

2. Stellungnahme des DAfStb zum „Sulfatangriff auf Beton“

– Aktualisierter Stand Februar 2012 –

Hintergrund

(1) In der Zeit vor 2003 wurden in Deutschland zwei Schäden an Betonbauwerken dokumentiert, die auf einen Sulfatangriff aus Böden und Wässern zurückgeführt werden. In der Praxis wurden diese Schäden seinerzeit unterschiedlich begründet und interpretiert, zum Teil wurden zunächst falsche Zusammensetzungen des betroffenen Betons genannt. Die widersprüchlichen Informationen haben zu einer Verunsicherung geführt. Zusätzlich wurden seinerzeit Ergebnisse von Laboruntersuchungen veröffentlicht und es wurden Standpunkte zur Sulfatproblematik verbreitet, die die Verunsicherung zum Teil noch verstärkt haben.

(2) Der DAfStb hatte dies zum Anlass genommen, im Jahr 2003 eine Expertengruppe einzusetzen, die einerseits den gesicherten Stand der Erkenntnisse aus vorliegenden Untersuchungen und Praxisbeobachtungen herausarbeiten und darauf aufbauend Empfehlungen für gegebenenfalls vorhandenen Handlungsbedarf hinsichtlich der Regelsetzung ausarbeiten sollte. Um einer möglichen Verunsicherung in der Praxis und bei Bauherren vorzubeugen und Sulfatschäden in Bauwerken zu verhindern, hatte der DAfStb in seiner Verantwortung für die Betonnormung und Regelsetzung bereits im Jahr 2003 eine Stellungnahme und Empfehlung herausgegeben (s. Anlage A), in der entsprechender Handlungsbedarf festgestellt wurde. Die wesentlichen Punkte dieser Stellungnahme aus dem Jahr 2003 werden hinsichtlich des seinerzeit festgestellten Handlungsbedarfes (s. a. Anlage A) im Folgenden aufgegriffen und die seit dieser Zeit gewonnenen Erkenntnisse und Schlussfolgerungen ergänzt.

1. Pyrihaltige Böden

Für pyrihaltige Böden wurde zum Zeitpunkt der ersten Stellungnahme im Jahr 2003 Präzisionsbedarf in der DIN 4030-1 identifiziert. Die Norm ist in Zusammenhang mit DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 anzuwenden (vgl. Anmerkung zu Tabelle 1 in DIN 1045-2). Wegen des möglichen kombinierten Säure-/Sulfatangriffs muss bei Vorliegen von pyrihaltigen Böden ein Gutachter eingeschaltet werden. Die überarbeitete DIN 4030-1:2008-06 wurde inzwischen um sog. „Pyritkarten“ erweitert, die Standorte enthalten, an denen Pyrit in nennenswerter Größenordnung zu erwarten ist und entsprechende Bodenanalysen zur Bewertung des Angriffspotenziales durchzuführen sind. Diese Karten unterstützen nunmehr den Gutachter bei der Feststellung des Angriffsgrades.

2. Aufbereitung des Kenntnisstandes

Die vom DAfStb eingesetzte Arbeitsgruppe zum Sulfatwiderstand sollte zunächst die im In- und Ausland vorhandenen Kenntnisse und Erfahrungen zusammenstellen. Im Jahr 2006 wurde mit DAfStb-Heft 554 der vorhandene Kenntnis- und Regelungsstand im In- und Ausland zusammengestellt.

3. Besondere Fragestellungen mit Forschungsbedarf

3.1 Allgemeines

(1) Die vom DAfStb eingesetzte Arbeitsgruppe zum Sulfatwiderstand sollte auf der Basis der vorhandenen Kenntnisse und Erfahrungen (s. a. Heft 554) besonders zwei Fragestellungen bearbeiten und eventuell notwendig werdende vorbeugende Maßnahmen für das Regelwerk ausarbeiten (s. a. Anlage A):

- a) Prüf- und Bewertungshintergrund bei Laboruntersuchungen zum hohen Sulfatwiderstand besonders bei niedrigen Temperaturen, der den mit Zementen bzw. Zement und Zusatzstoffen im Beton erzielbaren Sulfatwiderstand richtig einstuft,
- b) Voraussetzungen für eine Thaumasitbildung und Einfluss von Thaumasit auf den Schadensverlauf.

(2) Zu beiden Punkten (Fokus auf Punkt a)) wurde im DAfStb im Jahr 2006 ein Sonderforschungsvorhaben „Vertiefte Untersuchungen zum Sulfatwiderstand von Beton“ in drei Arbeitspaketen aufgelegt (Verbundforschung). Im Jahr 2010 wurden durch den DAfStb Ergänzungsuntersuchungen mit folgenden wesentlichen Zielsetzungen bewilligt:

- a) Einfluss der Magnesiumkonzentration auf den Schädigungsgrad; dieser Einfluss kann ggf. durch Herstellen synthetischer Wässer erfasst werden;
- b) Wirksamkeit der Erhöhung des Flugaschegehaltes von 20 M.-% auf 30 M.-% in Kombination mit CEM II/A-LL-Zementen;
- c) Einfluss der Alkalität auf die oberflächliche Thaumasitbildung.

(3) Die Forschungsarbeiten konnten im Jahr 2011 weitgehend abgeschlossen werden. Die Ergebnisse werden in der Schriftenreihe des DAfStb veröffentlicht. Die Bedeutung der Ergebnisse aus der Verbundforschung für die Praxis und der Handlungsbedarf für die Betonnormen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

3.2 Bedeutung für die Praxis

(1) Es wird festgestellt, dass seit Veröffentlichung der Stellungnahme im Jahr 2003 (s. Anlage A) keine weiteren Schäden in der Praxis an Betonbauteilen, deren Betone normkonform zusammengesetzt waren, aufgetreten sind.

(2) Sicherheit in der Praxis ergibt sich u. a. daraus, dass die Einwirkung durch aggressive sulfathaltige Wässer auf Betonbauteile in der Regel zu einem späteren Zeitpunkt erfolgt (z. B. durch eine Grundwasserabsenkung im Bauzustand) als dies bei den Laboruntersuchungen der Fall ist. Je später der Kontakt des Betonbauteils mit dem sulfathaltigen Wasser erfolgt, desto größer wird der physikalische Widerstand der Betone infolge der Porenverdichtung durch die Zementhydratation, die latent hydraulische Reaktion des Hüttensandes oder die puzzolanische Reaktion der Flugasche.

(3) Bei den zu einem frühen Zeitpunkt in die Sulfatlösung eingebrachten Flachprismen spielt zunächst die chemische Beständigkeit des Bindemittels (geringer C_3A -Gehalt, Verdünnungseffekte bei Flugaschemischungen) eine entscheidende Rolle; der physikalische Widerstand durch die Porenstrukturverdichtung kommt erst zu einem späteren Zeitpunkt zum Tragen; in der Praxis kommt dem physikalischen Widerstand des Betons stärkere Bedeutung zu. Anders als bei der Laborprüfung werden Betone in der Praxis auf eine definierte Festigkeitsentwicklung und damit auch Gefügeentwicklung unter Anwendungsbedingungen dimensioniert.

(4) Während es im Flachprismenverfahren (Laborprüfung) je nach Zement-/Zusatzstoffkombination aufgrund der geringen Probekörperabmessungen und der verspätet eintretenden Porenverdichtung zu einer vollständigen Zerstörung der Proben kommen kann, zeigen die den Bauteilbedingungen ähnlicheren Betonversuche z. T. nur eine oberflächliche Schädigung, die nur wenige Millimeter in den Beton hineinreicht. Der Schädigungsprozess kommt bei geringen Fließgeschwindigkeiten (annähernd hydrostatische Bedingungen) in der Regel bereits nach wenigen Millimetern – von der Oberfläche aus betrachtet – zum Stillstand.

(5) Auch bei Bauteilen, die in sofortigem Kontakt mit den sulfathaltigen Wässern stehen (Bohrpfähle, Schlitzwände), sind bisher bei normgerechter Zusammensetzung der Betone keine Schäden bekannt geworden. Außerdem werden bei diesen Betonen ohnehin Hoch-

ofenzemente (CEM III/B-NW/HS) oder CEM I-/CEM II-Zemente zusammen mit hohen Flugaschegehalten eingesetzt.

3.3 Handlungsbedarf für die Betonnormen

(1) Aus den unter Punkt 3.2 genannten Gründen (Fehlen von Schäden in der Praxis) besteht weiterhin kein kurzfristiger Handlungsbedarf für die Änderung der DIN 1045-2 hinsichtlich der dort getroffenen Regelungen für das Einwirken von sulfathaltigen Wässern und Böden (Klassifizierungssystem XA) und den Widerstand des Betons (Wasserzementwerte; Zementfestlegungen, Anwendungsregel für Flugasche).

(2) In den ergänzenden Untersuchungen (s. Abschnitt 3.1 (2)) wurde bei Zement-/Flugaschegemischen mit 20 M.-% Flugasche, bezogen auf (z+f), festgestellt, dass geringe Magnesiumkonzentrationen in sulfathaltigen Wässern und Böden den Schädigungsverlauf bei Laborprüfungen und Auslagerungsuntersuchungen bei dauerhaft niedrigen Temperaturen beschleunigen. Dieser Fall wird bei der Festlegung der Grenzkonzentrationen in den Expositionsklassen XA nicht erfasst. Die untere Grenzkonzentration zur Einstufung in die Expositionsklasse XA1 beginnt bei 300 mg Mg je l. Die DIN EN 206-1 berücksichtigt damit bei Angriff durch Magnesium auf Beton offensichtlich nur den reinen lösenden Angriff. Die den Schadensprozess beschleunigenden Effekte wurden aber bereits bei deutlich geringeren Mg-Konzentrationen festgestellt. Die Kombination aus Sulfatangriff, niedrigen Mg-Konzentrationen und niedriger Temperatur wird im Hinblick auf eine Klassifizierung derzeit nicht erfasst. Durch Einführung einer neuen Klassifizierungssystematik würde sich die Anwendung der Betonnorm verkomplizieren. Zudem können Klassengrenzen aus den vorliegenden Untersuchungen nicht abgeleitet werden.

(3) Auch wenn unter den zuvor beschriebenen Randbedingungen (geringe Mg-Konzentrationen, dauerhaft niedrige Temperaturen) keine Praxisschäden an Betonen aufgetreten sind, die normkonform zusammengesetzt sind, ist als vorbeugende Maßnahme eine Erhöhung des derzeit vorgeschriebenen Mindestflugaschegehaltes von 20 M.-% auf 30 M.-% bei Anwendung von DIN 1045-2:2008-08, Abschnitt 5.2.5.2.2, 7. Absatz, dritter Spiegelstrich, vorzunehmen. Alle Untersuchungen (Labor- und Auslagerungsversuche) haben gezeigt, dass eine Steigerung des Flugaschegehaltes im Gemisch aus Zement und Flugasche um diesen Anteil den Sulfatwiderstand von Betonen, die die HS-Eigenschaft durch Zugabe von Flugasche erreichen, nachweislich verbessert. Diese Regelung gilt als Vorsichtsmaßnahme bei Sulfatangriff, und zwar unabhängig davon, ob geringe Mengen Magnesium vorhanden sind oder nicht. Der Vorteil dieser Regelung besteht darin, dass sie zum einen einfach zu handhaben ist und andererseits zusätzliche Festlegungen für neue Einwirkungsklassen mit (derzeit unbekanntem) Grenzwerten im Bereich niedriger Magnesiumkonzentrationen in DIN EN 206-1 entbehrlich sind.

(4) Diese Regelung wird Eingang in die Neuausgabe der DIN 1045-2 im Zusammenhang mit der Revision von EN 206 finden.

Berlin, 22. Februar 2012

gez. Prof. Dr.-Ing. Manfred Curbach, Vorsitzender des DAfStb e. V.

Anlage A: Stellungnahme des DAfStb zum Sulfatangriff auf Beton aus dem Jahr 2003.

Sulfatangriff auf Beton - Stellungnahme des DAfStb

Hintergrund

In jüngerer Zeit wurden in Deutschland zwei Schäden an Betonbauwerken dokumentiert, die auf einen Sulfatangriff aus Böden und Wässern zurückgeführt werden. In der Praxis wurden diese Schäden unterschiedlich begründet und interpretiert, z. T. wurden zunächst falsche Zusammensetzungen des betroffenen Betons genannt. Die widersprüchlichen Informationen haben zu einer Verunsicherung geführt.

Zusätzlich wurden Ergebnisse von neueren Laboruntersuchungen veröffentlicht und es wurden Standpunkte zur Sulfatproblematik verbreitet, die die Verunsicherung zum Teil noch verstärkt haben.

Der DAfStb hat eine Expertengruppe eingesetzt, die einerseits den gesicherten Stand der Erkenntnisse aus vorliegenden Untersuchungen und Praxisbeobachtungen herausarbeiten und darauf aufbauend Empfehlungen für ggfs. vorhandenen Handlungsbedarf hinsichtlich der Regelsetzung ausarbeiten soll.

Um einer möglichen Verunsicherung in der Praxis und bei Bauherrn vorzubeugen und Sulfatschäden in Bauwerken zu verhindern, gibt der DAfStb in seiner Verantwortung für die Betonnormung und Regelsetzung folgende Stellungnahme und Empfehlung heraus:

Deutsche Normfestlegungen

Betonbauteile, die einem Sulfatangriff ausgesetzt sind, können durch Treiberscheinungen infolge sekundärer Ettringit- und/oder Gipsbildung bei niedrigen Bauteiltemperaturen zusätzlich durch Thaumasitbildung geschädigt werden. Zur Vermeidung von Schäden fordert EN 206-1 in Verbindung mit DIN 1045-2 einen Beton mit hohem Sulfatwiderstand. **Bei Beachtung der Normfestlegungen für Beton mit hohem Sulfatwiderstand sind bisher keine Schäden bekannt geworden.**

Der Widerstand von Beton gegen Sulfatangriff setzt sich aus einem chemischen und aus einem physikalischen Widerstand zusammen. Für den chemischen Widerstand ist im Wesentlichen der eingesetzte Zement bzw. die eingesetzte Zement-Flugasche-Kombination maßgeblich, für den physikalischen die Gefügedichtigkeit, gesteuert über w/z-Wert und Zementart.

Die Bewertung des Sulfatwiderstandes eines Zements bzw. einer Zement-Flugasche-Kombination erfolgt bislang auf der Basis von Zeitraffer-Laborprüfungen:

An Flachmörtelprismen ($d = 1 \text{ cm}$) mit einem w/z-Wert von 0,60 (Wittekind-Verfahren) bzw. 0,50 (SVA-Verfahren) werden bei $20 \text{ }^\circ\text{C}$ in hochkonzentrierter Sulfatlösung (29800 mg/l SO_4) Dehnungen gemessen. Liegen die Dehnungen nach 56 Tagen (Wittekind-Verfahren) bzw. nach 91 Tagen (SVA-Verfahren) unterhalb des Bewertungsgrenzwertes von $0,5 \text{ mm/m}$, erfüllt der geprüfte Zement die Voraussetzungen eines hohen Sulfatwiderstandes, d. h. die Eigenschaft als HS-Zement.

Der für Beton mit diesen Zementen bzw. Zement-Flugasche-Kombinationen zusätzlich erforderliche physikalische Widerstand ist in DIN 1045-2, Abschnitt 4.1, Tabelle 2 für die Expositionsklassen XA1, XA2, XA3 definiert und durch die Festlegung der höchstzulässigen w/z-Werte für diese Expositionsklassen in DIN 1045-2, Anhang F, Tabelle F 2.2-Teil 2 geregelt.

Die etwa 50-jährige Erfahrung mit diesen Normfestlegungen zum Sulfatwiderstand zeigt, dass bei Beachtung dieser Festlegungen keine Schäden infolge Sulfatangriff zu erwarten sind.

Die in DIN 1045-2, Abschnitt 5.2.5.2.2 getroffenen Festlegungen für Beton aus Zement-Flugasche-Kombinationen mit ausreichendem Sulfatwiderstand bei Angriff durch sulfathaltige Wässer und Böden mit bis zu 1500 mg/l SO_4 sind ebenfalls begründet durch die zuvor erläuterten Zeitraffer-Laboruntersuchungen (SVA-Verfahren) zusammen mit den entsprechenden Anforderungen an den w/z-Wert in DIN 1045-2, Anhang F.

Thaumasitschäden in England

In England sind in den zurückliegenden Jahren bei Betonen Schäden aufgetreten, die entweder einem Angriff durch stark sulfathaltige Böden und Wässer oder einem kombinierten Säure-Sulfatangriff durch Oxidation sulfidhaltiger Böden ausgesetzt waren. Die Schäden zeigten sich in Treiberscheinungen infolge Sekundärettringit und Sekundärgips und in Entfestigungen durch Thaumasit.

Bei Thaumasit handelt es sich um ein dem Ettringit verwandtes Mineral mit ähnlicher Kristallstruktur, das kein Aluminium, aber zusätzlich Silicium und Carbonat enthält. Die Thaumasitbildung führt im Unterschied zur Ettringitbildung aber nicht zu einer treibenden Reaktion, sondern zu einer Auflösung der Zementsteinmatrix, so dass sich fester Beton in eine breiige Masse umwandelt.

Eine Thaumasitbildung ist nach derzeitigem Erkenntnisstand nur unter folgenden Randbedingungen möglich:

- Feuchteeinwirkung und herkömmlicher Sulfatangriff (aus sulfathaltigen Wässern und Böden oder sulfidhaltigem Gestein, z. B. Pyrit),
- überwiegend niedrige Temperaturen ($t < 15 \text{ }^\circ\text{C}$),
- carbonathaltige Betonzusätze (z. B. Kalksteinmehl, Kalksteinzuschlag etc.) oder externe Carbonatquellen (Wasser, Luft).

Die in England festgestellten Schäden waren Anlass, die in Deutschland getroffenen Festlegungen nochmals zu überprüfen. Da Thaumasit nur bei niedrigen Temperaturen, wie sie im Grundbau vorkommen, gebildet wird, war besonders der Einfluss niedriger Temperaturen dabei zu untersuchen.

Die Ergebnisse zeigen, dass im Flachprismenverfahren bei den hohen Sulfatkonzentrationen und niedrigen Temperaturen einige Zement-Flugasche-Kombinationen das für 20 °C abgeleitete Prüfkriterium nicht einhalten und nach längerer Lagerungszeit - jenseits der Zeitdauer der Prüfkonvention - auch starke Dehnungszunahmen zeigen. Diese Ergebnisse deuten mit hoher Wahrscheinlichkeit auf ein Prüfartefakt hin, verursacht durch die unzureichende Reife der Mörtel der Flachprismen in Kombination mit der gewählten hohen Lösungskonzentration. Ein baupraktisches Risiko ist daraus nach derzeitigem – auch internationalem - Kenntnisstand nicht abzuleiten.

Der Frage einer praxisrelevanten Laborprüfung wird die Expertengruppe des DAfStb weiter nachgehen. Tatsache ist, dass das Flachprismenverfahren und das daraus abgeleitete Beurteilungskriterium nur für Normallagerung bei 20 °C an Praxisergebnissen kalibriert ist.

Inwieweit ein Thaumasitschaden stets einer vorauseilenden Treiberscheinung und damit Gefügelockerung durch eine Ettringit-/Gipsbildung bedarf, ist ebenfalls nicht abschließend geklärt.

Folgerungen

Da die in England und Deutschland bekannt gewordenen Schäden nur an Betonen festgestellt wurden, die den in DIN 1045-2 getroffenen Anforderungen an Beton mit hohem Sulfatwiderstand nicht entsprechen, bzw. im Fall eines kombinierten Säure- und Sulfatangriffs dafür nicht sachgerecht zusammengesetzt waren, besteht derzeit kein Anlass, diese Festlegungen zu überarbeiten - das gilt auch für die Zement-Flugascheregelung bei Sulfatangriffen bis zu 1500 mg/l SO₄.

Unzweifelhaft ist, dass in den Laborversuchen mit erhöhten Sulfatlösungskonzentrationen HS-Zemente keine erhöhten Dehnungswerte bei niedrigen und Normaltemperaturen zeigen - weder mit noch ohne Kalksteinmehl und/oder SFA-Zusätzen.

Weiterhin ist eindeutig, dass Kalksteinmehl-Zumahlungen zum Zement, die erheblich über 5 M.-% liegen oder Kalksteinzusätze zum Beton die Thaumasitbildung in Kombination mit den genannten Versuchsbedingungen im Labor (niedrige Temperaturen, hohe Sulfatgehalte) begünstigen. Einzelne HS-Zemente haben im Laborversuch geringere Neigung zu Thaumasitbildung gezeigt. Nach heutigen Erkenntnissen muss aus den Laborergebnissen nicht gefolgert werden, dass bei normengemäßen Betonzusammensetzungen in der Praxis Schäden auftreten können.

Handlungsbedarf

Für pyrithaltige Böden besteht Präzisierungsbedarf in der DIN 4030-1, die nach wie vor auch in Zusammenhang mit DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 anzuwenden ist (vgl. Anmerkung zu Tabelle 1 in DIN 1045-2). Wegen des möglichen, kombinierten Säure-/Sulfatangriffs muss bei Vorliegen von pyrithaltigen Böden z. Z. ein Gutachter eingeschaltet werden. Für die notwendigen Ergänzungen in DIN 4030-1 wird der entsprechende Normenausschuss in neuer Zusammensetzung die Arbeit kurzfristig aufnehmen.

Die vom DAfStb eingesetzte Expertengruppe zum Sulfatwiderstand wird auf der Basis der im In- und Ausland vorhandenen Kenntnisse und Erfahrungen besonders zwei Fragestellungen bearbeiten und eventuell notwendig werdende vorbeugende Maßnahmen für das Regelwerk ausarbeiten:

- Prüf- und Bewertungshintergrund bei Laboruntersuchungen zum hohen Sulfatwiderstand besonders bei niedrigen Temperaturen, der den mit Zementen und Bindemittelgemischen im Beton erzielbaren Sulfatwiderstand richtig einstuft,
- Voraussetzungen für eine Thaumasitbildung und Einfluss von Thaumasit auf den Schadensverlauf.

Berlin, 31.03.2003

gez.
Prof. Dr.-Ing. Peter Schießl,
Sprecher des DAfStb-Vorstandes