

Rissbildung in Fahrbahndecken aus Beton – Auswirkungen von Alkali-Kieselsäure-Reaktionen (AKR), Phase II: Laboruntersuchungen zur Auswirkung von Vorbeanspruchungen und externer Alkalizufuhr

FA 8.187

Forschungsstelle: Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Baustofftechnik (Prof. Dr.-Ing. R. Breitenbücher) /
 Technische Universität München, Lehrstuhl für Baustoffkunde und Werkstoffprüfung (Prof. Dr.-Ing. P. Schießl) /
 Bauhaus-Universität Weimar, F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde (FIB) (Prof. Dr.-Ing. J. Stark)

Bearbeiter: Breitenbücher, R. / Sievering, C. / Schießl, P. / Gehlen, C. / Mazanec, O. / Stark, J. / Ludwig, H.-M. / Seyfarth, K.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bonn

Abschluss: August 2012

1 Aufgabenstellung

In jüngster Vergangenheit sind Risse, vornehmlich Netz- und Längsrisse, vereinzelt jedoch auch Querrisse, an Fahrbahndecken aus Beton festgestellt worden, die häufig mit einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) in Verbindung gebracht werden. Die beobachteten Risse sind im Hauptfahrstreifen ausgeprägter als in den weniger belasteten zweiten Fahr- und Standstreifen. Wenn auch im Rahmen von Dünnschliffuntersuchungen Reaktionsprodukte einer AKR im Nachhinein nachgewiesen werden konnten, ist dennoch ungeklärt, inwieweit diese AKR als Hauptursache für die entstandene Rissbildung zu betrachten ist bzw. welcher Anteil an der Rissbildung einer schädigenden AKR zuzuschreiben ist.

Im Rahmen der Phase I dieses Forschungsprojekts wurden vor allem Randbedingungen aus der Herstellung, Lage und Betrieb für gezielt ausgewählte Streckenlose erfasst und ausgewertet. Zudem wurden in situ gewonnene Bohrkernproben hinsichtlich AKR einschlägig untersucht. In der Überlagerung mehrerer Einwirkungen zeigte sich, dass die Rissbildung in den Betonfahrbahndecken tendenziell mit steigender Temperatur bei der Herstellung (über rd. 15 - 20 °C) zunahm. Ebenso war in einem Fall, bei dem sehr ungünstige hygrische Verhältnisse vorlagen, eine extreme Rissbildung aufgetreten. Zudem konnte an Bohrkernproben, die aus bereits rissgeschädigten Streckenlosen entnommen worden waren, eine intensivere AKR festgestellt werden als an Proben, die aus ungeschädigten Streckenlosen stammten, obwohl beide von der Betonzusammensetzung ein vergleichbares AKR-Potenzial aufwiesen. Hieraus war abzuleiten, dass die eigentliche Rissinitiierung offensichtlich stärker durch thermische/hygrische Zwangsspannungen sowie Lastspannungen beeinflusst wurde als durch eine AKR. Eine externe Alkalizufuhr führte in den Untersuchungen zudem zu größeren Dehnungen als eine reine Feuchtlagerung ohne solche Alkalizufuhr.

Im Rahmen der in situ-Untersuchungen in Phase I konnten jedoch folgende, ebenso wichtige Fragen nicht näher quantifiziert werden:

- Wie wirken sich im Betongefüge durch Vorbeanspruchungen eingeprägte Veränderungen (Mikrorisse), seien sie durch äußere Verkehrslasten oder durch lastunabhängige Zwangsbeanspruchungen hervorgerufen, auf die Entwicklung einer AKR und die weitere Rissbildung aus?
- Inwieweit intensiviert eine externe Alkalizufuhr (Taumittel) eine AKR in Fahrbahndecken aus Beton?

2 Untersuchungsmethodik

In Phase II dieses Forschungsprojekts wurden – aufbauend auf den Erkenntnissen aus Phase I – die beiden oben aufgeführten Fragen einschlägig untersucht. Dabei erfolgte auch eine versuchstechnische Verifizierung der Überlagerung von thermischen/hygrischen Spannungen bzw. Lastspannungen mit Spannungsgradienten aus einer AKR, d. h., der in Phase I zusammengefassten Erkenntnisse und Einflussgrößen. Im Rahmen der Phase II dieses Projekts arbeiteten folgende Forschungsstellen zusammen, die für die Laboruntersuchungen gleiche Ausgangsstoffe und Zusammensetzungen für die Basisbetone verwendeten:

TU München (TUM):

Im Rahmen der Laboruntersuchungen an der TUM wurden einerseits eingespannte und andererseits frei bewegliche Straßenbetonbalken bei unterschiedlichen extremen thermischen und hygrischen Erhärtingsbedingungen (Sommer- und Frühjahr/Herbst-Betonage) hergestellt. Dabei wurde für die Betonherstellung neben in Bezug auf AKR reaktiver Gesteinskörnung auch eine nichtreaktive Gesteinskörnung verwendet. Über einen definierten Lagerungszyklus wurden dann im Nachgang einerseits die entsprechenden Zwangsspannungen und andererseits der Transport einer NaCl-Lösung in den Beton eingestellt. An allen Probekörpern wurden Längsdehnungen, Rissbildung und Rissbreiten dokumentiert und mit unbelasteten Balken (frei gelagert) verglichen. Zusätzlich wurden folgende Messungen durchgeführt:

- Kontinuierliche Messung des Feuchte- und Temperaturverlaufs
- Bewertung der Eindringtiefe (NaCl-Lösung) an Bohrkernen.

Ruhr-Universität Bochum (RUB):

Im Rahmen der Laboruntersuchungen an der Ruhr-Universität Bochum wurden Betonbalken aus Straßenbeton hergestellt und nach einer Lagerungsdauer von rund 40 Tagen zyklischen Biegebeanspruchungen ausgesetzt. Die Ober- und Unterspannung entsprach dabei den Beanspruchungen in einer Beton-

fahrbahndecke aus temperaturbedingten Wölbspannungen überlagert mit einer Überrollung einer Achse eines 40 t-Lkw. Erfasst wurde dabei, inwieweit durch die zyklische Beanspruchung eine allmähliche Degradation auftritt, was i. A. mit der Entstehung von Mikrorissen einhergeht. Dies erfolgte über Messungen von Ultraschalllaufzeiten. An den unterschiedlich stark vorgeschädigten Probekörpern wurde dann eine NaCl-Lösung auf die nachgestellte Fahrbahnoberfläche aufgetragen und durch weitere zyklische Belastungen mithilfe eines belasteten Reifens mit eingewalkt. Nach Abschluss der jeweiligen Versuchsserien wurde die Eindringtiefe der NaCl-Lösung mithilfe des Silbernitrat-Tests bestimmt. Parallel zu den Laborversuchen wurden an einzelnen Autobahnlosen auch Ultraschalluntersuchungen in situ vorgenommen. Durch den Vergleich der US-Laufzeiten im Bereich der 3 Fahrstreifen wurde qualitativ auf die unterschiedliche Beanspruchung und schon aufgetretene Schädigung im Mikrogefüge vom 1. Fahrstreifen und 2. Fahrstreifen geschlossen, wobei als Referenz der i. d. R. nicht oder nur wenig befahrene Standstreifen herangezogen wurde.

Bauhaus-Universität Weimar (FIB):

An der Bauhaus-Universität Weimar wurden einerseits gezielt vorgeschädigte und andererseits nicht vorgeschädigte Betonprobekörper aus Straßenbeton einschlägig hinsichtlich AKR untersucht. Nach einer Vorbelastung der Probekörper wurden diese in der Klimasimulationskammer gelagert und die Entwicklungen der Probendehnungen infolge der Lagerung kontinuierlich erfasst. Hieraus wurde der Einfluss der Vorschädigung auf die Dehnungsentwicklung infolge AKR abgeleitet. Während der Lagerung wurden die Proben entweder mit destilliertem Wasser oder NaCl-Lösung beaufschlagt, um hieraus den Einfluss einer externen Alkalizufuhr auf die Dehnungsentwicklung näher zu untersuchen.

3 Untersuchungsergebnisse

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts (Phase II) erfolgte an der TU München eine versuchstechnische Simulation der Überlagerung von thermischen und hygri-schen Spannungen mit Spannungen aus einer AKR. Innerhalb der ersten zehn Wechsellagerungszyklen (rd. 5 Monate) konnten noch keine Schäden infolge einer AKR festgestellt werden. Daher wurde die Prüfdauer zur Erzeugung einer möglichen schädigenden AKR um weitere zehn Wechsellagerungszyklen verlängert. Im Zuge der Wechsellagerung wurden durch Taumittel Alkalien auf die Betonoberseite aufgetragen, wodurch eine AKR beschleunigt werden sollte. Im Zuge der Verlängerung (zweite 10 Zyklen) wurde anstelle einer 3 %igen eine 10 %ige NaCl-Lösung verwendet.

Es wurde festgestellt, dass eine plötzliche Abkühlung der Betonbalken mit 5 °C kalter NaCl-Lösung zu einem signifikanten Anstieg der Zwangskraft führte. Verantwortlich für den Anstieg war im Wesentlichen der große Temperaturgradient zwischen der Balkenober- und -unterseite. Jedoch konnte selbst bei extremen Einwirkungen keine Trennrissbildung bei den eingespannten Balken beobachtet werden. Mit zunehmender Dauer der Beaufschlagung nahm die Zwangskraft wieder ab. Verantwortlich hierfür waren zwei Effekte. Maßgeblich verringerte sich die Zwangskraft durch die Abnahme des Temperaturgradienten im Querschnitt (allmähliche Abkühlung der Unterseite). Zudem

führte das eingedrungene Wasser zum Quellen der oberen Betonschichten, wodurch die während des Thermoschocks aufgetretenen Zugspannungen im oberen Bereich der Balken teilweise kompensiert wurden. Zusammenfassend zeigten die Versuche, dass schnelle, sprunghafte Verformungen maßgeblich durch Temperaturunterschiede ausgelöst werden. Verformungen infolge Feuchtgradienten verlaufen etwas langsamer. Der Einfluss der Vorlagerung auf die Zwangsspannungsentwicklung der Balken war vernachlässigbar gering.

Die Chloridkonzentration der Betone am Ende der Wechsellaagerung entsprach praxisnahen Beobachtungen. Erwartungsgemäß nahm die Chloridkonzentration mit zunehmendem Abstand zur Betonoberseite ab. In Balkenmitte betrug sie zwischen 0,27 und 0,87 M.-% bezogen auf Zement. Die Balken mit AKR reaktiver Gesteinskörnung (Beton A) wiesen gegenüber dem Balken ohne reaktive Gesteinskörnung (Beton B) geringfügig höhere Chloridgehalte auf. Nach den planmäßigen zehn Wechsellaagerungszyklen und den weiteren zehn Wechsellaagerungszyklen konnten an den verwendeten Betonen noch keine Schäden infolge einer AKR festgestellt werden.

An der Ruhr-Universität Bochum wurden 10 Straßenbetonbalken zyklischen Belastungen ausgesetzt. Der Grad der erreichten Vorschädigung wurde über die Messung der Oberflächengeschwindigkeiten (Ultraschallmessungen) und dem daraus errechneten Abfall des relativen dynamischen E-Moduls bestimmt. Es zeigte sich, dass infolge der zyklischen Vorschädigung durch beispielsweise 5 Mio. Lastwechsel der relative dynamische E-Modul um rund 10 % absank. Dieser Abfall geht mit einer Degradation im Mikrogefüge des Betons einher.

Im Anschluss an die zyklische Belastung wurde in die so geschädigten Balken eine 3 %ige NaCl-Lösung mithilfe eines überrollenden Rades (Auflast 1 t) eingewalkt. Dabei wurde die Anzahl der Überrollungen variiert (1 Mio. und 2 Mio. Überrollungen, je ein Balken gleicher Vorschädigung). Anschließend wurde nach entsprechender Präparation von Teilproben die Eindringtiefe der NaCl-Lösung mit dem Silbernitrat-Test bestimmt. Es zeigte sich, dass mit zunehmender Vorschädigung die NaCl-Lösung bis zu rund 40 % (bei 5 Mio. Lastwechsel Vorschädigung und 2 Mio. Überrollungen) tiefer in das Betongefüge eindrang als ohne entsprechende Vorschädigung (Bild 1). Damit hat der Grad der vor dem Einwalken vorhandenen Vorschädigung einen signifikanten Einfluss auf das Eindringverhalten der NaCl-Lösung. Diese so in den Straßenbeton eingetragene Tausalzlösung steht dann auch in größerer Tiefe als externe Alkaliquelle einer möglichen AKR zur Verfügung.

Neben den Laboruntersuchungen zum Einfluss von vorhandenen Vorschädigungen in Straßenbetonen auf das Eindringverhalten einer NaCl-Lösung wurden zudem auch Ultraschalllaufzeiten an bestehenden Betonfahrbahndecken im Stand-, 1. und 2. Fahrstreifen in situ gemessen. Dabei zeigte sich, dass die dynamischen E-Moduln der Fahrstreifen rund 10 % niedriger waren als der gemessene Referenzwert im Standstreifen. Dieser in situ gemessene Unterschied in den dynamischen E-Moduln war ebenfalls auf eine Gefügeflockung infolge der Verkehrsbelastung zurückzuführen. Auch zeigte der Vergleich zwischen den Messungen im Labor mit den in situ-Messungen eine gute Korrelation der Ergebnisse. Um die Eindringtiefe von Tausalzlösungen in situ messen zu können, wurden zudem

entsprechende Bohrkernproben aus den Betonfahrbahndecken genommen. Anhand des Silbernitrat-Tests wurde an diesen Proben eine Eindringtiefe zwischen rund 3,0 und 3,5 cm festgestellt. Auch diese Werte zeigten eine gute Übereinstimmung mit den an Laborproben ermittelten Eindringtiefen.

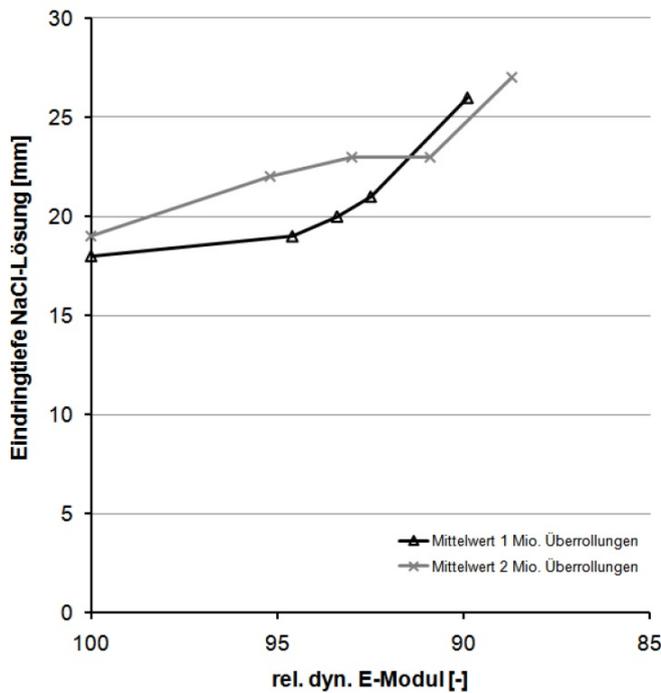


Bild 1: Eindringtiefe der NaCl-Lösung im gesamten Aufstandsbereich in Abhängigkeit der Vorschädigung und Anzahl der Überrollungen

An der Bauhaus-Universität Weimar wurden gezielte AKR-Untersuchungen unter praxisnahen Prüfbedingungen an Betonprobekörpern mittels AKR-Performance-Prüfung an vorgeschädigtem und ungeschädigtem Beton mit und ohne Alkalizufuhr von außen durchgeführt.

Für die AKR-Performance-Prüfung wurden Proben teilweise mechanisch im statischen Druckversuch vorgeschädigt. Für die Betonzusammensetzung mit alkaliunempfindlichen Rhyolith-Splitten zeigte sich erwartungsgemäß, dass die Alkalizufuhr von außen keinen signifikanten Einfluss auf die Dauerhaftigkeit hat. Dieser Befund bestätigte sich auch für die vorgeschädigten Proben dieser Betonzusammensetzung.

Dagegen war im Ergebnis der AKR-Performance-Prüfung für die Betonzusammensetzung mit alkaliempfindlichen Rhyolith-Splitten ein deutlicher Einfluss der Alkalizufuhr von außen festzustellen. Der Einfluss einer zyklisch/dynamischen Vorschädigung kam bei diesen Untersuchungen nicht so signifikant zum Ausdruck, was u. U. aber auch auf die Art der Vorschädigung und die zeitlich begrenzte Versuchsdauer zurückzuführen war. Dennoch war bei den mechanisch vorgeschädigten Proben nach 12 Prüfzyklen die AKR-bedingte Dehnung um rund 30 % größer als bei den nicht vorgeschädigten Proben. Dies entsprach bei dem vorliegenden Prüfzenario einem zeitlichen Vorsprung von etwa einem Zyklus (3 Wochen) (Bild 2).

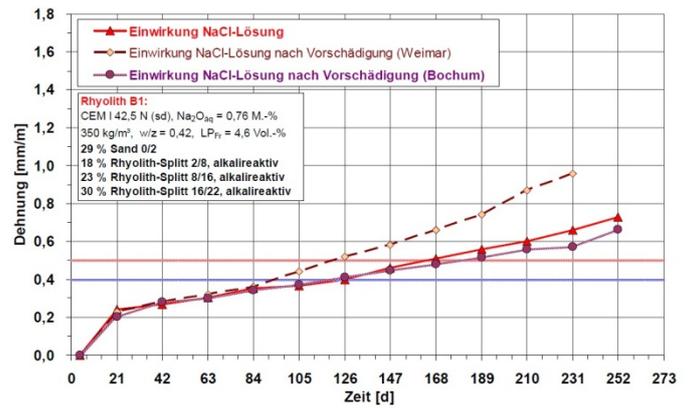


Bild 2: Dehnungsverlauf für die Betonzusammensetzung mit alkaliempfindlichen Rhyolith-Splitten A1 während der AKR-Performance-Prüfung mit Alkalizufuhr von außen sowie mit Vorschädigung (mechanische Methode FIB und zyklisch/dynamische Methode Bochum) und mit Alkalizufuhr von außen (ohne Vorschädigung)

Für baupraktische Verhältnisse ist daher abzuleiten, dass durch eine äußere Alkalizufuhr im Laborversuch, die den Einfluss alkalihaltiger Taumittel während der Nutzung widerspiegelt, eine die Dauerhaftigkeit beeinträchtigende AKR ausgelöst werden kann, wenn der Beton Gesteinskörnungen enthält, die nicht ausreichend alkaliunempfindlich sind. Für eine detailliertere Erfassung der Zusammenhänge sind weitere Untersuchungen dringend zu empfehlen.