

Chimia 52 (1998) 197–201  
 © Neue Schweizerische Chemische Gesellschaft  
 ISSN 0009-4293

# Versalzung und Korrosion von Spritzbeton (Sicherheitsstollen des Gotthard-Strassentunnels)

Michael Romer\* und Peter Lienemann

## Deterioration of Shotcrete in the Safety Gallery of the Gotthard Motorway Tunnel by Salt-Containing Water

**Abstract.** The corrosion behavior of shotcrete in the safety gallery of the motorway tunnel Gotthard was investigated. The tunnel was built in 1972/73, sections with water-leading rocks show various signs of concrete degradation. Samples of corroded concrete were investigated in the laboratory for their chemical and mineralogical compositions. X-ray diffraction (XRD), X-ray fluorescence (XRF), and methods to determine acid-soluble silicon compounds and insoluble contents were used to characterize the samples.

Comparisons of original concrete with corroded samples show the existence of discrete interaction mechanisms. These mechanisms lead either to harmless efflorescence, to detachments of concrete from the rock or to more or less complete degradation of the cement paste. Delamination or deterioration of concrete are related to the amount and kind of transformation products formed due to action of specific ionic species of the interacting water. Special attention is drawn to the formation of thaumasite, which may be formed under special conditions, even when sulfate-resistant cements have been used.

Physical and chemical properties of the cement paste as well as the composition of interacting water are important for the service life of a concrete structure. The potential of concrete degradation due to interaction with aggressive water may be lowered by preventing its contact or by draining the water not to force it to penetrate the concrete structure.

### Einleitung

Viele Baustoffe sind mehr oder weniger porös. Dies ermöglicht den Transport von Feuchtigkeit und damit verbunden von wasserlöslichen Substanzen. Die Lösungen erreichen bei der Verdunstung des Wassers die Sättigungsgrenze der enthaltenen Salze. Salzausblühungen auf Baustoffoberflächen sind daher keine Besonderheiten. Hohe Ionenkonzentrationen können chemisch mit dem alkalischen Beton, insbesondere mit dem Calciumhydroxid des zementösen Bindemittels, reagieren. Gleiches gilt für mineralisiertes Wasser in Kontakt mit Beton, was im Tiefbau und speziell im Tunnelbau keine

Seltenheit darstellt [1]. Verschiedenen Ionen wie Sulfat, Natrium oder Magnesium kommen dabei unterschiedliche Bedeutungen zu. Die Aggressivität von mineralisiertem Wasser auf Beton kann nach der DIN 4030 beurteilt werden [2]. Neben der Zusammensetzung des Wassers sind die Fliess- resp. Durchströmungsbedingungen von entscheidender Bedeutung für das Ausmass der Betonzerstörung durch aggressives Wasser.

Die Aggressivität von weichem oder saurem Wasser besteht im direkten Herauslösen und Wegführen von Zementstein-komponenten. Auch Inhaltstoffe von mineralisiertem Wasser, wie beispielsweise Magnesium, destabilisieren den hydratisierten Zement [3], d.h. sie führen neben der Bildung neuer Feststoffphasen zur Mobilisierung von Bindemittelkomponenten. Dem Angriff durch sulfathaltige Wasser kommt eine spezielle Bedeutung zu [4], da hier voluminöse, schwerlösliche Salze entstehen. Bei der Bildung der komplexen und kristallwasserreichen Sulfatverbindungen Ettringit und Thaumasit [5] dehnt

sich der Zementstein aus (Quellung), was die Zermürbung des Bindemittels verursacht.

Da die chemische Wechselwirkung meist nicht homogen im Zementstein abläuft, sondern sich auf Zonen erhöhter Porosität resp. Durchströmbarkeit konzentriert, kommt es zur Bildung ausgeprägter Schwächezonen und im Falle von Spritzbeton zur Auflockerung des Verbundes mit dem Traggrund (Fels).

In der Realität wirken sich oft mehrere Bestandteile von Wasser und Beton auf die chemischen Interaktionen aus, so dass sich verschiedenartige Reaktionen überlagern und wechselhafte Schadensbilder resultieren. Dabei wirken sich auch die Ionenkonzentration der wässrigen Lösung, die Durchströmungsgeschwindigkeit durch den Baustoff sowie die Reaktionskinetik und die Dauer der Wechselwirkung aus.

### Sicherheitsstollen Gotthard-Autobahntunnel

Der Sicherheitsstollen des Gotthard-Autobahntunnels (Sisto) wurde 1972/73 erbaut. Er verläuft parallel zum Autobahntunnel und ist durch Querschläge mit diesem verbunden. Der Sisto wurde konventionell ausgebrochen, und wo erforderlich, mit Felsankern und Spritzbeton vor dem Nachbrechen gesichert. Dies war in den Portalbereichen (Lockergestein) sowie in den Tunnelabschnitten mit zerklüfteten oder geschichteten Gesteinsformationen notwendig. Oft sind es auch jene Abschnitte, die stark mineralisiertes Bergwasser führen. Die Wasserverhältnisse haben sich seit dem Bau des Tunnels weder qualitativ (chemische Zusammensetzung) noch in ihren Austrittsmengen wesentlich verändert (Tab. 1).

Tab. 1. Zusammensetzung des Wasseraustrittes 20 Meter nördlich von Querschlag 26 (Permokarbon). Es handelt sich um ein hochmineralisiertes Grundwasser vom Typ Natrium/Calciumsulfat [1].

		Konzentration [mg/l]
Calcium	Ca <sup>2+</sup>	420
Magnesium	Mg <sup>2+</sup>	64
Natrium	Na <sup>+</sup>	1500
Kalium	K <sup>+</sup>	38
Hydrogencarbonat	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	82
Chlorid	Cl <sup>-</sup>	75
Sulfat	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	4500
Fluorid	F <sup>-</sup>	< 6

\*Korrespondenz: Dr. M. Romer  
 Eidgenössische Materialprüfungs-  
 und Forschungsanstalt (EMPA)  
 Überlandstrasse 129  
 CH-8600 Dübendorf  
 Tel.: +41 1 823 55 11  
 Fax: +41 1 821 62 44  
 E-Mail: romer@empa.ch

Bergwasser mit hohen Gehalten an Natrium, Calcium und Sulfat sowie elektrischen Leitfähigkeiten von über 6000 µS/cm wurden beim Durchfahren des Mesozoikums und des Permokarbons festgestellt. In Abschnitten mit kristallinen Gesteinen sind die Bergwässer erwartungsgemäss ärmer an gelösten Salzen, dafür tritt im südlichen Tunnelabschnitt lokal saures Wasser aus, welches vergleichbar einem Tafelwasser CO<sub>2</sub>-Blasen entwickelt.

Unser Interesse galt den Abschnitten im Sisto mit hochmineralisiertem Bergwasser [6]. Die mineralisierten Bergwässer manifestieren sich indirekt in Form von Wasseraustritten und begleitender Kristallisation von Mineralien sowie als Erscheinungsformen von Salztransport und Betonzerstörung.

**Untersuchungsmethoden**

Die Erfassung von Reaktionsprodukten erlaubt Rückschlüsse auf die Art der chemischen Interaktion von Beton mit Bergwasserbestandteilen. Im Labor wurden deshalb Materialproben von angegriffenem oder umgewandeltem sowie von unverändertem Beton chemisch-mineralogisch charakterisiert.

Zur Bestimmung der Elementzusammensetzung der Feststoffe wurde die Röntgenfluoreszenz-Spektrometrie (XRF) an pulverisierten Proben eingesetzt. Zur Quantifizierung wurden die unabhängig

bestimmten Massenanteile von Kohlenstoff und chemisch gebundenem Wasser berücksichtigt. Die mineralogische Charakterisierung auch von sehr kleinen Materialproben erfolgte mit der Röntgendiffraktion (XRD) [7]. Die Identifizierung von Verbindungen erlaubt Aussagen über deren Entstehungsbedingungen. Zur Beurteilung des Zementgehaltes und der Umwandlung des eigentlichen Bindemittels (sogenanntes Calciumsilikat-Hydrat-Gel) wurden die gravimetrischen Bestimmungen von säurelöslichen Siliciumverbindungen und säureunlöslichen Baustoffkomponenten herangezogen [8].

**Wechselwirkungen von mineralisiertem Bergwasser mit Spritzbeton**

Das Calciumhydroxid (Mineralname Portlandit) des hydratisierten Zementes steht im Gleichgewicht mit der Flüssigkeit im Porenraum und bewirkt die ausgeprägt alkalische Reaktion des hydratisierten Zementes. Der hohe pH-Wert stabilisiert die hydratisierten Zementsteinkomponenten, welche das eigentliche Bindemittel darstellen [4]. Vereinfacht kann daher die Wechselwirkung zwischen mineralisiertem Bergwasser und zementgebundenen Baustoffen mit Portlandit als Leitverbindung betrachtet werden, da durch den Entzug von Portlandit im feuchten Beton nachfolgend auch die übrigen Calciumverbindungen des Zementsteins angegriffen werden.

**Transport und Anreicherung leichtlöslicher Salze**

Der Salzgehalt von Bergwasser zeigt sich auf eindruckliche Weise in der Kristallisation verschiedener Mineralien bei Quellwasseraustritten. Calciumsulfate, Calciumcarbonat und zuletzt Natriumsulfat folgen sich mit zunehmender Distanz seitlich vom Wasseraustritt. Wie in Fig. 1 dargestellt, kristallisiert Natriumsulfat aufgrund seiner hohen Löslichkeit erst beim vollständigen Verdunsten der Feuchtigkeit. Die Bildung von Calciumcarbonat wird durch die Veränderung der chemischen Zusammensetzung des Flüssigkeitsfilms durch die Aufnahme von CO<sub>2</sub> aus der Tunnelatmosphäre mitbeeinflusst.

In den Tunnelabschnitten mit mesozoischen oder permokarbonen Gesteinsserien sind flächenhafte, weisse Ausblühungen auf Fels- oder Spritzbetonoberflächen häufig anzutreffen. Diese Salzkristallisationen bestehen aus Natriumsulfat oder Natriumsulfat-Hydrat. In Bereichen von aufsteigender Bodenfeuchtigkeit oder von Wasseraustritten reichern sich diese Salze am Rand von Feuchtstellen im Übergang zu trockenen Untergründen an (Fig. 2).

Phänomene der Salzsprengung in Form oberflächennaher Ablösungen von dünnen Spritzbetonschichten oder oberflächlicher Zermürbung wurden im Sisto nicht festgestellt.

**Reaktion von Bergwasserbestandteilen in Kontakt mit Spritzbeton**

In Abhängigkeit der Bergwassermigration durch den Baustoff und der Art der chemischen Reaktion kommt es zu visuell unterschiedlichen Schädigungen. Entstehen bei der Interaktion immobile Feststoffphasen, so kommt es zur Loslösung des Spritzbetons und damit zur 'Schalenbildung'. Je nach Fortschritt der Reaktion und allfälliger abdichtender Effekte ist auf der Oberfläche entsprechender Bauteile visuell kein Hinweis auf die schädigenden Angriffe in der Tiefe vorhanden.

Im Sicherheitsstollen des Gotthard-Autobahntunnels wurden zwei Formen der 'Schalenbildung' festgestellt. Im Kontaktbereich von Fels und Beton kann eine dünne Schicht von Magnesiumhydroxid oder eine bis zu wenige Millimeter dicke, plastische Schicht aus Calciumcarbonat festgestellt werden; letztere enthält noch die Zuschlagstoffe des ehemaligen Spritzbetons.

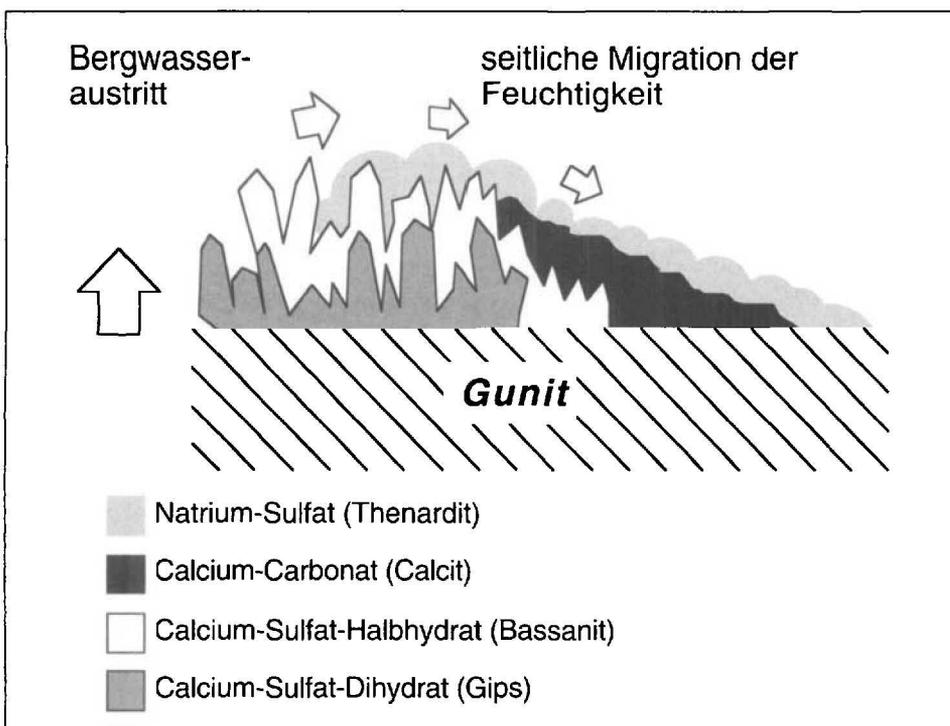
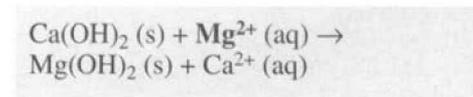


Fig. 1. Mineralisation (Mineralnamen in Klammern) beim Wasseraustritt 20 Meter nördlich Querschlag 26 aus permokarbonen Serien

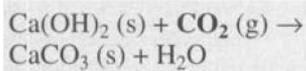


Fig. 2. Kristallisation und Anreicherung von Natriumsulfat und Natriumsulfat-Hydrat (weisse Krusten) auf Fels- und Spritzbetonoberflächen mit aufsteigender oder austretender Feuchtigkeit



Fig. 3. Zu einer bräunlichen, knetbaren Masse umgewandelter Spritzbeton (Pfeilmarkierungen). Im zentralen Bereich der rundlichen Ablösung ist die Felsoberfläche sichtbar.

Die Reaktion von gelöstem Magnesium wird thermodynamisch begünstigt, und die Bildung von schwerlöslichem Magnesiumhydroxid (Brucit) führt zu einer Abdichtung der Oberfläche. Magnesium finden wir deshalb nur im Kontaktbereich zu Beton angereichert, auch wenn trotz dichter Reaktionszone noch Wasser den Baustoff durchdringt.



Die Carbonatisierungsreaktion über CO<sub>2</sub>-haltiges Bergwasser läuft in Abhängigkeit der Wasserzusammensetzung und des freien CO<sub>2</sub>-Gehaltes über Hydrogencarbonat. Durchdringt das Bergwasser flächenhaft den Zementstein, so kann das vergleichsweise gut lösliche Hydrogencarbonat nicht abtransportiert werden, und Carbonat wird im Baustoff angereichert.

**Zersetzung von Spritzbeton**

Verschiedentlich kann die vollständige Zersetzung des Zementsteins festgestellt werden. Es kann sich dabei um eine

nahezu vollständige Carbonatisierung der Spritzbetonauskleidung handeln, wobei eine geringe Festigkeit erhalten bleibt. Andererseits führt die Umwandlung von Zementstein durch die Einwirkung von Sulfat aus dem Bergwasser unter Bildung von Ettringit, Thaumasit und Gips je nach Feuchtigkeitsgehalt zu bröckligen oder knetbaren Massen, welche lediglich durch die Anwesenheit von Zuschlagstoffen als ehemaliger Spritzbeton erkennbar sind (Fig. 3).

Als Referenzprobe wurde von visuell intaktem Spritzbeton Material herausgeschnitten, unter Vermeidung der atmosphärisch carbonatisierten Oberflächenpartie. Die Proben von umgewandeltem Spritzbeton stammen aus 2–3 cm dicken Schichten eines pastösen Materials auf dem Fels. In diesen Proben sind noch die Zuschlagkörner des ehemaligen Spritzbetons mit erkennbar. Der Vergleich der Analysenresultate von ursprünglichem Spritzbeton mit jenen von umgewandeltem, pastösen Spritzbeton zeigt, dass durch die Bildung von Umwandlungsprodukten

die ursprünglichen Gehalte an säureunlöslichen Bestandteilen sowie die Massenanteile von Aluminium, Eisen und Silicium ungefähr halbiert sind (Tab. 2). Dieser Verdünnungseffekt wird durch die Einlagerung von Sulfat, Carbonat, Calcium, säurelöslichen Siliciumverbindungen (Thaumasit) und chemisch gebundenem Wasser (Kristallwasser) verursacht. Der Befund deckt sich mit den in den Proben von umgewandeltem Spritzbeton nachweisbaren mineralischen Verbindungen wie Ettringit, Thaumasit, Gips und Calcit. Die Verdünnung bezüglich den Massenanteilen ist mit Volumenzunahmen von deutlich über 100% verbunden, da bei der Umwandlung viel Kristallwasser gebunden wird.

**Diskussion**

Die festgestellten Bergwassereinflüsse können phänomenologisch unterteilt werden und sind in Fig. 4 schematisch dargestellt.

- A) Gelöste Salze durchdringen den Beton ohne Wechselwirkung. Bei der oberflächennahen Verdunstung des Wassers steigt die Konzentration der gelösten Salze im Porenwasser, und die Salze kristallisieren als Krusten oder flaumartige Gebilde.
- B) Inhaltstoffe des Bergwassers wie beispielsweise Magnesiumionen reagieren in Kontakt zum Beton mit Zementsteinkomponenten. Dabei kommt es zur Mobilisierung von Bindemittelanteilen, die mit der Feuchtigkeit an die Bauteiloberfläche transportiert werden und zu Ausblühungen wie beispielsweise Calcit führen können.
- C) Die Umwandlung substantieller Bindemittelanteile von Spritzbeton kann ohne die Bildung oberflächlicher Ausblühungen erfolgen. In diesem Fall werden die Inhaltstoffe des Bergwasser quantitativ in schwerlösliche Reaktionsprodukte überführt. Diese Umwandlung betrifft, ähnlich wie Inter-

aktion B, den Spritzbeton in Kontakt zum Fels, kann aber grosse Teile oder die ganze Schichtstärke des Überzugs in Mitleidenschaft ziehen.  
 Die treibende Kraft der Interaktionstypen B und C liegt in den thermodynamischen Gleichgewichtsbedingungen – der Stabilität von Feststoffphasen in entsprechenden Porenlösungen. In Abhängigkeit von den Durchströmungsverhältnissen (Permeabilität), der Reaktionskinetik sowie der betroffenen Zementsteinkomponenten kommt es dabei zu lokaler oder tiefergreifender Umwandlung des Zementsteins.  
 Die Anreicherung von Thaumasit bei der Umwandlung von Spritzbeton durch Sulfateinwirkung erklärt den erhöhten Gehalt an säurelöslichen Siliciumverbindungen in diesen Proben. Andererseits könnte die langzeitliche Umwandlung von silicium- und carbonathaltigen Zuschlagstoffen (z.B. Kieselkalk) zu Thaumasit die Zunahme säurelöslicher Siliciumverbindungen erklären. Die Möglichkeit, dass Thaumasit durch Umwandlung carbonatischer Zuschlagstoffe unter gleichzeitiger Sulfateinwirkung entstanden ist [9], erscheint in diesem Fall aufgrund der teilweise massiven Carbonatisierung durch das Bergwasser unwahrscheinlich.  
 Thaumasit dominiert die Umwandlungsprodukte bei gleichzeitiger Sulfat- und Carbonateinwirkung. Gips tritt zusammen mit Thaumasit, nicht aber zusammen mit Ettringit auf. Die Bildung von Thaumasit ist an tiefe Temperaturen gebunden [5][10].  
 Die Bildung von Ettringit oder Thaumasit im Zementstein wirkt gleichzeitig lösend und treibend und kann deshalb grössere Volumen Zementstein beeinträchtigen. Da Thaumasit kein oder als Mischphase zu Ettringit nur wenig Aluminium einbaut, kann durch den Einsatz von Zement mit erhöhtem Sulfatwiderstand die Bildung von Thaumasit und die damit verbundene Sulfatschädigung nicht generell verhindert werden [11].  
 Die einzelnen Mechanismen der Interaktion gehen auf die Anwesenheit spezifischer ionischer Bergwasserkomponenten zurück. Natürliche Wässer zeigen aufgrund ihrer komplexen Zusammensetzung meist Überlagerungen verschiedener Reaktionsmechanismen.  
 Die abwechslungsreiche Abfolge verschiedener Formen der Wechselwirkung von Bergwasser mit Spritzbeton im untersuchten Objekt bedeutet, dass sich die Mechanismen und damit die Bergwasserzusammensetzungen innerhalb von wenigen Metern drastisch ändern.  
 Gefährlich sind betonaggressive Bestandteile in den Bergwässern. Diese sind aufgrund ihrer Reaktivität kaum an der Bauwerksoberfläche anzutreffen, da es in Kontakt zum Beton zu Stoffumwandlungen kommt. Solche Interaktionen können von oberflächlichen, harmlos wirkenden Salzausblühungen begleitet sein, sie können aber auch ohne sichtbare Symptome ablaufen. Ist die Menge von flächig durchströmendem Bergwasser geringer als die Verdunstungsrate an der Spritzbetonoberfläche, so ist nicht einmal der Eintrag von Bergwasser visuell erkennbar.  
 Oberflächlich sichtbare Salzausblühungen müssen nicht mit betonschädigenden Stoffumwandlungen in Verbindung stehen. Die Mineralogie der Ausblühungen kann indirekt Aufschluss geben über die Art von verborgenen Interaktionen. So kann die flächige Aussinterung von Calcit bedeuten, dass in der Tiefe der Spritzbetonaukleidung betonaggressive Wasserinhaltsstoffe den Zementstein zersetzen.

Tab. 2. Vergleich der Zusammensetzungen von originalem Spritzbeton und von umgewandeltem Beton

	Massenanteile der lufttrockenen Proben in g/100 g [%]		
	Referenzproben	umgewandelter Spritzbeton	
Farbe	dunkelgrau	weiss	braun
Konsistenz	hart	brüchig-weich	knetbar
UB <sup>a)</sup>	47	20	23
lösliches SiO <sub>2</sub> <sup>b)</sup>	5–6	8	9
Na <sub>2</sub> O	2,0–2,3	0,7	2,0
MgO	1,5–1,8	0,8	1,0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7–8	4,7	5,5
SiO <sub>2</sub>	32–34	16	17
K <sub>2</sub> O	1,8–2,0	0,6	0,6
CaO	31–32	29	33
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,0–3,3	1,5	1,8
SO <sub>3</sub>	0,3–0,5	3	4
CO <sub>2</sub>	10–12	7	12
H <sub>2</sub> O (Kristallwasser)	2–3	23	10
Verdünnungsfaktor	–	~2,0	~1,7
Mineralogie der Umwandlungsprodukte	–	Thaumasit Ettringit Calcit	Gips Thaumasit Calcit

<sup>a)</sup> UB = säureunlösliche Bestandteile  
<sup>b)</sup> von säurelöslichen Siliciumverbindungen

**Ausblick**

Aufgrund seiner Alkalinität stellt feuchter Beton ein grosses Pufferpotential gegenüber Säuren dar und kann grössere Wassermengen chemisch beeinflussen. Darin liegt gleichzeitig die Anfälligkeit von Beton gegenüber chemischen Angriffen. Dieser Wechselwirkung kann durch das Einbringen von dichtem und somit nahezu undurchlässigem Beton in der Bauausführung begegnet werden.

Während Beton gegenüber chemischen Angriffen optimiert werden kann, treten in einem Bauwerk immer Schwachstellen wie Fugen oder Risse auf. Abdichtende Effekte von oberflächlichen Phasenumwandlungen bei stehendem Wasser kommen bei der Durchdringung von Bauwerksteilen nicht zum tragen.

Im Hinblick auf die betriebliche Nutzung von Tunnelbauten und deren generell aufwendigen und kostspieligen Sanierungsarbeiten müssen schädigende Einflüsse von Bergwasser auf Baustoffe berücksichtigt werden. Bereits in der Projektplanung von Tiefbauten müssen detaillierte Informationen über die lokalen Bergwasserverhältnisse erarbeitet und deren mögliche Einflüsse auf die Dauerhaftigkeit des Bauwerkes berücksichtigt werden.

Die Verhinderung von Bergwasserkontakten mit chemisch reaktiven Baustoffen stellt die optimale, aber sicher auch aufwendigste Lösung dar. Kann durch gezielte Massnahmen das Bergwasser von der Rückseite des Bauwerkes abgeleitet werden, so wird die Gefahr der Durchströmung des Baustoffes und damit der chemischen Zerstörung stark vermindert.

Neben potentiell schädigenden Eigenschaften von mineralisiertem Bergwasser auf Beton muss auch dessen Neigung zur Ausscheidung schwerlöslicher Verbindungen (Versinterung) in Drainage- oder Abflusssystemen berücksichtigt werden.

Eingegangen am 16. März 1998

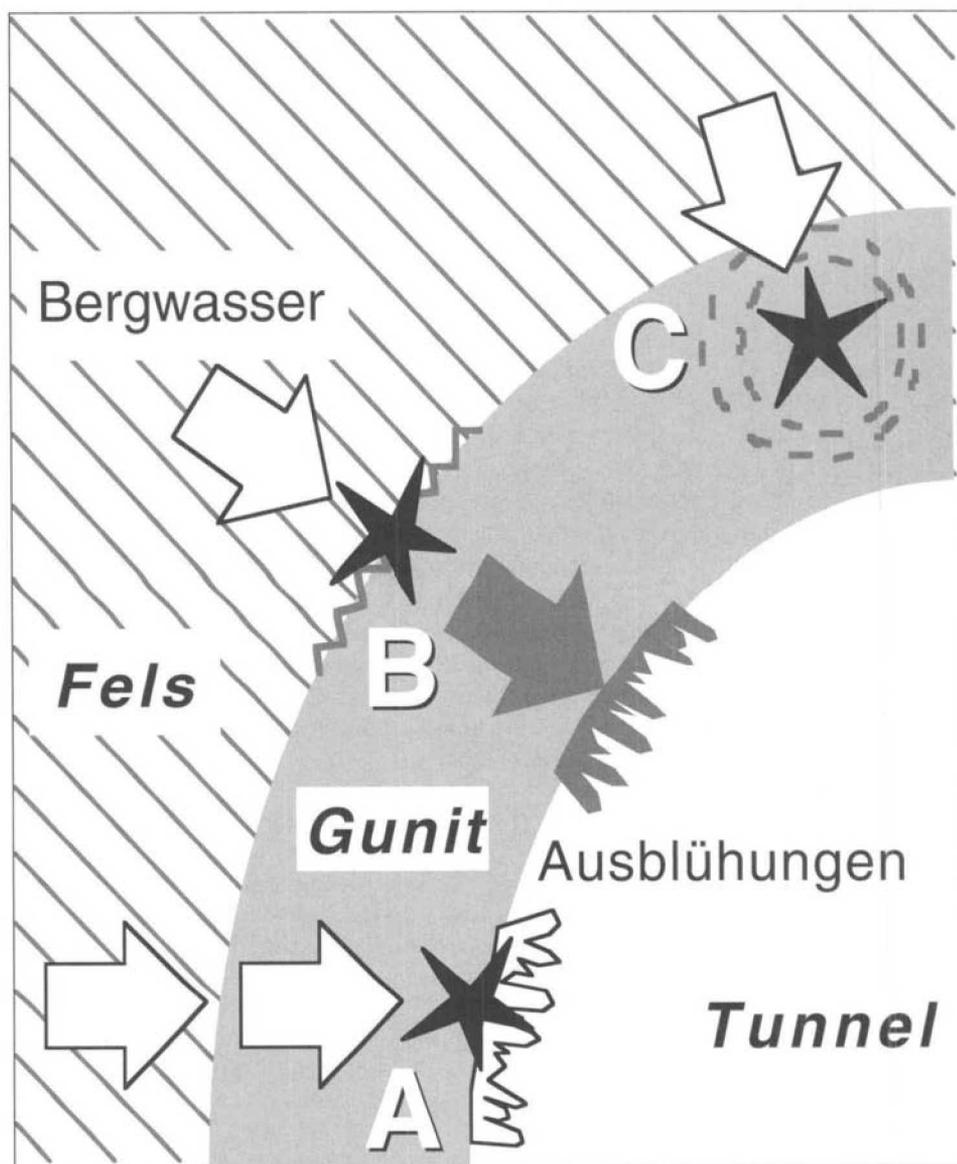


Fig. 4. Schematische Darstellung der Interaktion von mineralisierten Bergwässern mit Spritzbeton (Gunit)

[1] M. Wegmüller, J.D. Chabot, 'Einflüsse des Bergwassers auf die Dauerhaftigkeit von Bauwerken – Schlussbericht', Projektbericht Institut für Bauplanung und Baubetrieb, ETH-Zürich, 1997.  
 [2] DIN 4030, 'Beurteilung betonangreifender Wässer, Böden und Gase', Beuth Verlag, Berlin, Ausgabe Juni 1991.  
 [3] O.S.B. Al-Amoudi, M. Maslehuddin, M.M. Saadi, 'Effect of Magnesium Sulfate and Sodium Sulfate on the Durability Performance of Plain and Blended Cements', *ACI Materials Journal* 1995, 92, 15.  
 [4] I. Biczók, 'Concrete Corrosion, Concrete Protection', Akadémiai Kiadó, Budapest, 1972.

[5] Ettringit:  
 $\{Ca_6[Al(OH)_6]_2 \cdot 24H_2O\} \cdot [(SO_4)_3 \cdot 2H_2O]$   
 Thaumasit:  
 $\{Ca_6[Si(OH)_6]_2 \cdot 24H_2O\} \cdot [(SO_4)_2 \cdot (CO_3)_2]$   
 Ettringit und Thaumasit weisen ähnliche Kristallgitter auf. Es gibt Hinweise auf eine Mischkristallreihe zwischen diesen Endgliedern. Thaumasit wird bevorzugt bei tiefen Temperaturen (< 5°) gebildet. In Anwesenheit von Magnesium oder anderer Ionen können die Stabilitätsfelder verändert werden. H. Kollman, 'Mineralogische Untersuchungen über Ausblühungs- und Treiberscheinungen an Baustoffen durch Sulfate', *Giessener Geologische Schriften* 1978, 18.  
 [6] Für die fachliche Unterstützung danken wir Prof. R. Fechtig und J.D. Chabot vom Institut für Bauplanung/Baubetrieb der ETH-Zürich sowie M.C. Wegmüller.  
 [7] Chemische Formel Mineralname  
 $CaSO_4 \cdot 0,5H_2O$  Bassanit  
 $Mg(OH)_2$  Brucit  
 $CaCO_3$  Calcit  
 $CaSO_4 \cdot 2H_2O$  Gips  
 $Ca(OH)_2$  Portlandit  
 $Na_2SO_4$  Thenardit

[8] W. Studer, 'Die nachträgliche Bestimmung des Zementgehaltes im Beton', *Schweiz. Bauzeitung* 1978, 43, 809. An dieser Stelle möchten wir allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Abt. Anorganische Chemie/Feststoffcharakterisierung der EMPA für den Einsatz danken.  
 [9] J.A. Bickley, R.R. Hemmings, R.D. Hooton, J. Balinski, 'Thaumasite-related deterioration of concrete structures', *Proc. Concrete Technology: Past, Present, and Future* 1994, ACI SP-144, 159.  
 [10] N.J. Crammond, M.A. Halliwell, 'Assessment of the conditions required for the Thaumasite form of Sulphate Attack', in 'Mechanisms of Chemical Degradation of Cement-Based Systems', Eds. K.L. Scrivener and J.F. Young, E&FN Spon, London, 1995, 193.  
 [11] M.A. González, E.F. Irassar, 'Ettringite formation in low C3A Portland Cement exposed to sodium-sulfate solution', *Cement and Concrete Research* 1997, 27, 1061.