FELSSTÜRZE ISOLIEREN EIN TAL ZUR AUSSENWELT

Dr. Ruedi Krähenbühl, Dipl.-Bauing. (ETH) Curdin Bischoff und Dipl. natw. (ETH) Christoph Nänni, Chur, Dipl.-Ing. (HTL) Sven Fehler, Bellinzona, Dipl.-Bauing. (FH) Marco Weisshaupt, Mesocco – Schweiz

Eine beschleunigt bewegte Felsmasse drohte im Südosten der Schweiz eine Brücke als Tor in das Calancatal zum Einsturz zu bringen und die Bewohner von der Umwelt zu isolieren. In 2 Jahren realisierte man unter schwierigen Randbedingungen einen Umfahrungstunnel. Das Kernstück beinhaltete den sprengtechnischen Vortrieb, ohne die labile Felsmasse durch Immissionen zum Absturz zu bringen. Bereits 1/2 Jahr nach der Eröffnung riss am 3. Februar 2006 ein Felssturz von 20.000 m³ die alte Brücke in die Tiefe. Eine 10 Jahre dauernde, messtechnische Überwachung ermöglichte die präzise Vorhersage des Felssturzes und das bildliche Festhalten des dramatischen Ereignisses.

Nur 16 Monate später ereignete sich ca. 6 km taleinwärts, oberhalb eines Steinbruchs, ein Felsabbruch von ca. 200.000 m³. Die Straße in das Tal musste gesperrt und eine neue Verkehrsführung gefunden werden. Auch dieses Ereignis konnte präzise vorhergesagt werden und der Einfluss des Menschen als Verursacher wurde in der Ereignisanalyse deutlich.



Abb. 1: Der heutige Tunnel umfährt beide Felsrippen und dazwischen den später abgefahrenen Felssturz

Tunnel umgeht das Tal der Hölle

In der Südabdachung Graubündens führt die Zufahrtsstraße vom Misox über eine 2 Tunnel verbindende Brücke in das Calancatal (Abb. 1). Die südliche Felsrippe des Val d'Infern ist stark entfestigt und verursachte jährlich Blocksturz.

Auf Grund von geologischen Abklärungen war langfristig mit einem Felssturzpotenzial bis 30.000 m³ Gneis zu rechnen. Die geodätischen Messungen ergaben seit 1995 Bewegungen von 20 mm/Jahr mit beschleunigender Tendenz (Abb. 2). Das Risiko einer im Ereignisfall plötzlich fehlenden Brücke und von bei Nacht ins Nichts stürzenden Automobilen, verhinderte man mit einer messtechnisch automatisierten Straßensperrung.

Umgang mit Felssturzrisiko

Periodischen Gefahrenanalysen und Risikoabschätzungen wurden im Laufe der Zeit verschiedene Interventionsvarianten gegenüber gestellt. Den Entscheid, die Gefahrenstelle mit einem Tunnel zu umfahren erfolgte 2003 (Abb. 3), nachdem fest stand, dass in 1–3 Jahren mit dem Abbruch von > 3.000 m³ Fels zu rechnen war. Gemäß Ingenieuruntersuchungen konnte bereits ein kritischer Treffer eines 2 m³ Blocks aus 30 m Fallhöhe die Brücke zum Einsturz bringen (Abb. 4). Als Sofortmaßnahme gegen dieses Gefährdungsbild stellte man eine Hilfsbrücke bereit, die im Ereignisfall zwischen die beiden Tunnel eingeschoben werden konnte. Auch dann war noch mit einem Unterbruch der Straßen von 1–2 Monaten zu rechnen.

Vortrag auf dem 6. Kolloquium
„Bauen in Boden und Fels", 22./23.1.2008
an der Technischen Akademie Esslingen (TAE)



Abb. 2: Die alte Straße querte beide Felsrippen mit 2 Tunneln, welche die Brücke Val d'Infern verband

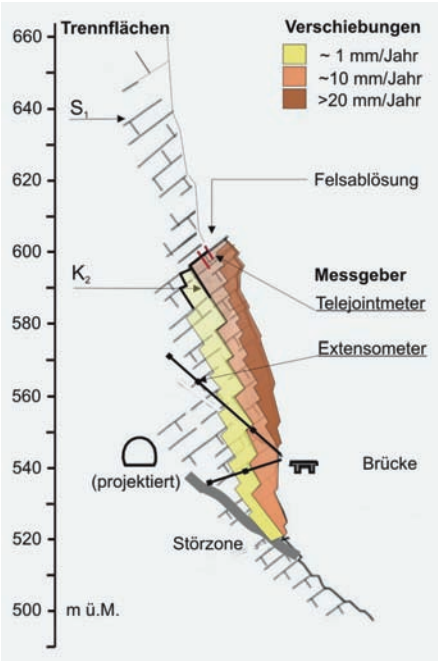


Abb. 3: N-S Profil der instrumentierten, instabilen Felsrippe mit Brücke und Lage des projektierten Tunnels

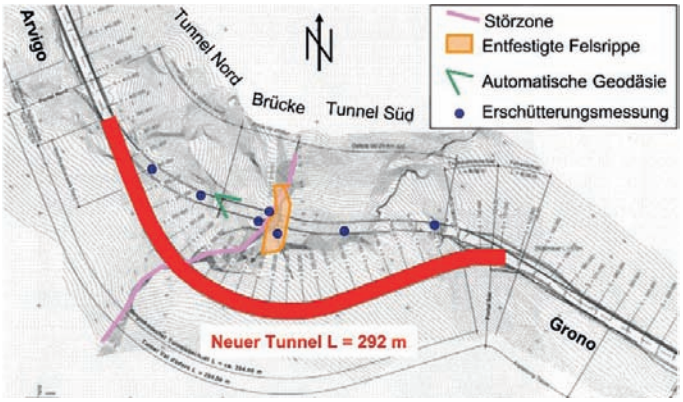


Abb. 4:
Der Sprengvortrieb 30 m hinter der instabilen Felsmasse erfolgte unter intensiver Überwachung

Dank detaillierter geologischer Abklärungen und einer mehrschichtigen, messtechnischen Überwachung konnte der Prozess der Felsentfestigung in diesem spröden Gebirge verstanden werden. Die Abhängigkeit der Felsbewegungen zu den Jahrestemperaturwechseln und Niederschlägen wurden über Jahre beobachtet. Sinkende Temperaturen lösten im Herbst Deformationen bis 5 mm/Tag aus. Bei Überlagerung durch Niederschläge wurden diese bis Faktor 2 erhöht. Im Sommer kam es mit steigenden Temperaturen zu einer Ruhephase und der Kluftwasserdruck von Sommergewittern konnte diese nicht mehr beeinflussen [1].

Projektrisiken unter Zeitdruck

Um die Verbindung und die Sicherheit des Verkehrs in das Calancatal zu gewährleisten, erwies sich die Variante eines 290 m langen Umfahrungstunnels als kostengünstiger, verglichen mit dem Ausbau einer Forststraße auf der gegenüberliegenden Talseite.

Das Tunnelprojekt sah vor, die potenzielle Sturzmasse in nur 30 m Tiefe zu hinterfahren. Im Süden entstand ein neues Portal und im Norden mündete der Tunnel spitzwinklig in den bestehenden ein. Die alte Steinschlaggalerie des Nordportals musste abgebrochen und ersetzt werden.

Das hufeisenförmige Normalprofil mit einer Fahrbahnbreite von 7 m wies einen Ausbruchquerschnitt von 65–68 m² auf (Abb. 5). Die Gewölbesicherung erfolgte mit Spritzbeton, Netzen und Ankern. Eine flächenhafte Abdichtung fehlte. Gebirgswasser von lokalen Nassstellen leitete man mit einer Folie gezielt zur Sohle ab. Die Entwässerung erfolgte im Mischsystem. Die Werkleitungen wurden in den Banketten geführt. Auf ein Innengewölbe verzichtete man wegen des gefahrenbedingten Zeitdrucks [3].

Auf Grund der geologischen Risikobeurteilung strebte man mit einem steigenden Vortrieb möglichst rasch den Tunneldurchstich an. Im Falle eines verfrühten Felsabbruchs war vorgesehen, den Innenausbau unter 1-spurigem Verkehr zu realisieren. Dies erforderte ein Projekt, welches verschiedene Szenarien berücksichtigen konnte.

Erschwerte Randbedingungen, wie enge Platzverhältnisse, der Bau unter Verkehr, die Baustelleninstallationen auf einer Straßenhälfte, die Möglichkeit einer beidseitig autonomen Baustellenversorgung für den Ereignisfall, der spitzwinklige Anschluss des Tunnels an den bestehenden, etc., bildeten die Kernstücke und erforderten eine umsichtige Planung. Innerhalb eines knappen Jahres mussten verschiedene Projektstufen, wie Auflage-, Genehmigungs-, Bau- und Submissionsprojekt inklusive Ausschreibung der Bauarbeiten bewältigt werden und die knappe Planungszeit durfte die Qualitätsansprüche nicht beeinträchtigen.

Um mit dem Sprengvortrieb nicht einen Felsabsturz zu provozieren, wurde der Tunnelausbruch auf die sommerliche Ruhephase der Gebirgsverschiebungen zwischen Mai und September gelegt. Das Zeitfenster war kurz und gab die Termine für die Projektierungsarbeiten vor. Um die Erschütterungen zu minimieren war trotz der guten Felsqualität ein Kalottenvortrieb mit 3–4 m langen Abschlägen und in Nähe der instabilen Felsmasse mit reduzierten von 1 m vorgesehen. Der Strossenabbau sollte erst nach dem Durchstich erfolgen.

Das bestehende Monitoring der instabilen Felsrippe wurde mit einer Verdichtung der Messpunkte und mit einer automatischen, geodätischen Vermessung für das optimale Beherrschen der kritischen Bauphasen ausgebaut. Alle Messdaten unterzog man über einen zentralen PC einer kritischen Grenzwertüberprüfung. Bei Überschreiten der Schwellenwerte wurden ein Baustellenalarm und die Straßensperrung ausgelöst. Via Internet hatten alle am Bau Beteiligten den aktuellen Datenzugriff.

Für den ungünstigsten Fall einer verfrühten Brückenzerstörung klärte eine Studie, ab welchem Vortriebsstand ein beschleunigter Vollausbruch den kürzeren Verkehrsunterbruch als das Einschieben der vorbereiteten Hilfsbrücke ermöglichen würde.

Handhabung der Ausführungsrisiken

Der 1-spurig durch die Baustelle rollende Verkehr mit den täglich vom Steinbruch Arvigo kommend, voll beladenen Sattelschleppern behinderte die Bauabläufe enorm. Um Platz zu gewinnen, wurde zuerst der Voreinschnitt Süd ausgebrochen. Ungünstige Felsverschneidungen führten wiederholt zu Niederbrüchen und erschwerten die vorgesehenen Ankerarbeiten.

Damit in dem kurzen Tunnel rasch die notwendige Vortriebsleistung erreicht werden konnte, mussten die Arbeitsabläufe des Sprengvortriebs laufend optimiert werden. Die zulässige Sprengstoffmenge und der Bohrraster wurden mit Hilfe der entlang beider Tunnels, der Brücke und des labilen Felsens vorgenommenen Erschütterungsmessungen festgelegt. Die Ergebnisse erlaubten schon nach Kurzem die Umstellung vom Kalottenvortrieb auf einen rascheren Vollausbruch. Lediglich wo bei Ausbruchsbeginn die Gneisbänke im Streichen der instabilen Felsrippe verliefen, lag man vereinzelt über den vorgegebenen Richtwerten.

Abb. 5:
Ab 2003 wurde die Zunahme der Geschwindigkeit deutlich, begleitet von jährlichem Blocksturz – zerrissenes Portal 1/2 Stunde vor dem Felsbruch

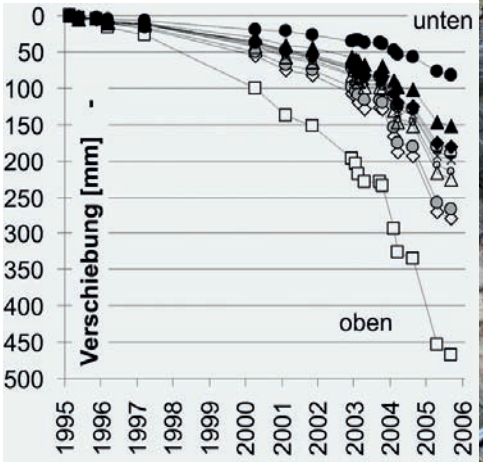






Abb. 6: Das Verzweigungsbauwerk beider Tunnel



Abb. 7: Das Gewährleisten der Arbeitssicherheit während des Baus unter Verkehr war sehr anspruchsvoll

Mit Ausnahme des Abschnitts einer kurzen Störzone erreichte die Vortriebsleistung 30 bis 40 m pro Woche. Am 7. Oktober 2004 konnte zeitgerecht der Durchstich gefeiert werden, d.h. knapp vor den jeweils im Herbst einsetzenden Felsdeformationsschüben. Das aus dem bestehenden Tunnel mit Stahlbögen ausgeführte Verzweigungsbauwerk im Norden musste in verkehrsfreien Zeitfenstern zwischen 20.30 und 5.00 Uhr erfolgen (Abb. 6). Um Mitternacht ermöglichte ein kurzes Fenster den Bewohnern die Rückkehr ins Tal. Unerwartet starke Wassereinbrüche während der Novembernieder-schläge erforderten größere Flächen von Abdichtungen.

In den Weihnachtsferien konnte der Verkehr während der stärksten Felsdeformationsperiode bereits sicher im neuen Tunnel provisorisch geführt werden. Auf Grund anhaltend starker Deformationen wurde dies bis Mitte Februar verlängert, was die Abdichtungs- und Spritzbetonarbeiten stark behinderte.

Der Abbruch der Galerie und der Bau des neuen Portalbauwerks Nord unter dem über enge Radien geführten Schwerverkehr erforderte höchste Ansprüche an die Arbeitssicherheit (Abb. 7). So musste beispielsweise ein zu hoch beladener, im Gerüst verkeilter Lkw durch Ausgraben wieder befreit werden.

Felssturz als happy-end

Nach einer höchst anspruchsvollen Bauzeit und ständigen Verkehrsbehinderung wurde am 28. September 2005 die Eröffnung des von der Bevölkerung ersehnten Umfahrungstunnels gefeiert. In lediglich $2^1/_2$ Jahren gelang es ohne Unfälle und ohne provozierten Kollaps der instabilen Felsmasse das Bauwerk zeit- und fachgerecht fertigzustellen, eine für alle Beteiligten stolze Leistung.

Nur $^1/_2$ Jahr nach der Eröffnung wurde auf eindrückliche Art und Weise zur Gewissheit, dass der Tunnel zum richtigen Zeitpunkt die richtige Investition war. Am 3. Februar 2006 stürzten 20.000 m³ Fels ab und rissen die Brücke mit sich. An Hand der messtechnischen Überwachung war es möglich, das Absturzdatum zu erkennen und dem einmaligen Naturschauspiel vor Ort beizuwohnen. Erst knapp 3 Stunden vor dem Felsabbruch wurde am Portal des alten Tunnels Süd dessen beginnende Zerstörung sichtbar (Abb. 8a, b und 9).

Abb. 8a, b: 3. Februar 2006, 12.44 Uhr, Absturz von 20.000 m³ – dann fehlte eine Brücke





Anzeige

Abb. 9: Die im Bohrloch versetzten Extensometer (E1a) und über Klüfte installierten Telejointmeter (T3) – alle gaben den Absturzzeitpunkt auf die Stunde genau an

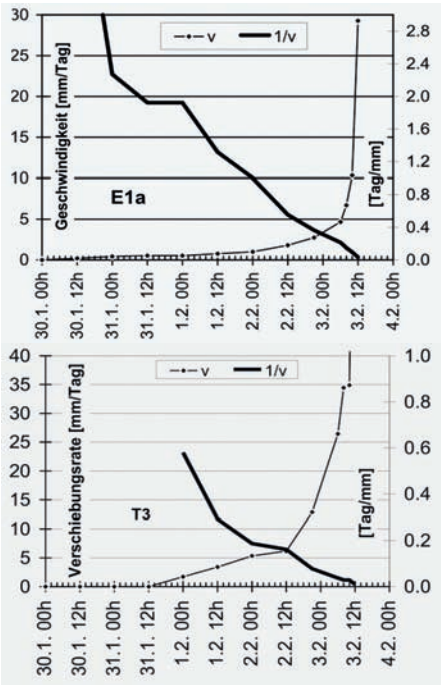








Abb. 10a–c: Große Spalten öffneten sich über Wochen und wanderten den Hang hinauf

Das Abtauen des Schnees erhöhte den Kluftwasserdruck, was die Verschiebungsgeschwindigkeiten um Faktor > 10 beschleunigte und zum Auslöseprozess für die über keine Stabilitätsreserve mehr verfügende Felsrippe wurde. An Hand der Fotoanalyse waren das Versagen des unter hohen Spannungen stehenden Rippenfußes und das Nachbrechen der überlagernden Felsmassen erkennbar. Der Felskollaps stellte sich nach Erreichen einer Felsverschiebungsgeschwindigkeit von 25 mm/Tag ein [2]. Von der ehemaligen, 30 m langen Brücke blieb in der Schutthalde der Calancasca nur noch ein $^1/_8$ m³ großer, runder Betonblock übrig.

Steinbruch provoziert Felssturz

Oberhalb des Steinbruchs von Arvigo, der seit über 80 Jahre betriebenen, einzigen Baustoffindustrie im Calancatal, begannen sich im Gelände ab dem 11. Mai 2007 entlang des Kluftsystems große Spalten zu öffnen, was auf riesige Felsinstabilitäten hindeutete (Abb. 10a–c).

Geologische Risikoerfassung

Die zentralen Fragen der Verantwortlichen waren, welches Ausmaß diese Felsbewegungen hatten, welcher Gefährdungsgrad für Leute, Verkehr und Infrastruktur davon ausging und ab welchem Zeitpunkt allenfalls mit kritischen Aktivitäten zu rechnen war. Nach intensiven geologischen und messtechnischen Abklärungen war bereits 14 Tage später klar, dass es zu einem großen Felssturz von mehreren 100.000 m³ kommen werde und dass der Beginn des Absturzes kurz bevorstand.

Die über die Spaltenöffnungen gemessenen Verschiebungen der Gneise stiegen von anfänglich wenigen mm/Tag bis zum 26. Mai 2007 auf mm/h an. In der Folge setzten sich neue Risse Hang aufwärts fort.

Felssturzprognose und Ereignis

Durch Analyse der Felstrennflächenlage, der im Steinbruch erkennbaren Verformungen und der gemessenen Verschiebungsrichtungen wurde ein räumliches und kinematisches Absturzmodell entwickelt. Folgende Eckpfeiler der daraus resultierenden Absturzprognose wurden den Betroffenen unterbreitet:

Absturzmasse:	300.000–400.000 m³
Prozess:	Felsgleiten auf der Schieferung
Ablagerungsraum:	ca. 90 % der Masse im Steinbruch, ca. 10 % im Talboden
Absturzbeginn:	Pfingsten, ab 28.5.2007
Ablauf:	erst Block- dann Felssturz
Entwicklung:	portionenweise über Wochen
Sturzblöcke:	> 100 m³ bis zum Talboden

Den Steinbruchbetreibern war es damit möglich, ihre Geräte im Steinbruch in Sicherheit zu bringen, die empfindlichen Werkhallen mit Blockwürfen notdürftig zu schützen und die sensiblen Gebäude zu evakuieren. Die Verantwortlichen für die Straße konnten erste Sofortmaßnahmen einleiten.

Am 28. Mai 2007 ließ man die über Nacht bereits gesperrte Straße zu und im Laufe des Nachmittags kam es nach zunehmendem Steinschlag zu den ersten Felsab-

Abb. 11: Die über die Spalten versetzten Messgeber kündeten den Absturzbeginn ab dem 28. Mai 2007 an

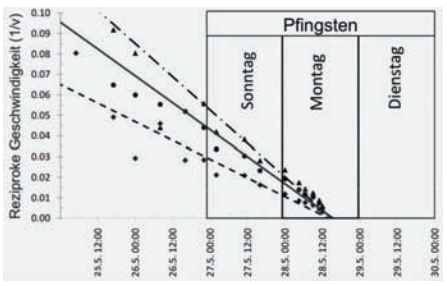


Abb. 12: Steinbruch Arvigo baut Gneis für Bauzwecke auf der talwärts geneigten Schieferung ab





Abb. 13:
Ein 350-m³-Block sperrte die Straße definitiv

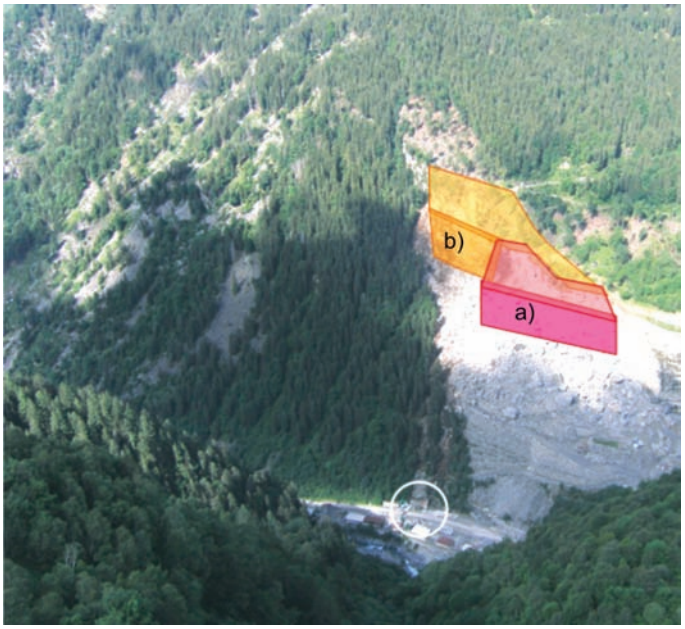


Abb. 14:
200.000 m³ Fels sind abgefahren (a), ein etwa gleich großer Rest wird in den nächsten Jahren folgen (b), im Vergleich dazu der 350-m³-Block im Tal (Kreis)

brüchen von bis zu 10.000 m³. Im Laufe der nächsten 2 Tage stürzten ca. 150.000 m³ ab, wovon das Gros im Steinbruch liegen blieb. Am 5. Juni stürzte ein Block von ca. 350 m³ (Abb. 13) unter Zerstörung eines ersten Gebäudes auf die zu diesem Zeitpunkt gesperrte Kantonsstraße. Nach der Absturzperiode von 1 Woche reduzierte sich die Häufigkeit von Felsabbrüchen. Die Verschiebungsgeschwindigkeiten der ca. 200.000 m³ umfassenden Reststurzmasse blieben jedoch mit > 30 mm/h hoch (Abb. 14).

Die Gefahrenbeurteilung und die Platzverhältnisse ermöglichten es, dass bereits 7 Tage nach Ereignisbeginn, die Straßenverbindung wieder 1-spurig auf einem Provisorium hergestellt werden konnte. Diese Verkehrsführung ist heute noch so. Mit dem Bau des definitiven, in den Grundzügen glücklicherweise schon vorliegenden Umfahrungsprojektes, wurde bereits begonnen. Da bis zum Abbruch der in den nächsten 1–3 Jahren erwarteten, restlichen Massen von ca. 200.000 m³ auf der ursprünglichen Trasse ein hohes Blocksturzrisiko verbleibt, ist eine Rückverlegung des Verkehrs undenkbar. Die Frage nach einer künstlichen Beschleunigung des Absturzprozesses wurde verschiedentlich aufgeworfen, musste aber auf Grund zu hoher Ausführungs- und Haftungsrisiken verworfen werden.

Felsabbaurisiken im Steinbruch

Das Mitverfolgen des Felsabbruchs bestätigte das ursprüngliche felsmechanische Modell im Wesentlichen. Das talwärts geneigte Einfallen der Schieferung entspricht mit 25–35° dem Reibungswinkel der Gneise, was bei fehlenden Zwängungen zum spontanen Ableiten von Felskörpern führte. So lange die quer zum Tal verlaufenden Klüfte bei dem entlang der Talklüftung vorgenommenen Abtrag noch Zwängungen verursachten, konnte der Abbau unter Kontrolle gehalten werden. Wurden aber in diesem Kluftsystem zu große Zähne aus dem Felsen abgebaut, wurden die Zwängungen reduziert, durch Scherung entlang der Querklüfte Deformationen zugelassen, daraus resultierend, progressiv größere Felsmassen und damit höhere Kräfte mobilisiert, bis das Gestein an den Zwängungspunkten überbeansprucht wurde und es in der Folge zu deren Versagen, und schließlich zu Felsabbrüchen kam (Abb. 15–17).

Auf Grund der heterogenen Anordnung und Ausbildung der Klüfte kann es je nach deren Disposition zu einer Verkettung von ungünstigen Randbedingungen kommen, was dann letztlich die Mobilisierung von riesigen Felsmassen ermöglicht, die in der Folge nicht mehr zu bremsen sind.

Vor diesem Hintergrund sind die Einflussmöglichkeiten des Felssachverständigen auf Sturzprozesse beachtlich und wenn ausreichende Zeit und repräsentative Messdaten zur Verfügung stehen, können heute in vielen auch komplexeren Fällen verblüffend gute Prognosen gestellt werden.

Literatur

[1] Krähenbühl, R.: Temperatur und Kluftwasser als Ursache von Felssturz, Bulletin angewandte Geologie 9/1, Juli 2004

[2] Krähenbühl, R.: Der Felssturz, der sich auf die Stunde genau ankündigte, Bulletin angewandte Geologie 11/1, Juli 2006

[3] Bischoff, G.; Fehler, S.; Krähenbühl, R.: Ein Tunnel als Tor zur Außenwelt, SIA Tec21 Nr. 41, 2006

Abb. 15: Stand Abbau 2001, wo entlang der verwinkelten Talklüfte „kleine Zähne" abgebaut wurden



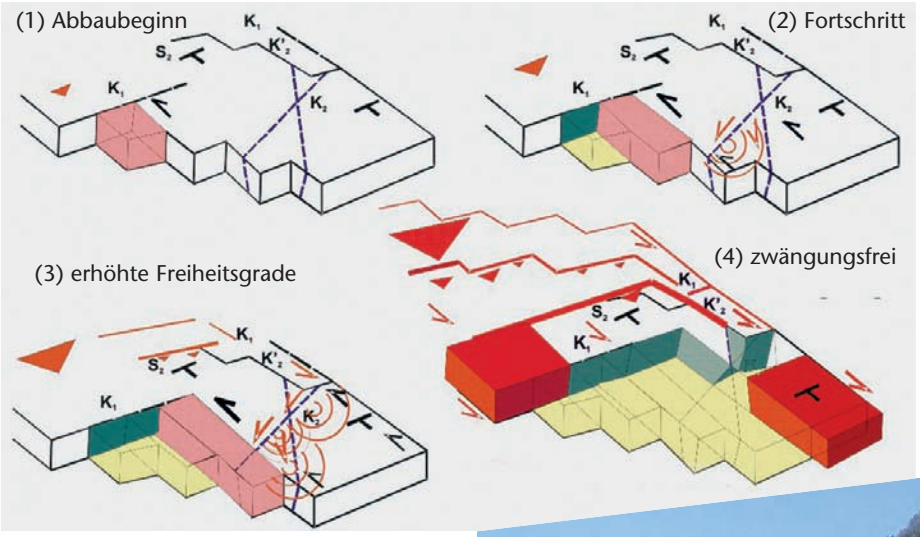


Abb. 16:
Werden in dieser Felstrennflächendisposition nur kleine Zähne abgebaut (1), so können die Spannungsumlagerungen vom Nachbarfelsen übernommen werden. Werden die Zähne zu groß, lassen die erhöhten Freiheitsgrade (3) entlang der K2-Klüfte Scherdeformationen zu, was Raum öffnet und zusätzliche Felsmassen und damit Kräfte mobilisiert. Werden die überbeanspruchten Zwängungspunkte beseitigt (4), kommt es im zwängungsfreien Zustand auf der Schieferung zum Ableiten großer Felsmassen

Abb. 17:
Stand 2006, wo mit dem Felsabbau „große Zähne" entstanden – im Hintergrund kamen fast 10.000 m³ Fels auf der mit 25° geneigten Schieferung von selbst in Bewegung, bevor die Sprengung erfolgen konnte



Autoren:
Dr. Ruedi Krähenbühl,
BauGrundRisk GmbH,
Dipl.-Bauing. (ETH) Curdin Bischoff,
EDY TOSCANO AG,
Dipl. natw. (ETH Geologe) Christoph Nänni,
Tiefbauamt Graubünden,
Dipl.-Ing (HTL) Sven Fehler,
Ufficio federale delle strada,
Dipl.-Bauing. (FH) Marco Weisshaupt,
Ufficio Tecnico Grigioni

Anzeige