

Schallemissionsanalyse zur Untersuchung der Effizienz von Selbstheilungsmechanismen in Beton

Kathrin FLOHR¹, Fabian MALM¹, Christian U. GROBE²

¹ Technische Universität München Centrum Baustoffe und Materialprüfung (cbm), München

² Technische Universität München Chair of Non-destructive Testing, München

Kurzfassung. Beton bzw. Stahlbeton ist neben vielen positiven Eigenschaften relativ anfällig gegenüber Rissbildung (vor allem auf Zug), was ab bestimmten Rissbreiten den Feuchtetransport ins Bauteil verstärken kann. Durch Risse erhöht sich die Permeabilität des Materials und es wird anfälliger beispielsweise gegenüber Frost-Tau-Wechseln oder dem Eindringen von Chloriden. Die Beschleunigung von Korrosionsprozessen und eine verkürzte Lebensdauer können Auswirkungen dieser Rissbildung sein. Deswegen ist es das Ziel vieler Forschungsprojekte, Methoden zu entwickeln, um die Rissbreiten in Beton zu begrenzen. Einen neuen Weg ermöglichen Zusätze, die zu einer Selbstheilung von Rissen führen und die Dauerhaftigkeit erhöhen. Im Rahmen des Projekts „Healcon“, gefördert von der Europäischen Kommission im 7. Forschungsrahmenprogramm, werden Heilungsmechanismen entwickelt bzw. weiterentwickelt. Dabei werden zerstörungsfreie Prüfverfahren eingesetzt, um die Aktivierung der Heilungsmechanismen zu beobachten und den Heilungsfortschritt zu überwachen. Die Schallemissionsanalyse spielt dabei eine besondere Rolle, da sie in der Lage ist, sowohl die Rissbildung zu beobachten, als auch die spätere Aktivierung der Heilungsmechanismen. Bei einer erneuten Belastung von Bauteilen kann ebenfalls über die SEA das Aufbrechen zwischenzeitlich geheilter Risse nachgewiesen werden. Dafür ist einerseits der Einsatz von empfindlichen Breitbandsensoren und Mehrkanal-SEA-Systemen sowie einer genauen 3D-Lokalisierungstechnik notwendig.

1. Einführung

Die Tragfähigkeit und vor allem die Dauerhaftigkeit von Ingenieurbauwerken entwickeln sich, sowohl in der Forschung als auch in der Praxis, zu einem immer wichtigeren Thema. In diesem Zusammenhang werden Methoden zur Selbstheilung von Rissen in Beton- oder Stahlbetonbauteilen entwickelt, um so die Lebensdauer zu verlängern. Verschiedene Heilungsmechanismen sind bereits getestet und werden weiterhin ausgewertet. Vielversprechende Ergebnisse wurden von mehreren Forschergruppen [1-8] veröffentlicht, wobei jedoch Optimierungsbedarf vor allem für Praxisanwendungen verbleibt. Bei der Entwicklung von Heilmethoden für zementartige Materialien ist die zeit- und raumabhängige Selbstheilungseffizienz zu bewerten. Bisher wurde die selbstheilende Wirkung meistens basierend auf der Rückgewinnung der mechanischen Eigenschaften nach einer bestimmten Zeit ausgewertet. Während einige Forscher die Druckfestigkeit bei der

Durchführung eines Zug- oder Biegeversuches bewerten, beurteilt die Mehrheit die Festigkeit, die Steifigkeit der Probe und/oder die Energie, der ausgesendeten Schallemissionen bei der Rissfortpflanzung. Der Wiedergewinn der mechanischen Eigenschaften wird durch erneutes Belasten einer bereits belasteten und geheilten Probe und durch den Vergleich der dabei gewonnenen Eigenschaften beschrieben.

Zerstörungsfreie Prüfmethode verfügen dabei über offensichtliche Vorteile [9]. Granger et al. [8] bestimmt die autogene Rissheilung durch die Schallemissionsanalyse (SEA). Diese wird auch Rahmen des durch die Europäische Kommission gesponserten Healcon Projekts untersucht. Dabei wird eine Rissheilung durch verschiedene eingebettete Heilmittel bewirkt, die durch Rissbildung aktiviert werden. Die Bewertung der Schallereignisse, die bei einem 3-Punkt-Biege-Versuch aufgenommen wurden, liefert einen detaillierten raumzeitlichen Eindruck vom Ablauf des Bruchprozesses.

2. Vorbereitung der Probekörper

Zur autonomen Rissheilung wird ein Polyurethan-basiertes Heilmittel (MEYCO MP 355 1K, BASF - The Chemical Company) verwendet. Das Polymer des Polyurethan, welches für die Rissinjektion, zur Rissverfüllung durch Aufschäumen entwickelt wurde, wurde im Rahmen eines Konzepttests für einige Probekörper in kleine Glaskapillaren mit einer Länge von 100 mm und einem Innendurchmesser von ca. 2,5 und 4,0 mm abgefüllt. Um die Reaktionszeit zu verkürzen, wurde an jedem Glaskapillar ein weiteres Röhrchen mit einem Gemisch aus Wasser und Beschleuniger angebracht. Die Glashohlkörper wurden mit HBM X60 (Methyl-Methacrylat) an den Enden abgedichtet. Für die Betonprobekörper wurde ein Rezept für Standardbeton nach DIN EN 206-01 verwendet. Nach 28 Tagen betrug die Würfeldruckfestigkeit 64,0 (\pm 1.8) MPa. Holzschalungen mit Abmessungen von 550 x 150 x 150 mm – basierend auf EN 12390-5 – wurden für die Probekörper mit und ohne Heilmittel vorbereitet. Die Glasröhrchen wurden mittels dünner Stahldrähte in der entsprechenden Position fixiert. Um reproduzierbare und kontrollierte Tests durchführen zu können, wurden paarweise Bewehrungsstäbe mit einem Durchmesser von 6,0 mm eingebaut.

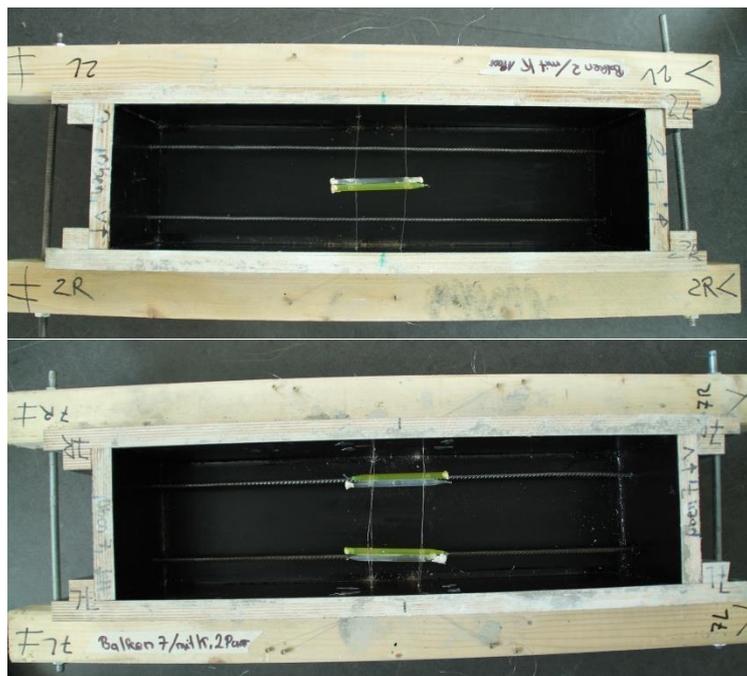


Abb. 1: Oben: Schalung und ein Glaskapillarenpaar (Balken Nr. 2). Unten: Schalung und zwei Glaskapillarenpaare (Balken Nr. 7).

3. Allgemeiner Aufbau der Experimente

Um Rissbreiten von 300-350 μm zu erhalten, wurden rissbreitengesteuerte 3-Punkt-Biege-Versuche mit einer Geschwindigkeit von 0,06 mm/min für 10 min durchgeführt. Der auftretende Riss lässt die Glaskapillaren aufbrechen und der Kleber beginnt in den Beton zu fließen. Nach einer 7-tägigen Aushärtung bei 20°C und einer relativen Luftfeuchte von 65 % wurden die Probekörper der gleichen Prozedur unterzogen. Insgesamt wurden sechs Probekörper mit und ohne Heilmittel getestet und mittels SEA überwacht.

4. Schallemissionsanalyse (SEA)

Zur Analyse des Rissverhaltens bei Erstbelastung und im geheilten Zustand bei Wiederbelastung wurde die SEA während des 3-Punkt-Biege-Versuchs angewendet. Bis zu 15 Piezosensoren (Panametrics V103) wurden mit Heißkleber an der Betonoberfläche befestigt. Parallel wurde über einen weiteren Kanal das Kraftsignal der Prüfmaschine mit aufgezeichnet. Die Kalibrierung der Empfindlichkeit aller Sensoren wurde durch das Hsu-Nielsen-Verfahren nach der DGZfP-Richtlinie SE2 [10] nachgewiesen. Zur Überprüfung der Lokalisierungsgenauigkeit sind mittels Ultraschallsensoren Impulse entlang eines Oberflächenrasters erzeugt worden. Teflonstreifen zwischen den Auflagern und den Probekörpern vermieden Kontaktgeräusche während der 3P-Biegeversuche. Die Rissbildung wurde kontinuierlich während des Be- und Entlastens der Proben vor und nach der Heilung untersucht. Zur automatisierten Bestimmung von Ersteinsatzzeiten wurde der AIC-Picker verwendet [11]. Danach wurden die Schallereignisse dreidimensional unter Verwendung der Algorithmen nach Geiger [12] und Bancroft [13] lokalisiert. Mittels Sensorpermutation, Median und Mittelwert wurde der beste Lokalisationsvektor berechnet. Um die Konfidenz in die Daten zu erhöhen, wurden nur besonders gute Lokalisierungsergebnisse weiterverwendet. Die Selektion erfolgte unter Anwendung eines Korrelationskoeffizienten und einer Energiebetrachtung. So wurde eine plausible zeitabhängige Rissdetektion sowie eine Zuordnung der Kapselbrüche möglich.

5. Ergebnisse

Die gemittelte Signalenergie der einzelnen Events, jeweils aufgenommen durch 15 Sensoren, während eines 3-Punkt-Biegeversuches in Abhängigkeit der Zeit zeigt Abb. 2. Rot markierte Punkte zeigen Lokalisierungen mit einem Korrelationskoeffizienten von mindestens 0,8.

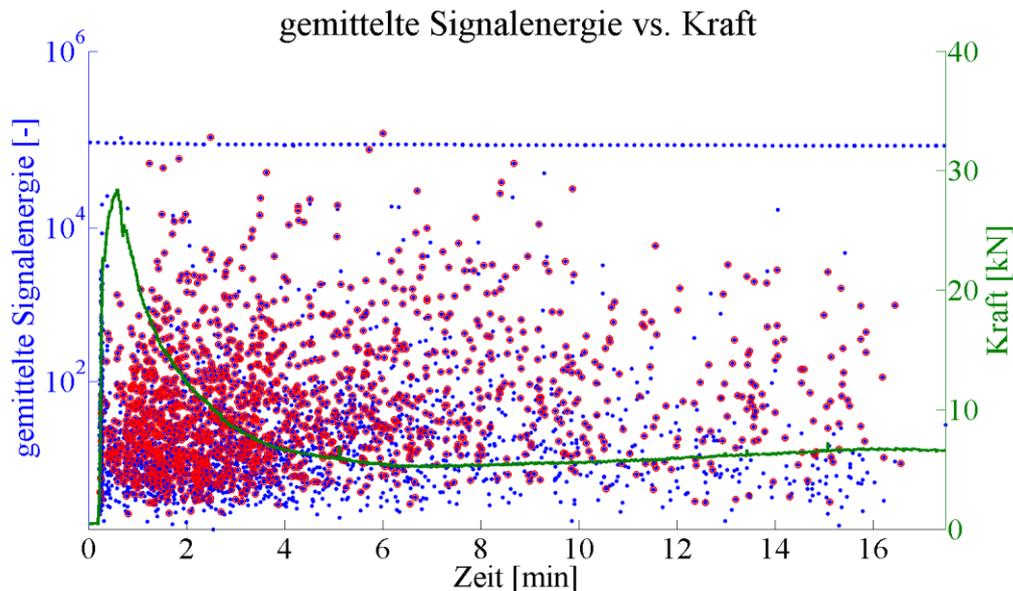


Abb. 2: Blau markierte Events: gemittelte Signalenergie während des 3-Pkt-Biege-Versuchs. Rot markierte Events: Korrelationskoeffizient $\geq 0,8$. Zusätzlich in grün dargestellt: Kraft-Zeit-Kurve. Die blauen Punkte mit konstanter Energie (ca. $1,2 \cdot 10^6$) stellen künstliche Ultraschallimpulse dar, die für Untersuchungen der Laufzeitveränderungen verwendet wurden.

Um Schallemissionen den Brüchen der Glaskapillaren zuordnen zu können, wurden die Events nach dem Energiegehalt selektiert. Einige Signale werden mit einer mittleren Energie von mehr als $1,5 \cdot 10^5$ (in relativen Energieeinheiten) nach Erreichen der Maximallast zwischen Minute 2 und Minute 6 aufgezeichnet (Abb. 2). Eine Lokalisierung dieser Schallemissionen ergibt eine starke Korrelation zwischen den bekannten Kapillarorten und diesen Schallemissionslokaisierungen (Abb. 3).

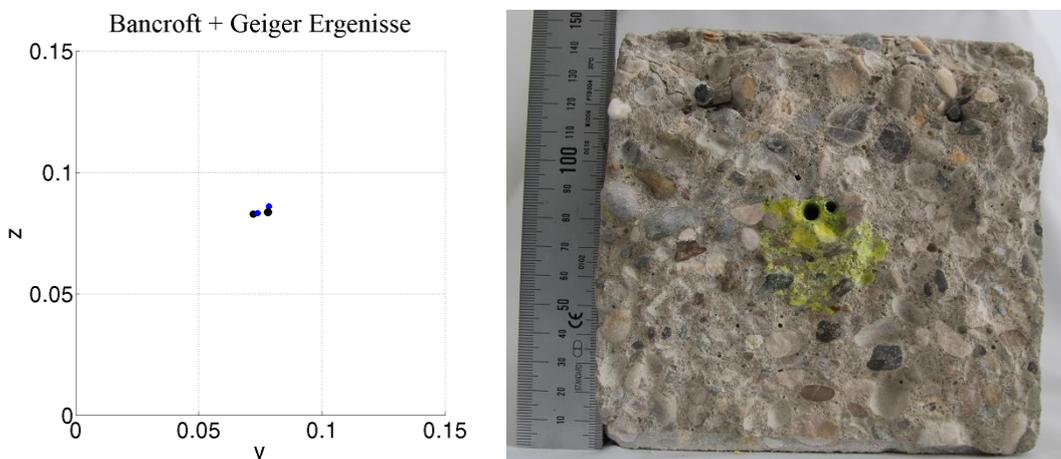


Abb. 3: 2 Lokalisierte Kapselbrüche (links) und tatsächliche Kapillarorte des Glaskapillarenpaars im Probekörper (rechts).

Dem Heilmittel wurden fluoreszierende Pigmente beigemischt, um eine visuelle Darstellung der Heilung zu ermöglichen. Abb. 4 zeigt Lokalisierungsergebnisse für zwei unterschiedliche Heilverfahren: Balken Nr. 9 mit zwei Glaskapillarenpaaren und Balken Nr. 3, welcher kurz nach der Erstbelastung am Rissbeginn manuell mit Polyurethan verfüllt wurde. Die nach dem oben beschriebenen Muster lokalisierten Events nach der Zweitbelastung (und somit nach der 7-tägigen Aushärtung) sind über die Fotos der Probekörper als transparentes Rechteck eingebettet. Im Fall der manuellen Rissverfüllung

treten viele Schallemissionen an der verklebten Fläche auf, was ein Beleg für den guten Verbund an dieser Stelle ist.

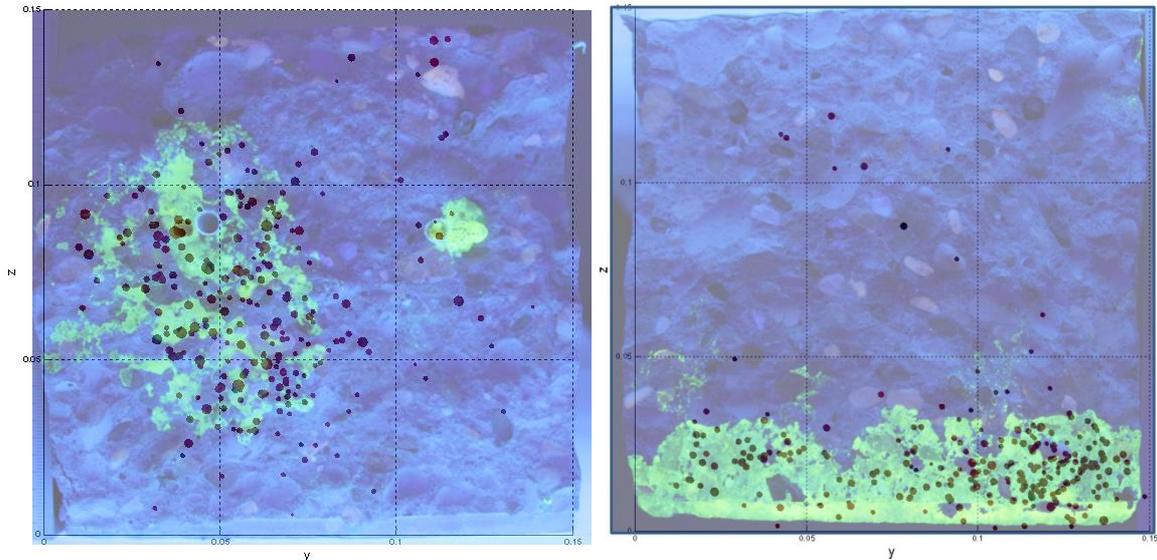


Abb. 4: Lokalisierte Schallemissionen im Rissquerschnitt in Korrelation mit benetzter Klebefläche. Links: Verfüllung durch 2 Glaskapillarenpaare (Balken Nr. 9). Rechts: Partielle manuelle Heilung am unteren Rissabschnitt (Balken Nr. 3).

6. Zusammenfassung

Im Rahmen eines von der Europäischen Kommission geförderten Projekts wurde die Anwendbarkeit der Schallemissionsanalyse zur Überwachung der Rissbildung und der Selbstheilungseffizienz mittels harzgefüllter Glaskapillare untersucht. Es hat sich gezeigt, dass während eines 3P-Biegeversuches eine Lokalisierung von Schallemissionen mit vergleichbar hoher Energie offenbar der Position der Kapillarbrüche entspricht. Die Aktivierung der Heilungsmechanismen kann also mit der SEA beobachtet werden. Schallemissionen, die während der Wiederbelastung auftreten, korrelieren mit der verklebten Fläche nach manueller Heilung und bestätigen somit die gute Verbundwirkung entlang der Rissoberflächen aufgrund des Klebers. Schließlich konnte gezeigt werden, dass die SEA ein geeignetes Verfahren ist, die Heilung des Risses sowie die Geometrie der benetzten Klebefläche, basierend auf Polyurethanharz, nachzuweisen.

Danksagung

Die präsentierten Arbeiten wurden teilweise durch die Europäische Union im siebten Rahmenprogramm (FP7 / 2007-2013) im Rahmen der Fördervereinbarung Nr. 309.451 (HEALCON) gefördert.

Referenzen

- [1] Van Tittelboom, K.; De Belie, N. (2013): Self-Healing in Cementitious Materials - A Review. *Materials* 2013, 6, 2182-2217.
- [2] Edvardsen, C. (1999): Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete. *ACI Materials Journal*. 96(3):448-455.
- [3] Yang, Y, Lepech, M.D., Yang, E.-H., Li, V.C. (2009): Autogenous healing of engineered cementitious composites under wet-dry cycles. *Cement and Concrete Research* 39. 382-390.

- [4] Jonkers, H.M. (2011): Bacteria-based self-healing concrete. *Heron* 56 (1/2), pp 1-12.
- [5] Van Tittelboom K, De Belie N, Van Loo D, Jacobs P (2011): Self-healing efficiency of cementitious materials containing tubular capsules filled with healing agent. *Cement and Concrete Composites* 33 (4), pp 497-505.
- [6] Van Tittelboom K, De Belie N (2010a): Self-healing concrete: suitability of different healing agents. *International Journal of 3R's* 1 (1), pp 12-21.
- [7] Granger S, Loukili A, Pijaudier-Cabot G, Chanvillard G (2007): Experimental characterization of the self-healing of cracks in an ultra-high performance cementitious material: Mechanical tests and acoustic emission analysis. *Cement and Concrete Research* 37 (4), pp 519-527.
- [8] Tsangouri, E, et al. (2013): Detecting the Activation of a Self-Healing Mechanism in Concrete by Acoustic Emission and Digital Image Correlation. *The Scientific World Journal*. Volume 2013, Article ID 424560, 10 pages.
- [9] Grosse, C.U., Van Tittelboom, K., De Belie, N. (2013): Non-destructive testing techniques for the observation of healing effects in cementitious materials – an introduction. *Proc. 4th International Conference on Self-Healing Materials – ICSHM*. Ghent. 6 p.
- [10] Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung E. V. (2014): Verifizierung von Schallemissionssensoren und ihrer Ankopplung im Labor, pp 43, <http://www.dgzfp.de/Fachaussch%C3%BCsse/Schallemissionspr%C3%BCfverf/Publikationen>: 15.04.2015.
- [11] Grosse, C.U., Ohtsu M. (2008): *Acoustic Emission Testing in Engineering - Basics and Applications*. Springer publ., Heidelberg, ISBN: 978-3-540-69895-1, 404 p.
- [12] Raith, M. (2013): *Schallemissionsanalyse bei Pulloutexperimenten an Verbunddübeln*. Master's Thesis. Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung. Technische Universität München.
- [13] Geiger, L. (1910): Herdbestimmung bei Erdbeben aus den Ankunftszeiten. *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse* 1910, S. 331–349.
- [14] Bancroft, S. (1985): An Algebraic Solution of the GPS Equations. *Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on AES-21(1)*: 56-59.