

Sulfatschäden an Betonen : Entstehung und Verhinderung

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

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Cementbulletin**

Band (Jahr): **69 (2001)**

Heft 10

PDF erstellt am: **01.05.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-153875>

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.

Sulfatschäden an Betonen: Entstehung und Verhinderung

Der Sulfatangriff auf Betone besteht aus einem komplexen Zusammenspiel chemischer und physikalischer Prozesse; er kann nicht durch einen einzelnen Mechanismus charakterisiert werden [1].

Die Sulfatbeständigkeit von Betonen ist ein altes Thema. Durch die Tunnelbauten im Rahmen von AlpTransit hat sie jedoch stark an Bedeutung gewonnen.

Was in den Normen steht

Bei Diskussionen über die Sulfatbeständigkeit von Betonen wurde früher in der Schweiz in Ermangelung eigener Normen auf die deutsche DIN 4030 [2] zurückgegriffen. Mit der Einführung der bereits genehmigten Norm EN 206-1 ab dem 1. Januar 2003 wird auch in der Schweiz ein gültiges Regelwerk vorhanden sein.

In der Norm EN 206-1 [3] werden die Umwelteinflüsse durch Expositionsklassen beschrieben. Böden und Grundwässer werden je nach Sulfatgehalt einer der Expositionsklassen XA1, XA2 oder XA3 zugeordnet. Zu den Expositionsklassen gehören bestimmte empfohlene Grenzwerte. Eine Auswahl davon ist in *Tabelle 1* zusammengestellt.

Erfahrungsgemäss weisen Betone einen ausreichenden Sulfatwiderstand auf, wenn sie die folgenden Anforderungen erfüllen:

- dichter Beton (W/Z-Wert < 0,50) für XA1
- dichter Beton (W/Z-Wert < 0,50) sowie Zement mit hohem Sulfatwiderstand für XA2
- Beton mit W/Z-Wert < 0,40 sowie Zement mit hohem Sulfatwiderstand für XA3; teilweise ist zudem ein äusserer Schutz des Betons notwendig.

Gemäss dem nationalen Vorwort zur SN EN 197-1 (2000), die ab 1. Januar 2002 gelten wird, sind die folgenden Zemente sulfatbeständig:

- CEM I mit maximal 3 M.-% C_3A (Tricalciumaluminat, $3 CaO \cdot Al_2O_3$).
- CEM II B und CEM III C.

Sulfatquellen

Sulfate können im Grundwasser als Natrium-, Kalium-, Magnesium- oder Calciumsulfat vorliegen. Andere Sulfatquellen sind Gülle und Industrieabwässer.

Bergwässer enthalten je nach durchfahrener Gebirgsformation sehr unterschiedliche Sulfatmengen. So wurden in zwei Bereichen des Nordteils des Vereinatunnels (Aroser Schuppenzone, Schaflägerzug) Wässer mit teilweise hohen Sulfatkonzentrationen (> 1550 mg/l, ca. 800 mg/l) gefunden, während im Südteil Sulfatgehalte unter 50 mg/l gemessen wurden [4].

Entstehung von Sulfatschäden

Die Entstehung von Sulfatschäden ist seit Jahren Ursache von Kontroversen. Neben Fakten gibt es auch viele Spekulationen. Grundsätzlich kann unterschieden werden zwischen

- externen Angriffen durch eindringende Sulfate aus Böden und Grundwässern sowie
 - internen Angriffen durch die so genannte verzögerte Ettringitbildung (delayed ettringite formation).
- Im Folgenden werden vor allem externe Sulfatangriffe betrachtet. Die daraus resultierenden Schäden kön-

	XA1	XA2	XA3
Umgebung	Chemisch schwach angreifende Umgebung	Chemisch mässig angreifende Umgebung	Chemisch stark angreifende Umgebung
SO_4^{2-} im Grundwasser	200 und < 600 mg/l	600 und < 3000 mg/l	3000 und < 6000 mg/l
SO_4^{2-} im Boden	2000 mg/kg und < 3000 mg/kg	3000 mg/kg und < 12 000 mg/kg	12 000 mg/kg und < 24 000 mg/kg

Tab. 1 Empfohlene Grenzwerte für die Expositionsklassen bei Sulfatangriff durch natürliche Böden und Grundwasser nach der zukünftigen EN-206-1:2000 (vereinfacht) [3].

nen die Folge der Bildung expansiver Stoffe (Ettringit, Gips, siehe Kasten «Ein wenig Chemie») oder der Auflösung des CSH-Gels, des wichtigsten Bestandteils des Zementsteins, sein.

Allerdings lassen sich Sulfatschäden meistens nicht auf eine Ursache allein zurückführen. Vielmehr laufen verschiedene Transportvorgänge und chemische Reaktionen nebeneinander ab, die sich gegenseitig beeinflussen. Neben den Sulfaten können weitere Verbindungen den Ablauf der verschiedenen Reaktionen beeinflussen.

Fest steht, dass Ettringit einen wesentlich grösseren Raum einnimmt als die Ausgangsstoffe. Wenn nicht genügend Porenraum für die Ausdehnung von Ettringit vorhanden ist, baut sich im Mörtel oder Beton ein innerer Druck auf, der zur Schädigung des Gefüges führen kann. Allerdings gilt zu berücksichtigen, dass Ettringit in einem Riss sowohl Ursache für die Rissbildung als auch nach dem Riss gebildet worden sein kann.

Die Rolle des C₃A

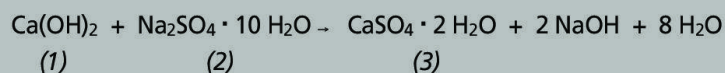
Je weniger Tricalciumaluminat (C₃A) ein Zement enthält, desto höher ist in der Regel sein Sulfatwiderstand. Zementen werden zur Regelung ih-

Ein wenig Chemie [6]

Die chemischen Reaktionen, die beim Angriff von Sulfaten auf Betone ablaufen, sind sehr komplex, da jeweils mehrere Verbindungen bzw. Kationen und Anionen daran teilnehmen können. Die Primärprodukte dieser Reaktionen sind – je nach Sulfatquelle, Sulfatkonzentration und pH-Wert – entweder Gips (3) oder Ettringit (5).

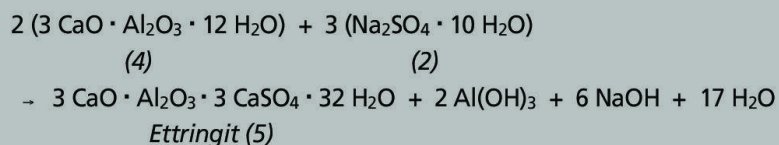
Die nachfolgenden Gleichungen dienen nur zur Illustration verschiedener Reaktionen, die bei einem Sulfatangriff ablaufen können.

- Beim Angriff von Natriumsulfat (2) auf Calciumhydroxid (1) entsteht Gips (3):



In fließendem Wasser kann Ca(OH)₂ (1) vollständig ausgelaugt werden. Bei stehendem Wasser stellt sich ein Gleichgewicht ein.

- Angriff von Natriumsulfat (2) oder Calciumsulfat auf Calciumaluminat-hydrate (4) unter Bildung von Ettringit (5):



Mit der Ettringitbildung ist eine starke Volumenzunahme verbunden. Gips (3) kann ebenfalls expansiv wirken.

res Abbindeverhaltens einige Massenprozent Gips (CaSO₄ · 2 H₂O) beigelegt. C₃A im Zement reagiert bei der Frischbetonherstellung unmittelbar nach der Wasserzugabe mit diesem Gips sowie Calciumhydroxid. Es entsteht Ettringit, das aber für den Festbeton nicht schädlich ist: Einerseits ist der Zementstein noch nicht fertig gebildet, andererseits

wird Ettringit in andere, weniger expansive Verbindungen umgewandelt, wenn aller Gips reagiert hat [5].

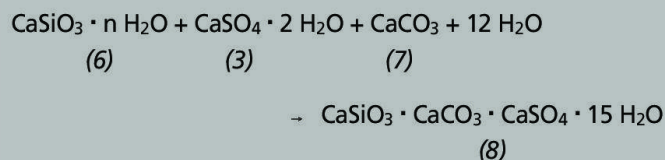
Nicht vergessen werden darf, dass C₃A auch Chloridionen bindet; ein niedriger C₃A-Gehalt ist deshalb gleichbedeutend mit einem geringeren Widerstand gegen einen Chlorideintrag [6].

Thaumasitbildungen

Seit etwa 1980 wird auch über Sulfatschäden durch die Bildung von Thaumasit (8) berichtet [7]. Voraussetzungen für das Auftreten von Thaumasit (8) sind:

- externe Sulfatquelle
- Temperatur < 15 °C (bevorzugter Temperaturbereich: 0–5 °C)
- Carbonationen (CO₃²⁻) oder Kohlendioxid (CO₂)
- viel Feuchtigkeit.

Die Reaktion zwischen Silikathydraten (6) und Gips (3) als Sulfatquelle lässt sich folgendermassen formulieren [8]:



Thaumasit ist normalerweise eine breiiges, farbloses Pulver ohne bindende Eigenschaften. Er kann aus Ettringit sowie aus allen wichtigen Zementphasen gebildet werden. Seine Hauptschadenswirkung besteht in der Zerstörung des Zementsteins, d.h. der bindenden Zementsteinkomponenten [7].

Schäden durch Thaumasitbildung werden vor allem aus Grossbritannien gemeldet [7]. Doch auch in der Schweiz wurden sie beobachtet, beispielsweise im Hauenstein-Basistunnel [8].

Zusatzstoffe und Zumahlstoffe [10]

Die Zugabe von Silicastaub wirkt sich in der Regel positiv auf die Sulfatbeständigkeit von Betonen aus. Einerseits lässt sich so die Zementmenge (und damit die Menge an Verbindungen, die mit Sulfationen reagieren können) verringern, andererseits wird der Beton bei korrekter

Verarbeitung dichter als ohne Silicastaub.

Die in Deutschland zugelassenen Hochofenzemente mit mehr als 65 % Hüttensand (CEM III B oder C) weisen einen hohen Sulfatwiderstand auf. Positiv auf den Sulfatwiderstand wirken sich auch Zugaben von Steinkohlenflugasche zu verschiedenen Zementen aus.

Diese Zusatzstoffe benötigen teilweise mehrere Tage bis Wochen, bis sie wirksam werden (Gefügeverdichtung).

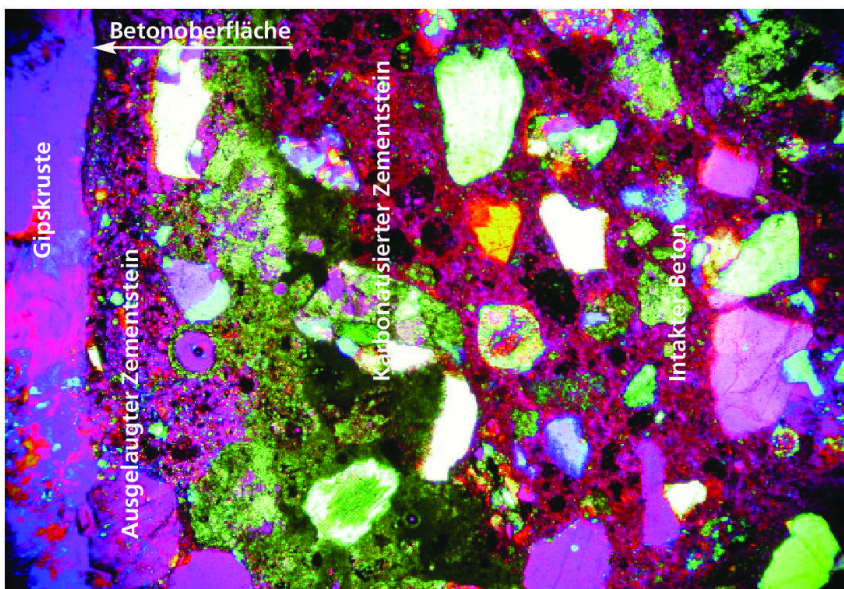
Verzögerte Ettringitbildung

Bei der verzögerten Ettringitbildung tritt Ettringit in Hohlstellen, Rissen und Kontaktzonen zwischen Zuschlägen und Zementstein auf, ohne dass ein externer Sulfatangriff vorliegt. Beobachtet wird dieses Phänomen vor allem – aber nicht ausschliesslich – bei wärmebehandelten Betonelementen, die häufig feucht werden [5]. Kritisch ist besonders eine zu hohe Temperatur (> ca. 80 °C) bei der Wärmebehandlung.

Biogene Schwefelsäurekorrosion

Dieser Artikel wäre unvollständig, würde nicht auch auf die biogene Schwefelsäurekorrosion hingewiesen. Derartige Schäden werden beispielsweise in Abwasserleitungen und Dachkonstruktionen von Nachklärbecken von Abwasserreinigungsanlagen beobachtet.

Vereinfacht kann dieses Phänomen folgendermassen erklärt werden: Bei Fäulnisprozessen unter Ausschluss von Sauerstoff entstehender Schwefelwasserstoff wird durch Schwefelbakterien (Thiobazillen) in Schwefelsäure (H₂SO₄) umgewandelt [6].



Sulfateinwirkung auf Zementstein von Kanalisationswand; Dünnschliffaufnahme, doppelt polarisiert mit Gipsplatte, Ausschnittbreite 2,4 mm.

Foto: Christine Merz, TFB

Wenn Schwefelsäure mit Zementstein reagiert, laufen verschiedene Reaktionen ab. So entsteht auf der Betonoberfläche Gips; der Zementstein wird geschädigt. Auch die Bildung von Ettringit im Innern des Betons ist möglich, da aus Schwefelsäuremolekülen Sulfationen gebildet werden können.

Nachweis des Sulfatwiderstands

Für die Sulfatwiderstandsbestimmung von Betonen nach AlpTransit, die auch von der TFB durchgeführt wird, werden acht Bohrkern ($\varnothing = 50 \text{ mm}$, $l = 150 \text{ mm}$) benötigt. Je vier

Proben werden in 10%iger wässriger Natriumsulfatlösung und in Wasser gelagert.

Die Nullmessung (Länge, dynamischer E-Modul) erfolgt sieben Tage nach der Herstellung der Prüfkörper. Die Messungen werden während zwei Jahren in definierten Abständen wiederholt.

Neben weiteren Anforderungen müssen die in der Sulfatlösung gelagerten Proben eines sulfatbeständigen Betons im Vergleich zu den in Wasser gelagerten Proben die folgenden Bedingungen erfüllen:

- Dehnung höchstens 0,5 % grösser
- dynamischer E-Modul höchstens 50 % niedriger.

Zudem werden die Proben visuell beurteilt (Auftreten von Rissen, Abplatzungen, Verformungen oder Zerfall), und es werden Dünnschliffe auf Gefügestörungen und die Bildung von Reaktionsprodukten mit Sulfat untersucht [12].

Zur Bestimmung der Sulfatbeständigkeit von Betonen als Teil der Qualitätssicherung während Bauarbeiten wurde das AlpTransit-Verfahren modifiziert. Die Versuchsdauer dieses beschleunigten Verfahrens beträgt noch 28 Tage [12].

Derartige Prüfungen sind an sich sehr nützlich. Ihr Wert ist allerdings nicht unumstritten. Das wichtigste Argument besteht darin, dass ihre Zuverlässigkeit wegen der oft erst nach Jahren sichtbar werdenden Sulfatschäden an Bauwerken nicht eindeutig beurteilt werden kann.

Schutz vor Sulfatschäden

Betonschäden durch Sulfate können verhindert werden, wenn auf die vorhandenen Kenntnisse zurückgegriffen wird. Dazu gehören [1,10]:

- korrekte Rezeptur, beispielsweise
 - niedriger W/Z-Wert
 - geeigneter Zement
 - ggf. geeignete Zusatzstoffe

- Betone, die auf Langzeitstabilität und nicht auf Druckfestigkeit getrimmt sind

sowie

- korrekte Verarbeitung des Frischbetons, d.h. unter anderem
 - gute Mischung (homogener Beton)
 - gute Verdichtung, damit eine dichte Matrix entsteht

- gute Nachbehandlung, um ein dichtes Gefüge im Deckbeton zu erreichen.

sowie

- Minimierung des Zutritts von Grundwasser und anderer Träger aggressiver Ionen zum Baukörper, beispielsweise durch Abdichtungen oder Beschichtungen

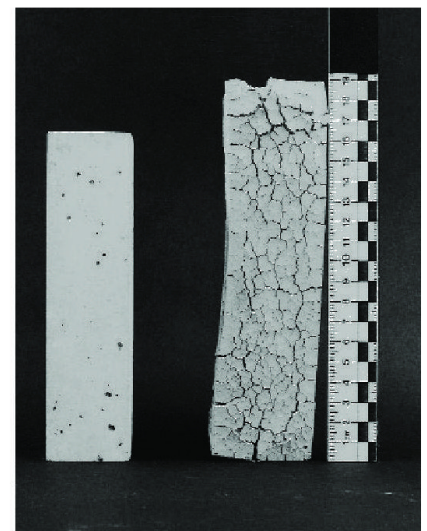
sowie

- laufender Unterhalt und rechtzeitige Instandsetzung des Bauwerks.

Kurt Hermann, TFB

LITERATUR

- [1] Skalny, J., and Pierce, J. S., «Sulfate attack issues: an overview», in Marchand, J. and Skalny, J.P. (Ed.), «Materials science of concrete: sulfate attack mechanism», The American Ceramic Society, Westerville, Ohio, 371 Seiten (1999).
- [2] DIN 4030, Teil 1: «Beurteilung betonangreifender Wässer, Böden und Gase; Grundlagen und Grenzwerte» (Ausgabe 1991).
- [3] EN-206-1: «Beton – Teil 1: Leistungsbeschreibung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität» (genehmigter Schlussentwurf vom Januar 2000).
- [4] Wetzig, V., «Tunnelwasser und Chemie», Schweizer Ingenieur und Architekt **114** [29], 630–631 (1996).
- [5] Stark, J., und Bollmann, K., «Späte Ettringitbildung im Beton» (Teil 1), Zement, Kalk, Gips **53** [4], 232–240 und **53** [5], 298–308 (2000).
- [6] Neville, A. M., «Properties of concrete», fourth and final edition, Longman, Essex (1999).
- [7] Bensted, J., «Mechanism of thaumasite sulphate attack in cements, mortars and concretes», Zement, Kalk, Gips International **53** [12], 704–709 (2000).
- [8] Le Roux, A., und Orsetti, S., «Les réactions sulfatiques: conditions de formation, structure et expansions des minéraux secondaires sulfatés», Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées **225**, 41–50 (2000).
- [9] Schmid, L. R., «Tunnelbauten im Angriff aggressiver Bergwässer», Schweizer Ingenieur und Architekt **113** [44], 1012–1018 (1995).
- [10] Jacobs, F., «Sulfatwiderstand von Zement und Beton», internes Papier TFB, Wildegg (1998).
- [11] Jentzsch, K., und Wigger, H., «Biologisch induzierte Betonkorrosion in ARA», Schweizer Ingenieur und Architekt **113** [10], 256–258 (1995).
- [12] Dienstleistungskatalog der TFB für das Jahr 2002 (in Vorbereitung).



Sulfatbeständigkeit von Mörtelprismen aus Portlandzement mit hohem Sulfatwiderstand (links) bzw. Portlandzement (rechts): Nach längerer Lagerung in einer Lösung mit einem hohen Sulfatgehalt treten nur beim Prisma aus Portlandzement Schäden auf.

Foto: TFB-Archiv

Schlüsselwörter

AlpTransit, C₃A, Ettringit, EN-206, Gips, Schwefelsäurekorrosion, Sulfatschäden, Thaumasit, Tricalciumaluminat.