

Temperatur und Kluftwasser als Ursache von Felssturz

Dr. Ruedi Krähenbühl

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

Zusammenfassung

Eine scheinbare Häufung von Felssturzereignissen im Alpenraum wirft Fragen hinsichtlich deren Verursachung durch ändernde Klimaverhältnisse auf. Statistische Ansätze zur Klärung von Fragen die in Zeiträumen rezenter geologischer Prozesse stattfinden sind hierfür kaum geeignet. Nur das Verstehen der gebirgsentfestigenden Prozesse kann fundierte Antworten liefern. Von Literaturbeispielen weiss man, dass sowohl Fälle von Felssturz mit eindeutiger Korrelation zu hohen Niederschlägen auftreten, wie auch solche, wo kein klarer Zusammenhang hergestellt werden kann.

Im Zuge des Risikomanagements von drei kritischen Objekten mit hoher Felssturzgefährdung entlang des Strassennetzes im Kanton Graubünden konnten in den letzten 4 Jahren viele Messdaten gesammelt werden. Zusammen mit detaillierten geologischen Feldaufnahmen, Risikoanalysen und einer intensiven Datenauswertung war es möglich, die massgebenden Prozesse in spröden Gebirgstypen zu erkennen. Die jährlichen Temperaturänderungen und Kluftwasserdruck sind die treibenden Kräfte für den dynamischen Entfestigungsprozess. Häufig genannte Ursachen wie Eis-, Wurzeldruck, Erdbeben, etc., stellen nur den zufälligen Auslöseprozess für Felsmassen dar, welche durch kontinuierlichen Kohäsionsabbau eine minimale Standsicherheit erreicht haben.

Felssturz Val d'Infern

In der Südabdachung Graubündens führen auf der einzigen Zufahrtsstrasse vom Misox ins Calancatal zwei Tunnels in kurzer Folge durch zwei Gneisrippen der Simano-/Aduladecke. Dazwischen wird die Störzone des Val d'Infern mit einer 30 m langen Brücke überquert. Über der Brücke baut sich eine fast 100 m hohe Felswand auf. Die Felsrippe des östlichen Tunnels wird entlang des parallel und senkrecht zum Calancatal streichenden Kluftsystems tief greifend entfestigt. Das Tunnelgewölbe ist dementsprechend mit bis auf Faustgrösse geöffneten Rissen zerlegt. In den letzten 5 Jahren haben sich aus der Felswand jährlich und stets im Herbst Block- und Felsstürze bis maximal 600 m³ ereignet (Fig. 1). Mit bescheidenen Schutzmassnahmen eines eher hilflosen Steinschlagnetzes und mit viel Glück überstand die Brücke alle bisherigen Ereignisse mit nur leichten Schäden. Das Gros der Sturzmassen fiel durch den wenige Meter breiten Schlupf zwischen Felswand und Brücke oder sprang über letztere hinweg.

Verschiedene in den letzten Jahren vorgenommene geologische Aufnahmen und Risikoanalysen führten zu einer umfassenden, messtechnischen Überwachung, zu der Verifizierung einer latent absturzgefährdeten, kritischen Sturzmasse von ~ 3'000 m³, zum Aufbau eines Alarm- und Frühwarnsystems, zur Erkenntnis, dass bereits ein kritischer Brückentreffer eines 2 m³ Blocks die Brücke zum Einsturz bringen kann, und letztlich zur raschen Projektierung eines 300 m langen Umfahrungstunnels. Ein Brückeneinsturz würde das Calancatal für Monate von der Umwelt abschneiden. Im Mai 2004 wurde mit den Tunnelarbeiten begonnen.

Geologische Entfestigungsmodelle

Verschiedene geologische Bearbeiter haben zwei unterschiedliche Modelle ausgearbeitet. Das eine postuliert ein auf den mit 40-65° talwärts geneigten K2-Klüften und der Schieferung S1 treppenförmig ausgebildetes Felsgleiten. (Fig. 2 und 2.1). Das andere Modell ging primär von kontinuierlichem Kohäsionsabbau infolge Spannungsumlagerungen in der Felsrippe aus. Diese steigen ausgehend von der als Knautschzone wirkenden, basalen Störzone aus Gesteinen geringerer Druckfestigkeit in der ganzen Felsrippe auf. In beiden

Modellen öffnen sich die durchschlagenden, als Ablösefläche dienenden K1-Klüfte scherenartig.

Das Risikomanagement

Mit einem Monitoring sollte einerseits die zeitliche Entwicklung der Gefahrensituation und andererseits das massgebende Entfestigungsmodell eruiert werden. Gleichzeitig hoffte man den Entfestigungsprozess besser verstehen zu können. Seit 1995 wurden in der ganzen Rippe Messpunkte geodätisch erfasst. Innerhalb der entfestigten Felsrippe konnte eine kritische Sturzmasse mit einer erhöhten, mittleren Verschiebungsgeschwindigkeit von 20 mm/Jahr festgestellt werden (Fig. 2).

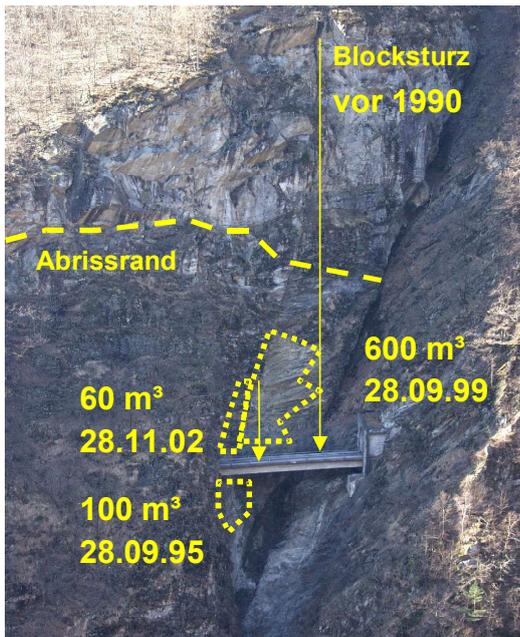


Fig. 1: Seit 1995 ereigneten sich jährlich Block- und Felsstürze. Durch die Entfestigung der Felsrippe wurde das Tunnelgewölbe stark zerrissen

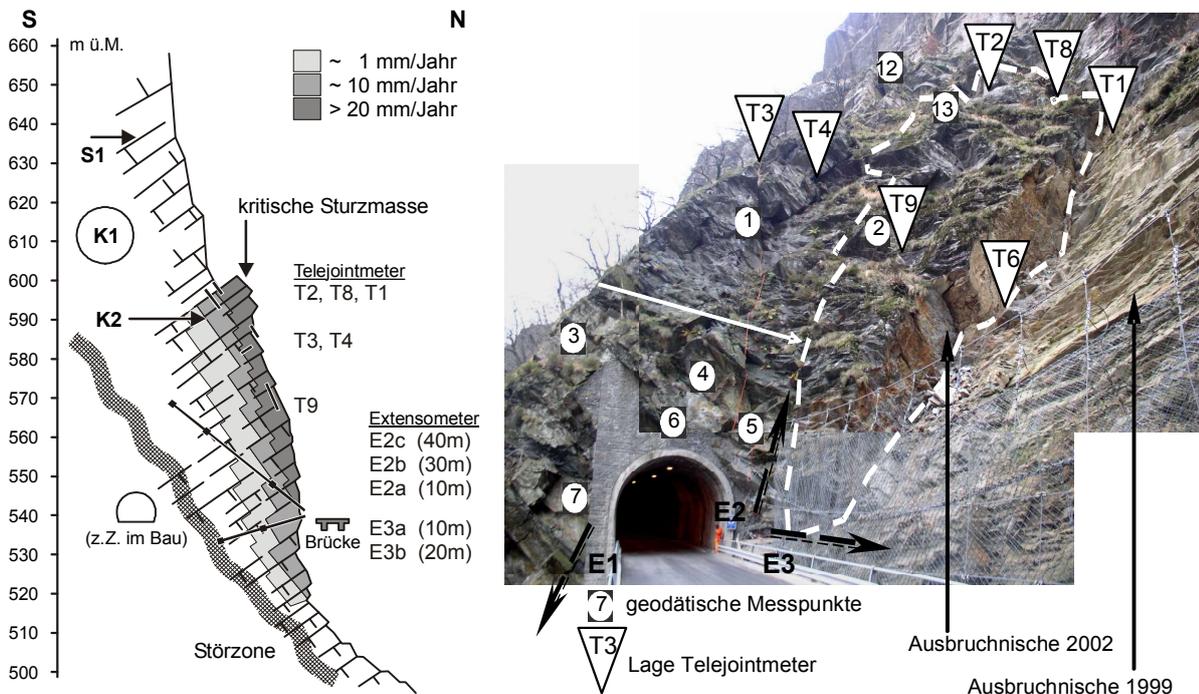


Fig. 2: Dank der Messanlage konnte in der Felsrippe eine kritische Sturzmasse von $\sim 3'000 \text{ m}^3$ und in die Tiefe der Felsrippe Entfestigungszonen mit abnehmenden Verschiebungsraten erkannt werden.

Nach dem grossen Felssturz von 600 m³ wurden im Jahr 2001 die Hauptablösung von der festen Felswand und die fortschreitende Zerlegung der Felsrippe mit sieben Kluft und Spannungsrisse überbrückenden Verschiebungsmessgebern überwacht. Zur Erfassung der tief greifenden Felsentfestigung wurden zwei bis 40 m lange Dreifach- und ein Zweifachextensometer installiert. Letzteres wurde Richtung der 100 m hohen Felswand gebohrt, um für den geplanten Umfahrungstunnel die Lage der stabilen Felszone zu verifizieren. Im Stundentakt wurden mit einer Klimastation die Niederschlagsmenge und die Lufttemperatur gemessen und diese zusammen mit allen Verschiebungsmessdaten über Natel einer Fernabfrage zugeführt.

Trotz dieses Frühwarndienstes konnte der Felssturz von 2002 nicht vorhergesehen werden. Keiner der Messgeber erfuhr eine kurzfristige, übermässige Beschleunigung. Es zeigte sich einzig, dass 4 Tage vor dem Absturz der am Fuss der kritischen Sturzmasse über einen Spannungsriss angebrachte, bis dahin keine Verschiebungen zeigende Telejointmeter T7 einen Sprung von lediglich 0.2 mm ausführte. Damit wurde das extrem spröde Verhalten des Felsens manifestiert.

Da infolge der Felsabbrüche der Fuss der kritischen Sturzmasse immer kleiner wurde und demzufolge unter einer zunehmenden Spannungskonzentration stand, entschloss man sich eine Alarmorganisation mit Rotlichtanlage aufzubauen, welche ab Dezember 2002 in Betrieb kam. Im April 2003 legte man in das Steinschlagnetz eine Reissleine ein, versetzt zusätzliche Telejointmeter sowie in 2 m Tiefe ein Felsthermometer. Bei Überschreiten von definierten Schwellwerten oder Unterbruch der Reissleine wurde der Verkehr durch eine automatisch geschaltete Rotlichtanlage angehalten. Bis 2004 erfolgten 10 Rotlichtalarme meist ausgelöst durch Stein- oder Blockschlag. Jeweils 30 Minuten nach der Alarmschaltung, nach der Beurteilung der Situation vor Ort und der Überprüfung der Messdaten, konnte der Verkehr wieder freigegeben werden. Im November 2003 erlitt ein Pickup durch einen Blocktreffer Totalschaden, Personen wurden glücklicherweise keine verletzt.

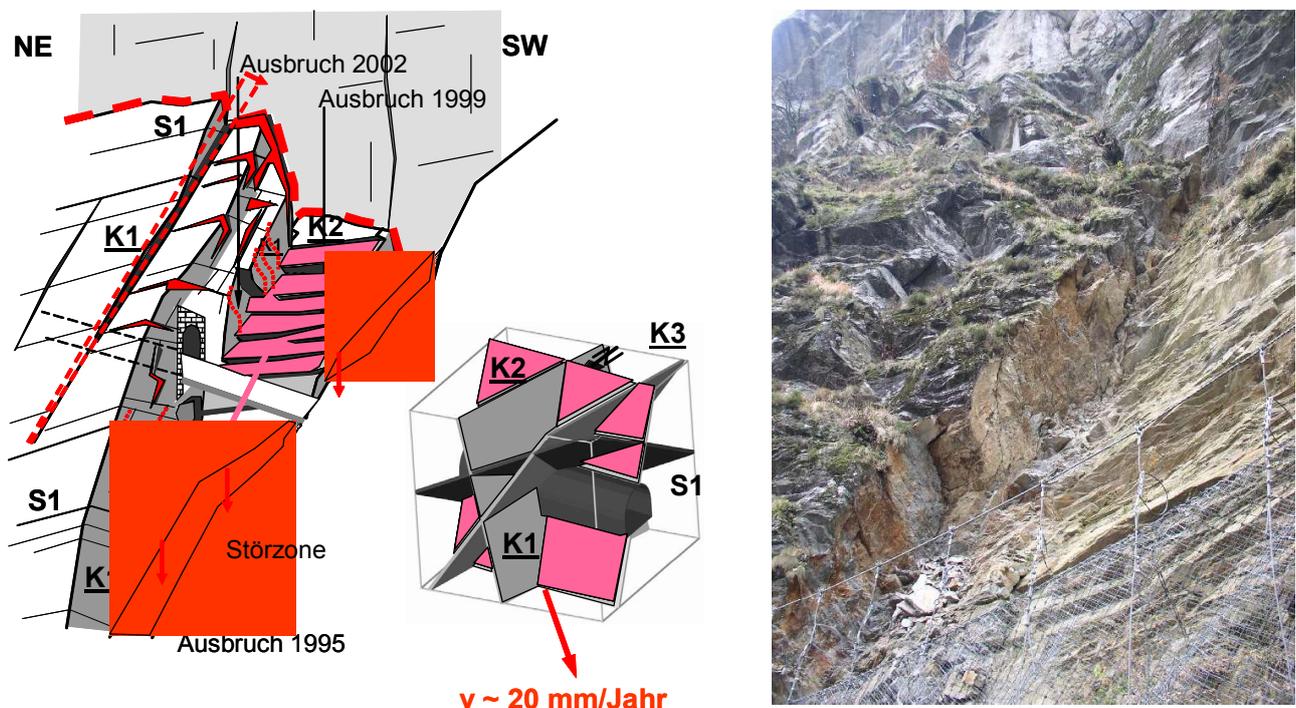


Fig. 2.1: Zwei geologische Entfestigungsmodelle wurden etabliert. Das eine geht von kontinuierlichem Kohäsionsabbau durch Spannungumlagerungen in der Felsrippe mit Felsablösungen der scherenartig sich öffnenden K1- und den überkippten K3-Klüften aus. Das andere von Felsgleiten entlang der bis 65°

geneigten K2-Klüfte.

Ergebnis der Messdaten

Vorerst versuchte man anhand der Weg/Zeitdiagramme das Deformationsverhalten der Felsrippe zu verstehen. Dies als Voraussetzung, um überhaupt Schwellwerte definieren und ein angemessenes Risikomanagement aufbauen zu können. Nachdem ersichtlich war, dass die Deformationen jährlich stets zwischen September und März erfolgten, wurde mit einer Detailauswertung die Abhängigkeit zu den Klimadaten untersucht.

Die Auswertung der Messdaten führt zu folgenden Erkenntnissen:

- Aufgrund der geodätischen Messungen ist seit 1995 eine zunehmende Deformationsbeschleunigung erkennbar, von der die kritische Sturzmasse am stärksten betroffen ist (Fig. 3).
- Die Extensometer zeigen erst ab November Deformationszunahmen (Fig. 5). Auffällig sind die im Sommer stagnierenden oder im mm-Bereich gar rückläufigen Verschiebungen [4].
- Die Herbstniederschläge bewirken einen Sturz der Lufttemperatur (2003 um 5-10°C), was die Felstemperatur in 2 m Tiefe zum Wendepunkt bringt. Dies erweist sich für die Felsentfestigung als das kritische Ereignis, indem von da weg die Verschiebungen einsetzen (Fig. 4, 6). An der Felsoberfläche beginnen sie bei Luft- und Felstemperaturen von < 10°C bzw. 15°C (Telejointmeter).

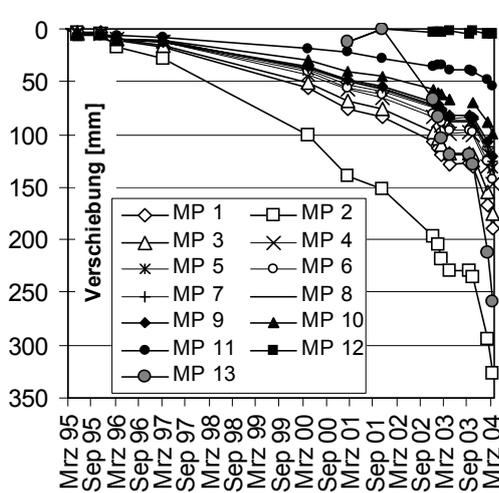


Fig. 3: Geodätische Verschiebungsmessungen zeigen seit 1995 beschleunigte Zunahmen.

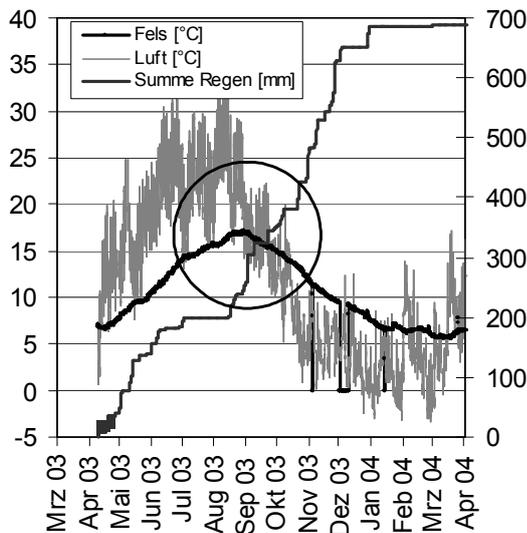


Fig. 4: Die Septemberniederschläge bewirken eine Temperatursturz von 5-10°C, was die bis dahin steigende Felstemperatur zum Wendepunkt

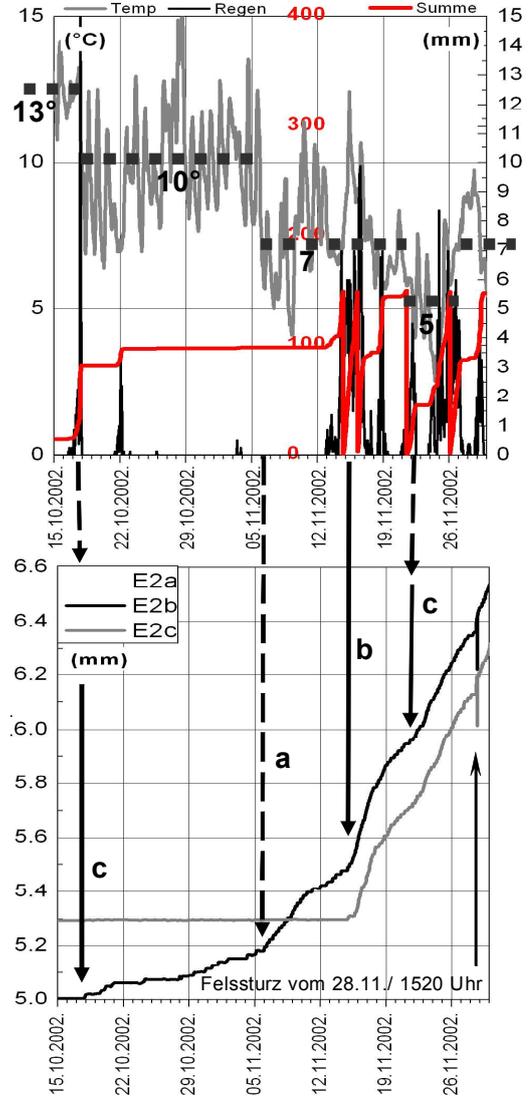


Fig. 5: Temperaturabsenkungen injizieren bei den Extensometern Verschiebungsschübe (a), starke Niederschläge bei gleicher Lufttemperatur ebenfalls (b), Überlagerungen von beiden kumulieren die Deformationen (c).

- Starkniederschläge im Frühjahr vermögen die Deformationen kaum, im Herbst dagegen stark zu beeinflussen (Fig. 6). Ein Vergleich mit den Messungen von 2002 bestätigt, dass hohe und lang anhaltende Niederschläge im Sommer keine nennenswerten Deformationen zu bewirken vermögen [4].
- Betrachtet man in einer Verschiebungsperiode nur die Abschnitte ohne Regenfälle, so sind mit sinkender Temperatur exponentielle Deformationen erkennbar (Fig. 7). Unter mittleren Lufttemperaturen von 5°C und Felstemperaturen in 2 m Tiefe < 10°C werden bereits Verschiebungsraten von ~ 1 mm/Tag erreicht (Telejointmeter T8). In der Periode 03/04 waren die Verschiebungsbeträge fast doppelt so hoch wie in der Periode 02/03. Dabei dauerte die Kälteperiode mit Lufttemperaturen < 5°C um 2/3 länger als in der Periode 02/03.
- Die temperaturabhängigen Deformationen stagnieren im März nach Überschreiten des jährlichen Felstemperturminimums von 5-7°C. In Felstiefen von nur noch geringen Felstemperturschwankungen treten keine Verschiebungen mehr auf, was beim vorliegenden Objekt in Tiefen von etwa 10 m erreicht wird [4].
- Die Tagesschwankungen der Lufttemperatur haben keinen erkennbaren Einfluss auf den Deformationsverlauf.
- Das Fokussieren auf die Regenperioden zeigt bei einer erheblichen Datenstreuung eine eher lineare Abhängigkeit von Niederschlags- und Deformationsrate (Fig. 7). Dabei zeigen verschiedene Messgeber, wahrscheinlich aufgrund ihrer unterschiedlichen geometrischen Lage zu der Hauptbewegungsrichtung, bei gleichen Niederschlags- unterschiedliche Verschiebungsraten.
- Niederschläge haben zwar kurzfristig die grösseren Auswirkungen auf die Verschiebungsraten als die Temperaturänderungen. Da die winterlichen Kälteperioden meist arm an Regen sind, liegen die Anteile der niederschlags- und temperaturbedingten Verschiebungsbeträge einer Herbst/Winter-Periode in der gleichen Grössenordnung.
- Die Deformationsschübe setzen ab Herbst mit geringer Verzögerung von 1-2 Stunden nach Niederschlagsbeginn ein und können noch über Tage nach Niederschlagsende anhalten.

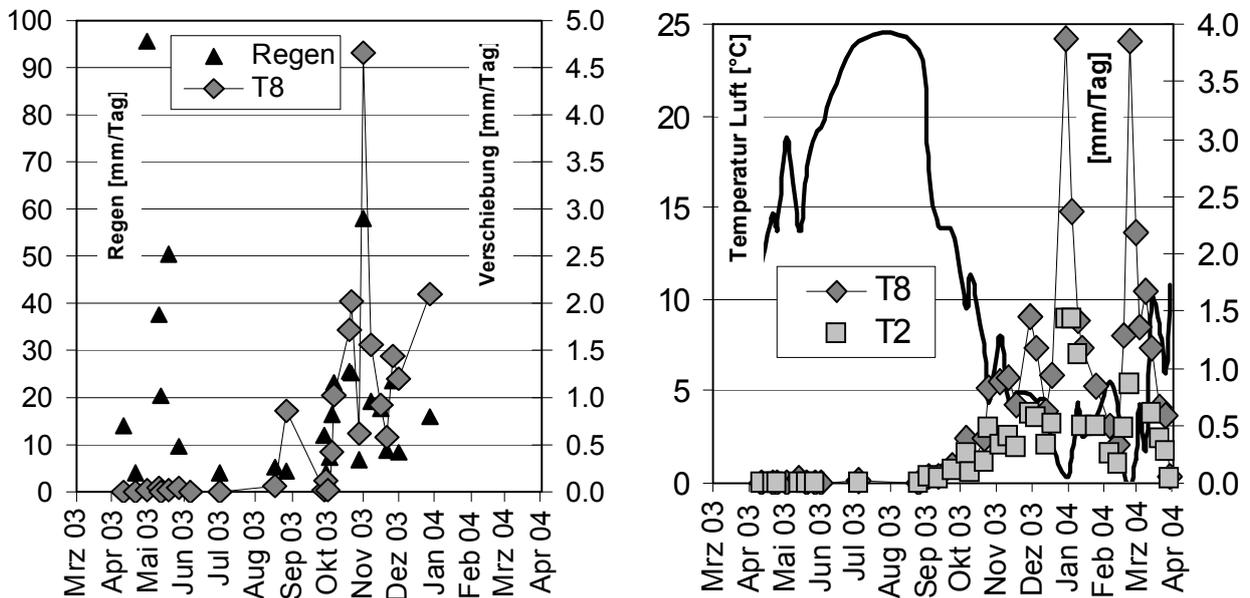


Fig. 6: Nur die Herbstniederschläge vermögen ab September Verschiebungen auszulösen (Telejointmeter), jene im Frühjahr/Sommer nicht (rechts, Darstellung nur der Regenperioden). Die Darstellung nur der Trockenperioden zeigt ab September die rein temperaturabhängigen Verschiebungsraten (links). Sie nehmen schlagartig ab, sobald die Temperatur wieder ansteigt.

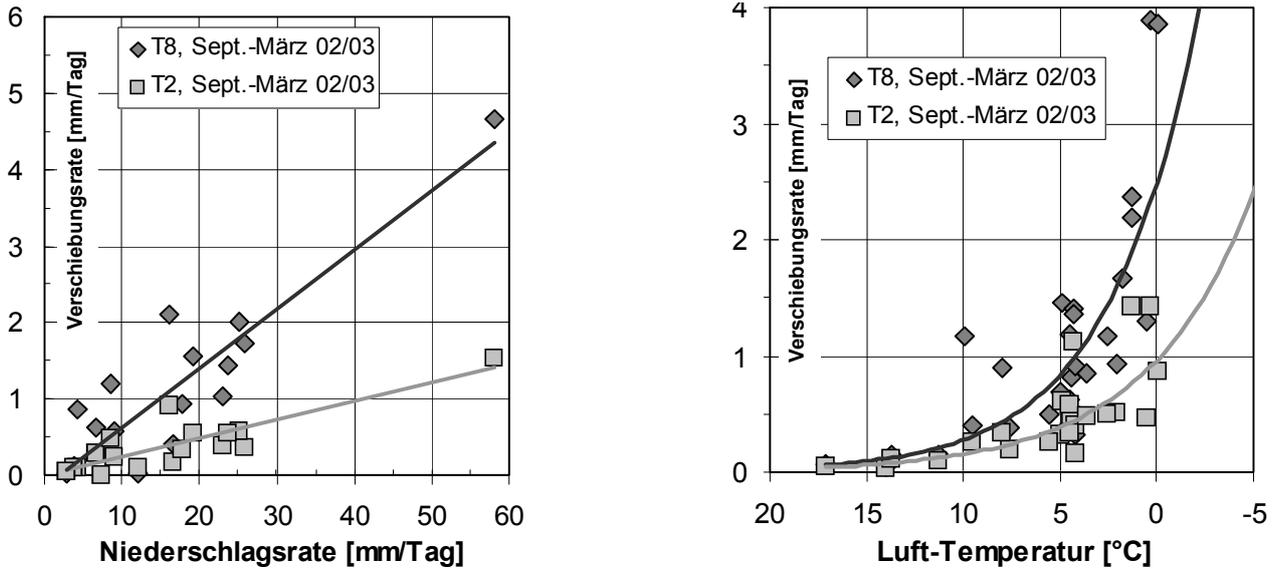


Fig. 7: Der Einfluss der Niederschläge auf die Verschiebungen ist eher linear. Jener der Temperatur verläuft exponentiell (links nur Regen-, rechts nur Trockenperioden dargestellt).

Dynamisches Entfestigungsmodell

Die Messdatenauswertung zeigt überwiegend plausible aber auch wenig verständliche Ergebnisse. So stellt sich die Frage, weshalb haben grosse Niederschlagsmengen im Frühjahr und Sommer keinen Einfluss auf die Verschiebungen? Oder wie können die rückläufigen Verschiebungen der Extensometer erklärt werden? Aufgrund der Untersuchungen lassen sich zwei, aus geologischer Sicht dynamische Entfestigungsmodelle ableiten.

Spannungsumlagerungen und Kluftwasserdruck

In der zerlegten, kritischen Sturzmasse des Val d'Infern aber auch in der gesamten Felsrippe treten kommunizierende Klüfte auf, die den Aufbau von Kluftwasserdruck ermöglichen. Die Zweiglimmer- und Biotitgneise zeigen ein deutliches Spröbruchverhalten. Senkrechte und als Fiederklüfte die Gneisbankung durchtrennende Spannungsrisse sind klare Hinweise für felsmechanische Spannungsumlagerungen, welche von der basalen Störzone aufsteigen. Dieses Modell wird durch die Tatsache gestützt, dass das ausserhalb der vorspringenden Felsrippe Richtung feste Felswand versetzte Extensometer E3 ebenfalls Verschiebungen von ~ 5 mm/Jahr anzeigt.

Der massgebende Entfestigungsprozess umfasst das Öffnen von Klüften für die Wasserwegsamkeit durch felsmechanisch bedingte Spannungsrissbildung, durch Brechen von Gesteinsbrücken und damit verbundenem Kohäsionsabbau. Dadurch steigt bei Niederschlag die Kluftwassersäule bzw. der hydrostatische Kluftwasserdruck, was als überlagernde Beanspruchung die Nukleation von neuen Spannungsrissen verursacht [1]. Diese kumulierenden, langsam fortschreitenden Prozesse bewirkten über Jahrzehnte im Kopfbereich der kritischen Sturzmasse einen fast vollständigen Abbau der Kohäsion, bis fast nur noch lose Felstürme auf dem noch kohäsiven Wandfuss stehen [4]. Im Ablösebereich sind daher die grössten Verschiebungsbeträge zu messen (Telejointmeter T8: Sept. 2003 bis März 2004 > 200 mm!). Der Fuss der Sturzmasse erfährt eine Zunahme der Spannungskonzentration, womit das Gestein überbeansprucht wird. Dies erhöht die Absturzgefährdung massiv. Aufgrund dieser Überlegungen stehen wir bei der kritischen Sturzmasse von $\sim 3'000$ m³ voraussichtlich kurz vor einem grösseren Sturzereignis. Ob „kurz“ hier Monate oder 1-2 Jahre bedeutet bleibt ungewiss.

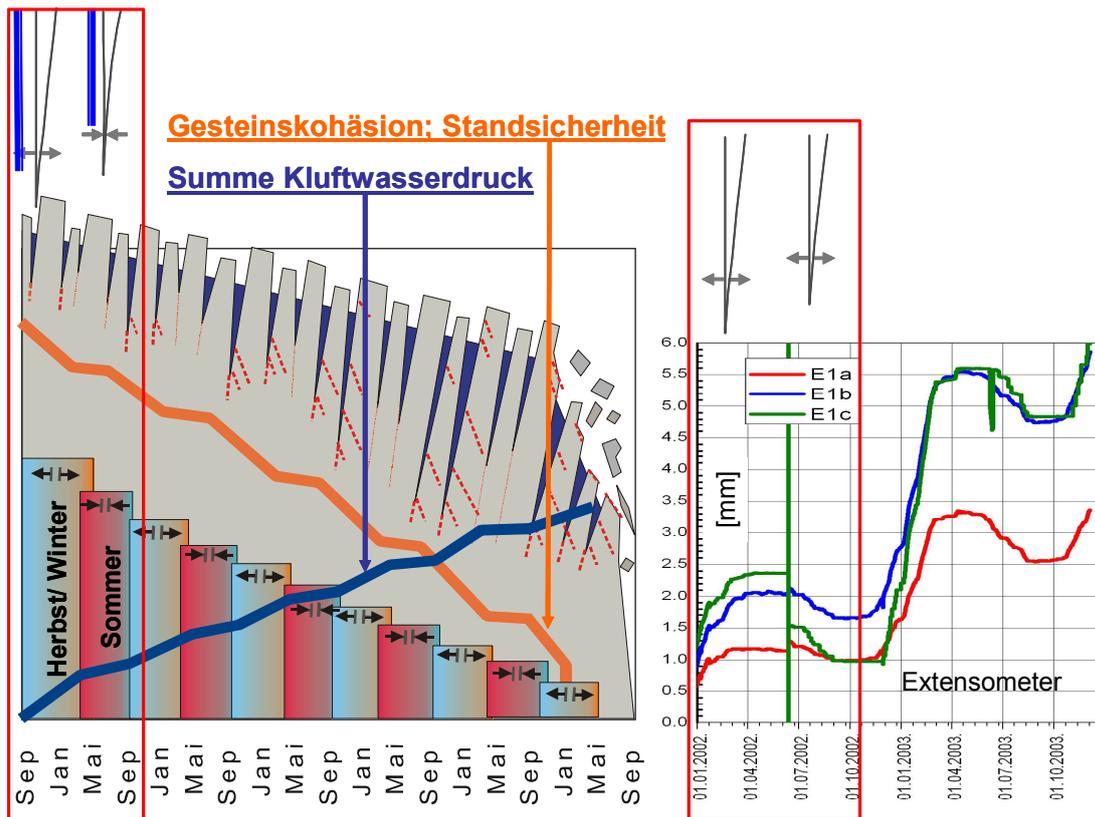


Fig. 8: Dynamisches Modell der jahreszeitlichen Expansion und Kontraktion der Klüfte. Durch Öffnen der Kluftbasis ab Herbst wird ein maximaler, kritischer Kluftwasserdruck erzeugt, entstehen Spannungsbrüche, und durch jährliche Zunahme der Klufttiefen die Gesteinskohäsion sowie die Standsicherheit abgebaut. Im Sommer herrscht relative Ruhe.

Temperaturwechsel und Kluftwasserdruck

Der periodisch wiederkehrende Bewegungsschub im Herbst ist primär temperaturbedingt und erfolgt aufgrund der Gesteinskontraktion nach Überschreiten des Felstemperaturmaximums (Fig. 4). Das unterschiedliche, niederschlagsbedingte Deformationsverhalten im Sommer und Herbst kann ebenfalls mit den jahreszeitlichen Temperaturänderungen erklärt werden. In einem spröden Gebirgstyp, wo tektonische Biegebeanspruchungen einen hohen Kluftdurchtrennungsgrad verursachen, führt dies zu jährlich variierenden Kluftöffnungsweiten sowie Klufttiefen [3].

Die Zugspannungen der Gesteinskontraktion wirken sich auf die schwächsten Zonen im Gebirge, die Klüfte, am stärksten aus (Fig. 8). Diese erfahren ab Herbst eine in die Tiefe abtauchende Öffnung und erreichen an der Basis Haarrissbreite. Bei Niederschlägen entstehen dadurch maximale Wassersäulen, was für das Gebirge kritische, hydrostatische Wasserdruckverhältnisse verursacht (10 kN/m² Wassersäule, Horizontaldruck). Die Gesteinsausdehnung im Frühjahr beendet den temperaturabhängigen Deformationsschub schlagartig nach Durchschreiten des Felstemperaturminimums. Die Klüfte werden im unteren Teil geschlossen, was bei Regen reduzierte Kluftwassersäulen bewirkt [4]. Diese sind für das Gebirge offenbar nicht mehr kritisch und vermögen keine Verschiebungen mehr auszulösen. Im Sommer rückläufige Extensometermessungen bestätigen dieses dynamische Temperatur/Kluftwasser Entfestigungsmodell. Die Gesteinsexpansion bewirkt zudem Zwängungen, was Felsbereiche mit hohem Durchtrennungsgrad wieder versteift.

Diese dynamische Ermüdung führt in spröden Gesteinen zu einer wachsenden Mikrorissbildung, zum Bruch von Gesteinsbrücken und zu kontinuierlichem Kohäsionsabbau. Dieser Prozess greift nur so weit in die Tiefe des Gebirges bis die Temperaturschwankungen so klein sind, dass nur noch geringe Zugspannungen im Gestein auftreten. In den Gneisen des Val d'Infern konnten mit den Extensometern temperaturabhängige Deformationen bis ~ 10 m Tiefe festgestellt werden [4]. In einem spröden Gebirgstyp können sich daher entlang steiler Felsflanken über Jahrzehnte Felsmassen von mehreren tausend m³ entfestigen, bis sie eine minimale Standsicherheit erreichen. Dann genügt ein zufälliger Auslöseprozess, wie eine Frostperiode, ein durch Starkregen injizierter Kluftwasserdruck, ein Erdbeben, etc., um den Absturz auszulösen.

Modellbestätigung an weiteren Objekten

Auf den ersten Blick erscheint es schwer vorstellbar, dass in starren Festkörpern von grosser Masse wie kristallinen Gebirgskomplexen rezent und ohne tektonische Einwirkungen sich Klüfte jahreszeitlich bedingt öffnen und schliessen, auch wenn dies nur im mm- Bereich erfolgt. Zudem herrscht oft die durchaus plausible Meinung vor, dass Kluftwasser in einer oberflächennahen, starken Felszerlegung abfliessen kann und kaum aufgestaut wird. Anhand vergleichbarer Objekte bestätigt sich jedoch dieses dynamische Entfestigungsmodell.

Felssturz Mesocco

Auf einem Plateau in Mesocco mit prähistorischen Gräbern öffneten sich 1994 etwa 10 m hinter einer 30-60 m hohen Felswand klaffende Risse in der Humusschicht. In den Folgejahren wurden geodätische Kontrollmessungen durchgeführt, Felsverschiebungen von 20 mm/Jahr gemessen, geologische Aufnahmen gemacht und als die Grösse des instabilen Felskörpers bekannt schien, wurden 1998 vorgespannte Anker versetzt. Es drohten etwa 100 m³ Fels aus ~ 10 m Höhe auf die am Fuss der Felswand als Galerie überdachte Brücke der Nationalstrasse zu stürzen. Die grob gebankten, metamorphen Kalkschiefer der Misoxerzone verfügten über ein Klufttrennflächensystem, welches Verschiebungen in Richtung der Galerieachse zuließ (Fig. 9). Wie sich später herausstellte, war die destabilisierte Felsmasse erheblich grösser als angenommen, was eine progressive Zunahme der Ankerkräfte zur Folge hatte und im Dezember 2000 ein Ablassen derselben erforderte (Fig. 11). Am 4. April 2001 erfolgte nach rapidem Kräftezuwachs der Anker ein Felsabbruch von ~ 8'000 m³ (Fig. 9). Erwartungsgemäss stürzte nur ein kleiner Teil von ~ 200 m³ auf das Galeriedach. Glücklicherweise kamen keine Menschen zu Schaden und jener am Bauwerk blieb relativ bescheiden. Wie die geologische Aufarbeitung ergab, knickte der nach unten verjüngte Fuss der Sturzmasse im Bereich der Moesa aus, was den Felssturz verursachte.

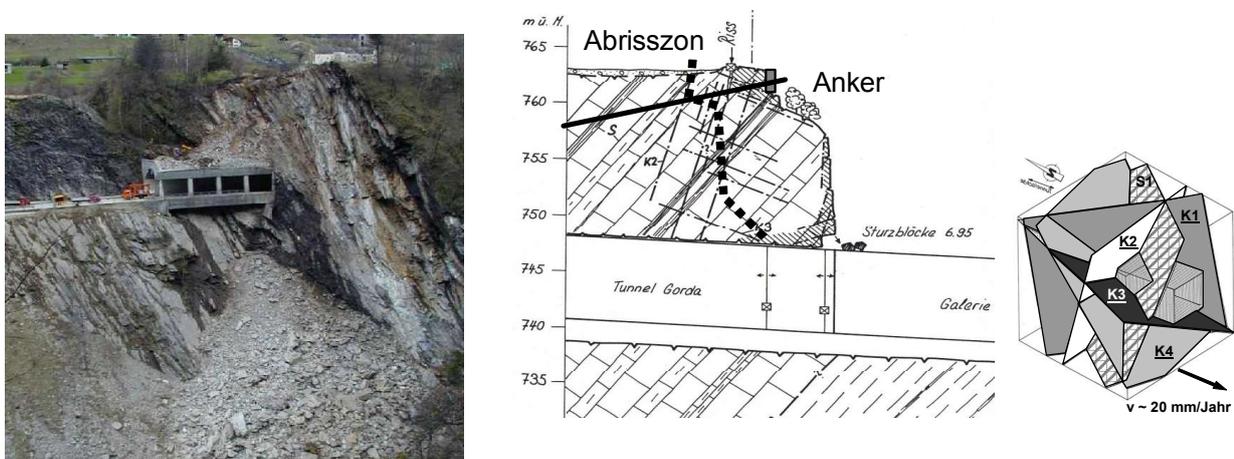


Fig. 9: Felssturz vom 4. April 2001 an der Nationalstrasse bei Mesocco. Schnitt durch die Tunnelachse mit der Abrisszone. Die Felsablösung erfolgte entlang der K2/K1 und den mit 50° geneigten K4-Klüften als Gleitflächen.

Das in dem metamorphen, spröden Gebirgstyp festgestellte Deformationsverhalten ist vergleichbar mit jenem im Val d'Infern. Aufgrund der Verschiebungsmessungen war erkennbar, dass stets ab Herbst die Deformationen ein- und ab Frühjahr wieder nahezu aussetzten (Rissmonitore). Da zum Zeitpunkt beginnender Deformationen die Lufttemperaturen noch deutlich über 0°C waren und grössere Bewegungsschübe meist nach Niederschlägen erfolgten, wurde damals nicht Frost sondern Kluftwasser als treibende Kraft angenommen.

Die mit Messdosen bestückten Anker zeigten jährlich ab September periodisch zunehmende und ab Frühjahr nahezu stagnierende Ankerkräfte, was mit dem gemessenen Deformationsverhalten korrelierte (Fig. 11). Auch an diesem Objekt vermochten nur die Herbstniederschläge, kaum aber jene des Frühjahrs und Sommers einen Kräftezuwachs auszulösen. Da man weder die Klimadaten noch der Felstemperaturverlauf am Objekt gemessen hatte, wurde der Einfluss der Temperatur auf den Entfestigungsprozess nicht erkannt. Es zeigt sich heute, dass die ab September steigenden Ankerkräfte mit einem Abfall der mittleren Lufttemperatur unter 10°C einsetzten.

Felssturz Lago di Poschiavo

Aufgrund der besonderen Felstrennflächenlage ist die ganze Westflanke des Lago di Poschiavo seit Jahrzehnten bekannt für kontinuierliche Felsentfestigungen und periodische Felssturzaktivitäten. Der schmale, steile Uferstreifen erforderte bei den gebündelten Verkehrsträgern Strasse und Schiene den Bau vieler Kunstbauten. Damit entstand für Felssturz ein hohes Schadenpotential. Am Südennde des Sees beschädigte 1998 ein Felssturz von lediglich 20 m³ Gestein aus 30 m Fallhöhe die Ponte Scalascia VI derart, dass sie statisch verstärkt werden musste (Fig. 10).

4.04.01 (unten, Geodäsie).

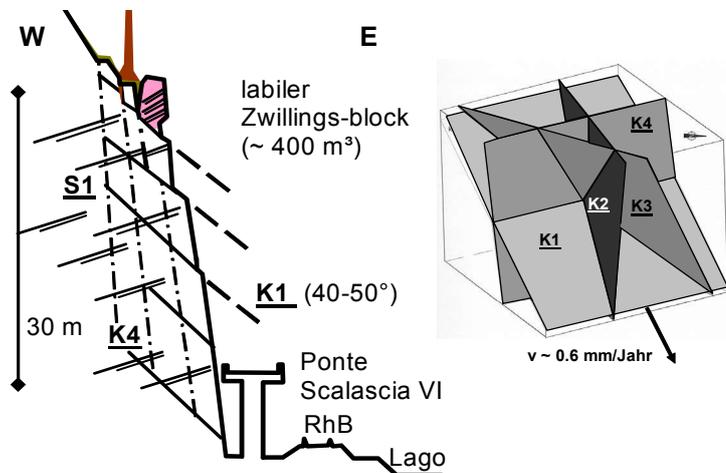
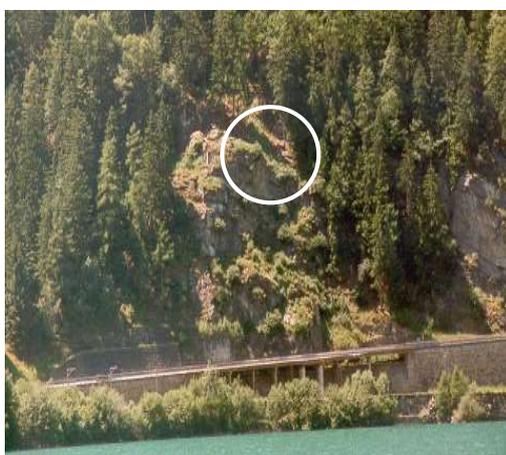


Fig. 10: Felsackungsmasse mit Ausbruchnische von 1998 (Kreis), wo ein Felssturz von 20 m³ aus 30 m Höhe die Ponte Scalascia VI beschädigte. Die Felsentfestigung erfolgt durch Ablösung entlang der K4, K2 und K3 Klüfte und der Gleitfläche K1 mit 40-50° Neigung.

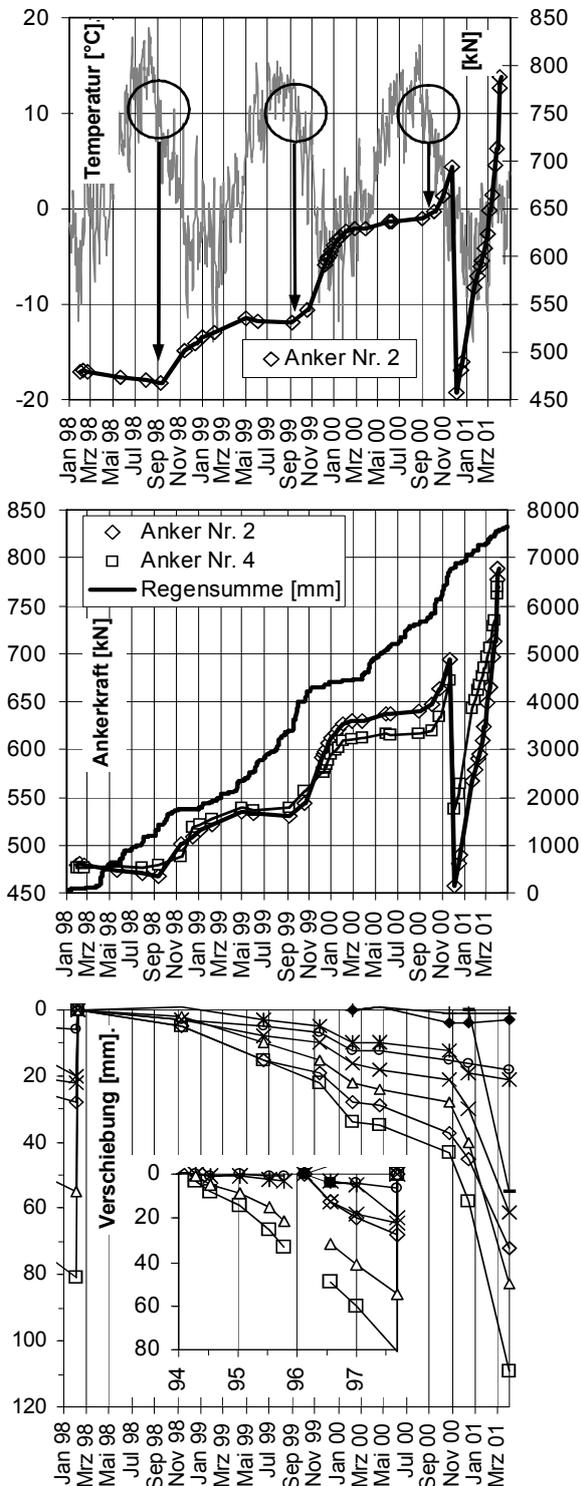


Fig. 11. Felssturz Mesocco: Sinkt die Lufttemperatur im September unter 10°C beginnen die Ankerkräfte zu steigen (Messstation San Bernardino). Sie stagnieren ab März wieder. Verschiebungsverlauf bis zum Felssturz vom

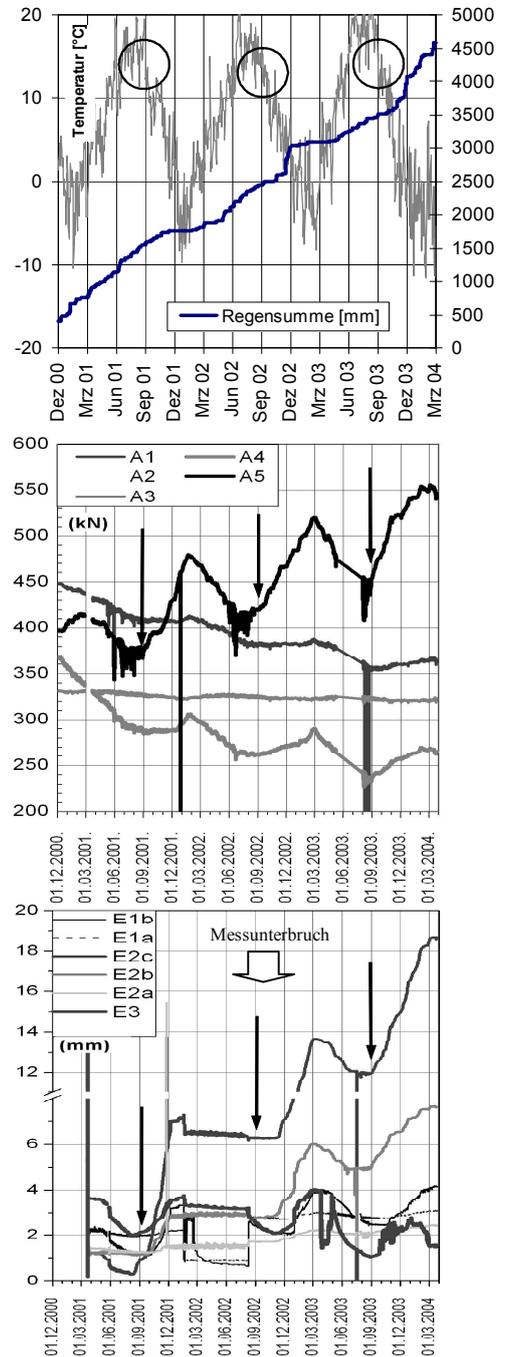


Fig. 12. Lago di Poschiavo: Der Beginn der Ankerkraftzunahme ab September ist primär temperatur- und nicht niederschlagsabhängig (Messstation Robbia, oben). Die Ankerkräfte (Mitte) schwanken mit dem Jahrestemperaturverlauf und die Extensometer zeigen eine ähnliche Zyklizität (unten).

Detaillierte geologische Untersuchungen und Ergebnisse von versetzten Telejointmetern brachten in 30 m Höhe eine instabile Felsmassen von 400 m³ und damit ein für die Brücke kritisches Gefahrenpotential zu Tage. Im ungünstigsten Fall musste gar mit Sturzmassen von 6'000 – 10'000 m³ gerechnet werden. Im Ereignisfall wären damit alle Verkehrsträger von Süden ins Puschlav für Monate unterbrochen.

Es folgten 1999 verschiedene Risikoanalysen, bauliche Massnahmenevaluationen, zusätzliche Instrumentierungen mit Extensometern und das Etablieren eines Frühwarn- und Alarmdispositivs. Im Jahr 2000 erfolgte als chirurgischer Eingriff ohne Sprengarbeiten der heikle Abtrag des 400 m³ grossen, labilen Zwillingsblocks und verschiedene Ankerarbeiten [2] (Fig. 13).

Anhand der neuen Aufschlüsse und der Ankerbohraufnahmen konnte von der Felswand ein detailliertes Befundprofil erstellt werden. Die Gneise der Felsackungsmasse bilden eine vollständig zerlegte, von aussen her kompakt erscheinende Felswand von 5-7 m Stärke. Dahinter folgt ein wirres Blockhauffwerk mit bis mehrere Meter breiten Klüften und Höhlen. Die in der Tiefe folgende Felswand ist ebenfalls von offenen Talklüften durchsetzt. Durch Felsgleiten stottern die entlang der Talklüftung sowie der senkrecht dazu stehenden Trennflächen abgelösten Kluffkörper auf Gleitflächen von 40-50° Neigung über Jahrzehnte talwärts (Fig. 10). Angesichts des extrem hohen Zerlegungsgrads und den grossen Klufföffnungsweiten waren sich alle am Objekt beteiligten Geologen darüber einig, dass Kluffwasser abfliesst und keinen massgebenden Staudruck aufzubauen vermag. Das Monitoring zeigte jedoch, dass im Herbst mit einem Verzug von ~ ½ Tag nach Niederschlägen Verschiebungen im 1/10 mm bis 1 mm Bereich auftraten.

Die im Zweistundentakt automatisch gemessenen, bis 30 m langen Mehrfachextensometer zeigen zwischen September und März Verschiebungen > 5 mm. Im Sommerhalbjahr sind sie leicht rückläufig, wie jene im Val d'Infern. Einige Ankerkräfte widerspiegeln diesen periodischen, saisonalen Trend. Unabhängig davon, ob die Ankerkräfte über die Jahre hinweg abnehmende oder zunehmende Tendenzen zeigen, weisen sie von September bis März schwingungsähnliche Kräftezunahmen bis 20% und zwischen März und September entsprechende Abnahmen auf (Fig. 12). Gleich wie in Mesocco setzen im ebenfalls spröden Gebirgstyp die Felsdeformationen und Ankerkraftzunahmen primär aufgrund des Temperaturabfalls und nicht von Niederschlagszunahmen ein.

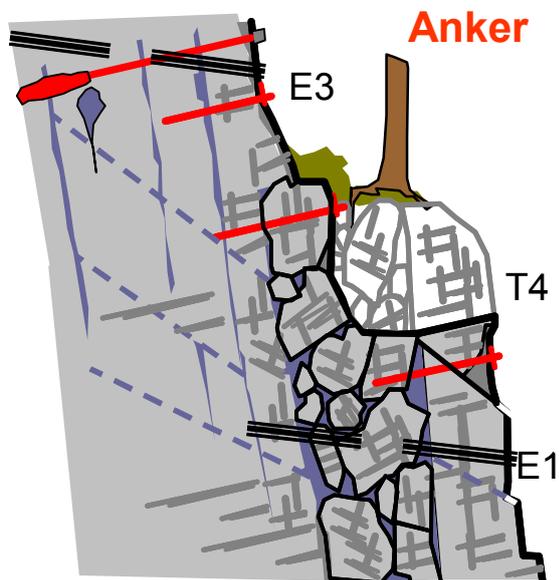


Fig. 13: Lago di Poschiavo: Nach Versetzen der Extensometer (E1-E3), nach Teilabtrag und Ausführung der Ankerarbeiten zeigt das geologische Befundprofil hinter der ~ 5-7m starken Felswand ein Hauffwerk von Blöcken mit grossen Hohlräumen. Die dahinter folgende Felswand ist mit offenen Talklüften K4 zerlegt.

Folgerungen

Das aufgrund der Verschiebungsmessungen, der Klimadaten und des Felstemperaturverlaufs im Val d'Infern für spröde Gebirgstypen abgeleitete, dynamische Temperatur/Kluftwasser Entfestigungsmodell bestätigt sich an den zwei vergleichbaren Objekten in Mesocco und am Lago di Poschiavo. Bei Letzteren korreliert der saisonale Verlauf der Deformationen mit jenem der Ankerkräfte. Verschiebungs- und Ankerkraftzunahme setzen bei Unterschreiten der mittleren Tageslufttemperatur von ~ 10°C ein. Vergleichbare Messungen im duktilen Gebirgstyp zeigen ein vollständig anderes Deformationsverhalten, auf das in dieser Arbeit nicht eingegangen werden kann.

Primär bewirken die jährlichen Temperaturwechsel die oberflächennahe Gebirgsentfestigung (Ermüdung). Dieser dynamische Prozess wird sekundär durch Kluftwasserdruck verstärkt (Rissbildung). Der maximale Kluftwasserdruck bildet sich temperaturbedingt jeweils in der Herbst/Winter-Periode, wenn die Klüfte am weitesten geöffnet sind. Zwischen September und April besteht in spröden Gebirgstypen daher das grösste Felssturzsrisiko, was die Ereignisse im Val d'Infern nachdrücklich bestätigen.

Bis in Felstiefen von 10 m bewirken temperaturabhängige Spannungsänderungen blasbalgähnliche Kluftbewegungen im mm-Bereich, die zu einer dynamischen Gesteinsermüdung führen. Mit sinkender Felstemperatur steigen die Deformationsraten exponentiell. Niederschlagsabhängiger Kluftwasserdruck verursacht bei maximalen Kluftöffnungsweiten starke Deformationsschübe. Diese überlagernden Prozesse bewirken einen Kohäsionsabbau und die Reduktion der Standsicherheit. Die für Felssturz ungünstigsten Verhältnisse sind mittlere Tagestemperaturen < 5°C und starke Niederschläge.

In Felstiefen > 10 m sind keine temperaturabhängigen Entfestigungseinflüsse mehr erkennbar. Kluftwasserdruck wirkt hier nur noch als einer von vielen Auslöseprozessen in Verhältnissen von sehr bescheidener Stabilitätsreserve. Oder er wird als überlagernde Einwirkung von felsmechanisch bedingten Entfestigungsprozessen massgebend (Spannungsumlagerungen). Bei kritischen Stabilitätsverhältnissen treten Ereignisse zufällig und unabhängig von der Jahreszeit auf. In solchen Fällen ist eine Frühwarnung nicht mehr möglich.

Die Analyse und das Verstehen der Entfestigungsprozesse im spröden Gebirgstyp zeigen, dass eine Klimaerwärmung mit Auswirkungen von steigenden Temperaturen und heftigen Niederschlägen auf diese oberflächennahen Prozesse kaum einen wesentlichen Einfluss haben können. Bei Auslöseprozessen von Felssturz spielen Starkniederschläge dagegen eine bedeutende Rolle. Hier kann die Klimaerwärmung kurz bis mittelfristig zu einer Zunahme von Ereignissen führen. Dies so lange, bis die heute kritischen Felsinstabilitäten in den Alpen abgeräumt sind. Dann ist das relative Gleichgewicht wieder eingestellt. Da die Klimaerwärmung ein langsamer Prozess ist, wird diese Ereigniszunahme kaum spürbar sein. Innerhalb der geologischen Entwicklungsdynamik kann somit für den Prozess Felssturz nicht von ausserordentlichen Verhältnissen gesprochen werden.

Referenzen

- [1] Eberhardt, E., Willenberg, H., Loew, S., Maurer, H.R. 2001: Active rockslides in Switzerland – Understanding mechanisms and processes. In: UEF International Conference of Landslides-Causes, Impacts and Countermeasures, 25-34. Verlag Glückauf GmbH Essen.
 - [2] Krähenbühl, R. 2001: Frühwarndienst in einem 1600 km langen Strassennetz. Mitt. Schweiz. Ges. f. Boden- und Felsmechanik, 143: 66-71.
 - [3] Krähenbühl, R. 2004: Gebirgswasser und Deformationen. 4. Kolloquium Bauen in Boden und Fels, Tagungshandbuch: 241-246. Technische Akademie Esslingen, Ostfildern
 - [4] Krähenbühl, R. 2004: Temperatur und Kluftwasser als Ursache von Felssturz. Bull. angew. Geol. 9/1, 19-35
-