

# Vermeidung von AKR in Betonfahrbahndecken

**Univ.-Prof. Dr.-Ing. Rolf Breitenbücher  
Dr.-Ing. Christoph Sievering**

Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Baustofftechnik  
Universitätsstraße 150, 44801 Bochum  
Tel.: 0234 / 32-22649, Fax: 0234 / 32-14113  
E-Mail: rolf.breitenbuecher@ruhr-uni-bochum.de

*In den letzten Jahren sind in Betonfahrbahndecken vermehrt Schäden (Risse) aufgetreten, die mit einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) in Verbindung gebracht wurden. Bei einer AKR reagiert amorphe Kieselsäure, die in Gesteinen enthalten sein kann, bei entsprechender Feuchte mit den Alkalien (Natrium, Kalium), die u. a. bereits im Zementstein enthalten sind. Eine AKR ist im allgemeinen Betonbau seit Langem bekannt und durch entsprechende betontechnische Maßnahmen beherrschbar. Bei Betonfahrbahnen kommen allerdings zwei zusätzliche Effekte hinzu. Zum einen werden im Winter alkalihaltige Taumittel auf die Betonoberflächen aufgebracht, die einen zusätzlichen (externen) Alkalieintrag in den Beton abbilden. Zum anderen ist der Beton durch die ständig überrollenden Fahrzeuge, insbesondere durch den Schwerverkehr, massiv zyklischen Beanspruchungen ausgesetzt. Dadurch entstehen im Laufe der Zeit feinste Mikrorisse im Betongefüge, die zunächst als Makrorisse so gar nicht erkennbar sind. Allerdings können über diese die extern eingetragenen Alkalien vergleichsweise tief in das Betongefüge eindringen und dort die gefürchtete AKR auslösen. Die deutlich erhöhte Gefahr einer AKR durch den externen Alkalieintrag in Verbindung mit Mikroschädigungen infolge der zyklischen Verkehrsbeanspruchungen wurde in einschlägigen Labor- und Praxisversuchen nachgewiesen. Während im allgemeinen Betonbau für die Vermeidung einer AKR oftmals die Verwendung eines Zements mit niedrigem Alkaligehalt (NA-Zemente) ausreichend ist, kommt bei Betonfahrbahndecken aufgrund des erheblichen Anteils an extern eingetragenen Alkalien der Auswahl geeigneter Gesteinskörnungen eine maßgebende Bedeutung zu. Dabei ist vor allem darauf zu achten, dass diese keine oder nur sehr geringe Anteile an amorpher Kieselsäure oder gestresstem Quarz aufweisen. Die Eignung solcher Gesteinskörnungen kann nach heutigem Kenntnisstand jedoch nur über entsprechende Betonversuche (Performanceprüfungen) zuverlässig bewertet werden. Daher liegt sowohl gemäß aktuellem als auch zukünftigem ARS der Schwerpunkt zur Vermeidung von AKR-Schäden im Bereich von Betonfahrbahndecken in solchen Vorab-Überprüfungen. Daneben kommt auch eine Erhöhung der Plattendicke in Betracht, wodurch die AKR-begünstigende Mikrorissbildung deutlich reduziert werden kann.*

## 1 Einleitung

In Deutschland liegen derzeit von insgesamt ca. 12.000 km an Autobahnen ca. 4.000 km in Betonbauweise vor. In den letzten Jahren traten in verschiedenen Abschnitten Rissbildungen in Betonfahrbahndecken auf, deren Ursache oftmals mit einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion in Verbindung gebracht wurde. Solche Risse treten teilweise als Netzzrisse auf, teilweise entwickeln sich daraus auch Längsrisse. Risse wären in unbewehrten Bauteilen wie Betonfahrbahndecken zunächst nicht so kritisch. Allerdings können sich infolge des kontinuierlich überrollenden Verkehrs daraus lokale Stellen mit Verschotterungen entwickeln, durch die die Verkehrssicherheit massiv beeinträchtigt und damit die Nutzung der Betonfahrbahnplatten stark eingeschränkt wird (Bilder 1a bis 1c).



Bild 1 a: Längsrisse



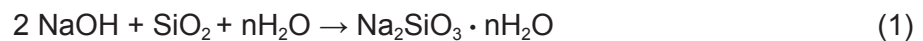
Bild 1 b: Netzkrisse



Bild 1 c: Lokale Verschotterung

## 2 Alkali-Kieselsäure-Reaktion

Bei der Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) reagieren in Lösung vorliegende Alkaliionen (Kalium-, Natriumionen) mit amorphem Siliciumdioxid ( $\text{SiO}_2$ ) zu einem Alkali-Kieselsäure-Gel (Gleichung (1)).



Die beiden für eine AKR notwendigen Reaktionspartner können bereits über die Ausgangsstoffe in den Beton gelangen. So enthalten Zemente bereits mehr oder weniger hohe Anteile an Alkalien. Amorphe Kieselsäure kann in bestimmten Gesteinskörnungen (z. B. Opal, Flint, Grauwacke, Rhyolith) enthalten sein. Das Reaktionsprodukt (Gel) wirkt infolge Wasseraufnahme stark treibend und kann betonschädigende Quelldrücke aufbauen, welche bis zu  $20 \text{ N/mm}^2$  erreichen können, während die Zugfestigkeit von Beton bei 2 bis  $5 \text{ N/mm}^2$  liegt. Die Folge solcher Quelldrücke sind Rissbildungen, die teilweise von den Gesteinskörnern ausgehen können, teilweise in der Mörtelmatrix starten (Bild 2). Mit fortschreitender Gelbildung kann das Betongefüge vollständig zerstört werden.

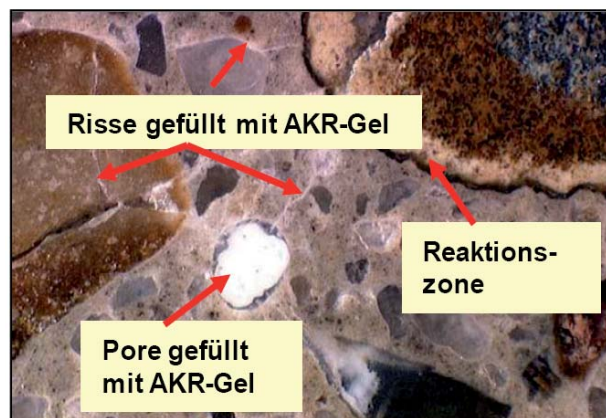


Bild 2: Mit AKR-Gel gefüllte Risse und Poren

### 3 Besonderheiten bei Betonfahrbahnen

#### 3.1 Externe Alkalizufuhr durch Taumittel

Eine Alkali-Kieselsäure-Reaktion ist im allgemeinen Betonbau seit Langem bekannt und durch entsprechende betontechnische Maßnahmen beherrschbar. So ist durch die Verwendung von Zementen mit niedrigem Alkaligehalt (NA-Zemente) eine AKR im Allgemeinen sicher zu vermeiden.

Bei Verkehrsflächen wird der Beton im Winter jedoch über die Taumittel zusätzlich massiv mit Alkalien (meist Na-Ionen) beaufschlagt. Durch diese externe Alkalizufuhr erhöht sich das Risiko einer AKR signifikant. Das Eindringen der Alkalien in das Betongefüge wird darüber hinaus durch feinste Mikrorisse begünstigt, die bei Betonfahrbahnen infolge der zyklischen Verkehrsbeanspruchungen entstehen.

#### 3.2 Beanspruchungen der Betondecke infolge Verkehr

Eine wesentliche Beanspruchung stellen bei Betonfahrbahnen die ständigen zyklischen Überrollungen, insbesondere durch den Schwerverkehr, dar. Diese verkehrsbedingten Beanspruchungen haben in den letzten Jahren durch den stetig wachsenden Anteil an Lkw-Verkehr signifikant zugenommen. Zwischen den Jahren 1970 und 2005 stieg die Güterverkehrsleistung von ca. 80 Mio.tkm auf ca. 400 Mio.tkm ([2, 3]). Durch diese im Vergleich zu früheren Verkehrsverhältnissen erheblich höheren dynamischen Beanspruchungen der Betonfahrbahndecken, können im Mikrogefüge des Betons Gefügestörungen entstehen. In einschlägigen Untersuchungen am Lehrstuhl für Baustofftechnik der Ruhr-Universität Bochum wurden Degradationen im Mikrogefüge infolge solcher dynamischen Belastungen nachgewiesen. Diese Degradationen zeigten sich einerseits in einem Anstieg der kontinuierlich gemessenen Verformungen, andererseits in einer Abnahme der Steifigkeit (Bild 3) [4]. Infolge anhaltender Verkehrseinwirkungen können aus einer solchen Degradation des Betongefüges in Überlagerung mit Zwangs- und Eigenspannungen zunächst Mikrorisse und im Laufe der Zeit dann daraus Makrorisse entstehen. Durch diese Gefügeflockerungen wird das Eindringen von Feuchtigkeit und gelöster Medien (v. a. Tausalze) in das Betongefüge begünstigt, sodass infolge solcher Interaktionen auch andere Schadreaktionen wie z. B. eine AKR beschleunigt ablaufen können.

Aufgrund der zuvor beschriebenen außergewöhnlichen Beanspruchungen einer Betonfahrbahn wurde beispielsweise auch in der DAfStb-Richtlinie „Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkaliereaktion im Beton (Alkali-Richtlinie)“ [5] und in DIN 1045-2 [6] eine für Fahrbahndecken spezifizierte Feuchteklasse „WS“ eingeführt.

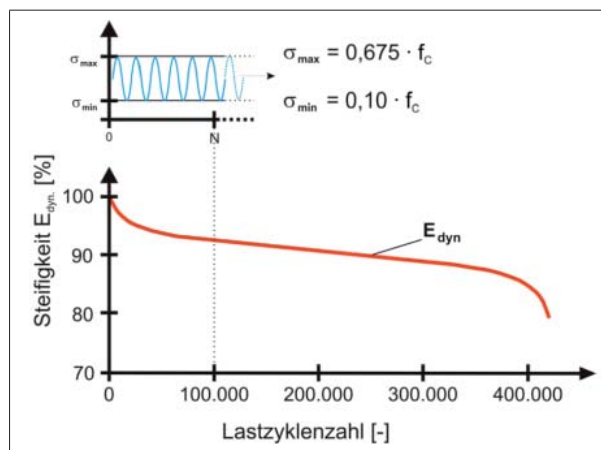


Bild 3: Degradation des Betons infolge dynamischer Belastung [4]

## 4 In situ Untersuchungen an Betonfahrbahndecken

### 4.1 Vorgehensweise

Aufgrund der unterschiedlichen Beanspruchungen von Fahrbahndecken, kann eine Rissbildung im Normalfall nicht eindeutig einer Ursache zugeschrieben werden. In den meisten Fällen sind Überlagerungen von mehreren Einwirkungen dafür verantwortlich, wobei der Einfluss der jeweiligen Beanspruchung im Nachgang nicht mehr eindeutig nachvollziehbar ist.

Um den Einfluss einer AKR auf die Rissbildungen in Betonfahrbahndecken genauer zu erfassen wurden in einem Verbund-Forschungsprojekt des BMVBS unter Federführung des Lehrstuhls für Baustofftechnik der Ruhr-Universität Bochum, in Zusammenarbeit mit dem Forschungsinstitut der Zementindustrie in Düsseldorf, dem Finger-Institut der Bauhaus-Universität Weimar und dem Centrum Baustoffe und Materialprüfung der TU München umfassende Untersuchungen an bundesweit ausgewählten Autobahnabschnitten durchgeführt. Zum einen wurden alle zugänglichen Dokumentationen über den Bau, die Nutzung und bisherige Beobachtungen für die entsprechenden Streckenlose ausgewertet. Zum anderen wurde in Laboruntersuchungen an Bohrkernen das verbleibende AKR-Restdehnungspotenzial aus Streckenabschnitten erfasst [7].

### 4.2 Einfluss der Herstelltemperatur auf die Rissbildung

In den Studien wurden insgesamt 21 Streckenlose von verschiedenen Bundesautobahnen untersucht. In den untersuchten Streckenlosen einer Autobahn waren jeweils vergleichbare Betone verwendet worden. In die Untersuchungen einbezogen waren jeweils Teilabschnitte mit und ohne Rissbildungen.

Zur Bewertung der Rissintensität wurden die Rissanzahl, die Rissbreite und die Risslänge je Platte ermittelt. Daraus wurde die repräsentative Rissöffnungsfläche (aus dem Produkt von Risslänge und Rissbreite) je Platte errechnet.

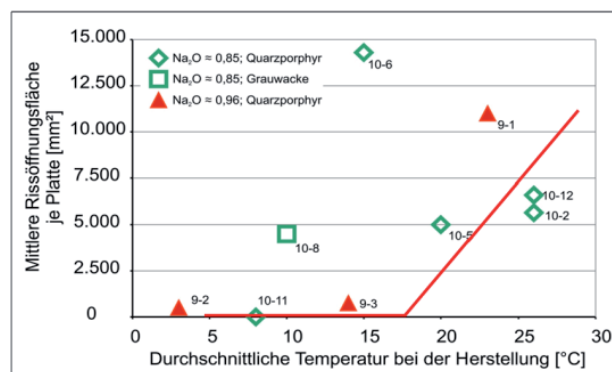


Bild 4: Durchschnittliche Herstelltemperatur und mittlere Rissöffnungsfläche [7]

Bei der Auswertung der Bauwerksakten zeigte sich ein deutlicher Zusammenhang zwischen den bei der Herstellung der Betonfahrbahndecken vorliegenden Temperaturen und den später vorgefundenen Rissen (Bild 4). Bei den Streckenlosen, die bei Temperaturen unter ca. 15 bis 20 °C hergestellt wurden, zeigten sich auch nach Jahren nahezu keine oder nur wenige Risse. Wurde dagegen der Beton bei Temperaturen über etwa 20 °C eingebaut, nahm demgegenüber die Rissöffnungsfläche kontinuierlich zu (Bild 4). (In den beiden Streckenlosen 10-6 und 10-8 sind nachweislich andere Ursachen, z. B. hygrische Effekte für die Rissbildung maßgeblich [7].)

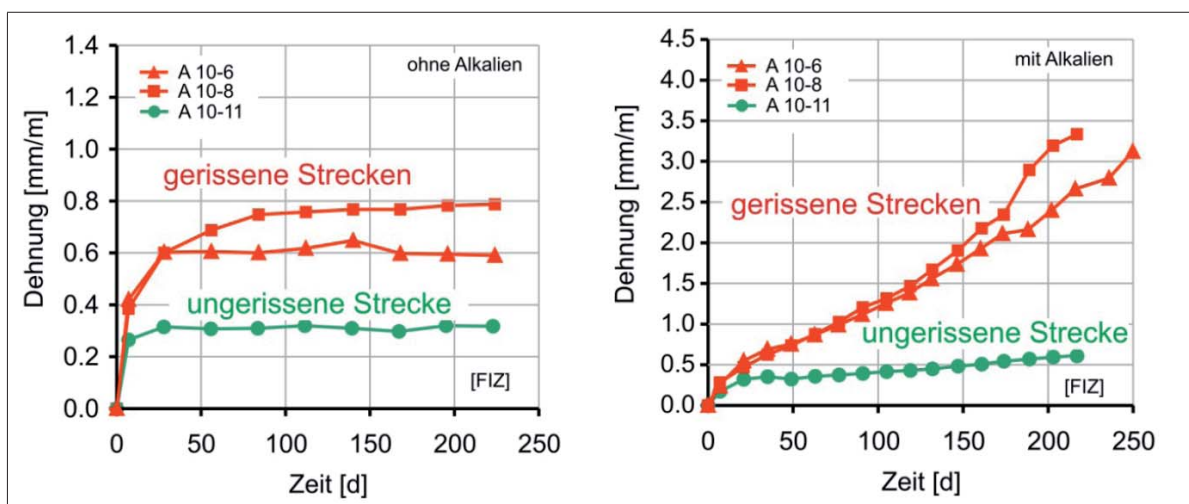
Diese Auswertungen machen deutlich, dass hohe Temperaturen bei der Herstellung von Betonfahrbahndecken die Rissbildung signifikant begünstigen.

### 4.3 AKR-spezifische Untersuchungen

Zur Ermittlung des AKR-Restdehnungspotenzials der verschiedenen Betone wurden aus diversen Streckenabschnitten Bohrkernentnommen und im Labor einschlägigen AKR-Untersuchungen in Anlehnung an die 60 °C Performance-Prüfung DAfStb-Richtlinie „Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktionen im Beton, Teil 3“, (Ausgabe 2007) [5] unterzogen. Dabei wurde eine Bohrkernhälfte jeweils ohne externe Alkalizufuhr, die andere mit externer Alkalizufuhr untersucht.

Die Bohrkernentnommenen aus rissgeschädigten Streckenabschnitten stammten, wiesen durchweg größere Dehnungen auf als diejenigen, die aus ungerissenen Bereichen entnommen wurden (Bild 5). Bei der 60 °C Performance-Prüfung ohne externe Alkalizufuhr konnte in der Regel bereits nach wenigen Wochen keine weitere Dehnungszunahme mehr festgestellt werden. Demgegenüber nahmen bei den Proben, denen während der Testzyklen zusätzlich extern Alkalien zugeführt wurden, die Dehnungen kontinuierlich zu (Bild 5). In diesem Fall waren die Dehnungszuwächse bei den Proben aus gerissenen Abschnitten signifikant größer als bei denen aus ungerissenen Bereichen [7].

Schon daraus kann gefolgert werden, dass Feuchtigkeit und darin gelöste Alkalien in ein bereits vorgeschädigtes Betongefüge wesentlich intensiver eindringen als in ein ungeschädigtes Gefüge. Eine AKR wird demzufolge durch bereits vorhandene Risse (auch Mikrorissen) deutlich begünstigt.

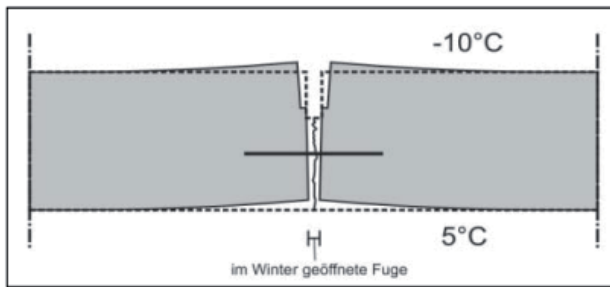


**Bild 5: Dehnungen der Bohrkernentnommenen infolge der Lagerung bei 60 °C**  
 a) links: ohne externe Alkalizufuhr  
 b) rechts: mit externer Alkalizufuhr (veränderte Skalierung der y-Achse!)

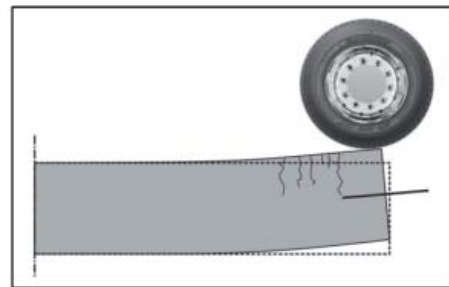
## 5 Charakterisierung der zyklischen Beanspruchungen von Betonfahrbahndecken

Betonfahrbahndecken werden überwiegend durch zyklische Einwirkungen beansprucht. Diese treten jedoch mit sehr unterschiedlichen Frequenzen auf. Infolge jahreszeitlicher Temperaturänderungen öffnen sich die Querfugen im Winter (Bild 6 a). Bei undichtem Fugenverguss, was nicht grundsätzlich auszuschließen ist, kann tausalzhaltiges Wasser in die Fugen eindringen. Dadurch können verstärkt Alkalien extern in diesen Bereich eingetragen werden.

Bei raschen Temperaturänderungen (z. B. Tag-Nacht-Schwankungen, Kälteeinbruch, Gewitterschauer im Hochsommer) stellt sich über die Plattendicke ein Temperaturgradient ein. Trotz Verdübelung der Fugen und Eigengewicht der Platten lässt sich eine Verwölbung der Plattenenden im Fugenbereich nicht vollständig vermeiden (Bild 6 a). Dadurch kommt es bei



**Bild 6 a: Fugenverformung Sommer – Winter**



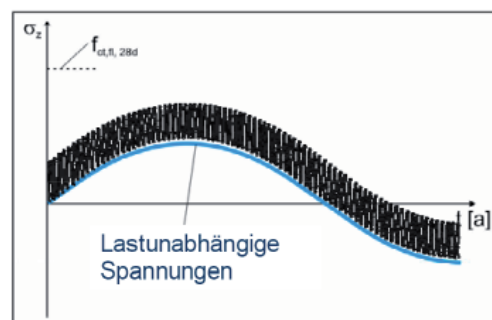
**Bild 6 b: Rissbildung an der Oberseite im Fugenbereich infolge Temperaturgradient und überrollendem Verkehr**

der Überrollung dieser Plattenenden durch den Verkehr zu erhöhten Biegezugspannungen in diesem Endbereich. Infolge einer Abkühlung von oben entstehen bei einem Temperaturgradienten von etwa 0,4 K/cm, wie er bei Fahrbahnplatten auftreten kann, an der Oberseite Zwangszugspannungen in Höhe von ca. 2,0 N/mm<sup>2</sup>. In Folge kann sich dort eine verstärkte Mikrorissbildung einstellen (Bild 6 b), durch die Alkalien ebenfalls verstärkt in das Betongefüge eingetragen werden können. Eine Begünstigung einer AKR durch diese Effekte im Fugenbereich zeigt sich auch bei in-situ Beobachtungen, bei denen der mögliche Beginn einer AKR in diesen Bereichen sich durch Dunkelfärbungen abzeichnet (Bild 7, aus [8]).

Diesen (zyklischen) thermischen Beanspruchungen überlagern sich noch die kurzzeitig einwirkenden Verkehrsbelastungen (Bild 8). Die Überrollung durch einen 40-t-Lkw führt dabei zu Biegespannungen von ca. 1,0 N/mm<sup>2</sup>. Unter einem negativen Temperaturgradienten (oben kälter) wirken die Verkehrslasten in Plattenmitte an der Oberseite entlastend. Im Randbereich hingegen werden die Biegezugspannungen an der Oberseite durch die Verkehrsbelastung verstärkt. In der Überlagerung ergibt sich für die hochfrequenten zyklischen Beanspruchungen hier eine Oberspannung  $\sigma_o$  von 3,0 N/mm<sup>2</sup> und eine Unterspannung  $\sigma_u$  von 2,0 N/mm<sup>2</sup>. Das Verhältnis Unterspannung: Oberspannung  $\sigma_u/\sigma_o$  beträgt dann ca. 0,66, das Verhältnis Oberspannung : Biegezugfestigkeit  $\sigma_o/f_{ct}$  ca. 0,5.



**Bild 7: Dunkelfärbungen im Fugenbereich als mögliches Indiz einer beginnenden AKR [8]**



**Bild 8: Überlagerung von kurzfristigen Verkehrsbeanspruchungen (hohe Frequenz) mit längerfristigen thermischen Zwangsspannungen (niedrige Frequenz)**

## 6 Systematische Untersuchungen unter zyklischer Beanspruchung und externem Alkalieintrag

### 6.1 Laborversuche unter zyklischer Belastung

Um systematischer und auch qualitativ erfassen zu können, inwieweit durch zyklische Vorbeanspruchungen und daraus resultierende Gefügeauflockerungen sowie durch die externe Alkalizufuhr unter den Randbedingungen auf Verkehrsflächen eine schädigende AKR begünstigen, wurden einschlägige Laboruntersuchungen durchgeführt [10]. Dazu wurden Betonbalken aus typischem Straßenbeton unter Verwendung einer AKR-sensitiven Gesteinskörnung hergestellt, die im Alter von ca. 40 Tagen zunächst in Vier-Punkt-Biegeversuchen zyklischen Biegebeanspruchungen mit einer Oberspannung  $\sigma_o$  von 3,0 N/mm<sup>2</sup> und einer Unterspannung  $\sigma_u$  von 2,0 N/mm<sup>2</sup> ausgesetzt wurden (Bild 9) [10]. Dabei wurde die allmähliche Degradation über vergleichende Messungen der Ultraschalllaufzeiten an der Biegezugseite bzw. anhand der daraus errechneten Veränderung im relativen dynamischen E-Moduls quantitativ erfasst.

Im Bild 10 ist eine schematische Übersicht der jeweiligen Messpunkte dargestellt. Die Ultraschalllaufzeiten wurden nach unterschiedlichen Lastzyklen (0, 0,5 Mio., 0,7 Mio., 1,0 Mio. und 5,0 Mio.) ermittelt.



Bild 9: Versuchsstand für zyklische Belastung von Straßenbetonbalken

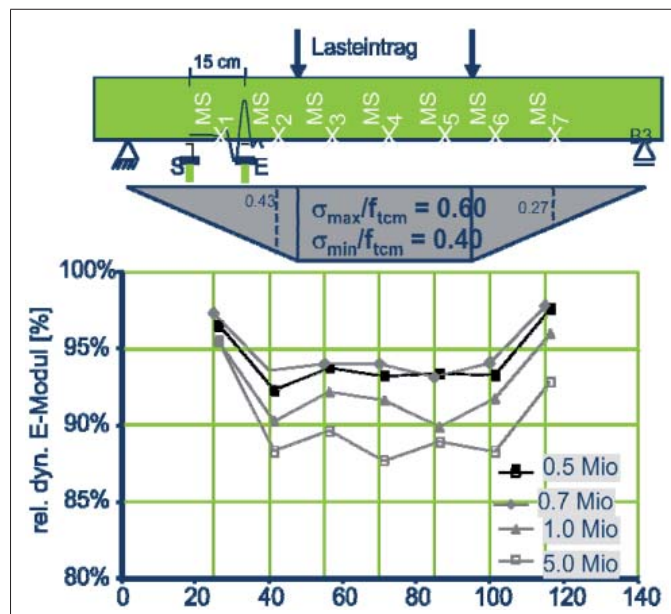
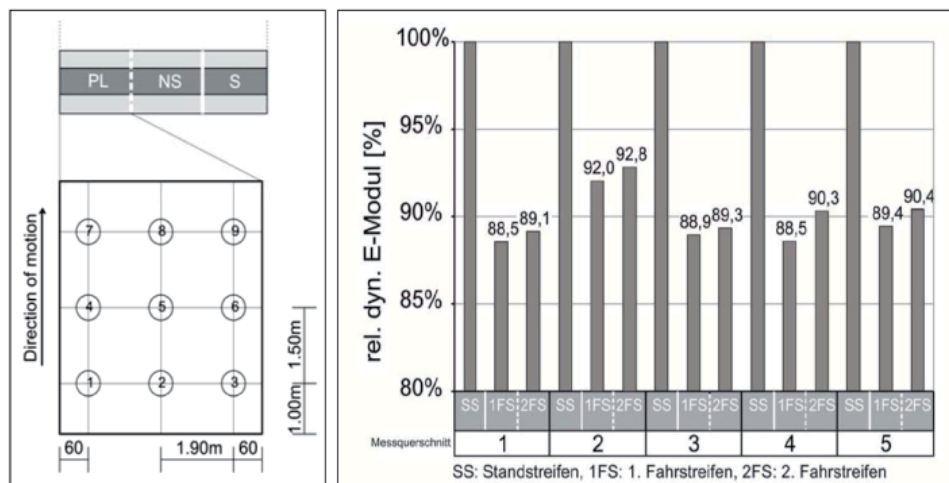


Bild 10: Übersicht über Messpunkte der Betonbalken (Laborproben)

Wie im Bild 10 dokumentiert, nahm der relative dynamische E-Modul mit steigenden Lastzyklen zunehmend ab. Bereits nach 500.000 Lastwechseln war dieser Kennwert bei dem untersuchten Verhältnis Oberspannung : Biegezugfestigkeit  $\sigma_o/f_{c,t}$  von ca. 0,5 bereits um etwa 5 % abgesunken. Dieser Abfall vergrößerte sich nach 5 Mio. Lastzyklen auf ca. 12 %. Bei den niedrigeren  $\sigma_o/f_{c,t}$ -Verhältnissen in den Bereichen außerhalb der Lasteinleitung (unter ca. 0,40) war der Abfall deutlich geringer. Dies korreliert auch mit Ergebnissen aus anderen Untersuchungen mit zyklischen Lastszenarien ([4, 11]). Solche Abfälle im relativen dynamischen E-Modul gehen nachweislich mit einer Mikrorissbildung einher, die umso stärker ausgeprägt ist, je mehr dieser Kennwert zurückgeht ([4, 12]).

Ein analoges Verhalten konnte auch an Betonfahrbahndecken in situ nachgewiesen werden. An mehreren Autobahnabschnitten, die bereits mehrere Jahre unter Verkehr waren, wurden ebenfalls Ultraschallmessungen an der Betonoberfläche durchgeführt und daraus wiederum der dynamische E-Modul bestimmt. In jeden Messquerschnitt wurden der Standstreifen und die beiden Fahrstreifen einbezogen. Unter der Annahme, dass der Standstreifen kaum durch überrollenden Verkehr beansprucht worden war, wurden die Messungen in diesen Feldern jeweils als Referenzwert (= 100 %) zugrunde gelegt. Es zeigte sich, dass die dynamischen E-Moduln im 1. und 2. Fahrstreifen um 7 bis 12 % niedriger waren als die entsprechenden E-Moduln im Standstreifen (Bild 11). Darüber hinaus waren die dynamischen E-Moduln im 1. Fahrstreifen, auf dem überwiegend der Schwerlastverkehr abläuft, stets niedriger als im 2. Fahrstreifen, auf dem nur gelegentlich Lkw fahren. Allerdings war der Unterschied mit im Mittel 1,8 % vergleichsweise gering.

Aus diesen Ergebnissen lässt sich somit auch eine entsprechende Degradation des Betongefüges (Mikrorisse) infolge der ständigen Verkehrsüberrollungen in situ ableiten [10]. Gleichzeitig ist festzuhalten, dass die Ergebnisse der Vor-Ort-Messungen in der gleichen Größenordnung (ca. 10 % Abfall im dynamischen E-Modul) wie die in den Laboruntersuchungen liegen, sodass für Letztere eine realistische Simulation der zyklischen Beanspruchungen und letztendlich eine realitätsnahe Degradation aufgezeigt werden konnte.



**Bild 11: Aus Ultraschalllaufzeiten berechnete relative dynamische E-Moduln im Stand-, 1. Fahr- und 2. Fahrstreifen an fünf Messpunkten [10]**



## 6.2 Externe Alkalizufuhr durch Einwalken einer NaCl-Lösung

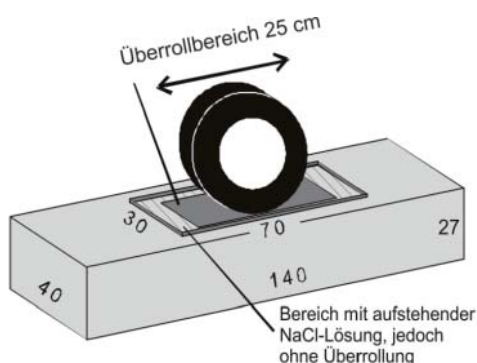
Die Probekörper, die mit unterschiedlichen Lastzyklen beansprucht und damit unterschiedlich stark vorgeschädigt worden waren (einschließlich Referenzprobe ohne zyklische Vorbelastung), wurden anschließend mit einer NaCl-Lösung auf die nachgestellte Fahrbahnoberfläche beaufschlagt. In eine Teilfläche wurde dabei die Tausalzlösung durch Überrollen mit einem belasteten Reifen (Radlast: 1 t) in den Beton eingewalkt (Bilder 12 und 13). Nach 1 Mio. bzw. 2 Mio. Überrollungen wurden aus den Balken prismatische Kleinproben gewonnen, an denen die Eindringtiefe der Taumittelösung bestimmt wurde.

Vereinfacht wurde dabei die Eindringtiefe der Chloridionen mit Hilfe des Silbernitrat-Tests ermittelt, da der Nachweis der Natriumeindringung wesentlich komplexer ist und für beide Ionen näherungsweise gleiches Eindringverhalten angenommen werden kann.

Zunächst zeigten diese Versuche, dass bereits in den Bereichen, in denen die Tausalzlösung nur oben aufstand (außerhalb der Überrollungen, Bild 12), diese mit zunehmender Vorschädigung tiefer in den Beton eindrang (Bild 14 a). Bei den Balken, die mit 5 Mio. Lastzyklen vorbeanspruchung worden waren (Abfall des dynamischen E-Moduls auf unter 90 %) war die Eindringtiefe um ca. 35 % größer als bei denen ohne Vorbelastung.

In gleicher Weise nahm die Eindringtiefe auch unter dem überrollenden Rad mit zunehmender Vorschädigung zu (Bild 14 b). Durch die Überrollungen – selbst bei der vergleichsweise geringen Radlast von nur 1 t – vergrößerte sich die Eindringtiefe gegenüber dem nicht überrollten Sektor bei den nicht vorbeanspruchungten Proben um ca. 50 % (Bild 14 a mit Bild 14 b). Danach reduzierte sich dieser „Einwalkeffekt“ bis 5 Mio. Lastzyklen auf ca. 20 %. Aus dem mehr oder weniger parallelen Verlauf der Eindringtiefen in dem nicht überrollten Sektor (Bild 14 a) ist ferner abzuleiten, dass der Unterschied der beiden Kurven primär durch die unterschiedlich langen Aufstandszeiten der Tausalzlösung hervorgerufen wurde (für 1 Mio. Überrollungen: 8 Tage Beaufschlagung, für 2 Mio. Überrollungen: 16 Tage). Daraus kann gefolgert werden, dass mit anhaltender Verkehrsbeanspruchung sich die zunehmende Vorschädigung (Mikrorissbildung) und die Dauer der Taumittelinwirkung stärker auf das Eindringverhalten der Salzlösung in das Betongefüge auswirkt als das Einwalken durch die überrollenden Reifen.

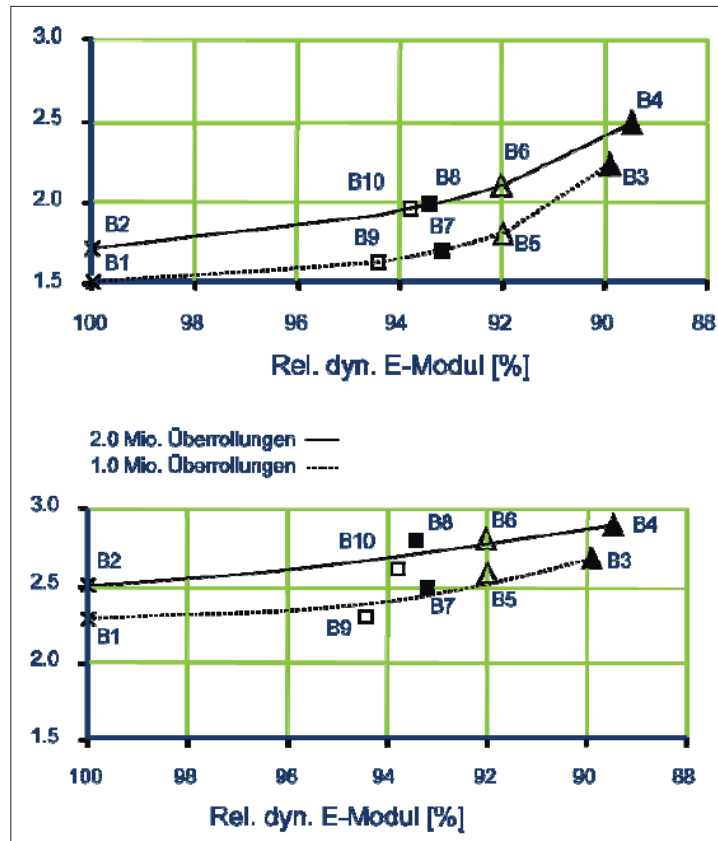
Des Weiteren ist zu erkennen, dass die mit abnehmendem relativem dynamischem E-Modul, das heißt zunehmender Vorschädigung, anwachsende Eindringtiefe der Tausalzlösung stets einen progressiven Verlauf aufweist.



**Bild 12: Übersicht über unterschiedliche Bereiche mit und ohne Überrollungen**



**Bild 13: Einwalkung von Taumitteln in vorbelastete Probekörper durch Überrollung**



**Bild 14: Eindringtiefe der NaCl-Lösung in Abhängigkeit der Steifigkeitsabnahme (Vorschädigung) sowie Anzahl der Überrollungen**  
 a) oben: im Aufstandsbereich, ohne Einwalken der NaCl-Lösung  
 b) unten: im Überrollbereich mit Einwalken der NaCl-Lösung

### 6.3 Dehnungen infolge AKR nach Vorschädigung und externem Alkalieintrag

Um letztendlich den direkten Einfluss der Vorschädigung und des externen Alkalieintrags in Betonfahrbahndecken auf die AKR zu erfassen, wurden abschließend Teilproben aus den nach Abschnitten 6.1 und 6.2 vorbeanspruchten Balken einem AKR-beschleunigenden Klima ausgesetzt. Hierzu wurden aus den großen Balken Kleinproben mit den Abmessungen 10 cm x 10 cm x 40 cm herausgesägt und in einer Prüfruhe bei 60 °C und mindestens 98 % Luftfeuchtigkeit insgesamt 12 Wochen gelagert. Dabei erfolgte keine weitere externe Alkalizufuhr mehr. Während dieser Einlagerung wurden die Dehnungen der unterschiedlich stark vorgeschädigten und mit Taumitteln beaufschlagten Proben erfasst [5]. Bereits innerhalb der ersten 14 Tage zeigten sich je nach Vorschädigungsintensität deutliche Unterschiede in den Dehnungen (Bild 15). Während die nicht vorgeschädigten Teilproben nach 2 Wochen Einlagerung eine Dehnung von maximal etwa 0,2 mm/m aufwiesen, wurde bei den Teilproben mit entsprechender Vorschädigung infolge von 5 Mio. Lastzyklen (Steifigkeitsabfall von ca. 10 %), bereits eine Dehnung von etwa 1,1 mm/m festgestellt [10]. Auch bei Beendigung der Einlagerung nach 84 Tagen wiesen die vorgeschädigten Proben etwa doppelt so hohe Dehnungen auf wie die nicht vorbelasteten Proben. Inwieweit dieses unterschiedliche Verhalten allerdings ausschließlich auf eine verschieden intensive AKR zurückzuführen ist, oder ob sich dem auch eine unterschiedliche Feuchteaufnahme überlagert – zumal sich die Dehnungskurven an eine horizontale Asymptote angleichen – muss in weiteren Untersuchungen noch geklärt werden.

Die Ergebnisse machen dennoch deutlich, dass ein Vorschädigungsgrad und die externe Alkalizufuhr eine AKR signifikant begünstigen können. Folglich dürfen diese beiden Parameter bei einer Gesamtbetrachtung der Ursachen für die Rissbildung in Betonfahrbahndecken nicht unberücksichtigt bleiben.

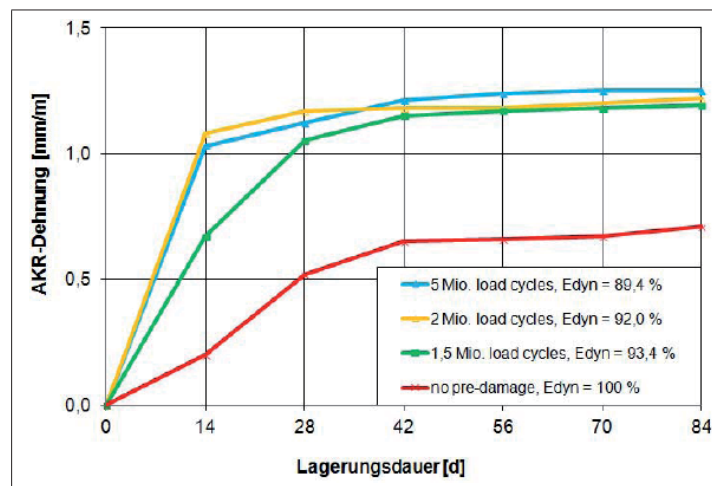


Bild 15: AKR-Dehnungen von Teilproben mit unterschiedlicher Vorschädigung und extern eingetragenen Alkalien

## 7 Schlussfolgerungen auf AKR-relevante Regelungen

Um das Risiko einer schädigenden AKR in Betonfahrbahndecken unter den dort vorliegenden speziellen Randbedingungen zu minimieren, ist zumindest einer der für diese Schadreaktion notwendigen Reaktionspartner (Alkalien, amorphe Kieselsäure) gering zu halten. Mit dem Allgemeinen Rundschreiben 12/2006 [14] wurde für Straßenbetone bereits der Alkaligehalt im Zement entsprechend begrenzt (Tabelle 1). Gleichzeitig dürfen seither im ARS als potenziell AKR-sensitiv benannte Gesteinskörnungen nur eingesetzt werden, wenn deren Eignung gutachterlich festgestellt wurde. An dieser Stelle sei festzuhalten, dass an Betonfahrbahndecken, bei denen diese Regelungen eingehalten wurden, bislang keine Indizien einer AKR oder beginnenden AKR beobachtet wurden.

Tabelle 1: Zulässige Alkaligehalte des Zementes für Beton von Fahrbahndecken

Zement	Hüttensandgehalt [M.-%]	Alkaligehalt des Zementes  Na <sub>2</sub> O-Äquivalent [M.-%]	Alkaligehalt des Zementes ohne Hüttensand bzw. Ölschiefer Na <sub>2</sub> O-Äquivalent [M.-%]
CEM I + CEM II/A		≤ 0,80	—
CEM II/B-T	21 bis 29	—	≤ 0,90
CEM II/B-S	21 bis 29	—	≤ 0,90
CEM II/B-S	30 bis 35	—	≤ 1,00
CEM III/A	36 bis 50	—	≤ 1,05

Da die Begrenzung auf bestimmte Gesteinskörnungen – wie im ARS 12/2006 auf petrographischer Benennung basierend – nicht abschließend erfolgen kann, sollen entsprechend der überarbeiteten Fassung dieses ARS zukünftig alle groben Gesteinskörnungen für die Anwendung in Straßenbetonen bewertet werden. Dies kann auf drei verschiedenen Wegen erfolgen. So kann wie bisher eine „Gutachterlösung“ für konkrete Betonzusammensetzungen erfolgen. Alternativ können grobe Gesteinskörnungen aus einer bestimmten Lagerstätte vorab einer Performance-Prüfung unter pessimalen Bedingungen unterzogen werden. Vor einer konkreten Baumaßnahme ist dann nur mehr eine einfache Bestätigungsprüfung erforderlich. Schließ-

lich können bereits positiv bewertete Gesteinskörnungen in einer von der BASt geführten Liste aufgenommen werden.

Da bei Betonfahrbahnen – wie erläutert – der externe Alkalieintrag eine wesentliche Rolle spielt, kommt der Dichtigkeit des Betons gegen das Eindringen von diesen in das Betongefüge eine hohe Bedeutung zu. Dabei haben Gefügearauflockerungen durch zyklische Belastungen – wie aus den beschriebenen Studien ersichtlich – einen hohen Stellenwert. Um solche klein zu halten, sollten die Oberspannungen bei den zyklischen Beanspruchungen nicht zu hoch werden, das Verhältnis  $\sigma_o/f_{c,t}$  sollte 0,4 nicht signifikant überschreiten. Dies kann durch entsprechende Dimensionierung der Betondecke sichergestellt werden.

## Literaturverzeichnis

- 1 Springenschmid, R.; Fleischer, W.: Oberflächenrisse in älteren Betonfahrbahndecken, Tiefbau-Ingenieurbau-Straßenbau 1993, Heft 10, S. 724–732
- 2 Knoll, E. (Hrsg.): Der Elsner 2000, Handbuch für Straßen- und Verkehrswesen, Otto Elsner Verlagsgesellschaft, Dieburg 1999
- 3 Statistische Mitteilungen des Kraftfahrt Bundesamtes und des Bundesamt für Güterverkehr, Online im Internet: www.kba.de
- 4 Breitenbücher, R.; Ibuk, H.: Experimentally based investigations on the degradation-process of concrete under cyclic load, Materials & Structures 2006
- 5 Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: DAfStb-Richtlinie „Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkali-reaktion im Beton (Alkali-Richtlinie)“, Berlin 2007
- 6 DIN 1045-2: 2008-08: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1
- 7 Endbericht der Ruhr-Universität Bochum zum Forschungsprojekt 08.182/2005 „Rissbildung an Fahrbahndecken aus Beton; Auswirkungen von Alkali-Kieselsäure Reaktionen (AKR), Phase I: In-situ Untersuchungen an Fahrbahndecken aus Beton mit/ohne Rissbildung vom 18. 7. 2008
- 8 Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Empfehlungen für die Schadensdiagnose und die Bauliche Erhaltung von AKR-geschädigten Fahrbahndecken aus Beton, Ausgabe 2009, Köln
- 9 Müller, C.; Borchers, I.; Eickschen, E.: AKR-Prüfverfahren: Auf dem Weg zur Performance Prüfung. Beton- und Stahlbetonbau 102, Heft 8, Ernst & Sohn Verlag, Berlin 2007, S. 528–538
- 10 Sievering, C.: Dauerhaftigkeit von Betonfahrbahndecken unter besonderer Berücksichtigung des externen Alkalieintrags, Dissertation an der Ruhr-Universität Bochum, 2012
- 11 Holmen, J.O.: Fatigue of concrete by constant and variable amplitude loading, PhD Thesis, The Norwegian Institute of Technology, Trondheim, 1979
- 12 Ibuk, H.: Ermüdungsverhalten von Beton unter Druckschwellbelastung, Dissertation an der Ruhr-Universität Bochum, 2008
- 13 Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Technische Lieferbedingungen für Baustoffe und Baustoffgemische für Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton (TL-Beton StB-07), Ausgabe 2007, Köln, FGSV 891
- 14 Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS): Allgemeines Rundschreiben (ARS) Nr. 12/2006 vom 17. Mai 2006
- 15 Breitenbücher, R.: Besonderheiten bei Alkali-Kieselsäure-Reaktionen in Betonfahrbahndecken, Beton- und Stahlbetonbau 102 (2007), Nr. 8