

Steinschlagrisiko und Investitionsentscheidung - gibt es eine rationale Basis?

Von Dr. Hans Angerer, Mag. Thomas Sönser und Dr. Raymund M. Spang

Zusammenfassung

Summary

Einleitung: In Zeiten knapper öffentlicher Mittel können auch bei der Sicherung von Verkehrswegen und Siedlungen nicht alle Wünsche unbesehen erfüllt werden. Seitens der Verkehrssicherungspflichtigen werden deshalb immer häufiger Forderungen an den Gutachter herangebracht, quantitative Aussagen zur Risikogröße bzw. zur Dringlichkeit einer Sicherungsmaßnahme oder im Vorfeld schon zur Notwendigkeit verkehrsbeschränkender oder betrieblicher Maßnahmen zu treffen. Unter Risiko wird dabei - in Übereinstimmung mit den meisten, mit sicherheitsrelevanten Fragestellungen befaßten Autoren (z.B. HINZEN, 1996) das Produkt aus Eintrittswahrscheinlichkeit und Schadenshöhe verstanden. Steinschlag sei im folgenden das Phänomen aus steilen Hängen herabrollender, springender oder frei fallender Felsblöcke mit Größen bis in den Kubikmeterbereich. Auf die unterschiedlichen Definitionen des Begriffs hinsichtlich seines Volumens soll dabei weiter nicht eingegangen werden. Auf HÄFNER (1993) wird verwiesen. Unter Steinschlag soll ferner nur verstanden werden, was allein auf oberflächennahe Entspannungs- und Verwitterungsvorgänge, nicht jedoch auf Spannungsumlagerungen und Spannungskonzentrationen im Vorfeld oder auch im Nachgang großräumiger Massenbewegungen zurückgeht (vgl. KENNEDY und NIERMEYER (1970) oder WIECZOREK et al. (1995)). Von der Betrachtung ausgenommen soll ferner Steinschlag sein, der sich in Böschungen aus herstellungsbedingten Auflockerungen oder Übersteilung ergibt. Für Bergstürze gelten hinsichtlich des Gefährdungspotentials ohnehin andere Regeln.

Die Forderung nach einer quantitativen Bewertung des Steinschlagrisikos ist bislang nicht erfüllbar. Zu wenig ist noch über Entstehungsbedingungen, Neubildungsraten usw. bekannt. Die in den letzten beiden Jahrzehnten erreichten Fortschritte konzentrierten sich auf die Kinematik und Kinetik des einmal in Bewegung geratenen Blocks sowie auf die Optimierung von Schutzsystemen, insbesondere aus bei geringer Belastung elastisch, bei hoher Belastung elastoplastisch reagierenden Drahtseilnetzen.

Sicher gibt es Fälle, in denen isolierte Felspartien die Prognose eines erfahrenen Gutachters durch kurzfristig folgendes Versagen bestätigt haben - generell sind die Prognosen jedoch mit einer großen Unsicherheit hinsichtlich des Eintrittszeitpunktes behaftet. Im folgenden soll deshalb untersucht werden, worin diese Unsicherheiten liegen und welche Mittel zur Verbesserung der Bewertung von Steinschlagrisiken im Hinblick auf fundierte Investitionsentscheidungen für Sicherungsmaßnahmen zur Verfügung stehen.

Sanierungen sind am sinnvollsten dort, wo das Risiko am größten ist. Dazu muß ein Überblick über die Gefahren und deren Verteilung vorliegen. Zu einem erheblichen Teil werden entsprechende Investitionsentscheidungen jedoch nach wie vor reaktiv und nicht präventiv getroffen, auch wenn die in den Alpenländern inzwischen durch Gesetz eingeführten Gefahrenkarten und das 1985 eingeführte Inspektionsmodell für Erdbauwerke der DB AG einen großen Fortschritt darstellen.

GEBAUER et al. (1990) lassen erkennen, daß der Anlaß für die Sanierung der sogenannten Weißwand ein Todesopfer war. In Kalifornien wurde 1991 mit der systematischen Sicherung entsprechender Risiken begonnen, nachdem die bis dahin geltende Doktrin, bei Steinschlag handele es sich um höhere Gewalt, im Gefolge von tödlichen Unfällen gerichtlich gekippt gesetzt worden war.

Reaktive Investitionsentscheidungen sind im Straßenbau zumindest dort heute noch üblich, wo Unfallschwerpunkte statistisch erfaßt und anschließend - möglicherweise - entschärft werden. Ein analoger Ansatz für die Risikominimierung bei Steinschlag scheitert jedoch schon daran, daß es zuverlässige Statistiken bislang nicht gibt. Außerdem ist die Prämisse, dort, wo ein Steinschlag sich ereignet hat, bestehe das größte Risiko, bereits aus der Anschauung heraus falsch:

- der betreffende Stein könnte der einzig labile gewesen sein;
- entlang der Strecke könnten wesentlich größere Risiken existieren, an anderen Stellen, die aus irgendwelchen Gründen noch nicht abgegangen, jedoch hochgradig labil sind.

An der Westfalenstraße in Essen wurde vor vielen Jahren bereits eine Schutzplanke zum Auffangen von kleinstückigen Tonsteinen aus einer steilstehenden Schichtfläche aufgestellt; 1976 ereignete sich wenige 100 m entfernt aus dickbankigen Sandsteinen ein Felssturz, bei dem

große Blöcke auf die vielbefahrene vierspurige Straße gelangten. Das Risiko war zuvor nicht erkannt worden (JOHN et al. (1979). Reaktive Maßnahmen sind deshalb offensichtlich kein geeignetes Mittel für Investitionsentscheidungen.

Weitere, derzeit noch offene Fragen befassen sich mit dem rechtlich zumutbaren Risiko (vgl. HÄFNER (1993), HINZEN (1996) und BINZWANGER (1990)). Gerade im Zusammenhang mit den oben angeführten Gefahrenkarten ist auch die Frage zu beantworten, was diese für eine präventive Sicherung bei Steinschlag leisten können und wo ihre derzeitigen Grenzen liegen. Es ist zu fragen, ob das Steinschlagrisiko hinreichend faßbar ist um zu rationalen Investitionsentscheidungen im Sinne einer gezielten Kappung von Risikospitzen zu kommen. Dies soll nachstehend mit vorhandenen Verfahren und an Beispielen untersucht werden. Dabei interessiert in Zeiten knapper Kassen nicht nur, wo das höchste Risiko ist, sondern auch , ob und wie lange es noch tragbar ist.

Charakterisierung des Steinschlags: Der eingangs definierte Steinschlag läßt sich wie folgt charakterisieren.

- Flächenhaft in einer Felswand auftretend;
- unregelmäßig verteilt;
- in unterschiedlichen Reifestadien befindlich;
- ähnlich dem Atomzerfall, aber mit unbekannter Zerfallsrate und nicht degressiv.
- Unbekannte Sicherheitsreserven der Einzelsituation, die in der Regel weder einer rechnerischen, noch einer meßtechnischen Erkundung zugänglich sind, schon weil ihre lokal konzentrierte Anzahl viel zu groß dafür ist.

Eintrittswahrscheinlichkeit: Diese hängt von einer Vielzahl von Faktoren ab. Die wesentlichen sind:

- Existenz von labilem Material,
- Erreichen des gefährdeten Objekts,

- Frequenz des das gefährdete Objekt erreichenden Steinschlags,
- Randbedingungen aus dem gefährdeten Objekt.

Schadenshöhe: Diese hängt vor allem von folgenden Faktoren ab:

- Wert des gefährdeten Objekts,
- Sensitivität gegenüber der Steinschlageinwirkung,
- Größe der konkret zu befürchtenden Einwirkung (Energie).

Hinsichtlich der Bewertung von Unfällen mit Verletzungen/Todesfolge wird auf die Ausführungen von HINZEN (1996) und BINZWANGER (1990) verwiesen.

Geotechnische Voraussetzungen: Zu den Grundvoraussetzungen für das Vorliegen labiler Massen gehören eine entsprechende Wandgeometrie sowie das Vorhandensein von Felsausbissen, Geröllauflagen oder Blöcken in erosionsgefährdeter Matrix. Exakte Werte für die Untergrenze der Hangneigung, von der an mit Steinschlag gerechnet werden muß, liegen nicht vor; Literaturangaben schwanken zwischen 35° und 40°, wobei diese wesentlich von der Oberflächenbeschaffenheit und der Steinschlaggeometrie abhängt. Eine starre Kugel auf starrer Oberfläche beginnt bekanntlich bereits bei weit geringerer Neigung zu rollen.

Geologische Ursachen: Die geologischen Ursachen für die Entstehung labiler Massen liegen in der oberflächennahen Entspannung und der Verwitterung. Im alpinen Raum ist das wesentlichste Agens der Verwitterung der Frost. Konzentriert er sich derzeit auf die Hochgebirgsregionen, so zeigen fossile Halden wie im Glastal bei Hayingen auf der Schwäbischen Alb, daß in den zurückliegenden Kaltzeiten Steinschlag auch im Mittelgebirge zu großen Schuttakkumulationen geführt hat.

Reifezeit: Geht man fiktiv von einer zum Zeitpunkt Null steinschlagfreien Felswand aus, so soll unter Reifezeit die Zeitspanne der Entstehung labiler Massen bis zu deren Absturz verstanden werden. Offensichtlich ist die Reifezeit nicht nur von der Gesteinsbeschaffenheit und der Gebirgsfestigkeit, sondern ganz wesentlich auch von der Exposition und vom Klima abhängig. So ließen sich an der vor wenigen Jahren sanierten Hochwangsteige in den zum Teil überhängen-

den massigen Riffkomplexen zwar oberflächenparallele hohlklingende Platten feststellen, der die Straße gefährdende, mit hoher Frequenz auftretende Steinschlag stammte jedoch bei gleichen klimatischen Bedingungen ausschließlich aus plattigen bis dünnbankigen Kalken.

Die Reifezeit ist identisch mit der Neubildungsrate. Diese liegt bei obigen Abhängigkeiten zwischen Jahren bis Jahrzehnten und Jahrtausenden. Mit Bezug auf obige Ausführungen existieren offensichtlich auch „fossile Steinschlagherde“.

Die Abnahme der Festigkeit ist wegen der in der Regel langen Reifezeit nicht beobachtbar; der aktuelle Status bzw. die Sicherheitsreserve ist unbekannt.

Bewertungskriterien: Da sich die Sicherheitsreserven einer rechnerischen oder meßtechnischen Bewertung entziehen, müssen andere Kriterien zur Bewertung herangezogen werden. In einem aufgelassenen Diabas-Steinbruch bei Wiemeringhausen reichte ein Fußtritt, um Kubikmeter-große Schalen zum Absturz zu bringen. Am Rudersdorfer Tunnel wurde 1976 einem mit der Beräumung beschäftigten Arbeiter beim Aufstieg am Seil über einen noch nicht beräumten Bereich ein labiler Felsblock zum Verhängnis. Entsprechende Partien haben offensichtlich keine Sicherheitsreserven mehr. In der Praxis hat sich deshalb als Kriterium für das Vorliegen labiler Partien die Ablösbarkeit mit dem Brecheisen bewährt. Was sich mit dem Brecheisen von Hand lösen läßt, ist zwar (noch) nicht unbedingt akut absturzgefährdet, zeigt aber einen Festigkeitsabfall auf ein kritisch geringes Niveau. Allerdings ist dieses Kriterium nur bei ansonsten hoher Verbandsfestigkeit anwendbar. Bei verwitterungsanfälligen, veränderlich festen oder tektonisch stark beanspruchten Gesteinen würde das Kriterium zur Prognose vollflächiger Instabilität führen.

Als Bewertungskriterium bietet sich zunächst auch der historische Ansatz an. Der 1992 erfolgte Steinschlag von See zeigt allerdings, daß dieser Ansatz mit erheblichen Risiken verbunden ist. Seit Jahrhunderten hatte sich an dieser Stelle kein größerer Steinschlag mehr ereignet, die unterhalb des Herdes liegende große Halde war völlig überwachsen; die zwischen den tieferliegenden Häusern vorhandenen großen Felsblöcke waren zum Teil in die Bauwerke integriert. Dem ersten Anschein nach handelte es sich um ein fossiles Steinschlaggebiet, das inaktiv war.

Ablösezeitpunkt: Vielfach wird das für Hartgesteine typische Spröbruchverhalten auf das Gebirge übertragen. Tatsächlich gehen jedoch dem Absturz labiler Massen mehr oder weniger große Verschiebungen und Auflockerungen voraus, an denen sich das Reifestadium - ggf. in Verbindung mit den o.a. Kriterien - zumindest grob abschätzen läßt. Wie bereits ausgeführt, ist die restliche Reifezeit jedoch nicht bestimmbar.

Meist sind jedoch Einzelablösungen nicht das Problem. Steinschlag ist eine in der Regel flächenhafte Erscheinung, wobei über die Felswände verteilt die unterschiedlichsten Reifestadien vorliegen. Das Ergebnis ist eine statistische Verteilung von Einzelereignissen, die in ihrer Unregelmäßigkeit militärischem Sperrfeuer entspricht.

Bekanntermaßen gibt es saisonale und tägliche, witterungsbedingte Minima und Maxima der Steinschlagaktivität. Diese Verteilungen sind auch abhängig vom jeweiligen Auslösemechanismus. Das Phänomen Steinschlag ist deshalb in der Regel nur statistisch faßbar.

Qualität und Quantität lokaler Herde: Die Steinschlaggefährdung hängt wesentlich von folgenden Faktoren ab:

- Volumen und Zerlegung lokaler Herde,
- dynamische Festigkeit ihrer Kluftkörper, in Verbindung mit den bei Stoßvorgängen auftretenden negativen Beschleunigungen (Zerplatzer),
- Flächenanteil labiler Partien an der Gesamtfläche.

Frequenz: Steinschläge treten zum Teil intermittierend (siehe obiges Beispiel See), teilweise über größere Zeiträume auch kontinuierlich auf. Die Frequenz kontinuierlich auftretender Steinschläge läßt sich in der Regel aus der Kartierung von Halden und Aufwuchsschäden abschätzen; bei intermittierendem Steinschlag mit entsprechend langen steinschlagfreien Intervallen versagt diese Methode.

Wie unten ausgeführt hängt es von der Reichweite des Steinschlags ab, ob eine hohe Steinschlagfrequenz auch zu einer entsprechenden Frequenz am gefährdeten Objekt führt. Für die Risikobeurteilung ist deshalb nicht die Frequenz am Ablösepunkt, sondern die Frequenz im Bereich des gefährdeten Objekts maßgebend. Bei Verkehrswegen in sehr steilen Hängen ist der Unterschied allerdings in der Regel gering; hier führen auch dichte Bewaldungen zu keinem ausreichenden Schutz. Untersuchungen an einer Reihe von Aufstiegsstraßen am Nordrand der Schwäbischen Alb haben gezeigt, daß aus den den Albtrauf bildenden Klippen herausfallende Steine ab einer bestimmten Größe die betreffenden Straßen trotz einer dichten Bewaldung nahezu vollständig erreichen.

Reichweite: Eine hohe Steinschlagfrequenz allein führt noch nicht zu einem entsprechenden Steinschlagrisiko. Der Steinschlag muß das gefährdete Objekt auch erreichen. Ob das potentiell gefährdete Objekt tatsächlich durch Steinschlag gefährdet ist, läßt sich nach SPANG (1987) je nach Einzelfall auf 3 verschiedene Arten untersuchen. Auf die historische, die empirische und die analytische Methode wird dort ausführlich eingegangen.

Verkehrliche Randbedingungen: Nach derzeitiger Kenntnis hat es den Anschein, als ob Unfälle im Zusammenhang mit auf der Straße liegenden Steinen deutlich häufiger vorkommen als Unfälle durch direkte Treffer. Die Gefahr des Auffahrens hängt maßgeblich von den Sichtverhältnissen, der möglichen Geschwindigkeit im Verhältnis zum Anhalteweg und von Ausweichmöglichkeiten ab. Hier unterscheiden sich schienengebundener Verkehr und Straßenverkehr grundsätzlich. Allerdings haben auch die Ausweichmöglichkeiten schon zu Unfällen unter Beteiligung des Gegenverkehrs oder mit Abkommen von der Fahrbahn geführt.

Die Wahrscheinlichkeit direkter Treffer hängt von folgenden Faktoren ab:

- Steinschlagfrequenz,
- Expositionszeit.

Die Expositionszeit kann dabei durch ungünstige Verkehrsbedingungen extrem steigen. Bei der Untersuchung einer über 80 m hohen, überwiegend vertikalen Felswand wurden erhebliche Steinschlagrisiken festgestellt. Unmittelbar am Fuß der Felswand verläuft eine viel befahrene Straße. Dort führt eine nicht weit entfernt liegende Ortsdurchfahrt während der Hauptferienzeit zu ständigen Staus, so daß jeweils über einen Großteil des Tages Fahrzeuge unmittelbar un-

terhalb der Felswand zum Stehen kommen. Die Trefferflächen des Steinschlags liegen in der Straße; die Fahrzeuge stehen dabei so dicht, daß eigentlich jeder Steinschlag in dieser Zeit treffen muß.

Bei der Exposition ist das Einzelfahrzeug vermutlich kein Maßstab; es muß vielmehr die Verkehrsdichte als Bewertungsmaßstab herangezogen werden.

Untersuchungsmethodik: Beim Ablauf einer Steinschlaguntersuchung lassen sich 3 Hauptphasen unterscheiden:

- Kartierung und Vermessung,
- Simulation,
- Bewertung.

Um den historischen Ansatz haben sich z.B. KOLLBRUNNER (1970) und HÄFNER (1993) bemüht. Effektiv ist eine aussagefähige statistische Grundlage jedoch bislang nicht vorhanden. In der Regel werden auf die Fahrbahn gelangte Steine von den Straßenmeistereien weggeräumt, ohne daß es zu einer Meldung käme. Vielfach schlagen Steine zwar auf der Fahrbahn auf, verschwinden jedoch anschließend ohne auffällige Spuren zu hinterlassen im tieferliegenden Hang. Bekannt werden nur Schadensereignisse. Der historische Ansatz reicht deshalb allein nicht aus. Es ist eine detaillierte geotechnische Untersuchung bzw. Kartierung der betreffenden Liefergebiete Voraussetzung für die Risikobeurteilung. Bei steilen Felswänden muß diese vom Seil aus erfolgen. Dabei muß festgestellt werden, inwieweit labile Partien vorhanden sind. Die zu erhebenden Daten sind bei SPANG und SÖNSER (1995) detailliert beschrieben.

Die anschließende Simulation, für die die Autoren das kommerzielle Rechenprogramm Rockfall 5.0 benutzen, zeigt, ob das betreffende Objekt tatsächlich gefährdet ist. Das Programm liefert an jedem gewünschten Punkt des Hanges die kinetische Energie und die Bahn und damit gleichzeitig die Bemessungsgrundlagen für die Auswahl eines geeigneten Schutzsystems.

Eine Kartierung ließ für unterhalb des Grünten liegende Bauernhöfe eine Gefährdung durch von einer Felswand unterhalb des Grünten ausgehenden Steinschlag vermuten. Allerdings waren die Blöcke bislang oberhalb der Höfe liegen geblieben. Durch eine Steinschlagsimulation

konnte gezeigt werden, daß von 500 Blöcken zwar ein Teil in den Almwiesen oberhalb der Höfe liegen bleibt, ein erheblicher Anteil jedoch die Höfe erreicht. Zur Sicherung wurde deshalb oberhalb der Höfe in einer Verflachung ein Erddamm errichtet.

Steinschlagsimulation: RITCHIE (1963) und EBNER v. ESCHENBACH et al. (1975) waren die ersten, die eine Berechnung von Steinschlagbahnen versuchten. Beide gingen vom Massenpunkt aus; als Anfangsbewegung diente der Freie Fall, der auf einer unter 45° geneigten Ebene endete. Der anschließende schiefe Wurf wurde ohne Dämpfung gerechnet; der Drall wird nicht berücksichtigt. Die kinetische Energie entspricht der potentiellen; die Reichweite liegt extrem auf der sicheren Seite; die Bahn ist unrealistisch.

Ein verbessertes einfaches Modell hat z.B. HEIERLI (1985) vorgelegt. Gegenüber seinen Vorgängern integriert er die Newton'sche Stoßtheorie; beim Aufschlag wird die Normalkomponente der Geschwindigkeit entsprechend reduziert; die Tangentialkomponente bleibt unverändert. Zwar wird als Anfangsbewegung Rollen - allerdings ohne Rollwiderstand - hinzugenommen; die Dralländerung beim Stoß wird weiterhin nicht berücksichtigt. Auch dieses Modell führt zu unrealistischen Bahnen; wegen des Fehlens einer tangentialen Dämpfung und wegen der Nichtberücksichtigung des Dralls ergeben sich unrealistische Bahnkurven, die mit wachsender Anzahl von schiefen Würfeln zum Verlust der Prognosefähigkeit führen. Die Berechnung erfolgt, wie bei den Vorgängern, von Hand.

Das bei SPANG und SÖNSER (1995) beschriebene Simulationsprogramm Rockfall in der aktuellen WINDOWS-Version 5.0 berücksichtigt derzeit sphärische und zylindrische Körper. Als Anfangsbewegung sind Rollen, Gleiten und Freier Fall möglich. Es sind die Koordinaten des Anfangspunktes anzugeben; daraus wird die physikalisch realistische Anfangsbedingung bestimmt. Rollen wird mit Rollwiderstand, Gleiten mit Gleitreibung, der Freie Fall mit Luftwiderstand gerechnet. Entsprechend den geometrischen Gegebenheiten berechnet das Programm wechselseitig Übergänge zwischen Freiem Fall, Schiefem Wurf, Rollen und Gleiten automatisch. Bei Stoßvorgängen wird die Dralländerung berücksichtigt; entsprechend den Oberflächenverhältnissen erfährt sowohl die normale, als auch die tangentiale Geschwindigkeitskomponente eine Dämpfung.

An beliebigen Stellen können Steinschlagschutzbauwerke oder Hindernisse errichtet werden, in deren Achse das Programm die totale kinetische Energie, den translatorischen und rotatorischen Anteil sowie den Aufschlagpunkt berechnet.

Die Einführung einer Oberflächenrauigkeit ermöglicht auch bei unveränderter Bahnneigung Übergänge vom Rollen/Gleiten in Schiefe Würfe. Der Einfluß einer Bewaldung kann mit der derzeit im Test befindlichen Version 6.0 untersucht werden.

Die Berechnung erfolgt im zweidimensionalen Schnitt, der ähnlich wie bei den meisten bodenmechanischen Böschungsbruchnachweisen in Lamellen zerlegt wird. Die Lamellenbreite ist von Lamelle zu Lamelle frei wählbar. Sie wird nach Krümmungsradien und Unstetigkeiten der geometrischen Oberfläche, sowie entsprechend der Änderungen von Oberflächeneigenschaften gewählt. Jeder Lamelle können unterschiedliche Oberflächeneigenschaften zugewiesen werden. Die Stoffparameter werden mit Mittelwerten und Streubereichen angegeben. Bis zu 1.000 Steine können in einem einzigen Berechnungsgang untersucht werden. Durch eine unabhängige automatische Variation aller maßgebenden Parameter für jeden linearen Bewegungsvorgang und jeden Stoß ergeben sich eine Vielzahl physikalisch möglicher Bahnen und ihre zugehörigen Hüllkurven. Die daraus folgende Streuung der kinetischen Energie und der Sprunghöhen wird statistisch aufbereitet. Darüber hinaus wird die Anzahl der Steine, die das potentiell gefährdete Objekt nicht erreicht, festgehalten.

Aus der Berechnung läßt sich dann entnehmen:

- Wieviel Prozent der Steine tatsächlich zu einer Gefährdung führen.
- Mit welcher Maximalenergie der Aufprall erfolgt.
- Welche Energieverteilung sich beim Aufprall der verschiedenen einzelnen Steine ergibt.
- Welche Sprunghöhenverteilung an dem betreffenden Hindernis auftritt.
- Wieviel Steine das Hindernis ggf. überspringen.

Aus der Energie- und der Sprunghöhenverteilung lassen sich die entsprechenden Fraktile bestimmen, die z.B. 95 % oder 98 % der Steine repräsentieren. Bei einer Reihe von Untersuchungen hat sich dabei gezeigt, daß die Beschränkung einer Sicherung auf 95 % oder 98 % zu einer erheblichen Einsparung bei der Ausführung von Schutzbauwerken geführt hat. Der Bauherr steht dann vor der Wahl, ob er bei gleichem Budget lieber auf einem kürzeren Stück 100 % der Steine, oder auf einem längeren Stück 98 % oder 95 % der Steine auffangen will.

Eintrittswahrscheinlichkeit: Anhand der Simulation läßt sich die Eintrittswahrscheinlichkeit bezogen auf die Gesamtanzahl der Steinschläge berechnen, nicht jedoch bezogen auf ihr zeitliches Auftreten. Hier sind mit Bezug auf vorstehende Ausführungen noch umfangreiche systematische Untersuchungen durchzuführen, um auch diesen Aspekt der Risikobeurteilung einbeziehen zu können.

Bewertung des Risikos für die Investitionsentscheidung: Eine feste Regel für die Grenzziehung zwischen Risiko und Gefahr nach HINZEN (1996) besteht bislang nicht. Sie ist qualitativ von der Sensitivität des betreffenden Objekts gegenüber Steinschlagfolgen abhängig.

Ebensowenig ist bislang exakt festlegbar, wo die Eingriffsschwelle liegt. Sie hängt ganz wesentlich von der Risikoakzeptanz ab. Diese wird bei einer Forststraße wesentlich größer sein als bei der einzigen Zufahrtsstraße zu einem Wintersportort, deren wiederkehrende Sperrung das Image des betreffenden Ortes nachhaltig in Mitleidenschaft ziehen würde.

Die Eingriffsschwelle ist außer von der Art und Häufigkeit der Nutzung, von Ausweichmöglichkeiten auf andere Zufahrten, von der Art der betroffenen Nutzer usw. abhängig. So war z.B. die Eingriffsschwelle an der durch das Judäische Bergland führenden extrem belasteten Autobahn Tel Aviv / Jerusalem sehr niedrig, nachdem wiederholt aus den bis 60 m hohen und über 60° steilen Einschnittsböschungen herabstürzende Steine zur Vollsperrung von Richtungsfahrbahnen geführt hatten. Ausweichmöglichkeiten hätten nur über schmale und kurvenreiche Nebenstraßen bestanden, die nicht in der Lage gewesen wären, den Verkehr aufzunehmen.

Wird eine Gefahr im Sinne von HINZEN (1996) festgestellt, muß ohnehin eingeschritten werden. Führen die zu erwartenden Steinschläge nur zu einem Risiko, muß im Sinne einer rationalen Investitionsentscheidung auch das nicht-geotechnische Komponenten enthaltende Gesamtrisiko beurteilt werden. Anzustreben sind dabei Risikobeurteilungen, die das Verkehrsnetz eines gesamten Landkreises oder Bundeslandes, wenigstens jedoch einen größeren Streckenab-

schnitt der betreffenden Straße enthalten. Entsprechende Fragen werden bei angespannter Haushaltslage der Öffentlichen Hände in Zukunft immer wichtiger werden. Bei dieser Gesamtrisikobeurteilung überlagern sich die geotechnischen Risiken mit den allgemeinen Gefahren aus der betreffenden Streckenführung wie

- Trassierungselemente,
- Fahrbahnzustand,
- vorwiegende Wetterverhältnisse und ihr Einfluß auf die Verkehrssicherheit, usw.

Bei schienengebundenen Verkehrswegen greifen solche Gesamtrisikobeurteilungen im allgemeinen nicht.

Beispiele

Ausblick

Danksagung

Literatur

BINZWANGER, H. Chr. (1990): Neue Dimensionen des Risikos, Abschied von der Restrisiko-Philosophie. - Schweizer Ingenieur und Architekt 17, 1164 bis 1168.

EBNER v. ESCHENBACH, H. & KLENGEL, K. J. (1975): Möglichkeiten zur Beurteilung der Standfestigkeit von Felsböschungen und ihre praktische Bedeutung. - Die Straße, 10, 420 - 426; 11.473 - 478.

GEBAUER, B., GREB, B., KÖHLER, A. & WASSNER, G. (1990): Umweltfreundlicher Stein-schlagverbau, wesentlicher Bestandteil sicherer Verkehrswege. - TIS, 12, 861 - 866.

HÄFNER, F. (1993): Gefahrenabwehr bei Steinschlag - Erfordernis, Sicherheitsniveau, rechtliche Aspekte. - Ber. 9. Nat. Tag. Ing.-Geol., Garmisch-Patenkirchen, 189 - 195.

HEIERLI, W., MERK, A. & TEMPERLI, A. (1985): Schutz gegen Steinschlag (2. Auflage). - Forschungsarbeit 21/83 auf Antrag der Vereinigung Schweizerischer Straßenfachleute.

HINZEN, A. (1996): Der Einfluß des menschlichen Fehlers auf die Sicherheit der Eisenbahn. - ETR, 45, H.10, 623 - 630.

JOHN, K. W., REUTER, G. & SPANG, R. M. (1979): Kippen als Bruchmechanismus in Felsböschungen. - Ber. 2. Nat. Tag. Ing.-Geol., 183 - 198, Fellbach.

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 RENDBURG, 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.

KOLLBRUNNER, C. F. (1970): Schutz der Straßen vor Rutschungen und Felsstürzen. - Inst. für bauwissenschaftliche Forschung, H. 11, Zürich.

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

SPANG, R. M. (1987): Protection against rockfall - stepchild in the design of rock slopes. - Proc. 6th Int. Congr. Rock Mech., Montreal.

SPANG, R. M. & SÖNSER, T.H. (1995): Optimized Rockfall Protection by "Rockfall".- Proc. 8th Int. Congr. Rock Mech., Tokyo.

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 - 96.