

Dr. Raymund M. Spang

Geologisch-Geotechnische Grundlagen des Steinschlagschutzes

Einleitung

Steinschlagschutz wird mindestens seit Beginn des Eisenbahnbaus in der Mitte des 19. Jahrhunderts betrieben. Bis in die 70er Jahre unseres Jahrhunderts blieb jedoch das Inventar an Schutzmaßnahmen einfach, die Bemessung auf Erfahrung beschränkt. Aus dem Lawinenschutz heraus wurden gerade in der Schweiz in den letzten 20 Jahren sowohl beim aktiven Schutz mittels flächenhafter Bodenabdeckungen, als auch beim passiven Schutz durch schwere Fangzäune mittels Drahtseilnetzen qualitative Entwicklungssprünge erzielt. Konnten noch vor 5 Jahren die schwersten Zäune immerhin 700 kJ aufnehmen (was der Energie eines frei fallenden Felsblocks von 1 m³ aus 28 m Höhe entspricht), so sind heute bereits Zäune mit Energieaufnahmen von bis zu 2.000 kJ verfügbar.

Diese Entwicklung wurde möglich als man begann, die bis dahin üblichen starren Konstruktionen durch nachgiebige zu ersetzen und die Steinschlagenergien über Reibungsbremsen und Verformungselemente in Wärme und Verformungsarbeit umzuwandeln. Parallel dazu wurden leistungsfähige Untersuchungs- und Berechnungsverfahren entwickelt, die von der empirischen Entwurfsmethode zur echten Risikoevaluierung und zur ingenieurmäßigen Bemessung von Steinschlagschutzbauwerken führten. Effizienter Steinschlagschutz setzt eine Analyse in 3 Schritten voraus:

1. Kann Steinschlag entstehen?
2. Führt der Steinschlag zu einem nicht-tragbaren Risiko?
3. Wie kann das Risiko ggf. auf ein tragbares Maß reduziert oder vollständig eliminiert werden?

Definition des Steinschlags

Schon HEIM (1882) hielt nichts von Einteilungen und Namengebungen, welche sich auf die Größe der bewegten Massen beziehen. Entscheidend ist offensichtlich die Energie und nicht das Volumen. Zur Abgrenzung die heute aufnehmbaren Energien heranzuziehen, erscheint deshalb zweckmäßig.

So werden Steinschlag und Felssturz als Massenbewegungen im Fels definiert, die sich auf oder über der Hangoberfläche im freien Fall, rollend, gleitend oder in schiefen Würfeln fortbewegen. Steinschläge bestehen in der Regel aus einzelnen Steinen; sie weisen in einem interessierenden Punkt eine durch Auffangbauwerke beherrschbare Energie (derzeit bis ca. 2.000 kJ) auf. Felsstürze bestehen demgegenüber aus einzelnen oder einer größeren Anzahl von Steinen bzw. Blöcken mit höheren Energien.

Die Unterscheidung nach der Anzahl der Steine ist insofern mechanisch sinnvoll, als bei Einzelsteinen oder wenigen Steinen wegen der üblicherweise fehlenden seitlichen Führung der Bewegung die Zahl der Interaktionen und damit die Energiedissipation bzw. der Energieaustausch zwischen den einzelnen Steinen begrenzt ist. Dagegen ist eine entsprechende gegenseitige Beeinflussung bei Felsstürzen in der Regel nicht zu vernachlässigen.

Eine weitere Unterteilung der Steinschläge kann wie folgt vorgenommen werden.

- Leichter Steinschlag $E \leq 70$ kJ.
- Mittlerer Steinschlag $E \leq 700$ kJ.
- Schwerer Steinschlag $E \leq 2.000$ kJ.

Voraussetzungen der Steinschlagentstehung

Es lassen sich geometrische und mechanische Voraussetzungen unterscheiden. Zu den **geometrischen Voraussetzungen** gehören die Hangneigung, die Steinschlag- und die Oberflächengeometrie. Wie Abb. 1 zeigt kann ein absoluter Grenzwinkel, der die steinschlaggefährdete Hangneigung von der nicht gefährdeten unterscheidet, nicht existieren, wobei eine solche Unterscheidung ohnehin übersieht, daß einheitlich geneigte Hänge den Ausnahmefall gegenüber gestuften Hängen mit deutlichen Neigungsbrüchen darstellen. Ob sich Steine bei einer bestimmten Hangneigung in Bewegung setzen, hängt von deren Geometrie und zugleich auch von der Geometrie bzw. Rauigkeit der betreffenden Hangoberfläche ab. Die Steinschlaggeometrie selbst ist von wenigen Ausnahmen abgesehen das Produkt des Trennflächengefüges, das nicht nur die Form, sondern auch die Größe bestimmt.

Zu den **mechanischen Voraussetzungen** zählen das Vorliegen von labilem Material auf der Oberfläche, die Oberflächenbeschaffenheit und ein auslösender Mechanismus. Labiles Material entsteht in der Regel durch Auflockerung bzw. Festigkeitsverluste; die Oberflächenbeschaffenheit mit den wesentlichen Parametern Rollwiderstand, Rauigkeit und Dämpfung entscheidet in Verbindung mit der Neigung darüber, ob eine Folgebewegung möglich ist.

Hinter den meisten der o.g. Voraussetzungen steht die Verwitterung mit ihren vielfältigen Wirkungsweisen als physikalische Verwitterung (Frost, Temperaturgang, Kristallisationsdrücke), als chemische Verwitterung (im wesentlichen Lösung), und als biologische Verwitterung (Wurzeldruck). Daneben spielen tektonische Beanspruchung, Entspannung, Erosion, Denudation und künstliche Eingriffe, insbesondere Abtrag durch Sprengen eine Rolle. Die spezielle Bedeutung des Frostes zeigt sich z.B. in den Seitentälern der Großen Lauter bei Hayingen auf der Schwäbischen Alb, wo bei durch tiefreichenden Karst fehlendem Abfluß bedeutende Geröllhalden am Fuße relativ hoher Felswände anstehen, die durch ihre vollständige Bemoosung zeigen, daß sie nicht unter dem derzeitigen Klima, sondern unter dem wesentlich kälteren Klima des Pleistozäns entstanden sein müssen.

Zu örtlichen Auflockerungen können ferner kinematisch ungünstige Trennflächenorientierungen und -abstände, tektonisch bedingte oder durch künstliche Eingriffe hervorgerufene Gefügelockerungen, Unterschneidungen hangender Schichten durch Erosion oder Verwitterung weicher liegender Schichten, Dislozierung z.B. durch Eisdruck, Wurzeldruck, Überlastungen durch Spannungskonzentrationen, Zwängungen (insbesondere durch Temperatur), und Kriech- und Bruchvorgänge in tieferen Bereichen des Hanges führen.

Insbesondere der Abklärung, ob es sich bei Steinschlagrisiken um primäre Risiken oder um durch größere Massenbewegungen induzierte handelt, ist besondere Aufmerksamkeit zu schenken. So berichten viele Autoren, wie z.B. KENNEDY & NIERMEYER (1970) und WIECZOREK (1995) über erhebliche Steinschlagaktivitäten, die großen Massenbewegungen vorausgingen. Auch HEIM (1882) weist in seiner Schilderung großer Bergstürze auf die Pilotfunktion des Steinschlags über Großereignisse hin.

Zusätzlich spielt freilich das **Ausgangsmaterial** bzw. seine Petrographie eine entscheidende Rolle. Untersuchungen verschiedener Steigen am Nordrand der Schwäbischen Alb haben in den dort felsbildenden Weißjurakalken spezifische Ablösemechanismen in den massigen Riffkalken, dem Riffschutt und in den unterlagernden, auch zwischen den Riffen vorkommenden geschichteten Kalkstein-/Kalkmergelsteinwechsellagerungen erkennen lassen. PAULCKE

(1942) bezeichnet die Granite und Massenkalken der Alpen als am wenigsten steinschlaggefährdet. Tonsteine und Schiefertone weisen demgegenüber zwar meist eine hohe Steinschlagfrequenz, jedoch aufgrund ihrer engständigen Zerlegung nur geringe Steinschlagenergien auf. Kritisch sind häufig zu Überhängen/Unterschneidungen führende Wechsellagen unterschiedlich verwitterungsbeständiger Schichten, wie sie im Mesozoikum verbreitet sind.

Felsausbisse sind nicht unbedingt Voraussetzung für das Vorliegen von Steinschlaggefahren. Auch nicht erosionsstabile Hanglehmdecken und Wurzelballen mit entsprechendem Steinanteil können Quelle von Steinschlägen sein. Darüber hinaus spielt zwar die Bewachsung der Flächen zweifellos eine Rolle, wenn sie auch vielfach überschätzt wird. Nach JAHN (1988) tritt in einem bestockten Hang eine gegenüber einem waldfreien Hang markant höhere Ablagerungsrate von Steinschlag auf. Dies ist unmittelbarer Beobachtung zugänglich, allerdings bietet der **Steinschlagschutzwald** in der Regel keinen ausreichenden Schutz. Dazu liegen zahlreiche Beispiele von dem inzwischen sehr bekannten Felssturz bei See 1992, aus dem Schweizer Jura bei Moutier, von der Deutschen Alpenstraße bei Innzell, von der Weißen Wand bei Bad Reichenhall und aus Steinschlagversuchen, z.B. an dem 150 m hohen bewaldeten Hang der Geislinger Steige vor. Außerdem ist die Ablagerung im Hang zweischneidig, weil eine stabile Lage hinter Bäumen nur für kleine Steinschlagvolumina erreichbar ist und auch für diese nur über die Lebensdauer des betreffenden Baumes. Die Reduktion der Energie wird zudem durch Waldschäden erkauft. Die Steinschlagschutzwirkung von Wäldern ist deshalb relativ, sie macht Schutzbauwerke oberhalb von Verkehrswegen in der Regel nicht verzichtbar.

Als **Auslösemechanismen** treten Frostdruck, Kluftwasserdruck, Wurzeldruck, Kristallisationsdruck, Erschütterungen (Erdbeben, Sprengungen), sekundär Starkwind-/Sturmfolgen (Steine lösen sich aus den Wurzelballen umgestürzter Bäume), sowie Einwirkungen durch Mensch und Tier, z.B. aus Bauarbeiten, Holzarbeiten und durch Lostreten von labilen Massen auf. Blitzschlag ist in einem Einzelfall als auslösend berichtet worden; daneben wirken Starkregen über die Denudation bzw. Erosion als mögliche Auslösemechanismen.

Als **Ablösemechanismen** kommen schalenartige Ablösungen, Knicken, Kippen, Gleiten und durch Schub- und Zugspannungen verursachte Materialbrüche in Frage.

Die **Anfangsbewegungen** des Steinschlags bestehen aus Gleiten, Rollen und Fallen. Im weiteren Verlauf der Bewegung kommt je nach Hangneigung der Schiefe Wurf hinzu. Der von RITCHIE (1963) postulierte starre Zusammenhang von Bewegungsart und Hangneigung über-

sieht den Einfluß der Steinschlaggeometrie ebenso wie den der Oberflächengeometrie und der die Oberfläche mechanisch definierenden Eigenschaften.

Für die Untersuchungen der **Reichweite** von Steinschlägen wird teilweise ein Pauschalgefälle angesetzt. Dieses Pauschalgefälle entsteht aus der Verbindung zwischen Auslösepunkt und Ruhepunkt des Steinschlags. Dieses auch als „Fahrböschung“ bezeichnete Konzept stammt aus dem Lawinenschutz. Die Übertragung auf Steinschläge ist derzeit nach Kenntnis des Autors nicht durch systematische Untersuchungen abgesichert. Es ist unmittelbar einleuchtend, daß die Reichweite wesentlich von der Geometrie des Steinschlags und darüber hinaus von der Oberflächenbeschaffenheit, je nach Bewegungsart vom Rollwiderstand oder von den Dämpfungseigenschaften abhängt. Ein Pauschalgefälle kann deshalb nicht existieren.

Untersuchungen

Zur Identifizierung und Einschätzung von Steinschlagrisiken ist eine Geotechnische Kartierung - im Regelfall vom Seil aus - unverzichtbar. Luftaufnahmen, insbesondere Schrägluftaufnahmen aus geringer Höhe, sind zwar als Kartiergrundlage meist unentbehrlich, als alleinige Untersuchungsmethode wegen des nur zweidimensionalen Aufschlusses jedoch unzureichend. Anzuraten ist stets auch eine historische Recherche, die meist brauchbare Hinweise auf Steinschlagfrequenz und Volumen gibt.

Steinschlaggefahren lassen sich direkt durch die Existenz labiler Felspartien bei Vorliegen der übrigen geometrischen und mechanischen Voraussetzungen nachweisen. Als Indizien im Rahmen von Voruntersuchungen dienen helle Stellen in den Felswänden, die junge Ausbrüche kennzeichnen, Steinschlagmarken an Bäumen und auf der Hangoberfläche, Schuttansammlungen in flacheren Geländeabschnitten und vor Hindernissen sowie im Extremfall Schäden.

Risiko

Das Risiko wird in Übereinstimmung mit HINZEN (1996) als Produkt aus Schadenshöhe und Häufigkeit definiert. Mit Bezug auf WIECZOREK et.al. (1995) läßt sich häufig eine Risikoverteilung aufzeigen, wie sie in Abbildung 2 dargestellt ist. Nicht berücksichtigt sind dabei die sekundären Schäden, die z.B. auf Straßen durch fehlerhafte Ausweich- und Bremsmanöver als Reaktion auf auf der Fahrbahn liegende Steine entstehen können. Auf den Zusammenhang zwischen Häufigkeit und Energie wird an anderer Stelle noch eingegangen werden.

Nicht jede Steinschlaggefährdung wird zu Baumaßnahmen zwingen. Maßgebend für eine Sanierungsentscheidung ist die Sensitivität des gefährdeten Objektes. So wurden in den Vorein-

schnitten des Schwelmer Tunnels bei Wuppertal zwar erhebliche Steinschlagrisiken festgestellt, da die eingleisige nicht elektrifizierte Strecke lediglich der Andienung eines Schrottplatzes dient und im übrigen mit geringer Geschwindigkeit befahren wird, wurde auf eine Sanierung verzichtet. Ebenso werden Steinschlaggefährdungen auf alpinen Wanderwegen und auf Feld- und Waldwegen in der Regel hingenommen werden können. Bahnlinien mit Personenverkehr und öffentliche Straßen werden dagegen zu Sicherungsmaßnahmen zwingen.

Steinschlagsimulation

Steht die Notwendigkeit von Steinschlagsicherungen fest, so stellen sich in der Regel die in Abbildung 3 gezeigten Fragen, nämlich mit welchen Energien und welchen Sprunghöhen gerechnet werden muß und wo demnach der günstigste Standort eines Bauwerks - oder ggf. mehrerer Bauwerke - liegt. Nicht immer ist es der Hangfuß. So hängt die optimale Lage von Schutzbauwerken im Hang unterhalb einer Felswand z. B. davon ab, ob der Energiezuwachs zwischen dem Fuß der Felswand und dem Hangfuß positiv oder negativ ist. Herstellungs- und Unterhaltungsgesichtspunkte kommen hinzu.

Nachdem bis vor wenigen Jahren keine Möglichkeit bestand, die oben aufgeführten Fragestellungen anders als empirisch zu beantworten, brachte die Entwicklung von Steinschlagsimulationsprogrammen, die eine Berechnung der Steinschlagbahnen gestatten, einen erheblichen Fortschritt. Das vom Autor entwickelte Steinschlagsimulationsprogramm ROCKFALL Version 5.0 ist seit vielen Jahren eingeführt und international verbreitet. Auf SPANG & SÖNSER (1995) wird verwiesen.

Anfänglich diente die Steinschlagsimulation der Untersuchung von Einzelsteinen. Dies lag insoweit nahe, als sich die ersten Anwendungen auf Ereignisse mit Einzelsteinen bezogen - entweder - wie bei dem Felssturz von See (1992), wo ein 30 m³-Monolith in ein Haus einschlug - oder, weil aus Steinschlagversuchen Bahndaten einzelner Steine zur Verfügung standen. Bei diesem in Abbildung 4 dargestellten, als „foot print“-Methode bezeichneten Verfahren wurden die Eingangsparameter in jedem homogenen Bahnstück so lange variiert, bis die Simulation zu exakt derselben Bahn führte, wie sie in der Natur beobachtet worden war. Dies führte zunächst zu der Erkenntnis, daß die Eingangsparameter abschnittsweise verschieden sein mußten. Im Ergebnis wurden die ursprünglich für ein ganzes Profil geltenden Parameter lamellenweise variabel. Dabei zeigte sich, daß die Geometrie der Makro-Oberfläche eines Hanges, die der Aufteilung in Lamellen zugrunde lag, ungeeignet war, die für die Bahn- und Bewegungsänderungen (Kinetik) maßgebenden Oberflächendetails zu erfassen. Wo schließlich ein Stein konkret auftraf und welche Bedingungen er dort vorfand, war offensichtlich zufällig, die Steinschlagbahn

ist nicht-deterministisch bzw. chaotisch. So konnte SINAI (1970) am Beispiel der Interaktion von Billardkugeln die sensible Abhängigkeit der Bahnen von den Anfangsbedingungen zeigen, bei denen eine beliebig kleine Veränderung zu unberechenbaren Resultaten führt. Lassen sich bei den ersten Stößen die Bahnen noch bis auf wenige Grad prognostizieren, so können die Kugeln mit zunehmender Anzahl der Stöße nicht vorhersehbar unter Winkeln zwischen 0° und 360° reflektiert werden.

Ebenso wie Billardkugeln weist der zwei-dimensional - in der Ebene des größten Gefälles - untersuchte Steinschlag drei Freiheitsgrade auf. Steinschlagbahnen sind jedoch wesentlich komplexer, weil die beim Billard konstanten physikalischen Eigenschaften der beteiligten Körper beim Steinschlag über die Bahn in großen Bereichen schwanken. Das Programm wurde deshalb insoweit modifiziert, als alle in Tabelle 1 mit Stern gekennzeichneten Eingangsdaten lamellenweise eingegeben und zusätzlich in jedem berechneten Bahnpunkt mittels eines Zufallsgenerators innerhalb vom Bearbeiter frei zu wählender, für jeden Parameter individuell anzugebender Bandbreiten neu bestimmt werden. Variiert wird auch der Ausgangspunkt!

Aufgrund der inzwischen vorliegenden Erfahrung aus einer Vielzahl von natürlichen Steinschlägen, Steinschlagversuchen in Österreich, Deutschland, der Schweiz, USA, Japan und Taiwan und zugehörigen Simulationen lassen sich für Vorentwurfszwecke realistische Eingangsdaten nach Tabelle 2 angeben, die im Zuge der Bearbeitung durch Feldaufnahmen und möglichst durch Steinschlagversuche verifiziert werden müssen.

Im Ergebnis der Parametervariation liefert das Programm Hüllkurven der möglichen Steinschlagbahnen, die für den Bemessungsstein das maximale Ereignis, nach Abbildung 5 aber auch - und das erscheint besonders interessant - die Verteilung der Energien und der Sprunghöhen sowohl über das Profil als auch am Standort vorhandener oder geplanter Bauwerke angeben.

Vielfach wird das Maximalergebnis für die Bemessung herangezogen. Nach einem Vorschlag von HALLER (1995) läßt sich die Verteilung der Energien am Standort eines Bauwerks für die Minimierung der Unterhaltungskosten nutzen. Dabei wird - wie in Abbildung 2 dargestellt - je nach Frequenz und in Analogie etwa zur Bemessung von Regenwasserkanälen zwischen Jahrhundertereignissen, Zehnjahresereignissen und Jahresereignissen unterschieden. Jahresereignisse dürfen die heute üblichen Bremselemente nicht aktivieren. Zehnjahresereignisse aktivieren die Bremselemente und erfordern je nach Aktivierungsgrad deren Austausch. Jahrhundertereignisse beanspruchen das Schutzbauwerk bis zur Traglast; sie sind die Maximal-

ereignisse der Berechnung. Die Zuordnung der Ereignisse zu einer entsprechenden Frequenz kann formal über das Berechnungsergebnis erfolgen; zweckmäßiger wird jedoch bei der Geotechnischen Kartierung bereits der für das jeweilige Intervall maßgebliche Berechnungsstein festgelegt.

Die in Abbildung 5 gezeigte statistische Auswertung der Berechnungsergebnisse läßt sich auch in anderer Weise als Entscheidungshilfe heranziehen. Bei dem verwendeten Beispiel ist klar, daß eine Bemessung des Zauns auf nur 98 % der maximal zu erwartenden kinetischen Energie zu einer Reduzierung der erforderlichen Energieaufnahme um 30 % und damit grob zu um ca. 25 bis 30 % geringeren Baukosten führt. Noch extremer ist das Verhältnis bei der Zaunhöhe. In Verbindung mit der naheliegenden Annahme einer umgekehrt proportionalen Beziehung zwischen Häufigkeit und Volumen von Steinschlägen (in Anlehnung z.B. an WIECZOREK et.al. (1995)) läßt sich daraus eine Versagenswahrscheinlichkeit entwickeln, die den EG-weiten Bestrebungen nach einem neuen Sicherheitskonzept für Ingenieurbauwerke entspricht.

Hinsichtlich des Sicherheitskonzepts sei noch angefügt, daß bei Steinschlagschutzbauwerken zwei Versagensmechanismen zu betrachten sind, nämlich das sogenannte

- **strukturelle Versagen**, bei dem das Energieaufnahmevermögen des entsprechenden Bauwerks überschritten bzw. das Bauwerk zerstört wird, und dem
- **geometrischen Versagen**, bei dem das Bauwerk übersprungen oder überrollt wird (bei Versuchen in Oberbuchsitzen wurde beobachtet, wie Steine zwar vor dem Bauwerk aufschlugen, aufgrund ihrer hohen Rotationsgeschwindigkeit jedoch am vertikalen Bauwerk emporrollten und dieses letztendlich übersprangen).

Aufgrund der vorstehenden Überlegungen wird es nicht mehr für erforderlich gehalten, auf die sich aus den Maximalereignissen ergebenden Energien zusätzliche Sicherheitsaufschläge zu machen. Dies führt im Einzelfall leicht dazu, daß die Bemessungs-Energie in die Größenordnung der potentiellen Energie gelangt. Der Sinn der Steinschlagsimulation würde damit zumindest bezüglich der Energie ad absurdum geführt. Hinsichtlich der Sprunghöhe ist im Einzelfall zu entscheiden, inwieweit hier - auch mit Bezug auf die Sensitivität des bedrohten Objekts - Zuschläge notwendig sind oder nicht.

Ausblick

Steinschlagsimulationen als Grundlage für Risikoabschätzungen, Bewertung bestehender Bauwerke und Dimensionierung sowie Positionierung neuer Steinschlagschutzbauwerke gehören heute zum Stand der Technik. Zusammen mit durch umfangreiche Versuche geprüften modernen Steinschlagschutzzäunen aus Ringnetzen ermöglichen sie einen zuverlässigen Steinschlagschutz, der Prüfungen im Rahmen des Baugenehmigungsverfahrens bestehen kann. Für Energien, die die heutigen Möglichkeiten von Drahtseilnetzen übersteigen, stehen Erdwälle zur Verfügung, auch wenn deren Energieaufnahme bis zum Bruch bisher nicht geprüft ist. Nach Erfahrungswerten dürfte sie jedoch bei sachgerechter Ausbildung über 15.000 kJ liegen.

Bei den gegenwärtigen Fortschritten in der Entwicklung von Steinschlagsimulationsverfahren und von Steinschlagschutzbauwerken haben sich die kritischen Fragestellungen von der Bemessung weg auf die Geotechnische Kartierung verschoben. Hier entscheidet sich inzwischen, ob eine Steinschlagsicherung bei Einsatz moderner Verfahren der Bemessung und Gefahrenabwehr erfolgreich ist oder nicht. Gerade mit Bezug auf die Kartierung bleibt festzuhalten, daß hinsichtlich der Mechanik der Steinschlagentstehung in Abhängigkeit von den petrographischen Gegebenheiten und hinsichtlich der Wechselwirkung zwischen verschiedenen Entstehungsmechanismen und der Neubildungsrate/Frequenz im Hinblick auf die Effizienz z.B. von Beräumungen noch erhebliche Defizite vorliegen.

Darüber hinaus wäre es wünschenswert, wenn zusätzlich zur Kalibrierung der Eingangsparameter von Simulationen durch Steinschlagversuche Labor- oder Indexversuche zu deren Bestimmung entwickelt werden könnten.

Literatur

HALLER, B. (1995): Freundliche mündliche Mitteilung, basierend auf Fatzer AG, Rockfall Protection (Vertriebsunterlagen für Steinschlagschutznetze).

HEIM, A. (1882): Über Bergstürze. - Neujahrsblatt der Zürcherischen Naturforschenden Gesellschaft, 84, 1 - 31, Zürich.

HINZEN, A. (1996): Der Einfluß des menschlichen Fehlers auf die Sicherheit der Eisenbahn. - ETR, 45, 10.

JAHN, J. (1988): Entwaldung und Steinschlag. - Internat. Symp. Interprävent 1988, 1, 185 - 198, Graz.

KENNEDY, B.A. & NIERMEYER, K.E. (1970): Slope monitoring systems used in the prediction of a major slope failure at the Chuquicamata Mine, Chile. - In: VAN RENDESBURG, P.W.J. (1970): Planning open pit mines. - Proc. Symp. theoret. background to the planning of open pit mines with special reference to slope stability, 215 - 225, Amsterdam.

PAULCKE, W. (1942): Gefahrenbuch des Bergsteigers und Skiläufers. - Berlin.

RITCHIE, A.M. (1963): Evaluation of rockfall and its control. - Highway Record, 17, 13 - 28.

SINAI (1970): In: PEITGEN, H. O. & JÜRGENS, H. & SAUPE, H.(1992): Bausteine des Chaos. - Berlin.

SPANG, R. M. & SÖNSER, Th. (1995): Optimized Rockfall Protection by „Rockfall“. - Proc. 8th Int. Congr. Rock. Mech., Rotterdam.

WIECZOREK, G. F. & NISCHENKO, S. P. und VARNES, D. J. (1995): Analysis of Rockfalls in the Yosemite Valley, California. - Proc. 35th US Symp. Rock Mech., 85 - 89, Rotterdam.

Quelle: Bündner Wald, Heft 4, Juli 1997, Chur.