

# Des Schnees Gespür für Schi und Board

## Wie lösen Schifahrer und Snowboarder Schneebretter aus?

von Jürg Schweizer

**Das Gewicht eines Schneebrettes beträgt schnell einmal hundert Tonnen. Warum sollen da die 70 kg eines Schifahrers für die Schneebrettauslösung entscheidend sein? Regiert da nicht eher der Zufall?**

**Die Lawinenunfallstatistik spricht andererseits eine deutliche Sprache. Rund 90 % der Lawinenopfer sind Freizeitsportler und die allermeisten von ihnen haben „ihre“ Lawine selbst ausgelöst. Die Chance, von zufällig herabstürzenden Schneemassen erfasst zu werden, ist sehr gering. Fast immer führt die punktuelle Zusatzbelastung durch den Schifahrer oder Snowboarder zum Lawinenabgang.**

### Rezept für eine Schneebrettlawine

Die Schneedecke ist als Folge des Wetters (Schneefall, Wind, Temperatur, Strahlung) aus verschiedenen Schichten aufgebaut, aus festeren und weicheren, dünnen und dicken. Das Rezept für eine Schneebrettlawine ist eine dünne, schwache Schicht innerhalb der Schneedecke, die von einer festeren Schicht überlagert wird. Ist das Gelände steil genug, kommt ein auslösendes Moment dazu und breitet sich der Bruch aus, so gleitet das Schneebrett ab. Solche dünnen Schwachschichten bestehen meist aus großen, kantigen Kristallen. Paradebeispiel ist eingeschneiter Oberflächenreif. Allerdings ist häufig gar keine dünne, schwache Schicht vorhanden und die Schwachstelle innerhalb der Schneedecke bildet ein Schichtübergang.

### Welche Zusatzbelastung verursacht ein Schifahrer in der Schneedecke?

Wie lösen nun aber Schifahrer oder Snowboarder trockene

Schneebrettlawinen aus? Was „spürt“ die Schneedecke von einem Schneesportler? Mit Hilfe von Messplatten, bestückt mit Kraftsensoren, können die durch einen Schifahrer verursachten Kräfte in der Schneedecke gemessen werden. Dazu werden vor einem Schneefall die Messplatten auf der Schneeoberfläche ausgelegt. Dann gilt es zu warten, bis sie genügend tief eingeschneit sind.

Ist die Überdeckung der Messplatten mit Schnee genügend dick (30 bis 60 cm), so werden sie belastet. Ein Schifahrer (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 Schifahrer verursachten Kräfte werden in der Tiefe, in der sich die Messplatte befindet, gemessen (bis zu 2000 mal pro Sekunde) und aufgezeichnet. Vor oder nach dem Versuch wird auch ein detailliertes Schneeprofil aufgenommen, weil Schneeart und Schichtung die Kraftübertragung wesentlich beeinflussen.

Biomedizinische Untersuchungen zeigen, dass die Belastungsstufe Wippen in etwa einem nicht zu ruppigen Schifahren entspricht.

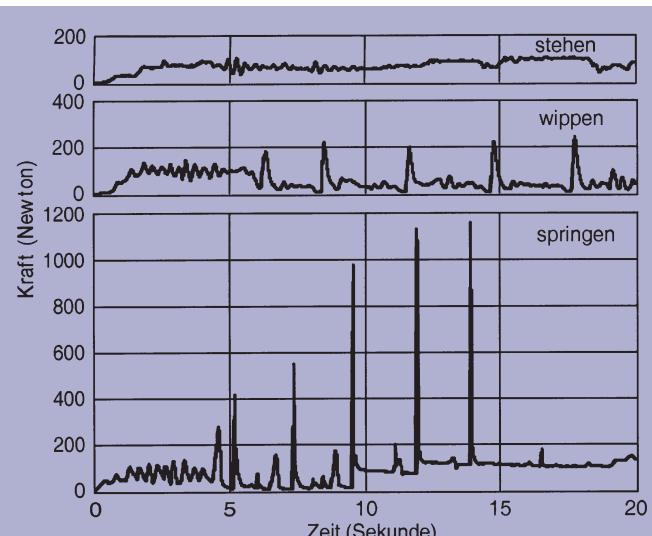
### Dynamische Belastung: kurz, aber heftig

Während die durch einen Schifahrer verursachten Kräfte in stehender Position meist gering sind, schnellen diese beim Wippen und vor allem beim Springen kurzfristig markant nach oben. Die vom Schifahrer verursachte Zusatzbelastung übersteigt das Eigengewicht der Schneedecke oft um ein Vielfaches. Beim Springen an Ort, das etwa mit einem

Sturz eines Schifahrers 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 Schifahrer 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 Schneedecken-eigenschaften ab. Sportliche Fahrweise, Springen und Stürzen können die Auslösewahrscheinlichkeit also wesentlich erhöhen (vgl. Abb. 1).

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

Eine Messung dauert jeweils 20 Sekunden. Die Messapparatur (Fläche: 0.25 m<sup>2</sup>) 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 größeren Einsinktiefe, d.h. der geringeren Überdeckung.





**Stehen, Wippen und Springen: Ein Schifahrer, oder auch einmal ein Snowboarder, steht, wippt oder springt - ähnlich wie bei einem Rutschblockversuch - genau oberhalb der Messapparatur auf die Schneedecke. Die durch den Schifahrer verursachten Zusatzkräfte werden in der Tiefe, in der sich die Messplatte befindet, gemessen und im Felde mit Hilfe eines Laptop Computers direkt registriert.**

#### 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 Schneedeckenoberfläche 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 (das Schneebrett) doppelt so mächtig, verringert sich (bei sonst gleich bleibenden Verhältnissen) die Zusatzbelastung auf dem Niveau der Schwachschicht auf rund die Hälfte (vgl. Abb. 2).

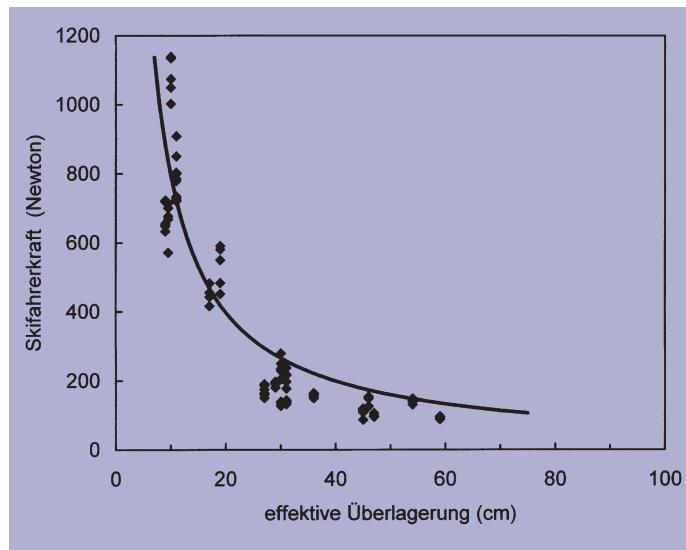
Eine wesentliche Rolle spielt die Einsinktiefe. Je tiefer ein Schifahrer im lockeren Schnee einsinkt,

desto tiefer hinunter können sich die Kräfte noch auswirken. Falls der Schifahrer 20 cm einsinkt, sind die von ihm verursachten Kräfte 40 cm unterhalb der Schneedeckenoberfläche etwa doppelt so groß, als wenn der Schifahrer nicht einsinken würde.

tauen der Kruste wesentlich zu. Gleichzeitig ändern sich während des Tages andererseits auch die Festigkeit und die Bruchzähigkeit der Schneedecke.

#### Wirkungszonen

Wie weit die Wirkung der von einem Schifahrer ausgelösten Kräfte in der Schneedecke reicht, ist abhängig vom Schneedeckenaufbau. Dieser Wirkungsbereich ist flächenmäßig klein, üblicherweise umfasst er weniger als 1 m<sup>2</sup>. Diese Fläche kann aber ausreichend sein für die Bruchausbreitung, denn die kritische Größe für die Bruchausbreitung ist im Bereich von 0.1 m bis 10 m, wobei bei schnellen Zusatzbelastungen die kritische Größe tendenziell kleiner ist. Die Tiefenwirkung, die für eine Lawinenauslösung von Bedeutung ist, hängt im konkreten Fall vor allem von der Schichtung der Schneedecke und von der Festigkeit der zu betrachtenden Schwachschicht ab. Allgemein gültige Zahlenangaben lassen sich deshalb nicht machen. Die Tiefenwirkung reicht bei Verhältnissen mit eher weichen Oberflächenschichten (z.B. nach einem Schneefall) und nur mäßiger Schneedeckenstabilität ungefähr bis in eine Tiefe von 40 bis 60 cm, bei einem Sturz in



**Abb. 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 Schiern und Messapparatur.

der Abfahrt bis in eine Tiefe von ca. 1 m (vgl. Abb. 4).

### Die Festigkeit der Schneedecke

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 wesentlich geringer bei schockartiger Belastung. Genau so wirkt aber ein Schifahrer durch seine Schwünge oder bei einem Sturz.

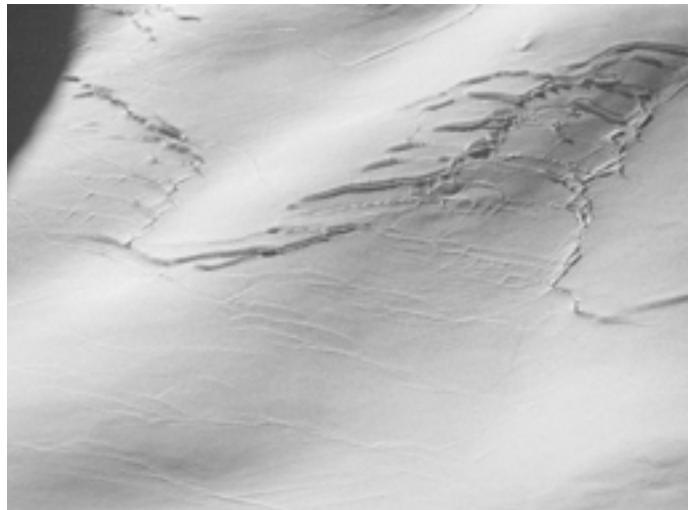
### Kriterien der Schneedeckenstabilität

Das Verhältnis von Festigkeit zu Spannung (Belastung) bestimmt die Schneedeckenstabilität - und zwar lokal. Es genügt also nicht, die punktuelle Zusatzbelastung in der Schneedecke zu kennen, 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

einige wenige Feldversuche zur flächigen Variabilität der Schneedecke und ihrer Parameter ange setzt worden.

### 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, zeigen, dass die Scherfestigkeit ebenso wie andere Größen (z.B. die Schneehöhe) flächig variiert. Diese Unterschiede der Festigkeit, und damit meist auch der Stabilität, innerhalb einer Hangexposition bestimmter Höhenlage sind meist erklärbar (was nicht heißt, dass sie auch erkennbar sind) und eine Folge der kleinräumigen Topographie und z.T. damit verbunden, unterschiedlicher klimatischer Bedingungen. 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. Keine der Studien zeigte innerhalb weniger Meter abrupte



Zwar angerissen, aber nicht abgeglitten. Wie kurz nach der Auslösung erstarrt sind diese Schneebrettawinen hängen geblieben.

Festigkeitsänderungen in der Form eines Sprungs von geringster Festigkeit zu hoher Festigkeit oder von minimaler Stabilität zu hoher Stabilität. In den kanadischen Untersuchungen mit Hilfe von Rutschblocktests waren jeweils innerhalb eines Hanges über 95 % der Resultate der Rutschblockversuche im Bereich  $\pm 1$  Stufe des Mittelwertes. Die Versuche in der Schweiz zeigen sehr ähnliche, etwas weniger homogene Resultate. Es ist aber durchaus möglich, wenn auch selten, dass einmal zwei benach-

barte Rutschblockversuche sehr unterschiedliche Resultate zeigen. Obwohl die aktuelle Datenlage zur Variabilität eher bescheiden ist, so scheint die Vorstellung des Flickenteppichs doch überholt. Zweifellos ist die Schneedecke inhomogen, aber das Ausmaß der Inhomogenität wurde teilweise überschätzt.

### Schneedeckenvariabilität

Die Variabilität ist zudem eine Frage der Betrachtungsweise. Es kommt auf die Skala an, das heißt, ob man alle 10 cm oder

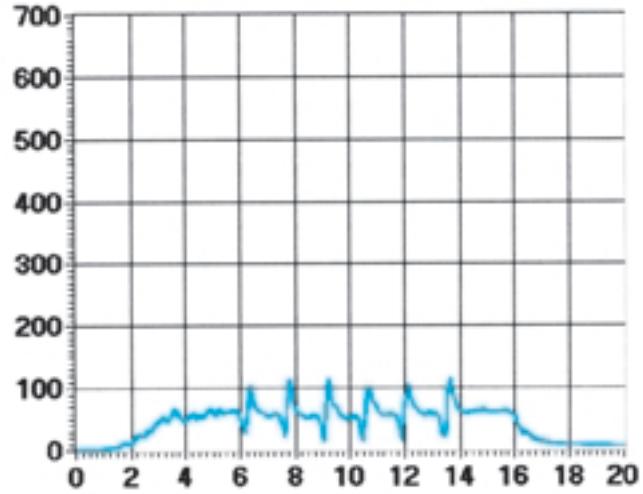
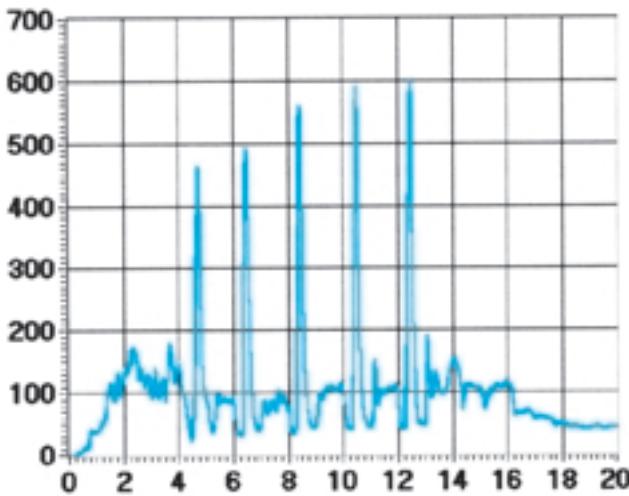
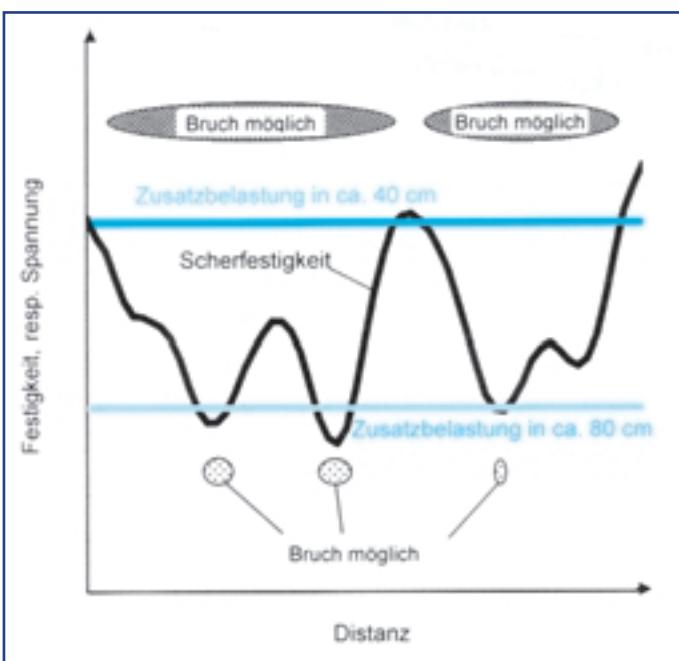


Abb. 3: Der Einfluss der Schichtung: weich – hart.

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).

alle 10 m, oder gar alle 1000 m misst. Misst man nur in einer bestimmten Skala, sind keine allgemeingültigen Aussagen zur Variabilität möglich. Welche Skala entscheidend ist, ist heute weitgehend unbekannt. Das Ausmaß der Variabilität hängt wesentlich vom Prozess der Schwachschichtbildung und den Bedingungen bis zum und während des Einschneierns der Schwachschicht ab. Generell gilt zudem, dass oberhalb der Waldgrenze, wo der Windeinfluss stärker ist, die Variabilität zunimmt. Bildet sich beispielsweise als Folge eines Regenfalles oder eines Wärmeeinbruches eine Kruste an der Oberfläche, so wird die flächige Variabilität gering sein. Ganz anders kann die Situation bei einem Oberflächenreif aussehen. Herrschen bei der Bildung häufig noch ähnliche Verhältnisse, so kann der Reif vor dem Einschneien je nach Exposition oder Lage durch den Wind zerstört werden.

Wissenschaft



**Abb. 4:** Abnehmende Auslösewahrscheinlichkeit mit zunehmender Tiefe der Schwachschicht - ein mögliches Modell.

Die schwarze Kurve zeigt eine fiktive Verteilung der Festigkeit (Streuung: 26%) in einer Schwachschicht quer durch einen Hang, wie sie verschiedentlich gemessen wurde. Die hellblaue und die dunkelblaue Linie geben die ungefähre Größe der durch einen Schifahrer 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 (schwarze Kurve) vorkommt, und dass die darüberliegenden Schichten dieselben Eigenschaften haben.

Befindet sich die Schwachschicht beispielsweise 40 cm unterhalb der Schneeeoberfläche, so besagt das Diagramm, dass praktisch überall die durch den Schifahrer verursachten Kräfte die Festigkeit übersteigen, dass also praktisch überall im Hang der Schifahrer lokal einen Bruch erzeugen kann und damit eine Lawinenauflösung 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 Schifahrer eine Schneebrettawine auslösen kann. Es gibt in unserem fiktiven Beispiel lediglich zwei bis drei Stellen, wo allenfalls ein Schifahrer einen lokalen Bruch erzeugen kann und - falls es zur Bruchausbreitung kommt - allenfalls auch eine Lawine entstehen kann.

### Wie kommt es zur Schneebrettawine?

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 Schneebrettauslösung gehen davon aus, dass zuerst irgendwo in der Schwachschicht lokal ein Bruch erfolgt, ein so genannter Initialbruch. Derartige Initialbruchflächen werden auch superschwache Zonen (oder hot spots) genannt. Die Modelle besagen, dass solche Zonen praktisch keine Scherspannungen übertragen können. Die Festigkeit in solchen Zonen soll geringer als das Gewicht der darüberliegenden Schneeschicht sein.

Der Initialbruch kann sich, falls genügend Energie für die Bruchausbreitung zur Verfügung steht, 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. Offensichtlich scheint, dass ein derartiger Bruchprozess von einer natürlichen Schwachstelle ausgehen dürfte, wo die Verformung sich konzentriert und es so zu einer allmählichen lokalen Schwächung der Schneefestigkeit kommt. Während Schneefallperioden kann aller-

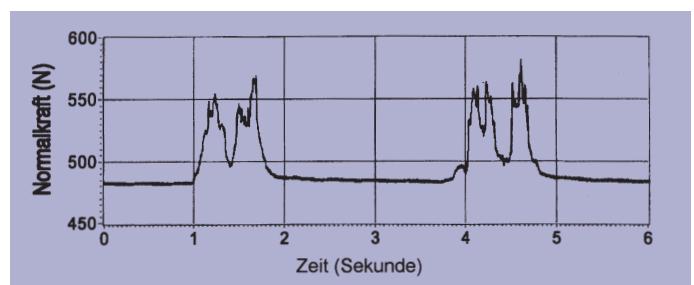
dings lokal ganz einfach auch die Festigkeit durch die zusätzliche Belastung überschritten werden. Sicher ist lediglich, dass solche Initialbruchflächen nicht einfach da sind, und vor allem, dass sie - einmal entstanden - ihre Eigenschaft als Rissstelle nur während sehr kurzer Zeit behalten. Als Folge 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 Schifahrer eine Schneebrettawine auslösen kann, ist in der Regel keine derartige superschwache Zone nötig. Dies wurde schon seit längerer Zeit vermutet, und durch Messungen jetzt erhärtet. Durch die Intensität der punktuellen Zusatzbelastung kann ein Skifahrer nämlich direkt einen lokalen Bruch erzeugen, der sich unter Umständen ausbreiten kann, ebenso wie dies beispielsweise durch Sprengungen geschieht.

### Wummmmm

Bricht eine Schicht zusammen, wird durch das plötzliche, minimale Absacken eine Vibration angeregt, die als dumpfes Wumm-Geräusch vernehmbar ist. Wie weit sich ein solcher Bruch ausbreitet, kann sehr unterschiedlich sein, manchmal nur einige Meter (Wum), dann wieder quer durch ganze Täler (Wummm). Je dumpfer der Ton, umso grösser scheint die gebrochene Fläche zu sein. Bei einer Fernauflösung, die auch von einer flachen Gelände-



**Abb. 5:** Zwei Schifahrer gehen (fahren) hintereinander über eine Messplatte (effektive Tiefe: 26 cm, weiche Oberfläche) hin und zurück. Die Normalkräfte (Spannungsspitzen) addieren sich nicht. Nur für eine sehr geringe Zusatzbelastung erfolgt eine leichte Überlagerung.



**Entlastungsabstände führen zu einer Reduktion des Risikos im Aufstieg.**

partie ausgehen kann, wird durch eine lokale Überlastung also ein Druckbruch erzeugt, der sich entlang einer Schwachschicht so weit in steiles Gelände ausbreitet, dass schließlich eine Schneebrettawine entsteht. Wie die Schneedecke, und vor allem eine Schwachschicht, genau beschaffen sein muss, damit ein Bruch sich ausbreitet, ist noch teilweise unbekannt. Generell kann aber gesagt werden, dass die Bereitschaft zur Bruchausbreitung mit der Größe der belasteten und dadurch allenfalls geschädigten Fläche zunimmt. Bruchgeschwindigkeiten wurden im Bereich von 6 m/s bis über 300 m/s gemessen. Je dicker das Brett, umso schneller ist die Bruchausbreitung. Bekannt ist zudem, dass bei solchen Ferauslösungen Schwachschichten fast immer aus Oberflächenreif, Schwimmschnee oder kantigen Formen bestehen, bei denen ein Strukturbruch stattfinden kann.

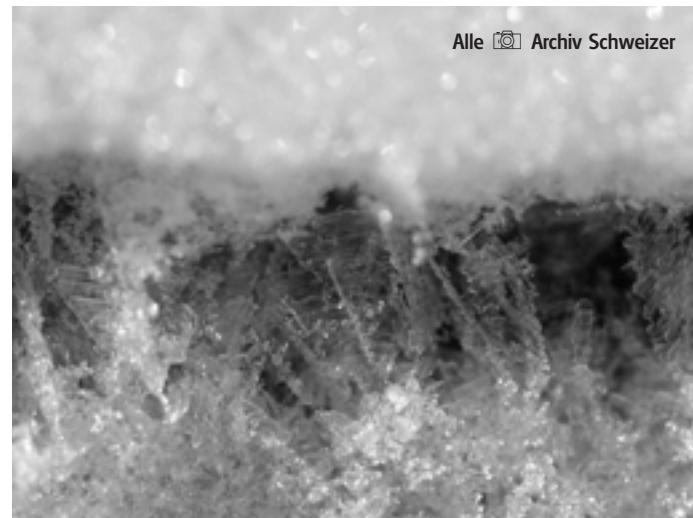
#### Entlastungsabstände

Die Messungen der durch einen Schifahrer verursachten Zusatzbelastungen in der Schneedecke zeigen, dass sich die Kräfte mehrerer Schifahrer beim Aufstieg hintereinander praktisch nicht addieren (oder erst in einer Tiefe, in der die punktuelle Zusatzbelastung schon beinahe vernachlässigbar ist), hingegen ist die flächige Wirkung gesamthaft größer (vgl. Abb. 5).

Damit steigt die Wahrscheinlichkeit, dass ein lokaler Bruch sich ausbreiten kann. Stehen mehrere Schifahrer nahe beieinander, etwa beim schischulmäßigen Sammeln, so können sich die Kräfte addieren, und die Belastung erfolgt gleichzeitig auf einer größeren Fläche - eine doppelt ungünstige Situation. Entlastungsabstände sind somit sinnvoll, weil die Gesamtbelastung abnimmt, die belastete Fläche kleiner ist, und nicht zuletzt, weil man auch nicht weiß, wie sich die mehrmalige Belastung in kurzen zeitlichen Abständen auswirkt, z.B. beim geschlossenen Aufstieg mehrerer Skifahrer in der gleichen Spur. Schließlich tragen Entlastungsabstände häufig ganz wesentlich zur Verringerung des Schadenausmaßes bei.

#### Schlussfolgerungen

Schifahrer lösen Lawinen durch ihre erheblichen, dynamischen, punktuellen 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“, und die Neigung



**Von nahe besehen wird die filigrane Struktur deutlich. Säulen gleich verbinden die Oberflächenreifkristalle zwei Schneeschichten.**

zur Bruchausbreitung zu berücksichtigen. Die Kräfte aufgrund der Belastung durch Schifahrer nehmen mit der Tiefe rasch ab und wirken nur lokal. Befindet sich eine ausgeprägte Schwachschicht nicht allzu weit unterhalb der Schneoberfläche (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, 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 auskeilender 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 (Wumm-Geräusch) führt zu einem Lawinenabgang. Ob sich ein lokaler Bruch ausbreiten kann, hängt ebenfalls vom Schneedeckenaufbau ab. Falls für die Bruchausbreitung viel Energie zur Verfügung steht, können auch stabile Hangteile abscheren.

Um die Bedingungen für die Bruchbildung und -ausbreitung zu verstehen, bleibt noch viel zu tun. Sicher ist, dass Schneebrettawinen umso größer werden, je härter die abgleitende Schicht ist.



**Dr. Jürg Schweizer ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Eidgenössischen Institut für Schnee- und Lawinenforschung (SLF) in Davos, Schweiz**

**Entlastungsabstände sind somit sinnvoll, weil die Gesamtbelastung abnimmt, die belastete Fläche kleiner ist, und nicht zuletzt, weil man auch nicht weiß, wie sich die mehrmalige Belastung in kurzen zeitlichen Abständen auswirkt, z.B. beim geschlossenen Aufstieg mehrerer Skifahrer in der gleichen Spur. Schließlich tragen Entlastungsabstände häufig ganz wesentlich zur Verringerung des Schadenausmaßes bei.**