

Einfluss von Mikrorissen auf die Dauerhaftigkeit hochfesten Betons

Dr.-Ing. Andrea Kustermann

Universität der Bundeswehr München, Institut für Werkstoffe des Bauwesens, Deutschland,
andrea.kustermann@unibw.de

Zusammenfassung

Mikrorisse in hochfestem Beton werden häufig für nicht erklärbare Phänomene verantwortlich gemacht. Ziel dieser Versuchsreihe war es, den Einfluss von Mikrorissen auf einige ausgewählte Dauerhaftigkeitseigenschaften zu untersuchen.

Probekörper aus hochfestem Beton wurden teilweise vorbelastet, um eine Mikrorissentwicklung zu provozieren. Die Vorlast wurde in der Druckpresse für eine Dauer von zwei Stunden auf 10 cm Würfel aufgebracht. Anschließend wurde jeder Prüfkörper in zwei Teile gesägt. Der größere Teil wurde zur Prüfung der Dauerhaftigkeitseigenschaften verwendet, der kleinere zur Untersuchung der enthaltenen Mikrorisse nach der Präparation. Die Prüfkörper zur Untersuchung der Dauerhaftigkeit wurden anschließend mit und ohne Vorlast einer Frost-Tausalz-Beanspruchung, kapillarem Saugen von Natriumchlorid und einer CO₂-Belastung ausgesetzt. Der zweite Teil der Probekörper mit und ohne Vorlast wurde danach zur Untersuchung der Mikrorisse präpariert und mikroskopisch untersucht. Es wurden die Parameter Mikrorissanzahl, durchschnittliche Mikrorisslänge, durchschnittliche Mikrorissbreite und die 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.

Im Vergleich der enthaltenen Mikrorisse zu den Dauerhaftigkeitseigenschaften zeigte sich, dass die größere Schädigung des hochfesten Betons durch Vorlast eine erhöhte Schädigung durch Frost-Tausalz-Beaufschlagung zur Folge hatte. Das kapillare Saugen und die Karbonatisierung hing nicht von den enthaltenen Mikrorissen im Betongefüge ab. Die Untersuchung der vorhandenen Mikrorisse zeigte, dass die Vorlast zu einer erhöhten Mikrorissanzahl führt. Die durchschnittliche Mikrorissbreite und -länge stieg nahezu um das Doppelte. Somit erhöhte sich die gesamte Mikrorissflächensumme signifikant.

Keywords: Mikrorisse, Dauerhaftigkeit, Hochfester Beton

1 Einleitung

Mikrorisse sind bereits ohne äußere Einwirkungen im Beton enthalten. Als Ursache dafür werden unterschiedliche Temperaturschwankungen und Elastizitätsmoduln sowie unterschiedliches Verformungsverhalten der einzelnen Komponenten im Beton angesehen. Dies hat Gefügespannungen im Beton zur Folge, 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 – 8]. Nach [9] führten Mikrorisse im Beton zu erhöhter Durchlässigkeit aufgrund von Austrocknung vor allem im jungen Beton. Bisshop and van Mier [10] beobachteten eine erhöhte Austrocknung bei einer großen Mikrorissanzahl. Den Zusammenhang zwischen Rissentwicklung und Permeabilität untersuchten Aldea et al. [12, 13]. Es zeigte sich dort, dass eine erhöhte Rissbreite eine erhöhte Permeabilität nach sich zieht.

2 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.

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 [13] und DIN EN 12390 [14]. Die Prüfung der Wassereindringtiefe erfolgte am 10-cm-Würfel, die Druckfestigkeit und die Spaltzugfestigkeit am 15-cm-Würfel.

Tabelle 1: Mischungszusammensetzung des hochfesten Betons für 1 m³ Frischbeton

	Rohdichte [kg/dm ³]	Masse [kg/m ³]
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

	Rohdichte [kg/dm ³]	Masse [kg/m ³]
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

Tabelle 2: Kennwerte des hochfesten Betons im Alter von 28 Tagen

Druckfestigkeit	Spaltzugfestigkeit	Festbetonrohichte	Wassereindringtiefe
88,8 MPa	7,1 MPa	2,43 kg/dm ³	12 mm

3 Probenvorbereitung

Zur Untersuchung der Mikrorisse in hochfestem Beton wurde die Hälfte der Prüfkörper im Alter von 28 Tagen 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 weiter verwendet. Die Lagerung ist in Kap. 4 im Detail beschrieben. Der kleinere Teil, ein Drittel des vormalig 10 cm Würfels, wurde zur Untersuchung der Mikrorisse auf der gesägten Fläche präpariert. Die Probenpräparation ist in [15] und [16] detailliert dargestellt. Die Flächen wurden jeweils planparallel geschliffen, getrocknet und mit einem niedrig viskosen, gefärbten Epoxidharz vergossen. Nach dem Erhitzen 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 µm und 25 µm gemessen. Breitere Risse werden im Weiteren als Makrorisse bezeichnet und werden in die hier dargestellte Auswertung nicht mit einbezogen.

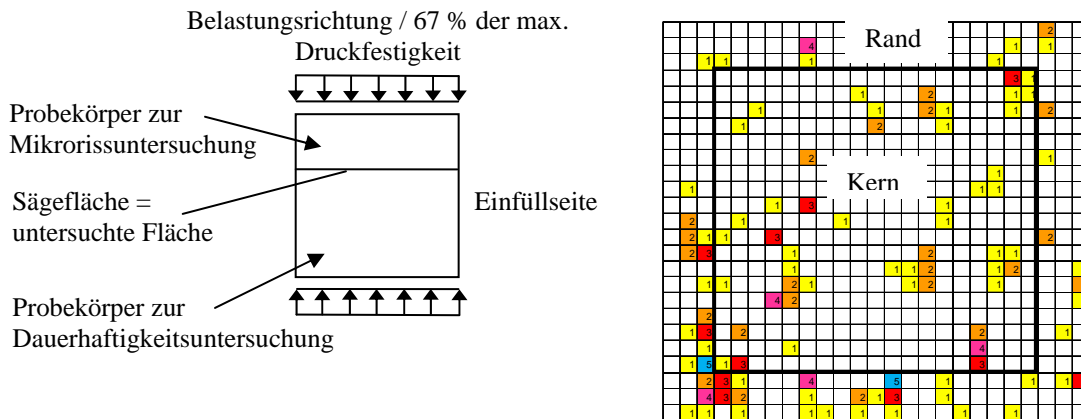


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Vorbelastung und der Probekörperherstellung (links); beispielhafte Darstellung der Mikrorissverteilung einer belasteten Probe, mit Rasterystem und Kennzeichnung des Rand- und Kernbereichs (rechts)

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

4 Untersuchung der Dauerhaftigkeitseigenschaften

4.1 Kapillares Saugen von Natriumchlorid

Die Probekörper zur Untersuchung des kapillaren Saugens von Natriumchlorid wurden an allen 4 Prüfkörperseiten, die von der zu prüfenden Fläche ausgingen, abgedichtet. Danach wurden die Prüfkörper auf zwei Dreiecksleisten in einem Bad aus 3 %-iger Natriumchlorid Lösung eingelagert. Zum kapillaren Saugen wurde die zu prüfende Fläche ca. 10 mm in die Prüfflüssigkeit eingetaucht. Als Ergebnis wird die Gewichtsänderung über die Prüfdauer angegeben.

4.2 Frost-Tausalz-Widerstand

Die Prüfkörper wurden an allen vier Seitenflächen mit einem wasserdichten Klebeband abgedichtet. Analog zum kapillaren Saugen (siehe Kap. 4.1) saugten die Prüfkörper 7 Tage in Natriumchlorid Lösung. Die anschließende Frost-Tausalz-Prüfung erfolgt analog dem CDF- Verfahren nach DIN EN 13290-9 [17]. Als Ergebnis wird die Abwitterung in Massen-% über die Prüfdauer aufgezeichnet.

4.3 Karbonatisierung

Die Probekörper zur Untersuchung der Karbonatisierung wurden in einem Kesternich-Schrank in einer 0,3-%-igen CO₂ Atmosphäre gelagert. Die Karbonatisierungstiefe wurde bis zum Alter von nahezu zwei Jahren gemessen. Dazu wurden die Prüfkörper in zwei Teile gespalten; dann wurde an der frischen Bruchfläche die maximale Karbonatisierungstiefe mittels Phenolphthalein als Indikator ermittelt.

5 Versuchsergebnisse

Die hier dargestellten Ergebnisse basieren auf Messungen im Alter von 28, 63 und 75 Tagen. Die Analyse der Mikrorisse erfolgte stets direkt nach der Präparation im Alter von 28 Tagen.

Der Vergleich der Mikrorissentwicklung mit den Dauerhaftigkeitseigenschaften erfolgte stets an zwei Prüfkörpern, die aus einem identischen Probewürfel präpariert wurden (vgl. Abb.1).

5.1 Frost-Tausalz-Widerstand

Die Abwitterung an den Prüfkörpern aus hochfestem Beton wurde nach 8, 16, 42 und 112 Frost-Tauwechseln ermittelt (Abb. 2). Die vorbelasteten Probekörper zeigten stets eine etwas höhere Abwitterung, vor allem mit steigender Zahl der Frost-Tau-Wechsel. Zwei der vorbelasteten Prüfkörper und ein unbelasteter Prüfkörper wurden nach 42 Frost-Tauwechseln zerstört. Nach 112 Frost-Tauwechseln zeigten alle Prüfkörper starke Schäden (siehe Abb. 2).

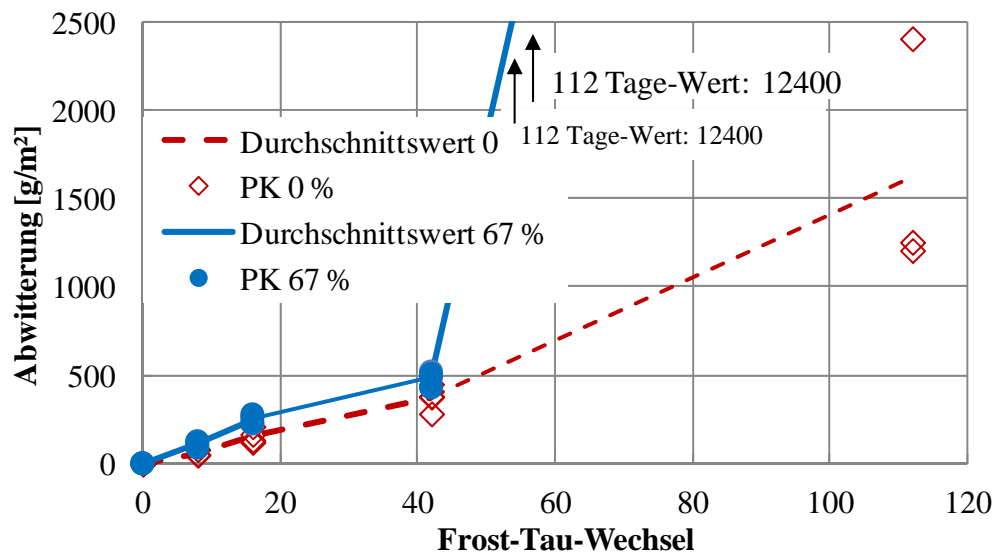


Abbildung 2: Abwitterung an Prüfkörpern aus hochfestem Beton

5.2 Kapillares Saugen von Natriumchlorid

Die Masse der vorbelasteten Prüfkörper wuchs im Zuge des kapillaren Saugens mit Natriumchlorid am deutlichsten an. Der Wert eines einzelnen Prüfkörpers übersteigt die anderen bei Weitem. Dieser hochfeste Betonprüfkörper enthielt einige Makrorisse mit Rissbreiten bis zu 200 µm. Abgesehen davon waren die Unterschiede zwischen unbelasteten und vorbelasteten Prüfkörpern, wie in Abbildung 3 zu erkennen, nur sehr gering.

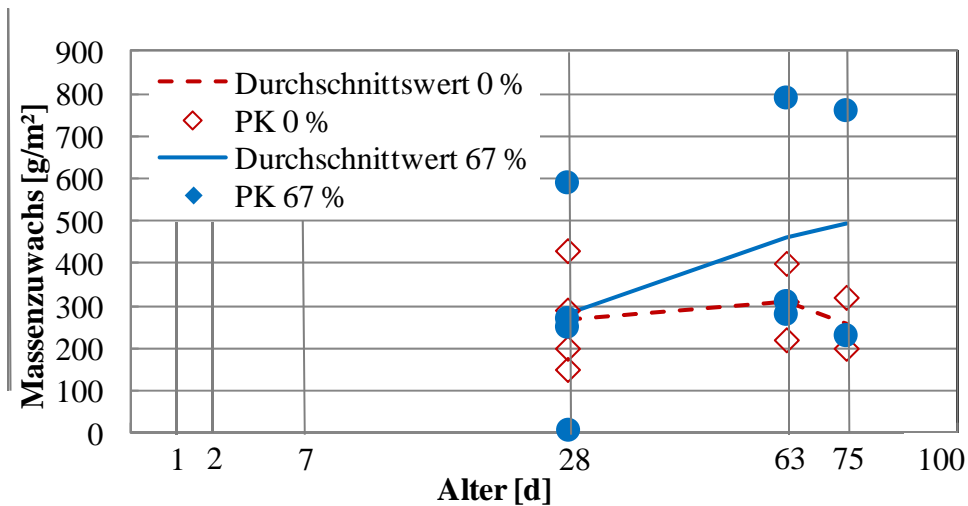


Abbildung 3: Massenzuwachs der Prüfkörper, saugend in Natriumchlorid Lösung

5.3 Karbonatisierung

In keinem der untersuchten Prüfkörper konnte Karbonatisierung festgestellt werden. Sogar die Prüfkörper, die bis zu einem Alter von zwei Jahren (594 Tage) in der 0,3%-igen CO₂ Atmosphäre lagerten, zeigten keine Karbonatisierung nach dem Spalten und Testen mit Indikatorlösung.

5.4 Mikrorissbildung

Zur Untersuchung der Mikrorissbildung wurde die Gesamtanzahl der Mikrorisse, ihre Verteilung ebenso wie die Mikrorisslänge und -breite mittels eines Gitters, welches auf die Prüffläche aufgelegt wurde, ermittelt. Darüber hinaus wurden die Mikrorisse unterteilt in Matrixrisse, Kontaktzonenrisse zwischen Zementmatrix und Gesteinskorn oder in Mikrorisse im Rand- und Kernbereich. Als Randbereich wurden die äußeren 12 mm der Prüffläche bezeichnet.

In diesem Kapitel werden nur Mikrorisse ausgewertet. Der Vergleich zwischen Mikrorissen und den Dauerhaftigkeitseigenschaften beinhaltet alle Risse, Mikro- wie auch Makrorisse. Lediglich zwei Prüfkörper in dieser Testreihe wiesen Makrorisse mit Rissbreiten von mehr als 200 µm auf.

Die Vorlast von 67 % der Druckfestigkeit führte in den meisten Fällen zu einer höheren Mikrorissanzahl und einer größeren Mikrorissflächensumme (Abb. 4). Im Kernbereich der vorbelasteten Prüfkörper zeigte sich dieser Effekt der Vorlast stärker als im Randbereich. Dies zeigte sich vor allem bei der Mikrorissflächensumme (Abb. 5).

Vergleicht man in den Abbildungen 4 und 5 die Mikrorisse in der Kontaktzone im Kernbereich, so zeigt sich Folgendes: Die Mikrorissflächensumme in der Kontaktzone im Kernbereich der vorbelasteten Prüfkörper ist höher als in der Mörtelmatrix, obwohl die Mikrorissanzahl in der Kontaktzone niedriger ist als in der Bindemittelmatrix. Die mittlere Mikrorissbreite in der Kontaktzone im Kernbereich ist doppelt so breit als im Randbereich (Abb. 6, rechts). Die Mikrorisslänge in der Kontaktzone im Kernbereich ist fast dreimal so lang wie im Randbereich (Abb. 6, links). Die mittlere Mikrorissbreite und -länge in der Bindemittelmatrix stimmen nahezu überein.

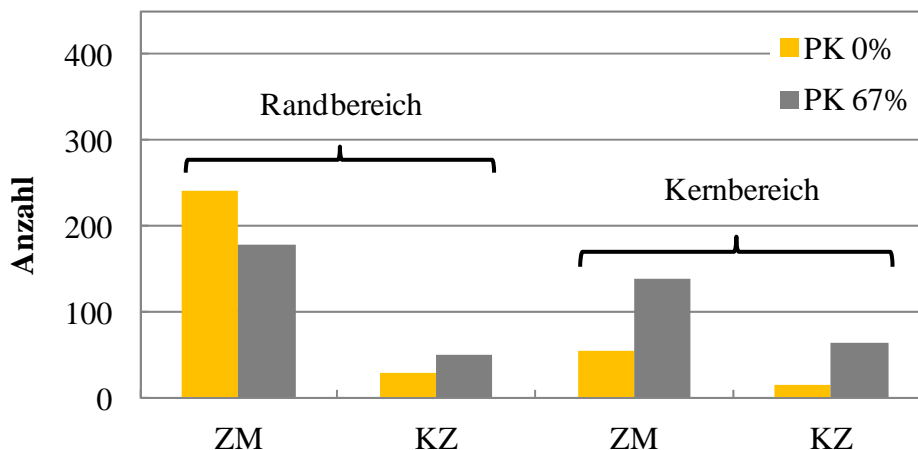


Abbildung 4: Anzahl der Mikrorisse unterteilt in Mikrorisse in der Kontaktzone (KZ) und in der Mörtelmatrix (ZM) im Rand- und Kernbereich

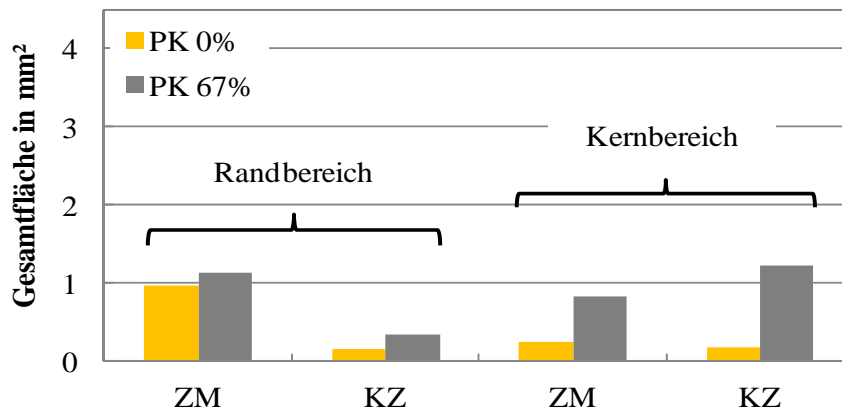


Abbildung 5: Mikrorissflächensumme im Randbereich (links) und Kernbereich (rechts) in Kontaktzone (KZ) und Mörtelmatrix (ZM) mit und ohne Vorlast

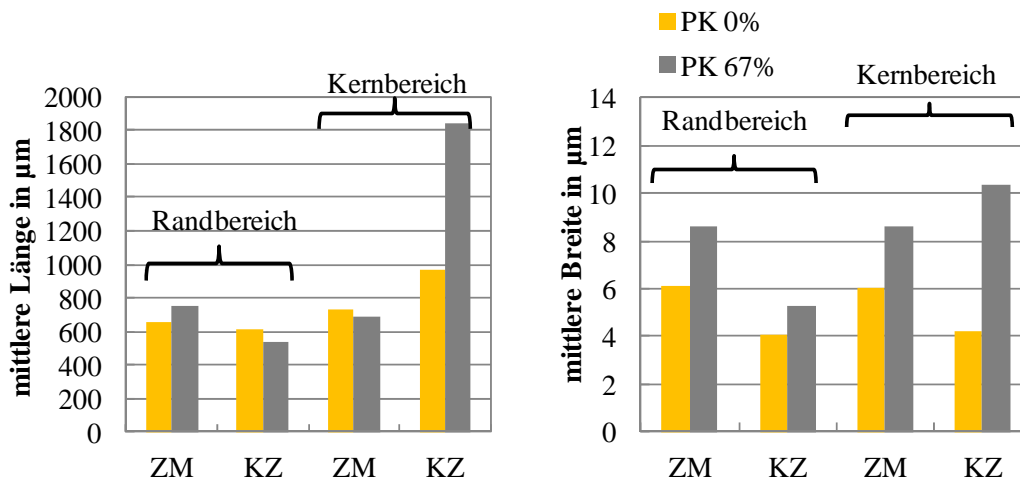


Abbildung 6: Mittlere Mikrorisslänge und -breite im Rand- und Kernbereich in der Bindemittelmatrix (ZM) und in der Kontaktzone (KZ)

6 Zusammenhang zwischen Mikrorissen und Dauerhaftigkeitseigenschaften

Die Abwitterung aufgrund von Frost-Tausalz-Beanspruchung zeigt ebenso wie das kapillare Saugen mit Natriumchlorid keine eindeutige Abhängigkeit von der Mikrorissbreite, -länge oder -flächensumme. Abbildung 7 zeigt exemplarisch die Korrelation zwischen der mittleren Mikrorissbreite und der Abwitterung durch Frost-Tausalz-Beanspruchung nach 8 und 42 Frost-Tau-Wechseln. Die Abwitterung ist bei den vorbelasteten Prüfkörpern geringfügig höher als bei den unbelasteten Prüfkörpern. Die vorbelasteten Prüfkörper weisen auch eine höhere Mikrorissflächensumme auf.

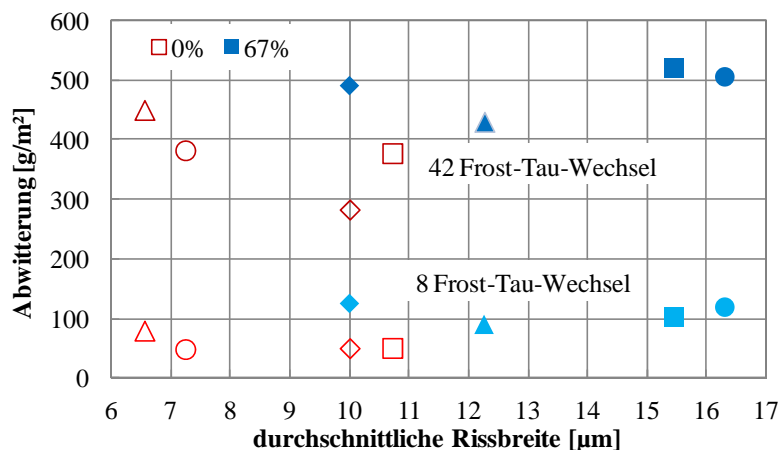


Abbildung 7: Abwitterung aufgrund von Frost-Tausalz-Beanspruchung in Relation zur mittleren Mikrorissbreite nach 42 Frost-Tau-Wechseln

Die Vorbelastung führte weder zu einer höheren Massenzunahme beim kapillaren Saugen mit Natriumchlorid noch zeigte sich eine Abhängigkeit von der Mikrorisslänge, -breite, -fläche oder -anzahl. Die Karbonatisierungstiefe war in keinem Fall messbar an dem hier verwendeten hochfesten Beton. Somit kann eine Abhängigkeit dieser Dauerhaftigkeitseigenschaften von den enthaltenen Mikrorissen der hier gemessenen Längen und Breiten ausgeschlossen werden.

7 Auswertung

7.1 Einfluss der Vorlast

Die Dauerhaftigkeitseigenschaften Karbonatisierung und kapillares Saugen von Natriumchlorid zeigen keine eindeutige Abhängigkeit zu den enthaltenen Mikrorissen in den hochfesten Betonprobekörpern. Das erhöhte kapillare Saugen kann mit den dort enthaltenen Makrorissen mit Rissbreiten bis zu 200 µm begründet werden. Die Mikrorisse scheinen zu klein zu sein, um die Transportmechanismen von Flüssigkeiten im hochfesten Betongefüge zu beeinflussen. [9] fand heraus, dass Risse mit Breiten von ungefähr 100 µm den Feuchtigkeitstransport im Beton beeinflussen. Aber sehr kleine Risse beeinflussen die Permeabilitätseigenschaften von Beton nach [9, 11, 12] nicht.

Das Eindringen von CO₂ war ebenso unbeeinflusst von den enthaltenen Mikrorissen. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Mikrorisse im hochfesten Beton zu klein sind, um das CO₂-Eindringen zu beeinflussen. In [18] zeigte sich ebenso, dass Mikrorisse einen größeren Einfluss auf Permeabilität als auf die Diffusion haben.

Die leicht erhöhte Schädigung der vorbelasteten Prüfkörper unter Frost-Tausalz-Belastung könnten mit dem Kristallisationsdruck in den Mikrorissen beim Gefrieren begründet werden. Da sich die mittlere Mikrorissbreite stark aufgrund der Vorlast erhöhte, kann das verstärkte Eindringen von Flüssigkeit zu stärkerer Frostschädigung geführt haben.

7.2 Mikrorissbildung

Die höhere Mikrorissflächensumme in der Kontaktzone, speziell im Kernbereich der vorbelasteten Prüfkörper kann mit lokalen Gefügespannungen aufgrund von unterschiedlichen Steifigkeiten der Gesteinskörnung und der Zementsteinmatrix begründet werden. Diese lokalen Zugspannungen werden überlagert durch die Zugspannungen aufgrund inneren Austrocknens im hochfesten Beton als Folge des niedrigen w/z-Wertes.

7.3 Einfluss der Mikrorisse auf die Dauerhaftigkeitseigenschaften

Die im hier verwendeten hochfesten Beton auftretenden Mikrorisse scheinen zu schmal zu sein, um die untersuchten Dauerhaftigkeitseigenschaften zu beeinflussen. Die größere Abwitterung der vorbelasteten Prüfkörper kann nicht in eindeutige Abhängigkeit zu der höheren Mikrorissanzahl, -fläche, -länge oder -breite gebracht werden.

8 Zusammenfassung

Vorbelastete Prüfkörper zeigten keine Unterschiede in Bezug auf kapillares Saugen von Natriumchlorid und Karbonatisierung, verglichen mit unbelasteten Prüfkörpern. Der Frost-Tausalz-Widerstand war niedriger und die Schädigung zeigte sich früher als bei unbelasteten Prüfkörpern.

Die Vorbelastung führte zu einer größeren Mikrorissfläche, speziell im Kernbereich der Prüfkörper.

Die Vorbelastung führte zu Mikrorissen mit einer größeren mittleren Mikrorissbreite und -länge, was zu einer größeren Mikrorissfläche vor allem in der Kontaktzone des Kernbereichs führte. Daneben erhöhte sich aber durch die Vorbelastung die Anzahl der Mikrorisse nicht in gleicher Weise.

Die Ergebnisse der hier präsentierten Versuchsreihe zeigten keine Korrelation zwischen den Mikrorissen im hochfesten Betongefüge und der Karbonatisierungstiefe oder dem kapillaren Saugen von Natriumchlorid. Der Frost-Tausalz-Widerstand zeigte geringfügig höhere Schädigung bei erhöhter mittlerer Mikrorissbreite.

9 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] Bazant, Z. P.; Raftshol, W. J.: "Effect of Cracking in Drying and Shrinkage Specimens". Cement and Concrete Research, Vol. 12, 1981, pp. 209-226
- [10] Bisschop, J.; van Mier, J. G. M.: "Effect of aggregates on drying rate of cementitious composites." Cement and Concrete Research 38 (2008), 1190-1196
- [11] Aldea, C.-M.; Shah, S.; Karr, A.: "Permeability of cracked concrete." Materials and Structures, Vol. 32, June 1999, pp 370-376
- [12] Aldea, C.-M.; Shah, S.; Karr, A.: "Effect of Microcracking on Durability of High-Strength Concrete." Transportation Research record. Paper No. 99-0801
- [13] DIN 1048-5 "Prüfverfahren für Beton" Juni 1991
- [14] DIN EN 12390-8 „Prüfung von Festbeton“ Februar 2001
- [15] Kustermann, A.; Thienel, K.-Ch.; Keuser, M.: Influence of Curing Methods on the Formation of Microcracks in High-Strength Concrete. Proceedings of the 7th International Symposium on the Utilization of High-Strength / High-Performance Concrete, Washington D.C., Juni 2005; ACI Special Publication Vol. 228, pp. 1282-1294
- [16] 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
- [17] DIN EN 12390-9 „Prüfung von Festbeton“ Mai 2002
- [18] Wong, H.S.; Zobel, M.; Buenfeld, N.R.; Zimmermann, R.W.: "Influence of the interfacial transition zone and microcracking on the diffusivity, permeability and sorptivity of cement-based materials after drying". Magazine of Concrete Research. 2009, No. 8, 61 pp 571-589