

PETER GAUER

Risikomanagement in lawinenexponierten Gebieten Norwegens

Risk management in avalanche exposed areas in Norway

Zusammenfassung:

Dieser Beitrag entstand anlässlich des Symposiums "VISIONS OF AVALANCHE PROTECTION" 27–28 April 2017 in Galtür, Tirol. Er greift einige immerwährende und dennoch aktuelle Fragen des Lawinenrisikomanagements in Norwegen auf.

Stichwörter: Lawine, Gefahr, Gefährdung, Risiko

Abstract:

This article originated from the Symposium "VISIONS OF AVALANCHE PROTECTION" 27–28 April 2017 in Galtür, Tyrol. It tackles a number of everlasting and still current issues of avalanche risk management in Norway.

Keywords: *Avalanche, danger, hazard, risk*

Einleitung

Obwohl Norwegen dünn besiedelt ist haben Lawinen aufgrund der topographischen Gegebenheiten einen beträchtlichen Anteil an den Opfern und Schäden durch Naturgefahren. In den letzten 40 Jahren gab es rund 220 Todesopfer, davon waren etwa 20 in Gebäuden. Das entspricht einer Sterbehäufigkeit von $\approx 1,1 \cdot 10^{-6}$ pro Jahr allgemein bzw. von $\approx 9,6 \cdot 10^{-8}$ pro Jahr in Gebäuden für gesamt Norwegen. In Österreich liegt die Sterbehäufigkeit durch Lawinen bei $\approx 3,4 \cdot 10^{-6}$ pro Jahr (bezogen auf die Periode 1950 bis 2004). Die Sterbehäufigkeit im Straßenverkehr beläuft sich auf $\approx 4,2 \cdot 10^{-5}$ pro Jahr in Norwegen und auf $\approx 7,9 \cdot 10^{-5}$ pro Jahr in Österreich (jeweils bezogen auf die Periode 2001 bis 2015). Abbildung 1 zeigt eine Übersicht über die Anzahl von Aufzeich-

nungen über Gebäudeschäden und Lawinentoten in den letzten vierhundert Jahren in Norwegen. Demnach gibt es circa 900 Aufzeichnung, wobei die Anzahl der betroffenen Gebäude deutlich höher ist da einzelne Aufzeichnung auch mehrere Gebäude umfassen. Auch ist von einer hohen Dunkelziffer in den vorhergehenden Jahrhunderten auszugehen. Die genaue Zahl der Lawinentoten in dem Zeitraum ist ebenfalls unsicher. Die Größenordnung dürfte aber bei 2500 bzw. 5 bis 10 pro Jahr liegen. Ein Winter der sich besonders hervorhebt ist der Winter 1867/1868 am Ende der "kleinen Eiszeit" mit über 50 Aufzeichnungen und rund 160 Lawinentoten. Die Wiederkehrperiode bedeutender Ereigniszyklen (d.h. mehr als 5 Schadensaufzeichnungen pro Jahr) ist circa 10 Jahre und der langjährige Durchschnitt beträgt rund zwei Ereignisse pro Jahr.

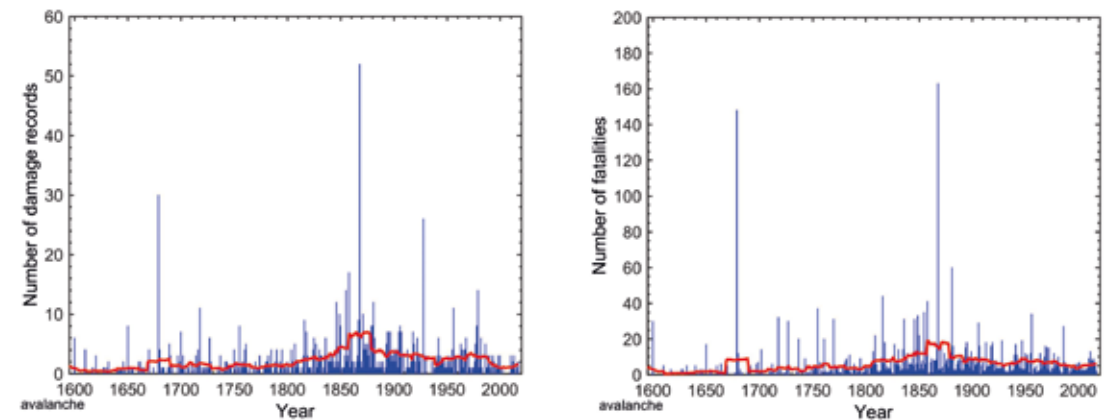


Abb. 1: Anzahl der Aufzeichnungen über Gebäudeschäden (links) und Lawinentote (rechts) in Norwegen für den Zeitraum zwischen 1600 und 2017. Die roten Linien zeigen den gleitenden Mittelwert (Daten basieren auf NVE's Web-site <http://www.skrednett.no/>; ohne Sulzströme)

Fig. 1: Records of building damages (left) and avalanche fatalities (right) in Norway during the period from 1600 to 2017. The red lines show a running mean. (Data based on NVE's net-site <http://www.skrednett.no/>; disregarding slushflows)

Nach einer Reihe folgenschwerer Ereignisse in den 1960er und Anfang der 1970er Jahre ernannte das Norwegische Parlament das Norwegische Geotechnische Institute (NGI) zum Kompetenzzentrum für Lawinen mit der Vorgabe, eine Versuchsstation aufzubauen (Stortingsmelding Nr. 9 1972-73 Innst. S. nr. 68, 1973), was mit der Versuchsstation Fonnbu/Ryggfonn umgesetzt wurde. Im Jahr 2009 bekam das Norwegische Wasser- und Energiedirektorat (NVE) als eine staatliche Institution das Mandat für den verwaltungstechnischen Umgang mit Lawinen in der Raumplanung.

Regelungen bezüglich der Lawinengefahr in der Raumplanung in Norwegen

Grundlage für die Behandlung der Lawinengefahr in der Raumplanung in Norwegen bilden die "Byggtknisk forskrift" TEK10 (bautechnische Vorschrift). Erste Regelungen bezüglich Lawinen-

gefahren wurden 1924 in die Bauvorschriften aufgenommen. Seit 1966 sind diese im ganzen Land in Kraft gesetzt. Zuständig für die Einhaltung der Plan- und Bauvorschriften sind die Gemeinden.

Im Wesentlichen werden drei Sicherheitsklassen bezüglich Lawinen unterschieden, die sich durch die Eintrittswahrscheinlichkeiten unterscheiden. Im Gegensatz zu den meisten Alpenländern existieren keine spezifischen Druckkriterien für die einzelnen Gefahrenzonen, vielmehr umschreiben die Regeln der Bauvorschriften, daß Schäden mit hohen Konsequenzen nicht vorkommen dürfen. Nur für Ausnahmenregelungen werden zusätzlich Druckkriterien vorgeben die nicht überschritten werden dürfen. Weiterhin wird geregelt, daß Objekte oder Gebäude mit sehr hohen gesellschaftlichen Konsequenzen, generell nicht in gefährdeten Gebieten gebaut werden dürfen. Norwegen, wie auch die meisten alpinen Länder, nimmt in der Raumplanung damit

Sicherheitsklasse für Lawinen	Konsequenzklasse	Maximale nominelle* jährliche Wahrscheinlichkeit	Gebäude- oder Objekttypen
S1	gering	$< 10^{-2}$ ($< 1/100$)	Garage, Bootshaus, Lager mit geringen Personenaufenthalt
S2	mittel	$< 10^{-3}$ ($< 1/1000$)	Wohnhäuser, Reihenhäuser bis 10 Wohneinheiten, landwirtschaftliche Betriebsgebäude
S3	hoch	$< 2 \cdot 10^{-4}$ ($< 1/5000$)	Reihenhäuser mit mehr als 10 Wohneinheiten, Kindergärten, Schulen, lokale Bereitschaftsinstitutionen
	sehr hoch	nicht akzeptabel	Krankenhäuser, nationale Bereitschaftsinstitutionen, Raffinerien

* Hier wird das Wort "nominell" gebraucht um diese Wahrscheinlichkeiten von reellen zu unterscheiden. Es ist zugegebener Maße schwierig oder gar unmöglich genaue Lawinenwahrscheinlichkeiten zu berechnen und eine wissenschaftliche Expertenbeurteilung mag zusätzlich notwendig sein.

Tab. 1: Gefahrenzonen für Lawinen und Rutschungen in Norwegen. Nominelle Wahrscheinlichkeit laut Norwegischen Bau- und Planungsgesetz (<https://dibk.no/byggeregler/tek/>; Stand 01.01.2016).

Tab. 1: Hazard zones for snow avalanches and landslides in Norway. Nominal probability according to the Norwegian Building and Planning Act (<https://dibk.no/byggeregler/tek/>; as of 01.01.2016).

in erster Linie die Gefährdung als Basis. Anders z. B. Island, das explizit drei Risikozonen unterscheidet in denen abhängig von der individuellen Sterbewahrscheinlichkeit Nutzungs- oder Baubeschränkungen gelten.

Gefahr, Gefährdung und Risiko

Um die Unterschiede in den Ansätzen zu verstehen muss man zuerst die Begriffe Gefahr, Gefährdung und Risiko unterscheiden. Die folgenden Definitionen entsprechen denen der International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE, 2004):

Gefahr (danger/threat): Ein natürliches Phänomen, das zu Schäden führen kann. Es wird beschrieben durch Geometrie, mechanische und andere Eigenschaften. Die Gefahr kann eine bestehende (wie ein kriechender Hang) oder eine potentielle (wie eine Lawine) sein. Die Charakterisierung einer Gefahr oder Bedrohung beinhaltet dabei keine Eintrittsvorhersage (-wahrscheinlichkeit).

Gefährdung (hazard): Die Wahrscheinlichkeit, daß eine bestimmte Gefahr (Bedrohung) innerhalb eines bestimmten Zeitraums eintritt.

Risiko (risk): Maß für die Wahrscheinlichkeit und Schwere einer nachteiligen Wirkung auf Leben, Gesundheit, Eigentum oder die Umwelt.

Quantitativ: **Risiko = Gefährdung × potentieller Verlustwert.**

Dies kann auch ausgedrückt werden als "Die Wahrscheinlichkeit eines unerwünschten Ereignisses mal die Konsequenzen, falls das Ereignis eintritt"

Es gibt noch weitere Risikodefinitionen. Für die Betrachtung des Lawinenrisikos eignet sich besonders der Ansatz wonach das Risiko eine Funktion

der Gefährdung, der Exposition und der Vulnerabilität ist:

$$\text{Risiko} = f(\text{Gefährdung, Exposition, Vulnerabilität}) \quad \text{Gl. (1)}$$

Um Aussagen über das Risiko aufgrund von Lawinen zu treffen ist es notwendig die Größenordnung der einzelnen Faktoren abzuschätzen. In einigen Fällen ist das für die Exposition noch einfach möglich. So ist die Exposition eines Hauses in einer Sturzbahn von der Größenordnung 1. Für die Gefährdung und Vulnerabilität ergeben sich aber oftmals bedingte Wahrscheinlichkeiten deren Abschätzung selten analytisch beschrieben werden können.

Lawinengefährdung

Die Lawinengefährdung zum Beispiel ergibt sich aus einer Kombination verschiedener Einflussparameter, wie z. B.:

- Gelände (Hangneigung, Exposition, ...)
- Vegetation (Bodenbewuchs, Bestandesdichte, ...)
- Niederschlag (Häufigkeit, Menge, Schnee oder Regen, ...)
- Windeinfluß
- Schneedeckeneigenschaft (maritim, kontinental, ...)
- Lawinenausläufänge

Man erkennt schon aus der Auflistung, daß sich auch hier eine Reihe bedingter Wahrscheinlichkeiten erwarten lassen. Eine gebräuchliche Vereinfachung zur Quantifizierung der Lawinengefährdung H eines spezifischen Ortes ist der Ansatz

$$H = P_L * P_A \quad \text{Gl. (2)}$$

wobei P_L die Lawinenwahrscheinlichkeit bezeichnet und P_A die Wahrscheinlichkeit, daß die Lawine den bestimmten Punkt auch erreicht. Dabei wer-

den die Wahrscheinlichkeiten im Allgemeinen als unabhängig betrachtet (Schläppy et al., 2014). Die Lawinenwahrscheinlichkeit wird dabei gerne mit der Dreitagesneehöhe in Verbindung gebracht (siehe McClung und Schaerer, 2006). Der Dreitagesneezuwachs wird außerdem in Verbindung mit der Anbruchmächtigkeit gebracht, ein wichtiger Parameter für moderne Lawinenmodelle zu Berechnung der Auslauflänge und Lawinenintensität (Salm et al. 1990). Daraus ergibt sich, dass der Ansatz in Gl. (2) mit der Annahme unabhängiger Wahrscheinlichkeiten eine sehr starke Vereinfachung ist. Auch dürfte die alleinige Kopplung der Anbruchmächtigkeit mit der maximalen Dreitagesneehöhe in vielen Fällen mit einer Unterschätzung des Lawinenvolumens behaftet sein.

Betrachtet man die Auslösewahrscheinlichkeit für sich, so mag ein einfaches probabilistisches Modell mit einer Grenzzustandsfunktion/Performancefunktion G der Form

$$G = R - L < 0 \quad \Rightarrow \text{Lawinenauslösung} \quad \text{Gl. (3)}$$

wobei R der Widerstand und L die Beanspruchung

ist, für die Abschätzung der Auslösewahrscheinlichkeit und der gleichzeitig zu erwartenden Anbruchmächtigkeit besser geeignet zu sein (siehe z. B. Gaume et al., 2013). Die Zufallsparameter R und L (und deren Verteilungen) ergeben sich aus einem mehr oder weniger komplizierten Schneedeckenmodell. Abbildung 2 zeigt eine Anwendung eines einfachen probabilistischen Modells basierend auf einem Mohr-Coulomb-Bruchkriterium, das die Gesamtsneehöhe der Altschneedecke und den 3-Tages Neuschneesumme berücksichtigt. Das Beispiel zeigt die bedingte Wahrscheinlichkeit $P(A|HNW_{3d})$ für den Lawinenpfad des norwegischen Versuchsgeländes Ryggfonn. Die bedingte Wahrscheinlichkeit $P(A|HNW_{3d})$ beschreibt die Wahrscheinlichkeit einer Lawine unter der Voraussetzung, von HNW_{3d} Neuschnee in den vorhergehenden drei Tagen. Das eingebettete Diagramm zeigt die entsprechende Wahrscheinlichkeitsverteilung der Anbruchmächtigkeit D_{rel} . Mit Verbesserungen dieses Ansatzes lässt sich eine objektivere Abschätzung der Wiederkehrdauer und entsprechender Anbruchmächtigkeit erreichen.

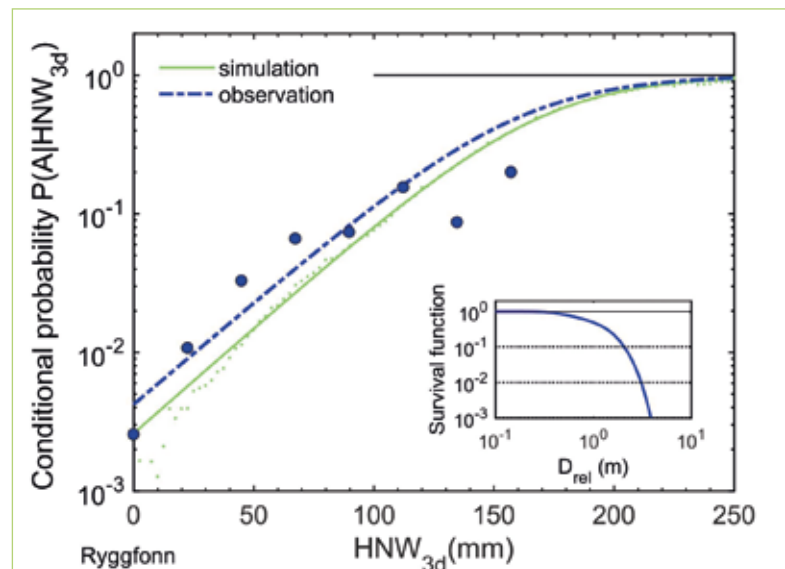


Abb. 2: Vergleich zwischen beobachteter und simulierter Wahrscheinlichkeit $P(A|HNW_{3d})$ für Ryggfonn. Die Linien zeigen die entsprechenden Kurvenanpassungen. Das Diagramm rechts unten zeigt die Wahrscheinlichkeitsverteilung der erwarteten Anbruchmächtigkeit D_{rel} .

Fig. 2: Comparison between observed and simulated $P(A|HNW_{3d})$ for the Ryggfonn path. Lines show the corresponding fits. The inset shows the probability distribution of the expected fracture depth D_{rel} .

Wirkung des Waldes in Anbruchgebieten

Es ist allgemein anerkannt, daß ein dichter Wald eine schützende Wirkung gegen Lawinenauslösung hat (Olschewski und andere, 2012, Bebi und andere, 2001). Die schützende Wirkung beruht einerseits auf einer Änderung der Schneedeckeneigenschaften, z.B. durch die geringere Ausbildung von kontinuierlichen Schwachschichten, die einem Lawinenabgang beitragen (Gubler und Rychetnik, 1991; Teich und andere, 2016). Zum anderen wird die Schneedecke durch die Baumstämme direkt abgestützt. Weniger gut etabliert sind allerdings die spezifischen Kriterien, die eine ausreichende Sicherheit gewährleisten. Vergleicht man angegebene Kriterien für die Bestandesstruktur (Meyer-Grass und Schneebeli, 1992, Viglietti et al. 2010, Ishikawa, 1969) mit typischen norwegischen Verhältnissen (Waldbeständen) so scheinen diese Kriterien eher konservativ zu sein.

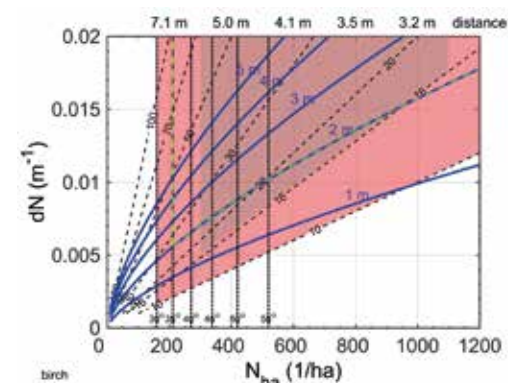


Abb. 3: Links: Vorgeschlagene Kriterien für dN versus N_{ha} abhängig von der Schneehöhe HS und für Hangneigungen zwischen 30° und 55° , um nach Gl (5) eine Stabilisierung der Schneedecke eines Birkenbestandes zu erreichen. Der rot schattierte Bereich zeigt den Bereich, in dem der Wald einen erheblichen Beitrag zur Schneedeckenstabilisierung leistet. Die blauen Linien zeigen HS und punktierte Linien die Hangneigung und die schwarz gestrichelten Linien kennzeichnen die BHD-Werte in cm. Die grauschattierte Fläche zeigt den Bereich, der nach Meyer-Grass und Schneebeli (1992) für $BHD > 16$ cm als ausreichend angesehen werden kann. Die grün gestrichelte Linie zeigt ein Beispiel für $HS = 2$ m und einer Hangneigung von 35° . Die rechte Abbildung zeigt ein Beispiel für den Parameter dN abgeleitet aus SAT-Skogs-Daten in Norwegen.

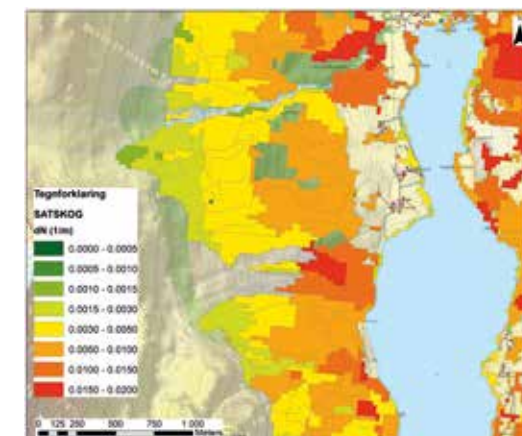
Fig. 3: Proposed criteria for dN versus N_{ha} depending on HS and for slope angles between 30° and 55° to obtain a forest contribution to the stabilization of the snowpack according to condition Gl (5) for a birch stand (left panel). The red shaded area shows the whole range in which forest provides considerable contributes to the snowpack stabilization. The blue lines show HS , dotted lines the slope angles and black dashed lines mark BHD -values in cm. According to Meyer-Grass and Schneebeli (1992), the underlying grey-shaded area depicts the range that could be regarded sufficient for $BHD > 16$ cm. The green dashed line shows an example for $HS = 2$ m and a slope angle of 35° . The right panel shows an example of the derived parameter from SAT-Skogs data in Norway.

Anderenfalls erfüllen viele norwegische Waldbestände keine ausreichende Schutzfunktion.

Im Rahmen eines Projektes zur Verbesserung der Gefahrenhinweiskarte in Norwegen wird daher versucht die existierenden Kriterien zu präzisieren (Gauer, 2016). Als Ausgangspunkt wird hierfür zuerst nur die erforderliche Stützwirkung eines Bestandes in Bezug auf eine bestimmte maximale Auslösewahrscheinlichkeit betrachtet. Dabei ergibt sich ein Zusammenhang zwischen Bestandesdichte und Brusthöhdurchmesser. Auch hierbei eignet sich ein einfaches probabilistisches Modell mit einer Grenzzustandsfunktion G der Form

$$G = -1 + R_S / L + R_{FS} / L < 0 \quad \text{Gl. (4)}$$

um den Effekt eines Waldbestandes abzuschätzen. R_S beschreibt die Schneedeckenstabilität und R_{FS} die zusätzliche Stützwirkung des Bestandes. R_S ,



R_{FS} und L werden als Zufallsvariable mit bestimmter Wahrscheinlichkeitsverteilung angesehen. Letzten Endes ergeben sich die Bestandskriterien aus der angestrebten maximalen Wahrscheinlichkeit. Für eine jährliche Lawinenwahrscheinlichkeit von weniger als 10^{-3} folgt aus Gl. (4) der Zusammenhang:

$$p_{ff} = P \{G(1, R_S / L, R_{FS} / L < 0\} = 10^{-3} \quad \text{Gl. (5)}$$

Als ein entscheidender Faktor ergibt sich dabei das Produkt $d \cdot N$ mit N als Anzahl der Stämme pro m^2 und d dem Brusthöhendiameter (BHD) in m . Das Produkt ist abhängig von der zu erwartenden Schneehöhe HS und der Hanghangneigung sowie von der Baumart. Im gezeigten Beispiel in Abbildung 3 wären die Kombinationen (N_{ha} , dN) für einen Birkenbestand ausreichend die rechts und oberhalb der grün-gestrichelten Linie liegen, wobei N_{ha} die Stammzahl pro Hektar ist.

Das Produkt dN hat auch eine entscheidende Bedeutung für Beurteilung der Bremswirkung eines Waldbestandes auf Lawinen. Es geht gemäß Newton's drittem Gesetzes "actio est reactio" als Faktor direkt in die Bremskraft ein.

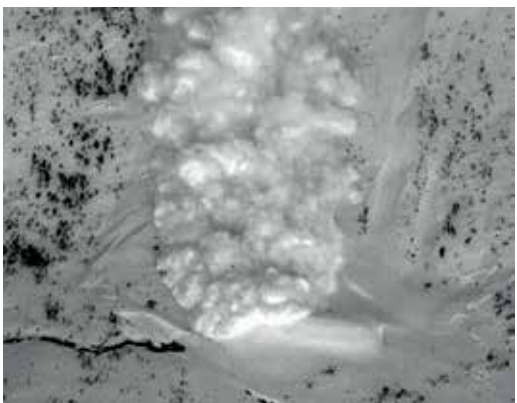


Abb. 4: Trockenschneelawine 2000-02-17 (links) überfährt den Lawinendamm im Auslaufbereich des Testgeländes Ryggfönn und Naßschneelawine 2005-04-16 (rechts), die als Trockenschneelawine startete, aber im feuchten Schnee im Talboden vor dem Damm auslief. Beide Lawinen sind zum Zeitpunkt des Fotos noch in Bewegung. (Fotos K. Kristensen und A. Moe, NGI)

Fig. 4: Dry-mixed avalanche 2000-02-17 (left) surpassing the catching dam in the "runout area" of the Ryggfönn test site and avalanche 2005-04-16 (right), which started as dry snow avalanche but run into damp snow in the valley bottom and stopped at the dam. Both avalanches are still in motion at the time of the photograph. (photos K. Kristensen and A. Moe, NGI)

Lawinenintensität

Für die Beurteilung des Lawinenrisikos ist ebenfalls die Kenntnis über Intensität und der damit verbundenen Vulnerabilität eines betrachteten Objekts notwendig. In erster Linie ist dafür die Druckwirkung der Lawinen am Ort entscheidend, die sich als eine Funktion der Lawinengeschwindigkeit und der Fließdichte ergibt. Die gebräuchlichen Lawinenmodelle berechnen zwar die Lawinengeschwindigkeiten, gehen dabei aber in erster Linie von einer konstanten Fließdichte aus (Christen et al. 2010; Sampl und Granig, 2009). Dagegen zeigen Lawinenversuche, daß das Fließregime und die damit verbundene Dichteänderung entscheidenden Einfluß auf die Druckwirkung hat. Abbildung 4 zeigt Beispiele für eine Trockenschneelawine und eine Lawine nach Übergang



zur Naßschneelawine. Ihre Druckwirkungen unterscheiden sich deutlich. Auch kann die Wirksamkeit von Schutzmaßnahmen, wie Fang- oder Leitdämmen, vom Fließregime abhängen.

Dennoch ist die Lawinengeschwindigkeit für den Praktiker ein wichtiger Parameter zur Beurteilung der Lawinenintensität und dessen Abschätzung ein wichtiger Schritt bei der Risikobeurteilung. Obwohl Lawinenmodelle die Geschwindigkeiten berechnen ist es wichtig für den Praktiker eine Vorstellung der zu erwartenden Geschwindigkeiten bei Bemessungsereignissen zu haben, um die Zuverlässigkeit der Berechnungen

zu kontrollieren. Daher sollte unbedingt hinterfragt werden, wenn Lawinenmodelle für Bemessungsereignisse deutlich niedrigere oder höhere Maximalgeschwindigkeiten liefern als Beobachtung indizieren. Abbildung 5 zeigt Mittlere-, den Bereich $\pm \sigma$, sowie die Maximalgeschwindigkeit einer Reihe von Messungen an außergewöhnlichen Lawinen, d. h. relative große Lawinen bezogen auf die jeweilige Sturzbahn (Gauer, 2013; 2014). Für diesen Vergleich wurden alle Sturzbahnen mit der maximalen Fallhöhe H_{SC} skaliert und die Geschwindigkeit als dimensionslose Zahl $U / \sqrt{gH_{SC}}$ dargestellt.

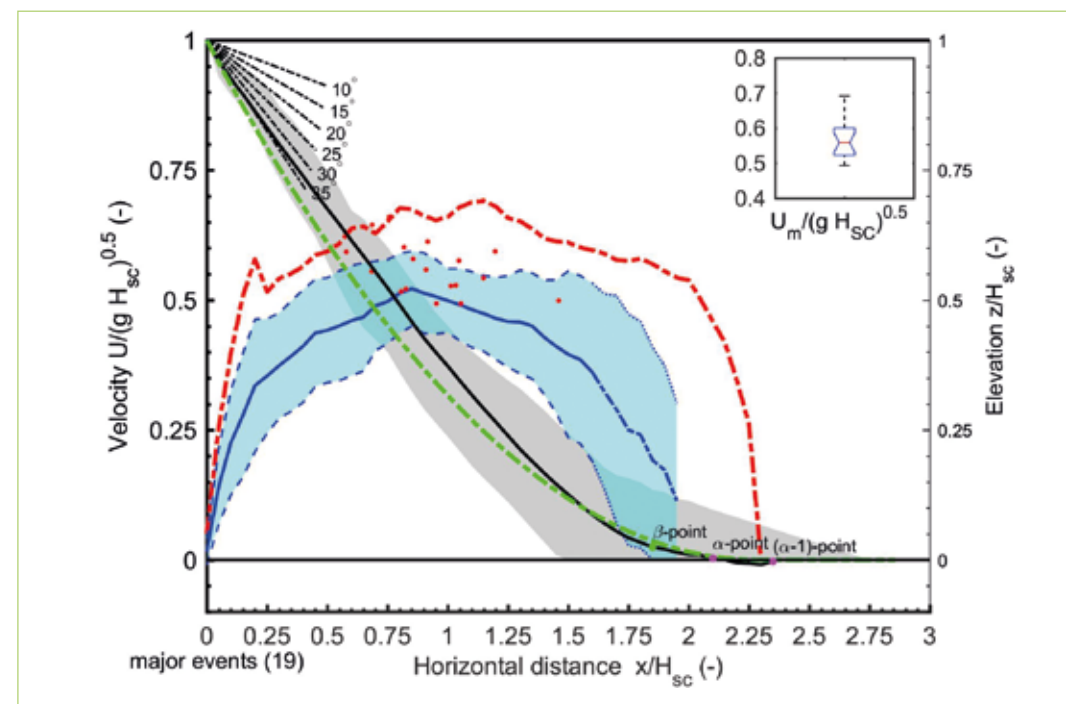


Abb. 5: Bereich der Frontgeschwindigkeiten entlang der Sturzbahn für eine Reihe von Messungen an verschiedenen außergewöhnlichen Lawinen. Die blaue Linie zeigt den Mittelwert, die blau-gestrichelten Linien den Bereich $\pm \sigma$ und die rote gestrichelte Linie die maximale beobachtete Geschwindigkeit. Die roten Punkte markieren das jeweilige Maximum der verschiedenen Messungen. Die schwarze Linie repräsentiert die Geometrie einer "mittleren Sturzbahn" und die grauschattierte Fläche die Umhüllende aller Sturzbahngeometrien. Als Referenz werden die β -Punkte sowie der α und $\alpha-1$ Punkt gezeigt (zur Erläuterung siehe Lied und Bakkehoi, 1980). Die grüne gestrichelte Linie zeigt die sogenannten isländischen Standardsturzbahn (Jónasson et al., 1999) zum Vergleich.

Fig. 5: Range of front velocities along the track for a compilation of measurements from various (major) avalanches. Blue line shows the mean, the blue dash lines the $\pm \sigma$ range and the red dashed line the maximum observed velocity. The red dots mark the maximum of the different measurements. The black line represents a "mean path" geometry and the gray shaded area the envelope of all geometries. As a reference, the β -point, α and $\alpha-1$ are shown (for explanation see Lied and Bakkehoi, 1980). For comparison, the green dashed line shows the so-called Icelandic standard path (Jónasson et al., 1999).

Für die Lawinenintensität ist der Aufpralldruck maßgeblich. Die Kenntnisse über (Aufprall-) Kräfte von Lawinen auf schmale Objekte, wie Masten von Stromleitungen, Skilifte und Seilbahnen, sind für deren Gestaltung und der damit versuchten Risikominimierung wichtig. Sie sind auch eine Voraussetzung für die Untersuchung und Rückrechnung von z. B. Waldschäden. Beobachtungen zeigen, daß auch sich langsam bewegende Lawinen enorme Kräfte auf Hindernisse verursachen können. Wie bereits oben angedeutet ist der Lawinenaufpralldruck, zumindest für schmale Objekte, stark abhängig vom Fließregime. Lawinenversuche zeigen, daß der Ansatz mit einer quadratischen Abhängigkeit von der Geschwindigkeit zu simple ist (Gauer et al. 2008, Sovilla et al. 2008). Im Allgemeinen läßt sich der Aufpralldruck P_i als eine Funktion von Geschwindigkeit,

Fließdichte und Parametern, die die Geometrie beschreiben, angeben:

$$P_i = f(U, \rho_l, \dots) \approx C_D \frac{\rho_l U^2}{2}. \quad \text{Gl. (6)}$$

Hierbei beschreibt der Dragfaktor/Widerstandsbeiwert C_D^* unter anderem die Geometrieabhängigkeit und ist seinerseits eine Funktion der Geschwindigkeit. Abbildung 6 zeigt das Produkt von Fließdichte und Dragfaktor in Abhängigkeit von der Froude-Zahl $F_r = U/\sqrt{gh_1}$, wobei h_1 die Fließhöhe ist, für eine Reihe verschiedener Druckmessungen in verschiedenen Lawinenversuchsanlagen. Ohne separate Dichtemessung läßt sich dieses Produkt eigentlich nicht getrennt betrachten. Die Abbildung zeigt eine starke Zunahme des Produktes für kleine Froude-Zahlen.

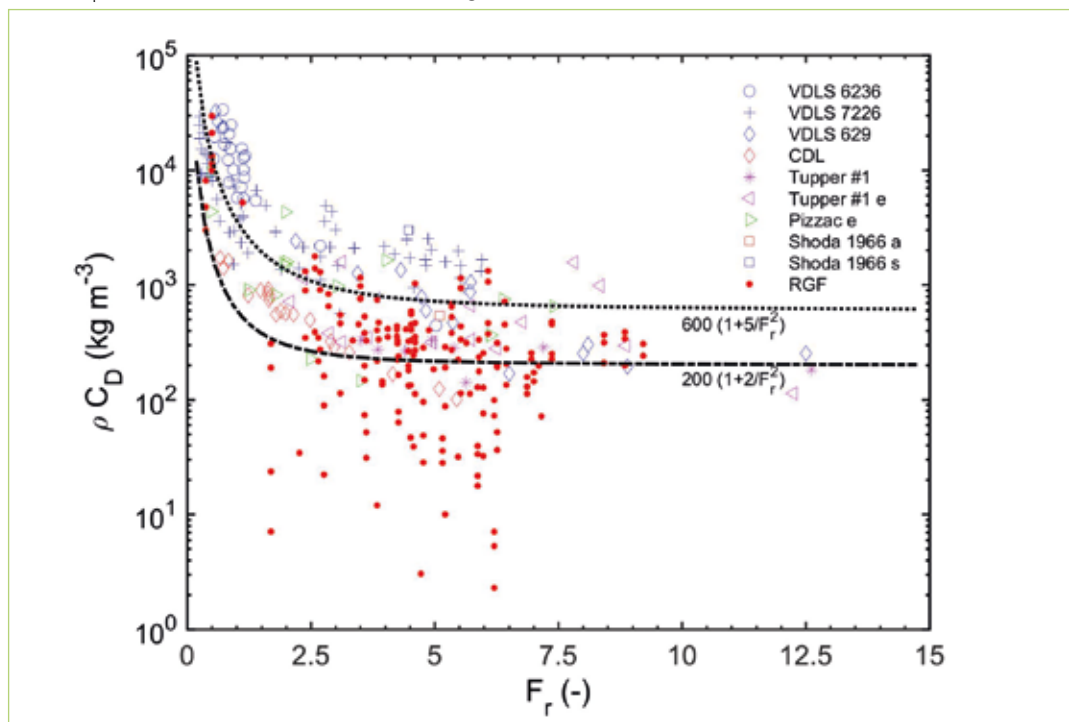


Abb. 6: Abschätzungen von $\rho_l C_D$ vs. $F_r (= U/\sqrt{gh_1})$ basiert auf Messungen in verschiedenen Lawinenversuchsanlagen.

Fig. 6: Estimates on $\rho_l C_D$ vs. $F_r (= U/\sqrt{gh_1})$ based on measurement in various avalanche test-sites.

Vulnerabilität

Neben der tatsächlichen Gefährdung trägt die Vulnerabilität eines gefährdeten Objekts wesentlich zum Lawinenrisiko bei. Die Quantifizierung der Vulnerabilität fehlt allerdings häufig aufgrund fehlender Daten. Dabei spielen unter anderen die geringeren Kenntnisse über die Wechselwirkungen zwischen Lawine und Objekt eine große Rolle. Abbildung 7 zeigt zwei Beispiele von Lawinenschäden an Gebäuden verursacht durch unterschiedliche Wechselwirkungen. Um die Vulnerabilität eines Objekts zu definieren, ist es notwendig, die Vulnerabilität mit einem Intensitätsmaß zu verknüpfen. Im Falle von Lawinen, ist der Aufpralldruck ein sich anbietendes Intensitätsmaß, obwohl dieser nicht immer leicht zu bestimmen ist, da z.B. die Lawinengeschwindigkeit und die Fließdichte nicht immer sicher bekannt sind. In den letzten Jahren wurde in mehreren Studien die Vulnerabilität von Gebäuden betrachtet und versucht durch Rückrechnungen zu quantitativen Aussagen zukommen (Schroll, 2015; Keylock und Barbolini, 2001; De Biagi, et



Abb. 7: Beispiele für Lawinenschäden an Gebäuden.

Fig. 7: Examples of avalanche damage to buildings.

al., 2015). Es gibt jedoch eine beträchtliche Streuung in den vorgeschlagenen Werten, auch aufgrund der zugrunde gelegten Lawinenparameter. Hier besteht mit Hinsicht auf das Lawinenrisiko noch Forschungsbedarf.

Um bessere Daten über die Vulnerabilität von Gebäuden zu erhalten, könnte auch der Vergleich mit den Atomversuchen Ende der 1940er und Anfang der 1950er Jahre beitragen (Valentine, 1998).



Restrisiko

Schlußendlich ist es notwendig auch ein Restrisiko zu quantifizieren, da keine Schutzmaßnahme, weder technische noch planerische, 100 % Sicherheit garantiert. Die Quantifizierung des Restrisikos erweist sich dabei oftmals als eine Herausforderung. Betrachtet man nur die Gefährdung und als planerische Schutzmaßnahme die Ausweisung von Gefahrenzonen, z.B. entsprechend der Sicherheitsklasse S2 in Norwegen, so ist die Restgefährdung einfach zu bestimmen, in diesem Fall sollte sie außerhalb der Zone $\leq 1/1000$ pro Jahr sein. Das sagt allerdings wenig über das Restrisiko aus; dazu fehlen die Angaben über die gefährdeten Objekte. Es ist sicherlich verständlich, wenn nach Umsetzung von technischen Schutzmaßnahmen die Frage nach einer Rücknahme der Gefahrenzonen aufkommt. Dabei ist allerdings zum einen zu bedenken, daß Schutzmaßnahmen

nur bezüglich ihres Bemessungsereignis ausreichenden Schutz bieten. Zum anderen kann eine Erhöhung der Anzahl exponierter Objekte – mehr Häuser am Rand der neuen Gefahrenzone – sogar zu einer Erhöhung des Gesamtrisikos führen. Angenommen eine Schutzmaßnahme für ein lawinengefährdetes Haus halbiert die Lawinengefährdung in einem größeren Bereich in dem nun drei weitere Häuser gebaut werden, so verdoppelt sich schlußendlich das Kollektiv-Risiko. Dies wirft Fragen in Bezug einer Risikobewertung von Umzonierungen auf.

Zusammenfassung

Ein quantifiziertes Lawinenrisikomanagement setzt umfangreiche Kenntnisse über alle beteiligten Einzelprozesse sowie ihrer Wechselwirkungen voraus. Speziell bezüglich der Quantifizierung der Wechselwirkungen einzelner Prozesse, wie zum Beispiel Wiederkehrdauern oder die Vulnerabilität von Objekten, besteht weiterhin Forschungsbedarf.



Abb. 8: Restrisiko; keine Schutzmaßnahme garantiert 100 % Sicherheit; Schutzmaßnahmen bieten nur bezüglich ihres Bemessungsereignisses ausreichenden Schutz.

Fig. 8: Rest risk; no defense measure will guarantee a 100 % safety; mitigation measures provide adequate protection only with regard to their design events.

Anschrift des Verfassers / Author's address:

Dr. Peter Gauer
Norwegisch Geotechnisches Institut
PB 3930 Ullevål Stadion
NO-0806 Oslo
peter.gauer@ngi.no

Literatur / References:

- BEBI P., KIENAST F., SCHÖNENBERGER W. (2001) Assessing structures in mountain forests as a basis for investigating the forests dynamics and protective function Forest Ecology and Management, 145, 3-14
- CHRISTEN M., KOWALSKI, J., BARTELT P. (2010) RAMMS: Numerical simulation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain Cold Regions Science and Technology, 63, 1-14
- DE BIAGI V., CHIAIA B. M., FRIGO B. (2015) Impact of snow avalanche on buildings: Forces estimation from structural back-analyses Engineering Structures, 2015, 92, 15-28
- GAUER P. (2013) Comparison of avalanche front velocity measurements: supplementary energy considerations Cold Regions Science and Technology, 96, 17-22
- GAUER P. (2014) Comparison of avalanche front velocity measurements and implications for avalanche models Cold Regions Science and Technology, 97, 132-150
- GAUER P. (2016) Forest cover within Nye aktsomhetskart snøskred i Norge (NAKSIN) Norwegian Geotechnical Institute, Norwegian Geotechnical Institute
- GAUER P., LIED, K., KRISTENSEN, K. (2008) On avalanche measurements at the Norwegian full-scale test-site Ryggfjonn Cold Regions Science and Technology, 51, 138-155
- GAUME J., CHAMBON G., ECKERT N., NAAIM M. (2013) Influence of weak-layer heterogeneity on snow slab avalanche release: application to the evaluation of avalanche release depths Journal of Glaciology, 59, 423-437
- GUBLER H., RYCHETNIK, J. (1991) Effects of forests near the timberline on avalanche formation Snow, Hydrology and Forests in High Alpine Areas Proceedings of the Vienna Symposium, August 1991., IAHS, 205, 19-38
- ISHIKAWA, M., SATO, S., KAWAGUCHI T. (1969) Stand Density of Avalanche Prevention Forest, Journal of the Japanese Society of Snow and Ice, 31, 14-18
- ISSMGE (2004) Glossary of Risk Assessment Terms –TC32 of International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE) Version 1.
- JÓNASSON, K.; SIGURDSSON, S. D. & ARNALDS, P.. (1999) Estimation of avalanche risk Icelandic, Meteorological Office, Icelandic Meteorological Office
- KEYLOCK C. J., BARBOLINI, M. (2001) Snow avalanche impact pressure – vulnerability relations for use in risk assessment Canadian Geotechnical Journal, 38, 227-238
- LIED K., BAKKEHØI S. Empirical calculations of snow-avalanche run-out distance based on topographic parameters Journal of Glaciology, 1980, 26, 165-177
- MCCLUNG D., SCHAERER P. (2006) The Avalanche Handbook The Mountaineers Books
- MEYER-GRASS M., SCHNEEBELI, M. (1992) Die Abhängigkeit der Waldlawinen von Standorts-, Bestandes- und Schneeverhältnissen, Internationales Symposium Interpraevent 1992-Bern
- OLSCHIEWSKI R., BEBI P., TEICH M., WISSEN HAYEK U., GRÉT-REGAMEY A. (2012) Avalanche protection by forests — A choice experiment in the Swiss Alps Forest Policy and Economics, 2012, 17, 19-24
- SALM B., BURKARD A., GUBLER H. U. (1990) Berechnung von Fliesslawinen. Eine Anleitung für Praktiker mit Beispielen. Mitt. Eidgenöss. Inst. Schnee- Lawinenforsch. Nr 47, 37 Seiten
- SAMPL P., GRANIG M. (2009) Avalanche Simulation with SAMOS-AT Proceedings of the International Snow Science Workshop, Davos, 519-523
- SCHLÄPPY R., ECKERT N., JOMELLI V., STOFFEL M., GRANCHER D., BRUNSTEIN D., NAAIM M., DESCHATRES M., (2014) Validation of extreme snow avalanches and related return periods derived from a statistical dynamical model using tree-ring techniques Cold Regions Science and Technology 99, 12-26
- SCHROLL, L. (2015) Schadwirkung von Lawinen Leopold-Franzens-Universität Innsbruck Fakultät für Technische Wissenschaften, Diplomarbeit
- SOVILLA B., SCHAER M., KERN M., BARTELT P. (2008) Impact pressures and flow regimes in dense snow avalanches observed at the Vallée de la Sionne test site Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 113, F01010(1-14)
- TEICH M., SCHNEEBELI M., BEBI P., GIUNTA A. D., GRAY C. G., JENKINS, M. J. (2016) Effects of Bark Beetle Attacks on Snowpack and Snow Avalanche Hazard Proceedings, International Snow Science Workshop, Breckenridge, Colorado
- VALENTINE G. A. (1998) Damage to structures by pyroclastic flows and surges, inferred from nuclear weapons effects Journal of Volcanology and Geothermal Research, 87, 117-140
- VIGLIETTI D., LETEY S., MOTTA R., MAGGIONI M., FREPPAZ M. (2010) Snow avalanche release in forest ecosystems: A case study in the Aosta Valley Region (NW-Italy), Cold Regions Science and Technology, 64, 167-173