

Erfolgskontrolle von Rissinjektionen durch Ultraschallmessungen

Martin FRIESE, Ute EFFNER, Thomas NOWAK, Frank MIELENTZ,
BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin

Kurzfassung. In diesem Beitrag werden die Ergebnisse eines Forschungsvorhabens, das die Entwicklung und Erprobung einer zerstörungsfreien Methode zur Kontrolle des Füllgrads von sanierten Rissen mit Ultraschallecho-Verfahren zum Inhalt hatte, vorgestellt. Hierbei kamen moderne Array-Techniken mit Ultraschall-Punktkontaktprüfköpfen sowie bildgebende Auswertungsverfahren zum Einsatz. Nach Grundlagenuntersuchungen an Testkörpern aus den verschiedenen Füllgütern sowie an einfachen Testkörpern mit eingeschnittenen Nuten wurde eine Vielzahl von Testkörpern mit durch Biegeversuche erzeugten Rissen untersucht. Bei diesen Untersuchungen zeigten sich signifikante Unterschiede zwischen unverfüllten und mit Epoxidharz oder Zementsuspension/Zementleim verfüllten Rissen bzw. Nuten, außerdem lieferten die zerstörungsfreien Untersuchungen in einigen Fällen Hinweise auf unvollständig verfüllte Risse.

1. Einführung

Die zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen (ZfPBau) hat sich in den letzten Jahren zu einem immer wichtigeren Werkzeug entwickelt. Neben der Strukturaufklärung und der Beurteilung von Mängeln und Schäden gewinnt sie zunehmend mehr Bedeutung im Bereich der Qualitätssicherung im Neubau und beim Bauen im Bestand.

Oberflächenverbundene Risse in Stahlbetonbauteilen können die Dauerhaftigkeit des Bauteils einschränken. Eindringendes Wasser kann in Verbindung mit Frost zu Frostabsprengungen und damit weiteren Schädigungen des Betonquerschnitts führen. Außerdem kann bis zur Bewehrung eindringende Feuchtigkeit Korrosion begünstigen. Besteht nach Beurteilung der Risse Handlungsbedarf, so kann die Instandsetzung zum Beispiel durch Füllen des Risses mit Epoxidharz, Polyurethan oder Zementleim / Zementsuspension durchgeführt werden. Für den Brücken- und Ingenieurbau sind hierfür die Regelungen der ZTV-ING Teil 3, Abschnitt 5 (ehemals ZTV-RISS) einschlägig.

Die Kontrolle des Sanierungserfolgs ist für die Dauerhaftigkeit der Konstruktion von wesentlichem Interesse. Derzeit kann die Prüfung auf Vollständigkeit der Füllung nur mit zerstörenden Untersuchungen (Bohrkernentnahme) durchgeführt werden. Aufgrund ihres zerstörenden Charakters sind diese Prüfungen auf begründete Ausnahmefälle beschränkt. Ein zerstörungsfreies Verfahren zur Beurteilung des Füllgrads könnte den Konflikt zwischen dem Wunsch nach vollständiger Dokumentation der Instandsetzung und dem nach geringster möglicher Beeinträchtigung des Bauteils durch die hierfür nötigen Untersuchungen lösen.

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens wurde die Leistungsfähigkeit von Ultraschall-Echoverfahren zur Bewertung des Füllgrads untersucht. Dazu wurden verschiedene Mess- und Auswertemethoden weiterentwickelt und ertüchtigt, so dass mit Ultraschall-Arrays zerstörungsfrei innerhalb kurzer Zeit eine Aussage im Zuge der Qualitätssicherung der Rissverpressung vor Ort möglich ist.

2. Grundlagen des Ultraschall-Echoverfahrens an Rissen

Für die Bestimmung der Tiefe von oberflächenverbundenen Rissen mit Ultraschallverfahren gibt es in der Literatur zahlreiche Ansätze, die auf der Messung der Laufzeit beruhen (Abbildung 1). Die eingekoppelte Welle wird an der Rissspitze gebeugt und ist im aufgezeichneten Ultraschallsignal (A-Bild) als Ungänze erkennbar.

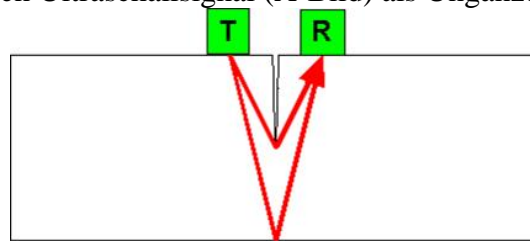


Abbildung 1 Einfache Laufzeitmessung zur Bestimmung der Risstiefe (schematisch)

Abbildung 2 zeigt ein solches A-Bild. Die Messung erfolgte an einer unverfüllten Nut. Deutlich erkennt man bei 240 μs die Rückwandanzeige. Zusätzlich ist bei 110 μs ein klarer Impuls erkennbar, der durch die Beugung an der Nut hervorgerufen wird.

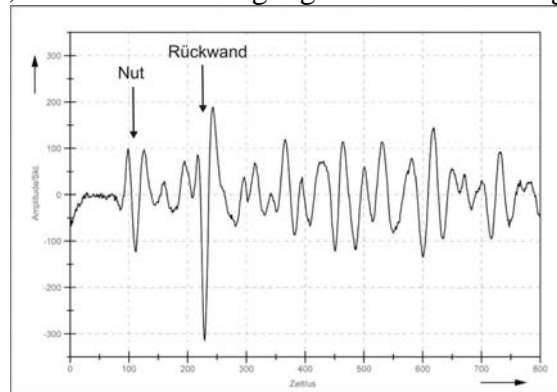


Abbildung 2 Typisches A-Bild einer Ultraschallmessung an einer unverfüllten Nut. Sende- und Empfangsprüfkopf wurden wie in Abbildung 1 dargestellt positioniert.

Untersuchungen haben gezeigt, dass diese Verfahren an Betonbauteilen nur eingeschränkt zuverlässig sind [1]. Während eine Bestimmung der Tiefe ungefüllter trockener Nuten zuverlässig gelang, war dies bei wassergefüllten oder verunreinigten Nuten und erst recht bei realen Rissen nicht möglich. Die größte Aussagesicherheit über den Rissverlauf konnte durch zweidimensionales Abtasten der Bauteiloberfläche und anschließende dreidimensionale Rekonstruktionsrechnung (3D-SAFT – Synthetic Aperture Focusing Technique [2]) erreicht werden. Bei diesem Verfahren wurde der Riss von einer Seite von verschiedenen Positionen aus beschallt und die Bauteiloberfläche auf der Seite des anderen Rissufers mit einem scannenden Laservibrometer als Ultraschallsensor abgetastet. Aus einem solchen Datensatz wird die Lage von Streuobjekten und Reflektoren im Bauteil unter der Messfläche dreidimensional errechnet. Die Ergebnisse können anhand von Schnitten oder Projektionen, bei denen die Amplitude der Reflexion farbcodiert dargestellt wird, beurteilt werden.

Dieses Verfahren hat aufgrund der verwendeten Prüfköpfe, die ein Koppelmittel wie Vaseline oder Glycerin benötigen, und des störungsempfindlichen Laservibrometers, für dessen Einsatz eine Vorbereitung der Oberfläche durch Aufbringen einer retroreflektierenden Folie oder Beschichtung erforderlich ist, einige Nachteile, die seinen Einsatz auf der Baustelle erschweren.

In den letzten Jahren haben sich für die Anwendung von Ultraschallverfahren an Betonbauteilen Punktkontaktprüfköpfe, die mit Transversalwellen (genauer: SH-Wellen – horizontal polarisierte Transversalwellen) arbeiten, als sehr geeignet erwiesen. Ein wesentlicher Vorteil dieser Prüfköpfe ist, dass sie ohne ein Koppelmittel einfach angedrückt werden können. Auf Basis dieser Prüfköpfe wurden Messapparaturen entwickelt, die eine schnelle Messung und Auswertung vor Ort ermöglichen, wodurch auf den Einsatz des Laservibrometers verzichtet werden kann.

3. Eingesetzte Messgeräte

Für die Untersuchungen wurden verschiedene kommerziell erhältliche Ultraschall-Messgeräte und zusätzlich ein Messsystem mit einem multistatischen Prüfkopfarray eingesetzt. Alle Geräte arbeiten nach dem Ultraschall-Echo-Verfahren und verwenden Transversalwellen-Prüfköpfe, die koppelmittelfrei auch auf rauen Oberflächen genutzt werden können.

Das Lineararray „MIRA“ ist kommerziell erhältlich. Bei diesem Gerät sind bis zu 16 Prüfkopfmodule entlang einer Linie angeordnet. Diese Module werden sequentiell so angesteuert, dass jedes Modul einmal als Sender (wobei alle anderen Module synchron als Empfänger agieren) und sonst als Empfänger arbeitet (Abbildung 3 links). So erhält man bei einer Messung mehrere Messkurven aus unterschiedlichen Sender- und Empfängerpositionen, aus denen mit geeigneter Software ein zweidimensionales B-Bild rekonstruiert werden kann [3][4]. Jedes Modul besteht aus vier Einzelprüfköpfen, die mit Transversalwellen arbeiten, diese sind dabei senkrecht zur Array-Achse polarisiert.

Die SAFT-Auswertesoftware für das Lineararray wurde speziell auf die Bedürfnisse der Rissuntersuchung angepasst von der Universität Kassel entwickelt.

Das Lineararray wird senkrecht zum Riss auf der Betonoberfläche angekoppelt (Abbildung 3 rechts) und die Messung gestartet. Aus den einzelnen Messsignalen werden die Ultraschallrückstreuung bzw. Reflexionen des Volumens unter der Messfläche berechnet. Die Ergebnisse sind als Schnitte bzw. Projektionen darstellbar, bei denen die Amplitude der Rückstreuung bzw. Reflexionen farbkodiert dargestellt wird [5]

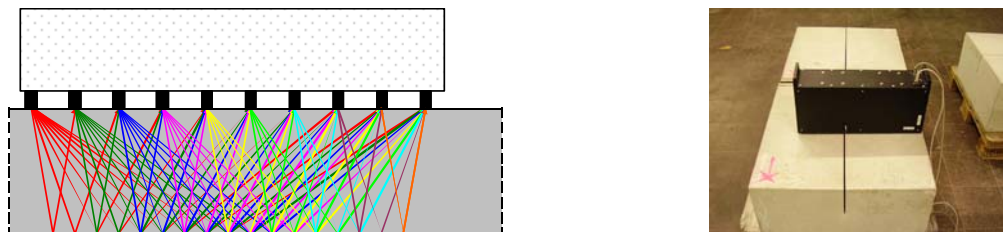


Abbildung 3 Lineararray: Messprinzip (links) sowie Messanordnung an einem Nuttestkörper

Das Messsystem „Multistatisches Array“ wurde an der BAM aus verschiedenen kommerziell erhältlichen Komponenten aufgebaut und Teilprogramme für die Gerätesteuerung entwickelt [6]. Kernstück der Messeinheit ist ein PXI-System (spezielles Computersystem) für die Messablaufsteuerung und die Messdatenerfassung. Als Sender wird ein A1220-Messkopf eingesetzt, als Empfänger der multistatische Array-Messkopf M3102 (Abbildung 4 links), der aus einer 6x6-Matrix aus Transversalwellen-Prüfköpfen besteht. Während der Messung wird an jeder Position nacheinander mit jedem der 36 Einzelprüfköpfe das empfangene Signal aufgezeichnet. Aus dieser Vielzahl von Kurven mit unterschiedlichen Sender- und Empfängerpositionen wird dann mit Hilfe einer an der Universität Kassel entwickelten Software ein Abbild des untersuchten Volumens rekonstruiert. Die Entwicklung orientierte sich an dem erprobten Verfahren zur Risscharakterisierung mit einem

Laservibrometer [1]; das Vibrometer wird wegen der beschränkten Einsatzmöglichkeiten z. B. auf Baustellen durch das multistatistische Array ersetzt.



Abbildung 4 Messsystem „Multistatistisches Array“: Links: multistatistischer Array-Messkopf M3102, rechts: Messaufbau für Riss-Untersuchungen

Abbildung 4 (rechts) zeigt den typischen Messaufbau einer Rissmessung. Bei den Messungen an den Rissen und Nuten sind der Sender und der Empfänger auf der Betonoberfläche, getrennt durch den Riss, angeordnet. Auch hier ist der Sendeprüfkopf so angeordnet, dass die Transversalwellen parallel zum Rissverlauf polarisiert sind.

4. Voruntersuchungen

Vor den Untersuchungen an echten Rissen wurden diverse grundlegende Untersuchungen vorgenommen. Zunächst wurden die Eigenschaften der Füllgüter Zementsuspension, Polyurethan und Epoxidharz hinsichtlich der Ultraschallausbreitung bestimmt. Im Zuge dieser Voruntersuchungen ergab sich, dass sich in dem Polyurethan-basierten Füllgut keine Transversalwellen ausbreiten können.

Weitere Voruntersuchungen fanden an idealisierten Probekörpern mit eingeschnittenen Nuten statt. Nach der Herstellung von vier identischen Probekörpern wurden die Nuten von dreien mit den verschiedenen Füllgütern verfüllt. Die Nut des vierten blieb als Referenz unverfüllt.

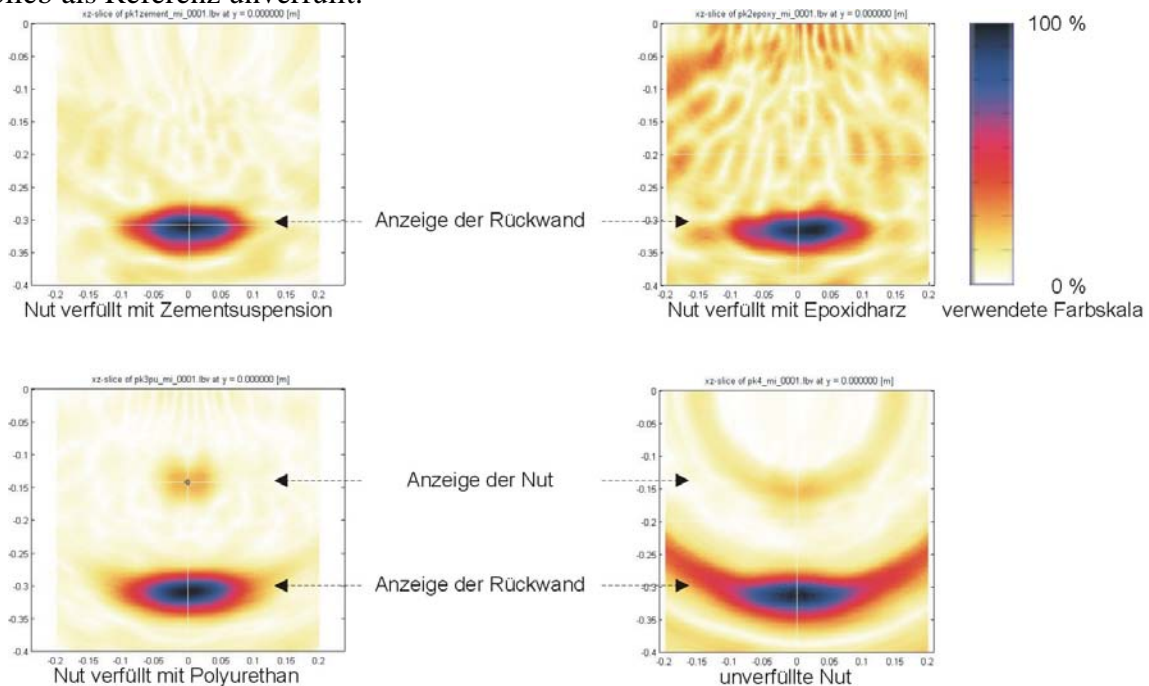


Abbildung 5 Messergebnisse mit dem Lineararray an Probekörpern mit unterschiedlich verfüllten Nuten

Die Ergebnisse der Messungen an diesen Testkörpern (Abbildung 5, Messanordnung mit dem Lineararray siehe Abbildung 3 rechts) korrespondieren sehr gut

mit denen an den Füllgut-Probekörpern. An den unverfüllten Testkörpern (Abbildung 5 unten rechts) konnten jeweils sowohl Nutspitze als auch Rückwand eindeutig abgebildet werden. Nach dem Verfüllen der Nuten war die mit Polyurethan gefüllte Nut (Abbildung 5 unten links) im Ergebnis der Rekonstruktionsrechnung ebenso deutlich erkennbar wie die unverfüllte Nut. Die Anzeigen der mit Zementsuspension verfüllten Nut (Abbildung 5 oben links) sowie der mit Epoxidharz verfüllten Nut (Abbildung 5 oben rechts) hingegen traten nicht mehr deutlich aus dem Hintergrund heraus. Auffällig ist, dass die Nuten nicht in ihrer tatsächlichen Tiefe sondern geringfügig tiefer angezeigt werden.

Mit dem multistatischen Array konnten vergleichbare Ergebnisse erzielt werden. Zur Anschauung wird hier das Ergebnis der Nut mit Zementsuspension (Abbildung 6) vorgestellt.

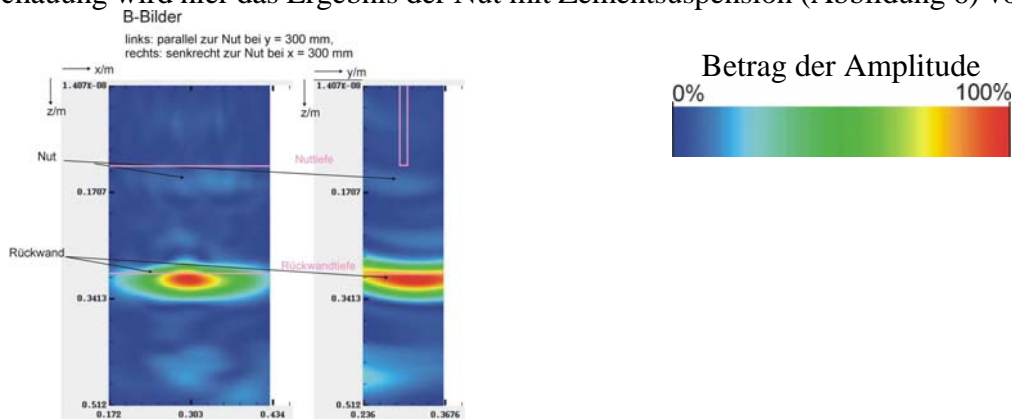


Abbildung 6 Rekonstruktionsergebnis der Messung am Nutentestkörper mit Zementsuspension verfüllter Nut; die Rückwand wird deutlich abgebildet, die Nut ist nur schwach zu sehen

Die rekonstruierten B-Bilder der Messungen mit dem multistatischen Array zeigen deutlich das Rückwandecho und eine schwach erkennbare Nutspitze. Auch hier werden die Nuten etwas tiefer angezeigt als es ihrer tatsächlichen Geometrie entspricht.

5. Ergebnisse an Rissen

Um die Vollständigkeit der Rissverfüllung zu beurteilen, ist es sinnvoll, Messungen jeweils vor und nach dem Verfüllen des Risses durchzuführen und diese zu vergleichen. Im Labor bietet es sich hier an, die zu untersuchenden Risse mit einem Biegeversuch zu erzeugen. Da während der Messungen und des Verfüllens der Probekörper in absoluter Ruhe verharren sollte, schied die Nutzung einer Prüfmaschine aus, stattdessen wurde ein Vierpunkt-Biegeversuch mit einfachen Mitteln nachgestellt (Abbildung 7).

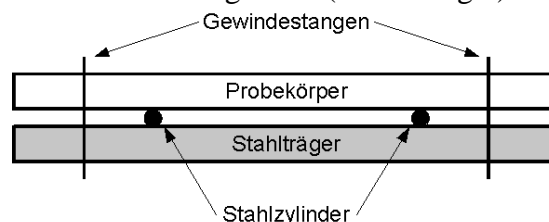


Abbildung 7 Vierpunkt-Biegeversuch (Skizze) zur Erzeugung der Risse

Exemplarisch werden die Ergebnisse an zwei unterschiedlich verfüllten Rissen vorgestellt. In den Riss im Probekörper „QSR5a“ wurde Epoxidharz injiziert, der Riss im Probekörper „QSR6b“ drucklos mit Zementsuspension verfüllt.

Der Rissverlauf im Probekörper „QSR5a“ ist in Abbildung 8 dargestellt.

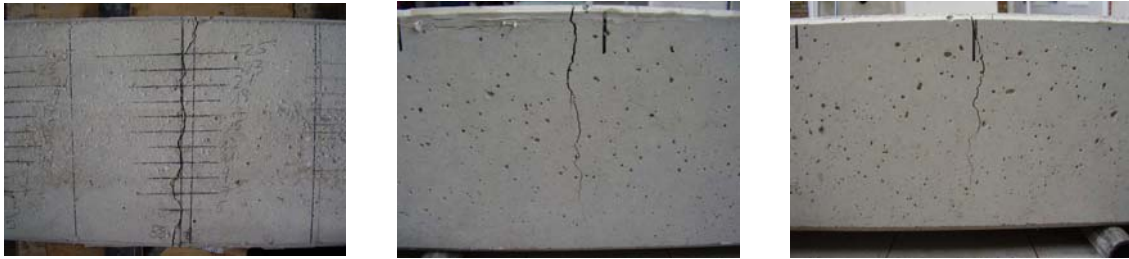


Abbildung 8 Testkörper „QSR5a“, Rissverlauf bei $x = 880$ mm. Links: Draufsicht, Mitte: Ansicht der Vorderseite, rechts: Ansicht der Rückseite

Mit dem Lineararray wurde zunächst eine Referenzmessung im ungerissenen Bereich des Probekörpers durchgeführt, um die Schallgeschwindigkeit für die Rekonstruktionsrechnung zu justieren (Abbildung 9 links). Danach wurden Messungen am unverfüllten (Abbildung 9 Mitte) sowie schließlich am verfüllten (Abbildung 9 rechts) Riss vorgenommen.

An der Referenzstelle wird die Rückwand deutlich in ihrer tatsächlichen Tiefe von 20 cm abgebildet. Bei ca. 40 cm ist ein Mehrfachecho der Bauteilrückwand zu erkennen. Im oberflächennahen Bereich treten starke Anzeigen auf, die auf sich an der Oberfläche ausbreitende SH-Wellen zurückgehen. Diese oberflächennahen Anzeigen treten am unverfüllten Riss nicht mehr auf, da sich Transversalwellen in Luft nicht ausbreiten können. Außerdem fällt auf, dass die Bauteilrückwand am offenen Riss diffus und zu tief abgebildet wird. Direkt hinter der Rückwandreflexion sind weitere markante Signale erkennbar. Diese Effekte könnten auf eine Überlagerung zwischen Rückwandreflexion und Winkelspiegel-Effekt (die schräg auftreffende SH-Welle wird an der Rissflanke reflektiert, trifft dann auf die Bauteilrückwand, wo sie abermals reflektiert wird, und gelangt schließlich wieder zur Bauteiloberfläche) zurückgehen. Das Bild, das sich am verfüllten Riss ergibt, ähnelt sehr stark dem an der ungeschädigten Referenzposition. Die Bauteilrückwand erscheint wieder klar in der richtigen Tiefe, im oberflächennahen Bereich treten starke Signale auf. Insgesamt deuten die Ergebnisse darauf hin, dass die Wellenausbreitung durch das Füllgut nicht oder nur unwesentlich gestört wird. Es ist von einer guten Verfüllung des Risses auszugehen.

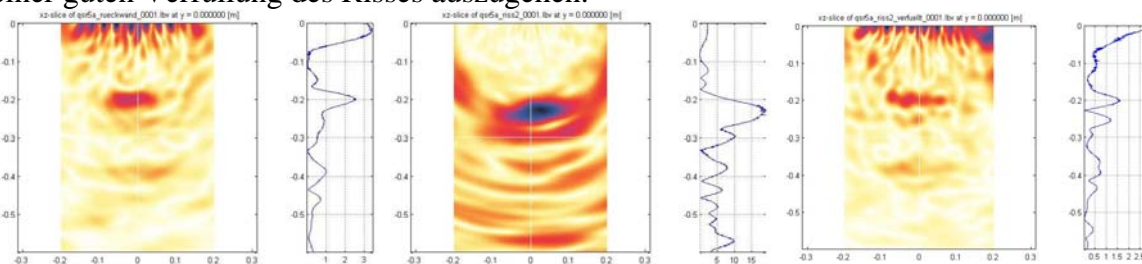


Abbildung 9 Testkörper „QSR5a“, Rekonstruierte B-Bilder der Messungen mit dem Lineararray. Links: Referenzstelle, Mitte: Messung am unverfüllten Riss, rechts: Messung am mit Epoxidharz verfüllten Riss

Mit dem multistatischen Array wurde analog verfahren, allerdings wurde auf die Messung am ungeschädigten Querschnitt verzichtet. Auch hier lassen sich ähnliche Effekte beobachten wie bei der Messung mit dem Lineararray. Bei der Messung am unverfüllten Riss treten starke Störsignale hinter dem Rückwandecho auf (Abbildung 10 links), im oberflächennahen Bereich sind keinerlei Anzeigen zu beobachten. Am verfüllten Riss (Abbildung 10 rechts) kommen hinter dem Rückwandecho nur noch geringe Störungen vor, dafür ist das 1. Mehrfachecho der Bauteilrückwand sehr gut zu erkennen. Außerdem sind im oberflächennahen Bereich starke Anzeigen vorhanden, die auf direkt an der Oberfläche verlaufende Wellen zurückgehen.

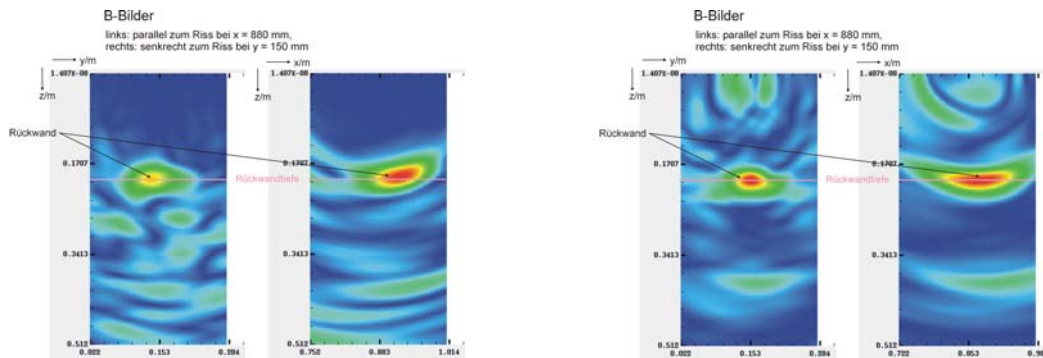


Abbildung 10 Testkörper „QSR5a“, Rekonstruierte B-Bilder der Messungen mit dem multistatischen Array. Links: Messung am unverfüllten Riss, rechts: Messung am mit Epoxidharz verfüllten Riss

Sowohl die Untersuchung mit dem Lineararray als auch die mit dem multistatischen Array indizieren einen vollständig verfüllten Riss. Um diese Annahme zu verifizieren, wurde ein Bohrkern entnommen und visuell (Abbildung 11 links) sowie computertomographisch (Abbildung 11 Mitte und rechts) untersucht. Die Untersuchungen am Bohrkern bestätigen das Ergebnis der Ultraschall-Untersuchungen, der Riss ist vollständig verfüllt.

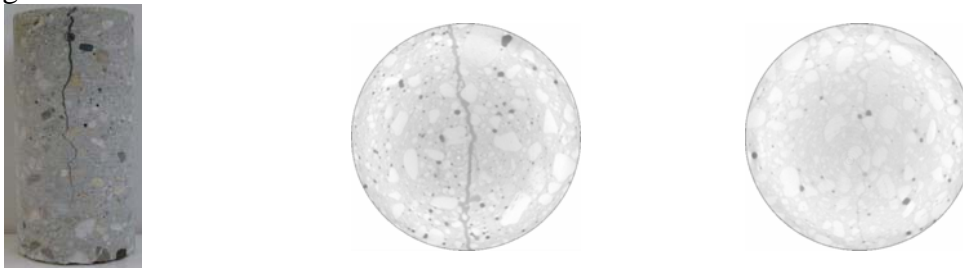


Abbildung 11 Testkörper „QSR5a“, aus dem untersuchten Riss entnommener Bohrkern. Links: Foto, Mitte: Tiefenschnitt aus dem CT-Datensatz in einer Tiefe von 13 mm, rechts: Tiefenschnitt aus dem CT-Datensatz in einer Tiefe von 140 mm

Am Probekörper „QSR6b“ wurde der Riss sehr weit geöffnet, um ihn drucklos mit Zementsuspension verfüllen zu können. Der Rissverlauf ist in Abbildung 12 abgebildet.



Abbildung 12 Testkörper „QSR6b“, Rissverlauf bei $x = 550$ mm. Links: Draufsicht, Mitte: Ansicht der Vorderseite, rechts: Ansicht der Rückseite

Mit dem Lineararray wurden wieder Messungen an einer ungerissenen Referenzstelle (Abbildung 13 links), am unverfüllten (Abbildung 13 Mitte) sowie am verfüllten (Abbildung 13 rechts) Riss vorgenommen. Im Vergleich der Ergebnisse zeigen sich ähnliche Phänomene wie am Probekörper „QSR5a“, allerdings sind auch Abweichungen zu den bisherigen Ergebnissen zu verzeichnen. An der ungerissenen Referenzstelle sowie am verfüllten Riss treten markante Signale infolge von SH-Oberflächenwellen auf. Am unverfüllten Riss können diese hingegen nicht beobachtet werden. An der Referenzstelle wird die Bauteilrückwand klar in ihrer tatsächlichen Tiefe

abgebildet, am geöffneten Riss erscheint sie diffus in einer zu großen Tiefe, gefolgt von anderen Signalen, die vermutlich auf die Reflexion der Welle an der Rissflanke zurückgehen. Am verfüllten Riss wird die Bauteilrückwand wieder in ihrer tatsächlichen Tiefe abgebildet, in der Mitte scheint allerdings ein Abschattungseffekt aufzutreten. Dieser korrespondiert mit Signalen, die direkt unterhalb der Anzeigen der Oberflächenwellen auftreten, die aber nicht mehr den Oberflächenwellen zugeordnet werden können. Diese Signale deuten auf Störungen, beispielsweise größere Lufteinschlüsse, zwischen Bauteiloberfläche und –rückwand hin. Mehrfachechos der Bauteilrückwand lassen sich nur an der ungestörten Referenzstelle beobachten.

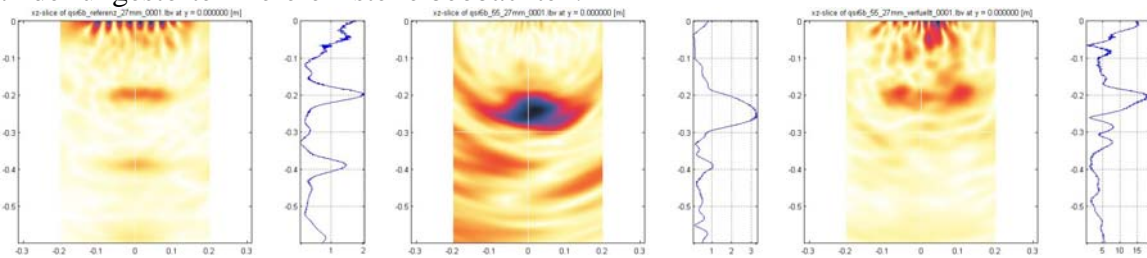


Abbildung 13 Testkörper „QSR6b“, Rekonstruierte B-Bilder der Messungen mit dem Lineararray. Links: Referenzstelle, Mitte: Messung am unverfüllten Riss, rechts: Messung am mit Zementsuspension verfüllten Riss

Mit dem multistatischen Array wurden an diesem Riss vergleichbare Ergebnisse erzielt. Die Bauteilrückwand ist sowohl am unverfüllten (Abbildung 14 links) als auch am verfüllten Riss (Abbildung 14 rechts) gut erkennbar, erscheint jedoch am verfüllten Riss stärker fokussiert. In einer Tiefe von ca. 10 cm erscheint sowohl am unverfüllten als auch am verfüllten Riss eine Anzeige erhöhter Amplitude. Am verfüllten Riss geht diese Anzeige in die Anzeigen über, die auf SH-Oberflächenwellen zurückgehen. Die Anzeige in einer Tiefe von 10 cm lässt sich als Kontaktstelle zwischen den Rissflanken deuten, hinter der sich im verfüllten Riss ein Lufteinschluss befindet.

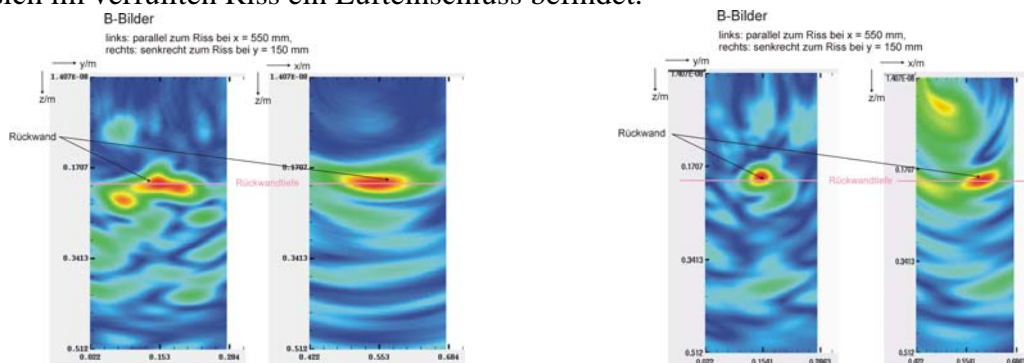


Abbildung 14 Testkörper „QSR6b“, Rekonstruierte B-Bilder der Messungen mit dem multistatischen Array. Links: Messung am unverfüllten Riss, rechts: Messung am mit Zementsuspension verfüllten Riss

Auch aus diesem Riss wurde ein Bohrkern entnommen, um den Befund aufgrund der Ultraschall-Untersuchungen zu verifizieren. Schon der visuelle Befund (Abbildung 15 links) zeigt größere unverfüllte Bereiche, was durch die Computertomographie (Abbildung 15 rechts) bestätigt wird.



Abbildung 15 Testkörper „QSR6b“, aus dem untersuchten Riss entnommener Bohrkern. Links: Foto, rechts: Tiefenschnitt aus dem CT-Datensatz in einer Tiefe von 59 mm

6. Zusammenfassung

Wenn ein Riss saniert wird, ist es von großem Interesse, verlässliche Informationen über die Qualität der Rissverpressung zu erhalten. Im Rahmen einer umfangreichen Studie konnte gezeigt werden, dass bildgebende Ultraschallverfahren diese Informationen zerstörungsfrei bereitstellen können. Mit den verwendeten Transversalwellen-Prüfköpfen zeigen sich signifikante Unterschiede zwischen unverfüllten und verfüllten Rissen für die Füllgüter Epoxidharz und Zementleim / Zementsuspension. Für Polyurethan konnte der Nachweis erbracht werden, dass aufgrund der Materialeigenschaften dieses Füllguts Untersuchungen mit Transversalwellen nicht zum Erfolg führen.

An den Probekörpern mit idealisierten Rissen konnte die Anzeige der Nut im Ultraschall-Ergebnis eindeutig zugeordnet werden. Bei realen Rissen gelang diese Zuordnung nicht immer. Eine Beurteilung des Füllgrads gelingt aber auch ohne Kenntnis des exakten Rissverlaufs im Querschnitt. Zwischen unverfüllten und verfüllten Rissen zeigen sich insbesondere hinsichtlich der Abbildung der Bauteilrückwand und der Abbildung von Oberflächenwellen deutliche Unterschiede. Diese Unterschiede bzw. Abweichungen davon können auch zur Detektion unzureichend verfüllter Risse herangezogen werden.

7. Danksagung

Die in diesem Beitrag vorgestellten Ergebnisse wurden im Rahmen eines von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) geförderten Forschungsvorhabens gewonnen.

Herrn Dr.-Ing. Klaus Mayer (Universität Kassel) stellte die SAFT-Algorithmen für die Rekonstruktion der Messdaten zur Verfügung, die von ihm durchgeführten numerischen Simulationen der Wellenausbreitung trugen entscheidend zum Verständnis der beobachteten Phänomene bei. Außerdem lieferte er wertvolle Hinweise bei der Auswertung der Messdaten.

Die computertomographische Untersuchung ausgewählter Bohrkern wurde von Herrn Dr. rer. nat. Jürgen Goebels (BAM-Fachgruppe VIII.5) vorgenommen. Für die Herstellung der Probekörper danken wir unseren Kollegen Marco Lange und Sean Smith sowie dem Betonlabor der BAM (BAM-Fachgruppe VII.1).

8. Referenzen

- [1] Mielentz, F., Milmann, B., Krause, M. und Müller, W.: Zerstörungsfreie Risscharakterisierung in Betonbauteilen mit Ultraschall. in: DGZfP (Hrsg.); Fachtagung Bauwerksdiagnose - Praktische Anwendungen Zerstörungsfreier Prüfungen, 25.-26. Oktober 2001 in Leipzig, DGZfP-Berichtsband 76 auf CD, Posterbeitrag 24, Berlin (2001).
- [2] Langenberg, K.-J., Mayer, K., Marklein, R., Theoretische Grundlagen der zerstörungsfreien Materialprüfung mit Ultraschall, Oldenbourg Verlag, 2009
- [3] Friese, M., Mielentz, F. und H. Wiggenhauser: Ultraschall-Linienarray zur Untersuchung von Betonbauteilen. In: Tagungsband zur Fachtagung Bauwerksdiagnose 2008, Praktische Anwendungen Zerstörungsfreier Prüfungen und Zukunftsaufgaben, 21.-22.02.2008, Berlin, Berichtsband BB 112-CD, Poster 9
- [4] Kozlov, V.N., Samokrutov, A.A. and V.G. Shevaldykin (2006), Ultrasonic Equipment for Evaluation of Concrete Structures Based on Transducers with Dry Point Contact, in: Al-Quadi, I. and G. Washer (eds.), Proceedings of the NDE Conference on Civil Engineering, St. Louis, USA, 2006
- [5] Müller, W.; Schmitz, V.; Schäfer, G.: Reconstruction by the synthetic aperture focussing technique (SAFT). In: Konferenz-Einzelbericht: Nucl. Eng. Des., 3. Japanese-German joint seminar on reactor safety research, 1986
- [6] Mielentz, F.; Taffe, A.; Krause, M.; Milmann, B.; Effner, U.: Erfolgskontrolle von Rissinjektionen durch zerstörungsfreie Ultraschallmessungen. Zwischenbericht zur Forschungsvereinbarung zwischen der BAM und der BASt, BASt FE 15.440/2006/DRB, BAM Vorhaben 4444, Juli 2008.