

**A. Kustermann; K.-Ch. Thienel**

## **Einfluss einer Druckbelastung auf die Mikrorissentwicklung im Beton**

### **Kurzfassung**

Ziel dieser Untersuchung war es, den Einfluss einer einaxialen Druckbelastung von 67 % der maximalen Druckfestigkeit im Alter von 28 Tagen auf die Mikrorissentwicklung im Beton zu untersuchen. Die Vorlast wurde in der Druckpresse für eine Dauer von zwei Stunden aufgebracht. Probekörper mit und ohne Vorlast wurden danach zur Untersuchung der Mikrorisse präpariert und mikroskopisch untersucht. Es wurden die Parameter Mikrorissanzahl, durchschnittliche Mikrorisslänge, durchschnittliche Mikrorissbreite und auch die gesamte Mikrorissflächensumme ermittelt. Die Mikrorisse wurden je nach ihrer Lage im Gefüge in Matrixrisse und Kontaktzonenrisse unterschieden. Überdies wurde die untersuchte Fläche von 10 x 10 cm in Rand- und Kernzone unterteilt.

Die Untersuchung der vorhandenen Mikrorisse zeigte, dass die Vorlast zu einer erhöhten Mikrorissanzahl führt. Die durchschnittliche Mikrorissbreite und –länge steigt nahezu um das Doppelte. Somit erhöht sich die gesamte Mikrorissflächensumme signifikant.

Die Mikrorisse in der Matrix sind in hoher Anzahl vorhanden, jedoch von geringer Länge und Breite. Die durchschnittliche Mikrorisslänge und –breite sind innerhalb der Mörtelmatrix nahezu gleich.

In der Kontaktzone ist die gesamte Mikrorissflächensumme der belasteten Probekörper im Kernbereich höher, während gleichzeitig die Anzahl geringer ist. Die durchschnittliche Mikrorissbreite ist im Kernbereich doppelt so hoch wie im Randbereich, die durchschnittliche Mikrorisslänge ist im Kernbereich dreimal so hoch.

### **Einleitung**

Mikrorisse sind bereits ohne äußere Einwirkungen im Beton enthalten. Als Ursache dafür werden unterschiedliche Temperatúrausdehnungen und Elastizitätsmoduln sowie unterschiedliches Verformungsverhalten der einzelnen Komponenten im Beton angesehen. Dies führt zu Gefügespannungen im Beton, die beim Überschreiten der Zugfestigkeit zu Mikrorissen führen. Unter Belastung wird dem Beton kurz vor dem Versagen ein sehr starkes Mikrorisswachstum unterstellt. Die Kontaktzone ist im Beton der schwächste Teil des Gefüges. Während der Belastung treten dort zuerst Mikrorisse auf, bei erhöhter Last kommt es auch zu Mikrorissen in der Matrix [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8].

## Versuchsmethode – experimentelle Versuche

Die hier vorgestellten Versuche wurden an hochfesten Betonprobekörpern durchgeführt. Die Mischungszusammensetzung ist Tabelle 1 zu entnehmen. Die Proben wurden nach einem Tag ausgeschalt, dann sieben Tage unter Wasser und anschließend im Klima 20 ° C / 65 % r. F. gelagert.

Tabelle 1

Mischungszusammensetzung des hochfesten Betons für 1 m<sup>3</sup> Frischbeton

	Rohdichte [kg/dm <sup>3</sup> ]	Masse [kg/m <sup>3</sup> ]
Zement CEM I 42,5 R	3,10	414
Silicastaub (slurry)	1,39	72
Sand (0/4) Münchner Moränenkalk	2,68	841
Kies (4/8) Münchner Moränenkalk	2,72	408
Kies (8/16) Münchner Moränenkalk	2,73	596
Münchner Leitungswasser	1,00	122

Der untersuchte hochfeste Beton wies im Alter von 28 Tagen die in Tabelle 2 aufgelisteten Festbetonkennwerte auf. Die angegebenen Werte sind Mittelwerte aus drei Prüfungen. Die Probenvorbereitung und die Prüfungen erfolgten nach DIN 1048 [1] und DIN EN 12390 [10]. Die Prüfung der Wassereindringtiefe erfolgte am 10 cm Würfel, die Druckfestigkeit und die Spaltzugfestigkeit am 15 cm Würfel.

Tabelle 2

Kennwerte des hochfesten Betons im Alter von 28 Tagen

Druckfestigkeit [MPa]	88,8	Festbetonrohichte [kg/dm <sup>3</sup> ]	2,43
Spaltzugfestigkeit [MPa]	7,1	Wassereindringtiefe [mm]	12

## Probenvorbereitung

Zur Untersuchung der Mikrorisse im hochfesten Beton wurde im Alter von 28 Tagen die Hälfte der Prüfkörper (3 Probekörper) mit 67 % ihrer Druckfestigkeit für eine Dauer von zwei Stunden vorbelastet. Die Vorbelastung wurde wie in der schematischen Darstellung in Abbildung 1, links dargestellt aufgebracht. Ziel der Vorbelastung war die Induzierung einer erhöhten Anzahl von Mikrorissen im Probekörper. Direkt nach der Entlastung wurden die vorbelasteten wie auch die unbelasteten Probekörper senkrecht zur Belastungsrichtung in zwei Teile unterschiedlicher Größe gesägt. Der größere Teil wurde zur Untersuchung von Dauerhaftigkeitseigenschaften weiterverwendet. Die Ergebnisse hierzu wurden mit den Mikrorissergebnissen verglichen und sind in [11] veröffentlicht. Der kleinere Teil, ein Drittel des vormalig 10 cm Würfels, wurde zur Untersuchung der Mikrorisse auf der gesägten Fläche präpariert. Die Probenpräparation

ist in [12] und [13] im Detail erläutert. Die Flächen wurden jeweils planparallel geschliffen, getrocknet und schließlich mit einem niedrig viskosen, gefärbten Epoxidharz vergossen. Nach dem Erhärten wurde das überschüssige Harz abgeschliffen und die Oberfläche poliert, so dass alle Poren und Risse in der Fläche erkennbar wurden. Auf die zu untersuchende Fläche wurde eine Glasplatte mit einer Gittereinteilung aufgelegt, so dass bei der Untersuchung mit dem Lichtmikroskop jeder Mikroriss in seiner Lage mittels Koordinaten festgehalten werden konnte. Ermittelt wurden die Anzahl und die Verteilung der Mikrorisse, ebenso wie deren Länge und Breite und somit deren Mikrorissfläche. Es wurden Mikrorisse mit Breiten zwischen  $3\ \mu\text{m}$  und  $25\ \mu\text{m}$  gemessen. Breitere Risse werden im Weiteren als Makrorisse bezeichnet und werden in die hier dargestellte Auswertung nicht mit einbezogen.

Die gezählten und vermessenen Mikrorisse wurden dann eingeteilt in Mikrorisse in der Mörtelmatrix (ZM) und Mikrorisse in der Kontaktzone (KZ) zwischen Gesteinskorn und Zementstein. Ebenso wurden die Mikrorisse nach ihrer Lage auf der Prüffläche eingeteilt in Mikrorisse im Kernbereich oder im Randbereich des Probekörpers. Abbildung 1, rechts zeigt beispielhaft die Mikrorissverteilung einer belasteten Probe, mit Rastersystem und Kennzeichnung des Rand- und Kernbereichs. Der Randbereich bezeichnet die äußeren 12 mm der Probekörperfläche.

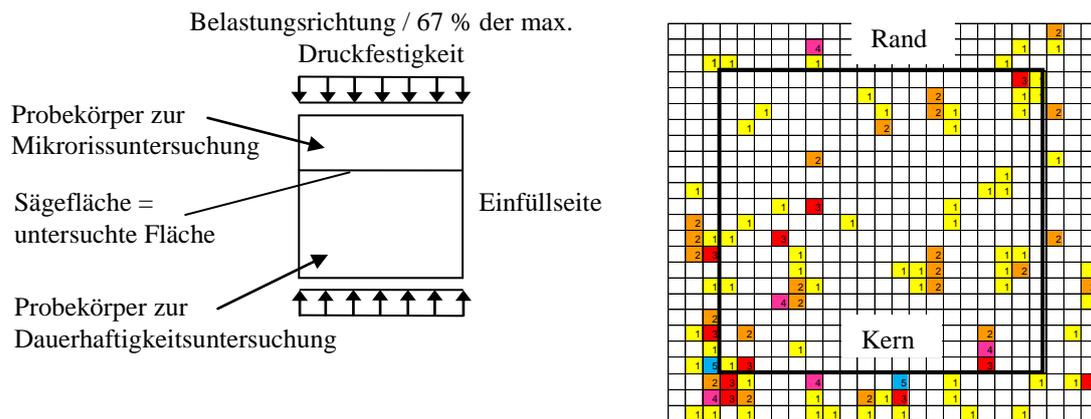


Abbildung 1  
Schematische Darstellung der Vorbelastung und der Probekörperherstellung (links);  
beispielhafte Darstellung der Mikrorissverteilung einer belasteten Probe, mit  
Rastersystem und Kennzeichnung des Rand- und Kernbereichs (rechts)

## Versuchsergebnisse: Einfluss der Vorbelastung

Die Vorbelastung auf die Probekörper aus hochfesten Beton führt zu einer erhöhten Anzahl von Mikrorissen (Abbildung 2, links). Betrachtet man die gesamte Mikrorissflächensumme (Abbildung 2, rechts), so zeigt sich hier der Einfluss noch deutlicher. Die Mikrorissflächensumme der vorbelasteten Probekörper ist mehr als doppelt so groß wie die unbelasteten.

Dies bedeutet, dass jeder einzelne Mikroriss im Durchschnitt durch die Druckvorbelastung breiter und länger wurde, und somit zu einer deutlich höheren Rissfläche führte. Abbildung 3 zeigt, dass die durchschnittliche Risslänge und noch stärker die durchschnittliche Rissbreite nach Vorlast etwa ein Drittel länger bzw. breiter als im unbelasteten Zustand ist.

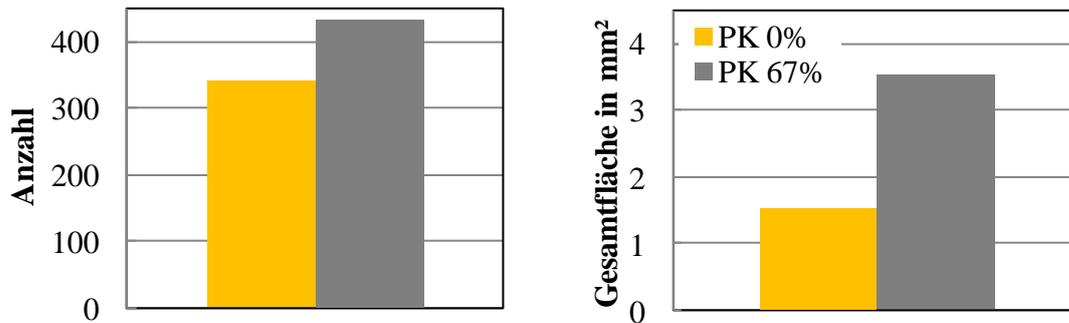


Abbildung 2  
Anzahl (links) und Gesamtfläche der Mikrorisse (rechts) im Vergleich mit und ohne Vorlast

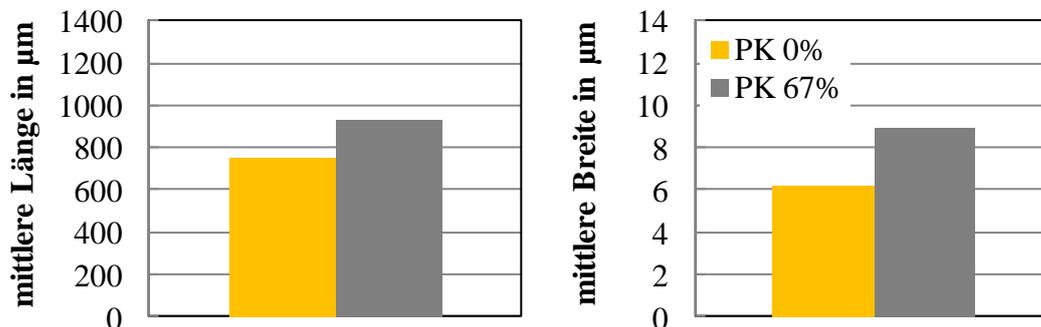


Abbildung 3  
Durchschnittliche Mikrorisslänge (links) und Mikrorissbreite (rechts) mit und ohne Vorlast

### Lage der Mikrorisse innerhalb des Betongefüges: Vergleich ZM – KZ

Im Folgenden soll die Lage der Mikrorisse innerhalb des hochfesten Betongefüges betrachtet werden. Die ermittelten Mikrorisse wurden unterschieden in Kontaktzonenrisse (KZ) und in Mikrorisse in der Mörtelmatrix (ZM). In Abbildung 4 ist erkennbar, dass an den unbelasteten Proben sowohl die Anzahl (6fach), wie auch die Mikrorissfläche (3fach) in der Mörtelmatrix deutlich höher sind als in der Kontaktzone. Die Anzahl der Mikrorisse in der Mörtelmatrix steigt durch die Vorbelastung nur gering an, die Mikrorissflächensumme etwas stärker. In der Kontaktzone verdoppelt sich die Anzahl der Mikrorisse durch die Vorlast, die Rissfläche vervierfacht sich nahezu. Der

Unterschied zwischen der Rissfläche der Mikrorisse in der Mörtelmatrix und der Kontaktzone ist nach der Vorlast nicht mehr so deutlich, wie im unbelasteten Zustand.

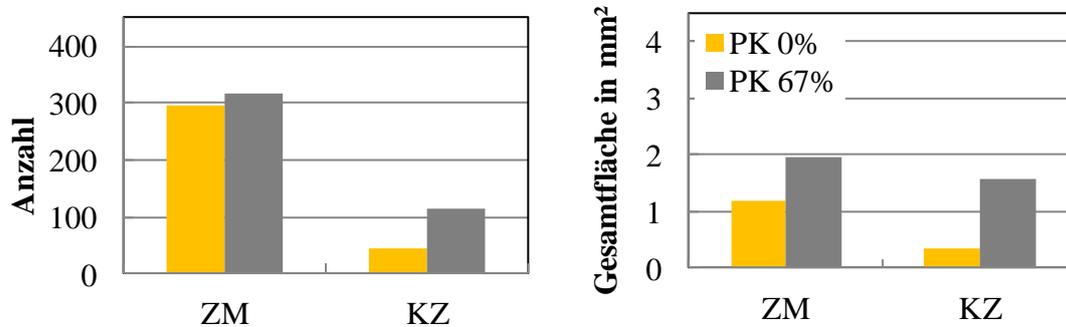


Abbildung 4 Anzahl (links) und Gesamtfläche der Mikrorisse (rechts) unterteilt in Mikrorisse in der Kontaktzone (KZ) und in der Mörtelmatrix (ZM) im Vergleich mit und ohne Vorlast

Die durchschnittliche Mikrorissfläche ist, wie in Abbildung 5 erkennbar, in der Kontaktzone der vorbelasteten Probekörper deutlich am höchsten. Im unbelasteten Zustand ist die durchschnittliche Mikrorissfläche der Kontaktzone ähnlich der Mikrorissfläche in der unbelasteten wie auch der belasteten Mörtelmatrix.

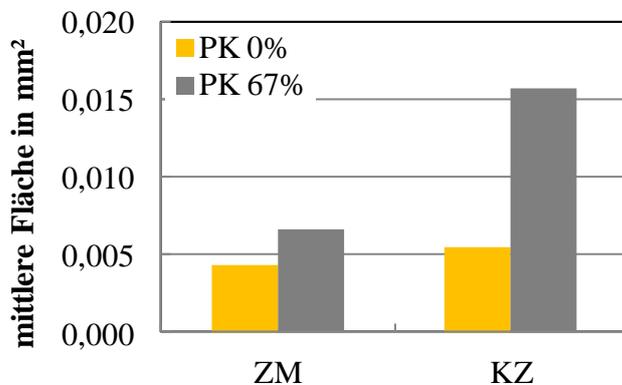


Abbildung 5 Durchschnittliche Mikrorissfläche in Kontaktzone (KZ) und Mörtelmatrix (ZM) mit und ohne Vorlast

### Lage der Mikrorisse im Probekörper: Rand- und Kernbereich

Im Folgenden werden nun die ermittelten Mikrorisse nach ihrer Lage im Probekörper dargestellt. Die gesamte Mikrorissflächensumme in der Kontaktzone im Kernbereich ist höher als in der Mörtelmatrix (Abbildung 7); gleichzeitig ist die Anzahl der Kontaktzonenrisse dort niedriger (Abbildung 6). Im Randbereich ist die Mikrorissanzahl in der Mörtelmatrix deutlich höher als in der Kontaktzone. Analog verhält es sich mit der Mikrorissfläche.

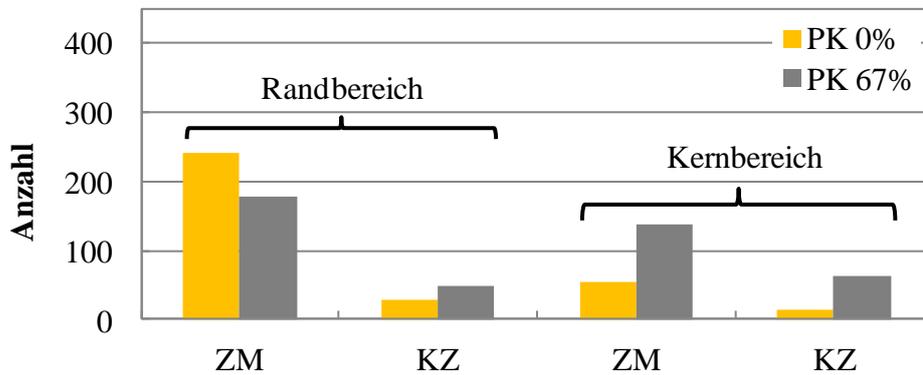


Abbildung 6  
Anzahl der Mikrorisse unterteilt in Mikrorisse in der Kontaktzone (KZ) und in der Mörtelmatrix (ZM) im Rand- und Kernbereich

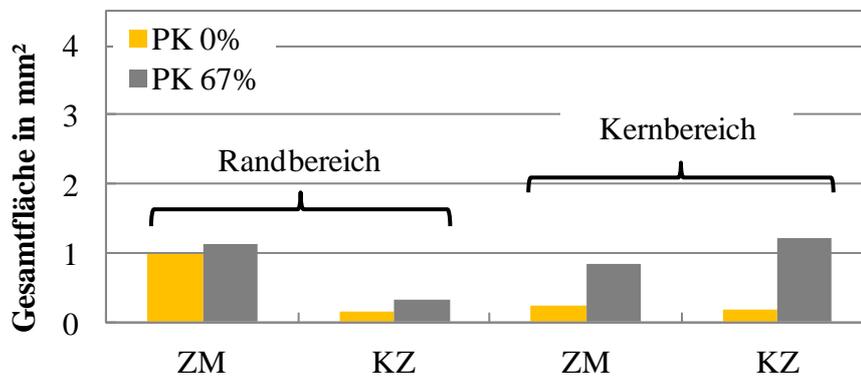


Abbildung 7  
Mikrorissflächensumme im Randbereich (links) und Kernbereich (rechts) in Kontaktzone (KZ) und Mörtelmatrix (ZM) mit und ohne Vorlast

Die Mikrorisslänge in der Kontaktzone wird im Kernbereich ca. doppelt so lang nach Vorbelastung (Abbildung 8, links). Die Mikrorissbreite ist im unbelasteten Zustand in der Mörtelmatrix im Rand- und Kernbereich höher als in der Kontaktzone (Abbildung 8 rechts). Nach der Vorbelastung zeigt sich in der Mörtelmatrix nur eine leichte Verbreiterung, während in der Kontaktzone die durchschnittliche Mikrorissbreite im Kernbereich um das 2,5fache steigt.

Die mittlere Mikrorisslänge in der Kontaktzone im Kernbereich ist nahezu dreimal so lang als im Randbereich. Die durchschnittliche Mikrorissbreite in der Kontaktzone im Kernbereich ist mehr als zweimal so hoch als im Randbereich. Die Mikrorisslänge in der Mörtelmatrix zeigt sich nahezu identisch, ungeachtet der Vorbelastung und auch ähnlich lang wie die unbelasteten Kontaktzonenrisse.

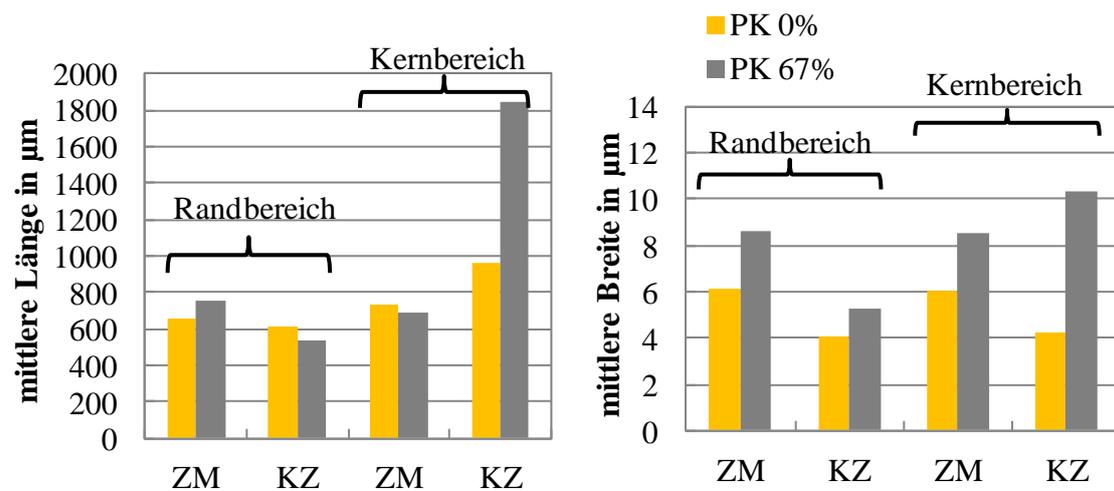


Abbildung 8  
Durchschnittliche Mikrorisslänge (links) und Mikrorissbreite (rechts) im Rand- und Kernbereich in Kontaktzone (KZ) und Mörtelmatrix (ZM) mit und ohne Vorlast

### Auswertung

Die erhöhte Anzahl und insbesondere die vergrößerte Mikrorissflächensumme in den vorbelasteten Probekörpern lässt darauf schließen, dass Druckvorbelastung bis zu 67 % der Festigkeit zu erhöhtem Mikrorisswachstum, vor allem zu längeren und breiteren Mikrorissen führt, aber nicht zu größeren Schäden. Nur in zwei der untersuchten Probekörper wurden Makrorisse identifiziert. Das angesetzte Lastniveau beeinflusst die Gebrauchseigenschaften trotz der erhöhten Mikrorissbildung nur marginal bzw. nicht (vergleiche [11]).

Die hohe Anzahl und die große Mikrorissfläche in der Mörtelmatrix im unbelasteten Betongefüge sind auf die Gefügespannungen durch das innere Austrocknen speziell bei hochfesten Betonen (vergleiche [13]) zurückzuführen. Durch die Vorlast erhöht sich die Anzahl kaum. Die Fläche vergrößert sich geringfügig; insbesondere nur durch eine Verbreiterung der Matrixrisse. Die Kontaktzone ist im hochfesten Beton durch die puzzolane Reaktion des Silikastaubes gestärkt und versagt nicht bereits unter der Zugbelastung durch Eigenspannungen. Die Vorbelastung führt aber zu einem extremen Anstieg der durchschnittlichen Mikrorissflächensumme in der Kontaktzone. Die externe Spannung durch die Vorbelastung führt dazu, dass die wenigen Kontaktzonenrisse zwar in der Anzahl ansteigen, aber vor allem in ihrer Fläche zunehmen, d.h. breiter und länger werden. Da die Betrachtungsebene der Mikrorisse senkrecht einaxial zur Belastungsrichtung verläuft, ist davon auszugehen, dass die dadurch entstehenden Querspannungen vor allem radial um die geschnittenen Gesteinskörner wirken und somit die Kontaktzone erweitern und zu Mikrorissen in diesem Bereich führen.

Die sehr stark erhöhte Mikrorissfläche in der Kontaktzone im Kernbereich der vorbelasteten Probekörper sind auf die lokalen Gefügespannungsspitzen aufgrund des unterschiedlichen Verformungsverhaltens der Einzelkomponenten zurückzuführen. Trotz der verbesserten Kontaktzone durch Zusatzstoffe im hochfesten Beton scheint die

Kontaktzone die Schwachstelle zu sein. Wenn die Eigenspannungen durch externe einaxiale Spannungen überlagert werden, kommt es in der Kontaktzone zwischen dichtem Zementstein und inertem Gesteinskorn zu einer Aufweitung der potenziellen Fehlstelle. Da die Betrachtungsfläche sehr nahe der Probekörpermitte gesägt wurde, kann davon ausgegangen werden, dass die Querkzugspannungen, die aus der einaxialen Druckspannung resultieren bis weit in die Probekörpermitte hineinreichen und somit dort zu Mikrorissen führen.

## Literatur

- [1] Hsu T. T. C.; Slate, F.; Sturman, G.; Winter, G.: Microcracking of plain concrete and the shape of the stress-strain curve. *Journal of the American Concrete Institute*, Vol. 60, 1963, pp. 209-224
- [2] Guse, U.; Hilsdorf, H. K.: Dauerhaftigkeit hochfester Betone. *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton Heft 487*, Beuth Verlag Berlin, 1998
- [3] Wiens, U.; Schröder, P.; Meng, B.; Schießl, P.: Mikrorissbildung im Hochleistungsbeton – vom Modell zu den Auswirkungen auf Betoneigenschaften. *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton*, 36. Forschungskolloquium, RWTH Aachen, S. 234-247, Oktober 1998
- [4] Tasdemir C.: Microstructural Effects on the brittleness of High Strength Concrete. *Fracture Mechanics of Concrete Structures*, pp. 125-134, 1995
- [5] Zimbelmann, R.; Budelmann, H.: Die Kontaktzone zwischen Zuschlag und Zementstein als Komponente des Betongefüges. in *Technologie und Anwendung der Baustoffe*, Berlin 1991
- [6] Schorn, H.: Damage process and fracture mechanism of uniaxially loaded concrete. *Proceedings of JMX 13: Micromechanics of Concrete and Cementitious Composites*, C. Huet, Lausanne, 1993
- [7] Mechtcherine, V.: Bruchmechanische und fraktologische Untersuchungen zur Rissausbreitung in Beton. *Schriftenreihe des Institutes für Massivbau und Baustofftechnologie*, Prof. S. Müller et al., 2000
- [8] Nemati, K.; Monteiro, P.; Scrivener, K.: Analysis of Compressive Stress-Induced Cracks in Concrete. *ACI Materials Journal* Sept/Oct 1998; 617 - 630
- [9] DIN 1048-5 "Prüfverfahren für Beton" Juni 1991
- [10] DIN EN 12390-8 „Prüfung von Festbeton“ Februar 2001
- [11] Kustermann, A.; Thienel, K.-Ch.: Influence in High Strength Concrete on Durability Properties. *Microstructural-related Durability of Cementitious Composites*, 2nd international Conference, Amsterdam, Niederlande 2012
- [12] Kustermann, A.; Thienel, K.-Ch.; Keuser, M.: Influence of Curing Methods on the Formation of Microcracks in High-Strength Concrete. *Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Symposium on the Utilization of High-Strength / High-Performance Concrete*, Washington D.C., Juni 2005; *ACI Special Publication* Vol. 228, pp. 1282-1294
- [13] Kustermann, A.: "Einflüsse auf die Bildung von Mikrorissen im Betongefüge." Heft 2, *Institut für Werkstoffe des Bauwesens, Universität der Bundeswehr München*, ISSN 1436-4409, 2005