

# Schadensermittlung für den Bosruck Eisenbahntunnel

Karl Grossauer, Kurt Klima  
*3G Gruppe Geotechnik Graz ZT GmbH, Graz, Österreich*

Robert Wittner  
*Spirk & Partner ZT GmbH, Salzburg, Österreich*

Helfried Bretterebner  
*Österreichische Bundesbahnen, GB Planung & Engineering, Wien, Österreich*

**KURZFASSUNG:** Alterungsprozesse, hervorgerufen durch Einflüsse aus dem Gebirge, der Umwelt und der Nutzung hinterlassen an Tunnelanlagen im Laufe der Zeit teilweise erhebliche Schäden an der gesamten Substanz. Um einen sicheren und wirtschaftlichen Betrieb dieser Anlagen zu gewährleisten, sind daher immer wieder Sanierungsmassnahmen erforderlich. Für die Planung und Ausführung solcher Maßnahmen ist eine umfassende Zustandserhebung von wesentlicher Bedeutung. Die Ermittlung der Schadensarten, deren Ausmaß und speziell deren Ursachen spielt dabei eine ganz besondere Rolle.

Am Beispiel des Bosruck Eisenbahntunnels wird die Vorgehensweise der Schadensermittlung gezeigt. Der Artikel konzentriert sich auf die angetroffene Zersetzung der Spritzbetonschale am Übergang Mauerwerk – Spritzbeton, auf die Ermittlung deren Ursache und die zukünftigen Auswirkungen auf den Tunnel.

## 1 EINLEITUNG

Die Österreichischen Bundesbahnen betreiben und erhalten eine Reihe von alten Eisenbahnanlagen. Dazu zählt auch der an die 100 Jahre alte Bosrucktunnel an der Grenze von Oberösterreich zur Steiermark.

Negative Einflüsse aus dem Gebirge, der Umwelt und dem Betrieb mit immer höheren Lasten und Geschwindigkeiten haben über die Jahrzehnte die Substanz dieser Anlage teilweise stark beeinträchtigt. Bereits seit Inbetriebnahme traten an der Tunnelauskleidung und am Sohlkanal laufend Schäden auf, die ständig Erneuerungen und Ausbesserungsarbeiten erforderten, jedoch trotzdem immer wieder teilweise zerstört wurden. Um einen sicheren und wirtschaftlichen Betrieb der Anlage zu gewährleisten, müssen daher in immer kürzer werdenden Intervallen Inspektionen und Revisionsarbeiten durchgeführt werden.

Für den Tunnelerhalter haben sich auch die gesetzlichen Rahmenbedingungen in Hinblick auf den Arbeitnehmer- und Brandschutz verändert. Diese Vorschriften sind gemäß Eisenbahn-Arbeitnehmerschutzverordnung (Stand 2000) bis 2010 in allen Bestandstunnel umzusetzen.

Im Projekt „Maßnahmen zur Erhöhung der Sicherheit in Bestandstunnel“, wo der GB PE federführend das Projekt- und Baumanagement durchführt, stellt sich für den Bosrucktunnel die Frage, in welchem kostenmäßigen Verhältnis notwendige Adaptierungen zur Erhöhung der Sicherheit einschließlich der Sanierung der bestehenden Anlage zu verschiedenen Neubauvarianten stehen.

Um nun den Sanierungsaufwand zu quantifizieren, ist es erforderlich den Zustand des Tunnels genau zu erheben, die Art und den Umfang der Schädigung festzustellen, die Schadensursachen zu ermitteln und daraus resultierend deren künftige Auswirkungen auf die Anlagenteile zu bestimmen.

Für die Ermittlung der Schadensursachen am Bosrucktunnel spielen die geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse eine zentrale Rolle und werden daher ausführlich behandelt.

## 2 ÜBERBLICK ÜBER DEN BOSRUCKTUNNEL

Der eingleisige, als Basistunnel geführte Bosruck Eisenbahntunnel auf der Strecke Linz – Selzthal (Pyhrnbahn) mit einer Gesamtlänge von 4,77 km wurde von 1901 bis 1906 mit einem Nettoquerschnitt von ~33 m<sup>2</sup> errichtet. Als Baustein für die Tunnelmauerung auf der Nordseite wurde ein spröder, wenig lagerhafter dolomitischer Kalkstein, auf der Südseite hauptsächlich fester, plattiger Quarzitschiefer verwendet.

Die Vorarbeiten zum Bau wurden am 1. Juli 1901 begonnen. Nach mehreren Unterbrechungen bei der Herstellung des Richtstollens, vorwiegend hervorgerufen durch zahlreiche Wassereintritte, konnte der Tunnel mit 11 Monaten Verspätung am 20. August 1906 dem Verkehr übergeben werden.

### 2.1 Geologische Verhältnisse

Die nachfolgenden Ausführungen fußen im Wesentlichen auf der Beschreibung von Geyer (1907).

Der Bosruck Eisenbahntunnel befindet sich an der Grenze Grauwackenzone / Nördliche Kalkalpen und durchschneidet das Bosruckmassiv von Süden nach Norden. Er durchörtert dabei im Wesentlichen Werfener Schiefer mit einem Muldenkern aus Kalk- und Dolomitmassen. Im Norden werden außerdem noch Gosauanlagerungen, im Süden Tonschiefer und Rauhackenbänder, sowie Reste einer Grundmoräne angefahren.

Genauen Aufschluss über den Aufbau des Bosruck, beginnend mit den ältesten Schichtgliedern, gibt die folgende Tabelle:

Tabelle 1. Länge der aufgefahrenen geologischen Schichten

| Geologische Schichtbezeichnung              | Auffahrungslänge in [m] |          |        | % der Tunnellänge |
|---|-------------------------|----------|--------|-------------------|
|   | Nordrampe               | Südrampe | gesamt |                   |
| Untere Werfener Schichten ohne Haselgebirge | 200                     | 950      | 1150   | 24,2              |
| Rauhacken                                   | -                       | 40       | 40     | 0,8               |
| Obere Werfener Schichten mit Haselgebirge   | 750                     | 1200     | 1950   | 41,1              |
| Gutensteiner Kalke und Dolomite             | 540                     | 240      | 780    | 16,4              |
| Hochgebirgskorallenkalk, Riffkalke          | 600                     | -        | 600    | 12,6              |
| Gosauschichten der Oberkreide               | 200                     | -        | 200    | 4,2               |
| Grundmoräne                                 | -                       | 26       | 26     | 0,5               |

Die unteren Werfener Schichten bestehen vorwiegend aus Sandstein und Sandsteinschiefer mit zum Teil kalkigen und dolomitschen Bindemittel, sowie einzelnen Gipslagen. Bei den Rauhacken handelt es sich um poröse Kalke und Dolomite, welche außergewöhnlich wasserwegig sind. Die oberen Werfener Schichten setzten sich aus Mergel- und Sandsteinschiefer zusammen. Häufig finden sich auch Haselgebirgseinschaltungen (Schiefertone mit Linsen und Stöcken aus Anhydrit, Dolomit, Gips, selten auch Steinsalz). Dünnplattig ausgebildet sind die dunklen Gutensteiner Kalke und Dolomite mit mittelmäßiger Wasserwegigkeit, deren Charakteristik die weißen Spatadern in der dunklen Kalkmasse sind. Das Gipfelmassiv des Bosruck wird aus hellgrauen bis weißen Kalken gebildet, welche ebenfalls von weißen Spatadern durchzogen und stark wasserführend sind. Die Gosauschichten der Oberkreide überziehen das Bosruckmassiv am nördlichen Abhang zusammenhängend, an der Südseite dagegen aufgelöst. Auf einer Länge von 26 m durchörtert der Tunnel noch eine aus Kalkgeschiebe zusammengesetzte Grundmoräne mit lehmigem Bindemittel. Sie dürfte wegen ihres überaus hohen Feinkorngehaltes am wenigsten wasserdurchlässig sein.

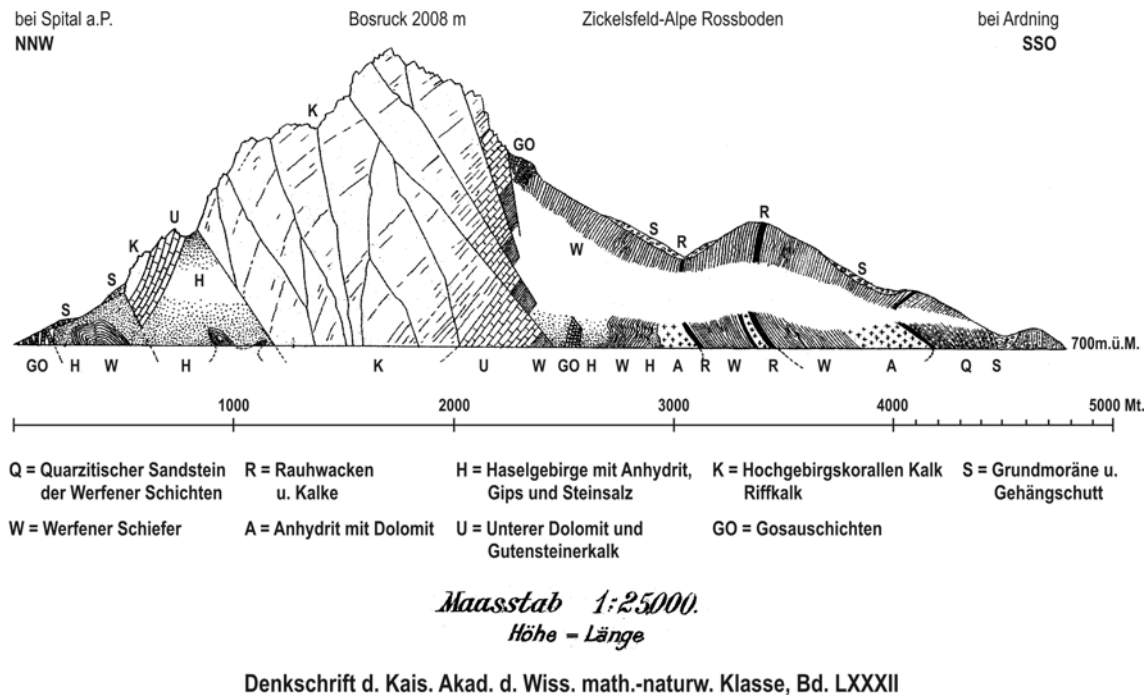


Abbildung 1. Geologischer Längenschnitt aus Geyer (1907); teilweise graphisch nachbearbeitet

## 2.2 Hydrogeologische Verhältnisse

Der Muldenkern besteht aus Kalk- und Dolomitmassen, ist außerordentlich wasserführend und fungiert als unterirdisches Wasserreservoir (Geyer 1907, Müller & Pacher 1961). Der Sockel des Gebirgsstockes wird dagegen vornehmlich durch wenig wasserwegige (wasserstauende) Werfener Schichten mit großen Strecken aus Haselgebirge, Gipseinlagerungen, etc. gebildet. Diese Schichten sind verantwortlich für den hohen Sulfatgehalt der Wässer, für die beim Bau des Tunnels vorkommenden Gaseinbrüche und die Gebirgsdruckerscheinungen. Die in diese Schichten eingestreuten spröden und klüftigen Rauhwackenzone sind im Gegensatz dazu wieder stark wasserführend.

Das Wasserreservoir besaß ursprünglich an seinem nördlichen Wannenrand einen natürlichen Abfluss in Form von zahlreichen Überlaufquellen. Durch den Tunnelvortrieb wurde dieses Reservoir angezapft und reagierte mit überaus starken Wassereinbrüchen, begleitet vom Auftreten von Gasausbrüchen. Die über die letzten Jahrzehnte beobachteten Abflussmengen im Sohlkanal betragen in der Größenordnung von 200 bis 300 l/s sowohl für die Nord-, als auch die Südrampe.

## 3 ZUSTANDSERFASSUNG UND SCHADENSERMITTLUNG

### 3.1 Sichtung und Auswertung vorhandener Unterlagen

In den Archiven der ÖBB wurden umfangreiche Unterlagen über den Bosruck Eisenbahntunnel gefunden. Diese setzen sich zusammen aus Aufzeichnungen über den Bau des Tunnels (Baupläne, verwendete Mauerungstypen, zusammenfassende Baugeschichte, etc.), die seit der Errichtung durchgeführten Umbau- und Sanierungsmaßnahmen, diverse Gutachten und die im Zuge von Inspektionen angefertigten Pläne und Tabellen.

Daraus wurde ein gesamtheitlicher Plan erstellt, der in übersichtlicher Form die Ringnummern, die verschiedenen eingebauten Mauerungstypen, bisher durchgeführte Sanierungsmassnahmen (eingeteilt nach Sanierungsperioden und Sanierungsart), Aufzeichnungen über div. Untersuchungen

(Feuchtstellen,  $\text{SO}_3$ -Gehalt im Wasser des Sohlkanals, etc.), Ergebnisse der Inspektionsfahrten und den geologischen Längenschnitt entlang der Tunneltrasse beinhaltet.

Aus diesen zusammengeführten Unterlagen konnten mehrere Bereiche identifiziert werden, in denen der Tunnel starke Schädigung aufweist, bzw. umfangreiche Sanierungsmaßnahmen durchgeführt wurden. Diese konzentrieren sich hauptsächlich auf jene Bereiche, an denen die Werfener Schichten und speziell Haselgebirge mit Gips und Anhydrit anstehen. Es ist an dieser Stelle noch anzumerken, dass auf die ursprüngliche Ausmauerung über weite Bereiche im Tunnel unterschiedlich starke Spritzbetonlagen im Zuge mehrere Sanierungsepochen aufgetragen wurden.

Basierend auf diesen Erkenntnissen wurde ein Untersuchungsprogramm zusammengestellt, das nähere Aufschlüsse über die Art der Schäden und deren Schadensursache geben soll.

### 3.2 Inspektion des Bauwerks

Im Zuge mehrerer Tunnelbegehungen wurden auffällige Merkmale wie Wasserzutritte, Schäden an der Tunnellaubung (festzustellende Hohlräume hinter Spritzbetonschale, Risse im Mauerwerk und Spritzbeton, fehlender Mauermörtel und offenes Mauerwerk, Ablöseerscheinungen der Spritzbetonschale) für jeden Ring in Datenblättern aufgezeichnet. Zusätzlich wurden mehrere Bohrkern aus der Tunnelwand und Proben von Spritzbeton, Mauermörtel, Sedimentablagerungen, Spülwasser der Bohrungen, Tunnelwässer und Quellen entnommen. Der Zustand des Sohlkanals über seine gesamte Länge wurde mit einer Kamerabefahrung dokumentiert.

Als wesentliches Merkmal konnte bei diesen Begehungen beobachtet werden, dass im gesamten Tunnel, vor allem aber im Südabschnitt vorwiegend im Bereich der Nischen sich die Spritzbetonschale von der Mauerung ablöst. Zwischen intaktem Mauerstein und zumeist ebenfalls intakter Spritzbetonschale ist stets eine mehrere Zentimeter dicke Schicht von umgesetztem Spritzbeton, möglicherweise auch Mauerwerk zu sehen (Abbildung 2).



Abbildung 2. Bohrkern B1 SI/61 – Zersatzzone zwischen Mauerwerk (links) und Spritzbeton

Die Schädigung erscheint makroskopisch entweder trocken schalig oder feucht pastös, in beiden Fällen mit feinkristallinen Einlagerungen und unterbricht die mechanisch feste Verbindung zwischen Mauerwerk und nachträglich aufgebrachtener Spritzbetonauskleidung.

Für die Entstehung der Umsetzungszone im Spritzbeton oder im Mauerwerk wurden 2 mögliche Ursachen in Betracht gezogen:

- Das Mauerwerk wurde vor Auftragen der Spritzbetonschale nur unzureichend gereinigt und die bereits durch Sulfat umgesetzten Steinanteile aus der Einwirkung von Rauchgasen zur Zeit des Dampflockbetriebes wurden nicht vollständig entfernt.
- Der Zersatz erfolgt durch aggressive Bergwässer, die durch das Mauerwerk diffundieren und durch die sperrende Wirkung des Spritzbetons im Grenzbereich zu einer konzentrierten Umsetzung des Stein- und/oder Betonmaterials führen.

Da der mangelnde Verband zwischen Mauerwerk und Spritzbetonschale, sowie eine nicht auszuschließende fortschreitende Schwächung der Spritzbetonschale von wesentlicher Bedeutung für einen sicheren Betrieb des Tunnels sind, wurden folgende Fragen untersucht:

- Mineralogische Zusammensetzung der Umsetzungsprodukte
- Art der aggressiven Lösungen (Sulfat, Chlorid usw.)
- Herkunft der Lösungen (aus dem Gebirge, Oberflächenwasser, ungenügende Reinigung des Untergrundes, etc.)
- Welche Prozesse führen zu dem beobachteten Zersatz
- Welche Materialien sind von dem Zersatz betroffen
- Besteht ein Zusammenhang zwischen durchörtertem Gebirge und den Umsatzprodukten
- Wo tritt der Zersatz auf: nur in den Nischenbereichen, hinter der Spritzbetonschale, nur in Gips und/oder Haselgebirgsstrecken oder auch in Bereichen mit anderen Gebirgsarten

#### 4 ERMITTLUNG DER SCHADENSURSACHE

Die Bohrungen in die Tunnellaibung wurden so gewählt, dass der Grenzbereich zwischen Mauerstein und Spritzbeton erfasst werden konnte. Mit Ausnahme von 2 Proben wurde durchwegs eine Umsetzungszone im Grenzbereich Mauerstein – Spritzbeton beobachtet. Hinweise auf eine ungenügende Reinigung der Oberfläche vor dem Spritzbetonauftrag sind an den Bohrkernen nur in geringem Ausmaß zu erkennen. Lediglich in einer Probe sind Russspuren in Klüften des Mauersteins sowie Verwitterungsspuren zu beobachten. Ob auch die Mauersteine vom Umsatz betroffen sind, konnte in keinem untersuchten Fall eindeutig erkannt werden.

Genauere Aufschlüsse über die Art der Schädigungen und deren Ursachen ergaben die Laboruntersuchungen, die am Institut für angewandte Geowissenschaften an der Technischen Universität Graz durchgeführt wurden.

##### 4.1 *Auswertung der Laboruntersuchungen*

Die Proben aus den Quellen, bzw. stark fließenden Wasserzutritten lassen keine außergewöhnliche Sulfat- oder Salzbelastung erkennen und entsprechen weitgehend Trinkwasser (ESW Consulting Wruss 2003, Klima 2003). Dies entspricht auch ihrer Herkunft als Karst- bzw. Kluftwasser aus den Karbonatgesteinen.

Die Spülwasserproben der Kernbohrungen hingegen zeigen durchwegs hohe bis sehr hohe Sulfatführung (Werte bis  $\sim 500 \text{ mg/l SO}_4^{2-}$ ). Zusätzlich konnte an mehreren Proben ein hoher Gehalt von Natrium und Kalium, sowie Chlor festgestellt werden. Auch die Werte für Aluminium und Silizium sind teilweise erhöht. Insgesamt weisen diese Analyseergebnisse auf eine Einwirkung von sulfat- und chloridhaltigen Wässern und damit verbundene Lösungserscheinungen im Spritzbeton hin.

An Proben von Spritzbeton, Umsetzungsprodukten und Mauermörtel wurden die auftretenden mineralischen Phasen mittels Röntgendiffraktometer-Analysen untersucht. Dabei konnte in den meisten Proben die Sulfatminerale Thaumasit und/oder sekundär gebildeter Gips nachgewiesen werden (Bauer 2004, Bauer, Klammer & Klima 2003, Klima 2003). Auch Ettringit, Kalziumhydroxid oder Natriumchlorid wurde bestimmt. Vereinzelt tritt in den zersetzten Proben auch metastabiler Vaterit auf.

##### 4.2 *Interpretation der Laborergebnisse*

Ettringit, Thaumasit und Gips sind typische Produkte des Sulfatumsatzes mit Zement. Der schädigende Mechanismus ist bei Ettringit und Gips dabei der Kristallisationsdruck, wobei die Gipsbildung durch das Angebot von Portlandit und Freikalk limitiert ist. Die zerstörende Wirkung von Thaumasit hingegen ist nicht das Quellen, sondern die Auflösung des Gefüges verwandelt den Zementstein in ein kohäsionsloses Pulver, das dann aus bis zu 85% Thaumasitnadeln besteht. Die Bildung von Ettringit oder Thaumasit hängt vor allem von den äußeren Bedingungen ab. Nach Mulenga, 2002 bildet sich bei niedrigen Temperaturen, bevorzugt zwischen 0 und 15°C, hoher Feuchtigkeit, einem pH-Wert von über 10,5 und Carbonat- und Sulfatangebot eher Thaumasit.

Für die Bildung der oben angeführten Sulfatminerale ist die Frage nach der Herkunft des Sulfats von entscheidender Bedeutung. Es kommen mehrere Sulfat-Quellen in Frage. Einerseits  $\text{SO}_4^{2-}$ -haltiges Bergwasser (dieses stellt eine quasi unendliche Sulfatquelle dar) und/oder das  $\text{SO}_2$  des Rauchgases aus dem Dampflockbetrieb vor Aufbringung der Spritzbetonauskleidung, welches

möglicherweise das Mauerwerk vorgeschädigt hat. Zur Klärung dieser Frage wurde die  $\delta^{34}\text{S}_{\text{cd}}$  Signatur mehrere Proben des geschädigten Spritzbetons von verschiedenen Stellen im Tunnel sowie einer im Tunnel aufgefundenen Russprobe untersucht. Russ (Steinkohlestaub) zeigt aufgrund sulfidischer Herkunft eine andere Isotopensignatur als der Schwefel aus dem Haselgebirge (Salze, Gips, Anhydrit). Die Isotopensignatur der Sulfide ist deutlich leichter als jene der Sulfate.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Zersetzung durch  $\text{SO}_4^{2-}$ -haltige Bergwässer hervorgerufen wurde (Bauer 2004). Rauchgase aus dem ehemaligen Dampflockbetrieb scheiden hingegen als Schwefelquelle aus.

## 5 ZUSAMMENFASSUNG

Am Bosruck Eisenbahntunnel wurde eine Reihe von Schäden festgestellt. Diese reichen von deutlichen Rissbildungen an den Wänden und Deckeln des Sohlkanals, Abplatzungen und Ablöseerscheinungen der nachträglich über Teilbereiche des Tunnels aufgetragenen Spritzbetonschale, zersetzten und ausgelösten Mauerungsmörtel bis hin zu Rissen in der Auskleidung.

Als wesentliches Schadensmerkmal, abgesehen vom Sohlkanal, konnte der Zersatz von Spritzbeton und Mauerungsmörtel identifiziert werden. Die Untersuchungen zeigten, dass die Schädigung durch Sulfatangriff hervorgerufen wurde. Der Angriff erfolgt dabei nur in geringem Ausmaß in treibender Form. Es überwiegt die Bildung von Thaumazit und damit verbunden eine Auflösung des Gefüges und Verlust der Festigkeit. Der Beton zerfällt dabei grusig, bei entsprechendem Feuchtigkeitsgehalt kann das Umsetzungsprodukt auch in plastisch pastöser Form vorliegen.

Zurückzuführen ist diese Schädigung im Wesentlichen auf die relativ geringen Mengen an vielen Stellen zusetzendes, oder auch durch die Mauerung diffundierendes sulfat- und/oder salzhaltiges Bergwasser. Dies gilt offensichtlich auch für Abschnitte, in denen nicht direkt sulfathaltiges Gebirge ansteht. Es konnte weitgehend ausgeschlossen werden, dass ungenügende Reinigung der Oberflächen vor Aufbringen von Spritzbeton wesentlich zum Zersatz des Zementes beigetragen hat.

Die vorliegenden Ergebnisse erlauben lediglich Aussagen mit punktueller Gültigkeit. Die flächenhafte Ausdehnung und Dicke der Umsetzungszone sind daraus nicht direkt abzuleiten. Es liegt jedoch der Schluss nahe, dass sich über weite Strecken die Spritzbetonschale vom Untergrund gelöst hat und zukünftig mit weiteren Ablösungen zu rechnen ist.

## LITERATURNACHWEIS

- Bauer, Ch. 2004. Ursachen der Sulfatschäden im Bosruck Eisenbahntunnel. *Diplomarbeit am Institut für angewandte Geowissenschaften*, Technische Universität Graz.
- Bauer, Ch., Klammer, D. & Klima, K. 2003. Thaumazit-, Ettringit- und sekundäre Gipsbildung in einer geschädigten Spritzbetonauskleidung (Eisenbahntunnel Bosruck). *European Journal of Mineralogy*, Band 15, Heft 1. Stuttgart.
- ESW Consulting Wruss 2003. Bosrucktunnel – *Gutachten* zur Untersuchung der Bergwässer (unveröffentlicht). Wien.
- Geyer, G. 1907. Die Aufschließungen des Bosrucktunnels und deren Bedeutungen für den Bau des Gebirges. Besonders abgedruckt aus dem LXXXII. Bande der Denkschrift der mathematisch-naturwissenschaftlichen Klasse der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften. Wien.
- Klammer, D., Bauer, Ch. & Klima, K. 2004. Isotopenchemische Untersuchung der geschädigten Spritzbetonauskleidung des Eisenbahntunnels Bosruck. *Gemeinsame Jahrestagung der Deutschen Mineralogischen Gesellschaft und der Deutschen Ton- und Tonmineralgruppe*. Karlsruhe.
- Klima, K. 2003. Bosrucktunnel – *Ergebnisse* der Wasseranalysen (unveröffentlicht). Graz.
- Mulenga, D.M. 2002. Zum Sulfatangriff auf Beton und Mörtel einschließlich der Thaumazitbildung. *Dissertation am F.A. Finger-Institut für Bausstoffkunde*. Bauhaus-Universität Weimar.
- Müller, L. & Pacher, F. 1961. Bosrucktunnel - Ingenieurgeologisches *Gutachten* über die Wasserführung und Abfluss im bestehenden Sohlkanal. Salzburg.