

---

# INSTANDSETZUNG BOSRUCK-EISENBAHTUNNEL: ENTWICKLUNG VON SPRITZBETON MIT ERHÖHTEM WIDERSTAND GEGEN THAUMASIT-SULFATANGRIFF

---

## ***REPAIR OF THE BOSRUCK RAILROAD TUNNEL: DEVELOPMENT OF SPRAYED CONCRETE WITH INCREASED DURABILITY AGAINST THAUMASITE SULFATE ATTACK***

Florian **Mittermayr**, Institut für Materialprüfung u. Baustofftechnologie, TU Graz, Österreich  
Maria **Thumann**, Labor für Betontechnologie, OTH Regensburg, Deutschland  
Andre **Baldermann**, Institut für Angewandte Geowissenschaften, TU Graz, Österreich  
Benedikt **Lindlar**, Sika Services AG, Zürich, Schweiz  
Christian **Stenger**, Sika Technology AG, Zürich, Schweiz  
Helmut **Huber**, Konsulent, Birgitz, Österreich  
Eric **Bauer**, Bernegger GmbH, Molln, Österreich  
Rudolf **Scheutz**, ÖBB-Infrastruktur AG, Linz, Österreich  
Wolfgang **Kusterle**, Labor für Betontechnologie, OTH Regensburg, Deutschland

Im Bosruck-Eisenbahntunnel kam es in Folge von intensivem Sulfatangriff durch Thaumasitbildungen zu erheblichen Betonschäden. Bisher sieht das Regelwerk (ÖNORM B 4710-1 und ÖVBB-RL Spritzbeton) bei Sulfatangriff den Einsatz von C<sub>3</sub>A-freien Bindemitteln vor – dies gilt auch für Spritzbeton. Untersuchungen haben gezeigt, dass C<sub>3</sub>A-freier Zement keinen wesentlich verbesserten Widerstand gegen den Thaumasit-Sulfatangriff aufweist. Im Zuge der Tunnelinstandsetzung war es das vorrangige Ziel, Spritzbeton mit erhöhtem Widerstand gegen Thaumasit-Sulfatangriff und ausreichender Frühfestigkeit zu entwickeln. In diesem Beitrag werden neu entwickelte Mischungsansätze und deren Umsetzung im Labormaßstab vorgestellt. Die mechanischen Kennwerte dieser Rezeptur (z.B. Frühfestigkeitsentwicklung) sowie die Ergebnisse der Dauerhaftigkeitsuntersuchungen zeigen, dass eine Rezeptur mit optimiertem Bindemittelgehalt die hohen Anforderungen im Tunnel erfüllen kann. Die Erfahrungen aus der praktischen Umsetzung im Zuge der Instandsetzungsarbeiten des Bosruck-Eisenbahntunnels im Jahre 2016 waren positiv.

*After facing serious concrete damage due to sulfate attack with massive thaumasite formation (TSA) the Bosruck railway tunnel was due for restoration. Previously, several studies have shown that shotcrete made on the basis of current standard regulations (ÖNORM B 4710-1 and ÖVBB-Guideline Sprayed Concrete) is insufficient to withstand TSA; thus, a new shotcrete mix was developed and used for the repair works. This newly developed shotcrete should have a higher resistance against TSA while still fulfilling the requirements in terms of workability and early strength development. This study reports results from lab spraying and durability tests as well as from onsite experience with this new shotcrete mix.*

## **1. Einleitung und Versuchsziele**

### **1.1 Betonschäden im Bosrucktunnel**

Im Jahr 2003 wurde erstmals eindeutig der Thaumasit-Sulfatangriff im Zusammenhang mit den entstandenen Schäden am Spritzbeton im Bosruck-Eisenbahntunnel nachgewiesen [1, 2] (im Folgenden „Bosrucktunnel“). Wie aus Plänen und Aufzeichnungen der ÖBB hervorgeht, dürfte es aber bereits lange vorher immer wieder zu Betonschäden (vermutlich durch Thaumasitbildung) und in der Folge zu Instandsetzungsmaßnahmen gekommen sein. In den Jahren 2007 - 2010 wurden an der TU Graz und am Joanneum Research Unter-

suchungen mit dem Ziel durchgeführt, die hydrogeologische und chemische Situation besser zu erfassen, sowie die Mechanismen der Betonschädigung besser zu verstehen [3]. Bei weiteren Untersuchungen im Jahr 2013 wurden wesentlich stark schadhafte Bereiche im Unterbau, welche bis dahin noch nie chemisch und mineralogisch untersucht wurden, auf Schäden bzw. Schädigungsmechanismen analysiert. Im Laufe der Untersuchungen (bis Dez. 2014) wurde verstärkt versucht einen Gesamtüberblick über das Auftreten von Schädigungen über die gesamte Tunnellänge zu bekommen. Im Zuge der Herbstsperrung 2014 wurden neben Sanierungs- und Modernisierungsarbeiten, z.B. an der Elektrik, in zwei Abschnitten „Testfelder“ ausgeführt (u.a. für geotechnisches Monitoring und Einsatz eines neuen Drainagesystems). Für die Installation der Testfelder wurden das Gleisgestänge, sowie der Ober- und Unterbau auf einer Länge von ca. 80 m entfernt. Für die Betonarbeiten wurde normengemäß sulfatbeständiger Spritz- und Sohlbeton mit  $C_3A$ -freiem Zement eingesetzt. Dieser Spritzbeton dient für die vorliegende Arbeit u.a. als Referenz. Die Bilder 1 und 2 zeigen extreme Beispiele der Betonschädigungen im Bosrucktunnel durch Thaumazit-Sulfatangriff. Diese Teilbereiche wurden im Zuge der Instandsetzungsarbeiten saniert.



*Bild 1: Zu Brei zerfallener Beton im Bosrucktunnel.*



*Bild 2: Starke Schädigung unterhalb des Geleiskörpers.*

## 1.2 Schädigungsmechanismen Thaumazit-Sulfatangriff: Stand der Wissenschaft

In unterirdischen Bauten, wie beispielsweise beim Bosrucktunnel vor den Instandsetzungsmaßnahmen, stellt der Sulfatangriff, vor allem der Thaumazit-Sulfatangriff (TSA), ein schwerwiegendes Problem dar. Derzeit kann laut ÖVBB Richtlinie Spritzbeton (RL SpB) [4] ab einer Sulfatkonzentration von  $>1500$  mg/l im Bergwasser Spritzbeton nicht mehr als dauerhafte Stützmaßnahme eingesetzt werden. Vor allem TSA wird durch lokal auftretende geologische und hydro-chemische Faktoren (z.B. kurzfristige Änderungen im pH-Wert und in der Temperatur) stark beeinflusst. Grundsätzlich muss aber festgehalten werden, dass es trotz intensiver Forschungsaktivitäten noch immer keine eindeutige Klarheit bezüglich der Vermeidung von Schäden durch TSA gibt. Dies zeigt sich durch die Vielzahl an wissenschaftlichen Publikationen und die darin enthaltenen Diskussionen, Unklarheiten und Limitationen (z.B. [5-8]). Die Mechanismen, welche zu TSA führen, sind komplex und konnten noch nicht restlos geklärt werden. Daher gibt es derzeit weder allgemeingültige Vorgehensweisen noch Prüfverfahren, um einen solchen Angriff mit Sicherheit verhindern zu können. Außerdem ist festzuhalten, dass in österreichischen Regelwerken und Normen (z.B. ÖNORM B 4710-1 [9]) die Begriffe Thaumazit bzw. Thaumazit-Sulfatangriff nicht erwähnt sind. Nur in der RL SpB [4] wird die Thematik mit einigen Sätzen behandelt. Die Praxistauglichkeit dieser Empfehlungen konnte noch nicht bestätigt werden bzw. ist teilweise auch widersprüchlich zu anderen Forschungsergebnissen [10, 11].

Beim klassischen Sulfatangriff unter Laborbedingungen kommt es in Folge von Ettringit- und Gips-Bildungen zur Volumeninstabilität durch Treiberscheinungen. Demgegenüber wirkt reiner Thaumazitangriff nicht treibend, sondern bewirkt – unter vollständigem Festigkeitsverlust – die Zersetzung des Zementsteins. Bei Felduntersuchungen hat sich aber gezeigt, dass TSA letztlich durch die Überlagerung von unterschiedlichen Schädigungsmechanismen erklärbar ist. Aus internationalen Publikationen und eigenen Forschungs-

aktivitäten sind nachfolgend einige wichtige Parameter bezüglich TSA Mechanismen und potentielle Vermeidungsstrategien abgeleitet (aus [3, 8, 10, 12-30]):

- **Gelöstes Sulfat:** Es ist bekannt, dass hohe Sulfatkonzentrationen (mehrere g  $\text{SO}_4^{2-}/\text{l}$ ) in Lösung die Korrosion des Betons durch TSA begünstigen. Daher wird im Labor für TSA-Versuche meist mit hohen Konzentrationen (30.000 – 50.000 mg/l Natrium- bzw. Magnesiumsulfat) gearbeitet, um die Versuchsdauer möglichst kurz zu halten. Solche Gehalte und reine Natrium- / Magnesiumsulfat-Lösungen treten im Tunnel / der Praxis jedoch so gut wie nie auf und es ist daher zweifelhaft, ob die Mechanismen der Schädigung auf diese Weise zuverlässig simuliert werden können [31, 32]. Zur Sulfatbelastung von Grundwässern (zutreffend für den Bosrucktunnel) kommt es überwiegend durch die Auflösung von natürlich vorkommenden Kalziumsulfat-Mineralen (Gips  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  und Anhydrit  $\text{CaSO}_4$ ). Die Sulfatkonzentrationen der Lösung ist durch die Löslichkeit der genannten Mineralphasen auf ca. 1.400 mg/l begrenzt. Neue Forschungsergebnisse haben gezeigt, dass die Sulfatkonzentration zwar einen großen Einfluss auf die Bildungsgeschwindigkeit von Thaumasil hat, dass aber eine Sättigung der angreifenden Lösung in Bezug auf Gips eine Voraussetzung für die Thaumasilbildung ist [33]. Die Gipssättigung hängt neben der Konzentration von Kalziumionen auch wesentlich von der Konzentration anderer Ionen (Ionenstärke), sowie der Temperatur und indirekt auch vom pH-Wert ab. Die Beurteilung der Aggressivität bzw. Gefährdung für TSA kann daher nicht gemäß der ÖNORM B 4710-1 [9] durch Zuordnung einer gegebenen Sulfatkonzentration zu einer entsprechenden Expositionsklasse erfolgen, da andere Randbedingungen in der Norm nicht berücksichtigt sind.
- **Portlandit:** Die Anwesenheit von Portlandit ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) hat entscheidende Auswirkungen auf TSA. Portlandit entsteht bei der Hydratation von Zement und bildet sich bevorzugt in der sogenannten Intertransition-Zone (ITZ; Grenzbereich zwischen Zementstein und Gesteinskörnung) [35]. Die „Portlanditzonen“ sind einerseits porös, was das Eindringen von gelösten Stoffen begünstigt und andererseits reagiert  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  mit Sulfationen unter der Bildung von Gips [z.B.:  $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{Na}_2\text{SO}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{NaOH}$ ], was zu mikrostrukturellen Schäden des Betongefüges führt. Der Gehalt an Portlandit kann durch die Auswahl geeigneter Zusatzstoffe stark reduziert werden. Puzzolanische Zusatzstoffe wie Flugasche, Metakaolin oder Silikastaub sind besonders geeignet. Die Verwendung von Hüttensand bewirkt kaum eine Reduktion von Portlandit, führt aber dazu, dass sich das Gefüge durch die latent hydraulische Reaktion verdichtet (Verschiebung zu kleineren Porenradien). Die neuentstehenden Calcium-Silikat-Hydrat Phasen (C-S-H Phasen) aus der latent hydraulischen Reaktion haben ein geringeres Ca/Si Verhältnis gegenüber denen der Portlandzement-Hydratation und sind somit widerstandsfähiger gegen Kalziumauslaugung. Außerdem bewirkt Hüttensand, dass sich in den Porenflüssigkeiten reduzierendere Bedingungen einstellen. In Falle von Sulfatangriff liegt der Schwefel in der Porenlösung nicht bzw. in verringertem Ausmaß als Sulfat, sondern auch als Sulfidspesies vor [36].
- **Reaktionskinetik, Sättigungsindex und Temperatur:** Die Bildung von Ettringit ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ), Gips und Thaumasil hängt neben der Reaktionskinetik auch vom Sättigungsindex (SI) der genannten Phasen ab [SI > 0 (Mineral übersättigt) – es kann zur Bildung kommen; SI < 0 (Mineral untersättigt) – Mineral wird gelöst]. Ist weniger Sulfat in der Porenlösung vorhanden, wird der SI Wert der jeweiligen Minerale kleiner und die Bildung findet nicht oder verzögert statt [33]. Die Temperatur hat vor allem auf die Kinetik bei der Thaumasilbildung maßgeblichen Einfluss. Thaumasil bildet sich bevorzugt bei niedrigen Temperaturen unter  $15^\circ\text{C}$ , da meist nur unter diesen Voraussetzungen ausreichen Karbonat in der Lösung vorliegt [25, 34].
- **Karbonatquelle:** In der Literatur wird als potentielle Karbonatquelle für Thaumasil ( $\text{CaSiO}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$ ) immer wieder Kalksteinfüller angegeben. Feine Kalksteinmehle können neben dem Zement auch in Zusatzstoffen oder in den feinen

Gesteinskörnungen enthalten sein. Zahlreiche im Labor durchgeführte Untersuchungen zeigen, dass Probekörper mit Kalksteinfüllern vermehrt Schäden gegenüber solchen ohne karbonatische Feinstoffe aufwiesen [34, 37-39]. Mittels Zugabe hochreaktiver puzzolanischer Zusatzstoffe (z.B. Metakaolin) zu Portlandzement – Kalksteinfüller Mischungen, konnten aber wiederum sehr gute Dauerhaftigkeitsergebnisse hinsichtlich (Thaumasit) Sulfatangriff erreicht werden [40, 41]. In Feldstudien konnten die Zusammenhänge von Kalksteinfüller-begünstigten Thaumasitschäden nicht verifiziert werden. Stattdessen hat sich gezeigt, dass TSA (so auch im Bosrucktunnel) durch die inkongruente Dolomitauflösung aus dolomitischen Zuschlägen forciert wurde [z.B.:  $\text{Ca}(\text{OH})_{2(s)} + 3\text{CaMg}(\text{CO}_3)_{2(s)} + (\text{Ca}_3\text{SiO}_5)_3\text{H}_2\text{O} + \text{CaSO}_4 + 14\text{H}_2\text{O} \rightarrow 5\text{CaCO}_{3(s)} + 3\text{Mg}(\text{OH})_{2(s)} + (\text{Ca}_3\text{SiO}_3)(\text{SO}_4, \text{CO}_3)_{15}\text{H}_2\text{O}_{(s)} + 2\text{H}^+$ ] [10, 30]. Untersuchungen zur Herkunft des im Thaumasit gebundenen Karbonates haben ergeben, dass das Karbonat im Wesentlichen aus dem Grundwasser bzw. den Bergwässern stammte [42]. Zur genauen Klärung dieser Fragestellungen sind aber noch weitere intensive Forschungsarbeiten nötig.

- **Organik:** Die An- bzw. Abwesenheit von gelösten organischen Substanzen hat maßgebliche Auswirkungen auf Mineralbildungen und im Speziellen auf die Thaumasitbildung. Im Labormaßstab konnte gezeigt werden, dass einige Hochleistungsverflüssiger vom Typ PCE (Polycarboxylatether) die Bildung von Thaumasit verlangsamen bzw. sogar verhindern können [11, 19]. Die Anwesenheit von Zuckerlösungen, aber auch anderer organischer Verbindungen, begünstigt hingegen die Bildung von Thaumasit [13, 43].

1.3 Anforderungen an Spritzbeton mit erhöhtem Widerstand gegen Thaumasit-Sulfatangriff  
Das vorrangige Ziel der durchgeführten Arbeiten war es Spritzbeton mit erhöhtem Widerstand gegen Thaumasit-Sulfatangriff und mit ausreichenden Frühfestigkeiten zur Instandsetzung des Bosrucktunnels erzeugen zu können. Der Nachweis der Erreichung einer stabilen Grundmischung mit niedrigem Gesamtwassergehalt und der Frühfestigkeitsklasse J2 sollte erbracht werden (Anforderungen siehe Tabelle 1)

Tab. 1: Anforderungen an Spritzbeton mit erhöhtem Widerstand gegen Thaumasit-Sulfatangriff zur Instandsetzung des Bosrucktunnels.

<b>Frühfestigkeitsklasse</b>	J1 + J2
<b>Spritzbetonklasse</b>	SpC III
<b>Spritzbeton-Festigkeitsklasse</b>	SpC 30/37(56)
<b>Expositionsklassen</b>	XC4/XF3/XAT
<b>Konsistenzklasse</b>	mindestens F59
<b>Verzögerung</b>	3 h
<b>Sieblinie</b>	GK 8
<b>Bindemittel</b>	Klinker C <sub>3</sub> A-frei Zusatzstoff Hüttensand Zusatzstoff Silikastaub als Suspension
<b>Beschleuniger</b>	ÖVBB-RL Spritzbeton, Tab. 4/5
<b>Feinteile (&lt; 125 µm)</b>	Kein kalk- und dolomithaltiges Material

## 2. Materialien und Methoden

### 2.1 Ausgangsstoffe und Rezeptur

Die Entwicklung der Rezeptur erfolgte in Zusammenarbeit mit der SIKA AG in Zürich. Die in diesem Beitrag beschriebenen Ausgangsstoffe, Probekörper und die daran angewandten Methoden beziehen sich in erster Linie auf die Rezeptur der Laborentwicklung. Nachdem die

Zusammensetzung allgemein und offen ausgeschrieben wurde, kamen bei der Umsetzung im Bosrucktunnel z.T. andere Ausgangsstoffe zum Einsatz.

Als Bindemittel wurde CEM I 42,5R – SR0, gemahlener Hüttensand (als AHWZ) und Silikastaub (Slurry) verwendet (weitere Angaben dazu sind Tabelle 2 zu entnehmen). Die Bindemittelzusammensetzung ist in Tabelle 3 angegeben. Es wurden 7% (bezogen auf das Bindemittel) einer alkalifreien Aluminiumsulfat Lösung als Erstarrungsbeschleuniger verwendet.

Tab. 2: Eigenschaften Zement und Zusatzstoffe (Herstellerangaben)

	<b>CEM I 42,5R – SR0</b>	<b>Hüttensand</b>	<b>Silikastaub Slurry</b>
<b>Dichte [kg/dm<sup>3</sup>]</b>	3,12	3,00	1,40*
<b>Blaine [cm<sup>2</sup>/g]**</b>	4400	4560	150000 – 350000
<b>SO<sub>3</sub> [M-%]</b>	3,20	1,46	< 2,00
<b>1 d DF [N/mm<sup>2</sup>]</b>	14	nb.	nb.

\*Feststoffgehalt 50 M.-%

\*\*Zement und AHWZ Blaine, Microsilica BET

Tab. 3: Richtrezeptur

<b>Zement</b>	CEM I 42,5 R – SR0	290 kg/m <sup>3</sup>
<b>Zusatzstoff</b>	Hüttensand	120 kg/m <sup>3</sup>
<b>Zusatzstoff 2</b> (Trockenmasse)	Silikastaub Slurry	15 kg/m <sup>3</sup>
<b>Summe Bindemittel</b>		425 kg/m <sup>3</sup>
<b>Wasser</b> (Anteil aus Slurry und PCE eingerechnet)		191 kg/m <sup>3</sup>
<b>W/B</b> (K=1)		0,45
<b>Fließmittel</b> bezogen auf Bindemittel	PCE	0,80 %
<b>Erstarrungsbeschleuniger</b> bezogen auf Bindemittel	Lösung: alkalifrei Aluminiumsulfat	7,0 %

## 2.2 Spritzanlage und Spritzvorgang

Die Spritzversuche fanden unter kontrollierten Bedingungen im Laborspritzstand der SIKA AG statt. Die Mischung erfolgte in einem Laborzwangsmischer; die Förderung mit einer Einzylinderpumpe (Sonderanfertigung von SIKA Aliva) mit 1 m<sup>3</sup>/h Pumpleistung und Pumpendrücken von ca. 4,7 bar. Der Luftdruck lag bei 4 bis 5 bar.

Die Beschleunigerdosierung erfolgte simultan mit einer Schlauchquetschpumpe. Der 3 m lange Düsen Schlauch mit einem Durchmesser von 37,5 mm endete in einer 40 cm langen Düse mit von 36 mm auf 22 mm verjüngendem Innendurchmesser. Der Düsenabstand beim Spritzen betrug 1,2 m (Bilder 3 und 4).

Die Raumtemperatur beim Spritzen und bei der Auslagerung betrug ca. 10°C und ca. 85% relative Luftfeuchte, um die Tunnelbedingungen vor Ort zu simulieren [30]. Es wurden zwei Probekisten (Grundfläche 25 cm x 25 cm, Höhe 18 cm und Grundfläche 35 cm x 35 cm, Höhe 15 cm) gespritzt. Die Dauer zum Einspritzen einer Kiste betrug etwa 2 Minuten. Von der Grundmischung wurden 3 x 15 cm-Würfel (Nullbeton) hergestellt.



*Bild 3: Laborzwangsmischer (links), Einzylinderpumpe mit Befüllvorrichtung (rechts).*



*Bild 4: Düse.*

### 2.3 Durchgeführte Prüfungen

Die Frischbetonprüfungen wurden gemäß RL SpB Pkt. 12.3.4 durchgeführt. Es wurde das Ausbreitmaß, die Temperatur, die Dichte und der Luftgehalt bestimmt. Die Frühfestigkeit wurde ebenfalls gemäß RL SpB [4] gemessen. Die durchgeführten Festbeton- und Dauerhaftigkeitsprüfungen sind in Tabelle 4 angegeben. Als Lagerlösung für den simulierten Thaumasis Sulfatangriff wurde ca. 2%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  + Gips und Kalzit im Überschuss als Bodensatz verwendet (die Zusammensetzung entsprach zu Beginn  $\approx \text{Na}^+$  7000 mg/l;  $\text{Ca}^{2+}$  340 mg/l;  $\text{SO}_4^{2-}$  15000 mg/l; im Verlauf der Experimente wurde der pH-Wert periodisch mit verdünnter Schwefelsäure auf ca. 8,6 eingestellt).

Neben den gespritzten Proben wurden von den Nullbetonproben Druckfestigkeit, das Reduzierte Versinterungspotential (RV) und die Längenänderung in einer 5%-igen  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  Lösung ( $\approx 34000$  mg/l  $\text{SO}_4$ ) in Anlehnung an das deutsche SVA-Verfahren [44] durchgeführt (siehe Tabelle 4).

### 2.4 Mineralogische und optische Untersuchungen

Die Reaktionsprodukte aus den Sulfattests wurden mittels Pulverröntgendiffraktometer analysiert (Das dafür eingesetzte Gerät war ein Röntgendiffraktometer Analytical X'Pert Pro mit Co-Röhre. Die Messungen erfolgten im Winkelbereich von  $3^\circ$  bis  $85^\circ$   $2\theta$ ). Das Probenmaterial wurde bei  $40^\circ\text{C}$  getrocknet, analysenfein zerkleinert und als texturfrees Röntgenpulverpräparat in die Probenträger des Messgerätes eingebracht. Die Phasenbestimmung erfolgte qualitativ.

Bereiche der Probekörper wurden auf Schäden optisch mit einem digitalen Lichtmikroskop von Keyence VHX 5000 mit 20 bis 200-facher Vergrößerung untersucht.



Tab. 4: Durchgeführte Prüfungen nach 56 Tagen; Lagerung bis zum Alter von einer 1 Woche bei 10°C und 85% rH in Spritzkisten anschließend bei 20°C unter Wasser bzw. Feuchtlagerung bis 56 Tage.

	Lagerung/Prüfbedingungen	Abmessung		Anzahl Bohrkerne	Anforderung / Bemerkung / Prüfverfahren
		∅	H		
<b>Druckfestigkeit (DF) SpB und Nullbeton</b>	unter Wasser 20°C	100	100	3	30/37 (56) RiLi SpB
<b>Wasserundurchlässigkeit (WU)</b>	unter Wasser 20°C	150	120	2	XC4 ≤ 16 mm RiLi SpB
<b>Karbonatisierung</b>	unter Wasser 20°C 28 bzw. 103 d in 2% CO <sub>2</sub> , 20°C und 65% RF	geschnittene prismatische Prüfkörper (ca. 3x4x10 cm)			in Anlehnung an CEN/TS 12390-12
<b>Frostbeständigkeit (Frost)</b>	unter Wasser 20°C	100	250	2 (quer zur Spritzrichtung)	RL SpB XF 3 ausgeweitet auf 112 Zyklen
<b>Reduziertes Versinterungspotential (RV) SpB und Nullbeton</b>	Feuchtlagerung 20°C	50	100	2	RL SpB
<b>Sulfat Thaumasil (TSA)</b>	unter Wasser 20°C 2% Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + Gips u. Kalzit (≈ 15000 mg/l SO <sub>4</sub> ), ~5°C	geschnittene prismatische Prüfkörper (ca. 5x3x10 cm)			Vergleich mit Referenz*
<b>Sulfat am Nullbeton (mod. SVA Test)</b>	unter Wasser 20°C 5% Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (≈ 34000 mg/l SO <sub>4</sub> ); Ca(OH) <sub>2</sub> ~5°C	50	140	6 (je 3 BK in 5% Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> und gesättigter Ca(OH) <sub>2</sub> Lösung)	modifizierter SVA Test; max. Dehnung nach 91d 0,05 mm/m und Vergleich mit Referenzen

\* Referenzspritzbeton: sulfatbeständiger Spritzbeton laut ÖVBB-RL [4] verwendet mit 420 kg/m<sup>3</sup> CEM I SR0; Herstellung 2013; ausgebohrt im Bosrucktunnel.

### 3. Ergebnisse und Diskussion

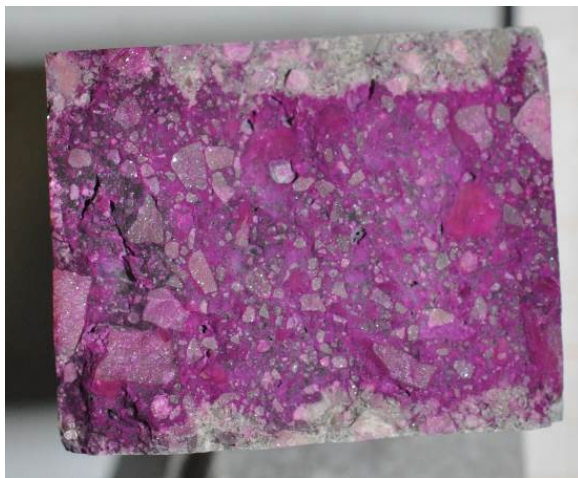
#### 3.1 Frischbetonprüfungen, Frühfestigkeitsentwicklung und Druckfestigkeit

Die Frischbetonprüfungen ergaben ein Ausbreitmaß von 580 mm, eine Temperatur von 19,9°C, eine Dichte von 2285 kg/m<sup>3</sup> und einen Luftgehalt von 5,4%. Die erreichte Festigkeitsentwicklung lag immer im oberen J2-Bereich. (Die Entwicklung der Frühfestigkeit ist in Bild 12 am Ende des Beitrags in der Gegenüberstellung zu den vor Ort gespritzten Rezepturen zu entnehmen). Die Druckfestigkeit des Spritzbetons nach 56 d betrug 64,7 N/mm<sup>2</sup> und die Rohdichte 2,32 kg/dm<sup>3</sup>. Der Nullbeton hatte eine Druckfestigkeit von 77 N/mm<sup>2</sup> nach 56 d und die Rohdichte lag bei 2,34 kg/dm<sup>3</sup>.

#### 3.2 Dauerhaftigkeitsuntersuchungen: Wasserundurchlässigkeit, Frost, Karbonatisierung und Reduziertes Versinterungspotential

Die ermittelte Wassereindringtiefe ergab einen sehr niedrigen Wert von 6 mm. Die auf die doppelte Anzahl an Frost-Tau Zyklen erhöhte Prüfung ergab keinerlei Abfall des E-Moduls. Das E-Modul betrug vor der Prüfung bzw. nach 25, 56 und 112 Zyklen 36,0 ± 0,5 kN/mm<sup>2</sup>.

Eine hohe Frostsicherheit kann daher angenommen werden. Die Karbonatisierungstiefe wurde durch Aufsprühen eines Indikators (Phenolphthalein) sichtbar gemacht und ausgemessen (siehe Bilder 5 und 6). Die Ergebnisse nach 28 bzw. nach 103 Tagen zeigen, dass die Karbonatisierung in der neuentwickelten Rezeptur im Vergleich zur Referenz geringer ist. Nach 28 Tagen war die Karbonatisierung an den Spritzbeton-Probekörpern der neu entwickelten Mischung kaum sichtbar (0-1 mm), hingegen konnten bei der Referenz Karbonatisierungstiefen von 0 bis 4 mm gemessen werden. Bei der Referenz wiesen einige „Lagen“ im Probekörperinneren eine vollständige Karbonatisierung auf. Es könnte sich dabei um poröse Fehlstellen bzw. um die Folge von unregelmäßiger Beschleunigeruntermischung handeln. Nach 103 Tagen betragen die Karbonatisierungstiefen ca. 1-3 mm, bei der Referenz 1-5 mm. Es gilt anzumerken, dass die Referenz einige Wochen vor Beginn der Prüfungen aus dem Tunnel entnommen wurde. Diese Probe ist somit deutlich älter und der damit verbundene Hydratationsgrad vermutlich höher. Aus den angelieferten Bohrkernen wurden unmittelbar vor Beginn der Prüfung Prismen herausgeschnitten.



*Bild 5: Karbonatisierung am Referenzspritzbeton nach 103 Tagen. Probekörpergröße ca. 3 x 4 cm.*



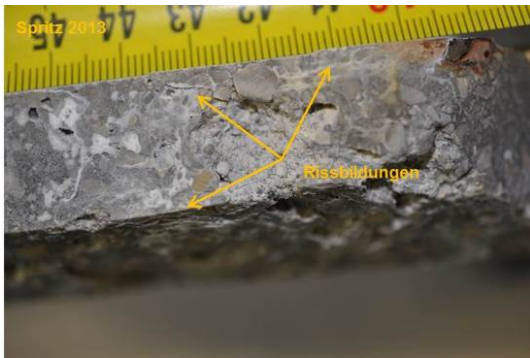
*Bild 6: Karbonatisierung am neuentwickelten Spritzbeton nach 103 Tagen. Probekörpergröße ca. 3 x 4 cm.*

Die Kalziumauslaugung (Reduziertes Versinterungspotential) ergab einen sehr geringen Wert von 0,41 kg/to  $\text{Ca}^{2+}$  (Nullbeton: 0,43 kg/to  $\text{Ca}^{2+}$ ). Auf österreichischen Baustellen wird teilweise bereits Spritzbeton mit reduziertem Versinterungspotential von 0,7 gefordert und eingesetzt. Bei Laborversuchen mit Zementgehalten von 450 kg/m<sup>3</sup> ergaben die Mischungen oft Werte von ca. 1,00 kg Ca /to [45, 46]. Die erreichten niedrigen RV-Werte deuten darauf hin, dass durch den Einsatz von Hüttensand das Gefüge verdichtet wurde und durch die puzzolanische Wirkung von Silikastaub Portlandit gebunden wurde. Diese Voraussetzungen sind auch hinsichtlich der Sulfatbeständigkeit von Vorteil (siehe auch 1.2.).

### 3.3 Dauerhaftigkeitsuntersuchungen: Sulfat und Sulfat-Thaumazit

Nach ca. 11 Monaten Einlagerung in  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  + Gips + Kalzit Lösung ( $\approx 15.000 \text{ mg/l SO}_4^{2-}$ ) konnten mit Ausnahme der Referenz-Spritzbetonprobe keine offensichtlichen Schäden festgestellt werden. Beim Spritzbeton, welcher 2013 für die Testfelder im Bosruck verwendet wurde, konnte an den Kanten und bei den Lunkern leichte Rissbildungen festgestellt werden (Bild 7a). Dies dürfte ein Hinweis auf erste Sulfatschädigungen durch Gips- und/oder Thaumazitbildung sein (Bilder 7c und 7d). Die neuentwickelte Spritzbetonmischung wies keinerlei Hinweise auf derartige Schädigung auf, siehe dazu Bild 7b.





*Bild 7a: Deutlich sichtbare Rissbildungen an der Referenz Spritzbetonprobe nach ca. 11 Monaten Lagerung bei 5°C in 15.000 mg/l SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>.*



*Bild 7b: Keine sichtbaren Schäden am neuentwickelten Spritzbeton nach ca. 11 Monaten Lagerung bei 5°C in 15.000 mg/l SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>. Probekörpergröße ca. 5 x 3 x 10 cm.*



*Bild 7c: Detailaufnahme unter dem Lichtmikroskop zeigt sichtbare Rissbildungen an der Referenz Spritzbetonprobe nach 11 Monaten. Weiße Flächen: Calciumcarbonat.*



*Bild 7d: Auflösung des Zementsteins und Bildung von Thaumasil (hellweiße Bereiche) an der Referenz Spritzbetonprobe nach ca. 11 Monaten Einlagerung.*

Nach einer Einlagerungsdauer von ca. 13 Monaten konnte mittels RDA eindeutig Thaumasil an der Referenz-Spritzbetonprobe festgestellt werden. Im breiigen, leicht mit den Fingern abzulösenden Material wurde zudem Gips nachgewiesen. Nach ca. 2,5 Jahren Einlagerungszeit wies die Referenz massive Zersetzungserscheinungen auf. Die neuentwickelte Spritzbetonrezeptur zeigt keinerlei Anzeichen für beginnende Schäden (siehe Bilder 8 und 9).



*Bild 8: Nach 30 monatiger Einlagerung bei 5°C in 15.000 mg/l SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> zeigt die Referenz Spritzbetonprobe massive Auflösungserscheinungen.*



*Bild 9: Die neuentwickelte Spritzbetonrezeptur weist auch nach 30 Monaten bei 5°C in 15.000 mg/l SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> keine erkennbaren Schäden auf.*

In Bild 10 ist die Längenänderung der Nullbetonmischung (Nass-Mischgut ohne Erstarungsbeschleuniger) der neuentwickelten Spritzbetonrezeptur geplottet. Die Versuchsanordnung wurde in Anlehnung an das deutsche SVA-Verfahren [44] durchgeführt. Der SVA Grenzwert liegt bei einer Längenänderung von 0,5 mm/m nach 91 Tagen. Aufgrund der geänderten Probekörpergeometrie gegenüber dem SVA-Test (2x4x16 cm Flachmörtelprismen) kann der Grenzwert des SVA-Tests nicht herangezogen werden. Als Referenz wurde für dieses Diagramm ein bekanntermaßen sehr gut sulfatbeständiger Beton (IXAT ÖVBB-Richtlinie Innschalenbeton [47] mit W/B 0,53; C<sub>3</sub>A-freiem Zement und 22% AHWZ (Kombiprodukt) herangezogen). Wie im Diagramm ersichtlich, ist die Längenänderung des Spritzbeton-Nullbetons (grün) deutlich geringer gegenüber der Referenz (blau).

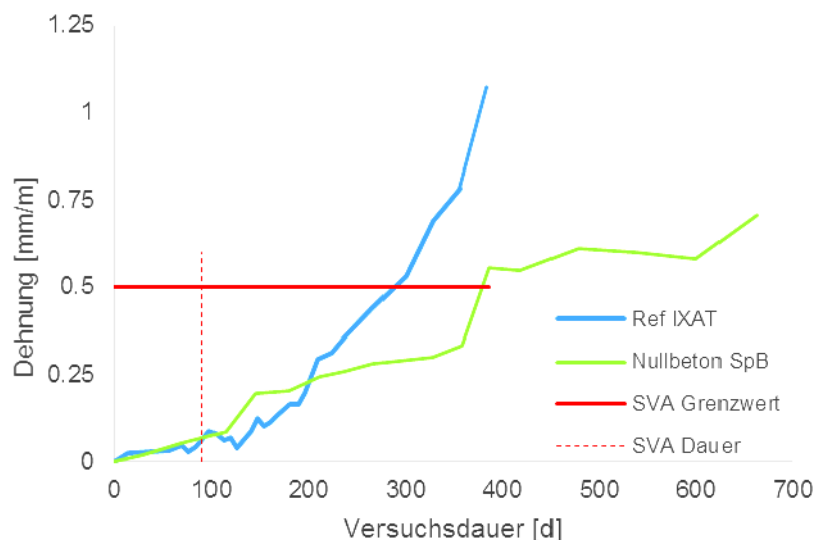


Bild 10: Längenänderung (Dehnung) am Spritzbeton (Nullbeton SpB) an 5 cm Bohrkernen.

#### 4. Praktische Erfahrungen bei der Instandsetzung des Bosrucktunnel mit dem neuentwickelten Spritzbeton mit erhöhtem Widerstand gegen Thaumazit-Sulfatangriff

##### 4.1 Voruntersuchungen vor Ort

Die im Labor der SIKA AG durchgeführten Spritzversuche gaben zwar Aufschluss über die Spritzbarkeit der neuentwickelten Rezeptur, jedoch war es vor Ort nötig mit den für die Instandsetzung des Bosrucktunnel verfügbaren Materialien und Geräten Vorversuche durchzuführen.

Bezüglich des Bindemittelsystems, Zement, AHWZ und Silikastaub Slurry, wurden jeweils die gleichen Produkte wie für die „SIKA-Versuche“ verwendet. Bei den Gesteinskörnungen handelte es sich um reines Kantkorn (0/2 Karbonatfrei + 4/8 Kalkstein). Bei den verwendeten Zusatzmitteln handelte es sich jeweils um andere Produkte als zuvor im Labor verwendet. Als Fließmittel wurde 1,8% Hochleistungsfließmittel (bezogen auf das Gesamtbindemittel) auf PCE Basis eingesetzt. Für eine bessere Verarbeitung (Pumpbarkeit) wurde 0,03% LP-Mittel (bezogen auf das Gesamtbindemittel) zugegeben. Die Offenzeit des Betons wurde mit 0,20% Verzögerer (bezogen auf das Gesamtbindemittel) auf 6-8 h eingestellt. Die stabilisierende Wirkung des Verzögerers wirkte sich auch positiv auf die Verarbeitungseigenschaften aus. An einem Versuchstag wurde der Konsistenzverlauf des Nullbetons bis 8 h dokumentiert (siehe Tabelle 5).

Tab. 5: Konsistenzverlauf Nullbeton Ausbreitmaß

Zeit	10 min	90 min	3 h	6 h	8 h
Konsistenz	63 cm	60 cm	59 cm	57 cm	56 cm

Als Spritzmobile kamen die Geräte Meyco Potenza und Meyco Oruga zum Einsatz. Bei einer zu hohen Dosierung des Beschleunigers (> 7% bezogen auf das Gesamtbindemittel) kam es zu deutlichen Festigkeitsverlusten an den Spritzbetonbohrkernen gegenüber den Nullbetonwürfeln und auch gegenüber geringer Dosierungen. Abweichungen der Mindestdosierung von unter 4,5% hatten zur Folge, dass sich die Frühfestigkeitsentwicklung extrem verschlechterte (siehe Tabelle 8 und Bild 12). Der optimale Bereich der Beschleunigerdosierung wurde somit auf 4,5 – 5,0% festgelegt. Die Vorversuche wurden im Außenbereich bei Temperaturen > 25°C durchgeführt und sind somit deutlich unterschiedlich zu den im Tunnel vorherrschenden Temperaturen (~ 8 C°).

#### 4.2 Instandsetzungsarbeiten im Bosrucktunnel

Im Zeitraum von Ende Juli 2016 bis Anfang November 2016 wurden mit den oben genannten Spritzmobilen 2738 m<sup>3</sup> der Spritzbetonsorte C30/37(56) III/J2/XC4/XAT/GK8/C<sub>3</sub>A-frei aufgetragen (Bild 11).



Bild 11: Spritzbetonarbeiten im Bosrucktunnel 2016.

Die Frisch- und Festbetoneigenschaften sind in folgenden Tabellen 6 und 7 zusammengefasst. Ein Festigkeitsentwicklungsverlauf bei Verwendung von 5,0% Erstarrungsbeschleuniger ist Bild 12 zu entnehmen.

Tab. 6: Frischbetoneigenschaften (n=77)

	Frischbeton- temperatur [°C]	Luft- temp. [°C]	Ausbreit- maß [cm]	Luft- gehalt [%]	Roh- dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Gesamt- wasserge- halt [kg]
<b>Mittelwert</b>	20,9	15,7	60,0	2,7	2386	191
<b>Standard- abweichung</b>	1,7	5,5	1,8	1,2	17,2	3,3



Tab. 7: Festbetoneigenschaften

	<b>Druckfestigkeit Nullbeton</b> Würfel 28 d [N/mm <sup>2</sup> ]	<b>Druckfestigkeit SpB</b> Bohrkerne 7 d [N/mm <sup>2</sup> ]	<b>Druckfestigkeit SpB</b> Bohrkerne 56 d [N/mm <sup>2</sup> ]	<b>Wasserundurchlässigkeit</b> (XC4) [mm]
<b>Mittelwert</b>	61,8	34,4	51,8	5
<b>Standardabweichung</b>	5,6	1,0	1,8	1
<b>Anzahl (n)</b>	8	3	3	3

Bei der Instandsetzung des Bosrucktunnels wurde nur die Sohle gespritzt (keine Über-Kopf Arbeiten). Aus diesem Grund wurde die EB-Dosierung eher gering (~5,0%) gehalten und folglich durfte bei der Frühfestigkeitsentwicklung die J2 Linie unterschritten werden. Es wurde auf ein besonders dichtes Gefüge abgezielt, was auch erreicht werden konnte. Die XC 4-Ergebnisse ergaben Werte von  $5 \pm 1$  mm.

Aufgrund der kühlen Bedingungen im Tunnel war die Festigkeitszunahme vor allem im Bereich von 1 h bis 24 h deutlich geringer gegenüber den Vorversuchen bei gleicher EB Dosierung. Der Anfangsbereich (bis 1 h) und die 7 d Festigkeiten waren hingegen annähernd gleich. Die extremen Festigkeitsabfälle der Vorversuche mit EB Dosierungen > 5% dürften in erster Linie den hohen Außentemperaturen geschuldet sein. Im Labor wurden bei 7% EB-Dosierungen keine negativen Auswirkungen festgestellt. Auch noch höhere Dosierungen könnten bei geeigneten Umweltbedingung und guter Nachbehandlung ohne große Festigkeitsabfälle umsetzbar sein.

Tab. 8: Gegenüberstellung der Festigkeitsentwicklung von Spritzbeton der Instandsetzungsarbeiten mit den Vorversuchen auf der Baustelle und der Labormischung. Festigkeiten in MPa.

		<b>Bosrucktunnel</b>			<b>Vorversuche Baustelle</b>					<b>Labor</b>
<b>Beschleuniger bezogen auf das Gesamtbindemittel</b>	[%]	4,5	5,0	5,0	4,0	5,0	6,0	7,5	8,5	7,0
<b>Temperatur</b>	[°C]	19,4	8,8	6,3	> 25,0					10,0
<b>Zeit</b>	10 min	0,20	0,48	0,49	0,33	0,36	0,46	0,52	0,48	0,66
	6 h	2,2	1,5	1,5	4,0	5,3	4,5	4,8	2,4	3,2
	24 h	11,2	8,8	8,2	11,2	17,6	14,1	8,6	3,8	7,0 (19h)
	7 d	34,9	32,9	35,3	29,0	35,1	23,5	20,5	10,9	na.
	56 d	53,4	49,3	52,6	na.	na.	na.	na.	na.	64,7

na. nicht analysiert

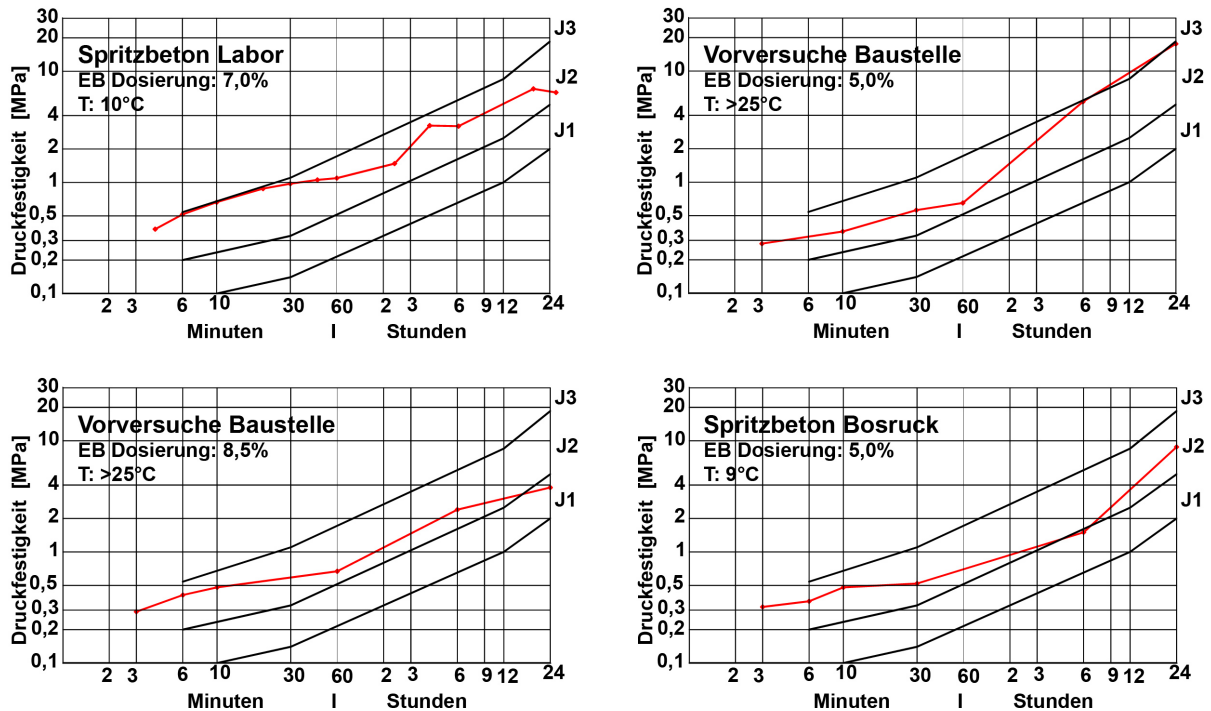


Bild 12: Frühfestigkeitsentwicklung geprüfter gemäß ÖVBB-RL SpB [4], Gegenüberstellung der Festigkeitsentwicklung von Spritzbeton Bosruck (Instandsetzungsarbeiten im Tunnel) mit den Vorversuchen auf der Baustelle und der Labormischung.

## 5. Zusammenfassung

Die vorliegenden Versuche und die Umsetzung bei den Instandsetzungsarbeiten im Bosruck-Eisenbahntunnel zeigen deutlich, dass mit dem vorgeschlagenen Bindemittel ( $C_3A$ -freier Zement mit ca. 30% Anteil an Hüttensand und niedrigem zusätzlichem Silikastaubanteil) und karbonatfreier 0/2 Kantkorn Gesteinskörnung ein gut verarbeitbarer Spritzbeton mit J2-Frühfestigkeitsentwicklung herstellbar ist. Das Fließmittel in Kombination mit Langzeitverzögerern konnte die baubetrieblich notwendige Verarbeitungszeit von bis zu 6-8 h offen halten.

In den Labor-Versuchen konnte gezeigt werden, dass mit 7% Erstarrungsbeschleuniger bezogen auf das Gesamtbindemittel die Frühfestigkeitsklasse J2 bei 10°C Umgebungstemperatur gut erreicht werden konnte. Die Grundmischung war ausreichend lange pumpearbeitbar und neigte weder zur Entmischung noch zu raschem Ansteifen. Sie konnte mit der relativ schwachen Laborpumpe gut gefördert werden.

Bei Vorversuchen auf der Baustelle zeigte sich, dass bei einer zu hohen EB Dosisierung (> 7% bezogen auf das Gesamtbindemittel) deutliche Festigkeitsverluste an den Spritzbetonbohrkernen gegenüber den Nullbetonwürfeln auftraten. Eine Unterschreitung von 4,5% EB hatte zur Folge, dass sich die Frühfestigkeitsentwicklung extrem verschlechterte. Der optimale Bereich der Beschleunigerdosierung wurde somit auf 4,5 – 5,0% festgelegt.

Die Festbeton- und Dauerhaftigkeitsprüfungen zeigen einen dauerhaften, dichten Spritzbeton. Untersuchungen zur Kalziumauslaugung, Wassereindringtiefe, Karbonatisierung und Frostbeständigkeit deuten darauf hin, dass die neu entwickelte Rezeptur eine erhöhte Widerstandsfähigkeit gegen sämtliche getesteten Angriffe aufweist.

Mit der vorliegenden Rezeptur ist es möglich einen Spritzbeton mit stark erhöhter Widerstandsfähigkeit für extreme Bedingungen wie im Bosrucktunnel herzustellen. Die Rezeptur



weist gegenüber Sulfat beständigem Spritzbeton nach ÖVBB-Richtlinie Spritzbeton eine deutlich verbesserte Widerstandsfähigkeit gegenüber Thaumasil-Sulfatangriff auf.

## 6. Literatur

- [1] Dietzel, M., Rinder, T., Niedermayr, A., Mittermayr, F., Leis, A., Klammer, D., Köhler, S. und Reichl, P.:  
Mechanisms of Sinter Formation in Drainage Systems. BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, 2008. 153(10): p. 369-372.
- [2] Bauer, C.:  
Ursache der Sulfatschäden im Eisenbahntunnel Bosruck. Diplomarbeit, TU Graz, 2004.
- [3] Mittermayr, F., Bauer, C., Klammer, D., Boettcher, M.E., Leis, A., Escher, P., und Dietzel, M.:  
Concrete under sulphate attack: an isotope study on sulphur sources. Isotopes in Environmental and Health Studies, 2012. 48(1): p. 105-117.
- [4] ÖVBB Richtlinie:  
Spritzbeton. Österreichische Bautechnik Vereinigung, Wien 12/2009.
- [5] Neville, A.:  
The confused world of sulfate attack on concrete. Cement and Concrete Research, 2004. 34(8): p. 1275-1296.
- [6] Bellmann, F.:  
On the formation of thaumasite  $\text{CaSiO}_3\text{-CaSO}_4\text{-CaCO}_3\text{-15H}_2\text{O}$ : part III. Advances in Cement Research, 2007. 19(4): p. 139-146.
- [7] Bellmann, F. und Stark, J.:  
The role of calcium hydroxide in the formation of thaumasite. Cement and Concrete Research, 2008. 38(10): p. 1154-1161.
- [8] Crammond, N.:  
The occurrence of thaumasite in modern construction - a review. Cement and Concrete Composites, 2002. 24(3-4): p. 393-402.
- [9] ÖNORM B 4710-1:  
Beton – Teil 1: „Festlegung, Herstellung, Verwendung und Konformitätsnachweis. . 2007.
- [10] Mittermayr, F., Baldermann, A., Baldermann, C., Grathoff, G.H., Klammer, D., Köhler, S.J., Leis, A., Warr, L.N. und Dietzel, M.:  
Environmental controls and reaction pathways of coupled de-dolomitization and thaumasite formation. Cement and Concrete Research, 2017. 95: p. 282-293.
- [11] Mittermayr, F., Rezvani, M., Baldermann, A., Hainer, S., Breitenbücher, P., Juhart, J., Graubner, C.A. und Proske, T.:  
Sulfate resistance of cement-reduced eco-friendly concretes. Cement and Concrete Composites, 2015. 55: p. 364-373.
- [12] Aguilera, J., Martinez-Ramirez, S., Pajares-Colomo, I. und Blanco-Varela, M.T.:  
Formation of thaumasite in carbonated mortars. Cement and Concrete Composites, 2003. 25(8): p. 991-996.
- [13] Aguilera, J., Varela, M.T.B. und Vázquez, T.:  
Procedure of synthesis of thaumasite. Cement and Concrete Research, 2001. 31(8): p. 1163-1168.
- [14] Barnett, S.J., Adam, C.D. und Jackson, A.R.W.:  
Solid solutions between ettringite,  $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3\text{12}(\text{OH})_{12}\text{26H}_2\text{O}$ , and thaumasite,  $\text{Ca}_3\text{Si}(\text{SO}_4)(\text{CO}_3)(\text{OH})_6\text{12H}_2\text{O}$ . Journal of Materials Science, 2000. 35(16): p. 4109-4114.
- [15] Brown, P.W., Hooton, R.D. und Clark, B.A.:  
The co-existence of thaumasite and ettringite in concrete exposed to magnesium sulfate at room temperature and the influence of blast-furnace slag substitution on sulfate resistance. Cement and Concrete Composites, 2003. 25(8): p. 939-945.
- [16] Crammond, N.J.:  
The thaumasite form of sulfate attack in the UK. Cement & Concrete Composites, 2003. 25(8): p. 809-818.
- [17] Iden, I.K. und Hagelia, P.:  
C, O and S isotopic signatures in concrete which have suffered thaumasite formation and limited thaumasite form of sulfate attack. Cement and Concrete Composites, 2003. 25(8): p. 839-846.
- [18] Bellmann, F. und Stark, J.:  
Prevention of thaumasite formation in concrete exposed to sulphate attack. Cement and Concrete Research, 2007. 37(8): p. 1215-1222.

- [19] Blanco-Varela, M.T., Carmona-Quiroga, P.M., Sáez del Bosque, I.F., Martínez-Ramírez, S.: Role of organic admixtures on thaumasite precipitation. *Cement and Concrete Research*, 2012. 42(7): p. 994-1000.
- [20] Collett, G., Crammond, N.J., Swamy, R.N. und Sharp, J.H.: The role of carbon dioxide in the formation of thaumasite. *Cement and Concrete Research*, 2004. 34(9): p. 1599-1612.
- [21] Glasser, F.P., Marchand, J. und Samson, E.: Durability of concrete — Degradation phenomena involving detrimental chemical reactions. *Cement and Concrete Research*, 2008. 38(2): p. 226-246.
- [22] Kohler, S., Heinz, D. und Urbonas, L.: Effect of ettringite on thaumasite formation. *Cement and Concrete Research*, 2006. 36(4): p. 697-706.
- [23] Lothenbach, B., Le Saout, G., Gallucci, E. und Scrivener, K.: Influence of limestone on the hydration of Portland cements. *Cement and Concrete Research*, 2008. 38(6): p. 848-860.
- [24] Lothenbach, B., Scrivener, K. und Hooton, R.D.: Supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, 2011. 41(12): p. 1244-1256.
- [25] Schmidt, T., Lothenbach, B., Romer, M., Neuenschwander, J. und Scrivener, K.: Physical and microstructural aspects of sulfate attack on ordinary and limestone blended Portland cements. *Cement and Concrete Research*, 2009. 39(12): p. 1111-1121.
- [26] Schmidt, T., Lothenbach, B., Romer, M., Scrivener, K., Rentsch, D. und Figi, R.: A thermodynamic and experimental study of the conditions of thaumasite formation. *Cement and Concrete Research*, 2008. 38(3): p. 337-349.
- [27] Kunther, W., Lothenbach, B. und Scrivener, K.L.: On the relevance of volume increase for the length changes of mortar bars in sulfate solutions. *Cement and Concrete Research*, 2013. 46(0): p. 23-29.
- [28] Ramezani-pour, A.M. und Hooton, R.D.: Thaumasite sulfate attack in Portland and Portland-limestone cement mortars exposed to sulfate solution. *Construction and Building Materials*, 2013. 40(0): p. 162-173.
- [29] Skaropoulou, A., Sotiriadis, K., Kakali, G. und Tsvivilis, S.: Use of mineral admixtures to improve the resistance of limestone cement concrete against thaumasite form of sulfate attack. *Cement and Concrete Composites*, 2013. 37(0): p. 267-275.
- [30] Mittermayr, F., Baldermann, A., Kurta, C., Rinder, T., Klammer, D., Leis, A., Tritthart, J. und Dietzel, M.: Evaporation — a key mechanism for the thaumasite form of sulfate attack. *Cement and Concrete Research*, 2013. 49(0): p. 55-64.
- [31] Bellmann, F., Erfurt, W. und Ludwig, H.M.: Field performance of concrete exposed to sulphate and low pH conditions from natural and industrial sources. *Cement and Concrete Composites*, 2012. 34(1): p. 86-93.
- [32] Lorente, S., Yssorche-Cubaynes, M.P. und Auger, J.: Sulfate transfer through concrete: Migration and diffusion results. *Cement & Concrete Composites*, 2011. 33(7): p. 735-741.
- [33] Tritthart, J., Mittermayr, F., Klammer, D. und Saxer, A.: Endbericht zum Forschungsprojekt „Ermittlung des kritischen Sulfatgehaltes von Beton“ (FFG Projekt 839199). 2014. p. 107.
- [34] Tsvivilis, S., Sotiriadis, K. und Skaropoulou, A.: Thaumasite form of sulfate attack (TSA) in limestone cement pastes. *Journal of the European Ceramic Society*, 2007. 27(2-3): p. 1711-1714.
- [35] Scrivener, K., Crumbie, A. und Laugesen, P.: The Interfacial Transition Zone (ITZ) Between Cement Paste and Aggregate in Concrete. *Interface Science*, 2004. 12(4): p. 411-421.
- [36] Lothenbach, B., Le Saout, G., Ben Haha, M., Figi, R. und Wieland, E.: Hydration of a low-alkali CEM III/B-SiO<sub>2</sub> cement (LAC). *Cement and Concrete Research*, 2012. 42(2): p. 410-423.
- [37] Irassar, E.F., Bonavetti, V.L., Trezza, M.A. und Gonzalez, M.A.: Thaumasite formation in limestone filler cements exposed to sodium sulphate solution at 20°C. *Cement and Concrete Composites*, 2005. 27(1): p. 77-84.
- [38] Irassar, E.F.: Sulfate attack on cementitious materials containing limestone filler - A review. *Cement and Concrete Research*, 2009. 39(3): p. 241-254.

- [39] Justnes, H.:  
Thaumasite formed by sulfate attack on mortar with limestone filler. *Cement and Concrete Composites*, 2003. 25(8): p. 955-959.
- [40] Tsivilis, S., Kakali, G., Skaropoulou, A., Sharp, J.H. und Swamy, R.N.:  
Use of mineral admixtures to prevent thaumasite formation in limestone cement mortar. *Cement & Concrete Composites*, 2003. 25(8): p. 969-976.
- [41] Sotiriadis, K., Nikolopoulou, E., Tsivilis, S., Pavlou, A., Chaniotakis, E. und Swamy, R.N.:  
The effect of chlorides on the thaumasite form of sulfate attack of limestone cement concrete containing mineral admixtures at low temperature. *Construction and Building Materials*, 2013. 43(0): p. 156-164.
- [42] Mittermayr, F., Rinder, T., Klammer, D., Leis, A. und Dietzel, M.:  
A Carbon Isotope Study of Thaumasite and Calcite Sinter Formation in Underground Construction. *International Congress on Durability of Concrete*, Hrsg.: Justnes, H. und Jacobsen, S., 2012, NTNU: Trondheim. p. No. C6-1: 1-14.
- [43] Martinez-Ramirez, S., Blanco-Varela, M.T. und Rapazote, J.:  
Thaumasite formation in sugary solutions: Effect of temperature and sucrose concentration. *Construction and Building Materials*, 2011. 25(1): p. 21-29.
- [44] Breitenbücher, R., Heinz, D., Lipus, K., Paschke, J., Thielen, G., Urbonas, L., Wisotzky, F.:  
German Building Authority (DIBt) Sachstandbericht - Sulfatangriff auf Beton. Vol. 554, 2006, Berlin: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton. 172.
- [45] Thumann, M., Saxer, A. und Kusterle, W.:  
Precipitations in the tunnel drainage system – the influence of sprayed concrete and other cement bound materials. In: Beck, T., Woldmo, O., und Engen, S. (Eds.): 7<sup>th</sup> International Symposium on Sprayed Concrete, Tekna, 2014: Sandefjord, Norway.
- [46] Thumann, M. und Kusterle, W.:  
Spritzbeton mit reduziertem Versinterungspotential. In: Kusterle, W. (Hrsg.): Spritzbeton-Tagung 2015, Alpbach, Tirol, Eigenverlag, p. 11.

## Zu den Autoren

Dr. rer. nat. Florian Mittermayr

Studium der Geowissenschaften Universität Innsbruck und TU Graz, Doktorat an der TU Graz, seit 2013 als Post Doc am Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie der TU Graz  
*f.mittermayr@tugraz.at*

M. Eng. Maria Thumann

Studium des Bauingenieurwesens an der OTH Regensburg, seit 2013 wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Ostbayerischen Technischen Hochschule in Regensburg  
*maria1.thumann@oth-regensburg.de*

Dr. rer. nat. Andre Baldermann

Studium der Geowissenschaften Universität Greifswald und TU Graz, 2015 Doktorat und anschließend Post-Doc am Institut für Angewandte Geowissenschaften TU Graz  
*baldermann@tugraz.at*

Dipl. phil. nat. Christian Stenger

Studium der Chemie an der Universität Bern, Forschung am Department für Radio- und Umweltchemie der Universität Bern und am PSI Villigen, seit 2005 bei Sika AG  
*stenger.christian@ch.sika.com*

Dr. sc. nat. Benedikt Lindlar

Studium der Chemie und der Germanistik an der Universität Konstanz, Dissertation an der ETH Zürich, Forschung am Lehrstuhl der Universität Konstanz, seit 2002 bei Sika AG  
*lindlar.benedikt@ch.sika.com*

Baurat h.c. Dipl.-Ing. Dr. techn. Helmut Huber

Studium Bauingenieurwesen, 52 Jahre baupraktische Betontechnik im Tiefbau, Tunnel- und Kraftwerksbau  
*huber.hel@a1.net*

Ing. Eric Bauer

Seit 2001 bei der Fa. Bernegger GmbH, Molln beschäftigt und seit 2006 Laborleiter. Lieferant von Nassspritzbeton und Trockenspritzbeton (beide auch als RV 0.7)

*eric.bauer@bernegger.at*

Dipl.-Ing. Rudolf Scheutz

Streckenmanagement und Anlagenentwicklung, Ansprechpartner für Tunnelbau Erhaltung und Instandhaltung ÖBB-Infrastruktur AG, Linz

*Rudolf.Scheutz@oebb.at*

Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Wolfgang Kusterle

Studium des Bauingenieurwesens an der Universität Innsbruck, Mitarbeit im Ingenieurbüro (Brückenbau), Dozent an der Universität Innsbruck. Beratungstätigkeit für Spritzbeton, Baustoffe im Tunnelbau, Betoninstandsetzung, Faserbetone, Brandschutz im Tunnelbau und Betontechnologie; seit 2001 Prof. an der OTH- Regensburg

*wolfgang.kusterle@oth-regensburg.de*