

**Zeitschrift:** Schweizer Ingenieur und Architekt  
**Herausgeber:** Verlags-AG der akademischen technischen Vereine  
**Band:** 113 (1995)  
**Heft:** 44

**Artikel:** Tunnelbauten im Angriff aggressiver Bergwässer: Möglichkeiten zur Steigerung der Dauerhaftigkeit des Betons  
**Autor:** Schmid, Leonhard R.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-78802>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 22.02.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

Leonhard R. Schmid, Rapperswil

# Tunnelbauten im Angriff aggressiver Bergwässer

Möglichkeiten zur Steigerung der Dauerhaftigkeit des Betons

**Wir stehen vor der Verwirklichung neuer grosser Untertagebauten für die Bahn 2000 und die alpenquerenden Transitlinien. Im Wissen der Schäden bestehender Tunnelbauten, verursacht durch aggressive Bergwässer, obliegt uns heute die richtige und wirtschaftliche Wahl der Projektgestaltung sowie die Wahl der Baustoffe. Ausgelaugte Fugenmörtel entstanden im Laufe der Zeit ebenso wie durch sogenanntes Treiben aufgebrochene Betonkonstruktionen. Aus den Alpen vom Unterengadin zum Genfersee, aus dem gesamten Jura und der angrenzenden Schwäbischen Alm reihen sich Meldungen über Schäden, die von aggressiven Bergwässern herrühren.**

Die Korrosion des Betons und des Tunnelmauerwerks, eigentlich des Zementsteines bzw. des Kalkes im Mörtel, tritt ein durch:

- Weiche Wässer, insbesondere, wenn sie zusätzlich noch kohlensäurehaltig sind.
- Wässer mit einem aggressiven Anteil an Kohlensäure
- Sulfatwässer als Natrium-, Magnesium- oder Calciumsulfate
- In selteneren Fällen in Kombination mit Chloriden, die aber nur für die Bewehrung oder die Stahlteile der Betriebsausrüstung problematisch werden
- Chloride aus Streusalzen und durch Landwirtschaft oder andere «zivilisatorische» Einflüsse belastete Wässer.

Über die Aggressivität von Bergwässern berichteten stellvertretend für viele andere schon die Geologen Stapff beim Gotthard-Eisenbahntunnel (über Schwefel-Wasserstoffquellen) und Künzli (über die Kombination von Sulfat- und Chloridwässern) beim Weissensteintunnel.

## Korrosion durch weiche Wässer und Wässer mit aggressivem Kohlensäureanteil

Auswirkungen solcher Gefährdungen treten meist erst lange nach Fertigstellung des Bauwerkes auf. So sind beispielsweise die Fugenmörtel des Tunnelmauerwerkes im RhB-Tunnel Val Gonda im Engadin heute

Bild 1.  
Tunnel San Bernardino,  
Sulfatwasserschäden  
in der Tunnelsohle  
durch aufsteigendes  
Bergwasser

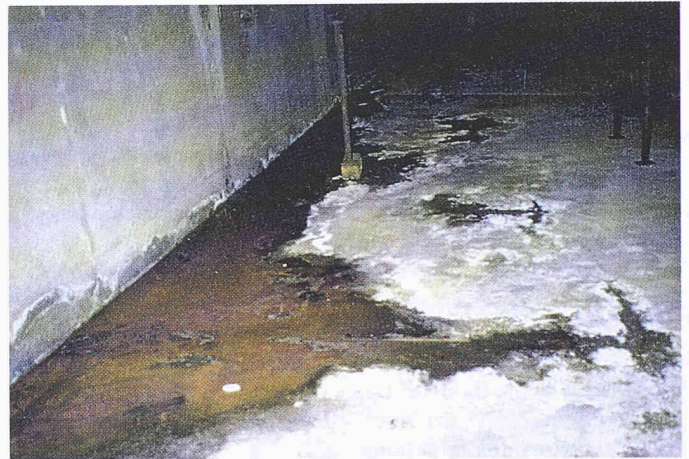
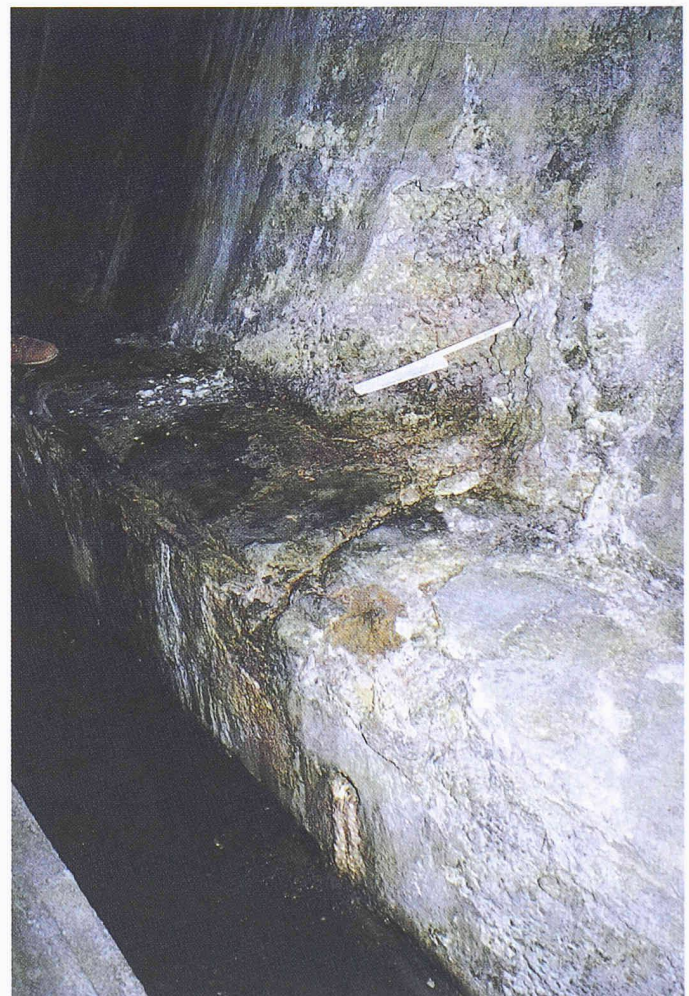


Bild 2.  
Tunnel San Bernardino,  
Sulfatwasserschaden  
im östlichen Gewölbe-  
widerlager und der  
Tunnelrigole





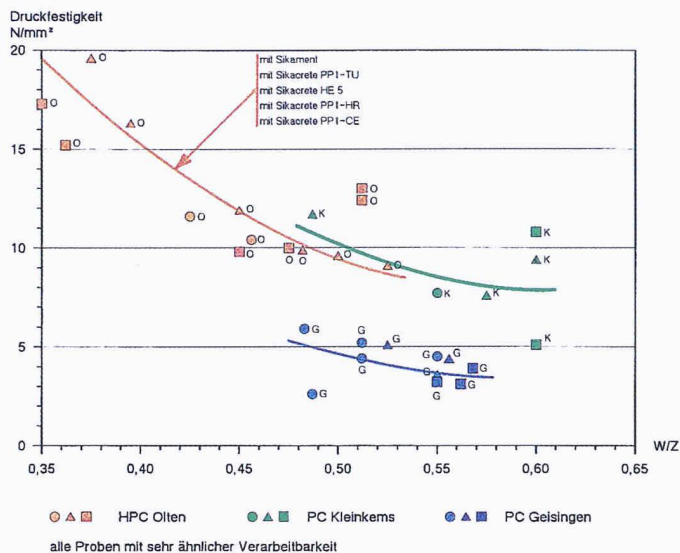


Bild 3.  
Betonfrühfestigkeit mit CEM I 52.5

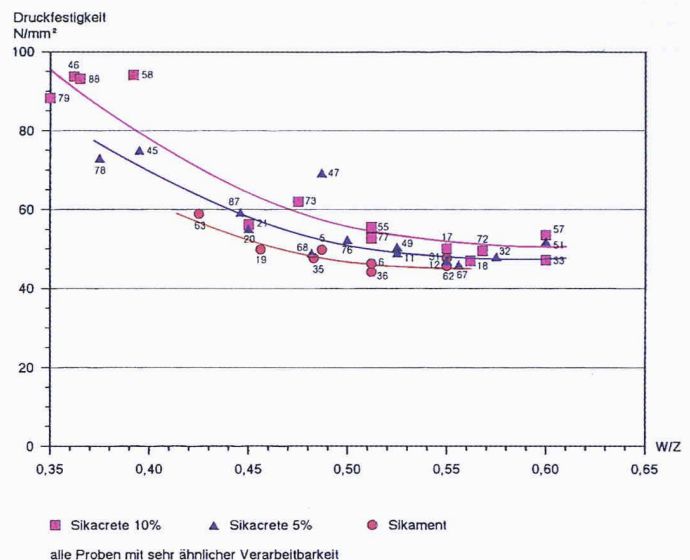


Bild 4.  
Betondruckfestigkeiten CEM I 52.5

teilweise bis zu Sand zersetzt. Im Schacht Sasso des Tunnels San Bernardino der N13 entstanden im oberen Teil starke Erosionen der Betonschachtverkleidung, während im unteren Schachtteil vor allem Sulfate Schäden verursachten.

Diesen Korrosionserscheinungen durch weiche und aggressive kohlen saure Wässer kann heute zu einem beträchtlichen Teil durch sehr dichte Betongefüge begegnet werden. Die notwendige Betontechnologie und die entsprechenden Gerätschaften zur Erreichung des dichten Gefüges sind weitgehend bekannt. Darüber hinaus gelingt es, mit entsprechenden Projektanpassungen einen erheblichen Schutzgrad zu erreichen.

### Korrosion durch Sulfatwässer

Schäden durch Sulfatwässer treten um so rascher ein, je konzentrierter die Lösung ist. Zudem steigert sich der Angriff vom Calciumsulfat zum Magnesium- und Natriumsulfat, dabei wirkt sich stets erneuerndes Bergwasser gegenüber stehendem oder nur schwach rinnendem progressiv angreifend aus. Die Schadensbilder und die geschädigten Objekte lassen sich fast beliebig lang auflisten.

So sind Tunnelgewölbe geschädigt bei:

- Tunnel der RhB im Unterengadin
- San-Bernardino-Tunnel, diverse Gewölbe, Tunnelsohlen und Rigolen
- Furkascheiteltunnel
- Wäggitaler Kraftwerke
- Bözberg-Eisenbahntunnel
- Bözberg-Strassentunnel N3

- Hauensteinbasistunnel mit Zerstörung der Berger'schen Sohlgewölbe
- Oberer Hauensteintunnel mit Zerstörung der Sohlgewölbe und des Spritzbetons.

Dem Tunnelbauer stehen zur Begegnung der Korrosionsgefahr drei grundsätzliche Möglichkeiten offen:

- Anpassung der Betontechnologie
- Schutzmassnahmen durch Beschichtungen und Abdichtungen
- Konzeptionelle Anpassungen.

Wir wollen uns hier primär mit den ersten beiden Möglichkeiten der Schadensminderung befassen. Die Frage ist, welches Betongemisch - und nicht welche Zementarten - dem Sulfatangriff zu widerstehen vermag.

Bis vor wenigen Jahren wurde für das Gipstreiben im Beton ausschliesslich die Bildung von Calcium-Sulfoaluminaten oder Ettringit ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ) verantwortlich gemacht. Die dabei ablaufende chemische Reaktion im Zementstein führt zu einer Volumenzunahme von 227%. Ettringit wurde in der Natur 1874 entdeckt.

Portlandzemente bestehen im wesentlichen aus den vier Hauptkomponenten:

- Tricalciumsilicat  $\text{C}_3\text{S}$
- Dicalciumsilicat  $\text{C}_2\text{S}$
- Calciumaluminatferrit  $\text{C}_4\text{AF}$
- Tricalciumaluminat  $\text{C}_3\text{A}$

Der nicht im Calciumaluminatferrit gebundene Teil des Aluminiumoxids bildet das Tricalciumaluminat, es ist verantwortlich für ein rasches Erstarren des Zementes. Es war deswegen naheliegend, das nicht gebundene Aluminiumoxid des Zementes

( $\text{C}_3\text{A}$ ) möglichst wegzulassen, womit die Bildung von Calciumsulfoaluminaten (Ettringit) verunmöglicht würde.

Mit den unter der alten Handlungsbezeichnung Sulfacem und Sulfix bekannten Zementen gelang dies weitgehend, allerdings mit dem Nachteil einer langsamen Entwicklung der Frühfestigkeit.

Entgegen der Annahme, das Sulfattreiben sei damit behoben, entstanden - wenn auch weniger oft - trotzdem Schäden an Untertagebauwerken durch Sulfattreiben.

Im oberen Hauensteintunnel der SBB und im San-Bernardino-Tunnel der N13 (Bilder 1 und 2) traten trotz der Verwendung von Sulfacem als  $\text{C}_3\text{A}$ -armer Zement beachtliche Schäden auf. Die mineralogische Analyse der Empa zum Hauensteintunnel ergab beträchtliche Mengen des Minerals Thaumasit. Thaumasit, in der Natur 1878 entdeckt, setzt sich aus Gips, Calciummonosilicat und Calciumkarbonat zusammen ( $\text{CaSO}_4 \cdot \text{CaSiO}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$ ). Es benötigt für seine Bildung keine Aluminate.  $\text{C}_3\text{A}$ -arme Zemente verunmöglichen deswegen zwar die Bildung von Ettringit in hohem Masse, nicht aber die Bildung von Thaumasit. Wie weit in den weltweit untersuchten Betonschäden durch Sulfatwässer das eine oder andere oder auch beide Mineralien beteiligt gewesen sein mögen, bleibt wenigstens für die Zeit vor 1985 weitgehend unbekannt. Sulfattreiben durch Thaumasit wird erst seit etwa 1980 besprochen.

Daraus folgernd dürfen  $\text{C}_3\text{A}$ -arme Zemente, CEM I HS, nicht mehr unbesehen als stark sulfatresistent gelten. Es stellt sich für bedeutende Bauwerke die Frage nach der geeigneten Baustoffwahl, die eine genügende Langzeitqualität sichert.



### Qualitäten bekannter Betonzusammensetzungen und Nutzungsziele

Für die neuen Tunnel der Bahn 2000 fordern die SBB ein Nutzungsziel von 100 Jahren, das Gleiche gilt für die AlpTransit-Linien. Damit soll mit einem normalen Unterhalt in der geforderten Zeitspanne keine grundlegende Sanierung notwendig werden. Diese sehr hohen Ansprüche setzen eine entsprechend hohe Qualität der Baustoffe und des Bauwerkes voraus, ebenso aber eine hohe Qualität der Projektgestaltung.

Weltweit werden zwar immer wieder Prüfungen zur Sulfatresistenz an Zementpasten und an Zementmörteln - z.B. nach den Richtlinien der American Society for Testing and Materials (ASTM) - ausgeführt. Eigentliche Prüfungen am Baustoff Beton bleiben aber die seltene Ausnahme, wohl der langen Prüfzeit wegen. Zementpasten- oder Mörtelprüfungen mit einer Expositionszeit von einigen Monaten bis zu einem Jahr reichen aber für eine Extrapolation auf ein volles Jahrhundert nicht aus.

Oft verwendete Prüfmethode, die Veränderungen der Volumina oder der Gewichte der Prüfkörper feststellen, können bei treibenden Angriffen systembedingt nicht zu schlüssigen Ergebnissen führen.

Einen guten Überblick über die weltweiten Untersuchungen bezüglich des

Sulfatangriffs gibt der im Zusammenhang mit der Mikrosilica-Technologie im Beton geschriebene State of art report von 1988 [1]. Die bis 1990 bekannten, weltweit durchgeführten Betonversuche waren für die geforderten Nutzungsziele nicht geeignet. Die SBB Kreis II haben deswegen der Durchführung eines umfangreichen Versuchsprogramms zur Bestimmung der betontechnologischen Massnahmen für die zukünftigen Juratunnel zugestimmt.

### Versuchsanordnung und Messmethoden

In Analogie zum ASTM-Standardtest C1012 wurden die Betonprüflinge bei rund 20°C einer Lösung aus 5%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  + 1%  $\text{MgSO}_4$  ausgesetzt.

An den Zylindern mit  $\varnothing$  50 mm bzw. den Prismen 50/50 mm, beide ca. 130 mm lang, mit leicht eingebohrten und geklebten Messmarken im Abstand von 100 mm wurde das folgende Prüfprogramm durchgeführt:

- Messung der Längenänderung in Mikrometer
- Waschen der Proben bei jeder Messung, der Sulfatangriff bleibt somit ohne jedes Hemmnis
- Abbruch des Versuchs, wenn aus einer Gruppe aus sechs Prüflingen einer ausfällt

- Festigkeitsprüfungen vor und nach dem Versuch

- Mikroskopische Dünnschliffbeurteilung auf Gefügeveränderungen und auf Bildung von Ettringit/Thaumasit.

In situ soll sich der Beton wirtschaftlich, in hoher und gleichbleibender Qualität verarbeiten lassen. Es macht deswegen keinen Sinn, Labor-Superbeton zu prüfen, der durch den Unternehmer selbst bei bestem Willen nicht in entsprechender Qualität herzustellen ist. Die Betonproben wurden aus 89 Betonkonzepten hergestellt, mit folgenden Mischungen:

- 11 verschiedene Zementtypen schweizerischer und deutscher Herkunft
- Zuschlagstoffe mit drei verschiedenen Sieblinien, hauptsächlich mit stark reduziertem Anteil der Fraktion 4 bis 8 mm
- Zusatzmittel als Hochleistungsverflüssiger in zwei Ausführungsvarianten
- Zusatzstoffe als Mikrosilica mit einer angepassten Menge an Hochleistungsverflüssiger in vier Ausführungsvarianten.

Aus den anfänglich 89 Betonrezepturen fielen 61 ihrer ungünstigen Verarbeitbarkeit wegen aus. Die 28 im Test verbliebenen Rezepturen zeichnen sich alle durch sehr ähnliche, gute Verarbeitbarkeiten mit einem Ausbreitmass von  $45 \pm 2$  cm aus. Die Wasserzementwerte schwanken entsprechend der Zusammensetzung der Betone zwischen 0.6 und 0.35.

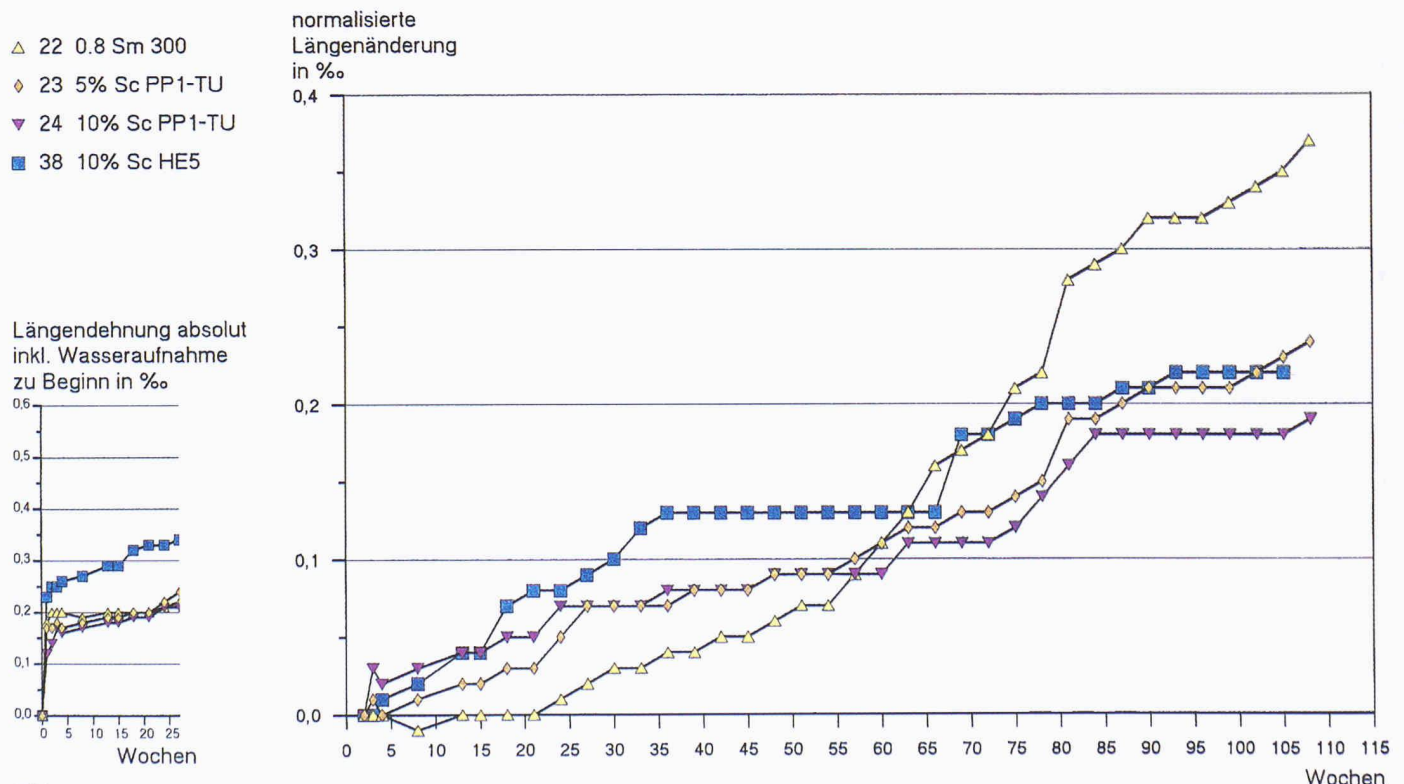


Bild 5.  
Längenänderung Beton CEM I 52.5 HS im Sulfatangriff



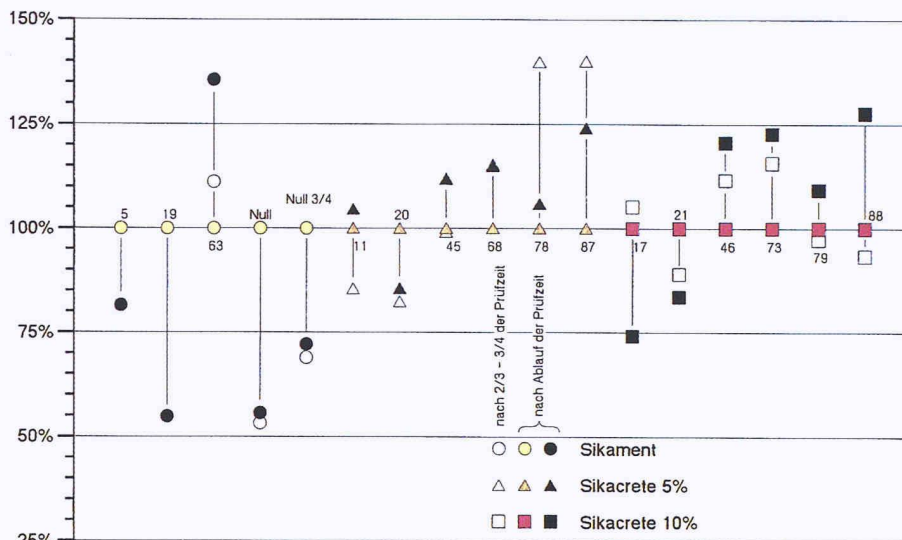


Bild 6.  
Prozentuale Veränderungen der Druckfestigkeit

durch den Sulfatgriff bei Portlandzement-Beton (nach 39 bis 111 Wochen Sulfatlagerung)

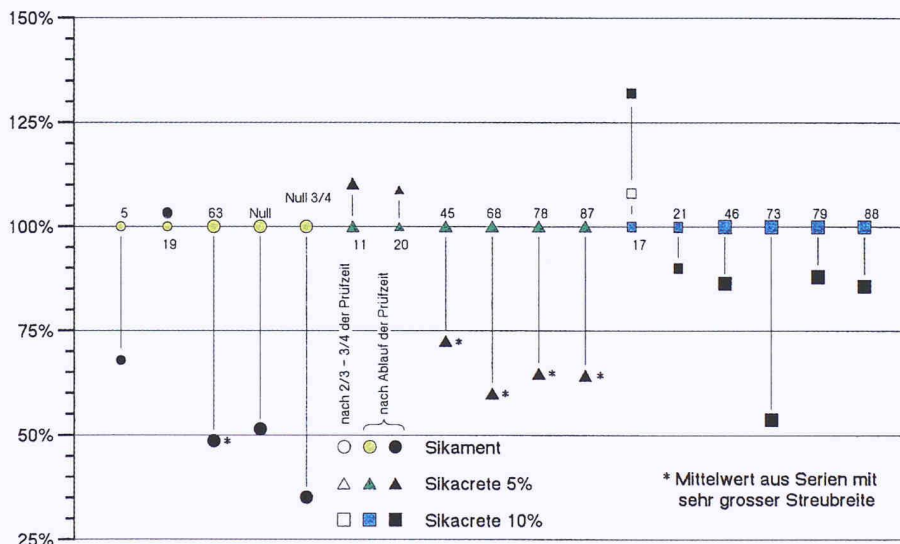


Bild 7.  
Prozentuale Veränderungen der Zugfestigkeit

durch den Sulfatgriff bei Portlandzement-Beton (nach 39 bis 111 Wochen Sulfatlagerung)

## Physikalische Eigenschaften der Betone

### Druckfestigkeitsentwicklung

Die Frühfestigkeit von Tübbing oder Kanalelementen muss zur sicheren Produktion und Handhabung minimale Werte erreichen. Aus betrieblichen und ebenso wirtschaftlichen Gründen gilt Analoges für den Verkleidungs- oder Sohlenfüllbeton. Die Darstellungen der Frühfestigkeiten für Beton mit Portlandzementen (Bild 3) zeigen günstige Werte, Betone mit CEM I HS ( $C_3A$ -arm) erreichen ohne Massnahmen erst viel später eine genügende Frühfestigkeit, während Hochfenzementbetone, selbst beschleunigt, die notwendige Frühfestigkeit niemals erreichen.

Die Druckfestigkeiten, aufgezeichnet nach 120 Tagen, ergeben sowohl für Beton mit CEM I 52.5, Bild 4, als auch mit CEM I 52.5 HS hohe Werte in klarer Abhängigkeit des Mikrosilicazusatzes und des W/Z-Faktors.

Hochfenzementbetone erreichen die notwendige Festigkeit für wirtschaftliche Einsätze in Strecken mit hohen Gebirgsdrücken kaum. Die Druckfestigkeit lässt sich durch Mikrosilicazusätze nicht mehr steigern. Ein zusätzlicher «Puzzolaneffekt» tritt offenbar nicht mehr ein.

### Zugfestigkeitsentwicklung

Die gemessenen echten Zugfestigkeiten variieren in starker Abhängigkeit vom W/Z-Faktor als Mittelwert mit 2.5 N/mm<sup>2</sup>

bis zu 5.0 N/mm<sup>2</sup> bei einem W/Z-Faktor von 0.35.

## Veränderung der Betoneigenschaften durch den Sulfatgriff

### Längenänderung der Prüfkörper

Die Längenänderung der Prüfkörper durch den Sulfatgriff zwischen zwei fixierten Messmarken wurde auf einen Mikrometer genau gemessen und laufend über die jeweilige Beobachtungsperiode aufgezeichnet. Der normalisierte Verlauf, beginnend nach Abschluss der Ausdehnung des Probekörpers durch die Wasseraufnahme bis zur Sättigung durch das Eintauchen in die Sulfatlösung, ist stellvertretend in Bild 5 dargestellt.

Bei Proben, die über die ganze Periode von 110 Wochen, einzelne bis 131 Wochen, ohne Schädigungen dem Sulfatgriff standhielten, stellten sich Längenänderungen ein von:

- CEM I 52.5 Beton 0,1‰ bis 0,81‰
- CEM I 52.5 HS Beton 0,12‰ bis 0,81‰
- HOZ Beton 0,065‰ bis 0,92‰
- CEM I 35.5 Nullbeton 0,75‰ bis 1,03‰

Für Prüfmörtel bezeichnet die ASTM-Richtlinie Beständigkeitskriterien in Abhängigkeit der Längenänderung nach 180 Tagen:

- < 0,5‰ als hoch sulfatbeständig
- < 1,0‰ als mittel sulfatbeständig

Umgerechnet für Beton sind diese Werte zu vermindern auf:

- < 0,275‰ für Hochsulfatbeständigkeit
- < 0,55‰ für Mittelsulfatbeständigkeit

Dabei ist der Zeitraum der Prüfung von 180 Tagen wenigstens auf ein volles Jahr zu verlängern.

### Veränderung der Druckfestigkeit

Der Sulfatgriff beeinflusst die Druckfestigkeit im Laufe der Zeit in unterschiedlichem Umfang. Qualitativ erfolgt zunächst meist ein Anstieg der Druckfestigkeit durch die Einlagerung von Ettringit oder Thaumasyt in den Poren des Betongefüges, das dadurch eine höhere Dichte erreicht. Der weitere Sulfatgriff führt in der Folge zu einer Steigerung der «Treibwirkung», verbunden mit dem Abfall der Druckfestigkeiten. Die Veränderung der Druckfestigkeiten durch den Sulfatgriff, im Verhältnis zu den Werten der jeweils gleichaltrigen, im Klimaraum gelagerten Betonproben, ist für den Portlandzementbeton in Bild 6 dargestellt.

### Veränderung der Zugfestigkeit

Der Sulfatgriff beeinträchtigt die Zugfestigkeit offenbar wesentlich mehr als die Druckfestigkeit. Die Veränderung der Zugfestigkeit durch den Sulfatgriff ge-



Bild 8.

Grad der Rissbildung nach Sulfatangriff verschiedener Zemente. HPC als CEM I zeigt deutliche Unterschiede in Abhängigkeit des Mikrosilicazuschlages

genüber den jeweiligen Schwesterproben, im Klimaraum gelagert, ist für den Portlandzementbeton in Bild 7 dargestellt.

Die Versuchsmischungen 5, 19, 20, 17 und 21 ergeben keine relevanten Werte, es handelt sich nur noch um einzelne Prüfergebnisse. Der Einfluss des Mikrosilicazuschlages ist trotzdem klar ersichtlich. In gewisser Weise fällt die Serie 73 beim hohen Sikacretezuschlag aus dem Rahmen.

### Rissebeurteilung im Dünnschliff mit und ohne Sulfateinfluss

Der Grad der Rissbildung im Dünnschliff aller untersuchten Probeserien ist in Bild 8 dargestellt.

Die eindeutige Wirkung des Mikrosilicazusatzes mit dem als Werkmischung zudosierten Superverflüssiger Sikacrete wird beim Beton mit hochwertigem Portlandzement augenfällig. Der Sulfacemzement-Beton (CEM I 52.5 HS) weist grundsätzlich ein geringeres Streumass auf als der CEM I 52.5-Beton, er muss aber generell als weniger gut eingestuft werden als der CEM I 52.5-Beton mit einem Mikrosilica-Zusatz von 8 bis 10%.

### Bewertung der Sulfatresistenz

Die Beurteilung der Sulfatresistenz der untersuchten Betonprobeserien stützt sich ab auf:

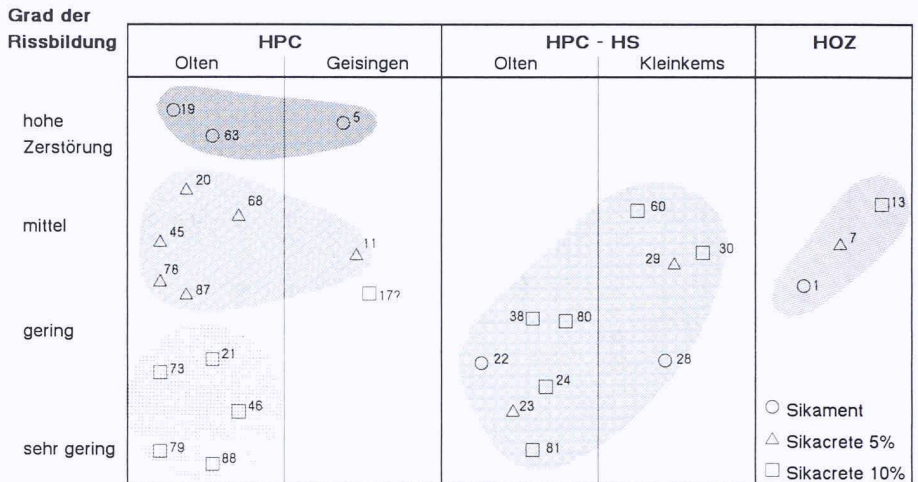
- Die visuelle Beurteilung der Probe-körper
- Die normalisierte Längenänderung
- Die Veränderung der Druckfestigkeit
- Die Veränderung der Zugfestigkeit
- Die visuelle Beurteilung der Dünn-schliffe
- Die Wasserleitfähigkeit

### Beton mit Portlandzement CEM I 52.5

Solche Betone weisen, unabhängig von der Mahlfeinheit des Zementes, auch in einer sehr guten Qualität hergestellt, nur eine bescheidene Sulfatresistenz auf. Diese Beurteilung stützt sich einerseits auf die grosse, normalisierte Längenänderung, andererseits auf den starken Abfall der Druck- und Zugfestigkeit und der zugehörigen Rissbildbeurteilung ab.

Durch den Mikrosilicazusatz mit dem angepassten Anteil an Superverflüssiger als Werkmischung bleiben die resultierenden normalisierten Längenänderungen sehr bescheiden, die prozentuale Veränderung der Druckfestigkeiten streut in einem ausserordentlich geringen Mass. Die Zugfestigkeit fällt gegenüber der Druckfestigkeit

Grad der  
Rissbildung



HPC deutliche Unterscheidung mit Mikrosilicazuschlag

HPC - HS keine klare Unterscheidung

HE als beschleunigende Zugabe führt zu grösserer Rissbildung

etwas mehr ab. Die Rissbildung mit dem Sikacretezuschlag von 10% bleibt sehr gering bis gering (Bilder 9 und 11). Die inzwischen rund vier Jahre der Sulfatbelastung ausgesetzten Prüfkörper analoger Zusammensetzung zeigen noch immer keine wesentlichen Verschlechterungen.

### Beton mit Sulfacemzement CEM I 52.5 HS (Portlandzement mit einem verminderten C<sub>3</sub>A-Gehalt)

Die normalisierten Längenänderungen dieser Betonmischungen zeigen mit Mikrosilicazusätzen eine gute Sulfatbeständigkeit. Die Veränderung der Druckfestigkeiten durch den Sulfatangriff zeigt eine grössere Streuung für die beiden Sikacrete-Dosierungen von 5% bzw. 10% des Zementgewichtes. Der Abfall der Zugfestigkeit ist beträchtlich, insbesondere fällt die grosse Streuung innerhalb der Prüferien negativ auf.

Die Rissbildung erreicht einen Grad von sehr gering bis gering (Bild 10). Sikacretezuschläge mit dem leicht beschleunigenden Verflüssiger HE<sub>3</sub> führen klar zu einer geringeren Sulfatresistenz. Offensichtlich spielt bei der sulfatbedingten Treibwirkung das Mineral Ettringit die grössere Rolle als das Mineral Thaumasit. Betonmischungen mit Zement CEM I HS dürfen nicht als hochsulfatresistent eingestuft werden.

### Beton mit Hochofenzementen HOZ

Die Betonproben mit Hochofenzementen als Bindemittel zeigen eine niedrige normalisierte Längenänderung. Die Erosion an der Oberfläche durch den Sulfatangriff nimmt erhebliche Ausmasse an. Der Abfall der Druck- und der Zugfestigkeit zeigt eine Verschlechterung durch den Mikrosilicazusatz. Der Puzzolaneffekt des

Hochofenzementes erreicht durch den Schlackenanteil selbst schon hohe Werte, eine zusätzliche Steigerung durch den Zusatz von Silicafume führt zur Verschlechterung der Betoneigenschaften.

### Vergleiche und Aussagerelevanz der Prüfungen

Weltweit werden meist Sulfatbeständigkeitsprüfungen an Zementpasten oder Zementmörteln ausgeführt. Vergleichende Versuche an Betonprüfkörpern sind offenbar sehr selten. Für die Beurteilung der vorliegenden Resultate wären im Hinblick auf die geforderte sehr lange Lebensdauer der Tunnelbauten solche Vergleiche von hohem Wert. In Tabelle 1 sind die unseres Erachtens wichtigsten Vergleichsreihen dargestellt:

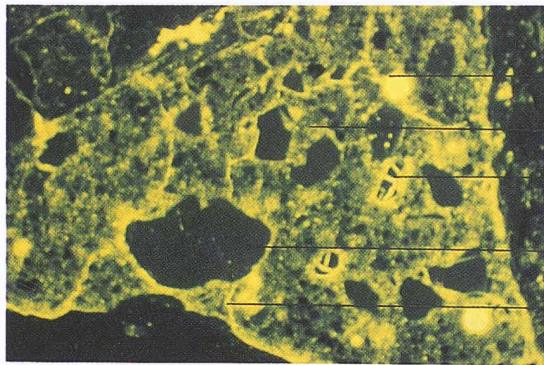
Direkte Vergleiche zwischen den Versuchsreihen bleiben vorerst problematisch wegen der grossen Variation der Betonzusammensetzungen, der unterschiedlichen Aggressivitäten der Prüflüssigkeiten und der ungleichen Expositionszeiten.

Die Versuchsreihe in den Alaunschiefern Oslos kann trotz der sehr langen Expositionszeit von rund 30 Jahren nur qualitativ die Aussage stützen, dass ein mikrosilicavergüteter Beton eine wesentlich gesteigerte Sulfatresistenz aufweise. Zum einen liegen keine vergleichbaren Messwerte vor, zum andern bleibt die tatsächliche Sulfatfracht unbekannt, bekannt ist nur eine gewisse Bandbreite der Sulfatbelastung mit einem oberen Grenzwert.

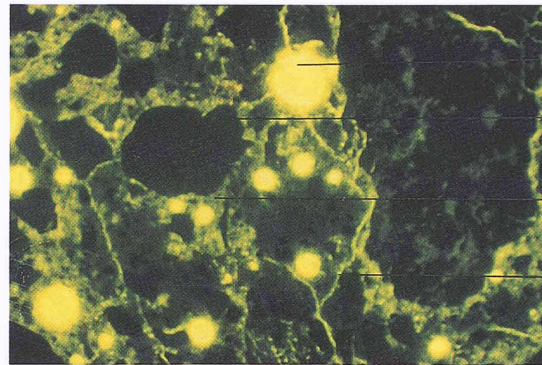
Der deutsche Versuch in Münster zeigt eine beachtliche Steigerung der Sulfatresistenz eines Portlandzementbetons durch Flugaschezusätze. Die Messreihen erlauben aber keine unmittelbaren Vergleiche.

Die englische Versuchsserie, mit den einerseits niedrigen, andererseits sehr hohen

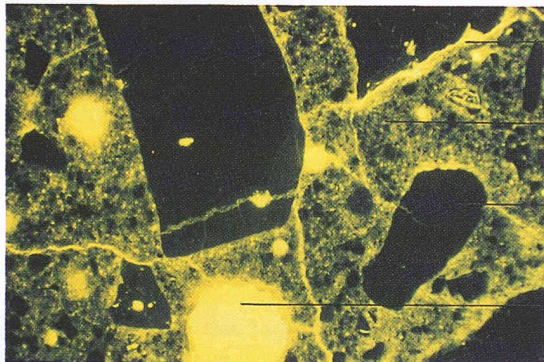




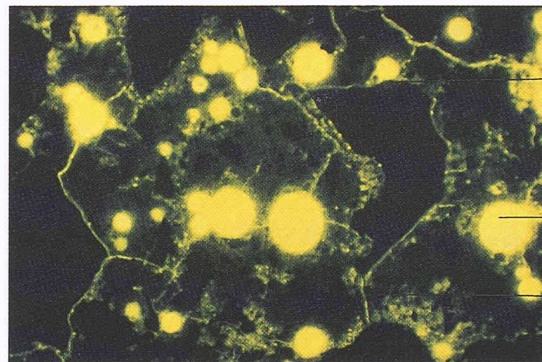
- Makropore
- Zementstein
- event. Zusatzstoff
- Zuschlag
- Riss



- Makropore
- Zuschlag
- Zementstein
- Riss



- Riss
- Zementstein
- Zuschlag
- Makropore



- Zuschlag
- Makropore
- Riss

Bild 9.  
Dünnschliffe mit Rissbild, Beton CEM I 52.5 und Mikrosilica (HPC Olten + 10% Sikacrete CE), oben nach Feuchtraumlagerung, unten nach Sulfatangriff, Foto LPM

Bild 10.  
Dünnschliffe mit Rissbild Beton CEM I 52.5 HS und Mikrosilica (HPC-HS Olten + 10% Sikacrete), oben nach Feuchtraumlagerung, unten nach Sulfatangriff, Foto LPM

Sulfatbelastungen stützt die Annahme, dass ein stark gesteigerter Sulfatangriff durch hohe Konzentrationen einen beachtlichen Zeitraffereffekt bewirkt. Die ausgewogensten Vergleiche ergeben die Versuche in

England mit denjenigen der SBB. Die Versuchsreihe der SBB, mit dem sehr stark gesteigerten Sulfatangriff (50 000 mg Natriumsulfat und 10 000 mg Magnesiumsulfat) zeigt auf eindruckliche Weise die Qualitäts-

unterschiede in der Sulfatresistenz der verschiedenen Betonmischungen. Ein Bezug zur Langzeitwirkung bleibt vorerst unmöglich, selbst in Anlehnung an die ASTM-Richtlinien.

Die englische Versuchsreihe weist nun den Weg von der sehr hohen, gesteigerten Sulfatbelastung mit 35 000 mg zu einer in situ möglichen Belastung mit 3500 mg. Für unsere meisten bekannten Verhältnisse entspricht der tiefere Wert im allgemeinen einer als hoch einzustufenden Sulfatbelastung.

Mit dieser Erkenntnis darf die Ableitung gewagt werden, dass Betone der SBB-Reihe mit einer Längenänderung von max. 0,25%, bei einer Prüfdauer von 90 bis 100 Wochen und in Anlehnung an ASTM, über die notwendige Sulfatresistenz verfügen, um als Bauteil im natürlich anfallenden Bergwasser über die geforderte Zeitspanne zu bestehen.

Die Versuchsreihe verdeutlicht aber auch, dass der Zusatz von Mikrosilica zu einer guten Grundmischung keineswegs genügt, um eine hohe Sulfatresistenz zu erzielen. Für hohe Resistenz sind besonders hervorzuheben:

- Das Betongefüge soll sehr dicht sein
- Der W/Z- Faktor soll < 0,45 sein
- Mikrosilica, im Umfang von 8 bis 10% muss mit einem abgestimmten, hochqualitativen Superverflüssiger zugegeben wer-

Betonversuch	Oslo	Münster	England	SBB
Zemente:	* PC * ASTM Typ V * Dänischer sulfat-resistenter Zement	* PC	* PC * PC-HS	* HPC * HPC-HS * HOZ
Zusatzstoffe:	Mikrosilica zu PC	Flugasche (EFA) zu PC	div. Schlacken als Kies	Mikrosilica, Super-verflüssiger
W/Z - Faktor	PC-0.5 / PC+Silica-0.6	PC-0.48 / PC+FA-0.43-0.49	0.6 ?	0.35 - 0.6
Belastung : * Sulfate * Chloride * pH-Wert	bis 4000 mg/l keine neutral - 2.8	1340 mg/l 61 mg/l 11	je als Na + Mg 3500-35000 mg/l keine ?	Na- und Mg-Sulfate 50000 + 10000 mg/l keine 8-9
Expositionszeit	30 Jahre	5 1/2 Jahre	3 Mte - 22 Jahre	ca. 2 Jahre
Messungen	Volumenreduktion	Gewichtsverlust REM E-Modul	Druckfestigkeit	Längenänderung Festigkeitsverlust Dünnschliffe
Prüfkörpergrösse	10 / 10 / 40 cm	10 / 15 / 35 cm	10 / 10 / 10 cm	5 / 5 / 13 cm geschnitten aus 20/20/20

Tabelle 1.  
Vergleichsreihen verschiedener Versuchsorte





Bild 11.  
Betonprobekörper CEM I 52.5 + 10% Mikrosilica Sikacrete  
CE nach 96 Wochen Sulfatlagerung, ohne sichtbare Schäden



Bild 12.  
Betonprobekörper HOZ L-NW/HS 70% + Verflüssiger, nach  
111 Wochen Sulfatlagerung mit starker Oberflächenerosion

den. Ohne solche abgestimmte Verflüssiger ist das Ziel nicht zu erreichen.

Diese Aussagen gelten für entsprechend hergestellte Ortbetongewölbe und im besonderen Masse für Tübbinge, sei dies für ganze Ringe oder auch nur für Sohl-tübbinge. Eine gute Qualitätslenkung bleibt Vorbedingung für den Erfolg.

Spritzbetonschalen lassen sich aber nicht in gleicher Dichte und Gleichmässigkeit herstellen. Sie können deswegen naturgemäss den aggressiven Bergwässern keinen gleichwertigen Widerstand entgegensetzen.

Versuchsreihen mit Probekörpern aus Spritzbetonschalen würden die offenen Fragen klären helfen. Voraussetzung dafür bleibt aber, dass die Probekörper an vielen beliebigen Stellen einer Spritzbetonschale aus einem Vortrieb entnommen werden. Laborproben erbringen zu günstige Werte.

### Äussere Schutzmassnahmen

Mit den dargestellten Massnahmen der Betontechnologie wird eine vertretbare und mit einfachen Mitteln realisierbare

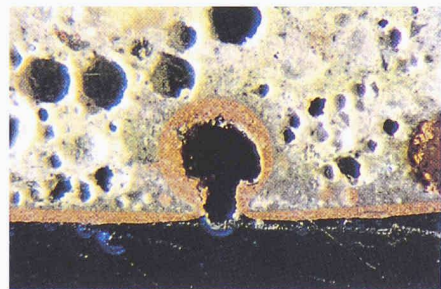


Bild 13.  
Querschnitt durch einen Beton mit einem  
einfachen Anstrich, aufgetragen auf noch sehr  
warmen Beton. Der Schutzfilm dringt in die  
offenen Lunker ein

Qualität sichergestellt. Die Vergleiche mit den ausländischen Versuchsreihen lassen nach menschlichem Ermessen eine Prognose der genügenden Gebrauchsfähigkeit über die Zeitspanne des formulierten Nutzungszieles von 100 Jahren zu.

Wenn es gelänge, mit einfachen Mitteln und damit vernünftigen Kosten, Fertigteile wie Tübbinge und Kanalelemente äusserlich mit einer ersten Sperre zu versehen, ergäbe sich eine beträchtliche Steigerung der Sicherheit, insbesondere für Zonen mit einem Bergwasseranfall als Kombination von Sulfaten und Chloriden, die auf die Dauer eine Gefahr für die Spreizkraftbe- wehrung in den Tübbinggelenken bilden könnten.

Durch die Behandlung der Betonoberflächen mit Imprägnierungen oder Anstrichen lässt sich eine solche äussere «Schutzhaut» aufbauen, die zwar kaum gänzlich dicht sein wird, jedoch die korrosiven Angriffe des Bergwassers über lange Zeit abzuweisen vermöchte und gleichzeitig sowohl die absolut notwendige Nachbehandlung eines Betons mit Silicafumezusätzen sicherstellte als auch eine Karbonatisierungssperre ergäbe.

Geprüft wurde die Schutzwirkung einer auf noch warme Betonelemente auf- gebrachten Epoxi-Beschichtung (Sikagard 65 W). Diese Beschichtung zeigt erstaunlich gute physikalische Eigenschaften und einen in keiner Weise erwarteten hohen Wirkungsgrad gegen den chemischen Angriff.

Eine solche Beschichtung der Tübbinge kann aber keinesfalls ungenügende betontechnologische Voraussetzungen verbessern oder Bauteile mit ungenügender Betongüte in hochkorrosionsbeständige Bauwerke verwandeln. Es geht vielmehr darum, im ungenügend bekannten Spannungsfeld der Langzeitwirkung (30 Jahre

Erfahrung liegen mit Beton im Sulfatangriff vor) eine zusätzliche Sicherheit einzubauen. Besonders angezeigt sind solche Beschichtungen in Zonen des kombinierten Angriffes Sulfate - Chloride.

Die Betonvergütung mit Mikrosilica- zusätzen wirkt nur dann, wenn während der Phase der Aushärtung eine genügende Betonnachbehandlung sichergestellt wird. Durch einen einfachen Anstrich mit dem erwähnten Epoxidharz lässt sich diese Forderung mit recht geringem Aufwand erfüllen. Der Anstrich ergibt einen erstaunlich dichten, gut haftenden, abrasionsfesten Film gegen die Sulfat- und Chloridwasser als auch gegen weiche Wässer. Das Eindringen in die Poren entsprechend Bild 13 entsteht nur, wenn der Anstrich auf den noch sehr warmen Beton erfolgt.

Die von den SBB formulierten Nutzungsziele einer hundertjährigen Betriebszeit, ohne Erneuerungsarbeiten durchzuführen zu müssen, dürften auf der Grundlage der widerstandsfähigen Betonmischungen, verbunden mit der vorgeschlagenen Beschichtung, realistisch sein.

Adresse des Verfassers:

Leonhard R. Schmid, dipl. Ing. ETH/SIA, smh  
Tunnelbau AG, 8640 Rapperswil

### Literatur

FIP, State of art report, 1988: Condensed silica fume in concrete

Scholz, Werner; Scholz, Hans: Dauerhaftigkeit von Beton, Tiefbau, Ingenieurbau, Strassenbau

Gutt, W.H.; Russel, A.D.: Blastfurnance slag as coarse aggregate for concrete stored in sulphat solutions for 22 years, Magazine of Concrete Research, 1989, 41

Osborne, G.J.: The sulphat resistance of portland and blastfurnance slag cement concrete, Building Research Establishment, 1990

Krenkler, K.: Chemie des Bauwesens, Springer Verlag, 1980