

Von der Schneeflocke zur Lawine

Am Schweizer Institut für Schnee- und Lawinenforschung in Davos beschäftigen sich Forscher u. a. mit den Materialeigenschaften von Schnee sowie der Entstehung und Dynamik von Lawinen.

Stefan Jorda

Mein erstes Ziel ist der Zauberberg. Von Davos aus geht es mit der Standseilbahn zum ehemaligen Sanatorium auf der Schatzalp, das Thomas Mann in seinem Roman verewigt hat. Für den prächtigen Jugendstilbau habe ich aber keine Zeit, denn von hier soll es 500 Meter höher gehen zum Strelapass. Dort unterhält das WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF eine meteorologische Station und ein Versuchsgelände.⁺⁾ Doch die Skilifte, die uns dorthin bringen sollen, stehen still. Weiter oben tobt ein Sturm. Für meinen Begleiter Alec van Herwijnen gehören die Launen der Natur zum täglichen Brot. Der promovierte Physiker leitet die Forschungsgruppe Lawinenbildung am SLF und hat rasch einen Plan B. Mit den Tourenski steigen wir durch den verschneiten Wald und an einer Almhütte vorbei, bis wir einen freien Hang auf etwa 2000 Meter Höhe erreichen, den van Herwijnen für geeignet hält. Hier will er mir zeigen, mit welchen Methoden er die Eigenschaften der Schneedecke untersucht.

„Ich habe schon immer gerne im Schnee gespielt“, sagt van Herwijnen und nimmt die Lawinenschaufel in die Hand. Er sticht damit senkrecht in den Schnee und schaufelt so lange Schnee beiseite, bis er einen senkrechten Schnitt durch die 1,30 Meter dicke Schneedecke freigelegt hat. Bereits auf den ersten Blick sind verschiedene Schichten zu erkennen, die er nun routiniert vermisst. Mit einem Metermaß bestimmt er die Tiefe der Schichten, mit einer Lupe Größe und Form der Schneekörner und mit einem Thermometer das Temperaturprofil. „Die Schneedecke ist wie ein Archiv der Witterung“, erklärt er und zeigt auf eine tief eingeschnitene dünne Kruste: „Die ist vom 10. und 11. Januar, da hat es



Thomas Stucki, SLF

Bei Schneebrettlawinen kommt eine Schneeschicht als Ganzes (ein „Brett“) ins Rutschen. Sie treten typischerweise auf,

wenn ein Hang steiler als 30 Grad und die Schneedecke instabil ist.

bis auf 2500 Meter Höhe geregnet“. Anschließend fielen 20 Zentimeter Schnee, bevor es eine Woche lang sonnig war mit sehr kalten Nächten, in denen sich Oberflächenreif gebildet hat. Unter der Lupe sind die großen kantigen Schneekristalle des Reifs zu erkennen. Da diese sich mit den seither gefallenen 60 Zentimeter Schnee nur schlecht verbinden können, ist die eingeschnitene Reifschicht entscheidend für die Lawinengefahr: Spontan oder unter Belastung durch einen Skifahrer kann diese Schwachschicht kollabieren. Ist der Hang flach, macht sich das nur durch ein deutlich hörbares „Wumm“ bemerkbar. Ist der Hang aber steiler, kann die ganze Schneedecke über der Schwachschicht ins Gleiten kommen und als Schneebrettlawine abgehen.

Mit der touristischen Erschließung der Alpen, dem Bau von Verkehrswegen und Wasserkraftwerken stieg Anfang des letzten Jahrhunderts die Notwendigkeit, Lawinen und ihre Entstehung wissenschaftlich zu untersuchen.

1942 wurde daher das Eidgenössische Institut für Schnee- und Lawinenforschung gegründet. Im Winter 1950/51 fiel so viel Schnee, dass in der Schweiz fast hundert Lawinentote zu beklagen waren. Dies führte die praktische Notwendigkeit von Lawinenschutz und -vorhersage drastisch vor Augen und löste verstärkte Forschungsanstrengungen aus. Heute ist das SLF ein interdisziplinäres Institut, dessen 140 Mitarbeiter sich mit der Entstehung und der Dynamik von Lawinen ebenso befassen wie mit den Materialeigenschaften von Schnee oder der Wirksamkeit von Schutzmaßnahmen. Dazu stehen ihnen Kältelabors und eine Schneemaschine zur Verfügung sowie verschiedene Versuchsfelder, in denen sie auch gezielt große Lawinen durch Sprengungen auslösen, um zum Beispiel Simulationsrechnungen mit den Beobachtungen zu vergleichen. Wintersportler kennen das SLF vor allem wegen des täglichen Lawinenbulletins, das die Lawinengefahr für alle Schwei-

+) Das SLF gehört zur Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL.

zer Bergregionen mit den Stufen 1 („gering“) bis 5 („sehr groß“) quantifiziert. Wichtige Puzzleteile für das Bulletin sind Wetterbeobachtungen und Schneeprofile, die regelmäßig an verschiedenen Punkten in der Schweiz aufgenommen werden.

Eine der großen Schwierigkeiten bei der Bewertung der Lawinengefahr besteht darin, dass der Aufbau der Schneedecke lokal stark variieren kann, je nach Hangneigung und Himmelsrichtung, Sonneneinstrahlung oder Wind. Außerdem ist die Schneedecke nicht statisch, sondern ändert sich insbesondere in Oberflächennähe ständig. Die filigranen großen Schneeflocken runden sich ab und schrumpfen, um die Oberflächenenergie zu reduzieren. Dadurch setzt sich die Schneedecke unter ihrem Eigengewicht. Außerdem liegt an der Schneedecke immer ein Temperaturgradient an: Am Boden beträgt die Temperatur konstant 0 Grad Celsius, an der Oberfläche ist sie immer negativ – heute sind es –7 Grad Celsius. Dadurch können in der Schneedecke aus den Körnern wieder große kantige oder becherartige Kristalle wachsen, die ebenfalls eine Schwachschicht bilden können. Um solche Schichten nicht nur lokal durch ein Schneeprofil identifizieren zu können, versuchen die Wissenschaftler am SLF unter anderem, Schneeprofile ausgehend von Wetterdaten direkt zu berechnen. „Ein langfristiges

Ziel wäre es, damit für die ganze Schweiz die lokale Schneedecke zu simulieren“, sagt van Herwijnen. Außerdem sollen neue experimentelle Methoden Erkenntnisse liefern über den Aufbau der Schneedecke und ihre Stabilität.

Mit Säge und Hightech

Aus einem vollen Rucksack entnimmt van Herwijnen mehrere Teile, die er zu einer langen Stange zusammenschraubt. An der Spitze trägt sie einen Piezosensor, und mit einem Schrittmotor lässt sie sich durch die Schneedecke bewegen. In weniger als einer Minute ist damit ein Profil des mechanischen Eindringwiderstands aufgenommen mit einer räumlichen Auflösung von unter einem Millimeter. Auch wenn die Interpretation dieser Daten komplex ist, deuten die bisherigen Ergebnisse darauf hin, dass sich mit diesem Gerät die Suche nach einer Schwachschicht in der Schneedecke deutlich beschleunigen lässt. Doch wenn eine solche Schicht gefunden ist, stellt sich die für die Beurteilung der Lawinengefahr viel wichtigere Frage nach ihrer Belastbarkeit. Kann die Schicht lokal kollabieren? Falls ja, wird sich dieser Bruch dann auch großflächig ausbreiten und eine Schneebrettlawine auslösen?

Um diese Fragen zu beantworten, gibt es verschiedene Tests, bei denen eine freistehende

Schneesäule sukzessive belastet wird. So klopft man zum Beispiel mit dem Spaten immer stärker auf die Säule, bis der Schneeblock oberhalb der Schwachschicht abgleitet – oder eben nicht. Doch auch hier entwickelt das SLF neue Messmethoden. Alec van Herwijnen legt eine Schneesäule mit einer Grundfläche von 30 mal 150 Zentimeter komplett frei und drückt schwarze Knöpfe so in die eine Seite, dass sie ein regelmäßiges Messgitter bilden. Nun richtet er eine Kamera auf die Schneesäule aus und schneidet mit einer Säge in die Schwachschicht hinein. Bereits nach wenigen Zentimetern breitet sich der Riss schlagartig aus, und die gesamte Schneesäule setzt sich um wenige Millimeter. Für das Auge ist der ganze Vorgang kaum sichtbar, das Messgitter erlaubt es aber später am Institut, den Film im Detail zu analysieren und daraus mechanische Eigenschaften wie die Elastizitätskonstante des Schnees zu extrahieren. „Wenn ich in die Schwachschicht schneide, und der Schnee darüber ist zu weich, dann bricht er einfach ab. Ist er aber fest genug, beginnt er sich durchzubiegen wie ein Balken, der an einem Ende nicht unterstützt ist“, erklärt van Herwijnen das Experiment. Ist der Schnitt lang genug, kann der ganze Balken nachgeben, sodass die in ihm gespeicherte Energie für die Bruchausbreitung zur Verfügung steht. Ob sich bei einer gegebenen Schneedecke aber tatsächlich ein



Alec van Herwijnen (mit roter Jacke) nimmt ein Schneeprofil auf (links). Mit der Denoth-Sonde lässt sich die Schneedichte von trockenem Schnee bzw. der Flüssigwassergehalt in feuchtem Schnee messen. Beim „Propagation Saw Test“ sägt van



Herwijnen in eine Schwachschicht, um herauszufinden, ob sich ein Bruch ausbreitet (rechts). Dank der schwarzen Markierungen lässt sich ein Film des Vorgangs später im Detail auswerten.

SLF, Mallaun Photography



Henning Löwe setzt im Kältelabor bei -15 Grad Celsius eine Schneeprobe in einen Computertomographen.

Bruch ausbreitet oder nicht, lässt sich bislang nur im Experiment entscheiden.

Heißer Schnee

Nach rund drei Stunden hat Alec van Herwijnen genug Daten gesammelt und packt seine Geräte zusammen. Mit kalten Füßen geht es auf die Skier; durch den Wald fahren wir ab nach Davos, wo ich am Institut mit Henning Löwe von der Forschungsgruppe Schneephysik verabredet bin. In Göttingen hat er über ungeordnete, weiche Materie promoviert, bevor er vor zehn Jahren nach Davos gekommen ist, weil ihn interessiert hat, wie Schnee als Material „funktioniert“. Dabei geht es nicht nur um Lawinen, sondern zum Beispiel auch um Satellitendaten, die Aufschluss über die Schneebedeckung in Arktis und Antarktis geben sollen. Um diese Radardaten korrekt interpretieren zu können, muss man verstehen, wie die Reflektivität für Mikrowellen von der Struktur des

Schnees abhängt. Eine wesentliche Aktivität der Forschungsgruppe besteht daher darin, die in der Natur ablaufende Umwandlung – die Schneemetamorphose – unter kontrollierten Bedingungen im Labor nachzuvollziehen. Dazu hat das SLF zwei Computertomographen angeschafft, die in einem Kältelabor bei -15 Grad Celsius betrieben werden und eine Auflösung von sieben Mikrometern erreichen – das ist die typische Strukturgröße von sehr frischem Neuschnee. Auf Schneefall ist Löwe aber nicht angewiesen, denn eine Maschine erlaubt es auch im Sommer, Schnee unter definierten Bedingungen herzustellen.

Dazu wird kalte Luft über einen offenen Behälter mit warmem Wasser geblasen. Die Luft nimmt Wasserdampf auf und strömt in eine kalte Kammer, in der Fäden gespannt sind. An diesen Nukleationskeimen wachsen aus der übersättigten Luft Schneekristalle, die mit feinen Besen abgestreift werden. Einen ganzen Tag dauert es, auf diese Weise einen Wäschekorb voller Schnee herzustellen – dafür hat dieser aber auch nichts mit Kunstschnee zu tun, der aus gefrorenen Wassertropfchen besteht.

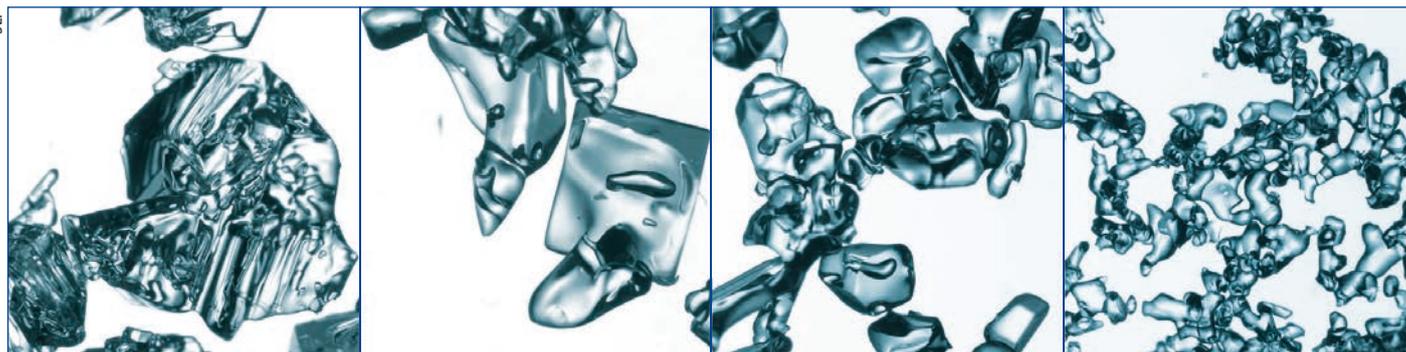
An einigen Kubikzentimeter großen Schneeproben lässt sich im CT über Tage hinweg die Schneemetamorphose in situ und in Echtzeit beobachten. Wie im Freien liegt dazu ein Temperaturgradient am Probenhalter. Am Computer zeigt Löwe mit einem Zeitrafferfilm, wie die Schneekristalle wachsen und dabei ihre Form ändern. Da der Dampfdruck unten höher ist (dort ist es wärmer), sublimiert unten Schnee, der als Dampf nach oben diffundiert und dort resublimiert. „Durch diesen gerichteten Trans-

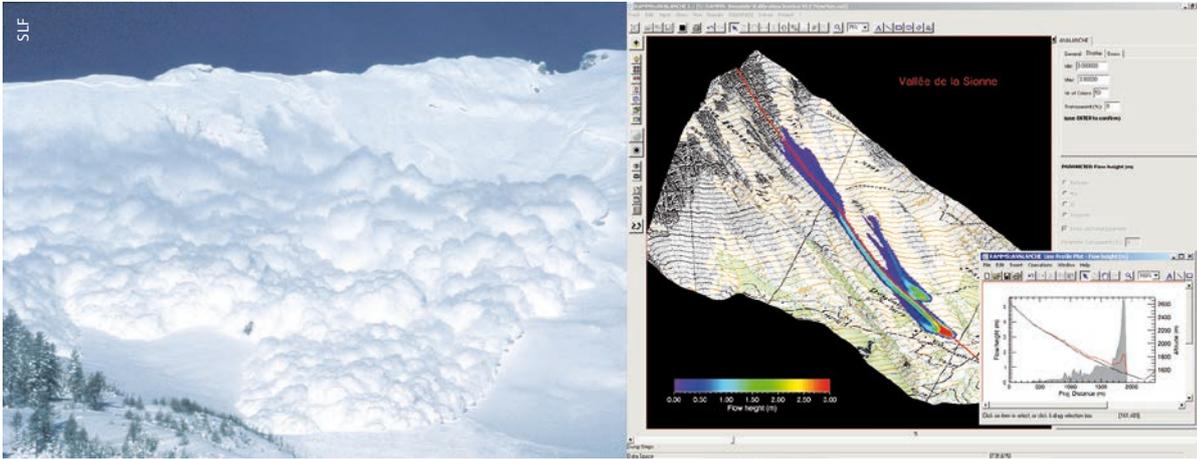
port entstehen in der Schneedecke völlig andere Kristallformen als in der Atmosphäre“, erläutert Henning Löwe. So ist beispielsweise die Mikrostruktur von Neuschnee eine ganz andere als die von Tiefenreif, der sich in der Schneedecke durch die Metamorphose gebildet hat. Ziel dieser Untersuchungen ist es, aus der Mikrostruktur von kleinen Proben makroskopische Eigenschaften wie Elastizität, Wärmeleitfähigkeit oder Brucheigenschaften abzuleiten und damit zu versuchen, ein Kontinuumsmodell für die ganze Schneedecke zu formulieren. Diese Vorgehensweise wird auch bei anderen komplexen Materialien wie Keramiken angewendet, „die besondere Herausforderung von Schnee besteht aber darin, dass dieser so heiß ist“, sagt Löwe. Heiß? „Ja, die Temperatur ist immer nahe am Schmelzpunkt von 0 Grad Celsius, das ist vergleichbar mit Eisen bei 1500 Grad.“ Durch diese „hohe“ Temperatur ist Schnee ein sehr dynamisches Material, für das die Strukturveränderung und deren Auswirkung auf makroskopische Eigenschaften auf gleichen Zeitskalen ablaufen. „Dass man diese beiden Effekte nicht entkoppeln kann, ist die Hauptherausforderung“, betont Löwe.

Physik statt Statistik

Während sich die Wissenschaftler am SLF also einerseits damit beschäftigen, unter welchen Bedingungen Lawinen überhaupt entstehen, ist es andererseits genauso wichtig, die Dynamik einer Lawine auf dem Weg ins Tal zu verstehen. Vor allem geht es darum, wie weit Lawinen nach extremen Schneefäl-

Im Computertomographen zeigt sich, dass Schneekristalle ebenso becherförmig sein können (v. l.) wie kantig, groß und rund oder klein und rund. Die Ausschnitte sind $3,2$ mal $3,2$ mm² groß.





Wissenschaftler des SLF lösen im Vallée de la Sionne im Wallis gezielt große Lawinen aus und vermessen diese mit einem

Arsenal an Instrumenten. Ein komplexes Simulationsprogramm erlaubt es, die Lawine sehr genau zu reproduzieren.

len kommen und welche Schäden sie anrichten können. Damit lässt sich entscheiden, welche Gebiete gefährdet sind, sodass man dort zum Beispiel nicht bauen darf. In den 1950er-Jahren wurde in der Schweiz begonnen, entsprechende Gefahrenkarten zu erstellen. Die Forscher haben sich damals bewusst gegen rein statistische Methoden zur Risikobewertung entschieden und stattdessen auf physikalische Modelle gesetzt. „Ich finde diese Entscheidung faszinierend. Die Pioniere haben sich zugeutraut, den physikalischen Prozess der Lawindynamik in den Griff zu kriegen“, sagt Perry Bartelt, der sich mit seiner Forschungsgruppe am SLF generell mit gravitationsgetriebenen Massenbewegungen beschäftigt – dazu gehören auch Schlammlawinen (Murgänge) oder Steinschlag durch große Felsblöcke.

Die ersten Modelle waren noch sehr idealisiert: Die Forscher teilten die Lawinenbahn in eine Anfangs-, eine Beschleunigungs- und eine Auslaufzone und schätzten mit gewissen Annahmen zur Reibung ab, wie weit ein Schneequader mit gegebener Masse kommt, der sich oben in Bewegung setzt. Sehr viel komplexer ist das Programm, das Perry Bartelt und seine Kollegen in den letzten Jahren entwickelt haben. Es erlaubt die Simulation von Lawinen in einem beliebigen Gelände, das durch eine echte topographische Karte beschrieben wird. Damit können Ingenieure die Wirkung von Schutzmaßnahmen wie Lawinenverbauungen vorab

berechnen und diese optimieren. Das Programm berücksichtigt zum Beispiel, dass die Lawine unterwegs weiteren Schnee aufnimmt, dass der Schnee nicht homogen ist oder dass Kollisionen der Schneekörner miteinander das Volumen der Lawine vergrößern. Dadurch können bei trockenem Schnee Staublawinen entstehen. „Früher hatten wir nur Newtonsche Mechanik, heute berücksichtigen wir auch die Gasdynamik von Boltzmann“, bringt Bartelt den Fortschritt auf den Punkt. Mit dem Volumen ändert sich auch die Reibung, die geringer wird, je schneller der Schnee fließt. „Wäre die Reibung konstant, dürften Lawinen nie so weit kommen wie beobachtet“, sagt Bartelt.

Mit dem Ziel, die Lawindynamik immer besser zu verstehen, führt das SLF auch große Lawinerversuche durch. Im Vallée de la Sionne im Wallis betreibt es dafür ein weltweit einmaliges Testgelände. Am 3. Februar war es zuletzt soweit: Mit Laserscannern und Radar wurde zunächst die Schneedecke präzise vermessen, bevor eine Hubschrauberbesatzung mit mehreren Kilo Sprengstoff große Lawinen auslöste, die mehr als zwei Kilometer weit ins Tal rauschten. Messinstrumente an einem Mast mitten im Lawinenfeld zeichneten verschiedenste Messgrößen auf, beispielsweise eine maximale Geschwindigkeit von 140 km/h. Nachdem die Lawinen zum Stillstand gekommen waren, wurde die Topographie erneut vermessen, um die bewegten Schneemassen genau quantifizieren

zu können. Auch wenn es heute mit dem Simulationsprogramm möglich ist, die tatsächliche Lawine sehr genau zu reproduzieren, war es im Vorfeld überhaupt nicht sicher, ob die Sprengung wirklich eine Lawine auslösen und wie groß diese sein würde.

Bartelts Gruppe hat inzwischen auch begonnen, sich mit der Vorhersage von Lawinen zu beschäftigen, also mit der Frage, ob in einem gewissen Hang zu einer bestimmten Uhrzeit eine Lawine abgeht oder nicht. „Solche Prognosen sind aber sehr heikel“, sagt Bartelt, „denn dafür braucht man eine viel höhere Genauigkeit als für die Frage, ob eine große Lawine grundsätzlich einen Ort gefährden kann oder nicht.“ Daher ist für den promovierten Bauingenieur bislang auch nicht abzusehen, dass das „unglaublich klug ausgedachte“ System der Schweizer Lawinenwarnungen, in das auch viele Erfahrungswerte eingehen, abgelöst wird. „Dieses System ist viel robuster als ein deterministisches physikalisches Modell, für das wir gar nicht alle notwendigen Informationen kennen können“, ist Bartelt überzeugt. Der Erfolg gibt ihm Recht, denn dank dieses Systems gab es im Februar 1999, der mit dem Winter 1950/51 vergleichbar war, „nur“ 17 Lawinentote in der Schweiz. Aber unabhängig davon, wie ausgeklügelt ein System auch ist: Wenn sich Wintersportler über Warnungen hinwegsetzen und in einen lawinengefährdeten Hang hineinfahren, kann es nicht helfen.