Felsböschung Bristenstrasse: Untersuchungen und Massnahmen zur Erhöhung der Sicherheit

Autor(en): **Bergamin, Stefan / Kirchhofer, Peter / Filippini, Raffaele**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **118 (2000)**

Heft 9

PDF erstellt am: **19.03.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-79883

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Stefan Bergamin, Peter Kirchhofer, Raffaele Filippini, Zürich

Felsböschung Bristenstrasse

Untersuchungen und Massnahmen zur Erhöhung der Sicherheit

Die Bristenstrasse zwischen Amsteg und St. Antoni wurde im Laufe der vergangenen Jahrzehnte wiederholt durch Felsstürze verschüttet. Nach dem letzten grossen Felsabbruch vom 19. Januar 1995 und der Wiederherstellung der Strasse wurde vom Kanton Uri eine umfassende felsmechanische Untersuchung eingeleitet, um die Stabilität der Felsböschung bzw. die Sicherheit der Strasse nach klaren Kriterien zu beurteilen und geeignete Sicherungsmassnahmen zu definieren.

Das Problem der Stabilität von Felsböschungen zählt zu den wichtigsten der Felsmechanik. Hauptgegenstand der einschlägigen Fachliteratur bilden zum einen Betrachtungen zu den Faktoren, die die Stabilität beeinflussen, zum anderen die verschiedenartigen Berechnungsmodelle; mit deren Hilfe wird beispielsweise die Sicherheit von Felskörpern gegen Abgleiten untersucht oder deren Sturzenergie bestimmt. Demgegenüber fehlt eine einheitliche Darstellung der Methodologie zur Beschaffung all jener Elemente, die als Grundlagedaten in solche Überlegungen und Berechnungen einfliessen. Bei Felsböschungen erheblicher räumlicher Ausdehnung, in denen die mannigfaltigen Phänomene schwer zu überblicken sind, ist eine strenge, systematische Vorgehensweise von besonderer Bedeutung. Sie liefert klare Grundlagen zum Sicherungskonzept, noch bevor spezifische Fragestellungen einer rechnerischen Prüfung unterzogen werden. Berechnungen stellen in der Tat erst in einer späteren Projektphase ein nützliches Instrument für ein tieferes Verständnis des Kräftespiels oder zur konstruktiven Durchbildung einzelner Sicherungsmassnahmen dar. Im Folgenden werden am Beispiel der felsmechanischen Untersuchungen entlang der Bristenstrasse im Kanton Uri wichtige Aspekte einer früher auch bei anderen Projekten bewährten Methodologie erörtert.

Ausgangslage

Die Bergstrasse Amsteg–Bristen ist die einzige befahrbare Verbindung zwischen dem Reuss- und dem Maderanertal. Für ihre unterbrochene Benützung sprechen zwei Gründe: einerseits pendeln viele Bewohner des Maderanertals ins Reusstal, anderseits besuchen zahlreiche Touristen das landschaftlich reizvolle Seitental. Der Verkehr setzt sich hauptsächlich aus Privatautos, Lastwagen und mehrmals täglich zirkulierenden Postautos zusammen.

Der zwei Kilometer lange Strassenabschnitt zwischen Amsteg (526 m ü.M.) und St. Antoni (715 m ü.M.) weist eine Steigung von 9% auf. Er folgt mit je vier Wendeplatten und Tunnels serpentinenförmig der untersten steilen Nordwestflanke des Bristens (Bild 1). Seit dem Bau der Bristenstrasse im Jahre 1910 beobachtet man ungefähr alle zehn Jahre das Niederstürzen einer grösseren Felsmasse. Sie verschüttet jeweils die Strasse an mehreren übereinanderliegenden Stellen und bedingt deren Sperrung für einige Tage. Nach dem Felssturz vom 19.1.1995 (Titelbild) war die Strasse zehn Tage lang unpassierbar und musste auch während der Ausführung der Räumungs- und Sicherungsarbeiten zeitweise gesperrt werden.

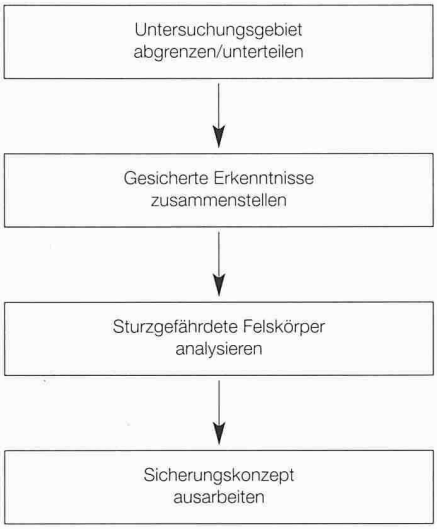
Die vorhandene Gefahr und wiederholte Sperrungen veranlassten 1997 das Tiefbauamt des Kantons Uri, eine systematische und gründliche Untersuchung in Auftrag zu geben. Hierbei sollten felsmechanische Grundlagen zur Einschätzung der Gefährdung bereitgestellt und notwendige Massnahmen erörtert werden [1, 2]. Konkret war abzuklären, ob die Strasse mit wirtschaftlich vertretbarem Aufwand für mehrere Jahrzehnte gesichert werden könne oder ob konzeptuell grundlegend andersartige Lösungen in Betracht zu ziehen seien.

Angesichts der Länge des Strassenabschnitts und der Grösse des Untersuchungsgebiets wurde besonderer Wert auf ein streng methodisches Vorgehen gelegt. Durch eine konsequente Trennung in Tatsachen, Annahmen und Modell sowie den daraus ableitbaren Massnahmen sollte die Kontrolle der in den Entscheidungsprozess eingeflossenen Informationen erleichtert werden (Bild 2).

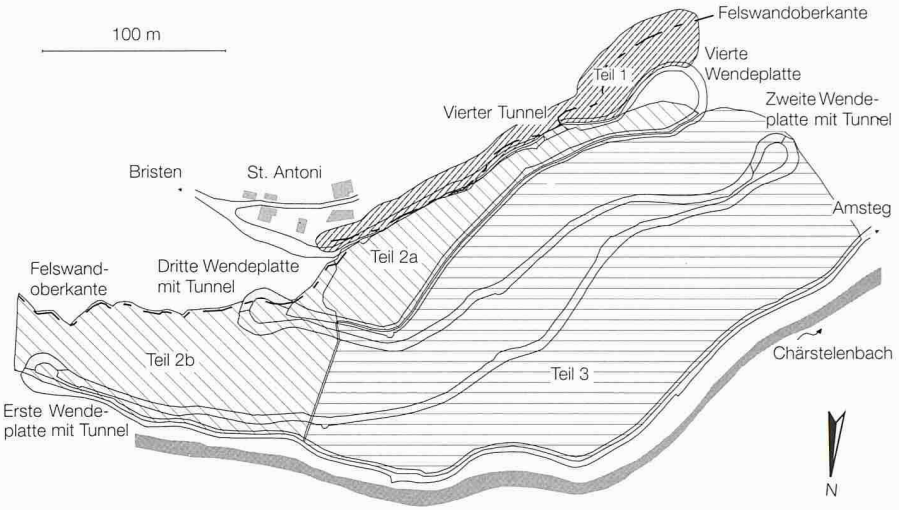
Als «sturzgefährdet» bezeichnen wir einen Felskörper, der schon bei einer geringfügigen Änderung der äusseren Kräfte oder Festigkeitswerte seine Lage in einer Felswand («potentieller Bruchkörper») oder im lockergesteinsbedeckten Gelände ändern kann («labiler Block»). Der Begriff verknüpft dabei zweierlei Gesichtspunkte: zum einen den summarischen Hinweis auf die Kinematik, zum andern die ganz konkrete Möglichkeit des Auftretens einer Bewegung. Die konstruktiven Massnahmen sollten den Ausgangspunkt für ein Vorprojekt zur langfristigen Sicherung der

1
Luftbild der südlichen Talflanke des Maderanertals mit dem untersuchten Abschnitt der Bristenstrasse zwischen Amsteg (rechts) und St. Antoni (oben links)





2
Schematische Darstellung des Vorgehens



3
Dreiteilung des Untersuchungsgebiets; die Teile 1 und 2 wurden von den Autoren untersucht

Verbindung ins Maderanertal bilden. Demgegenüber wurde eine messtechnische Überwachung nur für Einzelfälle ins Auge gefasst, weil solche Instabilitäten in der Regel ohne Vorankündigung in Form stetig wachsender Verformungen eintreten («sprödbruchartiger» Verlauf).

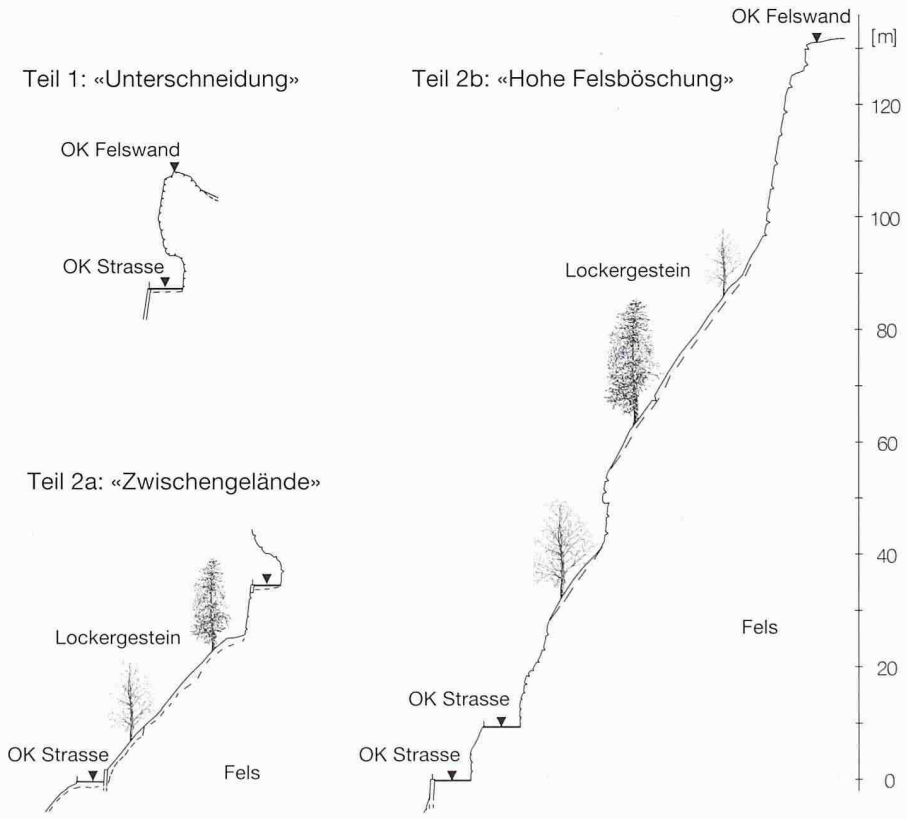
Untersuchungsgebiet

Die zu untersuchende Felsböschung wurde in ihrer Entstehung hauptsächlich durch einen Nebengletscher des Reussgletschers geprägt. Nach dessen Rückzug setzte die Erosionstätigkeit des Chärstelenbachs ein, der die tiefste, im Nord-Nordwesten gelegene Grenzlinie des Untersuchungsgebiets bildet. Im Süden durch die Felswandoberkante, im Osten und Westen durch Wendeplatten begrenzt, erstreckt sich das Untersuchungsgebiet über rund 60 000 m^2.

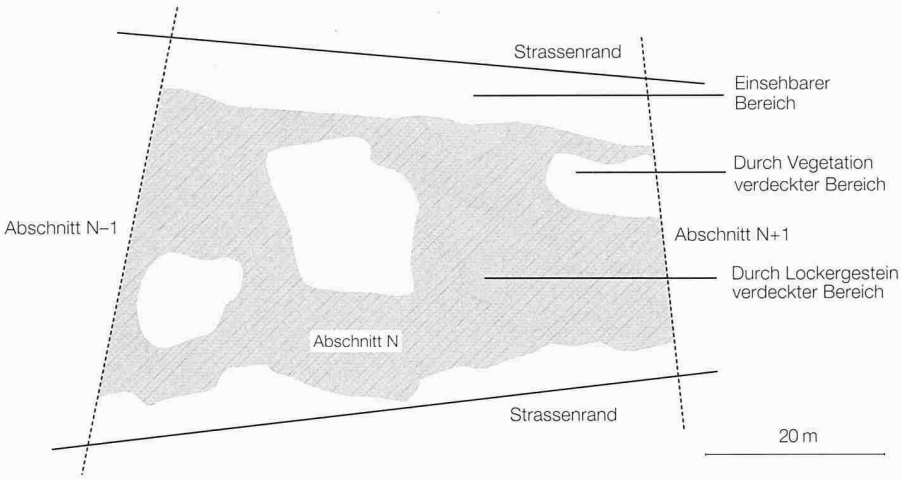
Zur Etappierung der Arbeiten wurde die in Bild 3 festgehaltene Dreiteilung vorgenommen: Teil 1 umfasst die bis 25 m hohe Felswand oberhalb des obersten Strassenabschnitts kurz vor St. Antoni, Teil 2 besteht aus dem Gelände zwischen den beiden obersten Strassenabschnitten (2a) sowie dem Bereich zwischen erster und dritter Wendeplatte (2b); das restliche Gebiet gehört zu Teil 3.

Die in Bild 4 skizzierten Querprofile zeigen den Geländeverlauf; der mittlere Böschungswinkel beträgt im Teil 2a rund 45°, im Teil 2b deutlich mehr. Die lokalen topographischen und geologischen Verhältnisse legten eine feinere Unterteilung entlang der Strasse nahe: die Teile 1 und 2a gliederte man in je vier, den Teil 2b in drei 40 bis 100 m breite Abschnitte. Alle elf Abschnitte wurden 1997 bis 1999 detailliert untersucht, während die Arbeiten im Teil 3 noch im Gang sind.

4
Drei typische Querprofile, wie sie in den Teilgebieten 1, 2a und 2b auftreten



Die Ausdehnung und schlechte Zugänglichkeit des Untersuchungsgebiets, die wegen des waldartigen Bewuchses eingeschränkte Einsehbarkeit und örtliche Bedeckung erschwerten oder verunmöglichten gar eine angemessene Erkundung (Bild 5). Durch Begehung flacherer Bereiche, Aufnahmen an Aufschlüssen vor allem in unmittelbarer Umgebung der Strassenanschnitte und Beobachtungen von der Strasse, vom Gegenhang und vom Helikopter aus versuchte man dennoch, ein möglichst zutreffendes Bild der Fels-



5
Schematische Darstellung der einsehbaren und verdeckten Bereiche im Abschnitt N ober- und unterhalb der Bristenstrasse

oberfläche zu erhalten. Die gesammelten Erkenntnisse aus diesen grösstenteils erratisch verteilten Lokalitäten lieferten wertvolle Hinweise auf die Felsstruktur im unsichtbaren bzw. unzugänglichen Rest des Untersuchungsgebiets. Sie erlaubten wichtige Schlüsse, deren Folgerichtigkeit sowohl innerhalb jedes Abschnitts als auch über die Nachbarabschnitte überprüft wurde. Bereits zu einem frühen Zeitpunkt war ersichtlich, dass für die Planung differenzierter Massnahmen zwischen den Felsaufschlüssen und dem lockergesteinsbedeckten Zwischengelände zu unterscheiden war.

Gesicherte Erkenntnisse

In der zweiten Phase der Untersuchung ging es darum, alle bisherigen Erkenntnisse zusammenzutragen. Hierzu wurden sämtliche registrierten Ereignisse ausgewertet, die topographischen Verhältnisse sowie die Felsstruktur und Hydrogeologie aufgenommen, augenfällig sturzgefährdete Felskörper erfasst und bestehende Sicherungsmassnahmen festgehalten. Die Informationen entstammten eigenen Feldaufnahmen, mehreren Begehungen mit den Geologen und der Auswertung bereits vorhandener Grundlagen.

Registrierte Ereignisse

Eine vom Bauamt nachgeführte Dokumentation gibt Auskunft über Ort, Ausmass, Jahreszeit, Witterung und Schäden zurückliegender Ereignisse. Der im alpinen Raum übliche Steinschlag wurde im Einzelnen nicht protokolliert. Im Laufe des letzten Vierteljahrhunderts verzeichnete man in den Teilen 1 und 2 insgesamt zehn Felsabbrüche mit einem grössten Einzelereignis von 600 m^3. Als aufschlussreich erwies sich eine Begehung mit dem Strassenmeister, der zusätzliche Beobachtungen zu Steinfall und Eisbildung sowie ergänzende Informationen zu weit zurückliegenden Schadenfällen vermitteln konnte.

Topographie

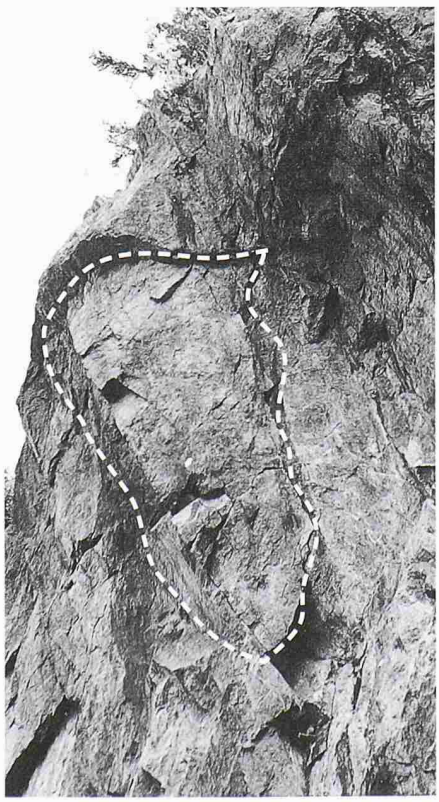
Die Beschreibung der Topographie umfasst neben der Niveauliniendarstellung Erläuterungen zur unmittelbaren Umgebung jedes Teilgebiets und detailliertere Ausführungen zu den Einzelabschnitten. Mit einer solchen Vorgehensweise vom Grossen zum Kleinen wird gewährleistet, dass mit grösster Wahrscheinlichkeit relevante Informationen nicht übersehen werden. Hauptgegenstand der Darstellung bilden der generelle Verlauf der Geländeoberfläche (z.B. metrische Erfassung, Form, Steilheit, Einschnitte) und der Strasse sowie markante Stellen; überdies werden neben der Beschaffenheit des Untergrunds (Fels-/Lockergesteins-/Vegetationsart mit räumlicher Ausdehnung) auch Wasseraustrittstellen vermerkt.

Die beim Bau der Strasse (1910) ursprünglich kahle Felsoberfläche ist heute mehrheitlich von einer vermutlich dünnen Lockergesteins- und Humusschicht bedeckt, weshalb von einer flachgründigen Vegetation auszugehen ist. Grössere Wasseraustrittstellen oder Bäche sind nicht bekannt.

Fels

Beim Gestein handelt es sich um einen Biotit führenden Chlorit-Serizitgneis: im unteren Bereich des Untersuchungsgebiets überwiegen die gebänderten, grobbankigen bis massigen Typen, gegen oben

6
Massgebende Eigenschaften von Trennflächen

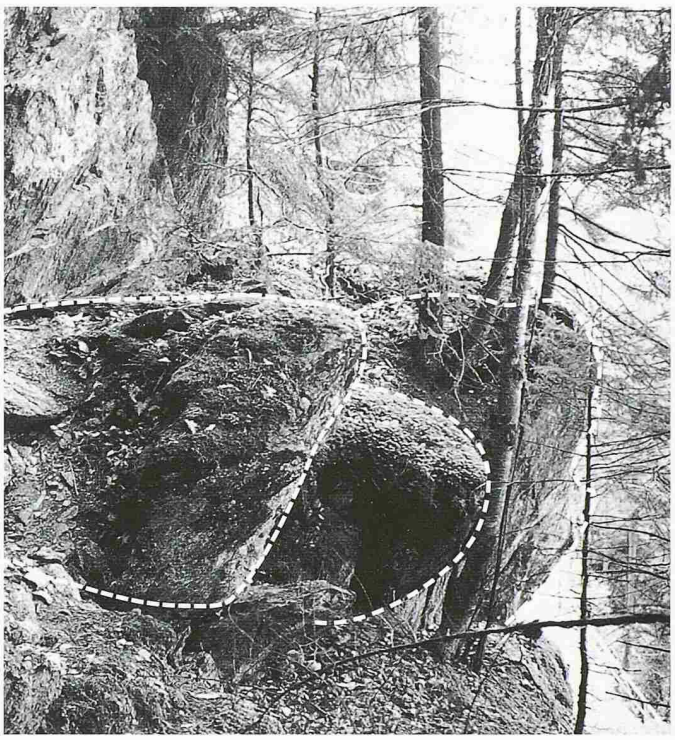


7
Identifizierter «potentieller Bruchkörper» im Teil 1 (V 1 m^3)

Lage, Verteilung:	Position im Raum bzw. Vorkommen
Raumstellung:	Räumliche Orientierung (Fallrichtung/-winkel)
Form:	Äussere Gestalt
Ebenheit:	Beschaffenheit im Makrobereich
Rauhigkeit:	Beschaffenheit im Mikrobereich
Erstreckung:	Räumliche Ausdehnung, erkennbar an der Länge der Ausbisslinie
Materialbrückenlänge:	Länge des Abschnitts zwischen zwei Ausbisslinien derselben Trennfläche
Versatz:	Gegenläufige Verschiebung der Trennflächenränder parallel zur Erstreckung
Abstand:	Normalenabstand zwischen zwei parallelen Trennflächen
Öffnungsweite:	Lichte Weite zwischen Trennflächenrändern
Füllung:	Material zwischen Trennflächenrändern
Verwitterung:	Anzeichen für deren Grad und Tiefe

beobachtet man eine anteilmässige Zunahme der schiefrigen Ausbildungen. Die gesteinsbildenden Mineralien sind Feldspäte und Quarz; untergeordnet und in variablen Anteilen sind auch Glimmer, Chlorit und Biotit vorhanden. Struktur und teils grobkörnige, teils feinkörnig-glimmerreiche Textur lassen erwarten, dass die Gesteinseigenschaften für die Stabilität der anstehenden Felsböschung von untergeordneter Bedeutung sind [3, 4].

Flächen, in denen der Zusammenhalt des Gesteins vollständig aufgehoben oder wesentlich geschwächt ist, werden als Trennflächen bezeichnet. Sie kommen in den bisher untersuchten Teilgebieten in mannigfaltiger Ausprägung vor. Ihre Eigenschaften wurden entsprechend den in Bild 6 aufgelisteten Aspekten erfasst. Anschliessend gruppierte man alle bekannten Elemente des Trennflächengefüges in fünf Kluftscharen (= Gruppen paralleler Klüfte), zwei Schieferungsarten und acht Einzelstörungen. Insgesamt weisen die meisten Trennflächen einen variablen Streubereich der Raumstellung auf; einige kommen nur in Einzelfällen vor, andere deuten auf eine Verkippung kleinerer Felspakete hin. Die ähnlichen Merkmale in unterschiedlichen Böschungsbereichen legen den Schluss nahe, dass auch in den verdeckten Bereichen die gleichen Trennflächen vorliegen. Die Eigenschaften jeder Art wurden abschnittsweise dokumentiert, wobei man Wasseraustritte aus dem Trennflächengefüge speziell vermerkte. Eine direkte, klar erkennbare Fortsetzung markanter Trennflächen in angrenzende Abschnitte konnte nicht festgestellt werden.



8
Drei klar erkennbare «labile Blöcke» im Teil 2a (V 0,5 bis 4 m^3)

Sturzgefährdete Felskörper

Folgende zwei Arten sind zu unterscheiden: «potentielle Bruchkörper» (Bild 7) und «labile Blöcke» (Bild 8). Unter einem «potentiellen Bruchkörper» verstehen wir einen Felskörper in einem Aufschluss, an dessen Kontaktflächen zum anstehenden Fels die Beanspruchung die Grenze der Scherfestigkeit erreichen kann. Sind die an ihm angreifenden Kräfte nicht mehr im Gleichgewicht, so kommt es zu einer Ablösung. Demgegenüber ist ein «labiler Block» ein Felskörper, der seine ursprüngliche Lage bereits gewechselt hat. Sind die an ihm angreifenden Kräfte nicht mehr im Gleichgewicht, so gleitet oder kippt er talwärts.

Die Felskörper wurden nach folgenden Gesichtspunkten aufgenommen: Lage, Art, unmittelbare Umgebung, Form bzw. begrenzende Trennflächen, Grösse, Eigenschaften, Versagensmechanismen und -risiko, Zugänglichkeit, mögliche Sicherungsmassnahmen. Ein besonderes Augenmerk galt der Trennung zwischen direkt wahrnehmbaren und gefolgerten oder vermuteten Tatsachen. Anzeichen, dass die in den zumindest einsehbaren Bereichen nachweisbar vorhandenen Fakten nicht auf die unzugänglichen, verdeckten übertragen werden dürften, konnten nirgendwo gefunden werden.

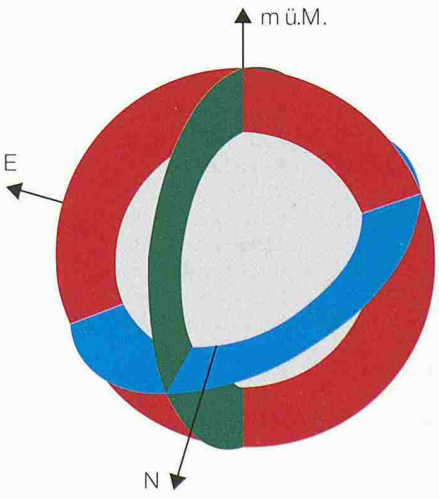
Bestehende Sicherungsmassnahmen

Seit dem Bau der Bristenstrasse ordnete man im Untersuchungsgebiet, sei es an einzelnen Stellen entlang der Strasse, sei es in der Böschung dazwischen, wiederholt Arbeiten zur Abwendung erkannter Gefahren an, die in ihrer Gesamtheit keinen systematischen Ansatz erkennen lassen. So wurden zum Beispiel einzelne Bäume entfernt, die Felswände periodisch entlang vertikaler Linien gereinigt und örtlich Betonstützkörper, Stütz- und Trockenmauern, Spritzbetonschalen, Felsanker, Zäune gegen Steinschlag oder Eisfall und Drainagen erstellt. Alle diese Massnahmen wurden hinsichtlich Lage, Ausgestaltung und Beständigkeit festgehalten und auf einen möglichen Einbezug in das zukünftige Sicherungskonzept geprüft.

Felskörperanalyse

Sie umfasst Betrachtungen zur Kinematik sturzgefährdeter Felskörper sowie Aussagen zur Wahrscheinlichkeit, einen Schaden durch solche zu erleiden. Als Erstes sind rein geometrische Überlegungen zu deren Form und Grösse anzustellen, ohne jeglichen Bezug auf bereits aufgenommene Felskörper oder angreifende Kräfte. Bei der Prognose von Versagensmechanismen wird eine konsequente Trennung zwischen theoretisch begründbaren Möglichkeiten und Hinweisen zum direkt kaum beobachtbaren Verhalten angestrebt. Präzise Aussagen zum Risiko, das die Wahr-

9
Anschauliche Darstellung der Trennflächenebenen in einer Kugel (grau = Fels) mit Schieferung (rot) und zwei Trennflächenscharen (grün, blau)



Steinfall:	Stein	$V \leq 0{,}5\ m^3$
Blocksturz:	Kleiner Block	$0{,}5 \leq V \leq 10\ m^3$
Felssturz:	Grosser Block	$10 \leq V \leq 10\,000\ m^3$
Bergsturz:	Felsbereich	$V > 10\,000\ m^3$

10
Bezeichnung von Felskörpern nach ihrer Grösse [7]

scheinlichkeit eines Schadenfalls miteinschliesst, sind aus verschiedenen Gründen nicht möglich. Um dennoch die Eintretenswahrscheinlichkeit und das absehbare Schadensausmass grob einzuschätzen, wurden einige grundsätzliche Überlegungen angestellt.

Form und Grösse

Die Form eines «potentiellen Bruchkörpers» ergibt sich einerseits aus der Lage, Raumstellung, Form und Erstreckung der Trennflächen, anderseits aus der Topographie. Um bei der Vielzahl von Trennflächen und der Variationsbreite ihrer Eigenschaften nicht den Überblick zu verlieren, sind vereinfachende Betrachtungen notwendig. So wird beispielsweise angenommen, jede Trennfläche einer Schar sei eben und weise eine mittlere scharspezifische Raumstellung sowie eine unbegrenzte Kontinuität auf (Bild 9). Legt man durch den Mittelpunkt einer aus Fels bestehenden Einheitskugel eine Trennfläche pro Schar, so lassen sich durch systematisches Kombinieren alle denkbaren Bruchkörperformen finden [1]. Auf eine Untersuchung von Bruchkörpern mit mehr als vier Trennflächen wurde verzichtet, weil nirgendwo solch komplex aufgebaute Felskörper beobachtet wurden. Kinematisch mögliche Bruchkörper mit einer zusammenhängenden Ausbisslinie auf der Felsoberfläche fanden - getrennt in «nicht beobachtbare» und «beobachtbare» Formen - Eingang in eine Zusammenstellung pro Abschnitt. Die unterschiedliche Grösse «potentieller Bruchkörper» erfordert eine Einteilung in Kategorien (Bild 10). Üblicherweise wird vom Körpervolumen V vor dem Versagen ausgegangen, wobei die Bezeichnung das potentielle Ereignis versinnbildlicht. Das Volumen nach dem Niedersturz, das infolge der Beanspruchung während der Verschiebung vom ursprünglichen abweicht, ist von untergeordnetem Interesse. Den erwähnten Formen wurde je eine maximale Grösse zugewiesen.

Im Gegensatz zu den «potentiellen Bruchkörpern», bei denen Trennflächen - sichtbar als Ausbisslinien - die Begrenzungsflächen bilden, können Form und Grösse «labiler Blöcke» nur anhand ihrer freiliegenden Oberfläche abgeschätzt werden. Blockteile unter Vegetation und Lockergestein entziehen sich der Beobachtung, was eine Formbezeichnung oder Volumenbestimmung verunmöglicht. Die Beschreibung der Form beschränkt sich daher auf anschauliche Begriffe wie kubisch, kugelförmig, plattig, während man die sichtbare und damit minimale Grösse entsprechend Bild 10 abstuft.

Versagensmechanismen

Unter Berücksichtigung all dieser Umstände ergeben sich für die «potentiellen Bruchkörper» die ersten vier der in Bild 11 aufgeführten Versagensmechanismen. Bei den «labilen Blöcken» spielt zusätzlich die Untergrundbeschaffenheit und Ausgestaltung der Auflagefläche eine wichtige Rolle; so sind Phänomene ähnlich einem Grundbruch denkbar, während Abblättern und Ablösen kaum vorkommen. Kombinationen verschiedener Mechanismen sind möglich. Bei der Analyse des Kräftespiels wurde vom Ist-Zustand ausgegangen; zukünftigen Auslösern hat man gesonderte Aufmerksamkeit geschenkt. Auf eine bodenmechanische Stabilitätsanalyse wurde wegen fehlender Anzeichen verzichtet.

Risiko

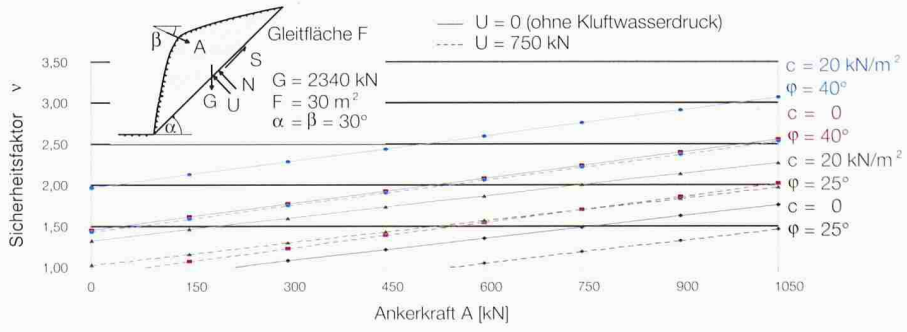
Im Hinblick auf eine denkbare schrittweise Umsetzung der geplanten Massnahmen besteht ein Bedürfnis, Aussagen zur Wahrscheinlichkeit des Eintretens und dem Ausmass des möglichen Schadens zu formulieren. Man will damit das Risiko, einen Schaden zu erleiden, quantifizieren. Den einfachsten Ansatz hierzu liefert das Produkt von Eintretenswahrscheinlichkeit und Schadensausmass [5].

Eine Durchsicht der registrierten Ereignisse ergibt, dass eine quantitative Bestimmung der Wahrscheinlichkeit nicht möglich ist. Die Begründung liegt einerseits in der kurzen Beobachtungsspanne (seit 1972), anderseits wurden nur Ereignisse ab Blocksturz vermerkt, obschon Steinfall mit einer Wiederkehrperiode «wöchentlich» bis «täglich» auftritt. Die Empfehlungen zur Dringlichkeit konstruktiver Massnahmen beruhen auf einer qualitativen Schätzung: wenn in absehbarer Zeit mit einer Instabilität eines Felskörpers gerechnet werden muss, ist die Eintretenswahrscheinlichkeit hoch, im langfristigen Fall gering. Das Schadensausmass beinhaltet die Gesamtheit aller Kosten, die sich aus einem Ereignis erge-

11
Beobachtete oder denkbare Versagensmechanismen

Abblättern:	Kleiner dünner Felskörper löst sich v.a. in leicht überhängenden Partien vom Untergrund
Ablösen:	Felskörper löst sich in überhängenden Partien nach Erreichen der Zugfestigkeit in der Kontaktfläche zum anstehenden Fels
Gleiten:	Felskörper verschiebt sich parallel zu einer Auflagefläche oder zur Schnittlinie zweier Auflageflächen, wobei mindestens eine Kontaktfläche zum Untergrund bestehen muss
Kippen:	Felskörper rotiert um eine Kippachse
«Grundbruch»:	Scherfestigkeit im Lockergestein unter der Auflagefläche lokal überschritten

12
Sicherheitsfaktor v in Funktion der Ankerkraft A für den Fall des Abgleitens auf einer Ebene



ben. Je nach Ort der Instabilität, Ausmass, Gelände- und Strassenverlauf wird eine Sturzmasse die Strasse nicht, ein- oder mehrfach tangieren, so dass quantitative Voraussagen zur Höhe eines Personen- oder Sachschadens mit erheblichen Unsicherheiten behaftet sind. Im vorliegenden Fall kann somit das Schadensausmass nur qualitativ als klein oder gross bestimmt werden. Zudem müsste man auch das Sperren der Strasse fiskalisch erfassen.

Damit liegt der Schluss nahe, dass für jeden identifizierten sturzgefährdeten Felskörper - unabhängig des eingeschätzten Risikos - die Anordnung konstruktiver Massnahmen geprüft werden muss. Für die Festlegung deren Dringlichkeit sind zusätzlich übergeordnete Überlegungen anzustellen.

Berechnungen

Im Hinblick auf das geplante Vorprojekt wurde nach bewährten Methoden beispielhaft ein rund 25 m³ grosser «potentieller Bruchkörper» auf Gleiten untersucht [6]. Ziel der Stabilitätsberechnung war, den Einfluss verschiedener Annahmen auf seine Standsicherheit aufzuzeigen sowie die Ankerkraft für eine begründete Wahl von Parametern zu bestimmen. Es wurde mit und ohne Kluftwasserdruck in der Gleitfläche gerechnet. Das Ergebnis der Sensitivitätsanalyse hat man in Diagrammen wie Bild 12 dargestellt. Sie erlauben dem projektierenden Ingenieur, rasch die Bandbreite der Anzahl Anker abzuschätzen.

Um überschlägig die Eignung von Steinschlagzäunen und Schutzgalerien zu prüfen, wurden zusätzlich Sturzenergieberechnungen nach [7] mit einfachen Annahmen für die Felskörperform, -grösse, Topographie, Untergrundbeschaffenheit entlang der Sturzbahn usw. durchgeführt; auf ausgedehnte Steinschlagsimulationen hat man bewusst verzichtet.

Ergebnisse

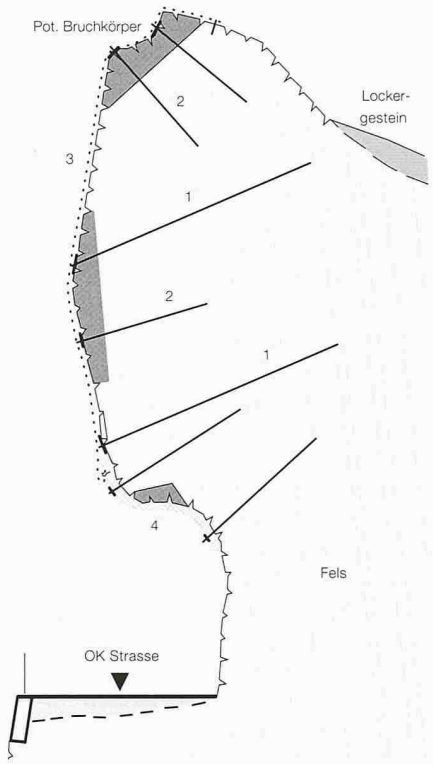
Die Analyse der geotechnischen Gegebenheiten in den Teilgebieten 1 und 2 führte zu folgenden Erkenntnissen:

- Die Form «potentieller Bruchkörper» wird hauptsächlich durch die Schieferung in Kombination mit ein bis zwei Klüften bestimmt, jene der «labilen Blöcke» ist uneinheitlich.
- Die Grösse der Felskörper beträgt im Ausnahmefall 250 m³ und liegt mehrheitlich im Blocksturzbereich. In der hohen Felsböschung von Teilgebiet 2b ist mit einem Einzelkörpervolumen von 10 m³ zu rechnen; dies entspricht der Erfahrung der letzten 30 Jahre, blieben doch in der Aufprallzone Körper von 0,5 bis 6 m³ liegen. Steinfall ist überall möglich, während für einen potentiellen Bergsturz kein adäquates Beispiel gefunden werden konnte.
- Die Versagensmechanismen sind vornehmlich Abblättern und Kippen der Schieferung. Der bisherigen Erfahrung entsprechend fehlen Hinweise auf denkbare instabile Lockergesteinspakete.
- Das Risiko eines Niederstürzens identifizierter Felskörper ist insgesamt erheblich.
- Die Berechnungen ergeben, dass die Aufprallgeschwindigkeit eines 10 m³ grossen Bemessungskörpers aus einer Höhe von 70 m im untersten Strassenabschnitt von Teil 2b über 30 m/s, die Aufprallenergie mehr als 10 000 kJ und die Sprunghöhe bis 5 m betragen.

Sicherungskonzept

Das Sicherungskonzept trägt der bekannten, der Aufgabe innewohnenden Schwierigkeit Rechnung, ausreichend genaue Aussagen über die tatsächliche Struktur einer natürlichen Felsböschung zu formulieren. Eine mit dem notwendigen Sachverstand und Sorgfalt vorgenommene Untersuchung kann zwar mit zunehmendem Aufwand vorhandene Unwägbarkeiten reduzieren, niemals aber das immanente Restrisiko eliminieren. Diese Problematik führt zum Schluss, dass bei der vorliegenden Aufgabe grundsätzlich gut abgestützte, in ihrer Wirkung breit greifende Massnahmen anzustreben sind, die die Stabilität sturzgefährdeter Felskörper erhalten oder die Auswirkungen einer Bewegung minimieren. Ein grober Überblick über deren Wirksamkeit [7] zeigt, dass das gewünschte Mass an Sicherheit nur mit einer Kombination aktiver und passiver Massnahmen erreicht werden kann. Erstere setzen beim Felskörper an, indem man ihn sichert bzw. entfernt oder spezielle Lastfälle verhindert; Letztere suchen die Strasse durch Auffangen oder Umleiten des Sturzkörpers zu schützen. Dazwischen liegen erhebliche Unterschiede in Bezug auf den Aufwand, die Kosten und den Gewinnn an Sicherheit. Ausserdem sind die angestrebte Sicherheit im Bauzustand, die Ausführbarkeit und der Landschaftsschutz in die Überlegungen miteinzubeziehen.

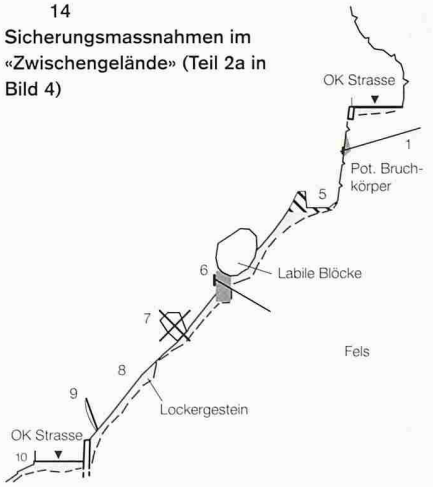
Die schematischen Darstellungen in den Bildern 13 und 14 stellen das ausgearbeitete Sicherungskonzept in zwei typischen Querschnitten dar. Im Teilgebiet 2a (Bild 14) mit Lockergestein und Vegetation ist in kleinräumigen Felsaufschlüssen eine Ankerung wie in Teil 1 geplant. In den



1 In mehreren Lagen systematisch angeordnete, vollvermörtelte, korrosionsfeste Anker, um ein Abblättern und Kippen entlang der Schieferung zu verhindern.
2 Kurze lokal angeordnete, vollvermörtelte, korrosionsfeste Anker, um einzelne, von der systematischen Ankerung nicht erfasste Felskörper zu fixieren.
3 Steinschlagnetze, um flächenhaft Steinfall zu unterbinden (lokal auch Steinschlagzaun möglich).
4 Armierte Spritzbetonschicht mit kurzen Ankern, um in unterschnittenen Bereichen Steinfall zu verunmöglichen.

13
Sicherungsmassnahmen im Bereich der «Unterschneidung» (Teil 1, Bild 4)

14
Sicherungsmassnahmen im «Zwischengelände» (Teil 2a in Bild 4)



5 Je nach Geländeverlauf Aushub eines Grabens, um Steine zurückzuhalten.
6 Unterfangung von «labilen Blöcken» mit Beton bzw. Zurückbindung mit korrosionsgeschützten Ankern.
7 Abtrag von «labilen Blöcken».
8 Fällen grosser Bäume, um Wurzeldruck und Sturmschäden zu vermeiden (Büsche als kleinräumiger Erosions-/Steinfallschutz sind erwünscht).
9 Steinschlagzaun oberhalb des unteren Strassenabschnitts, um herunterrollende Steine aufzufangen; seine Ausgestaltung hängt direkt vom Volumen der gesicherten «labilen Blöcke» und dem Vorhandensein einer Sicherung bei 5 ab.
10 Entlang der Strasse wird das Wasser gefasst und abgeleitet.

verdeckten Bereichen ist ebenfalls mit «potentiellen Bruchkörpern» zu rechnen, doch legt die Geometrie der Geländeoberfläche in Bezug auf die Raumstellung der Trennflächen den Schluss nahe, dass sie nur in Ausnahmefällen sturzgefährdet sein können; dies wird durch die bisherige Erfahrung bestätigt.

Im Teilgebiet 2b wurde eine grosse Zahl sturzgefährdeter Felskörper identifiziert. Ihre Sicherung mit Massnahmen in der 130 m hohen Böschung wurde aus drei Gründen verworfen: erstens, weil die grosse Anzahl Felskörper sehr aufwendige Arbeiten im schwer zugänglichen Gelände notwendig machen würde, zweitens, weil umfangreiche temporäre Massnahmen zur Gewährleistung der Sicherheit im Bauzustand erforderlich wären und drittens, weil trotz hohem Kostenaufwand nicht alle Bruchkörper- und Blockkonfigurationen erkannt würden. Als Varianten kommen nur der Bau einer Galerie oder eines Umfahrungstunnels in Frage. Beiden Lösungen gemein ist der Vorteil, dass Bauarbeiten ausschliesslich im Strassenbereich auszuführen sind und die Dauerhaftigkeit bei geringerem betrieblichem Unterhalt höher ist. Beim Tunnel ist die Einpassung in die Umgebung leichter.

Im Hinblick auf das Energieaufnahmevermögen einer Galerie von 3000 kJ nach [8, 9, 10] darf festgehalten werden, dass die Bemessungswerte von 10 000 kJ eine wirtschaftlich vertretbare konstruktive Gestaltung kaum zulassen. Angesichts dieser Schwierigkeiten erweist sich ein mindestens 250 m langer Tunnel als zweckmässige Lösung zur Umgehung der Gefahrenzone im östlichsten Teil des Untersuchungsgebiets (erste Wendeplatte).

Schlussfolgerungen

Bei der vorliegenden Studie hat sich ein streng methodisches Vorgehen infolge der längenmässigen Erstreckung der Strasse und der flächenmässigen Grösse des Untersuchungsgebiets als notwendig erwiesen. Die umfassende Dokumentation des angetroffenen Zustands der Felsböschung schaffte die Voraussetzung für die Planung der vorgeschlagenen Massnahmen und erlaubt nun ihre schrittweise Umsetzung. Das nicht nur punktuell, sondern breit angelegte Sicherungskonzept gewährleistet eine wesentliche Erhöhung der Sicherheit bei wirtschaftlich vertretbarem Aufwand. Im Gebiet der ersten Wendeplatte wird die Umgehung der Gefahrenzone als die kostengünstigste Lösung angesehen.

Trotz der methodischen, bis in Einzelheiten gehenden felsmechanischen Untersuchungen müssen die vorgelegten Erkenntnisse mit einem gewissen Vorbehalt betrachtet werden, da der anstehende, teilweise unter Lockergestein und Vegetation verborgene Fels mit seinen sich in die Tiefe erstreckenden Diskontinuitäten nicht ausreichend erfasst werden kann. In Einzelfällen bleibt ein mehr oder weniger grosser Ermessensspielraum bestehen. Die damit verbundene Ungewissheit der Prognose wird bei der Anordnung der konstruktiven Massnahmen berücksichtigt.

Adresse der Verfasser:
Stefan Bergamin, dipl. Ing. ETH/SIA, *Peter Kirchhofer*, dipl. Ing. ETH/SIA, *Raffaele Filippini*, dipl. Ing. ETH/SIA, Institut für Geotechnik, Professur für Untertagbau, ETH-Hönggerberg, 8093 Zürich

Literatur

[1] *Kovári K., Bergamin S., Kirchhofer P., Reichmuth, R.*: Felsmechanische Untersuchungen zur Gefährdung der Bristenstrasse. Bericht, Institut für Geotechnik, Professur für Untertagbau, ETH Zürich, 14.4.1998

[2] *Kovári K., Bergamin S., Kirchhofer P., Filippini R.*: Felsmechanische Untersuchungen zur Gefährdung der Bristenstrasse. Bericht - Teil 2, Institut für Geotechnik, Professur für Untertagbau, ETH Zürich, 15.5.1999

[3] *Schneider T.R.*: Ausbau Bristenstrasse, Geologische Grundlagen. Dr. T.R. Schneider AG, Uerikon, 31.5.1997

[4] *Schneider T.R., Bollinger D.*: Beurteilung der Gefährdung durch Sturzprozesse und mögliche Massnahmen. SKH, Stans, Nidwalden, 12.8.1998

[5] *Schneider J., Schlatter H.P.*: Sicherheit und Zuverlässigkeit im Bauwesen. Verlag der Fachvereine, Zürich, B. G. Teubner, Stuttgart 1994

[6] *Kovári K., Fritz P.*: Böschungsstabilität mit ebenen, keilförmigen und polygonalen Gleitflächen. Rock Mechanics, Suppl. 8, Springer-Verlag, Wien New York 1979

[7] Ingenieurbüro Heierli AG: Schutz gegen Steinschlag. Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute (VSS), Bern 1985

[8] *Bucher K.*: Dynamische Berechnungen von Steinschlageinwirkungen. Mitteilung 135, Schweizerische Gesellschaft für Boden- und Felsmechanik, Herbsttagung Montreux 1997

[9] Bundesamt für Strassen/Baudirektion GD SBB: Dokumentation Planung, Bau und Unterhalt gegen Steinschlag- und Lawineneinwirkungen. Eidg. Drucksachen- und Materialzentrale, Bern 1998

[10] Bundesamt für Strassen/Baudirektion GD SBB: Einwirkungen auf Steinschlagschutzgalerien, Richtlinie. Eidg. Drucksachen- und Materialzentrale, Bern 1998