

Freitag 20. Oktober 2017

09:30-10:00

Der Tunnel dem sein Fels davon läuft

Ruedi Krähenbühl ¹⁾, Florian Donau ¹⁾

¹⁾ BauGrundRisk GmbH, Sennensteinstrasse 5, CH-7000 Chur

Zusammenfassung

Der im Fels vorgetriebene Aclatobel-Tunnel liegt am Anfang der Safienstrasse, welche westlich von Chur, Graubünden, Schweiz, von der Rechtsrheinischen Oberländerstrasse aus ein 25 km langes Seitental mit ~ 400 Einwohnern erschliesst (Abb. 2).

Etwa 15 Jahre nach dessen Bau haben sich in zwei diskreten Zonen intensive Rissdeformationen und Fahrbahnabsenkungen eingestellt, worauf die Sicherheit des Tunnels in Frage gestellt werden musste. Die Ursachen für diese Deformationen waren unklar und so wurden als Basis für eine Massnahmenplanung geologische Abklärungen vorgenommen.

Die auf der Basis einer geologisch-geomorphologischen Kartierung erstellte Arbeitshypothese ermöglichte es, ein auf gezielte Fragestellungen hin ausgerichtetes Sondierkonzept umzusetzen. Mit dem Befund der Sondierbohrungen und den darin ausgeführten Inklinometermessungen konnte die Arbeitshypothese bestätigt werden. Es zeigte sich, dass dem 80 m unter der Oberfläche im Felsen liegenden Tunnel in lokal begrenzten Zonen der Felsen buchstäblich davon läuft.

1. Die Tunneldeformationen und die Randbedingungen

Der 2 km lange Aclatobel-Tunnel hinterfährt in einer langgezogenen Kurve das Aclatobel und wurde gebaut, da die alte, durch das Tobel führende Strasse in einer ~ 500 m breiten Lockergesteinsrutschung um bis zu 0.5 m/Jahr talwärts verschoben wurde [2]. Heute findet man Stützmauern der alten Strasse bis 20 Höhenmeter unterhalb dem ehemaligen Strassentrassee (Abb. 7/f).

Der in den Jahren 1986 bis 1990 bergmännisch erstellte Aclatobel-Tunnel weist an zwei ~ 50 m auseinander liegenden, jeweils ~ 7 m breiten Stellen intensive Risschäden am Innenring auf (Abb. 7/d). Die Tunnelsohle hat sich lokal abgesenkt. Die Risschäden mussten 2013 und 2015 mit Netzen und Ankern gesichert werden und die Sohle wurde periodisch reprofiliert ([4], Abb. 1). Die im Tunnel geführten Werkleitungen haben bisher keinen übermässigen Schaden genommen. Eine seit 2013 ausgeführte, geodätische Vermessung zeigt quer zur Tunnelachse verlaufende Verschiebungen, die maximale Geschwindigkeiten von knapp 10 mm/Jahr aufweisen.

Der Tunnel liegt in 80 m Tiefe und nachweislich vollständig im Fels. Er führt durch Phyllit-, Kalk- und Sandkalkschiefer der Bünderschieferserien, die mit einer ~ 50° in Richtung SE zum Alcatobelbach hin geneigten Schieferung einfallen. Die beiden Klüfte K1 und K2 stehen steil und verlaufen längs und quer zum Hang (Abb. 4). Der Fels ist oberflächlich grösstenteils von Gehängeschutt bedeckt und gegen die eingangs des Tobels auftretende Geländerippe ist er entlang der Schieferung freigelegt (Abb. 7/a).



Abb. 1: In den zwei ~ 7 m breiten, 50 m auseinander liegenden Deformationszonen mussten die Risse im Beton mit Netzen und Ankern gesichert werden; Ausführung der Bohrung SB 1 bis in 24 m Tiefe unter die Tunnelsohle.

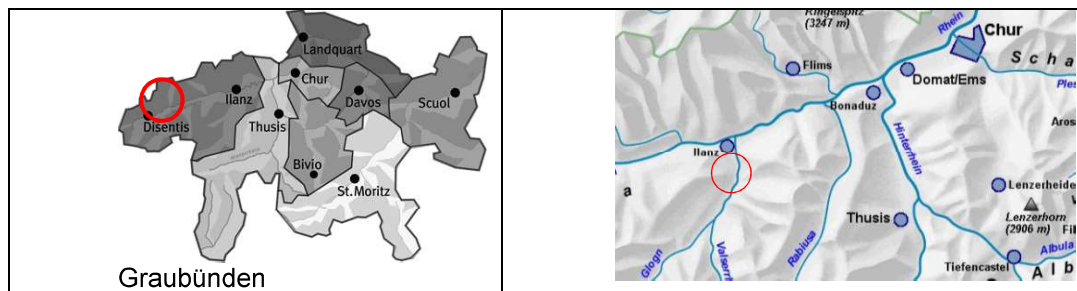


Abb. 2: Der 2 km lange Tunnel hinterfährt am Anfang des ~ 25 km langen, nach Südwesten verlaufenden Safientals das Aclatobel in einer langgezogenen Kurve.

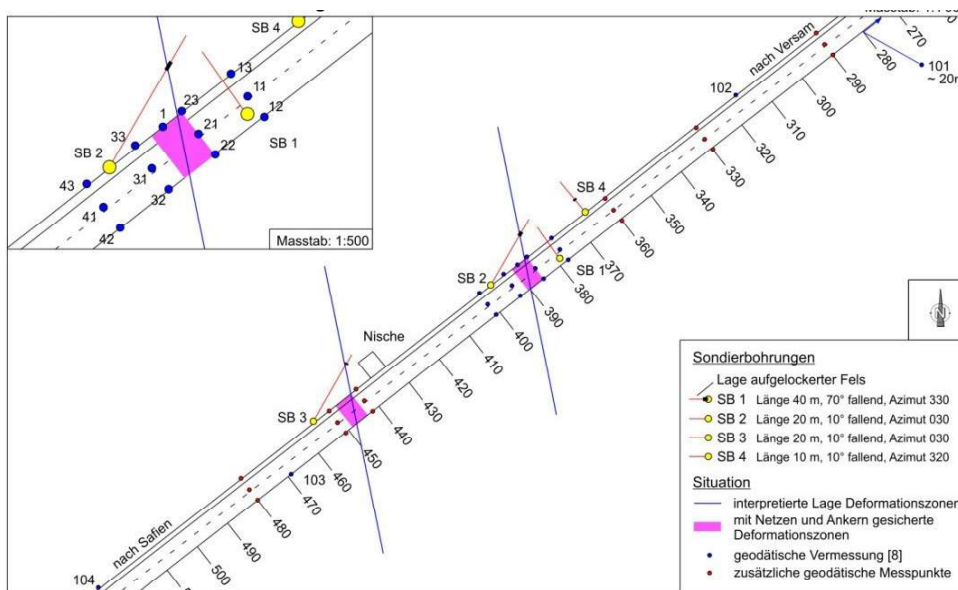


Abb. 3: Im Bereich der zwei Deformationszonen wurden 4 Sondierbohrungen mit dem Ziel ausgeführt, die Ursachen der Deformationen zu klären. Die Querschnitte der Zonen wurden geodätisch vermessen [2].

Während des Tunnelausbruchs wurden im Bereich der heute auftretenden Deformationsstellen keine Störzonen dokumentiert und die Vortriebssicherung wurde über die ganze Strecke in derselben Ausbruchklasse mit Spritzbeton und Ankern ausgeführt [1].

Die zwei vor dem Bau von der Oberfläche aus bis unter das Tunnelniveau ausgeführten und mit Inklinometern ausgestatteten Sondierbohrungen zeigten nach einer kurzen Messzeit von 1.5 und 5 Monaten im Übergang des Lockergesteins zum Felsen ausgeprägte Gleitzonen, die > 50 m oberhalb des Tunnelniveaus lagen [1].

Da die lokalen Deformationen im Betoninnenring progressiv zunahm, wurde ein Ingenieurbüro beauftragt, die Sicherheit des Tunnels zu überprüfen und ein Massnahmenkonzept für die Instandsetzung zu erarbeiten. Dieses sah verschiedene, kostenintensive Varianten mit einem Fächer, der von einem Einbau mit flexiblen Stahlbögen bis hin zu einem lokalen Ersatz und einer Verstärkung des Innenrings, reichte. Die Ursachen der eingetretenen Deformationen konnten bis dahin nicht eindeutig geklärt werden und beruhten auf Vermutungen. Auf dieser Basis war es nicht vertretbar, aufwendige Massnahmen zu planen und auszuführen und es waren geologische Untersuchungen mit dem Ziel erforderlich, die Schadensursachen abzuklären.

2. Geologischen Untersuchungen

2.1. Untersuchungskonzept

Als Arbeitshypothese standen drei mögliche Ursachen im Vordergrund: a) Tunnel in aktiver Rutschung, b) Kluftwasserdruck, c) quellendes Gebirge [5]. Die Ursache a) war schlecht vorstellbar, da der Tunnel in 80 m Tiefe vollständig im Felsen liegt. Und für ein quellendes Gebirge waren einerseits das Bündnerschiefer Gebirge und andererseits das Deformationsbild im Tunnel wenig typisch.

Das ganze Tobel wurde geologisch und geomorphologisch kartiert. Aufgrund der ersten Erkenntnisse der Kartierung wurden im Tunnel gezielt Sondierbohrungen angesetzt.

Die zwei Deformationszonen wurden mit je einer 10 m langen Schrägbohrung durchbohrt (SB2, SB3). In einer im Tunnelparament nahezu horizontal ausgeführten Bohrung wurden in verschiedenen Tiefen 3 Porenwasserdruckgeber versetzt (SB4). Und in der Tunnelsohle erbohrte man den Felsen bis 24 m Tiefe in vertikaler Richtung (SB1, Abb. 3). Ausser der SB 4 wurden alle Bohrungen mit Inklinometern ausgerüstet, dies in der Hoffnung, lokale Felsverschiebungen zu erkennen. Im Tunnel wurde zur Erfassung der gesamten Deformationen ein Laserscann vorgenommen.

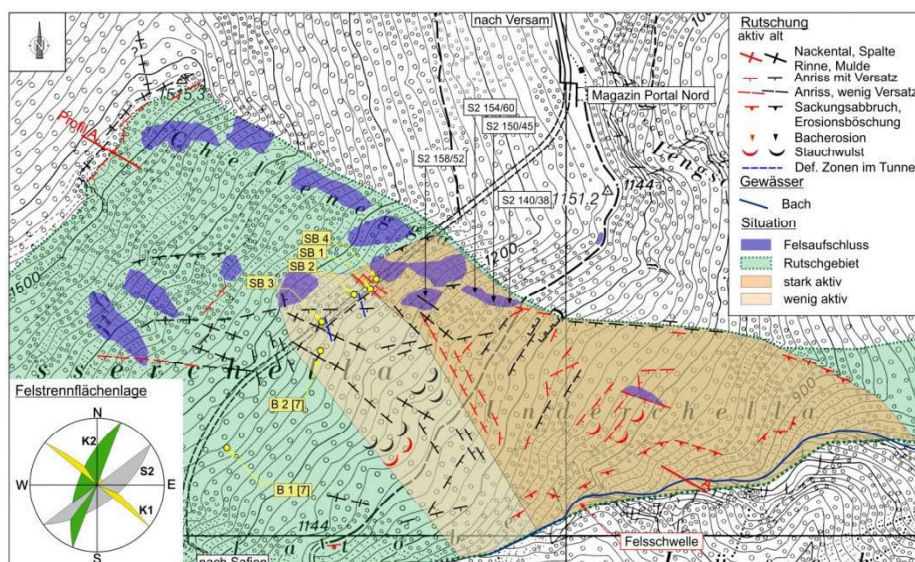


Abb. 4: Die geologisch-geomorphologische Kartierung ermöglichte es, verschiedene aktive Rutschgebiete zu unterscheiden und eine Arbeitshypothese für die Deformationsursachen im Tunnel zu bilden [5].

2.2. Ergebnisse und Interpretation der Untersuchungen

Anhand der geomorphologischen Feldaufnahmen konnte die Rutschung in drei Teilrutsche gegliedert werden ([5], Abb. 4). Die Bünderschiefer Bänke wurden durch den Aclatobelbach erosiv unterschritten, was den Hangfuss der nördlichen Flanke schwächte. Infolge der progressiv hangaufwärts fortschreitenden Felsentfestigung konnte sich bergseitig eine aktive Felsrutschung ausbilden. Im untersten Teil dieser Felsrutschung wurde der Felsen in einer Blockschutt Rutschung vollständig zerlegt. In früheren, geologischen Arbeiten wurde diese als Lockergestein, d.h. als Gehänge- und Blockschutt kartiert [3]. Weiter Hang aufwärts treten im Schutt immer mehr, gleich gerichtete Felsbänke auf, bis schliesslich der zusammenhängende, anstehende Felsen auftritt. In diesem zusammenhängenden Felsen lösten sich entlang der Trennflächen bis in die Tiefe des Tunnelniveaus treppenförmig abgestufte Felsbänke, die heute talwärts kriechen (Abb. 5).

Zu oberst am Grat des Aclatobels liegen hinter den Abrisskanten Nackentälchen (Doppelgrat, Abb. 5). Unterhalb des Grates bildete sich an der Felsoberfläche lokal ein auf der Schieferung oberflächennah abgleitender Gehängeschutt Rutsch, der aus den obersten, schräg talwärts geneigten Schieferbänken entstand (Abb. 7/a). Von dieser Lockergesteinsrutschung wurde die alte Strasse erfasst und sie ist in stark nassen Perioden bis um mehrere Meter pro Jahr talwärts gegliitten.

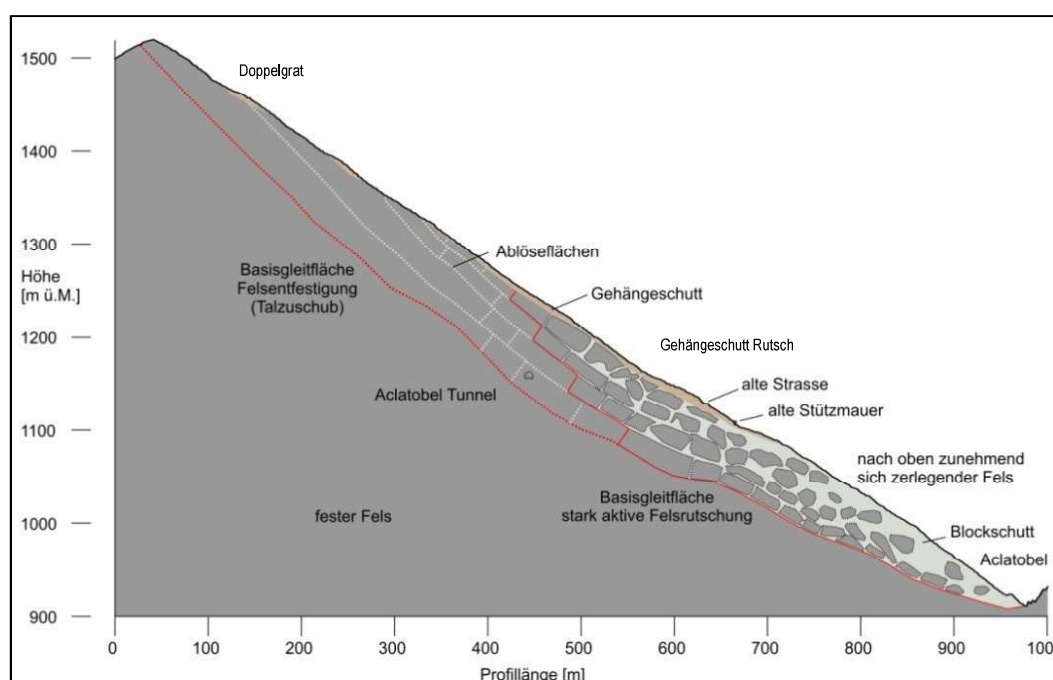


Abb. 5: Das Profil mit der anhand der geomorphologischen Kartierung erstellten Arbeitshypothese erlaubte es, die Bohrungen exakt zu platzieren [5]; die infolge der Bacherosion entstandene Felsrutschung zeigt alle Entfestigungsübergänge, von vollkommen zerlegtem Blockschutfeld am Hangfuss, über entlang der Felstrennflächen zerlegte Felsschollen, bis hin zur Doppelgratbildung im kompakten Felsen am Tobelgrat..

Die Deformationszonen des Tunnels liegen voraussichtlich in der kriechenden Einflusszone der heute wahrscheinlich wenig talseitig des Tunnels verlaufenden, aktiven Felsrutschung. Aufgrund der Feldaufnahmen musste das Felskriechen arbeitshypothetisch als die Hauptursache der Tunneldeformationen betrachtet werden.

Arbeitshypothese durch Sondierungen bestätigen

In den beiden schräg durch die Deformationszonen des Tunnels durchörterten Bohrungen SB 2 und SB 3 wurde in 15 - 18 m Tiefe ein in einer Stärke von 0.5 m bzw. 1.5 m vollständig zerlegter Felsen angetroffen. Die letzten Inklinometermessungen vom September 2017 bestätigen, dass in Tiefen von 15 – 18 m aktive Scherungen von ~ 4 mm/Jahr stattfinden. Die geometrisch erfasste Scherrichtung verläuft entlang der K1 Klüfte (Abb. 6).

Die in der Tunnelsohle vertikal ausgeführte SB 1 zeigte zwischen 14.0 m und 16.5 m Tiefe stark zerlegten Felsen und das eingebaute Inklinometer ergab in 16.5 m Tiefe eine, auf der Schieferung S2 verlaufende Gleitung mit einer Verschiebungsrate von 11 mm/Jahr.

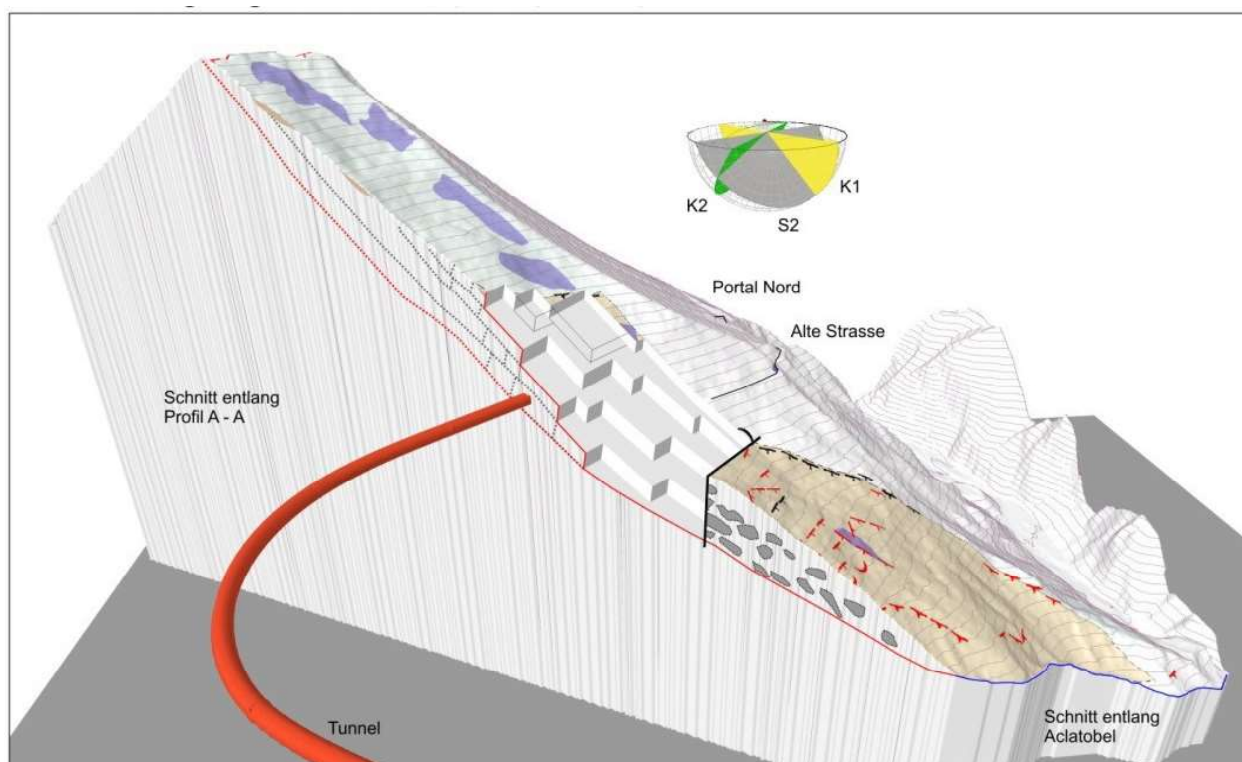


Abb. 6: Geologisches 3D Modell der lokalen Felsrutschung die als primäre Ursache der Tunneldeformationen durch die Sondierbohrungen und Inklinometermessungen bestätigt werden konnte (Signaturen gemäss Legende Abb. 4, [5]).



Abb. 7: a) Gehängeschutt aus abgefahrenen Felsplatten unter dem Tobelgrat; b) Felszertrennung in Hangmitte der Felsrutschung; c) bis zu Blockschutt zerlegter Felsen mit entlang der Schieferung ausgerichteten Blöcken am Hangfuss; d) Risse und Spalten in den Deformationszonen des Tunnels; e) zu Lockergestein zerlegter Felsen in der Gleitzzone in 16 m Tiefe der SB 1; f) Im Lockergesteinsrutsch 20 Höhenmeter unter das alte Strassentrasse verschobene Stützmauer.

In den Porenwasserdruckgebern der SB 4 konnten bisher auch während der Schmelzwasserperiode keine Wasserdrucke gemessen werden. Dies erscheint plausibel, da das geologische Modell der Felsrutschung entlang der sich öffnenden Felstrennflächen ausreichende Wasserwegsamkeiten für eine räumliche Gebirgsdrainierung ermöglichte.

In den untersuchten Gesteinsdünnschliffen konnten erwartungsgemäss keine quellenden Mineralien und auch kein Gips vorgefunden werden.

3. Folgerungen und Ausblick

Als Hauptursache der Tunneldeformationen ist eine erosiv entstandene Felsrutschung zu nennen, die gemäss den Inklinometermessungen mit Gleitzonen bis 16 m unterhalb der Tunnelsohle den Tunnel erfasste. D.h. dem Tunnel läuft entlang der massgebenden Felstrennflächen S2, K1 und K2, wie mit einer ausfahrenden Schublade, lokal sein Felsen in Form eines Kriechens kontinuierlich davon.

Kluftwasserdruck und quellendes Gebirge können als Nebenursachen nahezu ausgeschlossen werden.

In der zukünftigen Entwicklung der Felsrutschung und der Tunneldeformationen ist zu erwarten, dass die Deformationsgeschwindigkeit in diesem, aufgrund des grossen Felsvolumens trägen Systems, nur sehr langsam zunehmen wird. Hingegen muss aufgrund der in dem vorgegebenen Trennflächensystem ablaufenden Spannungsumlagerungen mit im Tunnel sich räumlich ausdehnenden Deformationen gerechnet werden. Mit dem Ausbilden von weiteren, diskreten Scherzonen im Tunnel ist über die Nutzungsdauer zu rechnen.

Die diskreten Scherzonen vermögen das Tunnelgewölbe nicht unmittelbar zu gefährden. Damit sind sämtliche, primär vorgesehenen Instandsetzungsmassnahmen zur Verstärkung des gesamten Tunnelgewölbes unnütz. Im Gegenteil, es muss mit derart grossen Kräften gerechnet werden, dass sich kein noch so starker Ausbau den resultierenden Deformationen zu widersetzen vermag. Da die Felsrutschung primär durch eine erosive Unterschneidung ausgelöst wurde, kann eine Stabilisierung durch Entwässerungsmassnahmen kein Thema sein.

Demnach muss nach baulichen Lösungen gesucht werden, welche die Gebrauchstauglichkeit des Tunnels im Bereich dieser Scherzonen zu gewährleisten vermögen. Dies können periodische Sicherungen mit Ankern und Netzen beinhalten, die verhindern dass keine Betonabplatzungen auf die Fahrbahn gelangen. Ebenso sind im Bereich der Scherzonen die sich absenkende Fahrbahn periodisch zu reprofiliert und die Werkleitung zu erneuern. Nach weiterem Deformationsfortschritt kann in den Scherzonen ein lokaler Ersatz des Betongewölbes, allenfalls kombiniert mit einem als räumlicher Puffer angedachten, bergseitig stark überprofilierten Felsabtrag, in Frage kommen.