

Der Felssturz, der sich auf die Stunde genau ankündigte Ruedi Krähenbühl¹

¹ Tiefbauamt Graubünden, Strassenbaulabor, 7000 Chur, rudolf.kraehenbuehl@tba.gr.ch

Stichworte: Felssturz, Absturzprognose, Auslöseprozess, Calancatal, Graubünden

Zusammenfassung

Die eingangs Calancatal seit 10 Jahren mit Messgeräten überwachte Felsrippe im Val d'Infern löste sich am 3. Februar 2006 um 12.44 Uhr und liess das Val d'Infern im wahrsten Sinne des Wortes zum Tal der Hölle werden. Etwa 20'000 m³ Felsmassen rissen die Brücke der Kantonsstrasse, welche die beiden Tunnels verband, mit sich. Ein halbes Jahr zuvor, am 28. September 2005, wurde der neue, die Gefahrenstelle hinterfahrende Strassentunnel eröffnet. Durch das rechtzeitige Planen und Realisieren des neuen Tunnels konnte das Sturzereignis ohne Einschränkung des Verkehrs hingenommen und eine über Monate dauernde Unterbrechung der Zufahrtsstrasse in das Calancatal verhindert werden. Der Absturz hatte sich auf den Tag genau und wie die nachträgliche Auswertung zeigte, sogar auf die Stunde genau angekündigt und konnte vor Ort beobachtet und im Bild festgehalten werden.

Dank einem permanenten Monitoring war es möglich, dieses hohe Felssturzsrisiko unter Kontrolle zu halten und zu einer 10jährigen Erfolgsgeschichte werden zu lassen. Natürlich braucht es stets eine

grosse Portion Glück dazu, welche im vorliegenden Fall auch beansprucht wurde. Hätte es auf der Alpensüdseite im Winter 2004/2005 grosse Schneefälle gegeben, wäre der Felssturz wahrscheinlich bereits ein Jahr früher, d.h. als der Tunnel noch im Bau war, nieder gegangen.

Abstract

The 3rd of February 2006 a rock fall of ~20'000 m³ of gneissic brittle rock occurred in the Val d'Infern, south-east Switzerland, and destructed the road bridge to the Calanca Valley. Fortunately a new tunnel has been opened for the traffic half a year before, to eliminate this site of great risk. The unstable rock slope was surveyed with a monitoring system over the last 10 years. This was still in operation until half an hour before the rock slope failure. The data analyses allowed to determine date and time of the event. Therefore it was possible to be in place and to take spectacular pictures. Heavy snow fall at the end of January and increasing joint water pressure after snow melt were the initial triggering mechanism of the rock slope failure.



Fig. 1: Am 3. Februar 2006 wurde das Val d'Infern zur Hölle, der Felssturz riss die Brücke in die Tiefe.

1 Vorgeschichte

Seit 1995 begannen sich im Val d'Infern Block- und Felsstürze zu häufen. Man wurde auf die seit Generationen bekannte Gefahrenstelle aufmerksam, leitete geologische Untersuchungen ein, die in der Folge zu einer stets weiter entwickelten messtechnischen Überwachung führten und letztlich zu einem automatischen Frühwarndienst ausgebaut wurden.

Als eine anhaltende Beschleunigung der Felsbewegungen erkennbar war, begann man im Jahr 2003 mit der Planung und 2004 mit dem Bau eines Umfahrungstunnels (Fig. 2). Da der Tunnel den labilen Teil der entfestigten Felsrippe in nur 30 m Tiefe hinterfuhr, bildete der sprengtechnische Vortrieb eine besondere bautechnische Herausforderung. Das Risiko durch Sprengeneinwirkungen den Absturz der kritischen Sturzmasse zu provozieren wurde mit einer zusätzlichen messtechnischen Überwachung und der entsprechenden Erfahrung von Fachleuten unter Kontrolle gehalten. Nach der Eröffnung des neuen Umfahrungstunnels am 28. September 2005 war das Felssturzrisiko für den Strassenverkehr gebannt. Um weitere geologische Erfahrungen zu sammeln entschloss man sich, die Felsrippe mit der bewährten Basisüberwachung bis zum Absturz zu begleiten.

Hinsichtlich der Frage des Zeitpunkts des Absturzes und des betroffenen Felsvolumens hatte man im Herbst 2005 konkrete Vorstellungen. Es liegt jedoch in der Natur von geologischen Ereignisprognosen, dass sie stets mit grossen Unschärfen verbunden sind und oft um einen Faktor >2 daneben liegen können.

2 Kenntnisstand vor dem Absturz

Die geologischen Verhältnisse und die felsentfestigenden Prozesse waren im Sommer 2004 bereits detailliert bekannt und können in der Übersicht wie folgt zusammengefasst werden (Krähenbühl 2004):

- Es liegen frische Zweiglimmergneise der Simanodecke vor, die im Steinbruch Arvigo zu Bauzwecken abgebaut werden;
- Das Einfallen der Schieferung S1 ist bergwärts; sie wird von steilen, z.T. offenen Talklüften des Misox (K1) und untergeordnet mit $40\text{--}65^\circ$ talwärts geneigten K2-Klüften durchtrennt (Fig. 3);
- Eine stark aufgelockerte, kritische Sturzmasse von $\sim 3'000\text{ m}^3$ liegt oberhalb der Brücke; aus dieser Zone lösten sich seit 1995 jährlich Block- und Felsstürze, dies jeweils im Herbst und im Winter;
- Mittlere Verschiebungen von $\sim 20\text{ mm/Jahr}$ sind in der, durch das Val d'Infern begrenzten Felsrippe von $\sim 30'000\text{ m}^3$ Volumen, geodätisch nachgewiesen; dies mit geringeren Verschiebungen im Fuss- und mit erhöhten im Kopfbereich (Fig. 4);
- Die Gebirgsablösung erfolgt nicht durch Gleiten, sondern durch Öffnen der Talklüfte K1 Richtung Val d'Infern und treppenförmiger Entfestigung entlang der Schieferung S1 sowie den K2-Klüften; dies führt zu anhaltendem Kohäsionsabbau infolge Brechen von Gneisbänken in steiler Topographie;
- Die Verschiebungen zeigen sommerliche Ruhephasen und periodische Deformationsschübe im Herbst und im Winter, mit Geschwindigkeiten bis maximal 5 mm/Tag (Extenso- und Telejointmeter);
- In diesem spröden Gebirgstyp wirkt über Jahrhunderte ein dynamischer Prozess der Felsentfestigung, angetrieben durch die jährlichen Temperaturwechsel im Felsen, den daraus resultierenden tiefen Kluftöffnungen in den Herbst- und Wintermonaten und dem bei Niederschlägen maximal einwirkenden Kluftwasserdruck;
- Es wird in der potentiellen Sturzmasse ein unter hohen Spannungen stehender Fuss angenommen, ohne dessen genauen Standort zu kennen;
- Der Absturz war aufgrund der Ähnlichkeit zu den geodätischen Verschiebungskurven des Felssturzes Mesocco vom April 2001 in den Deformationsperioden Herbst/Winter 04/05 oder 05/06 zu erwarten.

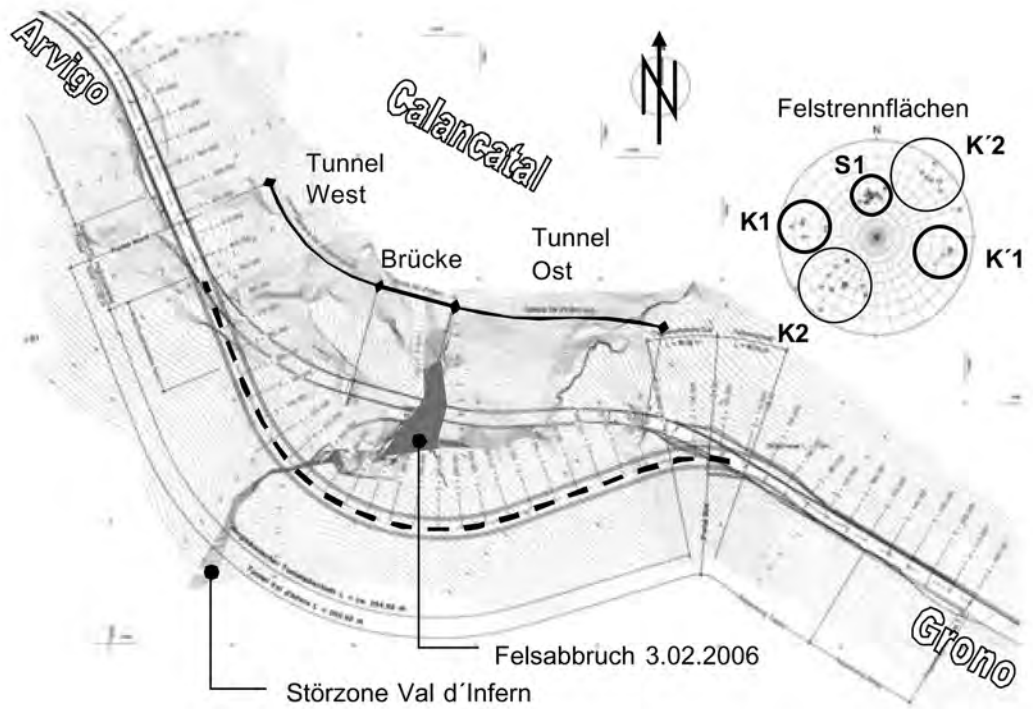


Fig. 2: Situation mit Umfahrungstunnel und Lage des Felssturzes.

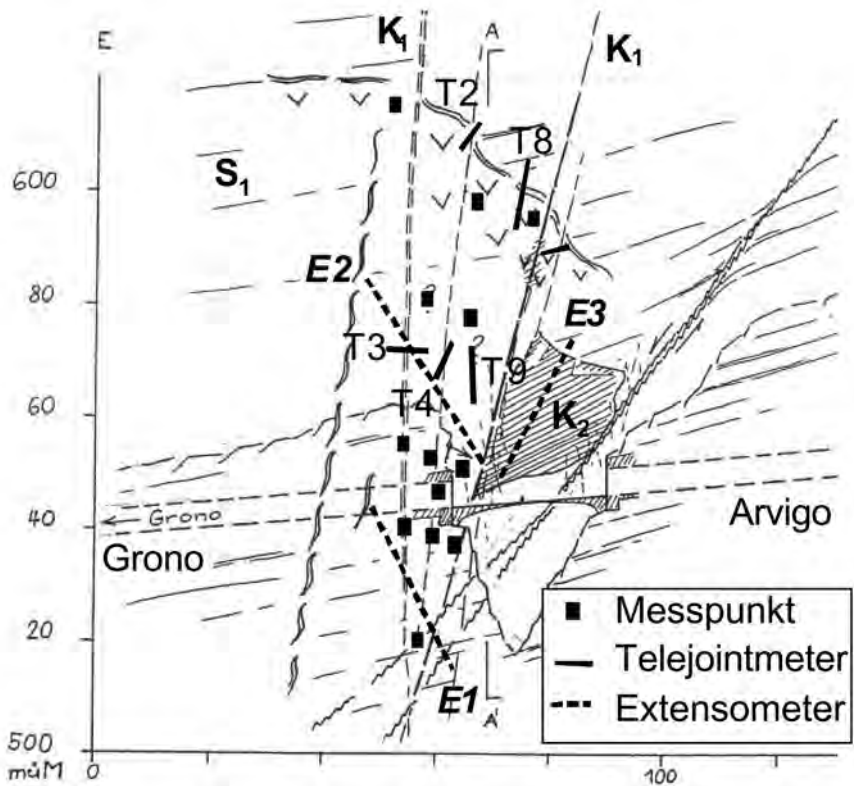


Fig. 3: Ansichtsskizze Val d'Infern mit Lage der Messeinrichtungen und der Felstrennflächen.

3 Der Absturz

Nachdem der Strassenverkehr mit dem neuen Tunnel sicher ins Calancatal geführt werden konnte, verloren die absturzgefährdeten Felsmassen im Val d'Infern verständlicherweise an Aufmerksamkeit. Obwohl jedes über Jahre betriebene Messsystem zur Erhaltung seiner Funktionstüchtigkeit einen Unterhalt benötigt und dieser insbesondere bei den in den Felswänden exponiert gelegenen Telejointmetern nicht jederzeit erfolgen konnte, war im Frühjahr 2006 das Gros der Extenso- und Telejointmeter noch immer funktionstüchtig. Nach wie vor wurde bei Überschreiten definierter Verschiebungswerte ein SMS-Alarm per Natel ausgelöst. Dies ermöglichte, kritische Situationen mit erhöhter Aufmerksamkeit zu verfolgen.

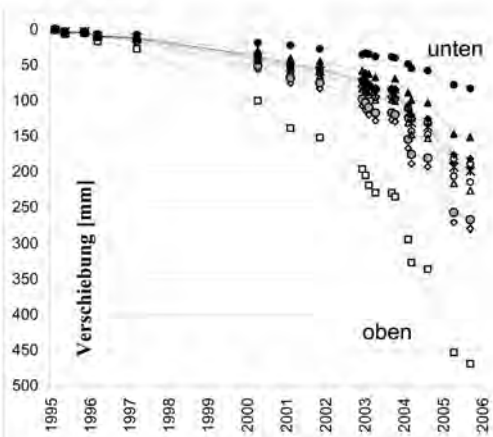


Fig. 4: Die Geodäsie zeigt eine anhaltende Beschleunigung; die Verschiebungen nehmen vom Rippenfuss nach oben stark zu.

3.1 Vom «Normal»- zum Ausnahmezustand

Ab dem 30. Januar 2006 erfuhren alle in Bohrlöchern versetzten Mehrfachextensometer innert Tagesfrist eine Verschiebungszunahme von ~ 0.5 mm/Tag auf 1–3 mm/Tag (Fig. 5). Solche Zunahmen wurden in früheren Deformationsphasen oft registriert und waren nichts besonderes.

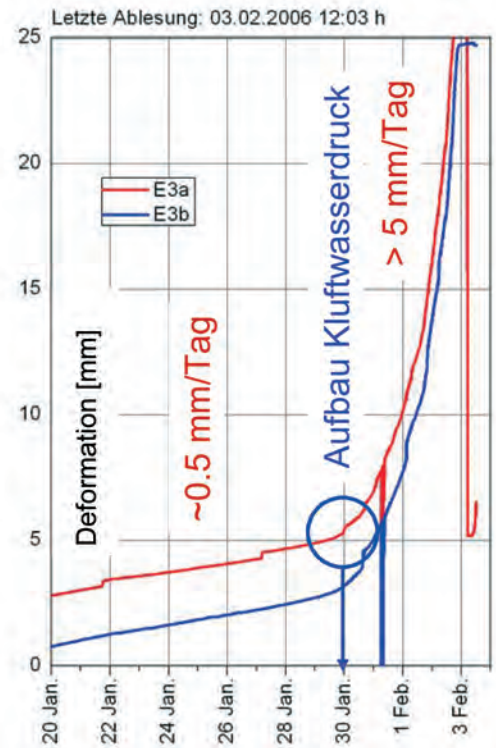
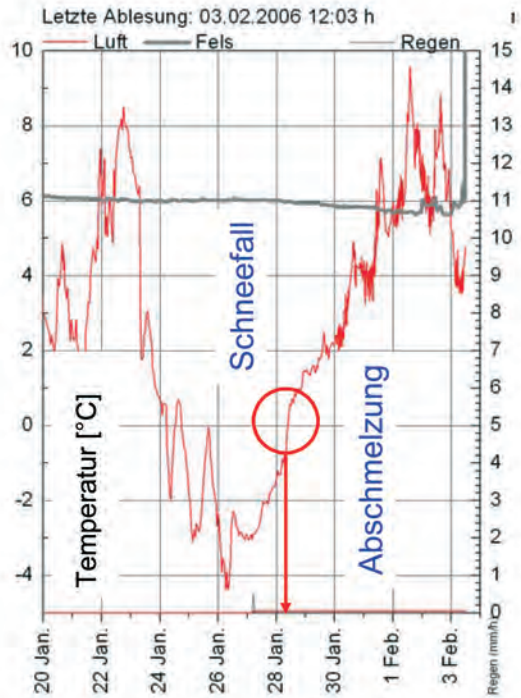


Fig. 5: Die Messergebnisse zeigen bei den Extensometern ab Ende Januar starke Verschiebungszunahmen, verursacht durch Kluftwasserdruck infolge Abschmelzens des Schnees.

Die Ursache dieser Beschleunigung war ebenfalls nachvollziehbar und plausibel: Zwischen dem 24. und dem 27. Januar 2006 ereigneten sich ergiebige Schneefälle. Am 28. Januar wurde die 0°-Grenze überschritten und es kam zum Abtauen des Schnees. Dies bewirkte eine Erhöhung des Kluftwasserdrucks, worauf mit einer Verzögerung von 1–2 Tagen die Extensometer ansprangen. Die Felstemperatur in 2 m Tiefe hatte das saisonale Minimum von 6°C erreicht, d.h. die Klüfte hatten den saisonal tiefsten Öffnungsstand (Krähenbühl 2004). Aufgrund des bisherigen Prozessverständnisses handelte es sich somit um den «Normalfall». Als am 2. Februar bei Lufttemperaturen von 9° C fast sämtlicher Schnee abgeschmolzen war, sich die hohen Verschiebungsgeschwindigkeiten jedoch nicht reduzierten sondern weiter auf >5 mm/Tag beschleunigten, wurden die Daten einer Detailauswertung unterzogen. Die im Diagramm Verschiebungsgeschwindigkeit gegen die Zeit dargestellten Messdaten zeigten ab dem 2. Februar eine deutliche Zunahme. Jene der reziproken Geschwindigkeit ergaben am 3. Februar auf der Zeitachse einen extrapolierten Einstichpunkt, was dem Absturz entsprechen würde (Fig. 6). Aufgrund der Daten musste man somit am 3. oder in der Nacht vom 3. zum 4. Februar den Felssturz erwarten. Da alle in verschiedene Richtungen versetzten Extensometer die gleiche Tendenz aufwiesen, war klar, dass die gesamte Felsrippe zum Absturz kam.

Für den Folgetag wurde Material bereitgestellt, um dem Absturz vor Ort beiwohnen und diesen dokumentieren zu können. Um 03.00 Uhr des 3. Februars wollte man die stündlich erfassten Daten via Internet erneut abfragen, wobei jedoch von zu Haus aus keine Verbindung zu Stande kam. Die zweite Option, die Daten direkt via Natelverbindung mit dem Notebook zu konsultieren, misslang ebenso, da der Akku des Natels leer war und das Aufladegerät sich im Büro befand. Der erneute Versuch um 04.30 Uhr im zwischenzeitlich erreichten Büro via Internet blieb ebenso erfolglos. Wie sich später heraus-

stellte, war in diesem Zeitraum in der ganzen Ost- und Südschweiz kein Zugang zum Internet vorhanden. Murphys law: «If anything can go wrong it will». Schliesslich gelang die Datenabfrage via direkter Natelverbindung. Die erneute Auswertung bestätigte das Absturzdatum vom 3. Februar und deutete gegen die Mittagszeit hin.

Nun begann der Ausnahmezustand. Das Auto wurde in Chur bestiegen und die Reise ins Val d'Infern angetreten. Nach 07.00 Uhr meldete der vor Ort beorderte Verantwortliche des Bezirkstiefbauamtes Mesocco, dass im alten, die Felsrippe querenden Tunnel Ost lautes Knacken zu hören sei, grosse Bruchstücke der Betonverkleidung am Boden liegen und fortlaufend Splitter ab dem seit Jahren intensiv zerrissenen Betongewölbe bröckeln. Nach dieser Meldung herrschte kein Zweifel mehr, der Abbruch stand bevor.

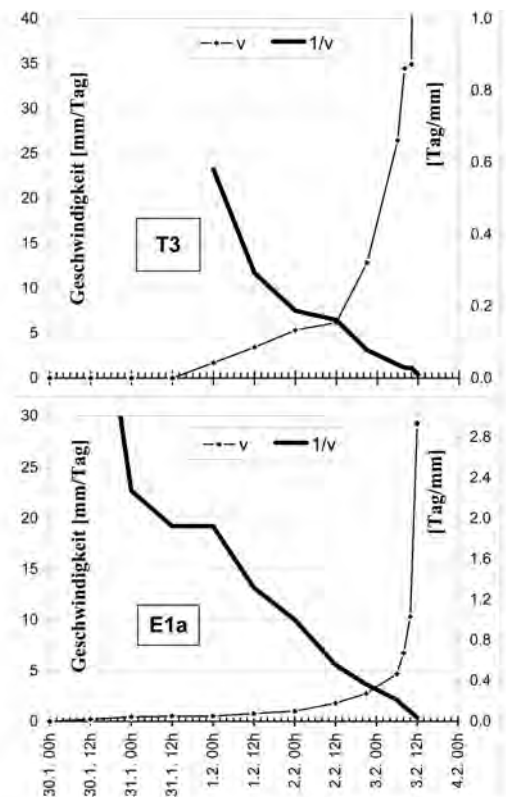


Fig. 6: Anhand des Diagramms, inverse Verschiebungsgeschwindigkeit gegen die Zeit, konnte der Tag und sogar die Stunde des Absturzes festgestellt werden.



Fig. 7: Das Tunnelportal wurde innerhalb der letzten 3 Stunden stark deformiert (Zeitpunkt vor dem Absturz: oben links $2\frac{3}{4}$ h, oben rechts $1\frac{1}{2}$ h, unten links $\frac{3}{4}$ h, unten rechts $\frac{1}{2}$ h).

3.2 Der Abbruchhergang

Die Ankunft im alten Tunnel bestätigte die eindrucklichen akustischen Geräusche des im Felsinnern stattfindenden Entlastens von Spannungen durch Riss- und Bruchbildungen und den hörbaren, rasch fortschreitenden Kohäsionsabbau im Gebirge.

Bis 3 Stunden vor dem Absturz war dem Tunnelportal und der Brücke noch kaum etwas von dem bevorstehenden Ereignis anzusehen. Auch die Felswand blieb visuell nahezu unverändert. Lediglich im $\sim\frac{1}{4}$ -Stun-

dentakt lösten sich im Einschnitt des Val d’Infern einzelne Blöcke. Auf der Brücke lagen noch kaum Gesteinsbrocken. Aus dem 40 m unter der Brücke liegenden Fuss der Felsrippe löste sich 1–2 m³ Gestein. Ansonsten blieb der Fuss in Takt und ohne sichtbare Oberflächenrisse. Die Gesamtmenge der bis zum Absturz nieder gegangenen Blöcke wird auf ~400 m³ geschätzt (2‰ der Sturzmasse).

Die letzten drei Stunden vor dem Absturz begann eine anhaltende Stein- und Blocks- turzaktivität. Das Tunnelportal in der Fels-

rippe wurde stark zerrissen und deformiert und die Steinverkleidung begann zu bröckeln (Fig. 7). Alle Messeinrichtungen blieben bis 30 Minuten vor dem Absturz intakt, dann riss das Sammelkabel zum Datenlogger am Tunnelportal (Fig. 8). Die letzten Messdaten wurden um 12.12 Uhr registriert. Um 12.44 Uhr war es dann so weit. Dem Betrachter bot sich das einmalige Bild eines gleichzeitigen Versagens der ganzen Felsrippe. Durch die vom Aufprall aufsteigenden Staubwolken wurde die Sicht rasch getrübt.



Fig. 8: Das Portal wird zerschert und verdrückt; wo das rechte Parament aufreisst, führt das Sammelkabel der Messgeber zum Datenlogger durch; trotzdem konnte bis 30 Minuten vor dem Absturz noch gemessen werden.

Wie die Bildanalyse zeigt, kam es zum Versagen des ~40 m unter der Brücke liegenden Felsrippenfusses. Dieser zog das Tunnelportal und die Brücke mit sich. Zu diesem Zeitpunkt war die über der Brücke positionierte, kritische Sturzmasse noch nahezu intakt (Fig. 9a–9f). Dann stürzte diese hinterher. Schliesslich lösten sich die benachbarte Felspartie am Rippenfuss sowie der darüber

gelegene Teil. Entsprechend dem Versagen des überbeanspruchten Felswandfusses erfolgte der Absturzvorgang von unten nach oben. Die Abbruchstelle wurde relativ sauber ausgeräumt, lokal verbleibende Schutzansammlungen werden die Sommer- und Herbstgewitter in die Calancasca befördern. Nur Fischer sind in nächster Zeit noch einer Gefährdung ausgesetzt.

Der Sturzkegel vermochte das an dieser Stelle breite Bett der Calancasca nicht vollständig zu verfüllen, entsprechend kam es zu keinem Wasserrückstau. Die grössten Sturzblöcke erreichten Zimmergrösse und das Blockmaterial präsentierte sich in frischem Zustand. Von der mit ~10'000 m³ Fels überschütteten Brücke wurde nur noch ein ~1/8 m³ grosses, gerundetes Betonstück vorgefunden. Der Rest war von den Gneisblöcken – ähnlich wie in einer Prallmühle – zerkleinert worden und verschwand im Schuttkegel (Fig. 11).

Fig. 9a-9f:

Die Bildanalyse zeigt deutlich das Versagen des unter hohen Spannungen stehenden Rippenfusses, das Nachbrechen des Tunnelportals und der Brücke und schliesslich das Hinterherstürzen der oberhalb der Brücke gelegenen Felsmasse.

9a



9b



9c



9d



9e







Fig. 10: Glücklicherweise sah nie ein Verkehrsteilnehmer in voller Fahrt solche Bilder (links Tunnelausfahrt Richtung Grono, rechts jene Richtung Arvigo).

4 Die Felssturzcharakteristik des Val d’Infern

Zehn Jahre nach einer intensiven Beobachtung, nach periodisch aktualisierten Risikoanalysen, einem sorgfältigen Gefahrenmanagement und letztlich der rechtzeitigen Planung und Realisierung eines Umfahrungstunnels, wurde mit dem ein halbes Jahr später erfolgten Absturz quasi das Pünktchen auf das «i» gesetzt. Die Verkehrseinschränkungen waren während der ganzen Zeit stets moderat, zu langen Strassenschliessungen kam es nicht, die finanziellen Mittel konnten effizient, ohne unnötige Ausgaben eingesetzt und das Risiko unter Kontrolle gehalten werden. Es kam lediglich zu zwei Unfällen: Im Sommer 2004 stürzte ein Einzelblock auf die Doppelkabine eines Pickups. Der Fahrer kam mit dem Schrecken davon, am Fahrzeug entstand Totalschaden. Während der, infolge von Blocktreffern erforderlich gewordenen Reparaturarbeiten an der Brücke, stürzte ein Bauarbeiter ohne Fremdeinwirkung vom Gerüst in die Tiefe und verschied auf der Unfallstelle. Die Ursache dieses tragischen Ereignisses blieb unbekannt.

Die Auswertungen im Nachgang lassen beim Felssturz Val d’Infern folgende charakteristischen Kenngrössen erkennen:

- Der Kollaps erfolgte nach lediglich ~500 mm Deformation während 10 Jahren.
- Zum Niederbruch kam es nach Überschreitung einer Verschiebungsgeschwindigkeit von $v > 25$ mm/Tag (~1 mm/h).
- Die Vorwarnzeit, erkennbar vor Ort durch Steinschlag, Rissbildung und Knackgeräusche, war mit 6 h kurz; sie hätte bei Tag ausgereicht, um den Verkehr auch manuell zu stoppen, wohl aber kaum in der Nacht.
- Anhand der automatischen Verschiebungsmessungen war der Absturz der ~20'000 m³ im Voraus auf den Tag und gemäss Auswertung im Nachgang auf die Stunde genau erkennbar (Fig. 6).
- In der Abbruchnische traten keine deutlichen Gleitflächen, sondern gestufte Trennflächenablösungen auf.
- Temperatur- und Kluftwasser-abhängige Felsentfestigungen bewirkten im Herbst/Winter periodische Deformationsschübe,

den Kohäsionsabbau und die resultierende Überbelastung des Rippenfusses.

- Eine erhöhte Labilität und das nahende Sturzereignis kündigten sich mit periodischen Block- und Felsstürzen bereits seit 10 Jahren an.
- Das kollapsartige Versagen eines visuell intakten Fusses brachte den von Hakenwurf und hoher Zerlegung geprägten Kopfbereich zum Absturz.
- Das Auslöseereignis war mit dem Schneefall Ende Januar und dem resultierenden Aufbau eines maximalen Kluftwasserdrucks, während einer Periode der am weitesten in die Tiefe geöffneten Klüfte, zufällig.



Fig. 11: Blick von der Calancasca hinauf über den Schuttkegel ins Tal der Hölle, wo seit dem 3. Februar 2006 die Brücke fehlt.

Literatur

Krähenbühl, R. 2004: Temperatur und Kluftwasser als Ursache von Felssturz. Bull. angew. Geol. 9/1 2004.