

Betonschäden durch den Angriff von Sulfationen

Autor(en): **Hermann, Kurt**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Cementbulletin**

Band (Jahr): **60-61 (1992-1993)**

Heft 4

PDF erstellt am: **11.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-153767>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

CEMENTBULLETIN

APRIL 1992

JAHRGANG 60

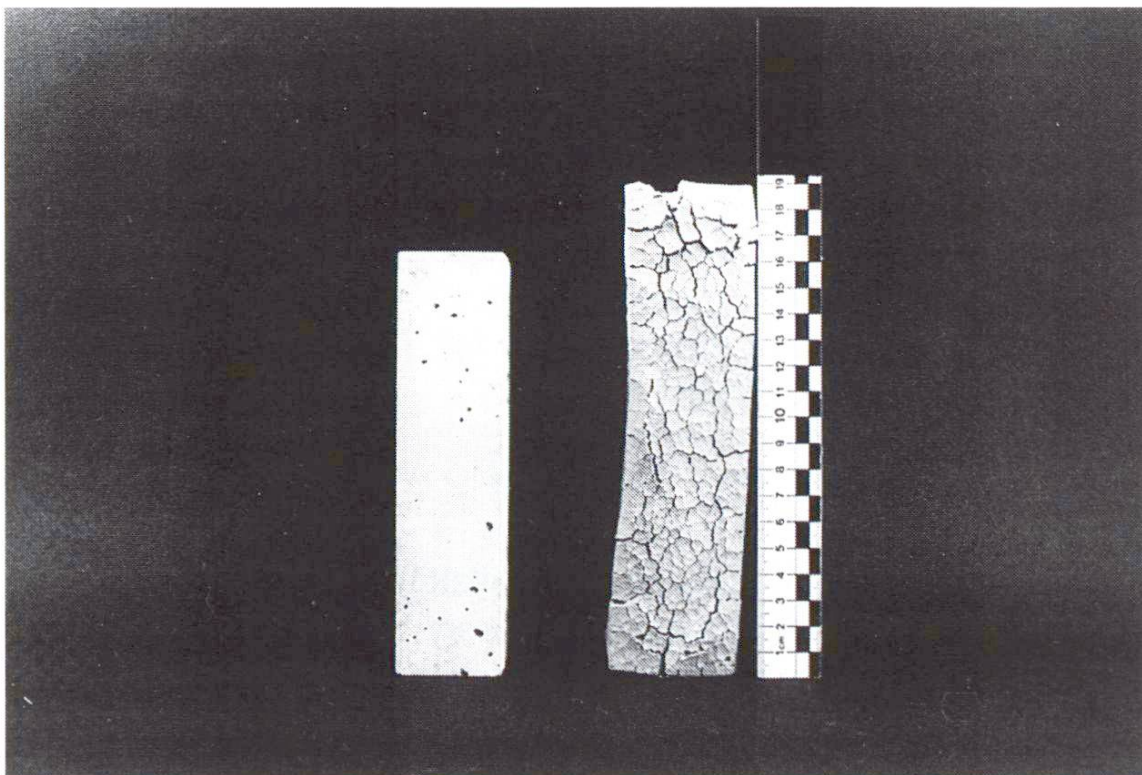
NUMMER 4

Betonschäden durch den Angriff von Sulfationen

Sulfatangriff auf Beton: Ursachen, Auswirkungen, Vorkehrungen zur Abwehr. Portlandzemente mit hoher Sulfatbeständigkeit.

Portlandzement mit hoher Sulfatbeständigkeit (PCHS) ist im «Cementbulletin» bereits in den Jahren 1958 [1] und 1978 [2] behandelt worden. In der Zwischenzeit sind zahlreiche Publikationen über den Mechanismus des Angriffes von Sulfaten auf Portlandzement (PC) erschienen. Auch die vielen neueren Untersuchungen über

Mörtelprismen aus PCHS (rechts) und PC (links) nach längerer Lagerung in einer Lösung mit hohem Sulfatgehalt: Das Sulfattreiben ist nur beim Prisma aus PC zu beobachten. (Foto: TFB)



2 Massnahmen zur Verhinderung der Zerstörung von Bauwerken in sulfatbelasteter Umgebung und die Einführung eines neuen hochwertigen Portlandzements mit hoher Sulfatbeständigkeit (HPCHS) rechtfertigen es aber, dieses Thema erneut aufzugreifen und in einem etwas grösseren Rahmen zu behandeln. Das vor kurzem in der Weströhre des Bözbergtunnels der N3 aufgetretene stark chlorid- und sulfathaltige Bergwasser [3] gibt dem Thema zusätzliche Aktualität.

Sulfatschäden

Sulfate kommen in der Natur in fester Form (Gips, Anhydrit, Ettringit), gelöst in Niederschlägen, Oberflächen- und Grundwässern sowie im Boden vor. Die Konzentrationen sind sehr unterschiedlich. So werden im Nordseewasser etwa 2800 mg Sulfat/l gemessen, und Mineralwässer können in Einzelfällen über 1500 mg Sulfat/l enthalten. In der Schweiz ist vor allem mit Schäden durch Wässer zu rechnen, die gipsreiche Schichten durchfliessen und dabei Sulfationen anreichern. Bei Sondierbohrungen für den Tunnel Mont Terri der N16 stiess man beispielsweise auf Wasser mit einer Sulfatkonzentration über 1200 mg/l [4].

Betonschäden durch den Angriff von in Wasser gelösten Sulfationen wurden schon vor über 100 Jahren, unter anderem durch *Michaelis* [5], beobachtet. Sie äussern sich je nach Stärke durch

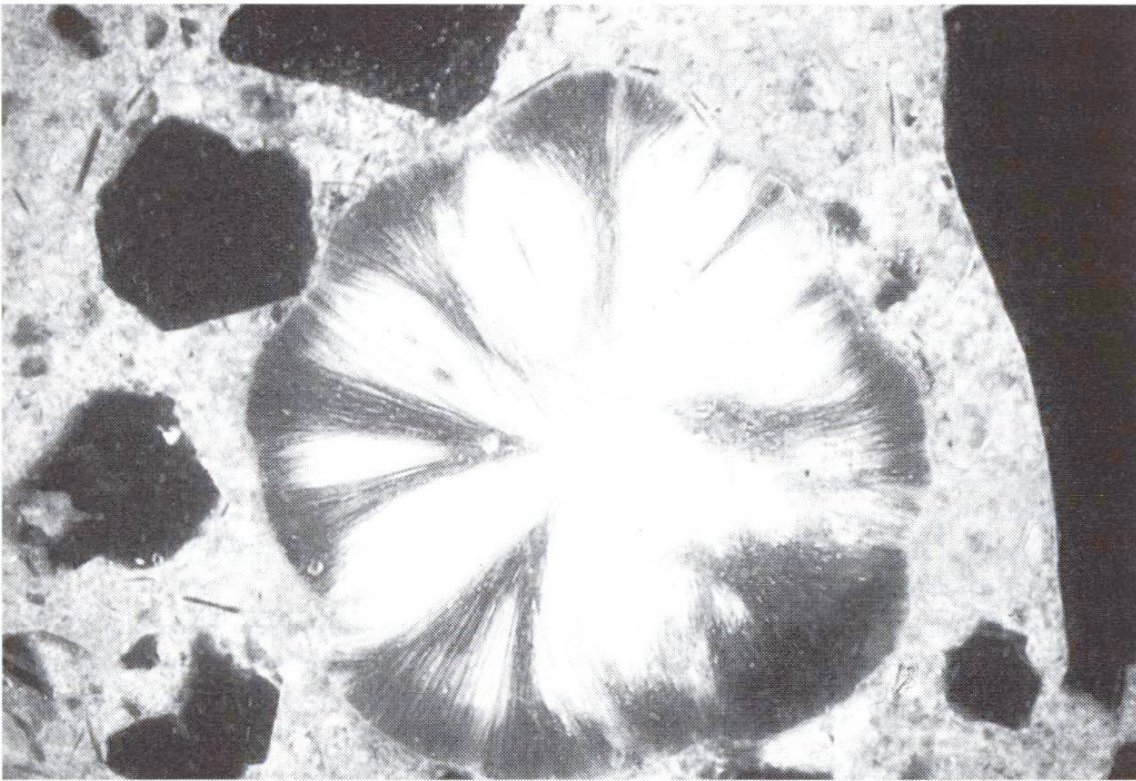
- Verformungen (Dehnungen, Verkrümmungen);
- Risse;
- Abplatzungen;
- völlige Zerstörung des Betons.

Das Ausmass eines Sulfatangriffs hängt sehr stark von der Konzentration ab (*Tabelle 1*).

<i>Angriffsgrad</i>	<i>Sulfatkonzentration in Wässern</i>	<i>Sulfatkonzentration im Boden</i>
schwach angreifend	200 bis 600 mg/l	2000 bis 5000 mg/kg
stark angreifend	600 bis 3000 mg/l	über 5000 mg/kg
sehr stark angreifend	über 3000 mg/l	–

Tab. 1. Abhängigkeit der Stärke des Sulfatangriffs von der Konzentration gemäss DIN 4030.

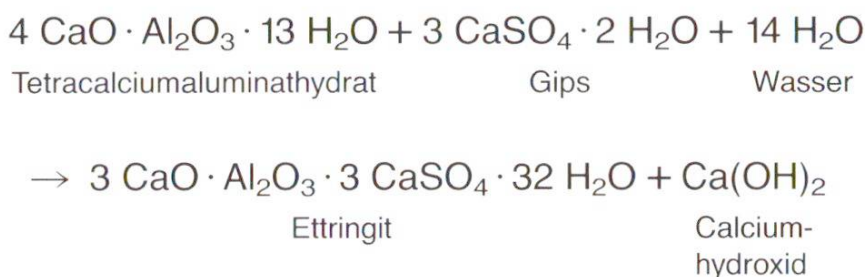
Die Ursachen dieses sogenannten «Sulfattreibens» sind noch lange nicht bis ins letzte Detail geklärt. Es liessen sich viele Publikationen zitieren, in denen kontroverse Standpunkte eingenommen werden. Als Informationsquelle können beispielsweise die Hinweise von *Cohen* und *Mather* [6] dienen, die sich auch kritisch mit den vorhan-



Mit Ettringit gefüllter Hohlraum in carbonatisiertem Zementstein (Aufnahme unter Fluoreszenzlicht, Ausschnittgrösse 0,72 × 1,08 mm). (Foto: TFB, Vernier)

denen Möglichkeiten zur Bestimmung der Sulfatbeständigkeit von Beton auseinandergesetzt haben.

Als gesichert darf angenommen werden, dass die Bildung von Ettringit aus Aluminathydraten, die bei der Hydratation von Tricalciumaluminat (C_3A , $3 CaO \cdot Al_2O_3$) entstehen, oft den Hauptanteil an der zerstörenden Wirkung hat. Der Angriff von in Wasser gelöstem Gips lässt sich vereinfacht folgendermassen formulieren:



Die Entstehung von Ettringit, der zu den wasserreichsten Mineralien gehört, ist mit einer achtfachen Volumenzunahme verbunden. Die nadelförmigen Kristalle wachsen in den Porenraum hinein. Sobald das freie Kristallwachstum nicht mehr möglich ist, baut sich ein Druck auf, der zur Dehnung und schliesslich zur Sprengung des Betongefüges führt. Zu berücksichtigen ist zudem, dass Sulfationen mit dem Calciumhydroxid im Beton reagieren können, wobei sich Calciumsulfatdihydrat, also Gips, bildet. Auch diese Reaktion ist gelegentlich mit einer derart starken Volumenzunahme verbunden, dass der Zementstein springt [7].

- 4 Seit einigen Jahren werden Schäden durch Bildung von Thaumasit beobachtet. Beispielsweise konnte er in der weichen, breiigen Masse einer Spritzbetonprobe aus dem Dettenbergtunnel zusammen mit Ettringit eindeutig nachgewiesen werden [8]. Seine Formel lautet:



Thaumasit, dem ebenfalls eine betonschädigende Wirkung zugeschrieben wird, ist wie Ettringit ein Mineral mit niedriger Dichte. Der Mechanismus seiner Bildung ist noch unklar.

Portlandzement mit erhöhter Sulfatbeständigkeit

Unbestritten ist, dass die Bildung von Ettringit und damit das Sulfatreiben durch einen möglichst tiefen C_3A -Gehalt im Zement unterbunden oder doch sehr stark verlangsamt werden kann. Portlandzement mit hoher Sulfatbeständigkeit (PCHS) wird in der Schweiz seit 1958 produziert. Er ist unter den Markennamen Sulfacem (Portlandzementwerk AG Olten, Olten) und Sulfix (SCB Société des Ciments et Bétons, Eclépens) erhältlich. PCHS ist etwas dunkler als Portlandzement (PC); das Verhalten der beiden Zementsorten ist ähnlich. PCHS kann mit PC gemischt werden, er verliert dabei allerdings seine besondere Eigenschaft der hohen Sulfatbeständigkeit.

In der Norm SIA 215 ist festgelegt, dass PCHS maximal 3 % C_3A enthalten darf; der C_3A -Gehalt von PC und hochwertigem Portlandzement (HPC) beträgt 7 bis 12 %. Abgesehen davon sind für PCHS die gleichen Gütewerte wie für PC vorgeschrieben.

Zerstörung von Beton durch Thaumasitbildung im Rothornstollen der Transitgasleitung Holland-Italien. (Foto: TFB)



5 Unter ungünstigen Bedingungen wirken bereits Konzentrationen von 200 mg Sulfat/l zerstörend auf Beton. Der Einsatz von PCHS wird dann empfohlen, wenn mit Sulfationenkonzentration von 400 mg/l oder mehr zu rechnen ist. (Sulfatbestimmungen führen die TFB, die kantonalen und weitere analytische Labors durch.)

Beim Erstellen von Bauwerken in sulfatgefährdeter Umgebung genügt es nicht, PC durch PCHS zu ersetzen. Jede Massnahme, die die Eigenschaften des Betons verbessert, ist nützlich:

- Eine hohe Zementdosierung, beispielsweise 300–350 kg/m³, führt zu einer hohen Gefügedichte.
- Bei PCHS soll ein wasserdichter Beton verlangt werden. Dies bedeutet, dass der W/Z-Wert $\leq 0,50$ sein soll.
- Zusatzmittel wie Verflüssiger und Luftporenbildner sind ebenfalls hilfreich. Sie ermöglichen eine gute Verarbeitbarkeit und erniedrigen die Permeabilität.
- Der in die Schalung eingebrachte Beton soll möglichst gut verdichtet werden.
- Unerlässlich ist auch eine sorgfältige Nachbehandlung.

Zu beachten ist ausserdem, dass die Wärmeentwicklung von Beton mit PCHS in den ersten Tagen geringer ist als bei Beton mit PC (langsamere Festigkeitsentwicklung). Besonders bei tiefen Temperaturen müssen deshalb die Ausschalfristen länger angesetzt werden als bei PC.

Bei Spritzbeton genügt es nicht, PCHS einzusetzen, um einen sulfatbeständigen Beton zu erhalten. Die meisten verwendeten Erstarungsbeschleuniger sind nämlich Aluminate, die mit dem Zement zu Calciumaluminathydraten reagieren können, deren Bildung man durch den geringen C₃A-Gehalt im Zement unterbinden will. Nach *Lukas* [9] soll das Produkt aus dem Al₂O₃-Gehalt des Erstarungsbeschleunigers und dessen Dosierhöhe $< 0,6\%$ sein, wenn der Zement $< 1\%$ C₃A enthält. Daneben gilt auch hier, dass ein möglichst dichter Zement – beispielsweise durch die Verwendung von Microsilica – die Sulfatbeständigkeit erhöht.

Sulfacem Spezial und Sulfix-HR, hochwertige Portlandzemente mit hoher Sulfatbeständigkeit (HPCHS), sind seit 1990 auf dem Markt. Sie unterscheiden sich von den entsprechenden PCHS durch ihre grösseren Feinheit (Blainewerte $> 4000 \text{ cm}^2/\text{g}$). Es gelten die in der Norm SIA 215 für HPC festgelegten Gütewerte.

Sowohl beim Bözbergtunnel der N3 [10] als auch beim Tunnel Mont Russelin der N16 [11] hat man sich bei der Tübbingherstellung – mindestens teilweise – zum Einsatz von HPCHS entschieden. Diese erfordert nämlich einen Beton, der relativ schnell eine hohe Frühfestigkeit erreicht, was mit PCHS nicht möglich ist. Nach *Brugger* [10] konnten bei den dampferhärteten Stahlbetontübbings aus Beton

- 6 B 45/35 (HPCHS bzw. HPC 325 kg/m^3) 28-Tage-Bohrkern-Druckfestigkeiten von 52 bzw. 56 N/mm^2 (Durchschnittswerte über den Querschnitt) erreicht werden.

Weitere sulfatbeständige Zemente

Der teilweise Ersatz von PC durch silikatreiche Bindemittel wie Hüttenzemente, Flugasche oder Microsilica führt ebenfalls zu Beton mit erhöhter Sulfatbeständigkeit. Belegt wird dies beispielsweise durch Versuche, die im Grundwasser eines Alaunschiefergebiets (bis zu $5 \text{ g SO}_3/\text{l}$, $\text{pH} 2,8$) durchgeführt wurden: Betonproben aus PCHS und aus einem mit 15 % Microsilica vergüteten Zement zeigten nach einer 30 Jahre dauernden Sulfatbelastung die gleichen Resultate [12].

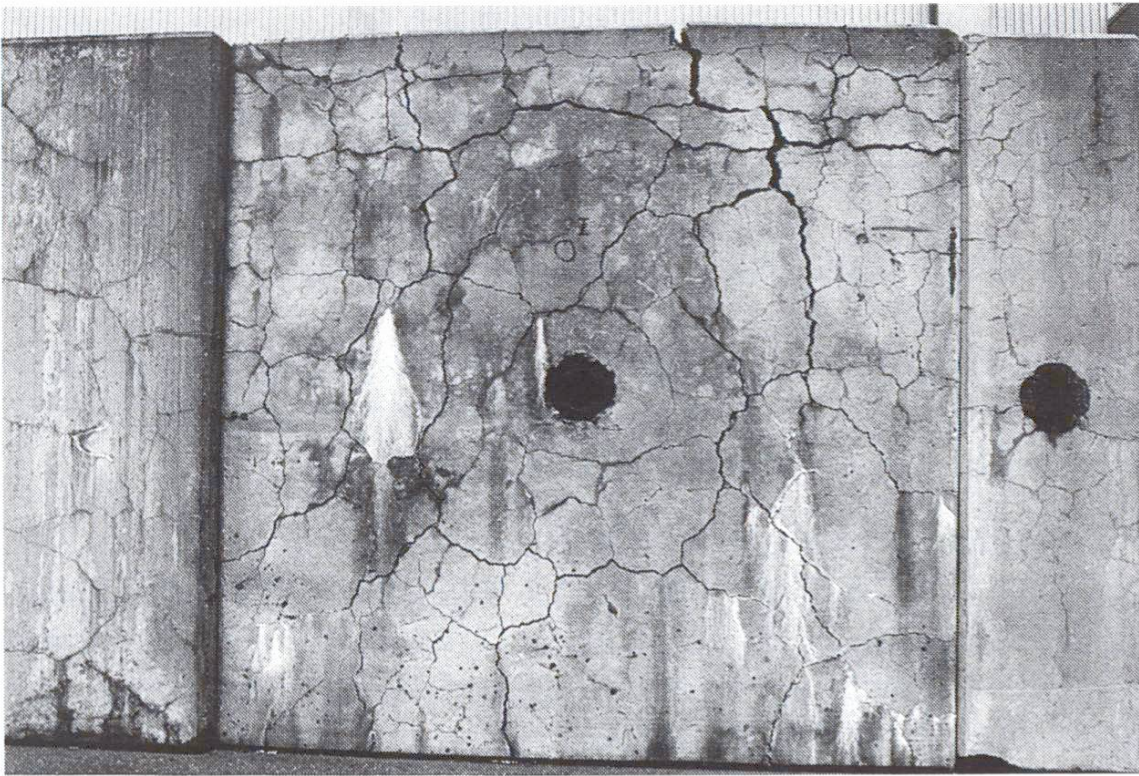
Hochofenzemente mit einem Anteil von 70 Gew.-% aluminiumoxidreichem Hüttsand gelten in Deutschland als Zemente mit hohem Sulfatwiderstand. Versuche, die gleichzeitig an sechs Labors durchgeführt wurden, haben ergeben, dass bereits 65 Gew.-% Hüttsand (18,7 % Aluminiumoxid) zusammen mit 35 Gew.-% PC (11,0 % C_3A) einen Zement mit erhöhter Sulfatbeständigkeit ergeben [13].

Sulfatreiben nach Wärmebehandlung

Verschiedentlich wurde in jüngster Zeit Sulfatreiben ohne äussere Zufuhr von Sulfationen beobachtet. Gemeinsam ist in allen Fällen, dass die betroffenen Teile unmittelbar nach der Herstellung einer intensiven Wärmebehandlung unterworfen wurden und nach dem Einbau ausgiebig mit Wasser in Berührung kamen. *Sylla* [14] und *Neck* [15] haben sich ausführlich mit diesem Phänomen befasst und mögliche Erklärungen dafür gegeben:

Portlandzemente enthalten bereits Sulfationen. Zur Steuerung der Abbindereaktion wird nämlich Gips, teilentwässertes Gips (Halbhydrat, $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5 \text{ H}_2\text{O}$) oder Anhydrit (CaSO_4) zugefügt. (Gemäss Norm SIA 215 beträgt der maximale SO_3 -Gehalt 3,5 % für PC und PCHS sowie 4,0 % für HPC.) Nach der Zugabe von Wasser reagiert ein Teil des C_3A mit den Sulfatträgern entweder zu Ettringit, zu sogenanntem «Monosulfat» ($3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12 \text{ H}_2\text{O}$) oder zu beidem. In dieser Phase ist der Beton noch plastisch. Die Ettringitbildung ist nicht schädigend; sie trägt im Gegenteil zur Festigkeit bei.

Es wird angenommen, dass bei der intensiven Wärmebehandlung die stabile Einbindung von Sulfat in den Zementstein behindert wird. Wahrscheinlich wandelt sich vorhandener Ettringit in Monosulfat um. Zudem treten durch das Austrocknen des Betons verstärkt feine Risse und Spalten auf, die das Eindringen von Wasser erleichtern. Die Folge davon sind Gefügestörungen, die zu Festigkeitsverlusten führen. Untersuchungen zeigen, dass Sekundärphasen aus Ettrin-



Bei der Lagerung im Freien traten bei diesem Zementblock nach einigen Monaten gravierende Schäden auf. Diese sind auf das Eindringen von Wasser zurückzuführen, das im unsachgemäß wärmebehandelten Beton ein Sulfattreiben auslöste. (Foto: PSI)

git-, Thaumasit- oder Mischkristallen der beiden Mineralien, die für das Sulfattreiben verantwortlich sind, bevorzugt in den Kontaktzonen zwischen Zementstein und Zuschlagoberflächen auftreten.

Die Wärmebehandlung von Betonteilen zwecks Beschleunigung des Abbindens ist durchaus möglich. Neck [15] empfiehlt, dass sie aber erst nach einer Vorlagerungszeit von 3 Std. (Temperatur maximal 30 °C) erfolgen und 65 °C nicht übersteigen soll. In diesem Fall läuft die Sulfatbindung weitgehend normal ab, und im erhärteten Beton sind keine Gefügestörungen feststellbar.

Kurt Hermann

8 Literatur

- [1] «Portlandcemente mit erhöhter Sulfatbeständigkeit», Cementbulletin **26** [11] (1958).
- [2] *Koelliker, E.*, «Portlandzement mit hoher Sulfatbeständigkeit (PCHS)», Cementbulletin **46** [5] (1978).
- [3] «N3-Tunnel erhält zusätzliche Abdichtungen», Schweizer Baublatt **102** [103/104], 61 (1991).
- [4] *de Montmollin, M.*, «Bau des Tunnels Mont Terri durch die jurassischen Mergel», Tagungsbericht zum Europäischen Symposium für Tunnelbau vom 5. Februar 1992 in Olten, Seiten 27–35.
- [5] *Michaelis, W.*, «Der Cement-Bacillus», Thonindustrie-Zeitung **16**, 105–106 (1892).
- [6] *Cohen, M. D.*, und *Mather, B.*, «Sulfate Attack on Concrete – Research Needs», ACI Materials Journal **88** [1], 62–69 (1991).
- [7] *Kollo, H.*, «Sulfatwiderstand – Ein Aspekt der Dauerhaftigkeit von Beton», Beton-Informationen **30** [1], 8–11 (1991).
- [8] *Schwander, H.W.* und *Stern, W.B.*, «Zur experimentellen Erzeugung von Umwandlungsprodukten an Oberflächen von Zementstein», Zement-Kalk-Gips **41** [1], 48–53 (1988).
- [9] *Lukas, W.*, «Spritzbeton: Fehler, Mängel und Schäden; betontechnische Ursachen», Tagungsbericht zum Spritzbeton-Kolloquium vom 27. September 1991 in Wildeg, Seiten 19–35.
- [10] *Brugger, M.*, «Beton-Nachbehandlung», Schweizer Ingenieur und Architekt **109** [44], 1037–1039 (1991).
- [11] *Luterbacher, W.*, «Entwicklung und Fabrikation von Tübbingbeton auf der Baustelle Mont Russelin (N 16)», Tagungsbericht zum Europäischen Symposium für Tunnelbau vom 5. Februar 1992 in Olten, Seiten 36–43.
- [12] *Scherer, J.*, «Microsilica als Zusatzstoff für Beton im Untertagebau», Unterlagen zum Wildegger Kurs «Beton im Untertagebau» vom 14./15. Mai 1991.
- [13] «Hochofenzement mit hohem Sulfatwiderstand», Beton **30** [12], 459–462 (1980).
- [14] *Sylla, H.-M.*, «Reaktionen im Zementstein durch Wärmebehandlung», Beton **38** [11], 449–454 (1988).
- [15] *Neck, U.*, «Auswirkungen der Wärmebehandlung auf Festigkeit und Dauerhaftigkeit von Beton», Beton **38** [12], 488–493 (1988).