
SCHÄDIGUNGSPOTENTIAL INFOLGE ERHÖHTEM SULFATGEHALT BEI VERWENDUNG ALKALIFREIER ERSTARRUNGS- BESCHLEUNIGER

DAMAGE POTENTIAL DUE TO INCREASED SULPHATE CONTENT BY USE OF ALKALI-FREE SETTING ACCELERATORS

Prof. Dr.-Ing. Rolf **Breitenbücher**,
Dipl.-Ing. Björn **Siebert**,
Lehrstuhl für Baustofftechnik, Ruhr-Universität Bochum, Deutschland

Mit dem Einsatz alkalifreier Erstarrungsbeschleuniger in Spritzbetonen konnten umweltrelevante Fragen (z. B. Eluierbarkeit) gelöst und Festigkeitseinbußen vermindert werden. Die auf Basis von Aluminiumhydroxid und Sulfat hergestellten, alkalifreien Erstarrungsbeschleuniger tragen erhebliche Mengen an Sulfat in den Spritzbeton ein, wodurch sich zumindest theoretisch das Schädigungspotential infolge Ettringitbildung erhöht.

In einem Forschungsprojekt wurde untersucht, inwieweit der durch den Einsatz alkalifreier Erstarrungsbeschleuniger verursachte Anstieg des Sulfatgehaltes ein Gefährdungspotential in Spritzbeton hervorruft. Auf Grundlage der erzielten Ergebnisse ist bei dem Einsatz dieser Erstarrungsbeschleuniger in üblichen Dosiermengen nicht von einem negativen Einfluss auf die Dauerhaftigkeit von Spritzbeton auszugehen, was nicht zuletzt auf das spezifische Spritzbetongefüge zurückzuführen ist.

The use of alkali-free setting accelerators in sprayed concrete has solved problems concerning environmental issues (e.g. leachability) as well as loss of strength. These alkali-free accelerators, based on aluminum hydroxide and sulphate, import a significant amount of sulphate in the sprayed concrete. Thus, the damage potential due to the formation of ettringite increases at least theoretically.

In a research project the damage potential in sprayed concrete due to the increase in the sulphate content caused by the use of alkali-free setting accelerator was investigated. Based on the achieved results a negative influence on the durability of sprayed concrete is not to be expected by use of alkali-free setting accelerators with usual doses. Predominantly, this can be attributed to the specific microstructure of such a concrete.

1. Einleitung

Seit Jahrzehnten wird Spritzbeton im konstruktiven Ingenieurbau erfolgreich eingesetzt. Wenn dabei oftmals der Beton innerhalb kürzester Zeit in großen Dicken auf vertikale Flächen oder über Kopf (z. B. bei Hangsicherungen, im Tunnelbau, u. ä.) appliziert werden muss, ist ein rasches Erstarren und eine hohe Frühfestigkeit unabdingbar. Dies wird durch den Einsatz von Erstarrungsbeschleunigern oder speziellen Spritzbetonzementen erreicht [1, 2, 3].

Die hierfür lange Zeit verwendeten Erstarrungsbeschleuniger auf Basis von Alkaliverbindungen [2, 4] führen jedoch im Vergleich zu nicht-beschleunigtem Beton einerseits zu Festig-

keitseinbußen im Endzustand, andererseits begünstigen sie die Auslaugung des Spritzbetons [5]. Letztere kann zum einen Boden und Grundwasser gefährden, zum anderen durch Versinterungen die Wirksamkeit von Tunneldrainagen massiv beeinträchtigen.

Daher wurden in den letzten Jahren verstärkt alkaliarme/-freie Erstarrungsbeschleuniger entwickelt, die im Allgemeinen auf Aluminiumsulfaten basieren. Die genannten Nachteile hinsichtlich der mechanischen und ökologischen Eigenschaften des Spritzbetons können damit weitestgehend ausgeschaltet werden [6, 7, 8]. Insbesondere zeichnen sich Betone, die mit diesen Produkten und nicht den klassischen Beschleunigern erstellt wurden, durch eine reduzierte Eluierbarkeit aus. Gleichzeitig wird eine ausreichend hohe Frühfestigkeit ohne Einbußen in der Endfestigkeit erzielt.

Alkalifreie Erstarrungsbeschleuniger werden meist auf Basis von Aluminiumhydroxid und Sulfat hergestellt. Die Wirkung dieser Beschleuniger basiert i.d.R. auf einer erhöhten Ettringitbildung im frisch aufgespritzten Beton. Bei einer üblichen Dosierung von ca. 4 bis 8 M.-%, bezogen auf den Zementgehalt, werden dadurch erhebliche zusätzliche Mengen an Sulfat in den Beton eingebracht, die ohne weiteres in der gleichen Größenordnung wie der Sulfateintrag durch den Zement liegen können. Bedingt durch diese erhöhten Sulfatanteile ist ein erhöhtes Potential für Schadreaktionen im Festbeton zumindest nicht von Haus aus auszuschließen. Unter den Umgebungsbedingungen der Anwendung solcher Spritzbetone, wie z.B. in Tunnelbauwerken (Feuchtigkeit, niedrige Temperaturen) ist daraus sowohl eine sekundäre Ettringitbildung als auch eine Thaumasitbildung – soweit die weiteren notwendigen Reaktionspartner vorliegen – möglich. Das Risikopotential kann durch sulfathaltiges Grundwasser zusätzlich erhöht werden, wenn der Sulfatgehalt im Beton durch von außen eindringende Sulfationen auf ein für eine solche Mineralneubildung günstiges Niveau ansteigt [9]. Die Dauerhaftigkeit und damit langfristig auch die Standsicherheit des Bauwerkes können dadurch u. U. maßgeblich beeinträchtigt werden. Andererseits weist Spritzbeton bedingt durch die spezielle Applikationstechnik eine spezifische Gefügestruktur auf. Im Allgemeinen ist davon auszugehen, dass sich – im Vergleich zu herkömmlichen Rüttelbetonen – im Mörtel mehr feinste Hohlräume einstellen. Diese wirken als Expansionsraum, so dass trotz einer Volumenzunahme der entstehenden Reaktionsprodukte (Ettringit) sich kein Sprengdruck und damit keine Schädigung einstellen können.

In Zukunft werden diese sulfathaltigen Erstarrungsbeschleuniger für Spritzbeton in der DIN EN 934-5 [10] geregelt. Aufgrund der noch relativ jungen Anwendung fehlten bis dato entsprechende Erfahrungswerte bzw. systematische Untersuchungen zu dieser Problematik.

2. Untersuchungen an Spritzbetonen mit alkalifreien Erstarrungsbeschleunigern

2.1 Untersuchungsprogramm und Durchführung

Im Rahmen eines Forschungsprojektes wurde am Lehrstuhl für Baustofftechnik der Ruhr-Universität Bochum gemeinsam mit dem F.A. Finger-Institut der Bauhaus-Universität Weimar untersucht, ob bzw. inwieweit durch den Einsatz alkalifreier Erstarrungsbeschleuniger und damit erhöhtem Sulfatgehalt die Dauerhaftigkeit von Spritzbeton tatsächlich beeinträchtigt wird [11]. Dabei stand das Schädigungspotential infolge des erhöhten Sulfatgehaltes im Festbeton unter Berücksichtigung des spezifischen Spritzbetongefüges im Mittelpunkt der Untersuchungen.

In diesem Forschungsprojekt wurden über einen Zeitraum von einem Jahr an Spritzbeton-Probekörpern, die mit alkalifreien Beschleunigern hergestellt und in Sulfatlösungen (Na_2SO_4), unter Wasser und an der Luft gelagert wurden, charakteristische Festbetoneigenschaften und deren zeitliche Veränderungen detailliert untersucht. Zur Beurteilung des Schädigungsverhaltens wurden an den Probekörpern zu verschiedenen Zeitpunkten die Druckfestigkeit,

die Längenänderung, der relative dynamische E-Modul sowie die Gefügestruktur mittels Rasterelektronenmikroskopie und Phasenanalyse bestimmt und bewertet.

Insgesamt wurden 8 Spritzbetone im Nassspritzverfahren mit verschiedenen Zementen unter Variation der Herkunft und Dosiermenge des Erstarrungsbeschleunigers hergestellt. Die Grundzusammensetzung der untersuchten Spritzbetone ist in Tab. 1 angegeben.

Tab. 1: Grundzusammensetzung der untersuchten Spritzbetone

| | | | |
|-----------------------------|--|-----|-------------------|
| Zementart: | Typ I: CEM I 42,5 R ($C_3A = 8,3$ M.-%); Typ II: CEM II/A-LL 42,5 R ($C_3A = 9,6$ M.-%, Kalksteinanteil = 9,5 M.-%) | | |
| Zementgehalt: | 450 kg/m ³ | | |
| Wassermenge: | 0,50 | | |
| Wassergehalt: | 225 kg/m ³ | | |
| Gehalt der Gesteinskörnung: | Quarzmehl: | 134 | kg/m ³ |
| | 0 / 2: | 759 | kg/m ³ |
| | 2 / 8: | 786 | kg/m ³ |
| Sieblinie: | B8 | | |
| Fließmittel: | Basis Polycarboxylatether | | |
| Zugabemenge: | 0,52 M.-% bez. Zementgehalt | | |

Mit dem Fließmittel wurde eine sehr weiche Konsistenz (F4) mit einem Ausbreitmaß von rd. 520 mm und einer Verarbeitbarkeitsdauer von mindestens zwei Stunden eingestellt. Die eingesetzten Beschleuniger unterschieden sich in erster Linie im Gehalt an $Al_2(SO_4)_3$ und $Al(OH)_3$, wie Tab. 2 zu entnehmen ist.

Tab. 2: Angaben zu den verwendeten Erstarrungsbeschleunigern

| | Erstarrungsbeschleuniger | | | |
|---|--------------------------|------------|------------|--------|
| | BE1 | BE2 | BE3 | BE4 |
| Konsistenz | Dispersion | Dispersion | Dispersion | Lösung |
| $Al_2(SO_4)_3$ [M.-%] | 90 | 70 | 100 | 70 |
| $Al(OH)_3$ [M.-%] | 10 | 30 | 0 | 30 |

In Tab. 3 sind die untersuchten Kombinationen aus Zement, alkalifreiem Erstarrungsbeschleuniger und dessen Dosiermenge aufgelistet.

Tab. 3: Untersuchte Variationen der Zemente, Erstarrungsbeschleuniger und deren Dosiermengen

| Bezeichnung der Spritzbetone* | Zement | | Erstarrungsbeschleuniger [M.-% v. Z.] | | | |
|-------------------------------|--------|--------|---------------------------------------|-----|-----|-----|
| | Typ I | Typ II | BE1 | BE2 | BE3 | BE4 |
| I/BE1/5 | X | | 5 | | | |
| I/BE1/10 | X | | 10 | | | |
| I/BE2/5 | X | | | 5 | | |
| I/BE2/10 | X | | | 10 | | |
| I/BE3/7 | X | | | | 7 | |
| I/BE4/7 | X | | | | | 7 |
| II/BE1/10 | | X | 10 | | | |
| II/BE2/10 | | X | | 10 | | |

* Bezeichnung: Zement/Beschleuniger/BE-Dosiermenge

Die Spritzbetonplatten wurden im Dichtstromverfahren im Spritzstand der Ruhr-Universität Bochum hergestellt. Der Beton wurde senkrecht auf die vertikal gelagerte mattfeuchte Holzbohlenwand, (2,2 x 1,0 m²) in einer Gesamtschichtdicke von rd. 26 cm in mehreren Lagen aufgetragen. Der Erstarrungsbeschleuniger wurde direkt an der Spritzdüse über eine BE-Pumpe zum Frischbeton zu dosiert.

Während der ersten sieben Tage nach der Herstellung wurden alle Spritzbetonplatten durch Abdecken mit feuchten Jutetüchern nachbehandelt. Die Herstellung und Nachbehandlung der Spritzbetone erfolgte bei einer Temperatur von $20 \pm 2^\circ\text{C}$.

Im Alter von vier Wochen wurden für die weiteren Untersuchungen Bohrkern (D \approx 100 mm, L entsprechend der Plattendicke) aus den Spritzbetonplatten entnommen und auf eine Länge von 220 mm zugeschnitten.

Nach den jeweiligen Nullmessungen wurden die Spritzbetonproben im Alter von 6 Wochen in die jeweiligen Medien für die Dauer eines Jahres eingelagert. Durch die Einlagerung eines Teils der Proben in eine 0,22 %ige-Na₂SO₄-Lösung, die monatlich erneuert wurde, wurde – zusätzlich zum inneren Sulfatangriff – ein weiterer, äußerer Sulfatangriff auf den Spritzbeton simuliert. Die Umgebungstemperatur für die Lagerung wurde einheitlich auf 8 °C festgelegt. Sowohl die Konzentration der Sulfatlösung als auch die Lagerungstemperatur wurden so gewählt, dass die Umgebungsbedingungen in Tunneln praxisnah abgebildet wurden.

Zusätzlich zu den Lagerungen in der Na₂SO₄-Lösung wurden von jedem Spritzbeton Probekörper bei 8 °C unter Wasser bzw. an der Luft bei einer relativen Feuchte von 60 % (Klima 8/60) gelagert. Auf Grundlage der Ergebnisse aus der Wasserlagerung kann das Schädigungspotential im untersuchten Spritzbeton infolge eines reinen inneren Sulfatangriffs abgeschätzt werden. Die im Klima 8/60 gelagerten Spritzbetonprobekörper dienten primär als Referenz für die Druckfestigkeit aller übrigen Probekörper.

3. Ergebnisse der Einlagerungsversuche

3.1 Mechanische Kennwerte

In Bild 1 sind die Druckfestigkeiten der untersuchten Spritzbetone nach 360 Tagen Einlagerung in NaSO₄-Lösung, Wasser und an Luft, jeweils als Mittelwerte aus 2 bis 4 Einzelergebnissen, dargestellt. Zusätzlich sind die Druckfestigkeiten der einzelnen Spritzbetone unmittelbar vor Einlagerung, d. h. fünf Wochen nach Herstellung, mit aufgenommen.

Die Druckfestigkeiten aller untersuchten Spritzbetone im Alter von fünf Wochen nach Herstellung lagen durchschnittlich in der Größenordnung von 50 N/mm² bis 55 N/mm². Nach 360 Tagen Einlagerung in Sulfatlösung, Wasser oder an Luft war bei allen Spritzbetonserien eine Nacherhärtung um 10 N/mm² bis 20 N/mm² festzustellen. Die Druckfestigkeiten der jeweiligen Spritzbetone unterschieden sich trotz der verschiedenen Lagerungen i. Allg. nur um maximal ± 3 N/mm². Lediglich bei dem Beton II/BE2/10 erreichten die in Wasser bzw. NaSO₄ gelagerten Probekörper um rd. 10 % geringere Druckfestigkeiten als die luftgelagerten Probekörper. Unter Berücksichtigung der bei Spritzbetonen verfahrensbedingt auftretenden größeren Streuungen in den Druckfestigkeiten lassen die Ergebnisse keine Hinweise auf einen schädigenden Sulfatangriff während der einjährigen Lagerung erkennen.

Hinsichtlich der Längenänderung wurden an den sulfat- und wassergelagerten Probekörpern in dem Untersuchungszeitraum von 360 Tagen Längenzunahmen von maximal 0,3 ‰ gemessen. Diese liegen durchaus im üblichen Bereich für Betone unter solchen Lagerungsbedingungen, d.h. sie sind im Wesentlichen auf das Quellen unter Wasser zurückzuführen.

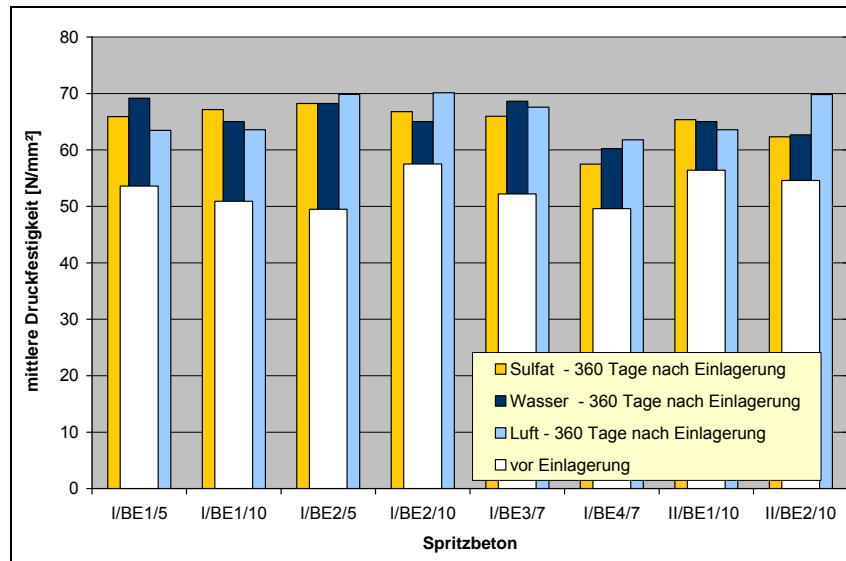


Bild 1: Druckfestigkeiten der Spritzbetone vor Einlagerung (Betonalter: ~35 Tage) und nach 360-tägiger Einlagerung

Treibschäden als Folge von innerer bzw. äußerer Sulfateinwirkung waren weder bei den in Wasser noch bei den in Sulfatlösung gelagerten Probekörpern festzustellen. Die an Luft gelagerten Probekörper verkürzten sich infolge von Schwindvorgängen im gleichen Zeitraum um rund 0,4 bis 0,9 ‰.

Auch die relativen dynamischen E-Moduln der jeweils in Wasser und Sulfat gelagerten Probekörper stimmten zu den einzelnen Untersuchungszeitpunkten weitgehend überein. So lässt sich für alle Spritzbetonproben über den Zeitraum von 360 Tagen ein Anstieg des rel. dynamischen E-Moduln um rd. 10 % feststellen. Beispielhaft ist das Ergebnis für die in Sulfat gelagerten Proben in Bild 2 dargestellt. Demgegenüber wurden auch bei den an Luft gelagerten Probekörpern mit Abweichungen von etwa ± 2 % keine wesentlichen Veränderungen festgestellt.

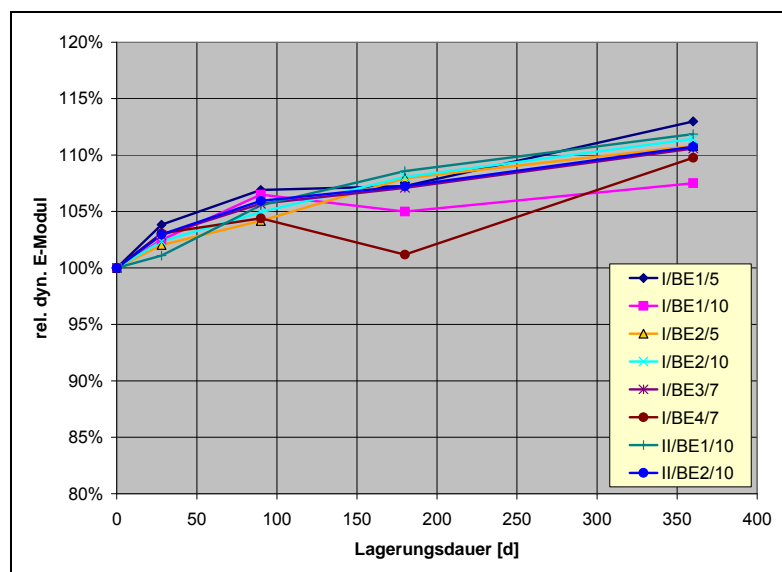


Bild 2: Relativer dynamischer E-Modul der Spritzbetone nach 360-tägiger Einlagerung in Sulfatlösung

3.2 Phasenanalyse und Gefügeuntersuchungen

Zur Quantifizierung des Phasenbestandes in den jeweiligen Spritzbetonen wurden von Beugungsdiagrammen aus XRD-Messungen der 360-Tage-Proben Rietveld-Analysen erstellt. Nach Abzug der Phasenanteile der Gesteinskörnung ergaben sich die in Tab. 4 dargestellten Phasengehalte im Zementstein. Der Zementstein bestand damit zu ca. 80 % aus amorphen Anteilen, die hauptsächlich den C-S-H-Phasen zugeordnet werden konnten. Die Gehalte an den Treibphasen Ettringit und Gips waren demgegenüber unabhängig von der Menge und Art des Erstarrungsbeschleunigers mit Werten zwischen 2 und 4 % gering. Sie lagen damit deutlich unter den Werten, die sich aus der Umsetzung der Beschleuniger zu Ettringit berechnen lassen.

Bei der Bewertung der Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass sich Analysenfehler aufgrund der hohen Gehalte an inerte Gesteinskörnung stark auf die berechneten Mengen an neu gebildeten Phasen auswirken. Für die Proben mit Portlandkalksteinzement (Typ II) ergaben sich erwartungsgemäß höhere Calcitgehalte im Zementstein.

Tab. 4: Rietveld-Auswertung für die Spritzbetone nach 360 Tagen Sulfatlagerung bei 8 °C

| Mörtelprobe | Σ Gesteinsk. i.d.Probe [%] | Zementstein i.d.Probe [%] | Phasen im Zementstein [%] | | | | |
|-------------|--------------------------------------|------------------------------|---------------------------|------|------------|--------|--------|
| | | | Ettringit | Gips | Portlandit | Calcit | amorph |
| I/BE1/5 | 54.1 | 45.9 | 3.7 | 2.8 | 7.2 | 7.8 | 78.4 |
| I/BE1/10 | 58.9 | 41.1 | 3.9 | 1.5 | 8.5 | 8.3 | 77.9 |
| I/BE2/5 | 46.4 | 53.6 | 4.3 | 2.2 | 6.7 | 3.2 | 83.6 |
| I/BE2/10 | 56.4 | 43.4 | 4.4 | 1.6 | 7.8 | 7.8 | 78.3 |
| I/BE3/7 | 54.8 | 45.1 | 2.4 | 2.7 | 7.3 | 7.3 | 80.3 |
| I/BE4/7 | 51.0 | 49.0 | 1.6 | 4.1 | 6.9 | 6.3 | 81.0 |
| II/BE1/10 | 56.5 | 43.5 | 2.1 | 1.8 | 8.3 | 12.9 | 74.9 |
| II/BE2/10 | 55.5 | 44.5 | 2.0 | 1.8 | 7.2 | 10.8 | 78.2 |

In Bild 3 sind für die Spritzbetone, die 360 Tage lang an Luft, Wasser oder Sulfatlösung lagerten, die aus den XRD-Messungen ermittelten Peakhöhen der Ettringitinterferenz bei $2\theta = 9,1^\circ$ gegenübergestellt. Die Intensität der Ettringitpeaks für die Luftlagerung charakterisiert dabei den Ettringitgehalt bei der Erstarrung bzw. Erhärtung der Betone. Aus den im Vergleich zur Luftlagerung höheren Intensitäten der wasser- bzw. sulfatgelagerten Proben lässt sich ableiten, dass die Hydratation einschließlich der weiteren Ettringitbildung offenbar während der Nasslagerung fortgeschritten war. Die erhöhte Ettringitmenge hatte dabei das Betongefüge allerdings nicht geschädigt. Eine Differenzierung hinsichtlich der verschiedenen Erstarrungsbeschleuniger ist aufgrund der Auswirkungen der jeweiligen Präparation der Proben für die XRD-Messung nicht möglich.

Für die Beurteilung des Sulfatangriffs war in erster Linie die Verteilung des Schwefels in der Randzone bzw. im Inneren der Mörtelproben interessant. Die REM-Aufnahmen des Mikrogefüges von angeschliffenen Mörtelproben wurden dazu durch farbliche Darstellung der Schwefelverteilung mittels ESCA-mapping ergänzt, wie beispielhaft für den Spritzbeton II/BE1/10 nach 90 Tagen Sulfatlagerung links in Bild 4 dargestellt ist. Die weitgehend homogene Verteilung des Schwefels bestätigt die schnelle und gleichmäßige Bildung von feinkristallinem Ettringit während der Erstarrung durch die spontane Reaktion des Beschleunigers mit $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

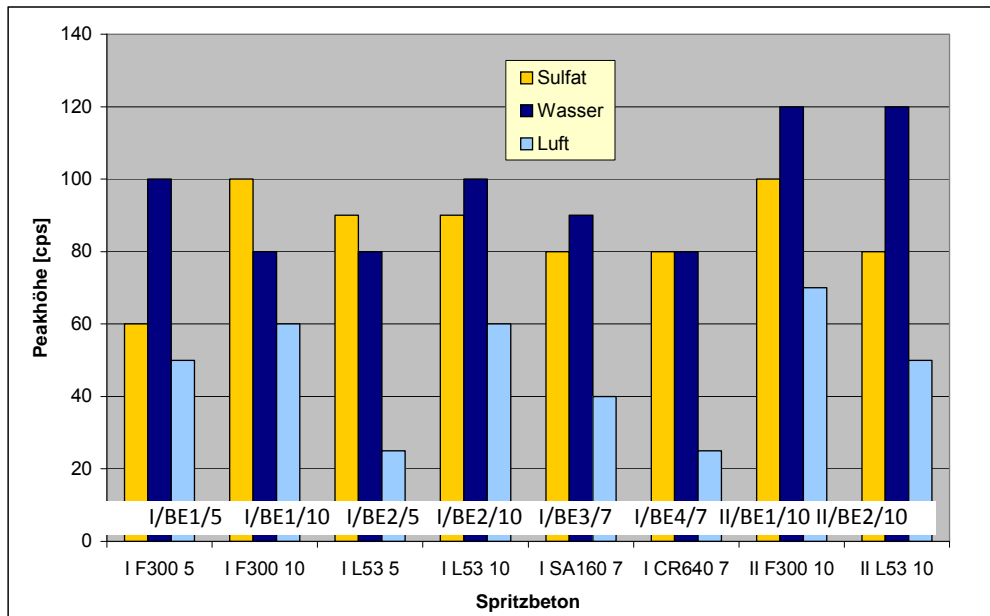


Bild 3: Vergleich der Intensität des Ettringitpeaks $2\theta = 9,1^\circ$ bei den untersuchten Spritzbetonen in Abhängigkeit von den Lagerungsbedingungen über 360 Tage

In Poren der wasser- bzw. sulfatgelagerten Spritzbetone zeigten sich deutliche Schwefelanreicherungen, die auf eine nachträgliche, sekundäre Ettringitbildung infolge fortschreitender Hydratation zurückzuführen sind. Der sekundäre Ettringit, der in den Poren in Form dicht gepackter Bündel aus Ettringitnadeln auftritt (Bild 4, rechts), ist in den untersuchten Spritzbetonen hinsichtlich Gefügeschädigung ungefährlich. Die zunehmende Verfüllung der Poren mit Ettringit ließ sich auch anhand der Erhöhung der Durchschallungsgeschwindigkeit bzw. der Zunahme des dynamischen E-Moduls feststellen (Bild 2). An den an Luft gelagerten Proben konnten hingegen nur leere Poren beobachtet werden. Bei diesen Proben wurden die Hydratation und damit die Ettringitbildung offensichtlich aufgrund des verringerten Feuchteangebotes deutlich verlangsamt.

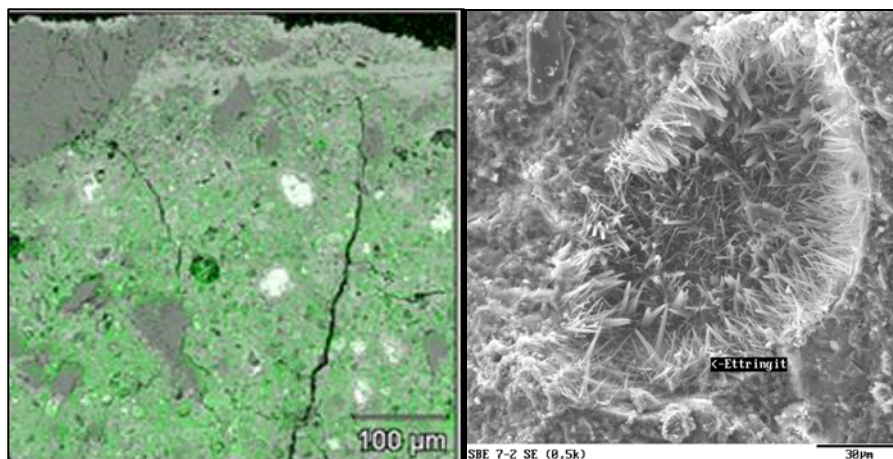


Bild 4: Sulfatverteilung im Randbereich mittels REM + ESCA (links) und REM-Aufnahme einer Pore (rechts) im Spritzbeton II/BE1/10 nach 90 Tagen Sulfatlagerung

4. Zusammenfassung

Mit den dargestellten Untersuchungen sollte das Schädigungspotential von alkalifreien Erstarrungsbeschleunigern auf Basis von Aluminiumsulfat in Spritzbetonen unter Einsatzbedingungen, wie sie in der Praxis auftreten können, untersucht werden. Aus der Veränderung mechanischer Kennwerte wie Festigkeit, dynamischer E-Modul und Längenänderung während einer Lagerungsdauer von 360 Tagen in Wasser, Natriumsulfatlösung bzw. in der Luft bei 8 °C wurde das Schädigungspotential infolge des erhöhten Sulfatgehaltes der Spritzbetone abgeschätzt und ggf. mögliche Schadensursachen durch begleitende Gefügeuntersuchungen abgeklärt.

Die mit verschiedenen alkalifreien Erstarrungsbeschleunigern untersuchten Spritzbetone ließen selbst bei hohen Dosierungen bis 10 M.-%, bezogen auf den Zementgehalt, weder makroskopische noch mikroskopische Schäden als Folge einer Bildung von sekundärem Ettringit bzw. Thaumasit erkennen. Die primäre Ettringitbildung aus den Erstarrungsbeschleunigern ist offenbar mit der Erstarrung und der nachfolgenden Wasserlagerung bei 20 °C weitgehend abgeschlossen. Eine nachträgliche Bildung von Ettringit während der Langzeitlagerung bei 8 °C findet im Allgemeinen nur in den Poren des Spritzbetons statt und verursacht damit keine schädigenden Gefügespannungen. Die gleichmäßige Verteilung der flüssigen Beschleuniger in der Betonmischung und die höhere Porosität der Spritzbetone wirken sich dabei günstig auf die Ausbildung spannungsarmer Gefüge aus.

5. Literatur

- [1] Lea, F.W.:
Lea's Chemistry of Cement and Concrete, P.C. Hewlett (Ed.), London, Großbritannien, 1998.
- [2] Maidl, B.:
Handbuch für Spritzbeton. ISBN 3-433-01196-6, Verlag für Architektur und technische Wissenschaft, Berlin, 1992.
- [3] Manns, W.; Schellhorn, H.:
Spezialzement für Spritzbeton. beton 9 (2001), S. 482-486.
- [4] Dörner, H.; Löschnig, P.:
Alkalifreie Erstarrungsbeschleuniger - eine neue Generation von Spritzbetonbeschleunigern. Ibausil 14. Internationale Baustofftagung, Bauhaus-Universität Weimar, Tagungsband Nr.1 (2000), S. 219-225.
- [5] Huber, H.; Gantner, J.; Kusterle, W.:
Spritzbeton mit alkalifreier Erstarrungsbeschleunigung - umweltneutraler Spritzbeton. Zement und Beton, 1/94.
- [6] Barker, A.P.; Hobbs, D.W.:
Performance of Portland limestone cements in mortar prisms immersed in sulfate solutions at 5 °C. Cement & Concrete Composites 21 (1999) Nr. 2, S. 129-137.
- [7] Maltese, C.; Pistolesi, C.; Bravo, A.; Cella, F.; Cerulli, T.; Salvioni, D.:
Effects of setting regulators on the efficiency of an inorganic acid based alkali-free accelerator reacting with a Portland cement. Cement & Concrete Research 37 (2007), S. 528-536.
- [8] Paglia, C.; Wombacher, F.J.; Böhni, H.K.:
Influence of Alkali-Free and Alkaline Shotcrete Accelerators within Cement Systems: Hydration, Microstructure, and Strength Development, ACI Materials Journal, 9/10 2004, S. 353-357.
- [9] Mulenga, D.:
Zum Sulfatangriff auf Beton und Mörtel einschließlich der Thaumasitbildung. Dissertation Bauhaus Universität Weimar, 2002.

- [10] DIN EN 934-5:
Zusatzmittel für Beton, Mörtel und Einpressmörtel; Teil 5: Zusatzmittel für Spritzbeton; Definitionen, Anforderungen und Konformitätskriterien; Deutsche Fassung prEN934-5:2003, Entwurf August 2003.
- [11] Breitenbücher, R.; Stark, J; Nobst, P.; Siebert, B.:
Schädigungspotential infolge erhöhtem Sulfatgehalt bei Verwendung alkalifreier Erstarrungsbeschleuniger. Forschungsbericht, ISBN 978-3-8167-7528-7, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2008.

Die Autoren

Prof. Dr.-Ing. Rolf Breitenbücher

Studium und Promotion an der TU München; Leiter des Zentralen Baustofflabors der Philipp Holzmann AG und gleichzeitig Geschäftsführer der Philipp Holzmann Bautechnik GmbH; seit 2003 Inhaber des Lehrstuhls für Baustofftechnik an der Ruhr-Universität Bochum

Rolf.Breitenbuecher@rub.de

Dipl.-Ing. Björn Siebert

Studium des Bauingenieurwesens bis 2003 an der RWTH Aachen; nach kurzer Tätigkeit in einem Technischen Büro seit Ende 2003 als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Baustofftechnik der Ruhr-Universität Bochum

Bjoern.Siebert@rub.de