

# Quantitative Rissanalyse im Fahrbahndeckenbeton mit der 3D- Computertomographie

Dietmar MEINEL<sup>1</sup>, Karsten EHRIG<sup>1</sup>, Frank WEISE<sup>1</sup>, Olaf PAETSCH<sup>2</sup>

<sup>1</sup> BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin  
dietmar.meinel@bam.de

<sup>2</sup> Zuse-Institut Berlin (ZIB), Berlin  
paetsch@zib.de

**Kurzfassung.** Die Dauerhaftigkeit von Fahrbahndeckenbetonen wird maßgebend von ihrer Mikrostruktur bestimmt. Diese erfährt durch die äußeren Einwirkungen durch Klima und Verkehr über die Nutzungsdauer eine signifikante Veränderung. Im Kontext der in den letzten Jahren verstärkt auftretenden Schadensfälle infolge der Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) im deutschen Bundesautobahnnetz stellt sich die Frage, in welchem Maße die ermüdungsinduzierte Betondegradation den Stofftransport und damit die AKR-induzierte Rissbildung begünstigt. Dabei kommt der hochauflösenden räumlichen Quantifizierung der Rissbildung eine zentrale Bedeutung zu und bildet die Basis für die Modellierung der sich überlagernden Schädigungsprozesse.

Gegenstand dieses Beitrags ist die Darstellung der Leistungsfähigkeit der 3D-Computertomographie (3D-CT) bei der quantitativen Rissanalyse in Betonen ohne und mit Ermüdungsbeanspruchung. Die Untersuchungen erfolgten dabei exemplarisch an Bohrkernen, die einem großformatigen Schwingbalken entnommen wurden. Zur Erreichung einer hinreichenden Ortsauflösung gelangte dabei die Region of Interest – Technik (ROI) zum Einsatz. Die Rissauswertung erfolgte mit einem gemeinsam vom ZIB und der BAM entwickelten Softwaretool für die automatisierte Risserkennung. So erlaubt dieses eine quantitative statistische Auswertung von Rissparametern, wie z.B. Risslänge, -breite und -orientierung. Die Notwendigkeit der automatisierten Rissauswertung beruht darauf, dass die Größe des CT-Datensatzes (mehrere GB) eine vollständige manuelle Segmentierung der Risse im 3D-Raum einen unverhältnismäßigen hohen Aufwand erfordert. Eine automatische Risserkennung liefert darüber hinaus noch weitere Daten, die eine nachträgliche Bearbeitung und Analyse der Risse erst möglich macht. Rissveränderungen über der Zeit können ebenfalls visualisiert und statistisch aufbereitet werden.

## 1. Einführung

Für die Herstellung dauerhafter und leistungsfähiger Bundesautobahnen, die im Laufe ihrer Nutzung mannigfaltigen hohen Beanspruchungen unterliegen, hat sich die Betonbauweise seit langem bewährt. Die hohe Wirtschaftlichkeit dieser Bauweise ist jedoch nur dann gegeben, wenn keine unplanmäßigen Instandsetzungs- oder Ersatzmaßnahmen vor Ende der geplanten Nutzungsdauer notwendig werden. In jüngster Vergangenheit wurden jedoch vermehrt Schäden an Betonfahrbahndecken festgestellt, deren Ursache mit der Alkali-

Kieselsäure-Reaktionen (AKR) in Verbindung gebracht wird. Im ungünstigsten Fall hat dies eine Halbierung der geplanten Nutzungsdauer von 30 Jahren zur Folge.

Aufgrund der hohen volkswirtschaftlichen Schäden an Betonfahrbahndecken durch die AKR wurde die Forschung auf diesem Gebiet in den letzten 15 Jahren stark intensiviert. Zentraler Forschungsgegenstand war bisher neben den präventiven betontechnologischen Maßnahmen vor allem die Entwicklung performanceorientierter Prüfverfahren zur AKR-Prävention. Dabei wurden insbesondere die klimatischen Einwirkungen auf die Betonfahrbahndecke und der externe Alkalieintrag zeitraffend simuliert. Die zusätzlich interagierenden mechanischen Einwirkungen aus dem Verkehr fanden bislang keine Berücksichtigung.

Vor diesem Hintergrund verfolgt die aus fünf Forschungspartnern bestehende und 2011 eingerichtete DFG-Forschergruppe 1498 u. a. das Ziel, den Einfluss einer Ermüdungsbeanspruchung bzw. Vorschädigung auf den AKR-Schädigungsprozess zu klären. Die hierfür erforderliche Beschreibung der vielfältigen interagierenden Schädigungs- und Transportprozesse erfordert eine enge Verknüpfung von Experimenten mit einer mehrskaligen Modellierung. Die experimentelle Basis bildet die mechanische Vorschädigung (Ermüdung) großformatiger Balken aus einem Fahrbahndeckenbeton mit einem erhöhten AKR-Schädigungspotenzial. An den anschließend gewonnenen Kleinproben werden die Auswirkungen der mechanischen Vorschädigung auf das Betongefüge und die interagierenden Transport- und Schädigungsprozesse analysiert.

Hauptgegenstand dieses Beitrags ist nach einer kurzen Einführung in die Grundlagen der ablaufenden Schädigungsprozesse die räumliche Charakterisierung der ermüdungsinduzierten Rissbildung an Bohrkernen aus großformatigen, zyklisch beanspruchten Balken aus einem repräsentativen Fahrbahndeckenbeton mit der 3D-Computertomografie. Zusätzlich werden die Auswirkungen der Rissbildung auf den Feuchtetransport mittels tomografischer In-situ Messungen während eines eindimensionalen kapillaren Wasseraufsaugversuchs analysiert. Beide aufeinander aufbauende Untersuchungen bilden die Grundlage für die Modellbildung der ermüdungsinduzierten Betondegradation und des interagierenden Feuchtetransports in der Forschergruppe.

## **2. Schädigungsmechanismen**

### *2.1 Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR)*

Vereinfacht lässt sich die AKR im Festbeton als eine chemische Reaktion der reaktiven Kieselsäure ( $\text{SiO}_2$ ) der alkaliempfindlichen Gesteinskörnung mit den Alkalihydroxiden (NaOH, KOH) der basischen Porenlösung und Wasser unter Bildung eines AKR-Gels beschreiben. Die Reaktivität der Gesteinskörnung wird dabei maßgebend von der  $\text{SiO}_2$ -Modifikation bestimmt. So muss das  $\text{SiO}_2$  entweder amorph, mikrokristallin oder gittergestört sein. Die in der Porenlösung enthaltenen Alkalihydroxide stammen vor allem aus dem Zement. Zusätzlich können extern über den winterlichen Taumittelauftrag Alkalien in die Betonfahrbahndecke eingetragen werden. Das gebildete AKR-Gel ist stark hygroskopisch und kann deshalb in größerem Umfang Wasser unter Volumenvergrößerung einlagern. Das wiederum führt bei zusätzlicher Anwesenheit von Calcium aus der Porenlösung zu Quelldrücke bis zu  $20 \text{ N/mm}^2$  [3]. Überschreiten die so entstehenden Quelldrücke die Zugfestigkeit des Betons, setzt eine Rissbildung ein. Man spricht dann von einer betonschädigenden AKR.

Einen zusammenfassenden Überblick über die gleichzeitig zu erfüllenden Voraussetzungen für eine AKR gibt die Abbildung 1.

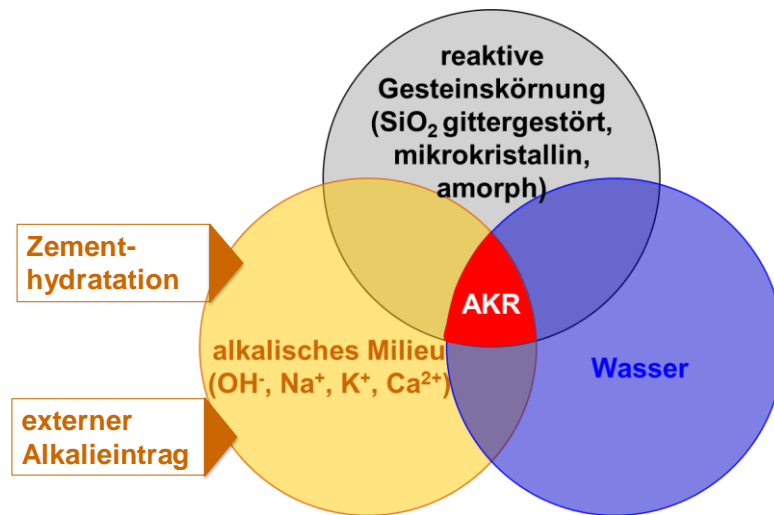


Abb. 1: Voraussetzungen für das Auftreten einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) im Beton

## 2.2 Ermüdungsinduzierte Betondegradation und interagierender Feuchtetransport

Maßgebenden Einfluss auf die Intensität des AKR-Schädigungsprozesses hat das am bzw. im reaktiven Gesteinskorn herrschende Angebot an extern zugeführtem Wasser und eingetragenen Alkalien. Der Transport dieser Medien wird entscheidend vom Betongefüge bestimmt. In diesem Kontext kommt der ermüdungsinduzierten Betondegradation durch die bei Betonfahrbahndecken maßgebende Biegezugschwellbelastung eine zentrale Bedeutung zu. So werden durch eine derartige zyklische Beanspruchung Mikrorisse im Betongefüge erzeugt, die die Materialeigenschaften signifikant beeinflussen. Die Ausprägung des Rissystems wird dabei vor allem von der Oberspannung, der Schwingbreite und der Lastwechselzahl bestimmt. Charakteristisch für den ermüdungsinduzierten Schädigungsprozess ist die Tatsache, dass es bei einer hinreichenden Anzahl von Lastwechseln bereits zu einem Materialversagen kommt, wenn die Oberspannung deutlich unterhalb der statischen Biegefestigkeit des Betons liegt. Die ermüdungsinduzierte Schädigungsevolution im Beton ist dabei durch drei zeitlich aufeinander folgende Phasen geprägt (Abbildung 2). In der ersten Phase tritt anfangs eine sehr hohe Rissaktivität auf, die dann relativ schnell abklingt. Hier finden vor allem Lastumlagerungen für einen Belastungsausgleich statt. Die zweite Phase ist durch ein stabiles kontinuierliches Risswachstum geprägt. In der sich anschließenden dritten instabilen Phase konzentriert sich die Schädigung lokal und führt mit zunehmender Lastwechselzahl zum Versagen des Bauteils.

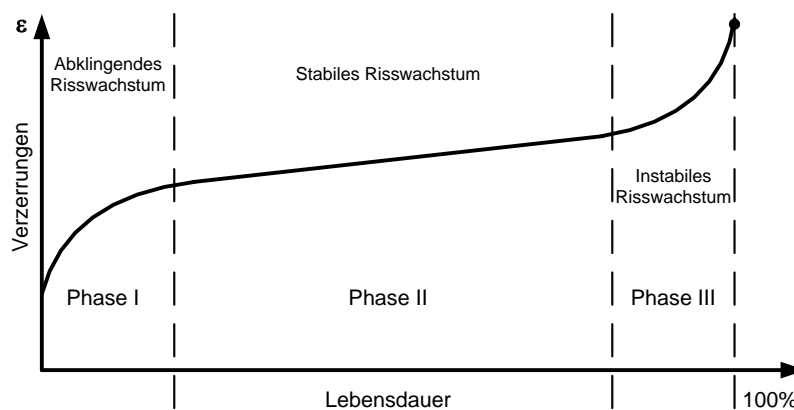


Abb. 2: Schädigungsevolution in einem Beton bei Ermüdungsbeanspruchung in Anlehnung an [2]

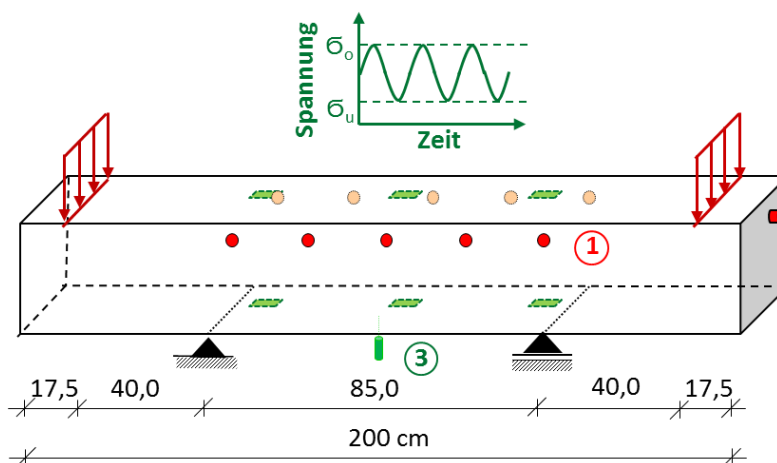
### 3. Vorschädigung mit Schadensmonitoring

#### 3.1 Probenherstellung

Für die Ermüdungsversuche wurden großformatige Balken aus einem typischen Fahrbahndeckenbeton hergestellt. Allerdings wurde dieser aufgrund der geplanten AKR-provozierenden Lagerungen ohne externe Alkalizufuhr nach der Ermüdungsbeanspruchung mit NaCl aufdotiert. Das  $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalent erhöhte sich so von 0,73 auf 1,30 M.-%. Trotz Aufdotierung konnte eine gute Verarbeitbarkeit und ausreichende Festigkeitsentwicklung des Fahrbahndeckenbetons sichergestellt werden. Mit der Wahl des Aufdotierungsmittels wurde dem Umstand Rechnung getragen, dass Natriumchlorid im Winter beim Streuen von Betonfahrbahnen eingesetzt wird. Als alkaliempfindliche Gesteinskörnung gelangten Oberrheinsplitt und Granodiorit zum Einsatz.

#### 3.2 Versuchsanordnung für zyklische Vorschädigung mit Schadensmonitoring

Die hergestellten Schwingbalken mit den Abmessungen  $27 \times 50 \times 200 \text{ cm}^3$  sollen einen repräsentativen Ausschnitt einer Betonfahrbahndecke darstellen. Mit dem Ziel des Eintrages einer mechanischen Vorschädigung wurden sie nach 56-tägiger Folienvorlagerung einem zyklischen 4-Punkt-Biegeversuch unterzogen. Die prinzipielle Versuchsanordnung ist in Abbildung 3 schematisch dargestellt.



#### ① SEA-/US-Sensoren    ③ Dehnmessstreifen / induktive Wegaufnehmer

Abb. 3: Versuchsanordnung für die mechanische Vorschädigung durch zyklische 4-Punkt-Biegebeanspruchung mit kontinuierlicher Erfassung ausgewählter Zustands- und Schädigungsindikatoren

Bei dem gewählten statischen System handelt es sich um einen Träger auf zwei Stützen mit beidseitiger Anordnung eines Kragarms. Die zyklische Lasteintragung erfolgte symmetrisch im äußeren Randbereich der Kragarme. Dadurch wird eine konstante Biegezugbeanspruchung auf der mit einem Besenstrich texturierten Oberseite des Schwingbalkens zwischen den Auflagern erzeugt.

Die Höhe der Oberspannung wurde so festgelegt, dass diese 60 % der Biegezugfestigkeit des untersuchten Betons entspricht. Als Bezugswert diente dabei die an den Prismen ( $15 \times 15 \times 60 \text{ cm}^3$ ) nach 56-tägiger Folienlagerung ermittelte minimale Biegezugfestigkeit. Die Schwingbreite ( $\sigma_o - \sigma_u$ ) betrug einheitlich  $1,0 \text{ N/mm}^2$ . Wie in [4] eingehend erläutert wird, entsprechen die gewählten Ober- und Unterspannungen den aus realitätsnahen Lastfällen resultierenden Beanspruchungen in einer Betonfahrbahndecke.

Aufbauend auf die in [5] gesammelten positiven Erfahrungen wurde eine Belastungsfrequenz von 7 Hz gewählt. Die maximale Lastwechselzahl betrug 5 Millionen. Zur zerstörungsfreien Erfassung der Schädigungsevolution im Schwingbalken während der zyklischen Beanspruchung wurden intermittierende Ruhe- und Belastungszyklen eingeführt.

Zur Charakterisierung des Gefügestandes in der äußeren Betonrandzone erfolgten im Ruhezyklus Ultraschallmessungen. Während der Belastungszyklen wurde die Betongradation durch Dehnungsmessung und Schallemissionsanalyse (SEA) in-situ verfolgt.

Der anfängliche starke Abfall des diskontinuierlich in der jeweiligen Ruhephase bestimmten relativen dynamischen E-Moduls um ca. 18 % in der Phase 1 der Ermüdungsbeanspruchung lässt auf eine stark ausgeprägte Mikrorissbildung in der mit einem Besenstrich versehenen Betonrandzone schließen. Die sich anschließende stabile Risswachstumsphase ist nur von geringer Dauer, da der betrachtete Balken bereits nach 3,25 Millionen Lastwechseln versagte. Die zeitliche Entwicklung der Betondegradation in der Betonrandzone wird am besten mit den kontinuierlichen Dehnungs- und Schallemissionsmessungen abgebildet. So sind hier die im Abschnitt 2.2 bereits beschriebenen drei typischen Phasen der Schädigungsevolution während der Ermüdungsbeanspruchung deutlich erkennbar. Dabei zeigt sich, dass sich das Versagen des Schwingbalkens sich nicht langfristig ankündigt, sondern vielmehr mit einer geringen Vorwarnzeit auftritt.

## **4. 3D-Computertomographie (CT)**

### *4.1 Prüfkörper*

Die Leistungsfähigkeit der Röntgen 3D-CT wird nachfolgend exemplarisch an einem aus dem mechanisch vorgeschädigten Schwingbalken C3-IV entnommenen Bohrkern mit einem Durchmesser von 30 mm aufgezeigt. Die vertikale Bohrkernentnahme über die gesamte Höhe des Balkens erfolgte dabei ca. 20 cm von der Bruchfläche entfernt, wo der Schwingbalken im zyklischen 4-Punkt-Biegeversuch versagte. Zur Berücksichtigung einer unterschiedlichen mechanischen Vorschädigung wurden in einem ersten Schritt die tomografischen Untersuchungen des Bohrkerns in zwei Messbereichen durchgeführt. Der obere Messbereich repräsentiert dabei die äußere Betonrandzone mit der maximalen Biegezugbeanspruchung auf der Oberseite des Schwingbalkens. Der mittlere Messbereich hingegen befindet sich aus statischer Sicht in der Nähe der Nulllinie und hat damit eine vernachlässigbare mechanische Beanspruchung bzw. Betondegradation erfahren. Zur Charakterisierung des Betongefüges in der gesamten oberen Bohrkernhälfte wurden im zweiten Schritt weitere 16 Tomografien mit verminderter Detailerkennbarkeit durchgeführt.

### *4.2 ROI-Messung*

Um die für eine effiziente automatische Risserkennung notwendige Voxelgröße von ca. 8  $\mu\text{m}$  zu erreichen, wurde die Region-of-Interest (ROI) CT Technik eingesetzt [6]. Diese bildet in der Horizontalen nur den inneren Bereich um die Drehachse (anstelle des vollständigen Objektumfangs) ab und ermöglicht so eine höhere Ortsauflösung (Abb. 4).

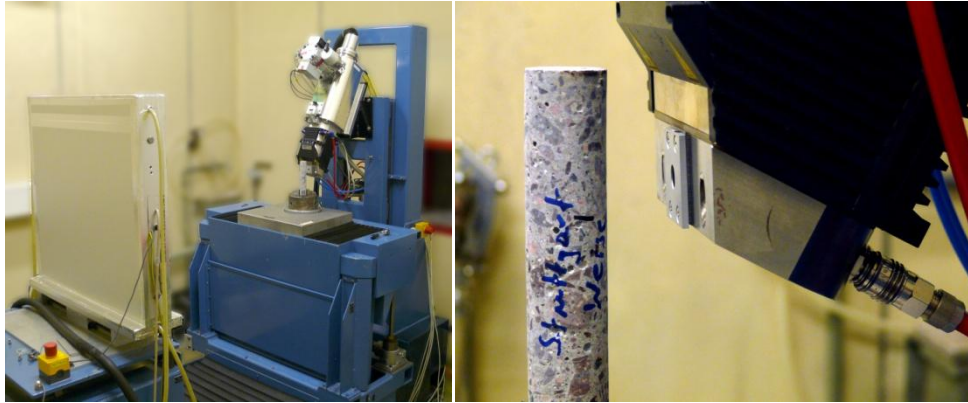


Abb. 4: 3D  $\mu$ CT Anlage (links), Bohrkern (Durchmesser: 3cm) in ROI-Position (rechts)

Für die Rekonstruktion der ROI-CT wurde die Software CERA der Siemens AG eingesetzt. Sie bietet einen speziellen Bildfilter und eine automatische Bildausrichtung (Alignment) für die ROI-CT. Um leichte Artefakte im Randbereich auszuschließen wurde ein Ausschnitt von  $1602 \times 1602 \times 1180$  Bildpunkte um das Drehzentrum der Probe zur Datenauswertung gewählt. Nach der Rekonstruktion im Gleitkommazahlbereich (Float) erfolgte eine Konvertierung in den 8-Bit Grauwertbereich zur Speicherreduktion. Der resultierende Volumendatensatz hat eine Größe von ca. 3 GB. Um ein möglichst gutes Signal-zu-Rausch Verhältnis bei den Messungen im oberen und mittleren Messbereich des Bohrkerns (Messungen 5671 und 5687) zu erzielen, wurden die Daten mit einer Belichtungszeit von 20 Sekunden (arithmetisches Mittel von 10 Projektionsaufnahmen über 2 Sekunden) mit 2400 Winkelschritten über  $360^\circ$  aufgenommen. Zusätzlich gelangte ein 1 mm Cu-Vorfilter bei einer Röhrenspannung von 130 kV und einem Röhrenstrom von  $160 \mu\text{A}$  mit einem 2k PerkinElmer Flachdetektor zum Einsatz.

Weiterhin wurden kontinuierlich ROI-CT Aufnahmen mit einer Belichtungszeit von 8 Sekunden (arithmetisches Mittel von 4 Projektionsaufnahmen über 2 Sekunden) beginnend vom oberen Messbereich im Abstand von 9 mm (Höhenversatz) durchgeführt. Durch die reduzierte Belichtungszeit und das daraus resultierende schlechtere Signal-zu-Rausch Verhältnis ergibt sich eine geringere Detailerkennbarkeit mit der automatischen Risserkennung. Das spiegelt sich in einem geringeren Rissvolumen wieder ( $2,53 \text{ mm}^3$  statt  $3,77 \text{ mm}^3$ ). Die reduzierte Belichtungszeit war aus technischen Gründen gewählt worden, um die Messzeiten insgesamt auf ein akzeptables Maß zu beschränken.

## 5. Rissanalyse

### 5.1 Prinzip

Zur quantitativen Auswertung der Risse in der Betonmatrix müssen die Risse identifiziert und deren charakteristische Kennwerte ermittelt werden. Aufgrund der bei den CT-Messungen anfallenden großen Datenmengen kann dies nur automatisch erfolgen [7, 8, 9]. Dazu wurde vom Zuse-Institut Berlin (ZIB) in Zusammenarbeit mit dem Fachbereich 8.5 der BAM eine Software entwickelt, die in das Programm ZIBAmira implementiert wurde [10]. Die automatische Risserkennung mit dem Tool CrackDetection aus ZIBAmira Version 2013.48 benötigt für einen 3D-Datensatz ( $1602 \times 1602 \times 1180$  Bildpunkte) mit einer NVIDIA Geforce GTX 650 Ti Grafikkarte eine Rechenzeit von ca. 20 Stunden. Die Risserkennung und -auswertung erfolgt dabei in mehreren Schritten. Nach dem Einlesen des CT-Datensatzes in ZIBAmira wird eine Maske erzeugt, um Fehler am Objektrand zu vermeiden. Im nächsten Schritt wird eine merkmalserehaltende iterative Medianfilterung durchgeführt. Die eigentliche Risserkennung erfolgt dann mittels Mustererkennung

(Template Matching). Alle gefundenen Risse lassen sich im 2D-Schnitt oder als 3D-Isosfläche darstellen (Abb. 5). Ebenso sind Visualisierungen der Lage und Orientierung von Rissen im Probekörper möglich. Für die quantitative Auswertung auf Voxelbasis werden die Einzelrisse mit ihren Eigenschaften in Listen abgelegt.

## 5.2 Ergebnisse und Auswertung

### 5.2.1 Rissanalyse im oberen und mittleren Messbereich des Bohrkerns

Die mittels automatisiertem Risserkennungstool im oberen maximal beanspruchten sowie im mittleren quasi unbeanspruchten Messbereich des Bohrkerns extrahierten Risse aus dem ROI-Teilvolumina sind der Abbildung 5 zu entnehmen.

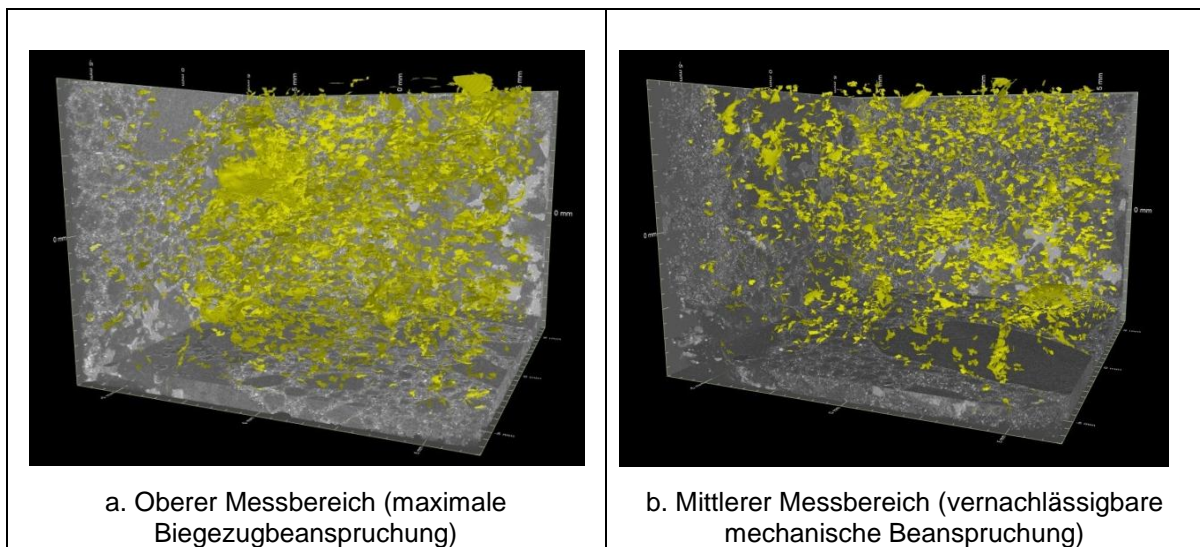


Abb. 5: 3D-Isosurface Darstellung der Risse in beiden ROI-Messbereichen des Bohrkerns aus dem mechanisch vorgeschädigten Balken C3-IV

Beim Vergleich dieser Bilder 5a und 5b ist bereits ein verstärktes Rissaufkommen im oberen Messbereich mit der stark ausgeprägten Betondegradation augenscheinlich. Belegt wird dies auch durch die statistische Auswertung der Anzahl und des Volumens der Risse (Tab. 1). So ist das gesamte Volumen aller Risse im oberen Messbereich mehr als doppelt so hoch wie im mittleren Bereich.

Tab. 1: Vergleich Risserkennung Beton 17-IV oberer und mittlerer Bereich aus ROI-CT (Detektierbare Rissbreite: ca. 5µm, Ausschnittgröße: 1602 x 1602 x 1180 Voxel, Ausschnittsvolumen: 1536,78 mm<sup>3</sup>)

Messbereich	Anzahl der Risse	Rissvolumen gesamt	Mittleres Rissvolumen pro Riss
Oben (5671)	3697	3,77 mm <sup>3</sup>	0,00102 mm <sup>3</sup>
Mitte (5687)	2026	1,51 mm <sup>3</sup>	0,00075 mm <sup>3</sup>

Einschränkend muss jedoch auch erwähnt werden, dass noch Verbesserungsbedarf beim Softwaretool zur automatisierten Risserkennung besteht. So bereitet mitunter die Erkennbarkeit eines durchgehenden Risses noch Probleme, was die Belastbarkeit der ausgewiesenen Rissanzahl einschränkt. Weiterhin bedarf es insbesondere bei einem geringen radiografischen Kontrast zwischen der Gesteinskörnung und der Zement-

steinmatrix bei der automatisierten Lagezuordnung der Risse (Korninneres, Korngrenze, Zementsteinmatrix) einer geeigneten Softwareerweiterung zur Segmentierung.

### 5.2.2 Rissanalyse in der oberen Bohrkernhälfte

Die Auswertung der in 9 mm Abstand aufeinanderfolgenden ROI-Bereiche zeigt die Abnahme der Risse und des Rissvolumens (Abb. 6). Miterfasst werden hierbei auch die in der oberflächennahen Betonschicht durch Schwinden im Frischbeton entstandenen Risse.

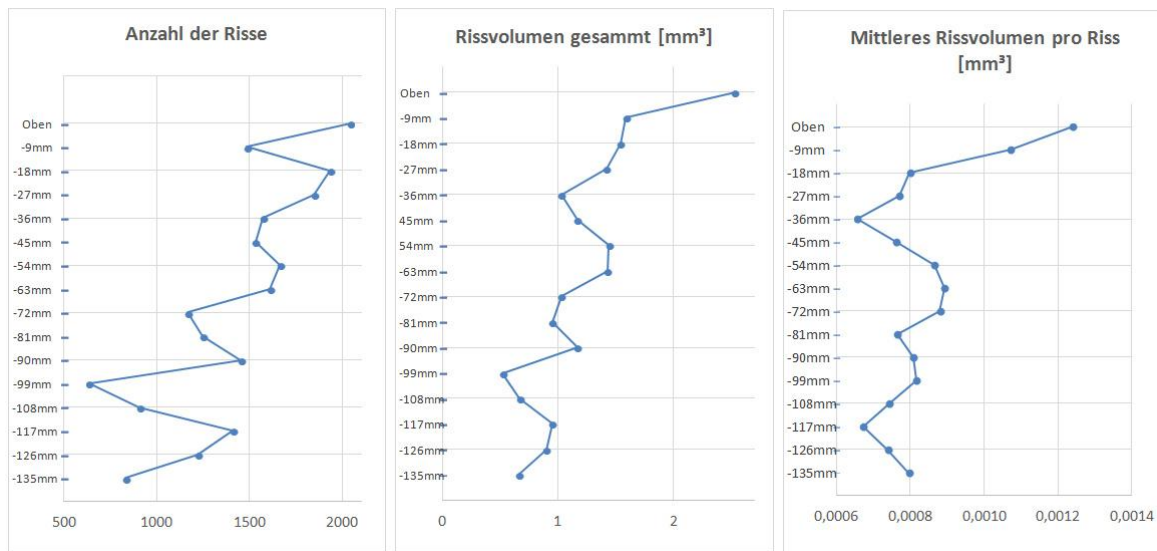


Abb. 6: Vergleich Risserkennung Beton 17-IV Bereiche aus ROI-CT  
 Messzeit: 5 h 20min, Integrationszeit: 8s, 2400 Winkelschritte über 360°, 130 kV, 1mm Cu Vorfilter  
 Ausschnittgröße: 1602x1602x1180 Voxel, Ausschnittsvolumen: 1536,78 mm<sup>3</sup>

Obwohl eine Differenzierung zwischen Zementsteinmatrix und Korn zur Risserkennung bereits in die automatische Risserkennung implementiert wurde, lässt sich diese nicht auf den gegebenen Datensatz anwenden, da kein signifikanter Grauwertunterschied zwischen Korn und Zementsteinmatrix vorhanden ist. Zur Differenzierung sollen daher in Zukunft weitere Methoden implementiert werden, um die Auswertung allein auf die Zementsteinmatrix beschränken zu können. Dies ist insbesondere in der ROI-CT von großer Bedeutung, da ein großes Korn ein beträchtliches Volumen im ROI-CT Datensatz einnehmen kann.

## 6. In-situ Verfolgung des Feuchtetransports im Beton

### 6.1 Allgemeines

Zur Bewertung der Auswirkungen der ermüdungsinduzierten Rissbildung auf den Transport von Wasser und Tausalztlösung im Beton ist die Durchführung systematischer kapillarer Aufsaugversuche an aus Großbalken ohne und mit zyklischer Vorschädigung gewonnenen kleinformatischen Proben vorgesehen. In diesem Kontext ist zur zeitlichen Verfolgung der örtlichen Feuchte- und Salzverteilung während des Aufsaugversuchs auch der Einsatz der Röntgen 3D-CT vorgesehen. Vor diesem Hintergrund erfolgten bereits erste Tastversuche mit dem Ziel, die Leistungsfähigkeit dieses Prüfverfahrens für dieses Prüfproblem zu verifizieren. Die prinzipielle Eignung der 3D-CT zur räumlichen



Visualisierung der Feuchteverteilung in einem Beton wurde bereits in [11] aufgezeigt. Dabei wurde vergleichend eine frostgeschädigte Betonprobe im trockenen und wassergesättigtem Zustand vergleichend tomographiert. Die anschließende Differenzbildung zwischen beiden Tomogramme gibt Aufschluss über die räumliche Feuchteverteilung im Beton.

### 6.2 Probe und Versuchsaufbau

Die ersten Tastversuche erfolgten an einem aus einem Großbalken ohne Vorschädigung gewonnen Bohrkern mit einem Durchmesser von 50 mm. Zur Gewährleistung eines eindimensionalen Feuchtetransport wurde die Mantelfläche des Bohrkerns mit einem Epoxidharz versehen. Zur kontinuierlichen definierten Befeuchtung der Probe wurde eine spezielle Vorrichtung entwickelt (Abbildung 8). Sie stellt auf der unteren Stirnseite des Bohrkerns eine gleichbleibende Wassersäule von 5 mm sicher. Die tomographischen Untersuchungen erfolgten mit einer 225 kV Mikrofokusröntgenanlage unter Verwendung eines Flachdetektors mit 2048 Pixeln x 2048 Pixeln, die zu einer 1024 Pixel x 1024 Pixel Matrix zusammengefasst (Binning) wurden. Die Integrationszeit betrug dabei 3s pro Winkel, bei 1200 Winkelschritten auf 360 Grad.. Die Tomographien wurden zunächst im Ausgangszustand und anschließend nach 1, 3 und 6 Stunden durchgeführt. Die Messzeit für jede Messung betrug 1 Stunde. Das hat zur Folge, dass die ermittelte Feuchteverteilung jeweils über eine Stunde während des Aufsaugversuchs gemittelt wird.



Abb. 8: Prüfkörper in Befeuchtungseinrichtung auf Manipulatorisch

### 6.3 Ergebnisse und Auswertung

Einen optischen Eindruck von der tomographisch ermittelten Grauwertverteilung im gleichen virtuellen Vertikalschnitt des Bohrkerns im trockenen Zustand und nach 1stündiger einseitiger Befeuchtung im kapillaren Aufsaugversuch zeigt die Abbildung 9. Es ist deutlich erkennbar, dass die vom Bohrkern aufgenommene Feuchtigkeit nur geringe Grauwertunterschiede zur Folge hat. Die ist auf die hohe Dichtigkeit und die damit verbundene geringe Wasseraufnahme des Betons zurückzuführen.

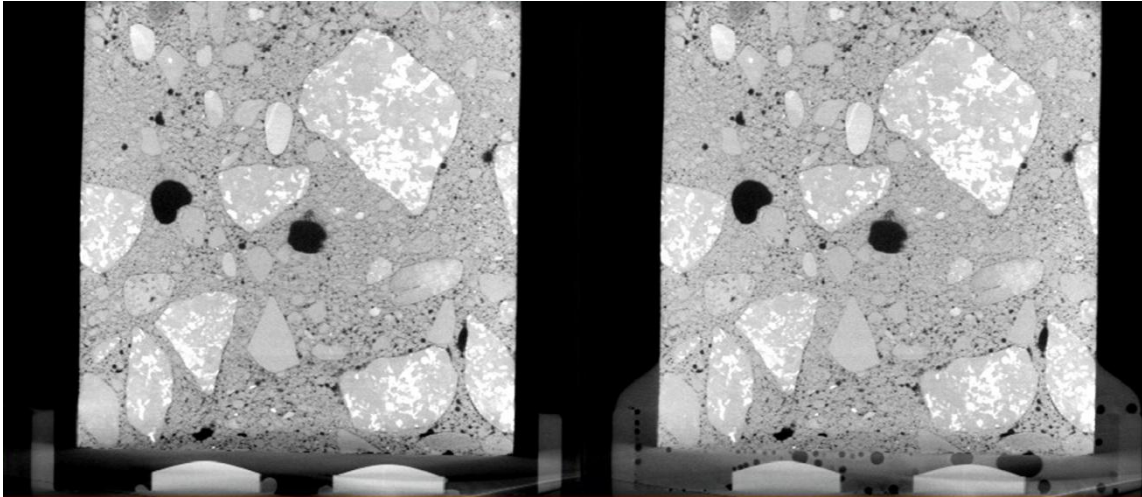


Abb. 9: Vertikaler CT-Schnitt durch den Betonbohrkern (D = 50 mm), trocken (links) und feucht (rechts)

Zur Visualisierung des aufgenommenen Wassers wird der 3D-Datensatz der Messung im trockenen Zustand von den Messungen der jeweiligen Feuchtigkeitsstufen subtrahiert (Abbildung 10). Aus den so erzeugten Differenzbildern lassen sich Volumen und Steighöhe der eingedrungenen Wassers ermitteln.

Perspektivisch ist es geplant, die Interaktion der ermüdungsinduzierten Risse und dem Feuchtetransport mittels 3D-CT räumlich zu analysieren.

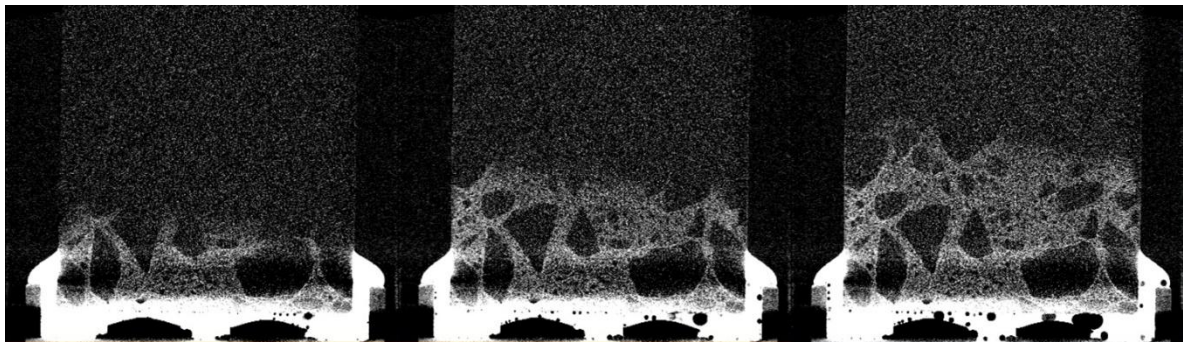


Abb. 10: Tomographisch ermittelte aufsteigende Feuchte im Bohrkern nach 1, 3 und 6 Stunden

## 7. Zusammenfassende Betrachtungen

Die im Rahmen der DFG Forschergruppe 1498 durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass die mittels zyklischen 4-Punkt-Biegezugversuch in einem Fahrbahndeckenbeton generierten ermüdungsinduzierten Risse mit der 3D-CT unter Nutzung der ROI-Technik räumlich abgebildet werden können. Einschränkend muss jedoch erwähnt werden, dass die Risserkennbarkeit durch die Ortsauflösung der gewählten Messanordnung limitiert ist. So können im vorliegenden Fall prinzipiell erst Risse ab einer Breite von 5  $\mu\text{m}$  abgebildet werden. Das gemeinsam vom Zuse-Institut Berlin (ZIB) und der BAM entwickelte und hier angewandte automatische Risserkennungstool hat sich prinzipiell bei der räumlichen Rissanalyse bewährt. So konnte der durch die Biegeschwellbeanspruchung induzierte Schädigungsgradient über die Balkenhöhe gut abgebildet werden. Es wurde aber auch deutlich, dass insbesondere bei einem geringen Kontrast zwischen der Gesteinskörnung und der Zementsteinmatrix die automatisierte Erkennbarkeit und die Lagezuordnung der Risse (Korninneres, Korngrenze und Zementsteinmatrix) noch verbesserungsbedürftig sind. Weiterhin wurde mittels erster Tastversuche gezeigt, dass es prinzipiell möglich ist, den Feuchtetransport in-situ mittels 3D-CT während des kapillaren Aufsaugversuchs abzubilden. Perspektivisch soll hier untersucht werden, ob die räumliche Feuchteverteilung

auch quantifizierbar ist. In einem weiteren Schritt gilt es, den Einfluss der ermüdungsinduzierten Risse auf den Feuchtetransport quantitativ zu erfassen. Dies bildet die Grundlage für die geplante wirklichkeitsnahe Modellbildung der Rissbildungs- und interagierenden Feuchtetransportprozesse im Beton auf Mesoebene.

Abschließend kann resümiert werden, dass die 3D-CT ein großes Entwicklungspotenzial für die Analyse der Transport- und Schädigungsprozesse in Betonen besitzt.

## Danksagung

Für die Herstellung der Prüfkörper danken wir Herrn Haamkens und Frau Voland. Weiterhin danken wir Frau Voland und Herrn Pirskawetz für die Unterstützung bei den Schwingversuchen mit den simultanen Messungen während des zyklischen 4-Punkt-Biegeversuchs. Ebenso danken wir Frau Ella Kunze für die Mitarbeit bei der Auswertung der CT-Daten. Unser besonderer Dank gilt der Deutschen Forschungsgesellschaft für die Förderung des Projekts.

## Referenzen

- [1] H BEB-AKR 12: Hinweise für die Schadensdiagnose und die Bauliche Erhaltung von AKR geschädigten Fahrbahndecken aus Beton. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. Arbeitsgruppe Betonstraßen. Ausgabe 2012, 5. Entwurf, Stand 11.01.2012.
- [2] Thiele, M., Baeßler, M., Rogge, A. und S. Pirskawetz: Schädigungsevolution in Beton unter hochzyklischen Ermüdungsbeanspruchungen. In: Tagungsband des 52. Forschungskolloquium des DAfStb, Berlin, 2011.
- [3] Mansfeld, Th.: Das Quellverhalten von Alkalisilikatgelen unter Beachtung ihrer Zusammensetzung. Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar, 2008.
- [4] Przondziona, R., Timothy, J., Nguyen, M., Weise, F., Breitenbücher, R., Meschke, G. und B. Meng: Vorschädigungen in Beton infolge zyklischer Beanspruchungen und deren Auswirkung auf Transportprozesse im Hinblick auf eine schädigende AKR. In: Beton und Stahlbetonbau, 110 (2015), Heft 1, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, S. 3-12.
- [5] Weise, F., Wiedmann, A., Voland, K., Kotan, E., Ehrig, K. und H.S. Müller: Auswirkungen von Ermüdungsbeanspruchungen auf Struktur und Eigenschaften von Fahrbahndeckenbeton. In: Beton und Stahlbetonbau, 110 (2015), Heft 1, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, S. 22-33.
- [6] D. Meinel, A. Staude, K. Ehrig: Analyzing Microstructure and Damage in Construction Materials with 3D Micro CT, 2nd International congress on 3D materials science, Annecy, France 2014, Proceedings.
- [7] K. Ehrig, J. Goebbels, D. Meinel, O. Paetsch, S. Prohaska, V. Zobel: Comparison of crack detection methods for analyzing damage processes in concrete with computed tomography, DIR 2011 International symposium on digital industrial radiology and computed tomography, Proceedings, DGZfP-BB 128, Seite 1-8, ISBN: 978-3-940283-34-4
- [8] O. Paetsch, D. Baum, D. Breßler, K. Ehrig, D. Meinel, S. Prohaska: 3-D-Visualisierung und statistische Analyse von Rissen in mit Computer-Tomographie untersuchten Betonproben. DGZfP-Jahrestagung 2013, DGZfP-BB 141, Dresden 2013
- [9] O. Paetsch, D. Baum, K. Ehrig, D. Meinel, S. Prohaska: Vergleich automatischer 3-D-Risserkennungsmethoden für die quantitative Analyse der Schadensentwicklung in Betonproben mit Computer Tomographie. DACH-Tagung 2012, DGZfP-BB 136, Graz 2012
- [10] D. Stalling, M. Westerhoff, H.-C. Hege: Amira: A Highly Interactive System for Visual Data Analysis. In C.D. Hansen, C. R. Johnson (eds.), The Visualization Handbook, Ch. 38, pp. 749-767, Elsevier, 2005.
- [11] Weise, F., Onel, Y. und J. Goebbels: Analyse des Gefüge- und Feuchtezustandes in mineralischen Baustoffen mit der Mikro-Röntgen-3D-Computertomografie. In: Bauphysik 29 (2007) Heft 3, S. 194-201.