

Leitfaden

künstliche Lawinenauslösung

Beinhaltet Informationen zu:

- Entstehung von Schneebrettlawinen
- Risikoreduktion durch temporäre **Massnahmen**
- Wirkung von Sprengungen auf die Schneedecke

Autoren:

Gubler Hansueli
AlpuG GmbH
Richtstattweg 3
CH-7270 Davos-Platz
Schweiz

Wyssen Sam
wyssen avalanche control AG
Feld 1
CH - 3713 Reichenbach
Switzerland
sam@wyssen.com

Kogelnig Arnold
Wyssen Austria GmbH
Höttinger Au 85
AT-6020 Innsbruck
Österreich
arnold@wyssen.com

Literaturzitat: Gubler H., Wyssen S. und Kogelnig A. (2012): Leitfaden künstliche Lawinenauslösung; wyssen avalanche control AG, Reichenbach (unveröffentlicht).

Reichenbach, im Januar 2012

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Massnahmen zur Risikoreduktion	2
2.1 Einleitung	2
2.2 Risikobegriff im Zusammenhang mit Lawinensicherung	2
2.2.1 Ereigniswahrscheinlichkeit (Gefahr)	5
2.2.2 Präsenzwahrscheinlichkeit	6
2.2.3 Schadenausmass.....	6
3. Entstehung von Schneebrettlawinen	8
3.1 Einleitung	8
3.2 Initialbruchbildung und Scherbruchausbreitung	8
3.2.1 Zusammenfassung	12
3.3 Deformierbarkeit als Schlüsselparameter für die Schneebrettgefahr	12
4. Künstliche Lawinenauslösung	15
4.1 Voraussetzungen	15
4.1.1 Bestimmung der lawinengefährdeten Gebiete	15
4.1.2 Verstärkung von Anlagen und Gebäuden	15
4.1.3 Beurteilung der Lawinengefahr oder der Schneedeckenstabilität.....	15
4.1.4 Sperren und Evakuieren von gefährdeten Gebieten	16
4.1.5 Rettung.....	16
4.1.6 Künstliche Lawinenauslösung und Stabilitätstests.....	16
4.2 Die Wirkung von Sprengungen auf die Schneedecke	17
4.2.1 Messung der Zusatzspannungen in der Schneedecke als Basis zum Vergleich verschiedener Auslösemethoden.	18
4.3 Wirkungsradius	19
4.3.1 Grösse des Wirkungsradius von 100% für die Sprengmethoden	20
4.3.2 Sprengpunkt	20
4.3.3 Ladungsgrösse.....	21
4.3.4 Sprengstofftyp	21
4.3.5 Schneebeschaffenheit, Art des Untergrundes.....	23
4.3.6 Die Wirkungsradien verschiedener Sprengstofftypen	23
4.4 Methoden zur künstlichen Lawinenauslösung	24
4.4.1 Allgemeines.....	24
4.4.2 Handwurfladungen	24
4.4.3 Überschneesprengungen mit Ladung an einem Pfahl befestigt	24
4.4.4 Gratausleger.....	24
4.4.5 Wurfladungen aus dem Hubschrauber	25
4.4.6 Ladungsabsenkungen aus bemannten Luftseilbahnen	25
4.4.7 Sprengseilbahnen, Ladungsabwerfer	26
4.4.8 Geschosse, Raketen	26
4.4.9 Gazex®	27
4.4.10 Daisybell® und O'Bellx® Gassprenganlagen.....	28
4.4.11 Lawinenwächter	28
4.4.12 Lawinensprengmast	29
4.4.13 Spezialfall Wächtersprengungen	30
4.5 Interpretation der Resultate und Richtlinien	31
4.5.1 Wahl des richtigen Zeitpunktes für Lawinensicherungsarbeiten.....	31
4.5.2 Wahl des Sprengstofftyps/Gasgemisch	31
4.5.3 Wahl des richtigen Sprengpunktes	34

4.5.4 Stabilitätstests	35
4.5.5 Bestimmung der Sprengwirkung.....	35
4.5.6 Restrisiko	35
4.5.7 Sicherheit der Sprengpatrouille.....	36
4.5.8 Messungen von künstlich ausgelösten Lawinen	36
5. Schlussbemerkungen	37
6. Quellenverweis	39

1. Einleitung

Das Risiko eines Lawinenunfalls kann mit verschiedenen Massnahmen reduziert werden. Dabei wird zwischen permanenten (Verbauungen, Schutztunnel, Galerien, Dämme, etc.) und temporären Massnahmen (Lawinenwarnung, Sperrung, Evakuierung, künstl. Lawinenauslösung, Rettung) unterschieden. Die Methoden der temporären Lawinenschutzmassnahmen gewinnen zunehmend an Bedeutung. Insbesondere verbesserte Kenntnisse der Vorgänge bei der Lawinenbildung, aussagekräftigere, automatische Messungen in den Lawinenanrissgebieten, Modellierung der kritischen Einflussgrössen und computergestützte Entscheidungshilfen sowie Verbesserungen bei der künstlichen Lawinenauslösung ermöglichen eine Senkung der Sperrzeiten bei gleichzeitiger Verkleinerung des Restrisikos für einen Lawinenunfall.

Um das Unfallrisiko kontinuierlich tief halten zu können, müssen alle gefährdeten Zonen inklusive der extremen Auslaufstrecken der Lawinen jederzeit gesperrt und evakuiert werden können. Gebäude und Anlagen innerhalb der gefährdeten Zonen müssen verstärkt werden um Lawinenkräften zu widerstehen. Temporäre Lawinenschutzmassnahmen sind vor allem zum Schutz von touristischen Anlagen und von Verkehrswegen mit mässigem Verkehrsaufkommen empfehlenswert.

Unter bestimmten Voraussetzungen können optimierte temporäre Massnahmen gemeinsam mit reduzierten permanenten Massnahmen auch zum Schutz von Siedlungen und Verkehrswegen mit hohem Verkehrsaufkommen eingesetzt werden. Verschiedene Schutzkonzepte können heute mit Risiko- und Sicherheitsanalysen miteinander verglichen werden. Solche Analysen, die natürlich auch die Kosten der verschiedenen Schutzkonzepte mitberücksichtigen müssen, bilden heute die Entscheidungsgrundlagen für die Festlegung von Sicherungsmassnahmen.

2. Massnahmen zur Risikoreduktion

2.1 Einleitung

Sicherheitsplanung hat zum Ziel, für Menschen und Güter in Siedlungen und auf Verkehrswegen, aber auch für Skifahrer auf Skipisten oder im Tourengelände eine genügende Sicherheit zu erreichen. Das Risiko wird als Mass für die Sicherheit verwendet. Je kleiner das Risiko umso höher die Sicherheit. Eine einfache Unterteilung in "sicher" und "gefährlich" ist heute nicht mehr ausreichend. Verschiedenste Gefahrenpotentiale beeinflussen das Risiko. Durch unterschiedliche Schutzmassnahmen ist es oft möglich, das Risiko zu vermindern.

2.2 Risikobegriff im Zusammenhang mit Lawinensicherung

Das Risiko für einen Lawinenunfall ist durch drei Faktoren bestimmt:

1. Die **Ereigniswahrscheinlichkeit** oder Lawinengefahr an der zu schützenden Stelle, wie zum Beispiel einer Skipiste oder einer Strasse,
2. die **Präsenzwahrscheinlichkeit** für Menschen und andere ungeschützte Objekte an dieser Stelle und
3. das **Schadensausmass**, dass den möglichen Schaden, entstanden durch Lawineneinwirkung, quantifiziert.

Alle drei Grössen können mit temporären Schutzmassnahmen beeinflusst werden. Jede zur Anwendung gelangende Schutzmassnahme muss ein gleichmässig tiefes resultierendes Restrisiko garantieren. Obwohl einzelne Massnahmen, wie Sperrung oder künstliche Lawinenauslösung, nur zeitlich befristet zur Anwendung kommen, muss der Lawinenschutz für gefährdete Personen und Objekte permanent gewährleistet sein.

Daraus ergeben sich die Anforderungen an die verschiedenen Teilbereiche des Massnahmenpakets:

- Kontinuierliche Ausführung der Messungen und Beobachtungen, die für die Bestimmung der Entwicklung der Lawinengefahr entscheidend sind.
- Bestimmung von charakteristischen Eigenschaften (z.B. Schwachschichten) der aktuellen Schneedecke im Anrissgebiet, die nicht direkt messbar, aber für die Bildung von Lawinen wesentlich sind.
- Beurteilung der Lawinengefahr unterstützt durch Entscheidungshilfen.
- Anordnung, Durchführung und Kontrolle von Sperrungen, Evakuationen und Öffnungen.
- Einsatz der Mittel zur künstlichen Lawinenauslösung, Überprüfung der Wirksamkeit und der Resultate der ausgeführten Sprengungen.
- Organisation und dauernde Aufrechterhaltung eines rasch einsetzbaren Rettungsdienstes.

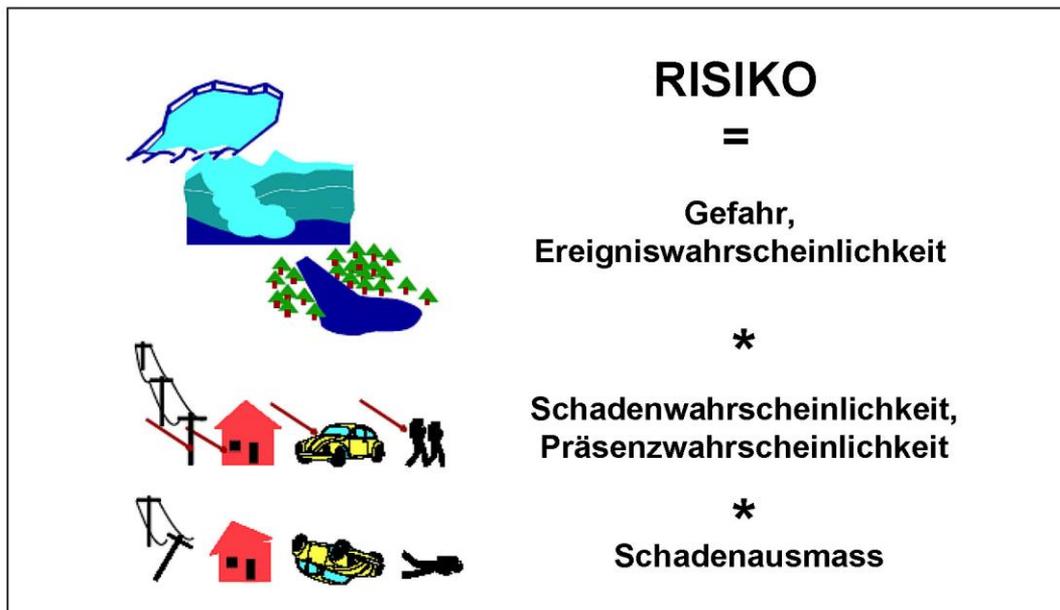


Abbildung 1: Definition des Risikobegriffs

Mit der künstlichen Lawinenauslösung verfolgt man das Ziel, die Lawinensicherheit im Anriss- und Ablagerungsgebiet sowie in der dazwischen liegenden Sturzbahn für eine begrenzte Zeit zu erhöhen. Mit den Methoden der künstlichen Lawinenauslösung können nicht nur potentielle Anrisszonen entladen werden, sondern grundsätzlich, sofern minimale Anforderungen erfüllt werden, auch Stabilitätstests durchgeführt werden.

Die Risikoanalyse ermöglicht den Vergleich verschiedenartiger Risiken und unterschiedlicher Schutzmassnahmen. Um die Wirkungsweise und die Wirksamkeit verschiedener Schutzmassnahmen und Verhaltensregeln miteinander vergleichen zu können, werden im Folgenden die das Risiko bestimmenden Faktoren definiert und diskutiert. Das **Risiko** ist durch die Wahrscheinlichkeit für den Eintritt eines Unfalles während eines vorgegebenen Zeitintervalls bestimmt.

Wir bezeichnen jegliche Art von Schäden oder Verletzungen, verursacht durch Lawineneinwirkung an Installationen, Gebäude, Wald oder Menschen, als Lawinenunfall. Beträgt das Risiko 1, so tritt der Unfall während des vorgegebenen Zeitintervalls mit Sicherheit ein, beträgt die Wahrscheinlichkeit 0, so ist kein Unfall zu erwarten.

Das **Risiko** lässt sich grundsätzlich in drei voneinander unabhängige Wahrscheinlichkeiten aufspalten, die miteinander zu multiplizieren sind (Abb. 1): Die Gefahr oder **Ereigniswahrscheinlichkeit**, die Schadenwahrscheinlichkeit oder **Präsenzwahrscheinlichkeit** und das **Schadenausmass**.

Für Unternehmungen und Institutionen ist das kollektive Risiko von grosser Wichtigkeit. Das kollektive Risiko ist gleich der Summe der individuellen Risiken aller durch das Ereignis bedrohten Personen und Objekte, multipliziert mit einem Aversionsfaktor (=subjektiver Faktor, durch die Akzeptanz der Öffentlichkeit gegeben).

Als **Restrisiko** bezeichnet man das nach Berücksichtigung aller getroffenen Sicherheitsmassnahmen verbleibende Risiko. Dieses errechnete Restrisiko muss schliesslich mit einem tolerierbaren, akzeptierten Risiko verglichen werden. Hier kann nicht ein Wert Null (absolute Sicherheit) gefordert werden. Die Antwort auf die Frage "wie sicher ist sicher genug" lässt sich nicht auf rein naturwissenschaftlich-technischer Grundlage beantworten. Hier spielen subjektive und irrationale Faktoren eine grosse Rolle. In den Bereichen Freizeitbeschäftigung und Sport werden oft sehr viel höhere individuelle Restrisiken akzeptiert als zum Beispiel im Beruf oder bei der Benützung öffentlicher Verkehrsmittel. Die drei Risikofaktoren werden von verschiedenen permanenten oder temporären Schutzmassnahmen beeinflusst:

Risiko = Ereigniswahrscheinlichkeit * Präsenzwahrscheinlichkeit * Schadenausmass	
Temporäre Massnahmen	Permanente Massnahmen
<p>künstliche Lawinenauslösung</p> <p>LAWINENWARNUNG, SPERRUNG, EVAKUIERUNG</p> <p><i>Rettung</i></p>	<p>Stützverbauungen⁽¹⁾, Ablenkverbauungen, Lawinen-Auffangdämme, Aufforstungen⁽²⁾</p> <p>LAWINENGEFAHRENKARTEN,</p> <p><i>Direktschutz, Objektschutz</i></p>

Tabelle 1: Aufteilung der temporären und permanenten Massnahmen zur Lawinensicherung im Hinblick auf die Risikofaktoren

(1) Jede Schutzmassnahme ist für Ereignisse einer bestimmten minimalen Wiederkehrdauer und zur Reduktion des Restrisikos für bestimmte Schadenbilder ausgelegt, so auch die Werkhöhen für die Wiederkehrdauer einer maximalen saisonalen Gesamtschneehöhe, die Werkabstände unter anderem für maximal zulässige Schneebewegungen innerhalb des Verbauperimeters. Der Zweck von richtliniengemässen Stützverbauungen (Schweizer Richtlinien 1990) besteht darin, die Entstehung von extremen Lawinenereignissen zu unterbinden. Stützverbauungen gemäss den Richtlinien verhindern das Anreissen von kleinen Lawinen innerhalb, unterhalb oder in unmittelbarer Nähe des verbauten Perimeters nicht in jedem Fall.

(2) Ein Wald muss gewisse Kriterien erfüllen, um die Bildung von Schneebrettlawinen zuverlässig zu unterbinden. Besonders Laubwälder müssen eine hohe Stammdichte (minimaler Durchmesser 0.1 m) aufweisen mit maximalen Abständen im Bereich vom 1.5 m. (Weitere Informationen H. Gubler and J. Rychetnik, 1991).

2.2.1 Ereigniswahrscheinlichkeit (Gefahr)

Verringerung der Gefahr ist für unseren Fall gleichzusetzen mit Verkleinerung der Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Lawinen am Ort der zu schützenden Objekte und Personen. Dieses Ziel kann durch verschiedene Massnahmen erreicht werden:

1. Künstliche Erhöhung der Stabilität der Schneedecke in möglichen Lawinenanrisszonen.
2. Minimalisierung der künstlich erzeugten Zusatzspannungen und deren Wirkungsbereich in möglichen Anrisszonen, sowie durch
3. Massnahmen zur Veränderung der Lawinenbahnen und Verkürzung der Lawinenauslaufstrecken.

Grundsätzlich unterscheiden wir zwischen permanenten und temporären Massnahmen.

Die **permanenten Massnahmen** umfassen dauernd wirksame Bauten wie Stützverbauungen in Anrissgebieten, möglicherweise kombiniert mit Verwehungsverbauungen, sowie Ablenk- und Bremswerken in der Lawinenbahn. Durch Stützverbauungen wird die Stabilität der gesamten Schneedecke in möglichen Anrissgebieten künstlich erhöht, durch Verwehungsverbauungen kann der Transport von zusätzlichem Schnee durch den Wind in Anrissgebiete reduziert werden. Durch Ablenk-, Brems- und Auffangwerke in Lawinenauslaufgebieten können extreme Auslaufstrecken verkürzt werden.

Im Gegensatz dazu sind die temporären Massnahmen nicht dauernd wirksam, die Gefahr kann nur für bestimmte Zeiten erniedrigt werden. In diesen Bereich gehören die Methoden der künstlichen Lawinenauslösung und die touristischen Verhaltensregeln in lawinengefährdetem Gebiet. Temporäre Massnahmen verhindern die Lawinenbildung nicht. Mittels künstlicher Lawinenauslösung kann einzig der Zeitpunkt und unter gewissen Voraussetzungen die maximale Lawinengrösse (allerdings mit beschränkter Sicherheit!) beeinflusst werden.

Die künstliche Auslösung von Lawinen ermöglicht die portionsweise Entladung von bedrohlichen Schneemassen in potentiell gefährlichen Anbruchgebieten zu wählbaren Zeitpunkten. Damit wird die Stabilität des in den Anrissgebieten verbleibenden Schnees stark erhöht. Um bei Anwendung temporärer Massnahmen das Restrisiko für einen Unfall klein halten zu können, muss es demnach möglich sein, die beiden anderen Faktoren, Präsenzwahrscheinlichkeit und Schadenausmass für bestimmte Zeitperioden sehr klein zu machen. Dies kann nur durch Evakuierungen, minimale Aufenthaltsdauer im Gefahrenbereich und Objektschutz erreicht werden.

Damit unterscheiden sich die möglichen Anwendungsgebiete der beiden Massnahmenkategorien (permanente und temporäre) zur Gefahrenreduktion ganz wesentlich. Für nicht oder schlecht evakuierbare und absperzbare Gebiete mit nur beschränkt möglichem Objektschutz wie Siedlungen oder Wälder sind im Allgemeinen permanente Schutzmassnahmen notwendig. In geeigneten Fällen kann durch eine Kombination von permanenten und aktiven temporären Schutzmassnahmen (künstliche Lawinenauslösung mit redundant aufgebauten,

optimalen festinstallierten Systemen) die Anforderungen an die permanenten Massnahmen (z.B. Höhe von Ablenk- und Auffangdämmen) deutlich reduziert werden. Für kurzzeitig sperrbare Verkehrswege wird oft eine Kombination von Objektschutz und künstlicher Lawinenauslösung als optimal erachtet. Für die Sicherung von leicht sperrbaren Skipisten, Langlaufloipen, Winterwanderwegen genügen oft Lawinengefareinschätzung und künstliche Lawinenauslösung.

Die Kombination zuverlässig optimierter Methoden der künstlichen Lawinenauslösung zur Verlängerung der Wiederkehrdauer für grosse bis extreme Ereignisse mit reduzierten permanenten Schutzmassnahmen in Sturzbahn und Auslauf erfordert allerdings einen sehr professionell und nachhaltig organisierten Sicherungsdienst.

2.2.2 Präsenzwahrscheinlichkeit

Die Präsenzwahrscheinlichkeit kann mit Hilfe von Lawinengefahrenkarten (ähnlich der Gefahrenzonenplanung in verschiedenen Alpenländern) und der Lawinenwarnung reduziert werden. Aufgrund von Lawinengefahrenkarten können Lawinenzonen ausgeschieden werden in denen jegliche Bauten verboten, oder bei geringerer Gefahr, nur mit baulichen Auflagen (z.B. verstärkte Bauweise) und Evakuationspflicht im Falle erhöhter aktueller Gefahr gestattet werden. Zur Beurteilung der aktuellen Gefahr bedarf es allerdings einer gut eingespielten Lawinenwarnung.

Der Skitourenfahrer muss die lokale Lawinengefahr selbst einschätzen. Grundlegende Informationen erhält er beispielsweise durch das Lawinenbulletin, aber nur mit zusätzlichen Abklärungen vor Ort kann die örtliche Lawinengefahr bestimmt werden. Durch geschickte Routenwahl und Minimierung der Aufenthaltsdauer im gefährdeten Gebiet kann er die Präsenzwahrscheinlichkeit verkleinern.

Touristische Anlagen und überwachte Abfahrtspisten können oft relativ einfach evakuiert und gesperrt werden. In den meisten Fällen ist es möglich, durch Nichtinbetriebnahme oder Abschalten von Beförderungsanlagen gefährdete Pisten nachhaltig zu sperren und zu evakuieren. Anlageteile wie Masten müssen durch bauliche Massnahmen geschützt werden. Durch lokale Informationen an die Skifahrer in Zonen erhöhter Gefahr kann die Präsenzwahrscheinlichkeit weiter gesenkt werden. Es muss hier erwähnt werden, dass der ungeschützte Skifahrer auch durch kleine Rutsche stark gefährdet ist. Orten mit Menschenansammlungen wie Liftstationen, Lifttrassen, Ruhe- und Wartepätzen etc. sind besondere Beachtung zu schenken.

2.2.3 Schadenausmass

Die Überlebenswahrscheinlichkeit von Lawinenverschütteten kann durch schnelle Rettung wesentlich beeinflusst werden. Voraussetzung dazu sind gut eingeübte Kameradenhilfe, ein gut organisierter Rettungs- und Pistendienst und Information der Skifahrer und Benützer von potentiell gefährdeten Verkehrswegen oder Wohngebieten.

Für bestehende Gebäude und Anlagen kann die Präsenzwahrscheinlichkeit nicht geändert werden. Hingegen kann das Schadenausmass für Bauten und Anlageteile innerhalb der Gefahrenzone durch bauliche Massnahmen (Objektschutz) stark verringert werden.

3. Entstehung von Schneebrettlawinen

3.1 Einleitung

Der weitaus grösste Teil der Schadenlawinen bricht als Schneebrettlawinen an. Lockerschneelawinen erreichen nur in den seltensten Fällen Volumina wie sie für Schadenlawinen typisch sind. Die hier beschriebene Abfolge von Ereignissen ist eine plausible Erklärung für die Bildung von trockenen Schneebrettlawinen. Die Notwendigkeit der einzelnen Ereignisse konnte durch Messungen und Modellrechnungen nachgewiesen werden.

3.2 Initialbruchbildung und Scherbruchausbreitung

Als Ausgangspunkt dient eine grundlegende Tatsache betreffend Schneefestigkeit. Es hat sich gezeigt, dass eine Schneeart (definiert durch Dichte, Kornform, Textur) in einem bestimmten Zustand (Temperatur, Feuchte) und unter einem bestimmten Spannungszustand (z.B. Scheren) keine Festigkeit besitzt, welche sich mit nur einer Zahl angeben lässt. Es muss vielmehr auch der Einfluss der Geschwindigkeit, mit welcher der Schnee deformiert wird (sog. **Deformationsgeschwindigkeit**) und die Deformation selbst mit einbezogen werden.

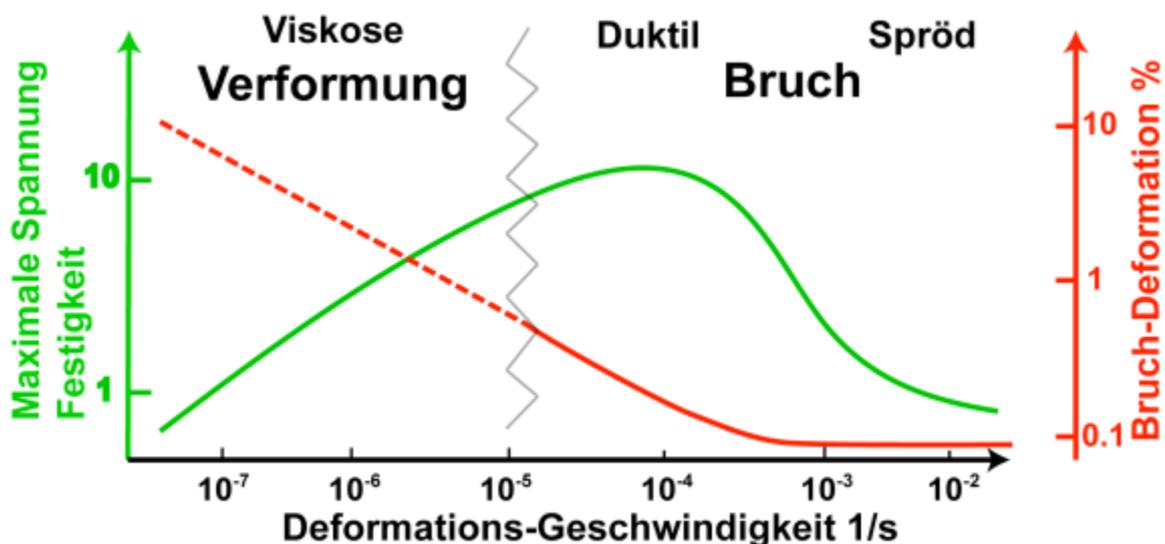


Abbildung 2: Maximal übertragbare Spannung ("Festigkeit von Schnee") in Funktion der Deformationsgeschwindigkeit. Schnee bricht nur im duktilen und spröden Bereich.

Dies sei an einem Beispiel erläutert, dass im Prinzip für jeden Spannungszustand, also z.B. auch bei Scherdeformation, gilt. Wird ein Schneewürfel unter einer vorgewählten Geschwindigkeit zusammengedrückt und die sich dabei ergebende Kraft gemessen, so beobachtet man folgendes: Drückt man langsam, so verformt sich die Probe, die gemessene Kraft ist klein, ein Bruch tritt auch nach sehr langer Zeit nicht auf. Geschieht dies etwas rascher, so steigert sich zwar die gemessene Kraft, aber es kann immer noch kein Bruch herbeigeführt werden. Man befindet sich hier im Bereich der sog. viskosen Verformung (Abb. 2). Der Schnee bricht erst, wenn die sog. kritische Deformationsgeschwindigkeit erreicht wird, bei der auch die

maximal übertragbare Spannung ("maximale Festigkeit von Schnee") auftritt. Jede weitere Steigerung der Deformationsgeschwindigkeit (man hat natürlich jeweils eine neue ungebrochene Probe zu verwenden) führt von nun an zum Bruch und zwar so, dass die Festigkeit mit zunehmender Deformationsgeschwindigkeit drastisch abfällt. Bei hohen Deformationsgeschwindigkeiten kann die Festigkeit bis auf 1/10 der Maximalfestigkeit absinken. Es ist dies der Übergang vom sogenannten duktilen (viskosen) zum spröden (elastischen) Bruch (Abb. 2).

Um zu einem Bruch zu gelangen, muss also der "Berg" der steigenden und dann wieder fallenden Festigkeiten überwunden werden. Eine bestimmte gegebene Kraft führt oder führt nicht zum Kollaps, je nachdem ob wir uns auf der viskosen oder überkritischen Seite befinden. Was bedeutet dies nun für den Anbruchmechanismus?

Wir gehen von der typischen Hochwinter-Situation mit trockener Schneedecke aus, bei der eine leicht verfestigte Schneeschicht auf einer schwachen und viel dünneren Schicht liegt. Wenn nun diese Schwachschicht und alle anderen Schnee- und Geländebeziehungen über einen ganzen Hang genau dieselben sind (sog. neutrale Verhältnisse), so kann bei tatsächlich vorkommenden Mächtigkeiten und -dichten der Schneeschicht über der Schwachschicht ein Anbruch unter dem Eigengewicht des Schnees gar nicht vorkommen. Dies, weil die hangparallelen Gewichtskomponenten der überliegenden Schicht zu klein sind, um die notwendige kritische Deformationsgeschwindigkeit hervorrufen zu können. Ob dies bei einer künstlich erzeugten Zusatzlast möglich wird, hängt von der erzeugten Deformationsgeschwindigkeit, der Schichtdicke und der Deformierbarkeit der überliegenden Schicht ab.

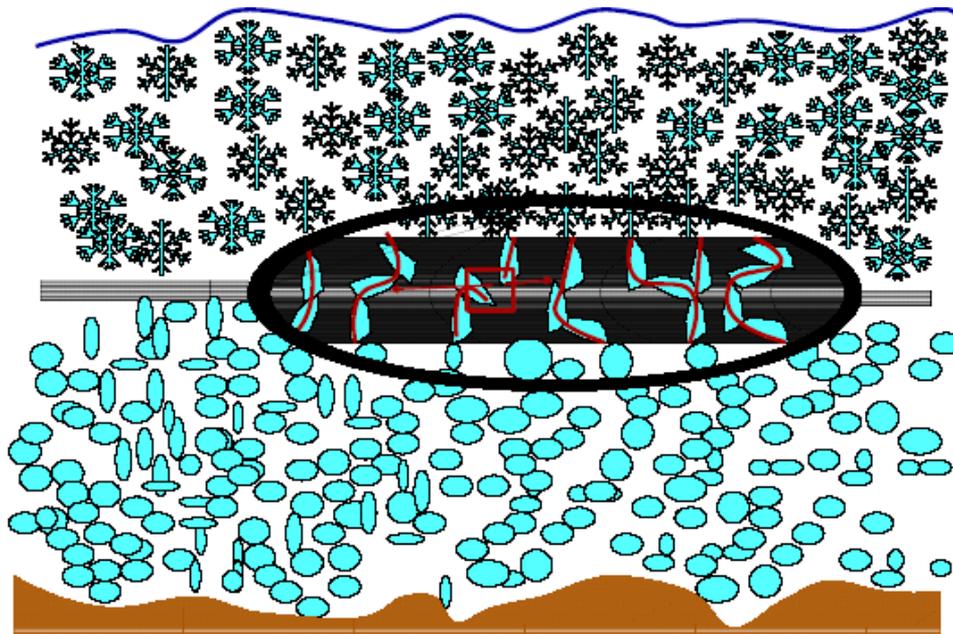


Abbildung 3: Schneedecke mit Schwachschicht. Vergrößerter Ausschnitt zeigt Spannungsumlagerung nach Bindungsbruch (Initialbruchbildung).

Fazit: Hangparallel homogene Verhältnisse - selbstverständlich sind sie nur unter gewissen Bedingungen möglich - deuten eher auf Anbruchsicherheit hin, trotz der Existenz einer Schwachschicht.

Für die Bildung von Schneebrettlawinen ist die Existenz einer dünnen, leicht deformierbaren Zwischenschicht mit kleiner Festigkeit zwischen Altschneedecke und Neuschnee demnach zwar eine notwendige, aber nicht hinreichende Bedingung.

Für die Bildung gefährlicher Lawinen mit Anriss Höhen von mehreren 10 cm müssen solche Zwischenschichten über Flächen von hundert und mehr Quadratmetern zusammenhängend und ungestört vorhanden sein. Die Scherfestigkeit und Viskosität dieser Schwachschichten ist durch ihre Schneestruktur bestimmt.

Typische Schwachschichten sind: Eingeschneite Oberflächenreifschichten, dünne, stark aufgebaute Schichten unmittelbar unterhalb der Oberfläche der Altschneesicht, obere Grenzschicht (Wachstumsschicht) einer Tiefenreifschicht sowie kalter, flaumiger Neuschnee auf einer kalten, harten Altschneeoberfläche aber auch wassergesättigte kohäsionslose Zwischenschichten. Die Verteilungen der Spannungen und Deformationen in der Schwachschicht hängen von der Verteilung des Neuschnees über der Schwachschicht, von der Hangneigung, Gesamtschneehöhe, lokalen Hindernissen und der Deformierbarkeit der Schichten ab.

Mit steigendem Gewicht des Neuschnees, steigt auch die Deformationsgeschwindigkeit und die Deformation in der Schwachschicht. Die starke lokale Deformation führt zu Bindungsbrüchen zwischen den Schneekörnern und Kristallen (Abb. 3). Damit sinkt die Festigkeit und steigt die Deformierbarkeit lokal, sofern nur schwächere neue Bindungen entstehen. Die hohe Deformationsgeschwindigkeit innerhalb der dünnen Schwachschicht verhindert aber weitgehend die Entstehung neuer starker Bindungen. Dieser Prozess dauert typischerweise Stunden. Die Schwachschicht wird lokal bei relativ kleinen Spannungen stark deformiert.

Können die vorhandenen Spannungen durch die verbleibenden Bindungen in der Schwachschicht nicht mehr von der Neuschnee- auf die Altschneesicht übertragen werden, so bricht die Struktur lokal zusammen. Es bilden sich **Initialbruchflächen**. Diese lokalen duktilen Scherbrüche in der Schwachschicht bilden sich vorwiegend an Stellen, an denen Spannung und Deformation durch Inhomogenität in der Neu- oder Altschneesicht und durch Hindernisse, die in die Altschneesicht hineinragen, konzentriert werden.

Messungen zeigen, dass diese Initialbruchflächen maximal von der Größenordnung eines Quadratmeters sind. Durch diesen Mechanismus des Initialbruches entstehen innerhalb der Schwachschicht **superschwache Zonen ("Hot Spots")**, die praktisch keine Scherspannungen von der Neuschneesicht auf die Altschneesicht übertragen können. Innerhalb dieser superschwachen Zonen kommt es zu einer weiteren Konzentration von Scherdeformationen, an den Rändern entstehen Scherspannungsspitzen.

Erreicht die Deformation am Rand einer solchen superschwachen Zone den von der vorhandenen Deformationsgeschwindigkeit abhängigen kritischen Wert (vgl. Abb. 2), so beginnt sich der Scherbruch entlang der Schwachschicht auszubreiten. Allerdings muss die superschwache Zone durch Vereinigung mehrerer Initialbruchzonen vorerst eine minimale Fläche mit einem Durchmesser von 5 bis 25 mal der Neuschneehöhen erreicht haben. Erst dann ist eine meist zuerst langsame und später schnelle Scherbruchausbreitung möglich.

Es ist vorstellbar, dass während der Phase der duktilen Bruchausbreitung mehrere Initialbruchflächen zusammengeschlossen werden und damit der Übergang zur Sprödburchausbreitung beschleunigt wird. Die kritische Länge L der Superschwachzone ist proportional zur Anrissmächtigkeit D , der Dicke d der Schwachschicht und umgekehrt proportional zum geometrischen Mittel der Scherdehnungsgeschwindigkeiten von Schneebrett und Schwachschicht. Die Wahrscheinlichkeit des Zusammenschlusses mehrerer unterkritischer Initialbruchflächen zu einer Superschwachzone nimmt mit steigender Bildungsrate für Initialbrüche zu. Diese Tatsache konnte durch Messungen der Infrarotschallemission in potentiellen Anrissflächen bestätigt werden.

Um so kleiner die notwendige kritische Länge L , desto grösser ist die Wahrscheinlichkeit, dass sie erreicht wird. L wird minimal für grosse Deformationsgeschwindigkeiten, sofern das geometrische Mittel der Scherdehnungsgeschwindigkeiten von Schneebrett und Schwachschicht gross ist und die Dicke d der Schwachschicht klein ist.

Damit wird zum Beispiel für ein hartes, windgepresstes Schneebrett auf leicht deformierbarer Schwachschicht L grösser, als für ein "typisches" Schneebrett. Aber auch für eine noch sehr lockere Neuschneeablagerung auf einer typischen Schwachschicht wird L gross. Die schnelle Scherbruchausbreitung (Sprödbuch, Primärbruch) entlang der Schwachschicht ist auch durch Teilgebiete der Schwachschicht möglich, in denen aufgrund erhöhter lokaler Stabilität ein Initialbruch unmöglich ist.

Ein **Zugbruch** (Anriss Stirn, Sekundärbruch) tritt frühestens dann auf, wenn durch den sich hangaufwärts ausbreitenden Scherbruch die hangparallelen Zugkräfte die Zugfestigkeit der Neuschneesicht erreichen. Der Zugbruch folgt oft Hindernissen oder Störungen in der Schneedecke, die lokale Zugspannungskonzentration erzeugen.

Die Grösse der Schneebrettlawine (resp. die Anbruchmasse) wird durch die Ausdehnung der Schwachschicht, die Zugfestigkeit der abgleitenden Schicht, die Hangneigung und lokale Abstützungen der Schneedecke begrenzt. Der Scherbruch kann sich auch durch Gebiete der Schwachschicht ausbreiten, in denen der Neuschnee nicht abgleitet. Abgleitender Schnee kann starke seismische Wellen im Boden erzeugen. Diese seismischen Schwingungen können zusätzlich Sekundärlawinen auslösen.

3.2.1 Zusammenfassung

Das Vorhandensein einer **ausgedehnten Schwachschicht** ist eine notwendige Bedingung für die Bildung von **Schneebrettlawinen**. Das Vorhandensein von Schwachschichten kann durch lokale Schneedeckentests, aber auch durch eine kontinuierliche Analyse der Wetterbedingungen während des Schneedeckenaufbaus, abgeklärt werden. Bei geringer Schneebrettgefahr sind keine solchen Schwachschichten vorhanden. Bereits bei mässiger Schneebrettgefahr muss örtlich mit Schwachschichten innerhalb der Schneedecke gerechnet werden. Für die Bildung von superschwachen Zonen als hinreichende Bedingung für die Scherbruchausbreitung sind lokale Initialbrüche notwendig. Kleine hangparallele Inhomogenitäten im Schichtaufbau der Schneedecke sind verantwortlich für die Entstehung von Initialbrüchen. Die Stellen dieser Initialbrüche sind im Allgemeinen nicht voraussagbar. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit flächiger Tests der Stabilität bei der künstlichen Auslösung von Lawinen. **Die künstlich durch Sprengungen erzeugten Druckwellen müssen alle Teile der möglichen Anrisszone erreichen, damit alle möglicherweise vorhandenen Schwachstellen ("hot-spots") zusätzlich belastet werden.** Damit lässt sich aber auch begründen, warum einige wenige Skispuren in einem möglichen Anrissgebiet keine endgültige Aussage über die Lawinengefahr zulassen.

3.3 Deformierbarkeit als Schlüsselparameter für die Schneebrettgefahr

Die Deformierbarkeit oder Steifigkeit der einzelnen Schneesichten ist entscheidend für die Lawinengefahr. In Modellen und Theorie wird zur Beschreibung der Deformierbarkeit die (lineare) Viskosität verwendet. Je höher die **Steifigkeit oder Viskosität** d.h. je kleiner die Deformierbarkeit einer Schneesicht, um so gleichmässiger werden Spannungen und Kräfte auf benachbarte Schichten übertragen.

Die Bezeichnungen Deformierbarkeit und Steifigkeit werden hier nicht im exakt wissenschaftlichen Sinne verwendet, sie sollen aber helfen die Vorstellung zu verbessern. Deformierbarkeit darf aber nicht mit Festigkeit verwechselt werden. Die **Festigkeit** charakterisiert das Bruchverhalten eines Materials. Für dünne Schwachschichten oder auch Schichtübergänge, die oft nur die Dicke eines oder einiger weniger Korndurchmesser haben, bedeutet Deformation sehr oft teilweiser Strukturbruch, d.h. die Kohäsion geht weitgehend verloren, die Festigkeit reduziert sich auf die innere Reibung, und die Deformierbarkeit steigt nach einer ersten minimalen Deformation (örtlicher Strukturkollaps) weiter an.

Die Deformierbarkeit der Oberschicht (Schneebrett) hängt sehr stark von ihrer Temperatur und Dichte ab. Steigende Temperatur bewirkt eine rasche Zunahme der Deformierbarkeit, zunehmende Dichte (bei starker Setzung) bewirkt eine empfindliche Abnahme der Deformierbarkeit. Die Deformierbarkeit der Oberschicht ist eine sehr wichtige Bestimmungsgrösse für die Lawinengefahr. Insbesondere für Schneebretter kleiner Mächtigkeit (Hanglawinen) hat wechselnde Schneetemperatur aufgrund von Sonneneinstrahlung und Lufttemperatur einen wesentlichen Einfluss auf die Deformierbarkeit dieser Oberschicht. Sehr oft liegt die wenig mächtige

Neuschnee- oder Schneeverfrachtungsablagerung (20 cm bis 40 cm) auf einer dünnen Schwachschicht die sehr deformierbar ist.

Erhöht sich nun durch Erwärmung die Deformierbarkeit der überlagerten Schicht, so sinkt die kritische Ausdehnung L für den Initialbruch und die Wahrscheinlichkeit eines Lawinenanbruches (Lawinengefahr) nimmt sehr schnell zu.

Es ist also nicht in erster Linie die Änderung der Festigkeit (Zugfestigkeit) des Schneebrettes, oder gar der tieferliegenden Schwachschicht, sondern die Zunahme der Deformierbarkeit (Abnahme der Viskosität) der Oberschicht bei einer kurzfristigen Erwärmung, die entscheidend ist für die Erhöhung der Lawinengefahr. Dies ist auch leicht einzusehen, da die hangsenkrechten Zug- und Scherbruchflächen nur etwa 1% der gesamten Bruchfläche ausmachen, die Zugfestigkeit in der Oberschicht kann demnach nicht entscheidend sein für die Lawinengefahr. Die Tatsache, dass diese Zugbruchflächen immer senkrecht zur Gleitfläche stehen, beweist auch, dass sich in jedem Fall zuerst ein (primärer) Scherbruch entlang der Schwachschicht (Gleitfläche) ausbreitet, bevor es zur Ausbildung der hangsenkrechten Zugbruchflächen (Sekundärbruch) kommt. Die hangsenkrechte Bruchfläche hat die kleinstmögliche Schichtdicke. Damit ist auch leicht zu verstehen warum dieser Temperatureinfluss um so grösser ist, desto kleiner die Mächtigkeit des potentiellen Schneebrettes ist, da die Eindringtiefe der Tagesschwankungen der Lufttemperatur und der Strahlung auf wenige 10 cm limitiert sind. Die folgenden Zeichnungen fassen die Verhältnisse nochmals zusammen.

Diese Erkenntnisse folgen aus den theoretischen Herleitungen und sind in der Praxis nachvollziehbar.

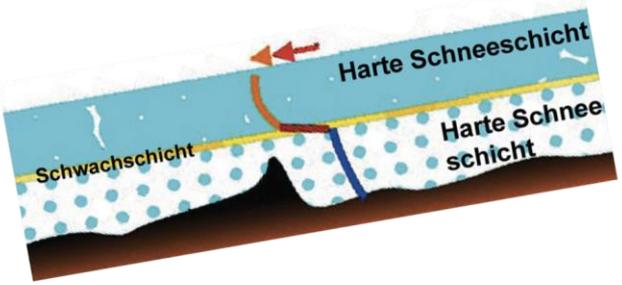
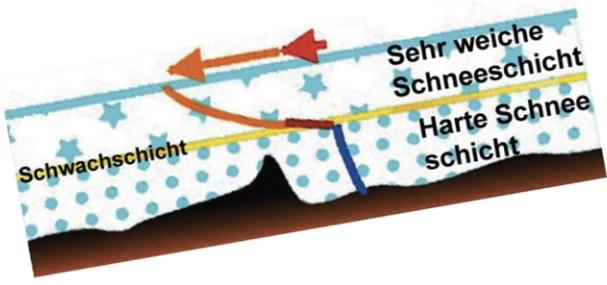
<p>Fall 1</p> <ul style="list-style-type: none"> • Harte Schneeschicht auf Schwachschicht • Wenig bis mäßige Spannungen und Verformungen • Initialbruch unwahrscheinlich 	
<p>Fall 2</p> <ul style="list-style-type: none"> • Leicht gesetzte Schneeschicht auf Schwachschicht • Hohe Spannungen und Verformungen • Initialbruch wahrscheinlich! 	
<p>Fall 3</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sehr weiche Schneeschicht auf Schwachschicht • Wenig bis mäßige Spannungen und Verformungen • Initialbruch unwahrscheinlich 	
<p>Fall 4</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bruch innerhalb einer Schneeschicht unwahrscheinlich • Keine Schwachschicht, keine Spannungen und Verformungen 	

Abbildung 4: Typische Situationen, die die Schneedeckenstabilität beeinflussen.

4. Künstliche Lawinenauslösung

4.1 Voraussetzungen

Ziel der künstlichen Lawinenauslösung ist es, instabilen Schnee aus potentiellen Anrissgebieten zu entfernen, um dadurch das Risiko eines unvorhergesehenen Lawinenereignisses im zu schützenden Gebiet für eine begrenzte Zeit zu minimieren. Diese Massnahme erlaubt weiter, die Schneedeckenstabilität in potentiellen Anrissgebieten zu testen. Sie ist weltweit als Standardmethode zur Sicherung von Skipisten und Verkehrswegen (z.B. Bergstrassen) anerkannt. In den letzten Jahren wurden sehr viele – bzgl. dem Detonationspunkt und der Erzeugung der Druckwelle - unterschiedliche Methoden getestet und operationalisiert. Dabei gilt es zu beachten, dass der Gebrauch von konventionellen Geschossen (z.B. Armeewaffen) und der Einsatz von Helikoptern in einigen Alpenländern gesetzlich eingeschränkt ist.

Es sind nachfolgenden Voraussetzungen zu beachten.

4.1.1 Bestimmung der lawinengefährdeten Gebiete

Aufgrund des Ereigniskatasters, der topographischen Begebenheiten (z.B. Hangneigung), der Bodenbedeckung, von Modellierungsergebnissen und extremen Auslaufstrecken gilt es detaillierte Lawinengefahrenkarten zu erstellen. Diese Gefahrenkarten bilden die Grundlage für die Errichtung von Häusern, Strassen, Infrastrukturanlagen und Skipisten als auch für deren Sicherungskonzept.

4.1.2 Verstärkung von Anlagen und Gebäuden

Anlagen (z.B. Liftmasten) und Gebäude, welche zwingend in potentiell gefährdetem Gebiet errichtet werden müssen, sind auf Lawinendrucke zu dimensionieren.

4.1.3 Beurteilung der Lawinengefahr oder der Schneedeckenstabilität

Während der Wintermonate muss die Schneedeckenstabilität fortlaufend beurteilt werden. Zu den wichtigsten Eingangs-Parametern zählen: Wettervorhersage (Niederschlag, Temperatur, Wind, Bewölkung), Schneeprofile in verschiedenen Expositionen und Höhenlagen, Neuschneeakkumulation, Wind (Schneeverfrachtung), Temperaturverlauf in der Schneedecke, Lufttemperatur, kurzweilige Strahlung und Oberflächentemperatur. Weiter helfen direkte Beobachtungen der Schwachschichtenbildung und der Neuschneesetzung (Rutschblock und diverse andere manuelle Stabilitätstests, Scherrahmen, Sprengungen) die Lawinengefahr besser einzuschätzen. Sicherlich ist es sinnvoll, diese Daten zusammen mit Lawinenbeobachtungen in einer Datenbank abzulegen, um ähnliche Verhältnisse der Gegenwart und der Vergangenheit miteinander vergleichen zu können. Expertensysteme können dazu eingesetzt werden dieses Vorgehen zu unterstützen.

4.1.4 Sperren und Evakuieren von gefährdeten Gebieten

Wenn die Gefahr ansteigt, müssen die gefährdeten Gebiete gesperrt und evakuiert werden. Es muss auf die Lawinengefahr aufmerksam gemacht werden (jedoch nur, wenn diese auch wirklich existiert!), Verkehrswege und Skipisten müssen gesperrt und bzgl. verbleibenden Personen in den gefährdeten Gebieten kontrolliert werden. Weiter müssen in den Skigebieten Anlagen, welche Skifahrer in gefährdete Gebiete befördern, geschlossen werden.

4.1.5 Rettung

Gut ausgebildete (und ausgerüstete) Rettungsmannschaften müssen jederzeit verfügbar sein.

4.1.6 Künstliche Lawinenauslösung und Stabilitätstests

Durch zusätzliche Belastungen können Lawinen ausgelöst oder die Schneedecke getestet werden. Die Zusatzbelastungen werden durch die Detonation von Sprengstoffen, Explosion von Gasmischungen, usw. ausgelöst.

Die Wahl der spezifischen Sicherungsmassnahmen ist von folgenden Kriterien abhängig:

- **Sicherheit der Patrouille:** Ist vom Transport und Umgang mit explosiven Stoffen, als auch vom Zugang zum Abschusspunkt abhängig.
- **Tolerierbares Restrisiko:** Ist von der Nutzung des gefährdeten Gebietes und der natürlichen Wiederkehrdauer des Lawinenereignisses abhängig.
- **Maximal tolerierbare Sperrzeit:** Ist von der Nutzung des gefährdeten Gebietes abhängig.
- **Kosten-Nutzen-Analysen:** Ist von den Ressourcen, welche für Schutzmassnahmen zur Verfügung stehen als auch von der Umsatzeinbusse, welcher durch eine mögliche Sperrung entstehen würde, abhängig.
- **Grösse und Topographie des potentiellen Anrissgebietes:** Diese Kriterien bestimmen die Anzahl der Sprengpunkte.
- **Rechtliche Bestimmungen:** Ist von vorhandenen Bewilligungen, der Ausbildung der Patrouillieren, den erlaubten Methoden, Restriktionen bzgl. der Lagerung von explosiven Stoffen, etc. abhängig.

Diese Kriterien bilden die Basis für die Evaluierung angemessener Schutzmassnahmen. Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass sich die verschiedenen Massnahmen erheblich in ihrer Abhängigkeit von den aktuell herrschenden Wetterverhältnissen (Sicht, Wind), den Ausführungszeiten, der erreichbaren Sicherheit und den entstehenden Kosten unterscheiden.

Die resultierenden Schutzmassnahmen und Sicherungsrouten müssen vorgängig ausführlich getestet werden, um sicherzustellen, dass weder das Überwachungs- noch das Sicherungsteam bei einem Einsatz gefährdet werden.

4.2 Die Wirkung von Sprengungen auf die Schneedecke

Die Detonation einer Sprengladung verursacht in ihrer unmittelbaren Umgebung eine **Schockwelle** (markante Zunahme der Teilchengeschwindigkeit an der Druckwellenfront). Mit zunehmender Entfernung vom Detonationspunkt entwickelt sich aus der Schockwelle eine **N-förmige Luftdruckwelle** (elastische Welle mit grosser Amplitude, N-Wellen), bevor diese schliesslich in eine **akustische Welle** (elastische Welle mit kleiner Amplitude) übergeht. Innerhalb der Schneedecke und im Boden breiten sich diese Erschütterungen als unterschiedlich Typen von **Druckwellen** (longitudinale - (p), transversale - (s) und Oberflächenwellen) aus.

Ist die Abbrenngeschwindigkeit eines Sprengstoffes kleiner 1000 m/s (Fortpflanzung der Verbrennungszone durch Wärmeleitung), so spricht man von einer **Explosion**, ist die Abbrenngeschwindigkeit grösser als 1000 m/s (Ausbildung einer Detonationswelle, Reaktionsenergie wird durch adiabatische Kompression an der Stosswellenfront erzeugt), so spricht man von einer **Detonation**.

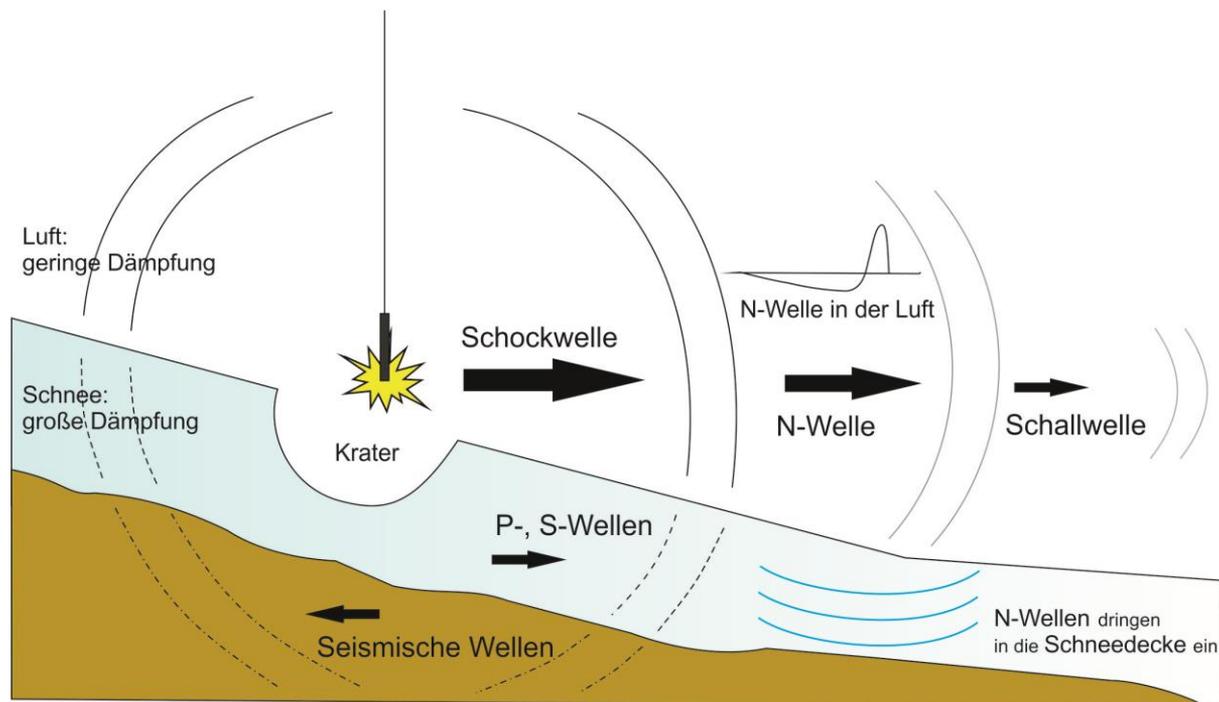


Abbildung 5: Ausbreitung von unterschiedlichen Druckwellen in den Medien Luft, Schnee und Boden. Diese Wellen wurden durch eine Detonation verursacht.

Meist erzeugt eine Explosion oder Detonation eine Druckwelle mit genügend grosser Amplitude um lokale Brüche in der interkristallinen Struktur des Schnees oder zumindest eine permanente Verformung (Krater) zu erzeugen. Die Amplituden der Druckwellen sowohl oberhalb, unterhalb als auch an der Schneeoberfläche sind hauptsächlich von der Position des Sprengpunktes relativ zur Schneeoberfläche abhängig. Schnee ist ein sehr effektiver Absorber für die Energie von Schockwellen. Eine 1 kg schwere Sprengladung verursacht gerade mal eine Kraterzone (Radius der permanenten Deformation) von 1 m Durchmesser. Die Abschwächung der longitudinalen und transversalen Druckwellenfortpflanzung in Schnee ist sehr hoch im Vergleich zu Medien wie Luft, Fels oder dichtem, grobem Sand.

Messungen und theoretische Überlegungen (Gubler 1976, 1977) zeigen einige interessante Details bezüglich der Fortpflanzung und Interaktion von Druckwellen (z.B. transversale Wellen) in einer saisonalen, trockenen Hochwinterschneedecke:

- Die N-förmigen Luftdruckwellen dringen durch das Porensystem des Schnees in die Schneedecke ein und verursachen Spannungen im Eisgerüst der Schneedecke.
- Die dadurch erzeugten dynamischen Zusatzspannungen sind proportional zu den entsprechenden Partikel – Deformationsgeschwindigkeiten in der Schneedecke.
- Die Amplitude der Deformationsgeschwindigkeit in der Schneedecke ist in etwa proportional zur Druckamplitude des expandierenden Gases einer Sprengstoffdetonation oder der Druckamplitude der N-Wellen in der Luft, dies jedoch in Abhängigkeit von der Form der N-Welle, insbesondere der Geschwindigkeit des Druckanstiegs im Porensystem. Die maximalen Deformationsgeschwindigkeiten und somit die maximalen dynamischen Zusatzspannungen sind damit zumindest in der Anfangsphase der Strukturdeformationen wesentlich durch die zeitliche Änderung des Porenluftdruckes und damit des N-Wellendruckes bestimmt.
- Schnee ist ein sehr effektiver Frequenzfilter. In einer typischen saisonalen Hochwinterschneedecke können ab einer gewissen Distanz zur Quelle nur noch Druckwellen mit einer Frequenz kleiner 100 Hz registriert werden. In Abständen grösser als 5 m bis 10 m von der Sprengstelle können somit hohe lokale Deformationsamplituden und Deformationsraten in der Schneedecke nur noch durch lokal in die Schneedecke eindringende N-förmige Luftdruckwellen verursacht werden. Es gilt zu beachten, dass die Dämpfung von Deformationswellen in nassem Schnee grundsätzlich sehr gross ist.

4.2.1 Messung der Zusatzspannungen in der Schneedecke als Basis zum Vergleich verschiedener Auslösemethoden.

Die zusätzliche Belastung σ des Schnees kann näherungsweise aus der gemessenen Deformationsgeschwindigkeit bestimmt werden:

$$\sigma = \kappa \rho_s v_s c_s$$

ρ_s : Schneedichte [kg/m^3]

v_s : Deformationsgeschwindigkeit [mm/s] (Abbildung 6)

c_s : Wellenfortpflanzungsgeschwindigkeit [m/s] (ca. 500 m/s)

κ : Konstante in Abhängigkeit des theoretischen Modells (0.4 bis 20); ein sicherer Wert ist $\kappa = 1$.

Um die verschiedenen Methoden der künstlichen Lawinenauslösung (Quellen von Druckwellen) miteinander vergleichen zu können, muss die Deformationsgeschwindigkeit innerhalb der Schneedecke in verschiedenen Tiefen (einige 10 cm unterhalb der Schneeoberfläche) gemessen und verglichen werden. Andere Messungen wie z.B. die Messung der Luftdruckwelle sind nicht genügend aufschlussreich. Diese Messungen sind jedoch nur mit speziellen Sensoren wie beispielsweise auf die Schneedichte abgestimmte Geophone oder Beschleunigungsmesser möglich.

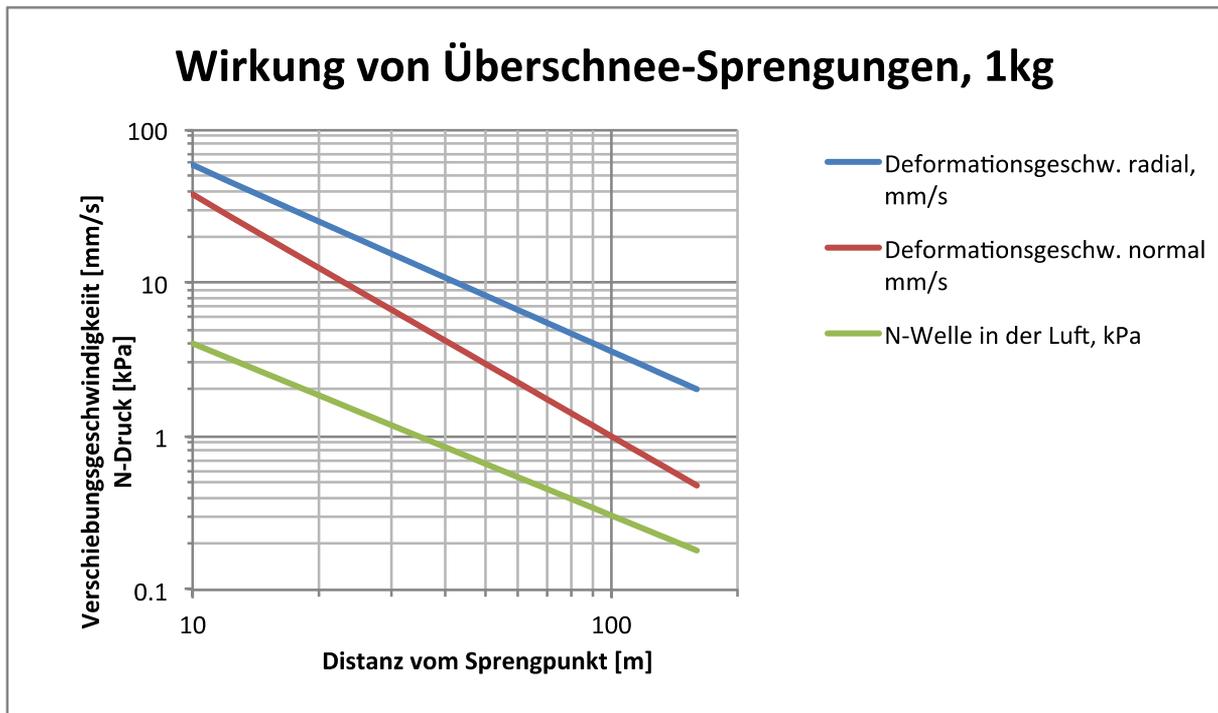


Abbildung 6: Wirkung einer 1 kg Sprengladung in der Schneedecke. In Blau Deformationsgeschwindigkeit radial, in Rot Deformationsgeschwindigkeit normal zum Hang und in Grün die N-Welle in der Luft. Zum Vergleich Glasbruch tritt bei ca. 1 kPa auf und Trommelfellverletzungen ab 35 kPa.

4.3 Wirkungsradius

Aus der Theorie haben wir gelernt, dass Schneebrettlawinen in den meisten Fällen nicht von jedem Punkt im potentiellen Anrissgebiet ausgelöst werden können. Initialbrüche von kritischer Größe für die Bruchfortpflanzung können durch die Zusatzspannungen oft nur in natürlichen Schwachstellen ("hot spots") aktiviert werden. Leider ist der Ort dieser "hot spots" im Gelände in den meisten Fällen nicht bekannt. Erschwerend kommt hinzu, dass sich die Verteilung dieser "hot spots" in Abhängigkeit der Schneeverteilung und der Wetterverhältnisse verändert. Deshalb ist es absolut notwendig, das **gesamte potentielle Anrissgebiet auf "hot spots" zu testen**. Es ist daher notwendig, die Wirkungsradien der verschiedenen Typen und Anordnungen von Druckwellenerzeugern (Detonationen und Explosionen) genau zu kennen.

Der Wirkungsradius eines Druckwellenerzeugers ist definiert als der Radius einer Kreisfläche mit Zentrum am Quellpunkt, in welcher die zusätzliche Belastung innerhalb der Schneedecke einen Schwellenwert überschreitet. Dieser Schwellenwert muss gross genug sein, um die primäre Scherbruchfortpflanzung in einer Schwachstelle zu initialisieren, welche vorgängig eine natürliche Stabilität grösser 1 aufwies. Diese minimale zusätzliche Belastung (Schwellenwert) soll vergleichbar sein mit der dynamischen Belastung, welche ein einzelner Schneesportler auf die Basis eines 0.5 m bis 1 m mächtigen Schneebretts ausübt.

Der Wirkungsradius einer bestimmten Sprengmethode ist damit durch den Abstand von der Sprengstelle definiert in dem noch eine minimale Deformationsgeschwindigkeit (proportional zur Zusatzbelastung) in einer für Schwachschichten typischen Tiefe erzeugt wird. In Fällen, wo das Anrissgebiet nach einem Stabilitätstest durch Sprengungen befahren wird, muss ein erhöhter Schwellenwert und dementsprechend ein reduzierter Wirkungsradius verlangt werden.

Der Wirkungsradius ist abhängig von der Position des Sprengpunktes relativ zur Schneeoberfläche, der Ladungsgrösse und des Sprengstofftyps (Sprengstoff, Gasmischung etc.), aber auch vom Typ des Schneebretts (nass/trocken, dünn/dick, hart/weich) und allenfalls bei bodennahen Sprengungen vom Bodentyp. Zusätzlich muss berücksichtigt werden, dass der theoretische Wirkungsradius einer Detonation durch Abschattung (durch das Gelände) der Luftdruckwelle massgeblich reduziert wird.

4.3.1 Grösse des Wirkungsradius von 100% für die Sprengmethoden

Der Wirkungsradius ist sehr stark von der Position des Sprengpunktes in Bezug zur Schneeoberfläche abhängig. Wir definieren den Wirkungsradius für die Detonation einer gegebenen Ladung 1 m oberhalb der Schneeoberfläche als 100%. Der Wirkungsradius von 100% für eine 1 kg bis 1.5 kg schwere Sprengladung mit einer hohen Detonationsgeschwindigkeit, einer hohen Explosionswärme und einem entsprechend hohem Gasvolumen beträgt ungefähr 85 m (Radius einer kreisförmigen Fläche mit Zentrum im Detonationspunkt).

Dieser Wirkungsradius von 100% ist auf ca. 50 m zu reduzieren, sobald das Anrissgebiet nach erfolgtem Stabilitätstest mittels Sprengungen von Schneesportlern befahren wird. Innerhalb der angegebenen Bereiche ist die zusätzliche Belastung in der Schneedecke in jedem Fall grösser als 100 Pa (200 Pa im Fall des reduzierten Wirkungsradius). Typisch wird ein minimaler Wert von 300 Pa erreicht.

4.3.2 Sprengpunkt

Die typische Abhängigkeit des Wirkungsradius einer Sprengladung von ihrer relativen Position zur Schneeoberfläche ist in Abbildung 7 zusammengefasst. Theoretisch ist die optimale Höhe der Ladung über der Schneeoberfläche geringfügig von der Ladungsgrösse abhängig. Die optimale Höhe steigt von 1.5 m auf 3.5 m für Ladungsgrössen zwischen 1 kg und 15 kg. In den meisten Fällen ist die optimale Höhe von der lokalen Topographie bestimmt, mit dem Ziel der

Abschätzung der Luftdruckwelle bestmöglich entgegenzuwirken. Ladungen, welche innerhalb der Schneedecke gezündet werden, verlieren einen Teil ihrer Energie durch die Erzeugung des typischen Kraters. Obwohl diese Ladungen eine höhere Belastung in der Schneedecke erzeugen, ist der jeweilige Wirkungsradius drastisch reduziert. Kleine Ladungen, welche in einer mächtigen Schneedecke detonieren, erzeugen in der Regel nicht einmal einen Krater und erzeugen damit keine Luftdruckwelle

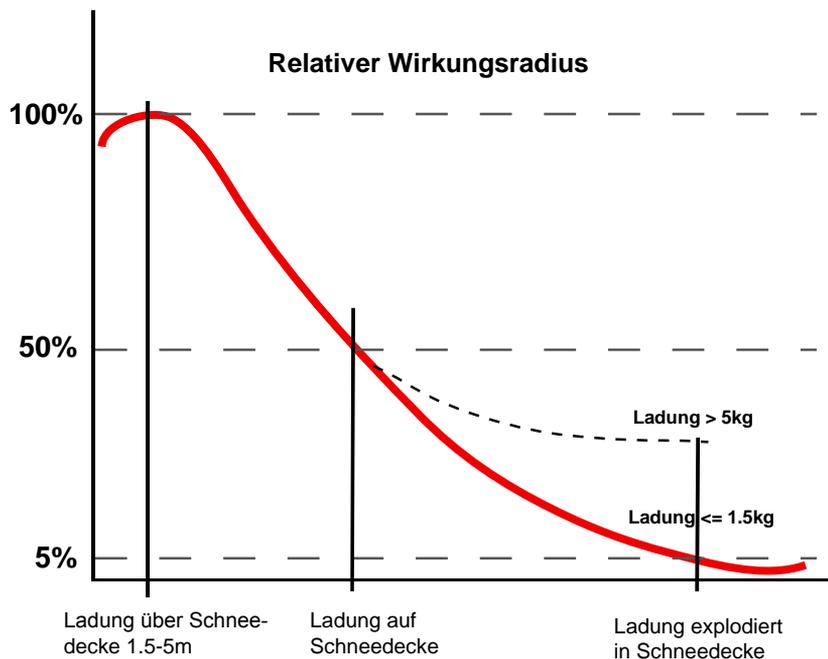


Abbildung 7: Die Abhängigkeit des Wirkungsradius (Radius einer kreisförmigen Fläche mit Zentrum im Sprengpunkt) von der Position des Sprengpunktes relativ zur Schneeoberfläche. Für Ladungen grösser als 5 kg und Ladungstiefen kleiner als 1 m unter der Schneeoberfläche ist der Wirkungsradius weitgehend unabhängig von der aktuellen Ladungseinsinktiefe aber deutlich reduziert verglichen mit einer Überschneesprengung.

4.3.3 Ladungsgrösse

Der Wirkungsradius einer Sprengladung über oder auf der Schneeoberfläche ist proportional zur Quadratwurzel der Ladungsgrösse (bei trockener Schneedecke). In nassem Schnee reduziert sich die Abhängigkeit auf weniger als die Kubikwurzel der Ladungsgrösse. Diese Skalierung trifft in etwa für Ladungsgrössen zwischen 1 kg und 10 kg zu.

4.3.4 Sprengstofftyp

Die Wirkung eines Sprengstofftyps/Gasgemisches ist abhängig von seinen Spezifikationen. Für Detonationen oberhalb der Schneedecke eignen sich Sprengstofftypen mit hohen Detonationsgeschwindigkeiten (> 6000 m/s) am besten. Bei Sprengungen auf oder innerhalb der Schneedecke sind Sprengstofftypen mit

mässigen Detonationsgeschwindigkeiten (4500 m/s bis 5500 m/s), grossem Gasvolumen und hoher Explosionswärme besser geeignet.

Bei den gebräuchlichen Sprengstofftypen mit hohen Detonationsgeschwindigkeiten variiert der Wirkungsradius innerhalb ca. 25%. Wenn beispielsweise ein Sprengstoff mit hoher Detonationsgeschwindigkeit für eine Sprengung innerhalb der Schneedecke eingesetzt wird, so kann seine reduzierte Wirkung durch eine Erhöhung der Ladungsgrösse um 50% wettgemacht werden. Falls hingegen Ammoniumnitrat (Kunstdünger) als Sprengstoff eingesetzt wird (gezündet mit einer Sprengschnur oder einem ähnlichen Booster), so muss die Ladungsgrösse um einen Faktor 5 bis 10 erhöht werden, damit ähnliche Wirkungsradien erreicht werden können. Ähnliches gilt auch für Gasgemische wie sie beispielsweise in Gazex® – Anlagen verwendet werden (Verbrennungsgeschwindigkeit ca. 1000m/s, Explosion anstelle einer Detonation).

Wir wissen, dass kleine Belastungsraten mit hohen Amplituden (Explosionen) lokal zu Kraterbildung und primären Lockerschneelawinen führen können. Für Distanzen grösser als 10 m vom Sprengpunkt werden Zusatzspannungen aber vor allem durch N-förmige Luftdruckwellen mit hoher Druckanstiegsrate (wie diese durch Detonationen von Sprengstoff verursacht werden) erzeugt.

Der Grund dafür liegt darin, dass hohe Deformationsgeschwindigkeiten vor allem durch den raschen N-Wellendruckanstieg im Porensystem des Schnees erzeugt werden. Die Deformationsgeschwindigkeit muss so hoch wie möglich sein um Sprödbrüche bei Belastungsraten grösser als 10^{-4} /s bis 10^{-3} /s zu erzeugen. Die Ursache liegt in der wesentlich tieferen Sprödbruchfestigkeit von Schnee verglichen mit der duktilen Bruchfestigkeit bei niedrigerer Deformationsgeschwindigkeit (vgl. Abb. 2)

Explosionen von Gasgemischen verursachen in Abständen grösser als einige 10 m vom Sprengpunkt deutlich tiefere Deformationsgeschwindigkeiten in der Schneedecke als gebräuchliche brisante Sprengstoffe mit hoher Detonationsgeschwindigkeit. Typische Wirkungsradien für Gazex® Anlagen betragen maximal ca. 80 m (seitwärts, max. 45°) für die 1.5 m³ Rohre und rund 100 m für die 3 m³ Rohre. Es sind dies Schätzwerte aufgrund von N-Wellen Druckmessungen über der Schneeoberfläche ohne direkte Messungen in der Schneedecke.

Messungen aus dem Jahr 2011 (vgl. Kap. 4.5.2) deuten auf noch deutlich tiefere Werte hin. Hängende Sprengladungen (z.B. Wyssen Sprengmast) mit einem Gewicht vom 5 kg erreichen einen Wirkungsradius von 130 m bis 150 m. Zusätzlich kann Detonationshöhe durch Veränderung der Länge der Halteschnur auf einfache Art optimiert werden.

An dieser Stelle soll jedoch nochmals festgehalten werden, dass nur Orte innerhalb des theoretischen Wirkungsbereiches genügend zusätzlich belastet werden, welche von der Ladungsposition auch eingesehen werden können!

4.3.5 Schneebeschaffenheit, Art des Untergrundes

Bei Sprengpunkten innerhalb der Schneedecke und nahe der Bodenoberfläche haben Schneebeschaffenheit, Untergrundbeschaffenheit und Vegetationsbedeckung einen wichtigen Einfluss auf den Wirkungsradius. Nasser Schnee reduziert den Wirkungsradius auf jeden Fall auf einen erweiterten Kraterbereich mit weniger als 10 m Durchmesser, der Wirkungsradius ist in diesem Fall nur schwach abhängig von der Ladungsgrösse (für Ladungsgrössen 5 kg bis 10 kg). Eingeschneite Büsche, Zwergstrauch Heiden oder sumpfiger Untergrund reduzieren die Wirkung der Detonation ebenfalls erheblich.

4.3.6 Die Wirkungsradien verschiedener Sprengstofftypen

Sprengpunkthöhe	Ladungsgrösse	Radius Anbruchsicherheit	Radius Begehungssicherheit
Überschneespr. (2-3 m)	5 kg	135 m	70 m
Überschneespr. (2-3 m)	1.5 kg	85 m	50 m
Gazex® (vorwärts)	3 m ³	ca. 70 m (120 m) ¹	50 % -70 % von Radius Anbruchsicherheit
Gazex® (45° seitwärts)	3 m ³	ca. 50 m (100 m) ¹	
Gazex® (vorwärts)	1.5 m ³	ca. 50 m (100 m) ¹	
Handladung	1.5 kg	30 m	----
vergrabenes Projektil	<1.5 kg	15 m	----

Tabelle 2: Wirkungsradien verschiedener Sprengmethoden und Ladungsplatzierungen. Gazex®: Propan-Sauerstoff-Mischung. Sprengstoffe: Hohe Explosionswärme und mittlere bis hohe Detonationsgeschwindigkeiten. ¹ Gemäss Messungen von 2011 sind die bisher angenommen Wirkungsbereiche (in Klammer) für Explosionen von Gasgemischen um ca. 70 % zu optimistisch angenommen.

Generell sollten noch folgende Hinweise bei der Wahl der Sprengmethode beachtet werden:

- In grossen Anrissgebieten erzielen mehrere verteilte Ladungen (womöglich mit Sprengschnüre verbunden) bessere Resultate als einzelne grosse Ladungen.
- Projektil mit Aufschlagzündern hoher Empfindlichkeit und sehr geringen Verzögerungszeiten garantieren einen Detonationspunkt nahe der Oberfläche.
- Für Handwurfladungen wird eine minimale Ladungsgrösse von 1.5 kg empfohlen.
- Bei Sprengmethoden mit festem Sprengpunkt und grossflächigen Anrissgebieten (Sprengseilbahnen, Gazex®, Lawinenwächter, Lawinenpfeife, Lawinensprengmast) wird empfohlen, die maximal mögliche Ladungsgrösse zu verwenden (3 kg bis 10 kg). Dadurch kann der Wirkungsradius auch bei nicht idealem Sprengpunkt optimiert werden.
- Werden die Ladungen vom Helikopter abgeworfen, soll eine minimale Ladungsgrösse von 5 kg (mit doppelter Sicherheitsanzündschnur) nicht unterschritten werden. Allenfalls Ladungen mit Recco-Transpondern markieren um das Auffinden von Blindgängern zu vereinfachen.

4.4 Methoden zur künstlichen Lawinenauslösung

4.4.1 Allgemeines

Bei der Wahl der Sprengmethoden werden oft die Investitionskosten als wichtigste Entscheidungsgrundlage herangezogen. Viel mehr sollte die Wahl aufgrund der Gefährdungen und Schutzziele getroffen werden. Bei falscher Systemwahl können längerfristig massiv höhere Betriebskosten und ein kleinere Risikoreduktion die Folge sein.

Der exakte Standpunkt für eine Anlage im Gelände variiert je nach System enorm!

4.4.2 Handwurfladungen



Bei dieser Sprengmethode muss sich eine Person in Wurfweite oberhalb des gewünschten Sprengpunktes positionieren. Das Gewicht von Handwurfladungen ist auf 1 kg bis 2.5 kg beschränkt. Es ist empfehlenswert, die Ladungen mit einer Schnur zu sichern. Dies verhindert das Abrutschen der Ladung auf einer

harten Oberfläche, erlaubt das Zurückholen von Blindgängern und erlaubt es oft, eingesunkene Ladungen an eine bessere Position an der Schneeoberfläche zurückzuziehen. Es gibt keine Investitionskosten und leicht zugängliche Anbruchgebiete können so einfach kontrolliert werden, weiters sind Sprengerfolge sofort ersichtlich. Allerdings erfordert diese Methode einen erhöhten Zeit- und Personalaufwand und ist oft gefährlich. Extreme Witterungsbedingungen können das Erreichen der gewünschten Sprengpunkte verhindern. Durch die Positionierung der Sprengladung im besten Fall an der Schneeoberfläche und die kleine Ladungsgröße ist nur ein begrenzter Wirkungsradius zu erwarten

4.4.3 Überschneesprengungen mit Ladung an einem Pfahl befestigt

Hierbei handelt es sich um eine sehr gefährliche Methode, weil die Patrouilliere das potentielle Anrissgebiet betreten müssen um den Pfahl mit der Ladung zu platzieren. Das Personal muss sich dabei unbedingt sichern! Auf der anderen Seite ist diese Methode sehr effektiv, wenn es darum geht harte Schneebretter mit grossen und gut verteilten Ladungen auszulösen. Die besten Resultate werden erreicht, wenn man mehrere 5 kg bis 10 kg schwere Ladungen in einem 30 m bis 50 m Raster mit Sprengschnur verbindet. Diese Methode erfordert einen hohen Zeit- und Personalaufwand, aber Sprengerfolge sind sofort ersichtlich. Extreme Witterungsbedingungen können das Erreichen der gewünschten Sprengpunkte verhindern

4.4.4 Gratausleger

Gratausleger werden manchmal dazu eingesetzt, Sprengladungen über Schnee nahe eines Grates zu platzieren. Sie bestehen meistens aus einer Rute welche an einem Drehpunkt fix auf einem Grat installiert wird. Vorne an dieser Rute kann die

Ladung angebracht werden, eine genügend lange Sicherheitsanzündschnur gezündet und die Ladung nach vorne in die gewünschte Sprengposition geschwenkt werden. Das Sprengpersonal muss vor der Sprengung in Deckung gehen. Es gibt geringe Investitionskosten und leicht zugängliche Anbruchgebiete können so einfach kontrolliert werden, weiters sind Sprengerfolge sofort ersichtlich. Allerdings erfordert diese Methode einen erhöhten Zeit- und Personalaufwand

4.4.5 Wurfladungen aus dem Hubschrauber



Helikoptereinsätze für die künstliche Lawinenauslösung sind eine weit verbreitete, sehr günstige und effiziente Massnahme. Um die Gefahr von Blindgängern zu minimieren werden müssen die Wurfladungen mit zwei Zündmittel versehen werden. Abgesehen von rechtlichen Einschränkungen für den Abwurf von Sprengladungen vom Helikopter in gewissen Ländern hat diese Methode drei grundsätzliche

Einschränkungen:

1. Grundsätzlich muss Flugwetter herrschen, was dazu führt, dass die Schneedeckenstabilität zum Zeitpunkt des Helikoptereinsatzes oft bereits wieder zugenommen hat. Damit ist es häufig nicht möglich, die Lawinengrösse durch frühzeitiges Sprengen zu begrenzen.
2. Meist werden die Ladungen durch eine offene Türe aus dem Helikopter geworfen. Dabei können verschiedene Probleme auftreten: Die Ladung kann auf einer harten Oberfläche abrutschen oder die Ladung sinkt in einer weichen Schneeoberfläche ein. Zudem können nicht markierte Blindgänger nur schwer aufgefunden werden. Das Abrutschen kann durch eine Erhöhung der Oberflächenrauigkeit der Ladung oder durch das Anbringen kurzer Holzstäbe an der Ladung meist verhindert werden. Um einer möglichen Reduktion des Wirkungsradius durch ein Eindringen der Ladung in die Schneedecke entgegenzuwirken, wird die Ladungsgrösse erhöht (minimale Ladungsgrösse 5kg).
3. Der erhöhte Zeitaufwand, die im Bedarfsfall knappe Verfügbarkeit der Hubschrauber und das erhöhte Risiko durch Flüge in unmittelbarer Geländenähe sind weitere Nachteile dieser Methode.

4.4.6 Ladungsabsenkungen aus bemannten Luftseilbahnen

Diese Methode kann eingesetzt werden, falls eine Luftseilbahn ein potentielles Anrissgebiet überquert. Die Ladungen werden entweder – mit zwei Zündmitteln versehen – aus der Luftseilbahn geworfen oder an einem Seil aus der Kabine abgesenkt, um eine Detonation oberhalb der Schneeoberfläche zu erzeugen. Die Distanz zwischen der Kabine und dem Sprengpunkt muss genügend gross sein, um Schäden an der Kabine und den Zug- und Tragseilen zu verhindern.

4.4.7 Sprengseilbahnen, Ladungsabwerfer



Viele Sprengseilbahnen sind nach wie vor in Gebrauch. Die Bahnlänge variiert zwischen wenigen Metern und einigen Kilometern und damit auch die Investitionskosten. Der große Vorteil der Sprengseilbahnen ist die Möglichkeit der Überschneesprengung und die Verschiebbarkeit des Sprengpunktes entlang der Seillinie. Dabei können folgende Hauptprobleme auftreten: Reifbildung, grosser Zeitbedarf und SeilSchwingungen verursacht durch starke Winde. Deshalb ist es häufig notwendig, automatische Entreifungssysteme einzusetzen. Um die Bedienungszeiten zu verkürzen muss bei grösseren Bahnlängen die Möglichkeit gegeben sein, mehrere Ladungen per Fernauslösung zu zünden. Zusätzlich ist es in unregelmässigem Terrain von grossem Vorteil, wenn die Ladungen an den Sprengpunkt auf die optimale Sprenghöhe abgesenkt werden können.

Oft verhindern starke Winde den Betrieb von Sprengseilbahnen. Masten, Transportkabelaufhängungen und Ladungsabwerfer müssen sehr sorgfältig konstruiert werden, um der Entgleisung des Seils bei intensiver Reifbildung und starken Winden entgegenzuwirken. Der Sprengpunkt kann nur entlang des Kabels variiert werden kann, jedoch nicht innerhalb des ganzen Anrissgebietes. Deshalb kommt der Linienführung grosse Bedeutung zu.

4.4.8 Geschosse, Raketen



Für die künstliche Lawinenauslösung sind insbesondere in der Schweiz verschiedene Armeewaffen im Einsatz: rückstossfreie Kanonen, Minenwerfer, Raketenrohre. Gängige Probleme mit diesen Systemen sind – abgesehen von den hohen Kosten pro Sprengung – die schlechte Empfindlichkeit der Zünder bei Minenwerfergeschossen sowie die sehr beschränkten Ladungsgrössen. Der große Vorteil dieser Systeme ist die Möglichkeit verschiedene Sprengpunkte von einem Standort aus zu erreichen. Die meisten Geschosse dringen vor der Detonation in die Schneedecke ein. Zusätzlich geht ein Grossteil der Energie für die Beschleunigung der Mantelsplitter verloren. Auf der anderen Seite können Armeegeschosse auch bei sehr widrigen Wetterbedingungen (praktisch keine Sicht) eingesetzt werden. Der Einsatz von Armeegeschossen ist in vielen Ländern rechtlich eingeschränkt.



Der französische Avalancheur, eine Gasdruckkanone ähnlich dem amerikanischen Avalancheur kompensiert das Problem der schlechten Zünder Eigenschaften durch die Verwendung eines langen schlanken Projektils damit die Detonation zumindest teilweise an oder über der Schneedecke erfolgt. Zudem wird ein Zweikomponenten-Sprengstoff eingesetzt, damit man die strengen gesetzlichen

Auflagen bei Lagerung und Transport nicht einhalten muss. Blindgänger werden zudem nach ca. 24 oder 48 Stunden wieder inert.

Systeme mit einem räumlich beschränkten Einsatzbereich (z.B. Lawinenpfeife) können Ladungen von 2.5 kg bis rund 400 m (je nach Beschaffenheit der verfügbaren Sprengstoffe) weit feuern. Der Lawinenwächter erlaubt es diesen Ladungstyp von einem Standort ausserhalb der potentiellen Anrissgebiete ferngesteuert abzufeuern.



Allgemein gilt bei den oben beschriebenen Systemen dass die Treffergenauigkeit mit zunehmender Entfernung und zunehmenden Windeinfluss stark abnimmt.

4.4.9 Gazex®



Beim Gazex® System wird die Lawinenauslösung durch Zündung eines Propan-Sauerstoff-Gemisches (0.8 m^3 bis 3.5 m^3) erreicht. Somit sind die gesetzlichen Auflagen bezüglich Systembewilligung und Personalausbildung für Handhabung und Bedienung der Anlage gegenüber den Systemen mit Sprengstoff wesentlich einfacher. Ein weiterer großer Vorteil ist die hohe Anzahl an Sprengungen welche mit einer Gasbefüllung durchgeführt werden können. Die Höhe

der Investition sowie die Gesamtbetriebskosten pro Schuss sind vergleichbar mit denen anderer ferngesteuerter Systeme.

Die Explosion wird in einem im Anbruchgebiet installierten Zündrohr ausgelöst und bewirkt eine Stoßwelle, die zuerst einen Überdruck, dann einen Unterdruck auf die Schneedecke ausübt. Dazu kommt ein direkter Schubdruck auf den Schnee direkt unterhalb der Zündrohröffnung. Die Anlagen werden über Funk oder GSM fernbedient. Die Gas- und Sauerstoffversorgung zu den Zündrohren erfolgt über Leitungen im Gelände von einem zentralen Versorgungscontainer. Die Steuerung erfolgt ebenfalls über diesen Versorgungscontainer welcher an einem sicheren Standort installiert und per Solarpanels mit Strom versorgt wird. Bis zu maximal 10 Zündrohre können von einem Versorgungscontainer aus angesteuert werden. Durch die Steuerung und Versorgung mehrerer Zündrohre von einem Versorgungscontainer aus wird die Systemredundanz allerdings deutlich verringert. Eine Fehlfunktion im Versorgungscontainer betrifft dann oft alle angeschlossenen Zündrohre. Ist eine hohe Systemredundanz gefordert (oft mit überlappenden Wirkungszonen), ist die Gazex® Variante mit separaten Versorgungseinheiten zu wählen. Durch die Explosion des Propan-Sauerstoff Gemisches werden deutlich geringere Deformationsgeschwindigkeiten in der Schneedecke verursacht (ausgenommen in der unmittelbaren Umgebung der Sprengstelle), weil die Abrenngeschwindigkeit deutlich geringer ist (ca. $1'000 \text{ m/s}$) als bei brisanten Sprengstoffe. Zündrohre mit Volumen $< 1.5 \text{ m}^3$ sind erfahrungsgemäss wegen des sehr kleinen Wirkungsradius nur in ganz speziellen Situationen (kleine Anrissgebiete in steilen Couloirs) zu empfehlen.

4.4.10 Daisybell® und O'Bellx® Gassprenganlagen



Neue Entwicklungen vom selben Hersteller wie Gazex® sind Daisybell® und O'Bellx®. Eine Gasmischung (Wasserstoff/Sauerstoff) wird in einem glockenförmigen Behälter gezündet. Die Daisybell® wird mit einer Leine am Hubschrauber angehängt, zum potentiellen Lawinenanrissgebiet transportiert und im stationären Flug ausgelöst. Die Zündung wird vom Helikopter aus ausgelöst und die

Explosion findet über der Schneedecke statt. Es ist möglich, mehrere Schüsse in kurzer Zeit abzufeuern. Der Einsatz dieses Systems ist sehr stark wetterabhängig, die fliegerischen Anforderungen an den Piloten unter realen Bedingungen hoch und der Wirkungsradius ist auch unter Hochwinterbedingungen sehr klein (stark gerichtete Explosion mit kleinem Wirkungsradius und starker Abhängigkeit von der Sprengpunkthöhe). Trotzdem kann diese Methode vor allem zur Pistensicherung eine Alternative zum Abwurf von Sprengladungen bilden.

Die O'Bellx® ist vom Prinzip her gleich, wird jedoch auf einem Mast im Anrissgebiet aufgesetzt und über Funk ferngesteuert. Der Einsatz dieser Variante ist wegen des kleinen Wirkungsbereiches (wie die 0.8m³ Zündrohre) auf Anrissgebiete von kleiner Grösse beschränkt. Es kann in steilen Runsen (Couloirs) mit einer Anrissbreite von bis ca. 40m eine gute Wirkung haben.

4.4.11 Lawinenwächter

Die Lawinenwächter der Firma Innauen-Schätti werden mit Fundament oder Felsanker an einem sicheren Standort nahe der Anrisszone montiert. Sie sind mit einem oder zwei Schutzkästen zu je 10 Sprengladungen bestückt. Die Ladungen werden vor dem Winter durch das Bedienungspersonal manuell in die Anlage eingebracht. Zur Stromversorgung für Steuerung und Mechanik wird über



Solarpanels eine Batterie geladen. Die Bedienung erfolgt ebenfalls über Funk von einem PC in einer Kommandozentrale.

Ein grosser Vorteil dieses Systems ist dass die Ladungen auf gewählte Sprengpunkte eingeschossen werden und einzeln ferngesteuert ausgelöst werden können. Ein elektrischer Zünder initiiert eine Treibladung mit welcher die Sprengstoffpatrone bis ca. 150 m ins Anrissgebiet geschossen wird. Beim Auswerfen der Sprengladung aus dem Rohr entzündet die Abreisszünder die Sicherheitsanzündschnüre.

Die Sprengkapsel bringt 2,8 kg Lawinensprengstoff im Zielgebiet zur Explosion.

Als Nachteil ist anzusehen dass es zu keiner Überschneesprengung kommt, die Ladung vor der Detonation bei harter Schneedecke abrutschen kann und die Bergung allfälliger Blindgänger meist schwierig und gefährlich ist.

4.4.12 Lawinensprengmast



Lawinensprengmasten werden ähnlich wie die Gazex® Anlagen innerhalb des obersten Abschnitts eines Anrissgebietes oder auf Rippen zwischen Couloirs oder Anrissmulden installiert. Lawinensprengmasten wie der Wyssen - Sprengmast sind ebenfalls ferngesteuert und senken 5 kg schwere Sprengladungen auf eine optimale Sprenghöhe ab bevor diese detonieren.

Der Wyssen - Sprengmast besteht aus einem fix im Anrissbereich installierten Mast und einem aufsetzbaren Magazinkasten. Die Masten werden mit 4 bis 5 Ankern oder Mikropfählen im Untergrund fundiert um den Eingriff in die Natur gering zu halten. Ein Dorn an der Mastspitze erlaubt ein einfaches Aufsetzen des Magazinkastens mittels Hubschrauber. Dieser beinhaltet 12 Ladungen zu je 5 kg Sprengstoff,

den Absenkmechanik, die elektronische Steuerung, eine Batterie, Solarzellen an dessen Aussenhülle und eine Funkübermittlungseinheit. Es sind also keine Zuleitungen im Gelände nötig. Die Zündung erfolgt nachdem die Ladung durch das Abwurfloch im Kastenboden fällt und mittels Fallenergie die Zünder aktiviert werden. Die Konstruktion ist so, dass er mit Hilfe eines Helikopters und einer speziellen Klinke auf einfache Art ohne Flughelfer aufgesetzt und entfernt werden kann. Diese Vorgänge bedürfen keine Anwesenheit auf dem Masten. Das Gewicht eines vollgeladenen Magazins beträgt ca. 650 kg. Sobald das Magazin auf dem Dorn platziert ist, richtet sich dieses automatisch aus. Die elektronische Steuerung wird erst nach dem korrekten Aufsetzen aktiviert. Dem Piloten wird die korrekte Installation angezeigt. Für Auffüll- und Wartungsarbeiten sowie die Lagerung im Sommer wird das Magazin ins Tal geflogen. Ein solches System ist besonders für abgelegene Standorte ohne winterlichen Bodenzugang geeignet.



Beim Lawinenmast von Innauen-Schätti ist der Magazinkasten fix am Masten montiert und die Sprengladungen werden, wie oben beim Lawinenwächter schon beschrieben, manuell vom Personal nachgeladen. Der Auswurf der Ladung erfolgt durch eine pyrotechnische Treibladung. Die Sprengladungen sind an eine Halteschnur geknüpft, so dass die Ladung über der Schneedecke detoniert. Mit der gleichen Anlage ist auch die Kombination von Lawinenwächter und Lawinenmast möglich. D.h. vom selben Kasten können Ladungen abgesenkt oder in ein entferntes Ziel geschossen werden.

Die Ladungsgrösse ist auf 2.8 kg beschränkt.

Die Nachteile der oben beschriebenen Systeme sind die hohen Investitionskosten pro Sprengpunkt und die Fixierung an einem bestimmten Standort. Je nach Standort ist man abhängig von Helikoptern für die Nachbefüllung der Magazine.

4.4.13 Spezialfall Wächtensprengungen

Für Wächtensprengungen werden zwei verschiedene Methoden eingesetzt.

1. Die Wächte wird von ihrer Aufhängung "losgeschnitten" indem durch verschiedene Sprengladungen ein Graben geöffnet wird. Dazu verbindet man im Idealfall verschiedene – entlang der Wächte – vergrabene Ladungen mit einer Sprengschnur. Die notwendige Grösse der einzelnen Ladungen ist in etwa durch folgende Gleichung gegeben: $W[\text{kg}] = (hs/2)^3$ mit hs : Schneetiefe/Mächtigkeit der Wächte an der Sprengstelle in [m] und $1\text{kg} < W < 10\text{kg}$

Die Distanz zwischen den individuellen Ladungen sollte in etwa hs entsprechen. Zusätzlich sollten die Ladungen in einer Tiefe von $hs/2$ vergraben werden.

2. Eine zweite oft sehr erfolgreiche Methode besteht darin grosse Ladungen über eine Wächte zu hängen, sodass die Detonation am Fuss der Wächte stattfindet.

Achtung: Ein Wächtenabbruch kann grosse Lawinen in den darunter liegenden Hängen auslösen!

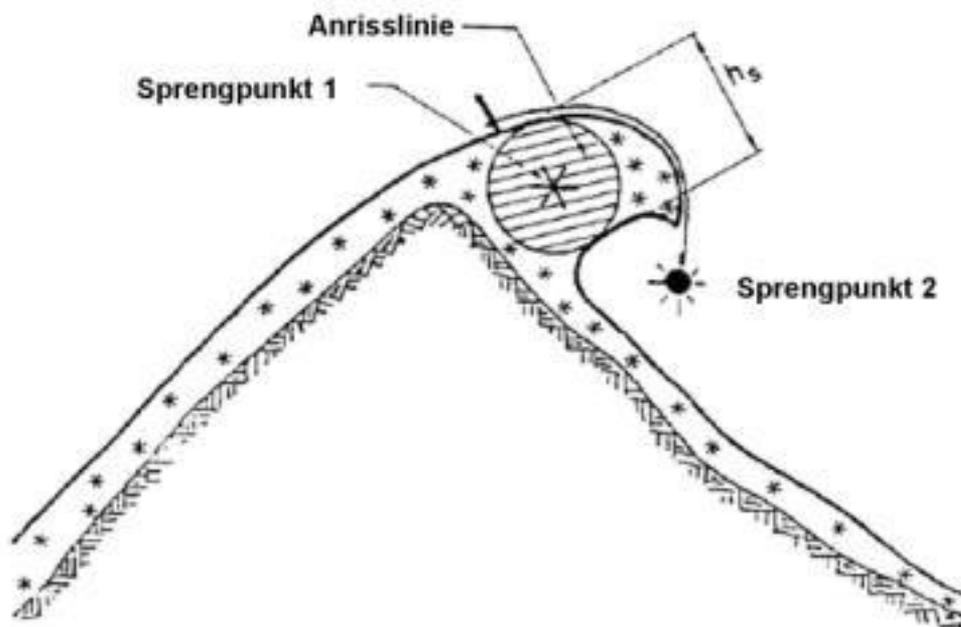


Abbildung 8: Skizze zur Entfernung von Wächten

4.5 Interpretation der Resultate und Richtlinien

4.5.1 Wahl des richtigen Zeitpunktes für Lawinensicherungsarbeiten

Lawinensicherungsarbeiten sollten wenn immer möglich während oder unmittelbar nach Grossschneefällen oder starker Schneeverfrachtung durchgeführt werden, bevor die natürliche Schneedeckenstabilität ansteigt. Wenn die Lawinengrösse (Auslaufdistanz) kritisch ist und limitiert werden soll, müssen Lawinensicherungsarbeiten zwingend bereits während der Niederschlags- oder Verfrachtungsphase durchgeführt werden, zumindest in den steileren Partien der Anrissgebiete.

Werden Sprengungen in wenig steilen Anrissgebieten bereits nach kleineren Neuschneemengen durchgeführt, sinkt unter Umständen die Wahrscheinlichkeit, dass durch spätere Auslöseversuche Lawinen ausgelöst werden. Die negativen Sprengungen zum früheren Zeitpunkt können, zumindest lokal, die Festigkeit der Schwachschicht erhöhen (durch forcierte Setzung).

Sobald die Auslaufdistanz einzelner Lawinen kritisch werden könnte, muss der Zeitpunkt für die anstehenden Sicherungsarbeiten sehr sorgfältig gewählt werden. Sprengt man zu früh, führt dies zu einem negativen Sprengresultat, sprengt man zu spät, werden zu grosse Lawinen ausgelöst. Grundsätzlich ist es mit entsprechenden Methoden möglich, steile Hänge während Grossschneefällen mehrere Male zu entladen. Man soll aber nie davon ausgehen, dass stark geladene Hänge mit kleineren Sprengladungen oder einer unterschiedlichen Ladungspositionierung portionenweise ausgelöst werden könnten. Sobald die Bruchfortpflanzung eingesetzt hat, hängt sie in der Regel nicht mehr von ihrer Initialisierung ab.

Hänge mit extremen Strahlungsbedingungen (südexponierte Hänge) sollten vor Hängen ohne nennenswerte Strahlungseinflüsse ausgelöst werden. Die Strahlung beschleunigt die abbauende Umwandlung als auch die Setzung der oberflächennahen Schicht (Schneebrett). Diese Vorgänge verursachen eine Abnahme der Festigkeit für eine begrenzte Zeit, erhöhen jedoch nachträglich die Steifigkeit der Schicht ohne die Schwachschicht zu beeinflussen. Deshalb sind die Bedingungen für einen Initialbruch und einsetzende Bruchfortpflanzung besser bevor die Festigkeit des Schneebretts (infolge Setzung) und allenfalls auch der Schwachschicht zunimmt.

4.5.2 Wahl des Sprengstofftyps/Gasgemisch

Sprengstoffe mit hohen Detonationsgeschwindigkeiten sollten dann eingesetzt werden, wenn die Ladungen über der Schneedecke positioniert werden (Sprengseilbahnen, Pfähle, Lawinensprengmasten).

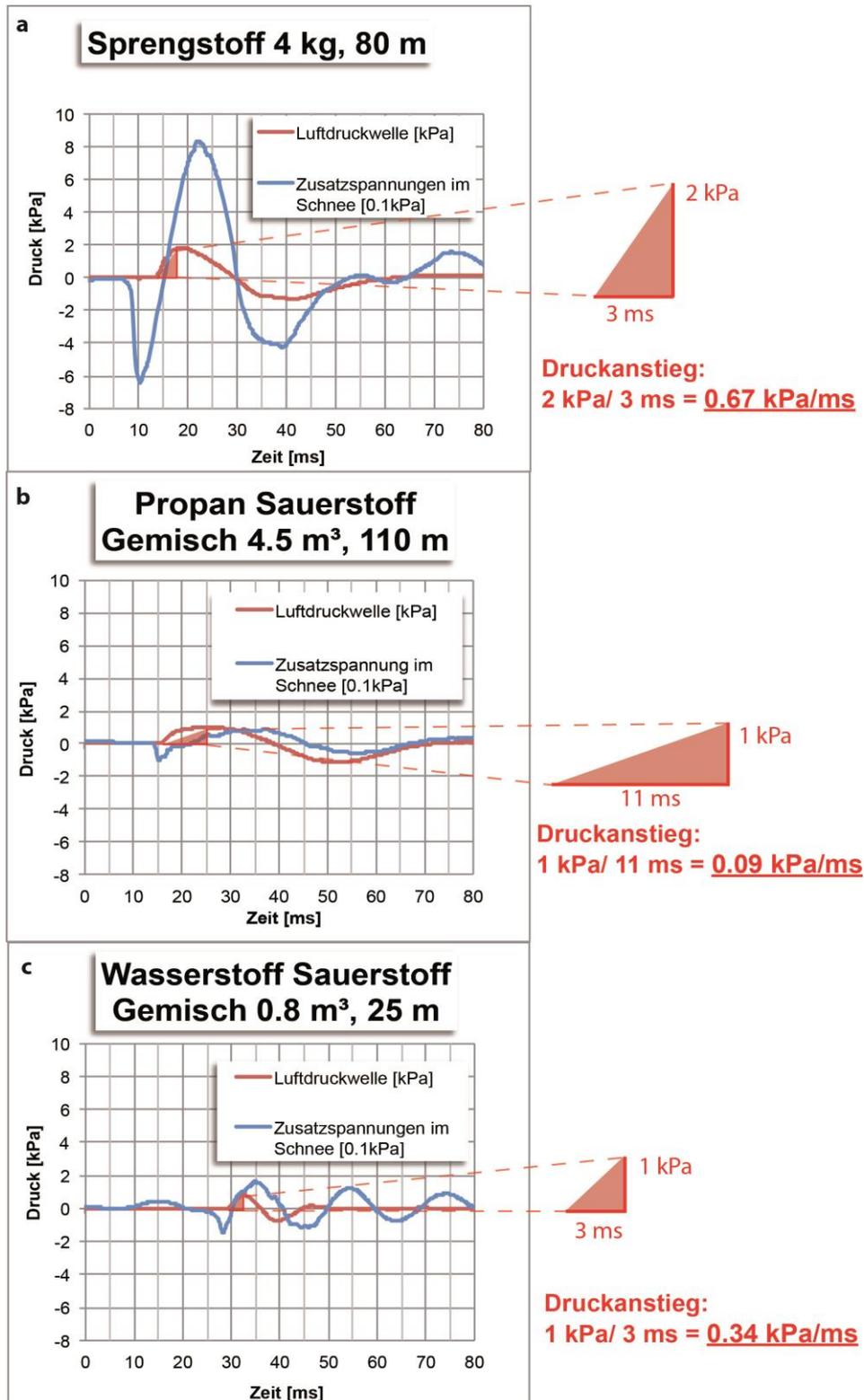


Abbildung 9: Wirkung verschiedener Sprengmethoden, Messungen 2011. Rot: N-förmige Luftdruckwelle an der Schneeoberfläche; Blau: Vertikalkomponente der Zusatzspannungen in der Schneedecke. Alle Werte in [kPa] (N/m^2) und Millisekunden [ms]. **Sprengstoff erzeugt aufgrund der hohen Druckanstiegsgeschwindigkeit (0.5-1 kPa/ms) weitaus höhere Zusatzspannungen im Schnee (900 Pa bei 80 m) als Gasgemische (100 Pa bei 110 m)!**

Sobald Ladungen auf oder innerhalb der Schneedecke positioniert werden (Handladungen oder Geschosse), ist ein Sprengstoff mit mittlerer Detonationsgeschwindigkeit (4000 m/s – 5000 m/s) ausreichend, solange die Explosionswärme hoch ist.

Explosionen von Gasgemischen haben wegen ihrer sehr tiefen Abrennengeschwindigkeit (<1000 m/s) einen deutlich kleineren Wirkungsbereich als Sprengstoffe. Diese Tatsache ist bei der Wahl der Sprengpunkte zu berücksichtigen!

Ein kleinerer Wirkungsradius bedeutet oft eine grössere Anzahl Sprengpunkte und somit eine grössere Anzahl von Anlagen. Abbildung 9 vergleicht die Sprengwirkungen des Sprengstoffes Alpinit (z.B. Sprengmast), mit einem 4.5 m³ Gazex® Zündrohr (Propan Sauerstoff Gemisch) und mit der 0.8 m³ Daisybell® (Wasserstoff Sauerstoff Gemisch).

Die Gazex® (Propan Sauerstoff Gemisch) Messung wurde unter 45° zur Rohrachse im Abstand von 110 m durchgeführt. Um einen direkten Vergleich mit den Alpinit (Sprengstoff) Messungen (Abstand der Messstelle 80 m vom Sprengpunkt) zu erhalten, müssen die Gazex® Messwerte um 50% für die V-Werte (Zusatzspannungen in der Schneedecke, blaue Linie) resp. 80% für die M-Werte (N-Wellenamplitude, rote Linie) erhöht werden. Andererseits sollte die Wirkung eines 4.5 m³ Rohres im Abstand von 110 m in etwa der Wirkung des grössten heute erhältlichen 3 m³ Rohres im Abstand von 80 m entsprechen.

Wie in Kapitel 3.2 bereits erwähnt, ist aber nicht die maximale Amplitude der Druckwelle in der Luft entscheidend, sondern die Geschwindigkeit des Druckanstieges, damit eine hohe Deformationsgeschwindigkeit erreicht wird. Abbildung 9a zeigt das bei Alpinit 3 ms vergehen bis der maximale Druck der N-Welle (rote Linie) erreicht wird und bei Gazex® Explosionen 11 ms (Abb. 9b), das dreifache der Zeit. Das ist durch die sehr niedrige Abrennengeschwindigkeit bei Explosionen von Gasmischungen (<1000 m/s) im Vergleich zu Detonationen von Sprengstoff (>5000 m/s) zu erklären.

Die maximale Amplitude der N-Welle bei Alpinit (2 kPa bei 80 m) ist gering höher als der interpolierte Wert für die Gazex® Explosion (1.8 kPa, errechnet aus 1 kPa bei 110 m + 80%).

Vergleicht man jedoch die Zusatzspannungen die durch die jeweilige Druckquelle in der Schneedecke verursacht werden (blaue Linie), sind die Unterschiede deutlich zu sehen. Alpinit verursacht zusätzliche Belastungen in der Höhe von 900 Pa bei 80 m und Gazex® Explosionen (4.5 m³) produzieren ca. 150 Pa (errechnet aus 100 Pa bei 110 m + 50%). Diese Ergebnisse müssen bei der Standortwahl und der Definition des Wirkungsbereiches, und damit der Anzahl der Anlagen, berücksichtigt werden.

Die Messungen mit der Daisybell® mussten aufgrund des geringen Wirkungsbereiches in einem Abstand von 25 m durchgeführt werden. Es wird in relativ kurzer Zeit (3 ms, Abb. 9c) ein N-Wellen-Druck von ca. 1 kPa aufgebaut (rote Linie). Die Zusatzspannungen die im Abstand von 25 m in der Schneedecke aufgebaut werden, betragen ca. 160 Pa, das entspricht in etwa dem Wert des 4.5 m³ Gazex® Rohres in einem Abstand von 80 m. Das ist aber nur ca. 1/6 der Zusatzspannungen die durch eine Sprengstoff Detonation in einem Abstand von 80

m gemessen werden konnten. Durch diesen begrenzten Wirkungsbereich ist die O'BellX[®] für punktuelle Eingriffe in kleinen Anbruchgebieten (vgl. S. 28) geeignet und Auslöseversuche mit der Daisybell[®] müssen bei negativem Resultat in einem sehr engmaschigen Raster (ca. 40 bis 50 m) durchgeführt werden.

4.5.3 Wahl des richtigen Sprengpunktes

Ideale Sprengstandorte sind solche mit geringerer Stabilität, d. h. jene Standorte mit hoher Wahrscheinlichkeit für einen Initialbruch. In Anbetracht der Tatsache, dass solche Standorte nicht präzise ausfindig gemacht werden können, muss das gesamte Anrissgebiet durch die Wirkungsradien der einzelnen Detonationen abgedeckt sein. Um dies auf eine ökonomische Art und Weise mit einer minimalen Ladungsanzahl zu realisieren, sollte man Sprengmethoden mit grösstmöglichen Wirkungsradien bevorzugen und die Sicherungsarbeiten an jenen Orten beginnen, welche erfahrungsgemäss eine schwache natürliche Stabilität aufweisen. Je mächtiger die Schneeschicht über der Schwachschicht, desto grösser die Dämpfung der Druckwellen, je kleiner die Zusatzbelastungen, desto unwahrscheinlicher ein Initialbruch.

Die grössten Wirkungsradien werden dann erreicht, wenn die Ladung oberhalb der Schneedecke positioniert wird (nur leicht verfestigte Schicht, tiefe natürliche Stabilität). Für harte Schichten mit einer hohen natürlichen Stabilität ist der Wirkungsradius für grosse Zusatzbelastungen sehr klein, in den meisten Fällen weniger als 10 m. Häufig werden grosse Ladungen an Pfählen fixiert oder sogar in der Schneedecke vergraben.

Sobald eine Ladung in die Schneedecke eindringt, ist der Wirkungsradius drastisch reduziert. Mit einer Schnur gesicherte Handladung können oft nach dem Werfen wieder an die Schneeoberfläche zurück gezogen werden.

Für Ladungen oder Geschosse deren Eindringen in die Schneedecke vor der Detonation nicht grundsätzlich verhindert werden kann, sollen Sprengpunkte innerhalb der notwendigen Wirkungszonen mit kleiner Schneehöhe oder windgepresster Oberfläche ausgewählt werden.

In Fällen wo die Schneeoberfläche extrem hart ist, gleitet die Ladung möglicherweise den Hang hinunter und detoniert ausserhalb des potentiellen Anrissgebietes. Deshalb sollten Handwurfadungen an einer Schnur gesichert werden. Dies ermöglicht zudem eine einfache Blindgängerbergung.

Wenn ein Sprengpunkt ausgewählt wird, sollte man sich sicher sein, dass alle Teile des Anrissgebietes innerhalb des Wirkungsradius vom Sprengpunkt aus sichtbar sind. Standorte, die von der direkten Druckwelle abgeschattet sind, erfahren in der Regel keine genügenden zusätzlichen Belastungen.

Bei **Nassschnee** ist der Wirkungsradius in der Regel stark eingeschränkt (meist nur auf eine ausgedehnte Kraterzone beschränkt). Zusätzlich ist der richtige Sprengzeitpunkt sehr schwierig zu bestimmen, da sich die Stabilität in einer nassen Schneedecke viel schneller ändert als in einer trockenen Schneedecke. Erfahrungen haben gezeigt, dass die Erfolgswahrscheinlichkeit zur Auslösung von

Nassschneelawinen am grössten ist, wenn die Sprengung kurz nach dem die höchsten Temperaturen erreicht wurden und die Abkühlung nach Sonnenuntergang wieder einsetzt, ausgeführt werden. Weiter gilt es zu beachten, dass mit den vorgestellten Methoden kaum Gleitschneelawinen ausgelöst werden. Exaktes Timing und grosse Ladungen (5 kg, Gazex®) sind sehr wichtig um die Wahrscheinlichkeit für positive Resultate zu erhöhen. Oft werden dabei nur lokale Entladungen in der unmittelbaren Umgebung der Sprengstelle ausgelöst. Dies deutet zwar auf geringe Stabilität hin, mit einer solchen lokalen Auslösung kann aber eine grössere mögliche Anbruchfläche nicht als gesichert gelten. Negative Sprengresultate können nicht als positive Stabilitätstests betrachtet werden.

4.5.4 Stabilitätstests

Wenn im potentiellen Anrissgebiet keine nennenswerten Lawinen mit Hilfe künstlicher Lawinensicherungsmethoden ausgelöst werden konnten, kann dies als positiver Stabilitätstest interpretiert werden, falls folgende Regeln berücksichtigt wurden:

- Das komplette potentielle Anrissgebiet muss mit den Wirkungsradien der einzelnen Sprengungen abgedeckt sein.
- Reduzierte Wirkungsradien durch von der Druckwelle abgeschattete Hangbereiche müssen berücksichtigt werden.
- Stabilitätstests dürfen nur für trockene Schneedecken interpretiert werden.
- Die Detonationen muss aufgrund des Knalls von einem Anwender oder einer elektronischen Messung verifiziert werden.
- Nach negativen Sprengresultaten sollte in der Regel eine Zeitspanne von 15 Minuten in Fällen mit hoher Schneetemperatur und eine Stunde in Fällen tieferer Temperaturen abgewartet werden, bevor das Gebiet als gesichert eingestuft werden kann (Zeit für die mechanische Relaxation der Schneedecke).

4.5.5 Bestimmung der Sprengwirkung

Durch Beobachtungen der Sprengung können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Je härter der Knall einer Detonation, desto grösser der Wirkungsradius, je gedämpfter der Knall, desto kleiner der Wirkungsradius.
- Ein flacher, untiefer Krater mit runder Form weist auf einen grossen Wirkungsradius hin.
- Hohe Schneefontänen und tiefe Krater sind ein Zeichen für kleine Wirkungsradien.

4.5.6 Restrisiko

Sobald in einem Anrissgebiet eine grossflächige Lawine ausgelöst wurde, können Anrissgebiet, entsprechende Sturzbahn und Auslaufgebiet als sicher eingestuft

werden. Normalerweise sind ausgeprägte Wetteränderungen notwendig, um die Stabilität der verbleibenden Schneedecke im Anrissgebiet zu verkleinern und dadurch das Gefahrenpotential erneut ansteigen zu lassen. Zu beachten sind allenfalls Ablagerungen in der Sturzbahn die bei einer Erwärmung erneut mobilisiert werden könnten.

Falls keine Lawinen ausgelöst werden konnten (negatives Resultat) aber obenstehende Grundsätze sorgfältig beachtet wurden (Stabilitätstests), kann das Restrisiko für einen unvorhergesehenen Lawinenabgang in vielen Fällen dennoch als klein eingeschätzt werden. Die kontinuierliche Beurteilung der Entwicklung der Schnee- und Wetterverhältnisse ist unerlässlich um einen möglichen Gefahrenanstieg frühzeitig zu erkennen.

4.5.7 Sicherheit der Sprengpatrouille

Die Sicherheit der Sprengrouen und -punkte muss unter Beachtung aller potentiellen Lawinenzüge und unter Einbezug aller möglichen sekundären Lawinen oder Fernauslösungen laufend beurteilt werden.

Bevor eine Sprengladung gezündet wird, muss sich das Sicherungsteam vergewissern, dass alle möglicherweise gefährdeten Gebiete gesperrt und evakuiert sind. Ebenso muss sich die Sprengpatrouille der Tatsache bewusst sein, dass die Länge der Auslaufstrecken häufig nur sehr schwer abzuschätzen ist.

Deshalb sollte das Sicherungsteam in ständiger Verbindung mit seiner Basis stehen und das Vorgehen als auch die Beobachtungen laufend kommunizieren.

4.5.8 Messungen von künstlich ausgelösten Lawinen

Um das Resultat der künstlichen Lawinenauslösung unabhängig von Wetter und Tageszeit als Voraussetzung für weitere sicherheitsrelevante Entscheide feststellen zu können, stehen grundsätzlich verschiedene Messmethoden zur Verfügung. Die meisten Methoden sind auch geeignet um natürliche Lawinenabgänge zu registrieren. Alle Methoden erfordern die feste Einrichtung von Messanlagen in den Lawinenzügen oder im Bereich des extremen Lawinenauslauf im Tal. Die Messmethoden umfassen:

- a.) Kurzreichweitige Mikrowellendoppleranlagen (Detektionsdistanz bis max. 300m) am Rande der Sturzbahn, Bodenerschütterungsmessungen im Bereich der Sturzbahn, Lawinendruckmessungen;
- b.) Mikrowellendopplerradar mit grosser Reichweite (Detektionsdistanz bis 2km) und Infraschallmessungen.

Die Messmethoden unter a) werden seit über 20 Jahren in Lawinenalarmanlagen eingesetzt. Diese Systeme sind erprobt, erfordern aber Installationen im Bereich der oberen Sturzbahn. Entsprechende Systeme werden heute angeboten. Messmethoden b) befinden sich in der abschliessenden Entwicklungsphase. Diese Systeme werden im Tal oder am Gegenhang installiert. Insbesondere der langreichweitige Lawinenradar neuester Generation kann als sehr erfolgsversprechende und robuste Methode bezeichnet werden. Der Erfolg des

Einsatzes von Infraschalldetektionsanlagen ist sehr ortsabhängig obwohl auch diese Detektionsmethode in jahrelanger Erprobung steht.

5. Schlussbemerkungen

Die lückenlose Gewährleistung des akzeptierten, sehr tiefen Restrisikos durch aktive und passive temporäre Lawinenschutzmassnahmen ist eine sehr anspruchsvolle Aufgabe. Sie erfordert neben guten Grundkenntnissen viel Erfahrung für alle Beteiligten. **Die zur Anwendung gelangenden Methoden für die künstliche Auslösung von Lawinen sind sorgfältig und situationsgerecht auszuwählen, zu installieren, zu kontrollieren, zu unterhalten und zu betreiben.**

Heute werden auf dem Markt eine große Auswahl von Systemen angeboten. Jedes der Systeme hat seine Vor- und Nachteile bezüglich Wirksamkeit, Sicherheit, Betrieb und Unterhalt. Leider werden immer auch wieder Systeme angeboten die grundsätzliche Anforderungen an Wirkungsbereich und Einsatzbereitschaft nicht erfüllen. Solche Systeme können zwar unter bestimmten Bedingungen auch Lawinen auslösen, das Restrisiko negativer Auslöseversuche (unvorhergesehene Lawinenniedergänge) bleibt aber hoch.

Aufgrund ihrer Wirkung sind Detonationen von Sprengstoffen Explosionen von Gasgemischen vorzuziehen. Gaskanonen haben aber bei Berücksichtigung eines eingeschränkten Wirkungsbereichs auch Vorteile in der Handhabung. Für die Bedienung beider Systeme bestehen aber keine sicherheitsrelevanten Unterschiede. Beide Systeme erzeugen Luftdruckwellen hoher Amplitude und können Lawinen auslösen. Bei der Handhabung der Sprengmittel (Gasgemische, Sprengstoffe oder inerte Sprengstoffkomponenten) sowie beim Umgang mit Blindgängern im erweiterten Sinn (nicht detonierte Sprengladungen, nicht explodierte oder fehlerhafte Gasgemische) bestehen aber große Unterschiede. Nichtdetonierte Sprengladungen verursachen heute aufgrund der meist vernachlässigbaren Schlagempfindlichkeit der Sprengmittel keine großen Sicherheitsprobleme. Allenfalls können Blindgänger mit Transpondern (z.B. Recco) markiert werden. Weitere Sprengungen mit der gleichen Methode zur Senkung des Lawinenrestrisikos sind meist möglich.

Stöchiometrisch fehlerhafte Gasgemische, die wesentlich schwächere Explosionen erzeugen bleiben aber oft unentdeckt und können zu einer falschen Interpretation des Sprengresultats führen. Für die Handhabung von Sprengmitteln und brennbaren Gasen gelten zu Recht unterschiedliche Gesetze und es ist eine unterschiedliche Ausbildung notwendig. Für die Fernbedienung der beiden Systemtypen ergeben sich aber keine Unterschiede, die Sicherheitsanforderungen sind identisch.

Die am häufigsten eingesetzten Methoden zur künstlichen Lawinenauslösung sind in nachfolgender Tabelle zusammengefasst.

Leitfaden künstliche Lawinenauslösung

Methoden Kriterien	Handwurfladung	Sprengseilbahn	Überschnee- sprengung auf Pfahl	Ladung an Gratausleger	Armeegeschoss (≈ 8cm)/ Avalancheur	Helikopter- sprengung/ Daisybell	Lawinenspreng- mast	Gazex®	Law-Wächter (LW), Law-Pfeife (LP)/ Überschnee- sprengung
Reichweite [m]	30	50-3000	-	3-15	≈ 3000/ ≈ 2000	unbegrenzt	Fernauslösung	Fernaus- lösung	LW ist fernausgelöst, LP 400m
Sicherheit der Sprengpatrouille	+	+++	-	+	+++/>+++	+++	+++	+++	+++
Wirkungsradius	+	+++	++	++	-+/>+	+/>+	+++	++	+/>++
Qualität des Stabilitätstests	+	++	+	+	-+/>+	+/>+	+++	++	+/>++
Kosten	tief	mittel bis hoch	tief	mittel	mittel bis hoch	mittel	hoch	hoch	hoch/mittel
Gesamt- Beurteilung	Gut, aber mit begrenzten Einsatzmöglichkeiten.	Gut, Anpassung der Ladungsplatzierung von Seillinie abhängig. Wind und Reifbildung sind limitierende Faktoren.	Nur in besonderen Situationen mit hoher natürlicher Stabilität einsetzbar.	Gut, bei passender Topographie. Anrissgebiet in Kammnähe, Wächtenabtrag.	Gut, wenn grosse Reichweiten und flexible Abschusszeiten wichtig sind. Wetterunabhängig. Kosten pro Schuss sehr hoch.	Gut, aber starke Wetterabhängigkeit. Das Entstehen von grossen Lawinen kann nicht verhindert werden.	Gut, fixer Standort, sehr guter Wirkungsradius, Ladungen bis zu 5kg. Keine Interventionen am Maststandort notwendig.	Gut, fixer Standort, mittelmässiger Wirkungsradius. Keine Sprengstoffe.	Gut, fixer Standort, limitierte Ladungsgrösse. Bei Ausführung als Lawinenmast hängende Ladung (2.8 kg) mit Überschneesprengung

Tabelle 3 : Methoden der künstlichen Lawinenauslösung.

Legende:

- +++ sehr gut
- ++ gut
- + befriedigend
- + genügend
- ungenügend

6. Quellenverweis

Gubler, H. (1976): Künstliche Auslösung von Lawinen durch Sprengungen. Zwischenbericht. Mitteilungen des Eidgenössischen Institutes für Schnee- und Lawinenforschung 32

Gubler, H. (1977): Künstliche Auslösung von Lawinen durch Sprengungen. Mitteilungen des Eidgenössischen Institutes für Schnee- und Lawinenforschung 35.

Gubler, H. (1977): Artificial release of avalanches by explosives. J. of Glaciology, Vol. 10, No 81.

Gubler, H. und Rychetnik (1991): Effects of forests near timberline on avalanche formation. IAHS publication No 205.

Gubler H. (2005): Vortrag Ischgl, Sicherheitsplanung unter Einbezug temporärer und permanenter Sicherungsmassnahmen zum Schutz vor alpinen Naturgefahren. Erhältlich bei AlpuG.

wyszen avalanche control AG
CH - 3713 Reichenbach
Switzerland

tel.: +41 33 676 76 76
email: avalanche@wyszen.com
www.wyszen.com