

IGF-Vorhaben: 15248 N
Bewilligungszeitraum: 01.07.2007 - 30.06.2010
Forschungsthema: **Auswirkungen der Gefügedichte der Betone auf den Ablauf einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion**

1 Einleitung und Forschungsziel

In diesem IGF-Vorhaben untersuchten das Forschungsinstitut der Zementindustrie (FIZ) und die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) den Einfluss der Gefügeeigenschaften von Beton auf den Ablauf einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR). Ausgangspunkt des IGF-Vorhabens war die Feststellung, dass Betonfahrbahndecken aus den 1960er Jahren im Gegensatz zu Decken, die ab den 1980er Jahren mit Gleitschalungsfertigern gebaut wurden, bei z. T. vergleichbarer Betonzusammensetzung keine Schäden infolge einer AKR aufwiesen. Die Ursachen hierfür konnten auf Basis der seinerzeit vorliegenden Erkenntnisse nicht geklärt werden. Ziel des IGF-Vorhabens war es, zu klären, ob durch eine gezielte Beeinflussung des Betongefüges eine Schädigung infolge einer AKR vermindert bzw. verhindert werden kann.

2 Ergebnisse und Bewertung

Die Ergebnisse zeigen, dass der Wasserzementwert den Ablauf einer schädigenden AKR in Laborprüfungen nicht in allen Fällen systematisch beeinflusst. Es gibt zwei gegenläufige Tendenzen. Zum einen dehnten sich in Laborprüfungen ohne eine Alkalizufuhr von außen die Betone mit niedrigen Wasserzementwerten von 0,35 und 0,45 früher und schneller als jene mit einem Wasserzementwert von 0,55. Sie wiesen zudem die größten Maximaldehnungen auf, wobei sie je nach Gesteinskörnung und Probekörpergeometrie beim Wasserzementwert von 0,45 oder 0,35 auftraten. Beim Wasserzementwert von 0,55 traten die Dehnung von Balken und die Rissentwicklung am 30-cm-Würfel verzögert auf. Im Gegensatz dazu waren die maximale Rissweite und die Schallemission am 30-cm-Würfel in der Nebelkammer sowie die Dehnung der Balken im 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr bei geringem Wasserzementwert am kleinsten. Daraus kann abgeleitet werden, dass niedrigere Wasserzementwerte und damit dichte Betone eine schädigende AKR in Fahrbahndecken nicht zwangsläufig verstärken, wie es als Hypothese formuliert wurde. Der 30-cm-Würfel und der 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr von außen berücksichtigen besser die Bedingungen von Fahrbahndeckenbeton in der Praxis, weil der große und kompakte Würfel besser als prismatische oder zylindrische Prüfkörper vor Auslaugung der Alkalien geschützt ist und im 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr von außen die Einwirkung von Taumitteln simuliert wird.

Dass manche Fahrbahndecken aus den 1960iger Jahren keine makroskopischen Schäden infolge einer AKR aufweisen, kann möglicherweise damit erklärt werden, dass es sich hierbei teilweise um Standstreifen handelte. Bei diesen trat wahrscheinlich eine AKR auf, die aber makroskopisch zu keinem Schaden führte, weil die regelmäßige hohe dynamische Belastung durch den Verkehr fehlte. Es ist anzunehmen, dass die hohe dynamische Belastung im zwei-

ten Schritt zu einer sichtbaren Zerstörung des AKR-geschwächten Betons z. B. im Bereich der Betonfugen führt.

Im Betonversuch mit Nebelkammerlagerung und beim 60 °C-Betonversuch ohne Alkalizufuhr beeinflusste die **Probekörpergeometrie** den Verlauf der Dehnungen und infolgedessen die spätere Beurteilung der Alkaliempfindlichkeit einer Betonrezeptur. In einigen Fällen dehnten sich nur die großen Probekörper (Betonbalken 10 cm x 10 cm x 50 cm), nicht aber die kleinen Probekörper (Betonbalken 7,5 cm x 7,5 cm x 28 cm und Betonzylinder Ø 7 cm, l = 28 cm). Ob ein Unterschied zwischen dem Verhalten unterschiedlicher Probekörper vorlag, hing von der Reaktivität der Gesteinskörnung und dem Wasserzementwert ab. Es wird vermutet, dass der Grad der Auslaugung von Alkalien während der Prüfung bei kleineren Probekörpern (Betonbalken 7,5 cm x 7,5 cm x 28 cm und Betonzylinder Ø 7 cm, l = 28 cm) und mit zunehmendem Wasserzementwert zunimmt. Je höher und schneller die Auslaugung, desto schneller wird möglicherweise ein kritischer AKR-auslösender pH-Wert in der Porenlösung unterschritten. Eine schädigende AKR wird dann im Beton nicht mehr stattfinden, obwohl in kompakten oder massiven Bauteilen eine schädigende AKR zu erwarten wäre. Daher besteht weiterer Forschungsbedarf zum Einfluss der Auslaugung und Prüfkörpergeometrie auf die Untersuchungsergebnisse der AKR-Betonversuche.

Die Lagerung von Betonen im Außenlager gibt das Verhalten von Betonen der Feuchtigkeitsklasse WF unter praktischen Bedingungen wider. AKR-beschleunigende Laborprüfungen sollten dieses Verhalten präzise abbilden. Die Dehnung von Betonbalken und die Rissweitenentwicklung am 30-cm-Würfel in der 40 °C-Nebelkammer prognostizierten eine schädigende AKR in Betonen, die seit acht Jahren im Außenlager des VDZ lagern. Sie wurden mit Wasserzementwerten von 0,40 bis 0,60, einem alkaliempfindlichen Kies-Edelsplitt vom Oberrhein und mit einem hohen Alkaligehalt hergestellt. Welche Laborprüfung und welche Probekörper das Verhalten der Betone unter realen Verhältnissen am besten abbilden, werden zukünftig die Ergebnisse der im Freilager gelagerten Betonprüfkörper zeigen.

Künstliche Luftporen beeinflussten weder in der 40 °C-Nebelkammer noch im 60 °C-Betonversuch mit bzw. ohne Alkalizufuhr von außen den Verlauf der Dehnungen von Betonen mit dichten alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen signifikant.

Der Einsatz von **Fließmittel** kann die Dehnung von Beton erhöhen, wenn es zusätzliche Alkalien von rd. 600 g/m³ in den Beton einbringt. In der Praxis dürfte der Einfluss der Alkalien des Fließmittels gering sein, da die Fließmittel selten in der Höchstdosierung eingesetzt werden. Bei Fahrbahndeckenbetonen, die im 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr von außen untersucht wurden, war die Dehnungsentwicklung bei den Betonen mit Fließmittel verzögert. Die Menge an Alkalien, die durch das Fließmittel eingebracht wurde, war bei diesen Betonen gering, weil ein stark verflüssigendes Fließmittel auf PCE-Basis in geringer Dosierung eingesetzt wurde.

Die Ergebnisse im 60 °C-Betonversuch ohne Alkalizufuhr zeigen, dass die Dehnungen mit zunehmender **Verdichtung** des Betons größer werden. Eine umgekehrte Tendenz zeigt sich bei einer Alkalizufuhr von außen. Die Natrium- und Chloridionen der Prüflösung können schneller in den schlechter verdichteten Beton eindringen und eine schädigende AKR verstärken bzw. beschleunigen.

Eine **Alkalizufuhr von außen**, wie sie bei Betonfahrbahndecken durch Beaufschlagung mit Taumitteln auftritt, beschleunigt in AKR-Performance-Prüfungen mit dem 60 °C-

Betonversuch mit Alkalizufuhr von außen eine schädigende AKR. Die Dehnungen entwickelten sich schneller, wenn der Wasserzementwert hoch oder die Verdichtung schlecht war. Es kann angenommen werden, dass in beiden Fällen ein schnelleres Eindringen von Feuchtigkeit und Alkalien in den Beton möglich ist und eine schädigende AKR dadurch schneller als in dichteren Betonen abläuft, wenn die Voraussetzungen für eine schädigende AKR gegeben sind.

Eine schädigende AKR reduziert die Druckfestigkeit von Beton nur geringfügig; den **statischen E-Modul** und die **Spaltzugfestigkeit** dagegen zum Teil deutlich. Der Abfall des E-Moduls ist abhängig von der Gesteinskörnung und kann bis zu 30 % betragen. Die Spaltzugfestigkeit wurde bis zu 20 % reduziert.

Die infolge Nebelkammerlagerung und 60 °C-Betonversuch aufgetretenen Dehnungen der Zylinder (\varnothing 7 cm, l = 28 cm) wurden sowohl auf herkömmliche Weise, d.h. durch manuelle diskontinuierliche Messung, als auch kontinuierlich erfasst. Bei Nebelkammerlagerung sind die Ergebnisse der **kontinuierlichen und diskontinuierlichen Längenmessung** vergleichbar. Im Unterschied dazu lagen die im 60 °C-Betonversuch durch diskontinuierliche Messung ermittelten Dehnungen stets unter den kontinuierlich erfassten Werten. Es bleibt zu klären, worauf diese Unterschiede zurückgeführt werden können. Umfassend durchgeführte systematische Untersuchungen zur Messtechnik zeigen, dass diese mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht ursächlich für die Diskrepanz der Messwerte ist. Ob bzw. wie stark beispielsweise das für die diskontinuierliche Messung erforderliche Herunterkühlen der Proben auf 20 °C einen Einfluss auf die Dehnung hat, kann anhand der bisher erfolgten Versuche nicht gesagt werden. Zur Klärung dieses Sachverhaltes besteht weiterhin Forschungsbedarf.

Prinzipiell kann zur Schadensanalyse mit neuartiger Prüftechnik festgestellt werden, dass die Ergebnisse der **kontinuierlichen synchronen Dehnungs-, Schallemissions- und Ultraschallmessungen** die inneren Gefügeveränderungen im Beton während der AKR-provozierenden Lagerung ganzheitlich abbilden. So konnte erstmals differenziert gezeigt werden, dass sich die Gefügeveränderungen zeitlich in folgende drei Phasen einteilen lassen:

- Phase 1: Dominanz der Hydratationsprozesse (Erhöhung der Ultraschallgeschwindigkeit bei vernachlässigbarer Schallemissionsaktivität und Dehnung)
- Phase 2: Dominanz der AKR-induzierten Rissbildung (verstärkte Schallemission und Dehnung bei gleichzeitiger Verringerung der Ultraschallgeschwindigkeit)
- Phase 3: Vermutliche Dominanz der Gelbildung und/oder Selbstheilung AKR-induzierter Risse (Abklingen der Schallemission und Dehnungen bei gleichzeitiger leichter Erhöhung der Ultraschallgeschwindigkeit)

Bei der phänomenologischen Beobachtung in Phase 3 besteht noch weiterer Klärungsbedarf.

Beim erstmaligen diskontinuierlichen Einsatz der μ -Röntgen 3D-CT zur Verfolgung AKR-induzierter Schädigungsprozesse wurde der Nachweis erbracht, dass mit dieser Prüftechnik prinzipiell die AKR-induzierte Rissbildung zeitlich und räumlich verfolgt werden kann. Bei ausgewählten Proben wurde der Befund nach Abschluss der AKR-Betonversuche durch lichtmikroskopische Untersuchungen bestätigt. Als sehr vorteilhaft erwies sich, dass durch die vergleichende tomografische Analyse auch Vorschädigungen des Gesteinskorns identifi-

ziert werden konnten. Die limitierende Größe bei der μ -Röntgen 3D-CT war erwartungsgemäß die Ortsauflösung. Diese betrug bei der verwendeten Prüfkörpergeometrie (Zylinder mit einem Durchmesser von 70 mm) und der gewählten Messanordnung ca. 40 μ m. Das hat zur Folge, dass Risse erst ab einer Weite von ca. 40 μ m mit dieser Prüftechnik sicher identifiziert werden können. Sehr feine Risse, die sich in der Zementsteinmatrix bildeten, und Alkali-Kieselsäure-Gel konnten nur mittels **Lichtmikroskopie** unter UV-Licht am Dünnschliff beobachtet werden. Perspektivisch wird es jedoch mit der Einführung des Verfahrens „Region of Interest“ möglich sein, Teilvolumina des gewonnenen CT-Datensatzes mit einer zusätzlichen maximal 5fachen Vergrößerung zu durchmustern. Es könnten so Risse mit Weiten ab ca. 10 μ m abgebildet werden. Dies gilt es jedoch durch weitergehende Forschung zu untersuchen.

3 Schlussfolgerungen

Die durchgeführten Untersuchungen lassen den Schluss zu, dass eine zunehmende Gefügedichte des Betons nicht zwangsläufig zu einer verstärkten AKR führt. Durch die im Projekt untersuchte Veränderung der Gefügeeigenschaften von Beton konnte eine schädigende AKR nicht vermieden werden. Es war nicht möglich durch die Wahl eines bestimmten Wasserzementwertes, durch den Verzicht auf Fließmittel bzw. eine weiche Konsistenz oder durch den Einsatz von Luftporenbildner eine schädigende AKR zu vermeiden, wenn alkaliempfindliche Gesteinskörnungen eingesetzt wurden.

Darüber hinaus bestätigen die Untersuchungen, dass der Verlauf einer schädigenden AKR vom Widerstand des Betons gegenüber den von außen eindringenden Alkalien abhängt. Bei Fahrbahndeckenbetonen müssen auf Grund der Alkalizufuhr von außen immer ausreichend alkaliunempfindliche Gesteinskörnungen eingesetzt werden, um eine Schädigung infolge AKR sicher zu vermeiden. Ferner hat sich gezeigt, dass der Einsatz neuer innovativer Prüftechniken neue Möglichkeiten der Verfolgung AKR-induzierter Schädigungsprozesse eröffnet und diese einen Beitrag zum besseren Verständnis der AKR-induzierten Schädigungsprozesse leisten.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das IGF-Vorhaben 15248 N der Forschungsvereinigung Verein Deutscher Zementwerke e.V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.