe von Geländeunebenheiten und Felsblöcken der Fall. An solchen Orten ist zudem häufig auch noch der Schneedeckenaufbau schwächer.

Nicht jeder lokale Bruch (Wum-Geräusch) führt zu einem Lawinenabgang. Ob sich ein lokaler Bruch ausbreiten kann, hängt ebenfalls vom Schneedeckenaufbau ab. Um die Bedingungen für die Bruchbildung und -ausbreitung zu verstehen, bleibt noch viel zu tun.

Jürg Schweizer, Davos ■

### Literatur

- Camponovo, C., und J. Schweizer. 1997. Measurements on skier triggering. *Proceedings International Snow Science Workshop, 6-10 October 1996, Banff AB, Canada*, 100-103
- Conway, H., und J. Abrahamson. 1984. Snow stability index. *Journal of Glaciology*, Vol. 30, No. 106, 321-327
- Föhn, P.M.B. 1989. Snowcover stability tests and areal variability of snow strength. *Proceedings International Snow Science Workshop, 12-15 October 1988, Whistler BC, Canada*, 262-273
- Föhn, P.M.B. 1993. Characteristics of weak snow layers or interfaces. *Proceedings International Snow Science Workshop, 4-8 October 1992, Breckenridge CO, U.S.A.*, 160-170
- Gubler, H., und B. Salm. 1996. Lawinen – Lawinenbildung – Risiko. In: *Lawinen und Rechtsfragen, Schnee- und Lawinenforum Nr. 1, 10.-14. Januar 1994, Davos, SLF*, 15-28
- Jamieson, J.B. *Avalanche prediction for persistent snow slabs*. Dissertation, Universität Calgary, Kanada, 258 S.
- McClung, D.M. 1987. Mechanics of snow slab failure from a geotechnical perspective. *IAHS Publication*, No. 162, 475-508
- McClung, D., und P. Schaefer. 1993. *The Avalanche Handbook*. The Mountaineers, Seattle WA. U.S.A., 271 S.
- Munter, W. 1996. Zur Grundlagenkrise der praktischen Lawinenkunde. In: *Schneeweiss, C., und B. Ritschel, Skitouren: Ausrüstung – Technik – Gefahrenkunde*. F. Bruckmann KG, München
- Munter, W. 1991. *Neue Lawinenkunde – Ein Leitfaden für die Praxis*. Verlag des SAC, Bern, 200 S.
- Salm, B. 1991. Wann und wo kommt es zum Schneebrettanriss? *Neue Zürcher Zeitung*, 31. Januar 1991, Nr. 25, 71
- Schweizer, J. 1996. Bildung und Eigenschaften der Schneedecke mit einem Seitenblick auf die Lawinenbildung. *Die Alpen, Zeitschrift des Schweizer Alpen-Clubs*, Nr. 1/1996, 12-18
- Schweizer, J., C. Camponovo, C. Fierz und P. Föhn. 1995. Skier triggered slab avalanche release – some practical implications. In: *Proc. Int. Symposium: Sciences and mountain – The contribution of scientific research to snow, ice and avalanche safety, ANENA, Chamonix, May 30 – June 3, 1995*, 309-315

**Zwar angerissen, aber nicht abgeglitten: Wie kurz nach der Auslösung erstarbt sind diese Schneebrettlawinen hängen geblieben.**



**Natürlich abgegangene Lawinen an einem schattigen Nordosthang. In der Mitte ist die Lawine zwar angerissen, aber nicht abgeglitten.**