



3 WANN KANN ES LAWINEN GEBEN?

Wie schon gesagt: Die typischen Skifahrerlawinen sind Schneebretter. Genauer: trockene Schneebretter. In diesem Kapitel will ich die grundsätzlichen Voraussetzungen für Schneebrettlawinen kurz zusammenstellen und in Kapitel 4 und Kapitel 5 werde ich versuchen, die Mechanismen zu erläutern, die zu einer Auslösung einer Schneebrettlawine führen. Anschließend, in den Kapiteln 6 und 7, werde ich mich dann Nassschneelawinen (nassen Schneebrettern und Gleitschneelawinen) und Lockerschneelawinen zuwenden.

3.1 Gebundener und ungebundener Schnee

»Gebundener« Schnee habe ich schon öfter angesprochen. Jetzt möchte ich auch einmal genauer erklären, was das ist. Gebundener Schnee ist solcher, bei dem durch den Zusammenhalt seiner Bestandteile (Flocken, Kristalle, Körner etc.) Kräfte innerhalb der Schneesicht über größere Entfernungen (jedenfalls über mehr als einige Zentimeter) übertragen werden können. Das ist bei »hartem« Schnee durch seine Festigkeit klarerweise stets erfüllt, kann aber auch bei recht weichem Schnee, der bei oberflächlicher Betrachtung kaum von Pulverschnee zu unterscheiden ist, der Fall sein. Dann liegt eben ein »weiches Schneebrett« vor. »Ungebundener« oder »weicher« Schnee ist demgegenüber solcher, bei dem seine Bestandteile (Flocken, Kristalle, Körner etc.) untereinander so wenig verbunden sind, dass eine Kräfteübertragung nicht oder höchstens über sehr kurze Entfernungen (maximal einige Zentimeter) möglich ist.

Unterscheiden kann man »gebundenen« und »ungebundenen« Schnee mittels des »Schaufeltests«: Wenn ein mit einer Schaufel ausgestochener Block Schnee mit der Schaufel hochgehoben werden kann und auch bei leichten Erschütterungen nicht in sich zusammenbricht, handelt es sich um »gebundenen Schnee« (siehe Abbildung 52, oben). Lässt der Schnee sich gar nicht als Block hochheben oder bricht er schon bei der kleinsten Erschütterung in sich zusammen,

Abbildung 52: Gebundener und ungebundener Schnee

Gebundenen Schnee erkennt man daran, dass man einen Block auf einer Schaufel hochheben kann und er auch bei kleinen Erschütterungen nicht zerfällt (oben), während ungebundener Schnee sich gar nicht als Block hochheben lässt, oder jedenfalls sofort bei der kleinsten Erschütterung zerfällt (unten).



Durch Wechtenbruch ausgelöste Lawine.



Abbildung 53: Spuren in gebundenem und ungebundenem Schnee

Beim Spuren in gebundenem Schnee bleibt zwischen den Skiern ein Steg stehen und alle Kanten und Flanken sind scharf ausgeprägt und glatt (links), in ungebundenem Schnee zerfallen Steg und Flanken (rechts).

handelt es sich um »ungebundenen Schnee« (siehe Abbildung 52, unten). Auch beim Anlegen einer neuen Spur kann man den Unterschied einigermaßen gut erkennen: Wenn man beim Spuren die Ski nicht ganz eng nebeneinander setzt, erhält man 2 getrennte Spuren mit einem Steg dazwischen. Sind Spuren und Steg deutlich ausgeprägt und mit scharfen Kanten und senkrechten und glatten Flanken versehen, handelt es sich um gebundenen Schnee. Zerfallen Spuren, Steg und Flanken, handelt es sich um ungebundenen Schnee, z.B. echten Pulverschnee (siehe Abbildung 53, aber Achtung, bei Packschnee – siehe Kapitel 2.3.2 – zerfallen Spurränder oft auch sofort).

Nochmals: Harter (»fester«) Schnee ist immer »gebundener« Schnee, während weicher Schnee sowohl »gebunden« als auch »ungebunden« sein kann. Die oft synonyme Verwendung des Wortes »weicher« Schnee für »ungebundenen« Schnee ist unglücklich, weil eben auch recht weicher Schnee »gebunden« sein kann. Da sie aber weit verbreitet ist, muss man mit dieser Zweideutigkeit wohl leben.



3.2 Gleitschicht

Liegt eine gebundene Schneeschicht auf einer Schicht ungebundenem Schnee auf, kann die obere Schneeschicht grundsätzlich auf bzw. in der unteren Schicht abrutschen, falls nur der Hang steil genug ist. Man kann sich die ungebundene Schicht einfach als eine Schicht aus lauter kleinen, untereinander nicht bzw. nur sehr schwach verbundenen Kugeln vorstellen, die dem Abrutschen der oberen Schicht nur wenig Widerstand entgegensetzen (»Kugellager«). In der Lawinentheorie wird dann noch unterschieden, ob dieses Abrutschen auf der Oberfläche der ungebundenen Schicht (auf der obersten Kugellage) oder innerhalb dieser (zwischen den Kugellagen) erfolgt. Ein Abrutschen auf der Oberfläche bezeichnet man als »Scherbruch« (hier gleiten 2 Schichten aneinander vorbei, ohne selbst wesentlich verformt zu werden), ein Abrutschen innerhalb der ungebundenen Schicht als »Strukturbruch« (hier wird die Struktur der ungebundenen Schicht zerbrochen). Für das theoretische Verständnis von Lawinen ist die Unterscheidung wichtig, für die Praxis ergibt sich aber

kein großer Unterschied. Eine solche ungebundene Schicht, die innerhalb der Schneedecke als Kugellager dienen kann, wird manchmal einfach als »schwache Schicht« oder »weiche Schicht« bezeichnet, aber auch »Gleitschicht«, »Gleithorizont«, »Schwachsicht«, »Schwachzone«, »Schmierschicht«, »Schmierhorizont« genannt. Im Englischen ist die Bezeichnung »weak layer« gebräuchlich. Mit solchen Schichten werden wir uns noch öfter befassen müssen.

Oft hört man, dass ein Schneebrett »auf einer harten Schicht (Harschschicht oder Eisschicht innerhalb der Schneedecke) abgerutscht ist« und vielfach sieht es auch genauso aus. Aber wie schon in Kapitel 1.3 dargelegt, ist die eigentliche aktive Zone, in der das Losbrechen und Abrutschen der Lawine wirklich erfolgt, wahrscheinlich immer eine dünne Zwischenschicht aus weichem (ungebundenem) Schnee (siehe auch Kapitel 4 und Kapitel 5). Die harte Schicht darunter ist nur insofern für die Lawine (mit)verantwortlich, als sie einerseits gegebenenfalls durch das Zurverfügungstellen geeigneter Randbedingungen selbst mit dazu beiträgt, dass sich überhaupt eine Gleitschicht bildet (z.B. Kristallwachstum an der Schichtgrenze durch aufbauende Umwandlung, siehe Kapitel 2.2, aber auch Sperre für darauf ab rinnendes Schmelz- oder Regenwasser, siehe Kapitel 2.5) und andererseits als gleichmäßige schiefe Ebene zum leichten Abrutschen der Lawine dient.

3.3 Voraussetzungen für Schneebrettlawinen

3.3.1 Schichtenaufbau und Steilheit

Nehmen wir einmal an, dass ein gewisser Bereich der Schneedecke als Schneebrettlawine abrutschen will. Zwei Voraussetzungen für solch ein »Abrutschen als Schneebrettlawine« habe ich schon angegeben:

- I. Die Schneedecke muss schichtenförmig aufgebaut sein, mit einer gebundenen Schicht oberhalb als eigentlichem Schneebrett und einer weichen Schicht darunter als Gleitschicht (was unter dieser ist, spielt kaum eine Rolle) und
- II. der Hang muss ausreichend steil sein.

Fehlt eine dieser Voraussetzungen, gibt es keine (Schneebrett-)Lawine. Beide sind also notwendige Voraussetzungen.⁸ Aber auch wenn beide Voraussetzungen erfüllt sind, muss eine Lawine nicht

⁸ Für das Eintreten eines Sachverhaltes kann es »notwendige«, »hinreichende« und »notwendige und hinreichende« Voraussetzungen geben:

- Eine Voraussetzung (oder ein Satz von Voraussetzungen) ist »notwendig«, wenn bei ihrem Fehlen (Nicht-Zutreffen) der Sachverhalt auf keinen Fall eintritt, die Voraussetzung ist eben notwendig. Wenn eine notwendige Voraussetzung aber erfüllt ist, so muss der Sachverhalt immer noch nicht zwangsweise eintreten, es kann ja auch sein, dass hierfür auch noch andere Bedingungen erfüllt sein müssen. Beispiel: Eine notwendige Voraussetzung zum Skifahren ist, Ski zu haben (eigene oder ausgearbte). Aber nicht jeder, der Ski an den Füßen hat, kann auch gleich Ski fahren. Die Voraussetzung ist zwar notwendig, aber nicht hinreichend.
- Eine Voraussetzung (oder ein Satz von Voraussetzungen) ist »hinreichend«, wenn bei ihrem Zutreffen der Sachverhalt zwangsweise eintritt. Wenn eine hinreichende Voraussetzung nicht erfüllt ist, kann der Sachverhalt aber trotzdem eintreten, nur tut er das dann eben nur manchmal und nicht immer. Beispiel: Sich mit dem Hammer kräftig auf den Daumen zu schlagen, ist eine hinreichende Voraussetzung, um Schmerzen zu verspüren. Es gibt aber auch noch viele andere Gründe für Schmerzen, die Voraussetzung ist hinreichend, aber nicht notwendig.
- Eine Voraussetzung (oder ein Satz von Voraussetzungen) heißt »hinreichend und notwendig«, wenn bei ihrem Zutreffen der Sachverhalt zwangsweise eintreten muss und wenn bei ihrem Nicht-Zutreffen der Sachverhalt auf keinen Fall eintreten kann. Anmerkung: »Notwendige« Voraussetzungen anzugeben, ist oft relativ einfach. »Hinreichende« Voraussetzungen wirklich vollständig anzugeben, ist meist viel schwieriger, erst recht natürlich »notwendige und hinreichende« Voraussetzungen.

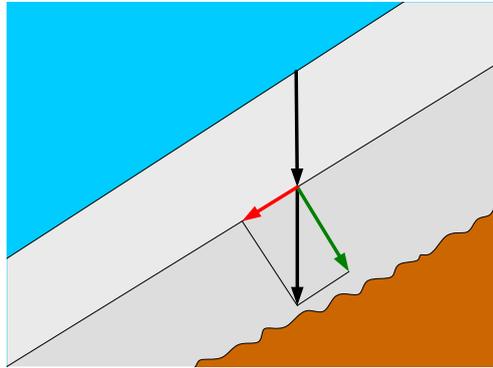


Abbildung 54: Kräfteparallelogramm

Die Gewichtskraft einer Schneemasse (schwarzer Pfeil) kann man in 2 Komponenten aufteilen: eine senkrecht zum Hang (grün) und eine parallel zum Hang (rot). Die Komponente senkrecht zum Hang drückt die untere Schneeschicht zusammen, nur die Komponente parallel zum Hang wirkt als Antriebskraft für die Lawine (»Hangabtriebskraft«). Sie ist umso größer, je steiler der Hang ist. Die Gewichtskraft ist die Resultierende aus der hangparallelen und der hangsenkrechten Kraftkomponente.

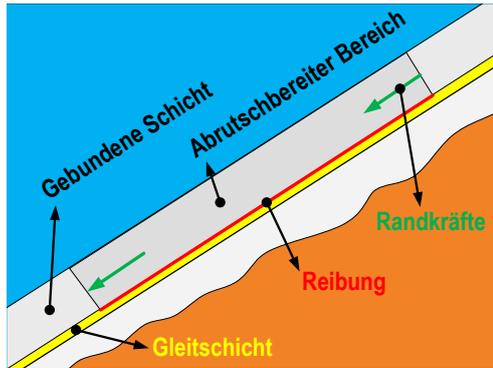


Abbildung 55: Rückhaltende Kräfte

Die Reibung auf der Unterlage (rot) sowie die Randkräfte (Festigkeit innerhalb der gebundenen Schicht, grün) versuchen, eine abrutschbereite Schneemasse am tatsächlichen Abrutschen zu hindern.

zwangsläufig abgehen. Dafür müssen vielmehr auch noch andere Bedingungen erfüllt sein. Die beiden Voraussetzungen sind daher, auch zusammen, keine hinreichenden Voraussetzungen. Konkret muss zusätzlich auch die Kräfteverteilung

innerhalb der Schneedecke »passen«; nur wenn auch das erfüllt ist, entsteht eine Lawine, hierzu gleich mehr.

3.3.2 Treibende und rückhaltende Kräfte

Bezüglich des Abrutschens einer Lawine gibt es immer zwei gegensätzlich gerichtete Einflüsse: treibende Kräfte und rückhaltende Kräfte.

- **Treibende Kräfte** ergeben sich aus dem Gewicht der abrutschbereiten Schneemasse und der Hangneigung: Das Gewicht drückt zunächst einmal nach unten. In ebenem Gelände bewirkt das nur ein Zusammendrücken der darunterliegenden Schneeschichten, weiter nichts. In einem geneigten Hang kann man die Gewichtskraft aber stets in zwei Komponenten aufteilen: in eine senkrecht zum Hang und in eine parallel zum Hang (Kräfteparallelogramm, siehe Abbildung 54). Die Komponente senkrecht zum Hang drückt den Schnee – wie die ganze Gewichtskraft im ebenen Gelände – einfach zusammen, die Komponente parallel zum Hang will den Schnee zum Abrutschen bringen. Diese treibende Kraft zum Abrutschen (»Hangabtriebskraft«) wird gegebenenfalls durch Zusatzlasten auf die Schneedecke (z.B. Gewicht eines Skifahrers) verstärkt (wobei die Zusatzlast natürlich genauso in eine hangsenkrechte und eine hangparallele Komponente aufgespalten werden muss).

- **Rückhaltende Kräfte** ergeben sich aus der Reibung und aus der Festigkeit: Dem Abrutschen-Wollen der gebundenen Schicht wirken die Reibung auf der Unterlage (bzw. innerhalb der »Gleitschicht«) und die Festigkeit innerhalb der gebundenen Schicht entgegen (siehe Abbildung 55). Bezüglich der Reibung spricht man von »basaler Reibung« (d.h. auf die Basis des abrutschberei-

ten Bereiches bezogener) Reibungskraft« und auch von »basaler Festigkeit« oder »basaler Scherfestigkeit« (Letzteres nicht ganz zutreffend auch dann, wenn das Abrutschen nicht als Scherbruch auf der Gleitschicht, sondern als Strukturbruch innerhalb dieser erfolgt, siehe Kapitel 3.2). Ist die Reibung groß genug, geht keine Lawine ab. Aber auch wenn die Reibung klein ist, kann eine Lawine noch dadurch verhindert werden, dass der abrutschbereite Bereich der gebundenen Schicht an seinem Rand festgehalten wird. Nur wenn die Festigkeit der gebundenen Schicht so klein ist, dass Letztere entlang des ganzen Umfangs des abrutschbereiten Bereiches aufreißt, kann eine Lawine abgehen. Solange die Festigkeit auch nur in einem Teil des Umfangs überwiegt, wird der abrutschbereite Bereich dort noch festgehalten und er kann sich nicht lösen und abrutschen. Diese durch die Festigkeit innerhalb der gebundenen Schicht bewirkten rückhaltenden Kräfte bezeichnet man als »Randkräfte«, weil sie eben am Rand des abrutschbereiten Bereiches wirken. Diese »Randkräfte« können umso größer werden, je höher die Festigkeit innerhalb der gebundenen Schicht ist.

Nochmals: Antreibend wirkt die Gewichtskraft zusammen mit der Steilheit des Hanges, rückhaltend wirken die Reibungskraft und die Randkräfte. Damit können wir eine dritte Voraussetzung für eine Lawine angeben:

- III. Damit eine Lawine abgehen kann, muss die hangabwärts gerichtete Komponente der Gewichtskraft – gegebenenfalls einschließlich Zusatzlast – größer sein als alle rückhaltenden Kräfte zusammen (basale Reibungskraft und Randkräfte).

Zusammen mit den beiden oben genannten Voraussetzungen ergibt sich

insgesamt ein notwendiger und hinreichender Satz von Voraussetzungen: Alle drei Voraussetzungen müssen vorhanden bzw. erfüllt sein, damit eine Lawine abgehen kann, wenn sie aber vorhanden sind, dann geht die Lawine auch sicher ab.⁹

Allerdings ist das mit den Voraussetzungen in der Realität wiederum doch nicht so einfach. Alle relevanten Kräfte, die Gewichtskraft, die Reibungskraft gegenüber der Gleitschicht (bzw. innerhalb der Gleitschicht) und auch die Randkräfte entlang des Umfangs eines abrutschbereiten Bereiches variieren von Ort zu Ort. Man müsste also für alle Punkte des abrutschbereiten Bereiches alle Kräfte aufsummieren und eine Gesamtbilanz ziehen. Das geht in der Realität aber auch nicht so leicht, weil die (abrutschbereite) gebundene Schicht nicht unendlich steif ist. In ihr können zwar Kräfte über gewisse Distanzen übertragen werden, aber infolge der Weichheit des Schnees werden sie nicht in voller Stärke übertragen. Je weiter sie übertragen werden müssen, umso kleiner »kommen sie dort an« (siehe auch Kapitel 5.7.3). Eine einfache Summenbildung funktioniert daher auch nicht.

3.3.3 Lawinenbedingung

Um das Problem dennoch etwas besser in den Griff zu bekommen, wollen wir uns nochmals dem Geschehen am Rande

⁹ Für aufmerksame Leser sei noch angemerkt, dass man die Voraussetzungen I und II eigentlich nicht unbedingt braucht, weil man sie auch als in der Voraussetzung III ohnehin enthalten ansehen kann: Die dort zu berücksichtigende Reibungskraft impliziert bereits, dass es Schichten gibt, zwischen denen es mehr oder weniger starke Reibung gibt (Voraussetzung I), und die ausreichende Hangsteilheit (Voraussetzung II) ist über die hangabwärts gerichtete Komponente der Gewichtskraft auf jeden Fall mit erfasst (in ebenem Gelände ist die »hangabwärts gerichtete Komponente der Gewichtskraft« immer null; je steiler der Hang wird, umso größer wird sie). Zur besseren Übersichtlichkeit habe ich jedoch die Voraussetzungen I und II extra aufgeführt.

des abrutschbereiten Bereiches zuwenden: Damit eine Lawine abgeht, muss zunächst am oberen Ende des abrutschbereiten Bereiches ein Zugriss auftreten. Ohne Zugriss gibt es keine Lawine (so ähnlich hatten wir das ja schon bei der Definition der Randkräfte gesehen). Der Zugriss tritt genau dort (in genau den Punkten) auf, wo die dort wirkenden (dort entstehenden bzw. bis dorthin übertragenen) hangabwärts gerichteten Kräfte größer sind als die dort gegebene Festigkeit des Schnees innerhalb der gebundenen Schicht. Wo immer das der Fall ist, reißt der Schnee auf.

Analoges gilt für den am unteren Ende des abrutschbereiten Bereiches notwendigen Druckbruch in der gebundenen Schicht: Ohne Druckbruch stützt sich der abrutschbereite Bereich ja noch voll ab und es kann keine Lawine geben. Und natürlich gilt das Gleiche auch für die den abrutschbereiten Bereich seitlich festhaltenden Flanken: Auch die müssen brechen (in dem Fall ist es ein Scherbruch), damit eine Lawine abgehen kann. Eine Lawine gibt es also nur, wenn:

- um den abrutschbereiten Bereich rundherum eine geschlossene Linie besteht, bei der punktweise die gerade genannte Bruchbedingung »hangabwärts gerichtete Kräfte größer Festigkeit« erfüllt ist (nur dann kann eine geschlossene Bruchlinie entstehen und nur dann sind die Randkräfte alle ausgeschaltet), und wenn zusätzlich
- der rundherum abgebrochene Bereich sich aufgrund der Reibung auf seiner Unterlage allein (also ohne Randkräfte) nicht halten kann.

In der Reihenfolge vertauscht und etwas anders ausgedrückt: Eine Lawine gibt es nur, wenn die Reibung alleine nicht ausreicht und wenn zusätzlich die Randkräfte völlig ausgeschaltet werden. Diese Voraussetzungen sind beides notwendige Voraussetzungen, ist auch nur eine da-

von nicht erfüllt, gibt es keine Lawine. Es kann ja einerseits – bei ausreichender Reibung – auch ein rundherum abgebrochener Bereich einfach liegen bleiben, und es kann andererseits – bei unzureichender Reibung – ein insofern abrutschbereiter Bereich sich noch irgendwo an seinem Rand festhalten (was er ja auch immer dann tut, wenn keine geschlossene Bruchlinie um ihn herum entsteht). Zusammen ergeben die beiden Voraussetzungen aber sehr wohl einen hinreichenden Satz von Voraussetzungen: Immer wenn beide Voraussetzungen erfüllt sind, geht die Lawine auch sicher ab. Zusammen sind die beiden Voraussetzungen also notwendige und hinreichende Voraussetzungen.

Auf Basis dieser Überlegungen können wir die oben formulierte Voraussetzung III auch etwas umschreiben:

»Eine Lawine geht immer genau dann ab, wenn die Summe aller hangabwärts gerichteten Kräfte größer ist als die Summe aller rückhaltenden Kräfte.«

Wie dargelegt, ist diese Formulierung der »Lawinenbedingung« zwar etwas vereinfachend, aber für die meisten Überlegungen scheint sie mir präzise genug zu sein, und sie scheint mir auch einfach genug dafür zu sein, dass man sich unter ihr noch etwas vorstellen kann. Sie ist, wie gesagt, eine notwendige und hinreichende Voraussetzung. Sie muss erfüllt sein, damit eine Lawine abgeht, und wenn sie erfüllt ist, dann geht die Lawine auch sicher ab. Ich werde im Folgenden bevorzugt diese Formulierung verwenden, bitte die Leser aber immer daran zu denken, dass die Formulierung sich immer auf den ganzen Umfang und auf die gesamte Fläche des abrutschbereiten Bereiches bezieht, nicht auf Teilbereiche oder gar nur einzelne Punkte.

Ganz wichtig bei diesen Überlegungen ist noch, dass sowohl die Kräfte als auch die Schneefestigkeit sich mit der Zeit stark verändern können (siehe insbeson-

dere Kapitel 2.7.3), sodass das lawinenauslösende Ungleichgewicht urplötzlich von einem Moment zum anderen auftreten kann. Als Beispiel sei die plötzliche Zusatzbelastung bei Sturz eines Skifahrers herausgegriffen, aber wir haben auch schon andere Veränderungen wie Erwärmung, Windeinflüsse etc. kennengelernt. Solche Veränderungen werden uns noch des Öfteren beschäftigen.

3.4 Zwischenbilanz

Damit können wir eine Art Zwischenbilanz ziehen: Die typischen Skifahrerlawinen sind Schneebrettlawinen. Sie werden meist durch den Skifahrer selbst ausgelöst und brechen grundsätzlich groß-

flächig rund um ihn herum ab, d.h., bei ihnen rutscht von Anfang an ein ganzer Hang (oder zumindest ein großer Hangbereich) gleichzeitig ab und der Skifahrer befindet sich mitten auf diesem Hangbereich. Das Losbrechen der Lawine erfolgt immer genau dann, wenn die Summe aller hangabwärts gerichteten Kräfte (die sich aus dem Gewicht der Schneemassen und aus eventuellen Zusatzlasten, z.B. Skifahrer, sowie aus der Hangsteilheit ergeben) größer ist als die Summe aller rückhaltenden Kräfte (die sich aus der Reibung und aus der Festigkeit innerhalb der gebundenen Schicht ergeben). Da alle Kräfte und auch die Schneefestigkeit sich zeitlich stark verändern können, ist für das Abgehen einer Lawine eine Momentbetrachtung maßgeblich.

Schattenspiele bei Lawinenverbauungen in einem Steilhang.

