

# Auswirkungen mikrostruktureller Degradation und Verkehr

## Feuchtetransport in Betonen

Robin Przondziona<sup>1\*</sup>, Rolf Breitenbücher<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Baustofftechnik, Bochum

## Kurzfassung

Die Dauerhaftigkeit von Betonbauteilen ist durch die Überlagerung mikrostruktureller Schädigungen mit der Zufuhr externer Alkalien unter Umständen negativ beeinträchtigt. Nicht nur Betonfahrbahndecken die in der Winterzeit alkalihaltigen Taumitteln ausgesetzt sind, sondern beispielsweise auch Offshore-Windenergieanlagen im Salzwasser erfahren eine Degradation infolge zyklischer Lasten und sind gleichzeitig externen Alkalien ausgesetzt. Die durch die Beanspruchung eingetragene Schädigung zeigt sich nicht makroskopisch sondern vielmehr auf einem mikrostrukturellen Level. Mikrorisse mit einer Breite von 5 bis 50  $\mu\text{m}$  entstehen in der Betonmatrix (Zementstein und Randzone der Gesteinskörnungen) und begünstigen wiederum den Eintrag der externen Alkalien. [1]

In Betonfahrbahndecken wird der Alkalieintrag zudem durch den überrollenden Verkehr begünstigt [2]. Die im Winter aufstehende alkalihaltige Taumittellösung wird beim Überrollen jedes einzelnen Reifens durch einen lokal entstehenden Druck tiefer in das Betongefüge gepresst.

In diesen Untersuchungen liegt der Fokus auf der Charakterisierung der Degradationseffekte auf mikrostruktureller Ebene des Betons [3] sowie dem Transportverhalten von Flüssigkeiten in sowohl intaktes als auch geschädigtes Betongefüge. Des Weiteren wurden die infolge des Verkehrs entstehenden Drücke im Gefüge untersucht.

Die Degradation wurde durch die Erfassung der Ultraschalllaufzeit sowie mittels mikroskopischer Erfassung der Mikrorissstruktur anhand der Variation der Belastung (Spannungsniveau und Lastzyklenzahl) großformatiger Balken charakterisiert.

Die sich infolge äußeren Druckes im Betongefüge einstellenden Drücke wurden in verschiedenen Tiefen und in Variation des äußeren Druckes erfasst. Der externe Druck wurde durch einen äußerlich auf den Beton wirkenden Wasserdruck simuliert. Es zeigte sich eine direkte Abhängigkeit von äußerem und innerem Druck. Je höher der externe Druck, desto höher auch der innere Druck und ergo auch die Eindringtiefe externer Alkalien. Zudem zeigte sich ein deutlicher Anstieg des inneren Drucks an Probekörpern, welche zuvor eine mikrostrukturelle Schädigung widerfahren haben.

## 1. Einleitung

Beton- und Stahlbetonbauwerke sind während ihrer Lebensdauer neben rein statischen auch erheblichen dynamischen Beanspruchungen ausgesetzt. Hierbei sind vor allem thermische und hygrische Spannungen zu nennen die tages- und jahreszeitlichen Schwankungen sowie der Witterung unterliegen. Man kann hier von niederfrequenten Spannungen sprechen. Neben diesen niederfrequenten Spannungen können hochfrequente dynamische Belastungen auf das Bauteil wirken. Am Beispiel einer Betonfahrbahndecke wären das zum Beispiel die Verkehrslasten oder am Beispiel einer Windkraftanlage die dynamischen Lasten aus dem Betrieb. Vor allem die Überlagerung der nieder- und hochfrequenten Lasten führt zu einer mikrostrukturellen Gefügeänderung im Bauteil, welche an sich keinen erheblichen Schaden darstellt, aber sekundäre Schadreaktionen begünstigen kann. In erster Linie weist das Betongefüge durch die eingetragenen Mikrorisse einen erheblich geringeren Widerstand gegen das Eindringen externer Medien auf, welche wiederum weitere Schäden auslösen oder verstärken können.

\*Vortragender Autor: Robin.Przondziona@rub.de

Der Transport flüssiger Medien in porösen Baustoffen erfolgt durch verschiedenste Mechanismen. Dabei hängt der Transport in erster Linie von der Größe, Art und Form der Poren bzw. Mikrorisse ab, aber auch von den physikalischen Gesetzmäßigkeiten, die in der jeweiligen Pore/Mikroriss wirken. Neben dem Transport durch Diffusion ist der Kapillartransport ein wesentlicher Transportmechanismus [4,5].

Bei Betonfahrbahndecken spielt neben den vorgenannten Mechanismen ein zusätzlicher Effekt eine wichtige Rolle. Steht Flüssigkeit auf der Fahrbahn während gleichzeitig ein Reifen über den Beton fährt, so entsteht ein lokaler hydraulischer Druck an der Betonoberfläche, welcher in das Betoninnere gerichtet das Eindringverhalten flüssiger Medien verstärken und beschleunigen kann.

Neben dem reinen Transport von Wasser in porösem Gefüge ist für die hier angestellten Betrachtungen hinsichtlich einer Alkali-Kieselsäure Reaktion (AKR) der Transport von Alkalien im Zuge der Tausalzbeaufschlagung von besonderer Bedeutung. Die so zusätzlich in das Betongefüge eingetragenen Alkalien können mit einer entsprechend alkaliempfindlichen Gesteinskörnung rasch auch in größerer Tiefe des Betonbauteils reagieren und die AKR massiv beschleunigen.

In den hier beschriebenen Untersuchungen werden sowohl die Einflüsse auf die Entwicklung und Ausmaße einer Vorschädigung (mikrostrukturelle Degradation) als auch das Eindringverhalten flüssiger Medien in solch vorgeschädigtes Betongefüge erfasst. Zudem wird der sich im Betongefüge einstellende Druck infolge äußeren hydraulischen Druckes tiefenabhängig quantifiziert und dessen Auswirkung auf das Eindringverhalten beschrieben.

## 2. Experimentelle Untersuchungen

### 2.1 Degradation

In den experimentellen Untersuchungen wurden Betonbalken mit den Abmessungen  $180 \times 50 \times 27 \text{ cm}^3$  zyklisch belastet. Alle Balken wurden einheitlich mit einem typischen Straßenbeton hergestellt. Die Oberfläche der Balken wurde nach der Herstellung mit einem Besenstrich texturiert.

Die zyklischen Beanspruchungen wurden jeweils im Alter der Balken von mindestens 56 Tagen begonnen. Diese wurden mit Vierpunktbiegezugversuchen realisiert. Aus der Überlagerung von langsam veränderlichen thermischen Zwangsspannungen mit rasch zyklisch wiederkehrenden Verkehrslasten ergeben sich jeweils eine Ober- und Unterspannung ( $\sigma_o$  bzw.  $\sigma_u$ ). Im Wesentlichen wurden zwei Lastfälle unterschieden. Zum einen eine Abkühlung von oben (negativer Temperaturgradient von  $0,4 \text{ K/cm}$ ) bei gleichzeitiger Verkehrslast durch einen 40-t-LKW in Plattenmitte und zum anderen die Verkehrslast am Plattenrand bei gleichem Temperaturgradient. Hieraus ergeben sich an der Betonoberfläche, bei einer Schwingbreite durch Verkehrslast von  $1,0 \text{ N/mm}^2$ , die extremalen Spannungsverhältnisse  $\sigma_u/\sigma_o = 0,5$  bzw.  $\sigma_u/\sigma_o = 0,66$  [3].

Ausgehend von einer durchschnittlichen Biegezugfestigkeit  $f_{ct,fl}$  für Betonfahrbahndecken von  $6,0 \text{ N/mm}^2$  ergeben sich für diese beiden Lastfälle die Verhältnisse  $\sigma_o/f_{ct,fl} = 0,35$  bzw.  $\sigma_o/f_{ct,fl} = 0,5$ . Aufgrund der Probekörpergeometrien sowie Austrocknungseffekten ergibt sich eine geringere Biegezugfestigkeit von ca.  $4,0$  bis  $4,5 \text{ N/mm}^2$ . Für die durchgeführten Versuche wurden die Oberspannungen den jeweiligen Balken angepasst, um das Verhältnis  $\sigma_o/f_{ct,fl}$  beizubehalten. In diesen Versuchsreihen wurden folgende Parameter variiert:

- Verhältnis von Oberspannung zu Biegezugfestigkeit ( $\sigma_o/f_{ct,fl} = 0,35; 0,50; 0,60$ )
- Anzahl der Lastzyklen ( $N = 0; 1,0; 2,0; 5,0 \text{ Mio.}$ )

Die Lastzyklen wurden mit einer Frequenz von  $5 \text{ Hz}$  aufgebracht. Hieraus ergaben sich bei den angestrebten Gesamtlastzyklen Prüfdauern von bis zu 14 Tagen. Um dennoch eine große Anzahl an Proben untersuchen zu können, wurde an der Ruhr-Universität Bochum (RUB) ein Mehrfachprüfstand ent-

wickelt. Dieser ermöglicht die gleichzeitige zyklische Belastung von sechs Balken (Abb. 1). Die Steuerung erfolgt über einen Haupt-Hydraulikzylinder, welcher den Öldruck über ein Leitungssystem an die einzeln ansteuerbaren Versuchsstränge verteilt.



Abbildung 1: Versuchsstand zum zyklischen Belasten für 6 großformatige Probekörper (180 x 50 x 27 cm<sup>3</sup>)

Die sich während der zyklischen Beanspruchung einstellende Degradation wird im Ruhezustand des Balkens über vergleichende Ultraschalllaufzeitmessungen der Oberflächenwelle in der auf Biegezug beanspruchten Betonrandzone erfasst. Daraus wird der dynamische Elastizitätsmodul ermittelt. Je größer der Abfall dieses Kennwerts im Laufe der Lastzyklen ist, d. h. je niedriger der relative dynamische E-Modul wird, umso mehr Mikrorisse und andere mikrostrukturelle Veränderungen sind im Betongefüge zu vermuten.

In Abbildung 2 sind die Verläufe der relativen dynamischen E-Moduln unter verschiedenen Belastungsniveaus dargestellt. Erwartungsgemäß wurde ein umso größerer Abfall im relativen dynamischen E-Modul festgestellt, je höher das Lastniveau war. Nach fünf Mio. Lastzyklen zeigte sich bei einem Belastungsniveau von  $\sigma_o/f_{ct,fl} = 0,35$  ein Abfall auf ca. 91 %, hingegen war bei  $\sigma_o/f_{ct,fl} = 0,60$  bereits ein signifikant höherer Abfall auf ca. 75 % festzustellen. Des Weiteren stellte sich ein maßgebender Anteil der Schädigung bereits nach den ersten wenigen Tausend Lastwechseln ein. Im weiteren Verlauf der Belastung nahm die Schädigung weitestgehend stetig, aber deutlich langsamer zu. Dieser Verlauf zeichnet den beginnenden Teil eines S-förmigen Schädungsverlaufs nach Wöhler [6] ab.

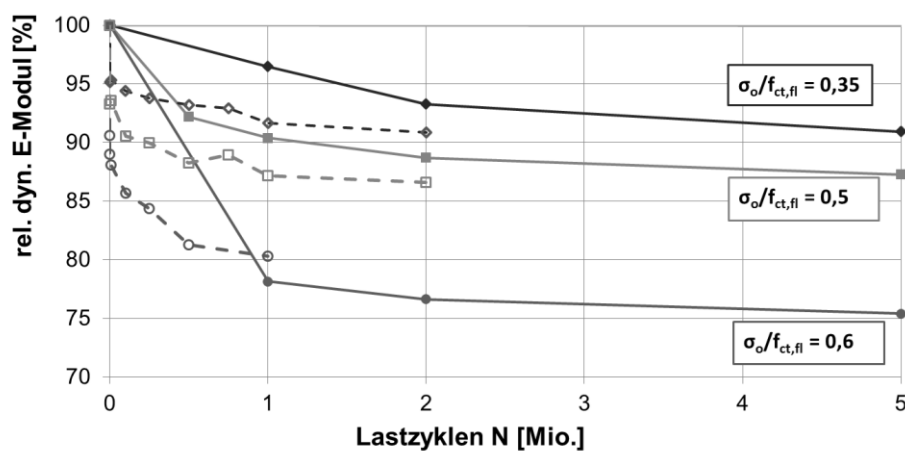


Abbildung 2: Abfall des relativen dynamischen E-Moduls in Abhängigkeit der Lastzyklenzahl und des Spannungsverhältnisses

Nach Abschluss der Vorschädigung wurden aus einzelnen Balken Teilproben für die mikroskopische Bewertung der Mikrorissbildung entnommen. Von diesen Teilproben wurden Dünnschliffe erstellt, an denen dann die Rissanzahl, Risslänge, Rissbreite und daraus die Rissöffnungsfläche in der Analyseebene auf einer Fläche von  $5,0 \times 5,0 \text{ cm}^2$  ermittelt wurden (Tab. 1). Es zeigte sich vor allem ein deutlicher Unterschied in der Anzahl der Mikrorisse zwischen vorgeschädigtem und nicht vorgeschädigtem Bereich. Die Breite der Mikrorisse betrug rd.  $5 \mu\text{m}$ , ihre Länge rd.  $1,5 \text{ mm}$  und war für alle Schädigungsbereiche weitestgehend konstant. Des Weiteren wurde festgestellt, dass die Risse sowohl in der Korn- grenze als auch im Zementstein auftreten.

Tabelle 1: Ergebnisse der Rissmikroskopie an Dünnschliffproben in Abhängigkeit der Degradation

Schadenscharakteristik					
Lastzyklen	[Mio.]	0	2	2	5
$\sigma_o/f_{ct,fl}$	[-]	0	0,5	0,35	0,5
$E_{dyn}$	[%]	100	92,7	91,5	70,2
Risscharakteristik (Fläche $5 \times 5 \text{ cm}^2$ )					
Rissanzahl	[-]	12	74	104	403
Rissbreite	$[\mu\text{m}]$	6,6	5,2	5,3	4,6
Risslänge	$[\mu\text{m}]$	1.400	1.600	1.000	1.500
Rissfläche	$[\mu\text{m}^2]$	13.400	8.100	6.100	8.500
Rissfläche, gesamt	$[\mu\text{m}^2]$	160.500	600.400	633.300	3.500.000

Neben der Belastung bei konstanten Spannungsverhältnissen wurde ebenfalls die Hypothese der Schadensakkumulation nach Palmgren-Miner [7,8] untersucht. Hierzu wurden die großformatigen Probekörper im Wechsel für je 1 Mio. Lastzyklen mit unterschiedlichen Spannungsverhältnissen belastet. Diese wechselten zwischen  $\sigma_o/f_{ct,fl} = 0,35$  und  $\sigma_o/f_{ct,fl} = 0,50$ . Die Belastung erfolgte bis insgesamt 10 Mio. Lastwechsel (vgl. Abb. 3).

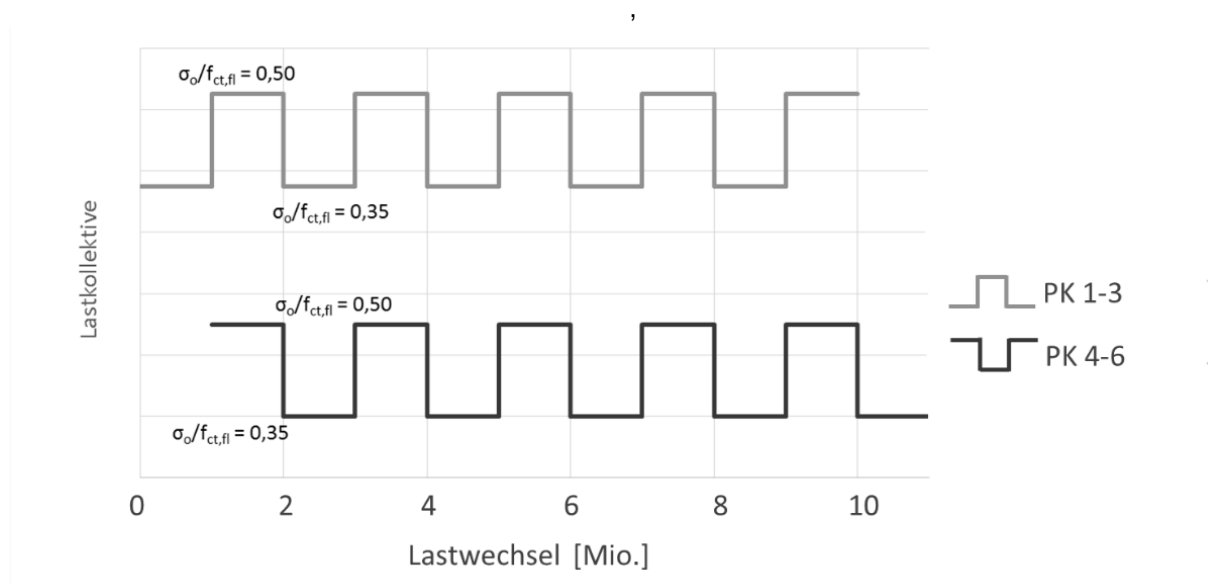


Abbildung 3: Belastungsschema für die wechselnde Beanspruchung

Während der Belastung, wurden in bestimmten Intervallen wie auch schon bei konstanten Spannungsverhältnissen die Ultraschalllaufzeiten an der biegezugbeanspruchten Seite der Großbalken erfasst und anhand dessen der dynamische E-Modul bestimmt. Abbildung 4 zeigt den Abfall des relativen

dynamischen E-Moduls unter wechselnder Beanspruchung. Während der ersten aufgebrauchten Lastwechsel zeigt sich eine etwas größere Schädigung infolge der höheren Belastung. Im weiteren Verlauf verhält sich der Abfall der unterschiedlich belasteten Balken leicht gegenläufig, aber weitestgehend parallel. Nach Beendigung der 10 Mio. liegt die Degradation der unterschiedlich belasteten Balken nur wenige Prozent auseinander. Daher lässt sich die Palmgren-Miner Hypothese für den vorliegenden Fall als erwiesen ansehen.

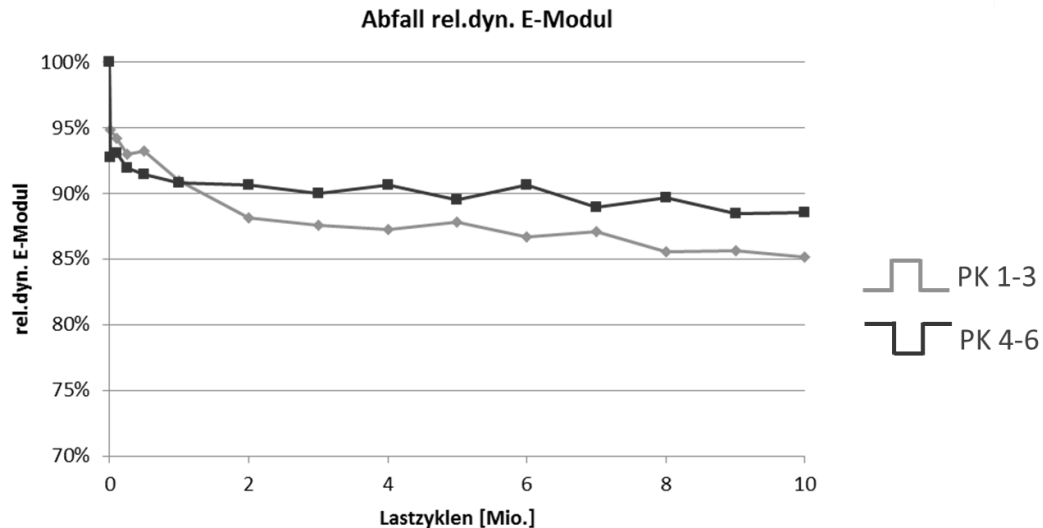


Abbildung 4: Abfall des relativen dynamischen E-Moduls bei wechselnder Beanspruchung

## 2.2 Eindringverhalten flüssiger Medien

Der Feuchtetransport in sowohl geschädigte als auch ungeschädigte Probekörper hängt maßgeblich von der Vorschädigung der Probekörper ab. Nach der zyklischen Belastung der Großbalken wurde an der biegezugbeanspruchten Seite der Balken das kapillare Eindringverhalten von Wasser untersucht. Hierzu wurden an der Balkenoberfläche Karsten-Röhrchen appliziert und die Wasseraufnahme über die Zeit für geschädigte und ungeschädigte Probekörper festgehalten.

Die Wasseraufnahme in Abhängigkeit der zuvor induzierten Vorschädigung ist in Abbildung 5 dargestellt. Es lässt sich festhalten, dass die kapillare Wasseraufnahme mit zunehmendem Grad der Vorschädigung ( $rel.E_{dyn}$ ) schneller und größer ausfällt. Lag die Wasseraufnahme für einen ungeschädigten Probekörper nach acht Stunden bei ca.  $10 \text{ kg/m}^2$  so hat sich diese für einen stark vorgeschädigten Probekörper mit  $rel. E_{dyn} = 70,2 \%$  in etwa um das 2,5-fache erhöht.

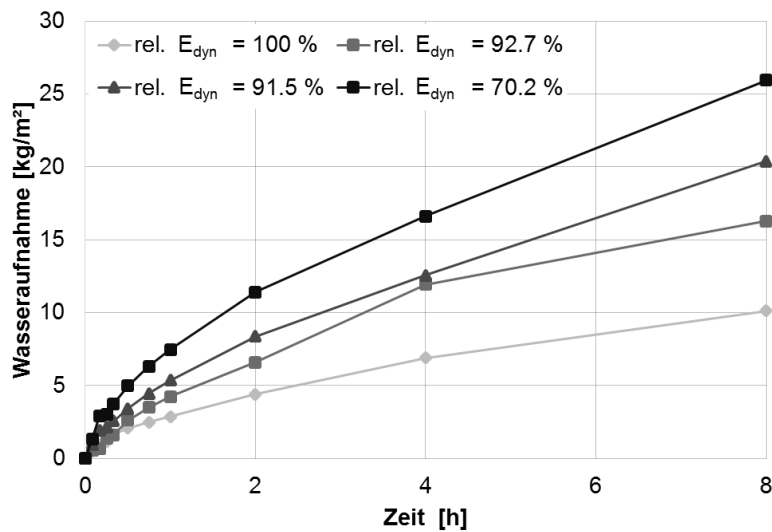


Abbildung 5: Kapillare Wasseraufnahme in Abhängigkeit der Degradation

In Kombination mit den oben beschriebenen zyklischen Beanspruchungen der Großbalken wurden tausalzhaltige Lösungen auf die vorgeschädigten Betonoberflächen aufgebracht und deren Eindringverhalten näher untersucht. Hierzu wurde ein praxisnahes Beanspruchungsszenario entwickelt. Im Zuge der Untersuchungen wurde an der RUB die Tausalzlösung nach Abschluss der zyklischen Vorbeanspruchung in die Betonoberfläche durch Überrollen eingewalkt. Hierzu wurde eine Rundlaufanlage entwickelt, in der bis zu sechs vorgeschädigte Großbalken überrollt werden können (Abb. 6). Die sechs integrierten Reifen sind jeweils mit einer Auflast von bis zu einer Tonne versehen. Sie überrollen die Balken mit einer Geschwindigkeit von bis zu 10 km/h. Während dieses Überrollens steht die Prüflösung auf der Oberseite der Betonbalken auf. Das Eindringverhalten wurde hierbei unter folgenden Variationen untersucht.

- Na-Konzentration der Salzlösung (3 %, 5 %)
- Anzahl der Überrollungen ( $N_{\ddot{u}} = 1,0-2,0$  Mio.)
- Grad der Vorschädigung (Anzahl der Lastzyklen ( $N = 0-5,0$  Mio.) und Spannungsniveau ( $\sigma_o/f_{ct,fl} = 0,35; 0,50; 0,60$ ))



Abbildung 6: links: Versuchsstand zum gleichzeitigen Einwalken einer Prüflösung in 6 großformatige Probekörper (180 x 50 x 27 cm³); rechts: überrollendes Rad

Im Anschluss an das Einwalken der Prüflösung in die großformatigen Betonprobekörper wurden Teilproben ( $10 \times 10 \times 20 \text{ cm}^3$ ) entnommen, an denen nach Spaltung die Chlorideindringtiefe mit Silbernitrat und Kaliumdichromat erfasst wurde. Es wurde hierbei zum einen unterschieden zwischen Proben aus dem zuvor ungeschädigten Randbereich und der voll geschädigten Balkenmitte als auch zwischen Proben aus dem Bereich der Reifenspur und solchen bei denen die Prüflösung lediglich aufstand und nicht zusätzlich eingewalkt wurde (vgl. Abb. 7).



Abbildung 7: Balkenaufsicht mit Reifenspur und Entnahmestellen der Teilproben

Abbildung 8 stellt die Chlorideindringfront einer fünfprozentigen NaCl-Lösung unterschiedlicher Teilproben aus den unterschiedlichen Entnahmebereichen dar, nachdem Sie 500.000-mal im Mehrfachprüfstand überrollt wurden. Es ist dabei zu erkennen, dass die Chloride sowohl in Abhängigkeit der Vorschädigung als auch durch das Einwalken tiefer in den Beton eindringen. Die tiefste Eindringfront zeichnete sich dabei bei der Teilprobe aus der vollgeschädigten Balkenmitte mit einem rel. dyn. E-Modul von 80,2 % in der Reifenspur ab. Die mittlere Eindringtiefe lag hier bei 33,7 mm. Im identisch vorgegeschädigten Bereich neben der Reifenspur in dem die Prüflösung lediglich aufstand und ausschließlich durch kapillares Saugen eingedrungen ist, lag die mittlere Eindringtiefe mit 26,7 mm darunter. Die geringste Eindringtiefe wurde im ungeschädigten Randbereich neben der Reifenspur festgestellt. Diese lag bei 20,8 mm.

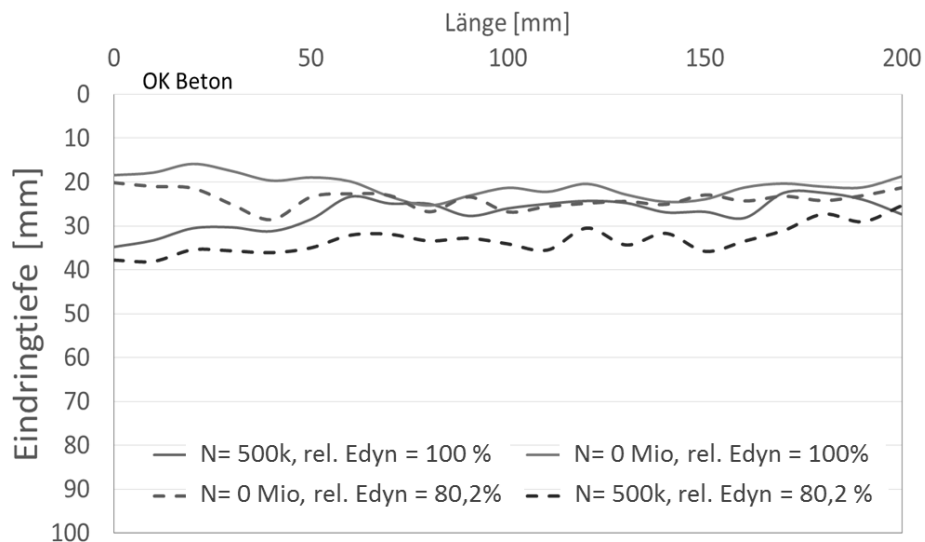


Abbildung 8: Chlorideindringfront über die Länge der Teilprobekörper in Abhängigkeit der Vorschädigung und Anzahl der Überrollungen

### 2.3 Permeationsdruck im Festbeton

Das Überrollen der Probekörper bei gleichzeitig aufstehender Prüflösung hat nachweislich eine verstärkende Wirkung auf das Eindringverhalten der aufstehenden Prüflösung (vgl. Kap. 2.2). Diese verstärkende Wirkung entsteht im Moment des Überrollens des Reifens. Zwischen der Fahrbahnoberfläche, der Prüflösung und dem Reifen generiert sich ein hydraulischer, zum Teil auch in das Betongefüge gerichteter, hydraulischer Druck. Dieser bewirkt, dass das sich im gesättigten Beton befindliche Wasser diesen äußeren hydraulischen Druck ebenfalls wiederfährt und so tiefer in das Betongefüge eindringen kann. Man kann hier von einem Permeationsdruck sprechen. Dieser ist abhängig von mehreren Faktoren. Zum einen von dem äußeren Druck, welcher wiederum von Geschwindigkeit und Gewicht der Fahrzeuge abhängig ist, und zum anderen von dem Betongefüge auf das dieser wirkt. Insbesondere die Dichte und die Konnektivität des vorhandenen Porensystems sind hier relevant. Die Konnektivität kann durch induzierte Mikrorisse derart gesteigert werden, dass ein stärkeres Eindringen die Folge ist.

Um das Phänomen des Einwalkens oder genauer des Permeationsdruckes im Betongefüge nähergehend zu untersuchen wurde eine Testmethode entwickelt, bei der der durch äußere hydraulische Druckeinwirkung entstehende Permeationsdruck im Betongefüge erfasst werden kann. Abbildung 9 zeigt das Versuchsschema zur Druckmessung im Gefüge. Die zu untersuchenden Probekörper werden zunächst mittels einer Bohrung in variierenden Tiefen präpariert. An diese Bohrung wird druckdicht nach außen geführt ein Rohr angeschlossen, welches wiederum mit einem Druckaufnehmer verbunden ist. Der entstandene Prüfraum muss zur Messung des Druckes wassergefüllt sein. Das Wasser wirkt hier als inkompressibler Druckmittler. Wirkt nun ein äußerer Druck auf den Probekörper und wird bis zum Prüfraum weitergegeben, so kann der Druckaufnehmer diesen Druck erfassen.

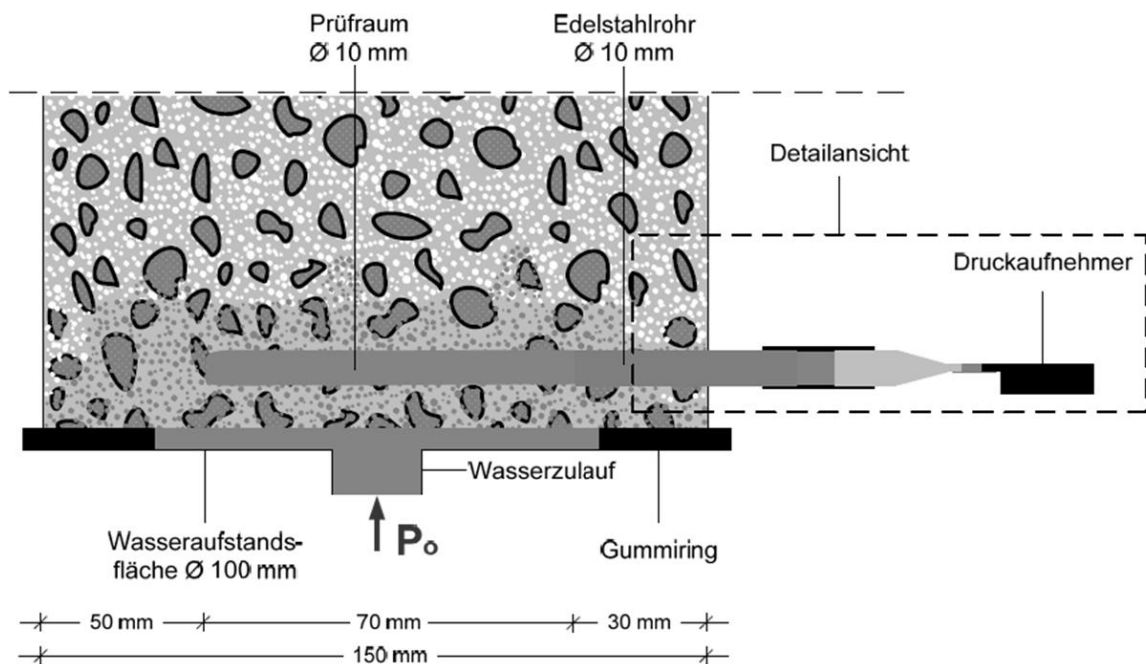


Abbildung 9: Prüfschema zur Erfassung des Permeationsdruckes im Betongefüge

In einer ersten Versuchsreihe wurde auf zuvor präparierte Probekörper ein äußerer hydraulischer Druck aufgebracht und dieser in verschiedenen Tiefen (6, 10 und 14 mm) gemessen. Der externe hydraulische Druck wurde zu 3 bar festgelegt und in einem Prüfstand zur Untersuchung der Wasserdurchlässigkeit (WU-Stand) auf den Betonprobekörper (15 x 15 x 15 cm<sup>3</sup>) appliziert. Des Weiteren wurde eine zuvor geschädigte Probe mit einem rel. dyn. E-Modul von ca. 85 % und einer Prüfraumtiefe von 10 mm untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in Abbildung 10 dargestellt. Es zeigt sich, dass der sich im Gefüge einstellende Permeationsdruck in ungeschädigten Proben mit zunehmender



Tiefe sukzessive abbaut. Hier ist zu erwähnen, dass bereits in einer Tiefe von 14 mm nach 20 h ein Druck von ca. 350 mbar erreicht wurde. In einer Tiefe von 6 mm unter der Oberfläche lag der Druck bei gleicher Beanspruchung nach 20 Stunden bei knapp 2000 mbar. Insbesondere ist hervorzuheben, dass der Druck in einem zuvor geschädigten Probekörper (rel.  $E_{\text{dyn}} = 85\%$ ) um ein vielfaches schneller ansteigt. Hier wurde die messtechnische Grenze trotz eines Prüfraumabstandes von 10 mm bereits nach wenigen Stunden erreicht. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass die infolge der zyklischen Beanspruchung eingetragenen Mikrorisse im Betongefüge als Transportweg zur Verfügung stehen und das Eindringen flüssiger Medien massiv verstärken.

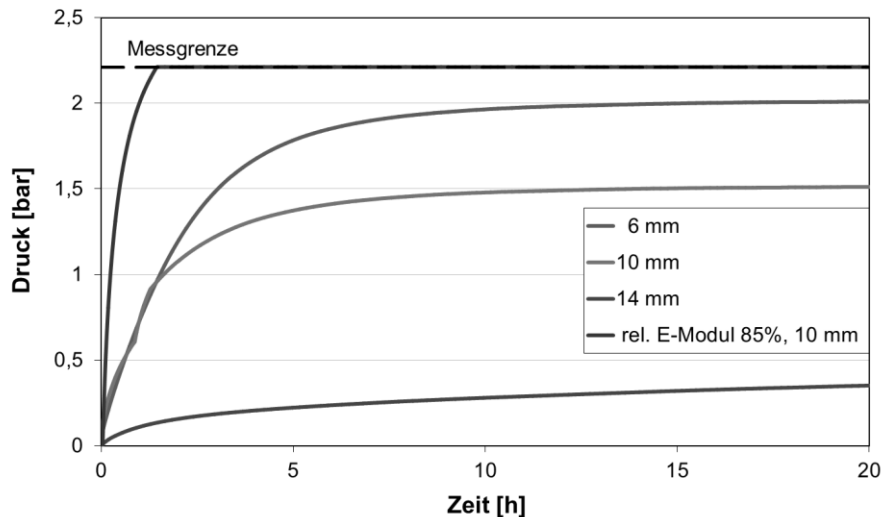


Abbildung 10: Permeationsdruck in verschiedenen Tiefen

### 3. Fazit

Die präsentierten Ergebnisse zeigen einen deutlichen Einfluss der zyklischen mechanischen Belastung auf das Eindringverhalten von Flüssigkeiten und damit auf das Potenzial einer intensivierten Schädigung durch AKR. Die begleitenden Messungen der Ultraschalllaufzeit charakterisieren eine eindeutige Abhängigkeit der Schädigung von der Anzahl der durchlaufenden Lastzyklen sowie dem Spannungsverhältnis der Oberspannung zur Biegezugfestigkeit der Großbalken. Darüber hinaus wird die Degradation des Mikrogefüges anhand von rissmikroskopischen Auswertungen deutlich.

Die Belastung unter wechselnder Beanspruchung zur Überprüfung der Palmgren-Miner Hypothese hat für den vorliegenden Fall zu einer Bestätigung der Hypothese im Rahmen der zu erwartenden Schwankungen geführt.

Es konnte anhand von Untersuchungen zum kapillaren Wassereindringverhalten an sowohl geschädigten als auch ungeschädigten Probekörpern eine Abhängigkeit der Wasseraufnahme von der Vorschädigung ausgemacht werden. Es zeigte sich, dass die Wasseraufnahme höher ist und schneller erfolgt, je stärker die Vorschädigung der Probekörper erfolgte.

In den Einwalkversuchen in dem entwickelten Mehrfachprüfstand zeigte sich zum einen die Zunahme der Chlorideindringtiefe in geschädigtem Beton und zum anderen eine Steigerung der Eindringtiefe in Folge des überrollenden Reifens.

Der sich dadurch einstellende Permeationsdruck konnte in einer ersten Versuchsreihe beschrieben werden und verdeutlicht den Einfluss der Degradation auf das Eindringverhalten flüssiger Medien sowie die tiefenabhängige Reduktion des Permeationsdruckes.

## Danksagung

Der Autor dankt der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die finanzielle Förderung im Rahmen des Teilprojektes TP 1 „Externer Alkalieintrag in mechanisch / thermisch vorgeschädigtes Betongefüge“ der Forschergruppe 1498 „Alkali-Kieselsäure-Reaktionen in Betonbauteilen bei gleichzeitiger zyklischer Beanspruchung und externer Alkalizufuhr“.

## Literatur

- [1] Przondziono, R.; Timothy, J.J.; Nguyen, M.; Weise, F.; Breitenbücher R.; Meschke, G.; Meng, B.: Vorschädigungen in Beton infolge zyklischer Beanspruchungen und deren Auswirkung auf Transportprozesse im Hinblick auf eine schädigende AKR. Beton- und Stahlbetonbau 110 (2015), H. 1, S. 3-12.
- [2] Sievering, C.: Dauerhaftigkeit von Betonfahrbahndecken unter besonderer Berücksichtigung des externen Alkalieintrags. Dissertation (2012). Ruhr-Universität Bochum.
- [3] Weise, F.; Wiedmann, A.; Volland, K.; Kotan, E.; Ehrig, K.; Müller, H.S.: Auswirkungen von Ermüdungsbeanspruchungen auf Struktur und Eigenschaften von Fahrbahndeckenbetonen. Beton- und Stahlbetonbau 110 (2015), H. 1, S. 22-33.
- [4] Vokwein, A.: Untersuchungen über das Eindringen von Wasser und Chlorid im Beton. Dissertation (1991), TU München.
- [5] Wittmann, F.H.; Zhang, P.; Zhao, T.: Eine zerstörungsfreie Messmethode zum Studium des Eindringens von Flüssigkeiten in Beton. 17. Internationale Baustofftagung (ibausil), Weimar, Tagungsbericht, Band 1 (2009), S. 969-974.
- [6] Ibuk, H.: Zum Ermüdungsverhalten von Beton unter Druckschwellbelastung. Dissertation (2008), Ruhr-Universität Bochum.
- [7] Miner, M.A.: Cumulative damage in fatigue. Journal of Applied Mechanics 12 (1945), Issue 1
- [8] Palmgren, A.: Die Lebensdauer von Kugellagern. VDI Forschungsheft Nr. 68 (1924), S. 339-341