

# **Einfluss der Porosität von Beton auf den Ablauf einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion**

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieurin

am F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde an der  
Fakultät Bauingenieurwesen der Bauhaus-Universität Weimar

vorgelegt von

Katja Volland  
geborene Hader

Mentor/Innen: Univ.-Prof. em. Dr.-Ing. habil. Jochen Stark (Weimar)  
Dir. u. Prof. Dr. rer. nat. Birgit Meng (Berlin)

Status der Doktorandin: extern

Datum: 11. Mai 2015

## **Problemstellung und Zielsetzung der Arbeit**

1. Der Dissertation liegt die Frage zugrunde, welchen Einfluss die Porosität von Beton auf den Ablauf einer schädigenden AKR hat. Insbesondere soll geklärt werden, ob der Einsatz von Gleitschalungsfertigern und die damit verbundene verringerte Porosität der Betone den Ablauf einer schädigenden AKR begünstigt.

## **Stand der Wissenschaft**

2. Die veränderte Struktur der Fahrbahndeckenbetone aufgrund des Einsatzes von Gleitschalungsfertigern seit den 1980er Jahren wurde bei der Erstellung bzw. Überarbeitung von Regelwerken bisher nicht berücksichtigt.
3. Die Verwendung von Gleitschalungs- statt Betondeckenfertigern erfordert eine weichere Konsistenz der Betone. Diese lässt sich durch Optimierung der Sieblinie, Einsatz von Betonzusatzmitteln und einen höheren Mindestzementgehalt bei nahezu gleichbleibendem w/z-Wert erreichen. Derartige Maßnahmen führen zu einer leichteren und schnelleren Verdichtung des Betons, woraus eine höhere Gefügedichtigkeit resultiert.
4. Diese höhere Gefügedichtigkeit spiegelt sich in einer Abnahme der Duktilität und einer geringeren Porosität des Betons wider. Dadurch können zum einen die infolge AKR entstehenden Zugspannungen schlechter abgebaut werden und zum anderen stehen sowohl ein höherer pH-Wert der Porenlösung als auch ein geringerer Ausweichraum für das entstehende AKR-Gel zur Verfügung. Diesen AKR-begünstigenden Faktoren ist jedoch die niedrigere Permeabilität der gefügedichteten Betone gegenüberzustellen. Dadurch wird das Eindringen externer Alkalien verringert und die Diffusion der Alkalien zu den potenziell reaktiven Gesteinskörnungen verlangsamt.
5. Daher stellt sich die Frage, ob der Einsatz von Gleitschalungsfertigern und die daraus resultierende geringere Porosität des Betons das Risiko für den Ablauf einer schädigenden AKR verstärkt oder nicht.

## **Eingesetzte Methoden**

6. Zur Beantwortung dieser Frage wird unter Anwendung einer neuartigen zerstörungsfreien Prüfmethodologie und bei variierender Porosität untersucht, welche Schädigungsparameter maßgebend für den Ablauf und die Intensität einer schädigenden AKR sind. Die berücksichtigten Schädigungsparameter sind die mechanischen Eigenschaften des Betons, der zur Verfügung stehende Expansionsraum und die im Beton ablaufenden Transportvorgänge.
7. Um den Einfluss der jeweiligen Schädigungsparameter spezifizieren zu können, gehen die Prüfungen einerseits von einem hohen internen und andererseits von einem hohen externen AKR-Schädigungspotenzial aus. In beiden Fällen erfolgen die Untersuchungen an langsam reagierenden alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen. Die unterschiedlichen Porositäten der Betone ergeben sich hauptsächlich durch Variation des w/z-Wertes.
8. Bei den Versuchen mit einem hohen internen AKR-Schädigungspotenzial stehen die mechanischen Eigenschaften und der Expansionsraum im Vordergrund; außerdem ist der Einfluss der Zugabe eines LP-Bildners zu analysieren.
9. Um ein hohes internes AKR-Schädigungspotenzial zu erreichen, kommt ein Zement mit einem hohen Alkaligehalt zum Einsatz. Die Betonprobekörper werden der 40 °C-Nebekammerlagerung und dem 60 °C-Betonversuch über Wasser unterzogen. Dabei findet eine neue Prüfmethodologie Anwendung, die der kontinuierlichen Messung der Dehnung und der ablaufenden Erhärtungs- und Rissbildungsprozesse dient. Diese Prüfmethodologie umfasst die Messung der Ultraschallgeschwindigkeit, die Schallemissionsanalyse und die  $\mu$ -3D-Computertomografie.
10. Hingegen richtet sich der Fokus bei den Versuchen mit einem hohen externen AKR-Schädigungspotenzial auf die Transportvorgänge im Beton. Zur Provokation eines hohen externen AKR-Schädigungspotenzials werden die Probekörper der FIB-Klima-wechselagerung ausgesetzt.

## Erzielte Ergebnisse

Im Rahmen der Arbeit konnten die folgenden Erkenntnisse hinsichtlich des Einflusses der Porosität von Beton auf den Ablauf einer schädigenden AKR gewonnen werden:

11. Die Vermutung, dass der Einsatz von Gleitschalungsfertigern und die damit verbundene verringerte Porosität der Fahrbahndeckenbetone den Ablauf einer schädigenden AKR bei Einsatz langsam reagierender alkaliempfindlicher Gesteinskörnungen begünstigt, bestätigt sich nicht. Vielmehr reduziert die infolge eines abnehmenden w/z-Wertes verringerte Porosität des Betons eine AKR-Schädigung.
12. Die Probekörpergeometrie hat bei variierender Porosität in der 40 °C-Nebelkammerlagerung eine erhebliche Bedeutung. Mit abnehmender Probekörpergeometrie, d.h. zunehmendem Oberflächen/Volumen-Verhältnis, nimmt die Auslaugung an Alkalien extrem zu. Infolgedessen lässt die AKR-Schädigung trotz eines hohen Ausgangspotenzials stark nach. Widersprüchliche Ergebnisse in Abhängigkeit von der Probekörpergeometrie sind die Folge. Die Ergebnisse der 300 mm<sup>3</sup>-Betonwürfel sind als maßgebend anzusehen. Sie spiegeln die Praxisbedingungen von Betonfahrbahndecken realitätsnäher wider als die Betonzylinder (Ø 70 mm, l = 280 mm) und Betonbalken (75 x 75 x 280 [mm]).
13. Die Auslaugung an Alkalien hat auch im 60 °C-Betonversuch über Wasser einen großen Einfluss auf die Ergebnisse der Betone mit variierender Porosität. Mit zunehmender Porosität werden so viele Alkalien ausgelaugt, dass auch bei einem sehr hohen Ausgangspotenzial lediglich eine geringe AKR-Schädigung einsetzt.
14. Das AKR-Schädigungspotenzial der untersuchten langsam reagierenden Gesteinskörnungen, namentlich Sauerländer Grauwacke-Splitt, Kies-Edelsplitt vom Oberrhein und Quarzporphyr-Splitt, beeinflusst zwar erwartungsgemäß die Intensität der Schädigung, hat jedoch keinen Einfluss auf die Tendenz der Ergebnisse.
15. Die Transportvorgänge stellen den maßgebenden Schädigungsparameter für den Ablauf und die Intensität einer schädigenden AKR dar. Die mechanischen Eigenschaften des Betons und der im feinen Kapillarporenbereich zur Verfügung stehende Expansionsraum haben hingegen lediglich eine untergeordnete Bedeutung.
16. Die Zugabe eines LP-Bildners hat ebenfalls nur einen geringfügigen schädigungsvermindernden Einfluss auf den Ablauf einer schädigenden AKR.

Zur Verfolgung des AKR-Schädigungsprozesses kam eine neuartige Prüfmethodologie zum Einsatz. Ferner wurde mittels verschiedener Prüftechniken der Schädigungszustand nach Abschluss der AKR-provozierenden Lagerung detailliert untersucht. Dies lässt die folgenden Bewertungen zu:

17. Durch Einsatz einer neuartigen Prüfmethodologie können in der 40 °C-Nebelkammer und im 60 °C-Betonversuch die Erhärtungs- und infolge AKR ablaufenden Rissbildungsprozesse detailliert erfasst werden. Diese neue Prüfmethodologie umfasst die kontinuierliche Messung von Dehnung, Ultraschallgeschwindigkeit und Schallemissionsaktivität sowie diskontinuierlich angeordnete tomografische Untersuchungen. Dabei ist eine gute Korrelation der genannten Messverfahren untereinander gegeben.
18. Sowohl an den 300 mm<sup>3</sup>-Betonwürfeln in der 40 °C-Nebelkammer als auch an den kontinuierlich gelagerten Betonzylindern (Ø 70 mm, l = 280 mm) im 60 °C-Betonversuch über Wasser konnten anhand der Ergebnisse der Ultraschall- und Schallemissionsmessung eine Dominanz der drei folgenden Phasen beobachtet werden:
  - (I) Hydratation,
  - (II) Rissbildung und Rissaufweitung,
  - (III) vermutlich Verfüllung der Risse mit AKR-Gel und/oder sekundären Reaktionsprodukten, wie beispielsweise Ettringit, bzw. Selbstheilung des Betons.
19. Die an den Betonzylindern in der 40 °C-Nebelkammer erfassten kontinuierlichen Dehnungen sind vergleichbar zu den diskontinuierlich gemessenen Werten. Die kurzzeitige Entnahme der Probekörper aus der 40 °C-Nebelkammer zur Durchführung der Messungen wirkt sich demnach nicht wesentlich auf die ermittelten Dehnungen aus.

20. Bei dem 60 °C-Betonversuch über Wasser liegen die kontinuierlich gemessenen Dehnungen signifikant unter den diskontinuierlich ermittelten Werten.
- Die Hauptursache des unterschiedlichen Dehnverhaltens ist in der Anzahl der je Behälter eingelagerten Probekörper und dem damit verbundenen variierenden Auslaugverhalten an Alkalien und Sulfaten zu sehen.
  - Mit zunehmender Probekörperanzahl je Edelstahlbehälter werden weniger Alkalien und Sulfate ausgelaugt, so dass ein höheres AKR-Schädigungspotenzial bestehen bleibt. Daraus resultieren erhöhte Dehnungen infolge AKR.
  - Die Menge der in der Lösung gemessenen Alkalien ist bei kontinuierlicher Lagerung von drei Probekörpern im Vergleich zur diskontinuierlichen Lagerung auch bei identischer Probekörperanzahl je Edelstahlbehälter geringfügig erhöht. Dies führt zu leicht reduzierten Dehnungen.
  - Die Dehnung der Probekörper nach kontinuierlicher Lagerung ist im Vergleich zur diskontinuierlichen Lagerung auch bei identischer Probekörperanzahl je Edelstahlbehälter leicht reduziert. Dies ist auf die unterschiedliche Zusammensetzung des gebildeten AKR-Gels zurückzuführen. Bei kontinuierlicher Lagerung ist das AKR-Gel – im Vergleich zur diskontinuierlichen Lagerung – reicher an Kaliumoxid ( $K_2O$ ) und Siliziumoxid ( $SiO_2$ ), jedoch ärmer an Calciumoxid ( $CaO$ ). AKR-Gele nehmen mit zunehmendem Alkaligehalt mehr Wasser auf, so dass die Viskosität des Gels sinkt. Die während der kontinuierlichen Lagerung entstandenen AKR-Gele besitzen demnach eine geringere Viskosität und können folglich geringere Quelldrücke aufbauen.
  - Die unterschiedliche Zusammensetzung des AKR-Gels in kontinuierlich und diskontinuierlich gelagerten Probekörpern resultiert vermutlich aus dem Abkühlen der diskontinuierlich gelagerten Probekörper jeweils nach 28 Tagen.
21. Wie erwartet, führt ein erhöhter pH-Wert der Lösung im Edelstahlbehälter – ohne zusätzliche Alkalizufuhr – zu einem Anstieg der Dehnungen im 60 °C-Betonversuch.
22. Durch Anordnung computertomografischer Untersuchungen kann zwischen bereits vorhandenen und erst während der AKR-Lagerung initiierten Rissen unterscheiden werden. Weiterhin kann mittels der tomografischen Untersuchungen beobachtet werden, wann die Risse infolge der AKR-provozierenden Lagerung entstehen und wie sie sich im weiteren Verlauf aufweiten.
23. Die Computertomographie bietet die Möglichkeit, besonders interessierende Bereiche für aufbauende mikroskopische Untersuchungen gezielt auszuwählen.
24. Die Messung der Eigenschwingzeiten reagiert im Vergleich zur Messung der Ultraschalllaufzeiten sensibler auf die ablaufenden anfänglich dominierenden Hydratations- und sich anschließenden Rissbildungsprozesse.
25. Die laserinduzierte Breakdown-Spektroskopie stellt das geeignete Verfahren zum Nachweis des eingedrungenen Natriums nach erfolgter AKR-Performance-Prüfung mit externer Alkalizufuhr dar. Die Elementverteilung kann mit diesem Verfahren auch bei kleinen Mengen qualitativ und quantitativ erfasst werden.
26. Hingegen ist bei Untersuchungen mit Mikro-Röntgenfluoreszenzanalyse eine hohe Konzentration an Natrium im Beton erforderlich, um dieses überhaupt nachweisen zu können.

Der Ablauf einer schädigenden AKR bei der FIB-Klimawechsellaagerung kann durch wie folgt beeinflusst werden:

27. Eine reduzierte Lagerungstemperatur während der Nebelphase der FIB-Klimawechsellaagerung von 40 °C anstelle von 45 °C hat eine signifikante Reduzierung der ablaufenden AKR-Schädigungsprozesse zur Folge.
28. Natriumchlorid dringt infolge einer Behandlung der frisch hergestellten Betonoberfläche mit Zemdrain<sup>®</sup> in geringerer Menge und Tiefe in den Beton ein. Dies führt bis zu einer Tiefe von ca. 50 mm zu einer reduzierten Bildung von AKR-Gel.