

## Treiberscheinungen in Tragschichten ohne Bindemittel unter Verwendung von RC-Baustoffen aus Beton

FA 6.103

Forschungsstelle: Materialprüfanstalt (MPA) Braunschweig, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) der Technischen Universität Braunschweig

Bearbeiter: Rigo, E. / Unterderweide, K.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Bonn

Abschluss: November 2017

### 1 Aufgabenstellung

Beim Abbruch von Bauwerken beziehungsweise beim Rückbau von Betonfahrbahnen fallen unter anderem große Mengen an mineralischen Baustoffen aus Betonabbruch an, deren Verwertung ökologisch und ökonomisch als RC-Baustoff sinnvoll ist. Die wesentlichen Vorteile bei der Verwendung solcher Baustoffe liegen in der Schonung der natürlichen Lagerstätten und damit einer längeren Verfügbarkeit in Zeiten immer knapper werdender Ressourcen sowie einem geringeren Verbrauch an Deponieraum.

RC-Baustoffe aus Betonabbruch werden unter anderem seit Jahrzehnten erfolgreich in Tragschichten ohne Bindemittel (ToB) verwendet. In den letzten Jahren wurden im Straßenbau einiger Bundesländer, Schadensfälle durch Treiberscheinungen in ToB aus RC-Baustoffen mit Betonabbruch beobachtet. Durch ungleichmäßige Hebungen und Aufwölbungen der ToB kam es an darüber liegenden Asphaltsschichten zu Schäden. Derartige Schäden traten überwiegend nach Frostperioden an untergeordneten Straßen mit dünnen Asphaltdecken auf. Bei den bisherigen Laboruntersuchungen an den RC-Baustoffen aus den geschädigten Bereichen wurden hohe Wassergehalte, erhöhte Sulfatkonzentrationen und erhöhte Anteile von Materialien mit niedrigen Festigkeiten bis hin zu breiigen Strukturen festgestellt.

Der RC-Baustoff aus Betonabbruch besteht im Wesentlichen aus der als inert geltenden Gesteinskörnung des Betons sowie dem Zementstein. Letztgenannter ist nicht inert, sondern kann, zum Beispiel mit externen Sulfationen, chemische Reaktionen eingehen und neue mineralogische Phasen bilden:

#### – Ettringitbildung

Ettringit bildet sich durch Reaktion der Calciumaluminatphasen im Zementstein mit gelösten Sulfationen. Bei dieser chemischen Reaktion kommt es zu einer starken Volumenzunahme, was letztlich zu Dehnungen, Rissbildungen und Treiberscheinungen führt. Eine Verstärkung der Schäden erfolgt bei gleichzeitiger Einwirkung von Frost und Frost-Taumittel.

#### – Thaumasitbildung

Der Prozess der Thaumasitbildung wird durch einen kombinierten Angriff von gelösten Sulfat- und Carbonationen auf den Zementstein hervorgerufen. Dabei lösen sich die Festigkeitsbestimmenden CSH-Phasen des Zementsteins auf. Diese Auflösung führt zu einer Entfestigung des Zementsteins. Der Beton wird weich und zerfällt.

Voraussetzung der Ettringit- und Thaumasitbildung ist also das Vorhandensein von externen, gelösten Sulfationen. Diese können aus dem Grundwasser, Abwasser oder aus Mobilitätsprozessen sulfathaltiger Recyclingbaustoffe an den Zementstein gelangen. Kritische Sulfatgelhalte können Baurestmassen aus dem Hochbau aufweisen. Sie sind vor allem auf den Gips- oder Gipsestrichanteil im Bauschutt zurückzuführen. Es ist daher während eines Gebäudeabbruchs besonders wichtig, die gipshaltigen Materialien von den restlichen mineralischen Baustoffen zu trennen und das Recyclingmaterial hinsichtlich des Gipsgehalts zu überwachen.

In der Forschungsarbeit soll die Ursache der Treiberscheinungen in ToB geklärt werden. Ziel ist die Festlegung einer kritischen, externen Sulfatkonzentration, ab welcher die Ettringit-/Thaumasitbildung erfolgt und damit eine mögliche Volumenvergrößerung beginnt. Dazu sollen experimentelle Untersuchungen im Labormaßstab und rechnerische Simulationsverfahren angewendet werden. Ein weiteres Ziel ist die Entwicklung eines schnellen und baustellentauglichen Analyseverfahrens für die Bestimmung des Sulfatgehalts in RC-Baustoffen.

Es wurde zunächst eine ausführliche Literaturrecherche durchgeführt, die neben den Schäden von Treiberscheinungen in ToB auch die Ursache von Schäden an Bestandsbauwerken aus Beton durch Ettringit- und/oder Thaumasitbildung sowie technische Regelwerke hinsichtlich kritischer Sulfatgehalte umfasst.

Zur Ermittlung eines kritischen, externen Sulfatgehalts für RC-Baustoffe wurde ein Laborverfahren entwickelt, bei dem die Volumenzunahme von mit Gips beaufschlagten RC-Baustoffen über mehrere Monate gemessen wurde. Die RC-Baustoffe hatten eine konstante Gesteinskörnungszusammensetzung und waren während der gesamten Versuchsdauer mit hoher Feuchte beaufschlagt. Untersucht wurde der Einfluss der Betonzusammensetzung und der Temperatur. Zusätzlich wurden Lagerungsversuche in wässriger Lösung durchgeführt, bei denen bestimmte Körnungen der RC-Baustoffe mit unterschiedlichen Gipsgehalten versetzt wurden und die Ettringit-/Thaumasitbildung röntgenografisch zeitabhängig verfolgt werden konnte.

Anschließend wurde das rechnerische Simulationsverfahren Transreac eingesetzt, um durch Langzeitsimulation für ToB aus RC-Baustoffen aus Betonabbruch einen kritischen, externen Sulfatgehalt zu berechnen. Transreac beinhaltet eine Kombination aus zeit- und ortsabhängigen Berechnungen des thermodynamisch und kinetisch stabilen Phasenbestands mit einer Feuchte-, Wärme- und Stofftransportberechnung. Da Transreac erstmals für solche RC-Baustoffe eingesetzt wurde, wurden die oben genannten Laborverfahren und Lagerungsversuche zur Validierung herangezogen. Anschließend erfolgte unter Annahme möglichst realitätsnaher Bedingungen in der ToB die Bestimmung des kritischen, externen Sulfatgehalts.

Für die Entwicklung eines schnellen und baustellentauglichen Analyseverfahrens für die Sulfatanalyse wurden moderne physikalische Methoden (Infrarot- und Röntgenfluoreszenzspektro-

skopie) eingesetzt und an RC-Baustoffen aus Betonabbruch getestet.

### 2 Untersuchungsmethodik

#### 2.1 Versuche mit sulfatbeaufschlagten RC-Baustoffen im wassergesättigten Zustand

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde erstmalig eine Methode zur direkten Bestimmung der Volumenzunahme durch Ettringit- und Thaumasitbildung bei der Reaktion von Gesteinskörnungen aus RC-Baustoffen mit Gipszusätzen entwickelt. Die Versuche wurden bei 8 °C und Raumtemperatur durchgeführt.

Dazu wurden Gesteinskörnungen aus RC-Betonen beziehungsweise RC-Baustoffe mit RC-Beton (Sieblinie nach DIN EN 1744-1, ideale Fuller-Kurve) mit Calciumsulfat-Dihydrat versetzt und in einen Prüfzylinder entsprechend DIN EN 1744-1 eingebracht. Dieser wurde anschließend so in eine wassergefüllte Wanne gestellt, dass die Gesteinskörnung vollständig durchfeuchtet war. Mittels eines Wegaufnehmers wurden die Dehnungen während der Ettringit- und Thaumasitbildung gemessen und daraus die Volumenzunahme berechnet. Ein Nachteil des Verfahrens ist, dass eine Probenahme während der Einlagerungsversuche nicht möglich ist. Die Ettringit- und Thaumasitbildung lässt sich nur nach Abschluss der Versuche röntgenografisch nachweisen. Deshalb wurde parallel dazu ein Schnellverfahren entwickelt, bei dem die Gesteinskörnung in Polyethylen-Behältern mit Calciumsulfat-Dihydrat dotiert wurde. Vorteil dieser Methode ist, dass auch während der Reaktion Material entnommen und auf Ettringit- und Thaumasit untersucht werden kann. Dies ist besonders wichtig für die anschließenden Simulationsberechnungen, da mit dieser Methode das Berechnungsverfahren validiert werden konnte.

#### 2.2 Simulationsberechnungen mittels Transreac

Mithilfe des Simulationsverfahrens Transreac sollen im Rahmen des Forschungsprojekts Worst-Case-Szenarien zur Abschätzung des Grenzwerts für Sulfat im RC-Beton berechnet werden.

Transreac wurde im Fachgebiet Baustoffe der TU Braunschweig entwickelt und kombiniert die Berechnung von chemischen Reaktionen und Transportprozessen. Dabei werden auch Veränderungen der Transportparameter, zum Beispiel im Falle des inneren Angriffs durch Sulfate (wie zum Beispiel Gips) ein erhöhter Transport durch Treibdehnungen, berücksichtigt. Auf dieser Grundlage können zum Beispiel Grenzwerte für Treiberscheinungen durch Gips beziehungsweise Sulfate berechnet werden.

#### 2.3 Entwicklung einer schnellen, quantitativen Analysenmethode zur Ermittlung des Sulfatgehalts

Ziel des Forschungsprojekts war die Entwicklung einer schnellen und kostengünstigen Methode für die quantitative Analyse des Sulfatgehalts in Gesteinskörnungen aus RC-Beton.

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden folgende drei Analyseverfahren getestet:

- FTIR-Spektroskopie mittels Abgeschwächter Totalreflektion (ATR-Technik),
- Röntgenfluoreszenzspektroskopie (RFA) mittels eines Handspektrometers,
- Schwefelbestimmung durch Verbrennung mithilfe eines Schwefelanalysators.

### 3 Untersuchungsergebnisse

#### 3.1 Versuche mit sulfatbeaufschlagten RC-Baustoffen im wassergesättigten Zustand

Die Ergebnisse der Versuche im Prüfzylinder haben gezeigt, dass die Methode dazu geeignet ist, das Treibpotenzial (Volumenzunahme) von RC-Baustoffen zu bestimmen.

Es wurden baupraktische Betone verglichen, die aufgrund ihrer chemischen und physikalischen Eigenschaften laut Literatur zu sehr hoher (Worst-Case-Beton) beziehungsweise sehr niedriger Volumenvergrößerung (Best-Case-Beton) nach Gipszugabe neigen. Mit Normalzementen hergestellte RC-Betonen mit hoher Porosität (Worst-Case-Betone) und einem w/z-Wert zwischen 0,5 und 0,55 zeigten eine deutliche Volumenzunahme ab einem extern zugesetzten Gipsgehalt zwischen 0,9 und 1,8 M.-% (entspricht zwischen 0,5 und 1 M.-% Sulfat). Die Volumenzunahme beziehungsweise die Schädigung des Zementsteins wurde mithilfe der Röntgendiffraktometrie eindeutig auf eine Ettringit- und/oder Thaumasitbildung zurückgeführt. Bei einem mit sulfatbeständigem Zement (Hüttensandzement) hergestellten, extrem dichten Beton (Best-Case-Beton) wurde auch nach 150 Tagen keine Volumenzunahme festgestellt. Diesem Beton wurden maximal 5 M.-% Calciumsulfat-Dihydrat zugesetzt.

Für die Höhe der gemessenen Volumenzunahme liegt kein Bewertungsmaßstab vor. Es handelt sich um Laborversuche (ähnlich der Volumenzunahme für Stahlschlacken nach EN 1744-1), bei denen das Potenzial für eine Volumenzunahme getestet wird. Daher kann zu diesem Zeitpunkt kein Grenzwert für die Volumenzunahme angegeben werden, ab dem es zu Treibschäden im Straßenbau kommen kann.

Die beschleunigten Versuche bestätigen die Ergebnisse des neuen Prüfverfahrens. Sie zeigen, dass deutlich höhere Mengen an Ettringit und/oder Thaumasit nach Reaktion mit den Worst-Case-Betonen als bei der Reaktion mit dem Best-Case-Beton auftreten. Bereits nach zwei Wochen wurde eine Ettringit-/Thaumasitbildung im Falle der Worst-Case-Betone nachgewiesen. Ab einem extern zugesetzten Gipsgehalt von 0,5 M.-% wurde keine Ettringit-/Thaumasitbildung nach 14 Wochen festgestellt.

#### 3.2 Simulationsberechnungen mittels Transreac

Mithilfe des Simulationsverfahrens Transreac wurden Worst-Case-Szenarien zur Abschätzung des Grenzwerts für den externen Gipsgehalt (das heißt ohne den Sulfatanteil des RC-Betons) im RC-Beton berechnet. Dazu wurde ein Worst-Case-Beton herangezogen und Bedingungen für hohe Transportprozesse eingestellt. Das erste Auftreten von Dehnungen nach zehn Jahren wurde als Überschreitung des Grenzzustands

gewertet. Damit ist der so berechnete Grenzwert auf der sicheren Seite. Die rechnerische Simulation ergab einen Grenzwert für den externen Gipsgehalt im RC-Beton von  $< 1$  M.-% (entspricht  $< 0,55$  M.-% Sulfat).

Experiment und Simulation weisen also darauf hin, dass es oberhalb eines externen Gipsgehalts von 1 M.-% (0,55 M.-% Sulfat) zu Volumenvergrößerungen aufgrund von Ettringit-/Thaumasitbildung kommen kann. Dieses Ergebnis bestätigt den Grenzwert für säurelösliches Sulfat, der in den derzeit gültigen Regelwerken enthalten ist.

### 3.3 Entwicklung einer schnellen, quantitativen Analyse-methode zur Ermittlung des Sulfatgehalts

Die nasschemische Bestimmung des Sulfatgehalts gestaltet sich nach den derzeitigen Richtlinien als recht zeitintensiv. Daraufhin wurden mehrere Verfahren für die schnelle und quantitative Analyse von Sulfat in RC-Baustoffen aus Betonabbruch getestet. Mittels IR-Spektroskopie (ATR-Methode) lässt sich der Sulfatgehalt nur unzureichend quantifizieren. Die Nachweisgrenze lag bei etwa 1,5 M.-%. Unerwünschte Bestandteile (zum Beispiel Kunststoffe, Gips) können jedoch sehr schnell qualitativ nachgewiesen werden. Die Röntgenfluoreszenzanalyse und der Schwefelanalysator eignen sich für die quantitative Analyse des Gesamtsulfatgehalts (Sulfat und Sulfid) an fein aufgemahlenem RC-Material. Die Nachweisgrenze liegt bei  $< 0,5$  M.-% Sulfat. Die Analysen mittels Schwefelanalysator zeigen gegenüber den nasschemisch bestimmten Sulfatgehalten die geringsten Abweichungen.

## 4 Folgerungen für die Praxis

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde ein neues Prüfverfahren entwickelt, um das Treibpotenzial von RC-Baustoffen aus Beton in Kontakt mit Sulfaten zu bestimmen.

Weiterhin konnte ein praxistaugliches Schnellverfahren für die Analyse des Sulfatgehalts für Gesteinskörnungen aus RC-Baustoffen entwickelt werden. Für die quantitative Analyse eignen sich die Röntgenfluoreszenzspektroskopie und die IR-Detektion mittels Verbrennung in einem Schwefelanalysator.

Darüber hinaus wurde eine kritische Sulfatkonzentration für den chemischen Angriff auf Gesteinskörnungen aus RC-Baustoffen mit Beton bestimmt. Für das untersuchte Worst-Case-Szenario (Beton mit hoher Porosität) zeigen Experiment und rechnerische Simulation, dass es oberhalb eines externen Sulfatgehalts von 0,5 M.-% zu Treiberscheinungen durch Ettringit-/Thaumasitbildung kommen kann.

