

Zur Visualisierung von Schäden in Betonschwellen durch zerstörungsfreie Ultraschallprüfung

Die bildgebende Ultraschalltechnik liefert Hinweise auf verdeckte Schäden in Spannbetonschwellen. Dieses zerstörungsfreie Prüfverfahren schafft eine objektive und vergleichbare Basis für die Zustandsbestimmung der Schwellen und ermöglicht die Optimierung von baulichen Erhaltungsstrategien.



Ultraschalluntersuchung von Betonschwellen

Im deutschen Eisenbahnnetz sind ca. 80 Millionen Spannbetonschwellen verbaut. Diese sind über ihre Lebensdauer verschiedenen Umwelteinflüssen und Lasteinträgen ausgesetzt. Die Folge ist die fortwährende Degradation der Schwellen – bis hin zu sichtbaren Schäden, welche die Leistungs- und Tragfähigkeit der Schwellen reduzieren können [1]. Daher wird der Zustand von Spannbetonschwellen regelmäßig durch Sichtprüfungen bewertet.

Die Aussagekraft der Ergebnisse von Sichtprüfungen hängt neben der Prüferpersonalqualifizierung sowie -erfahrung und dem Material von Umweltbedingungen wie Wetter- und Lichtverhältnissen ab. So können Feuchtigkeit oder Bewuchs die Entdeckungswahrscheinlichkeit von Oberflächenrisse deutlich reduzieren. Hinzu kommt das Materialverhalten des Spannbetons; zum Beispiel, dass die Stahlkorrosion innerhalb des Bauteils auftritt und viele Schäden über weite Zeiträume äußerlich nicht sichtbar sind. Dies gilt analog für vom Gleisschotter verdeckte Defekte. Auch Ab-



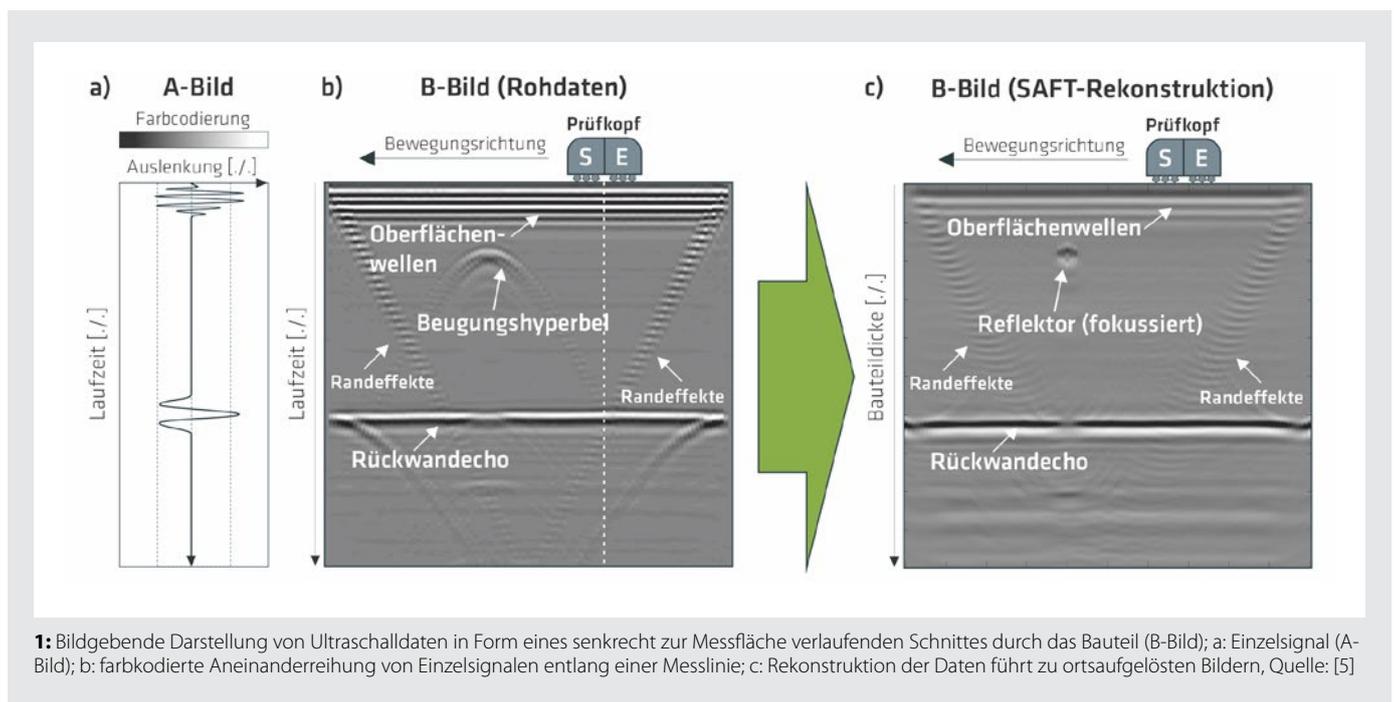
Dr.-Ing., Dipl.-Volksw. Christoph Strangfeld

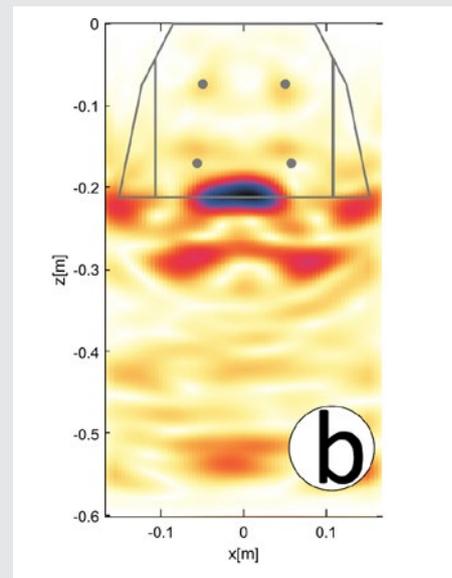
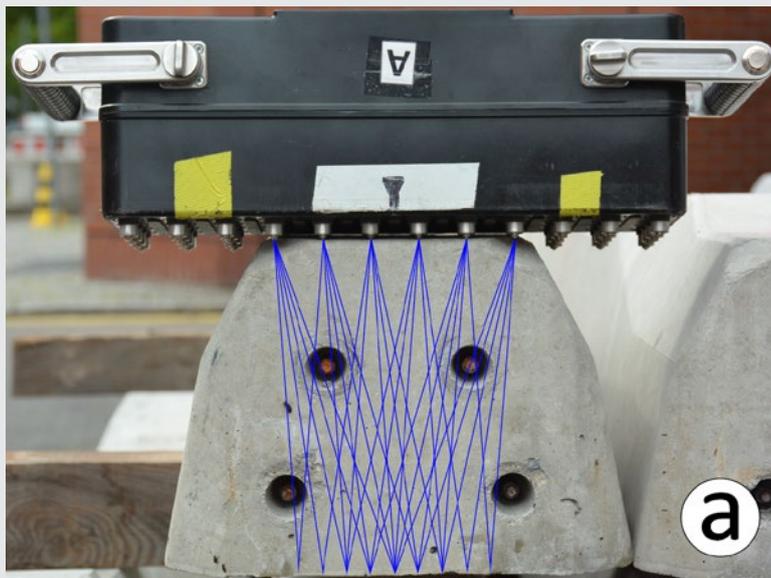
Stellvertretender Leiter des Fachbereichs 8.2: Zerstörungsfreie Prüfmethoden für das Bauwesen, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin
christoph.strangfeld@bam.de



Dr.-Ing. Stefan Küttenbaum

Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin
stefan.kuettenbaum@bam.de





2: a: Multistatisches Ultraschallarray mit idealisierten Laufwegen der elastischen Wellen im Bauteil (dargestellt sind jeweils nur die kürzesten Wege zwischen den Prüfköpfen); b: Ultraschall B-Scan einer fabrikkneuen Schwelle, Konturlinie der B70-Schwelle wurde nachträglich zur Visualisierung hinzugefügt

platzungen an der Schwellenunterseite können durch die Sichtprüfung im Gleis nicht ohne Weiteres entdeckt werden.

Fehlende Informationen für die ganzheitliche Zustandsermittlung einer Spannbetonschwelle auf der Strecke sind ein Hauptgrund, weshalb die Schwellen häufig nach einer Nutzungsdauer von 20 Jahren ausgetauscht werden [2]. Doch auch im Anschluss sind viele Schwellen noch in einem sehr guten Zustand und können weiterverwendet werden [3]. Innovative, objektive und validierte Verfahren können einen wesentlichen Beitrag für die gesicherte Vorhersage der Restlebensdauer der Schwellen auch im Gleis leisten [4].

Grundlagen des Ultraschallverfahrens im Bauwesen

Das bildgebende Ultraschallverfahren wird seit Jahrzehnten sehr erfolgreich in verschiedensten Disziplinen wie der Medizin oder der Werkstoffprüfung eingesetzt. Im Bauwesen werden piezoelektrische Wandler verwendet, um eine elastische Welle in das Messobjekt zu senden. Diese durchläuft das Bauteil und wird an Grenzen zwischen zwei Materialien mit verschiedenen akustischen Eigenschaften reflektiert. Dies gilt auch für den Übergang von Beton zu Luft, z. B. an der Rückseite des Bauteils oder an Rissen innerhalb des Gefüges. Durch die Messung der Laufzeit, die der reflektierte Ultraschallimpuls benötigt, um zum Wand-

ler zurückzulaufen, kann bei Kenntnis der Ultraschallgeschwindigkeit des Materials die Tiefenposition eines Reflektors bestimmt werden. Durch Messungen entlang einer Messlinie kann die räumliche Ausdehnung eines Risses ermittelt werden.

Für die Visualisierung werden üblicherweise Längs- und Querschnitte, sog. B-Bilder, oder auch Tiefenschnitte (C-Bilder) durch das Bauteil verwendet. Diese werden aus einer Vielzahl abgetasteter Signale innerhalb eines Messrasters erzeugt. Bild 1 zeigt neben einem an einem Messpunkt aufgezeichneten Zeitsignal (A-Bild) zwei solcher B-Bilder, die denselben Bereich beschreiben. Der Unterschied besteht darin, dass die Rohdaten in Bild 1b durch eine Rekonstruktionsberechnung in einen geometrisch aufgelösten Datensatz überführt wurden (c). Nach der Rekonstruktion beschreibt die Y-Achse nicht mehr die Laufzeit in μs , sondern die Tiefe in mm des Reflektors in Bezug auf die Messfläche. Die Informationen aus einer Mehrzahl an A-Bildern werden dabei auf den Ursprung der Reflektion fokussiert.

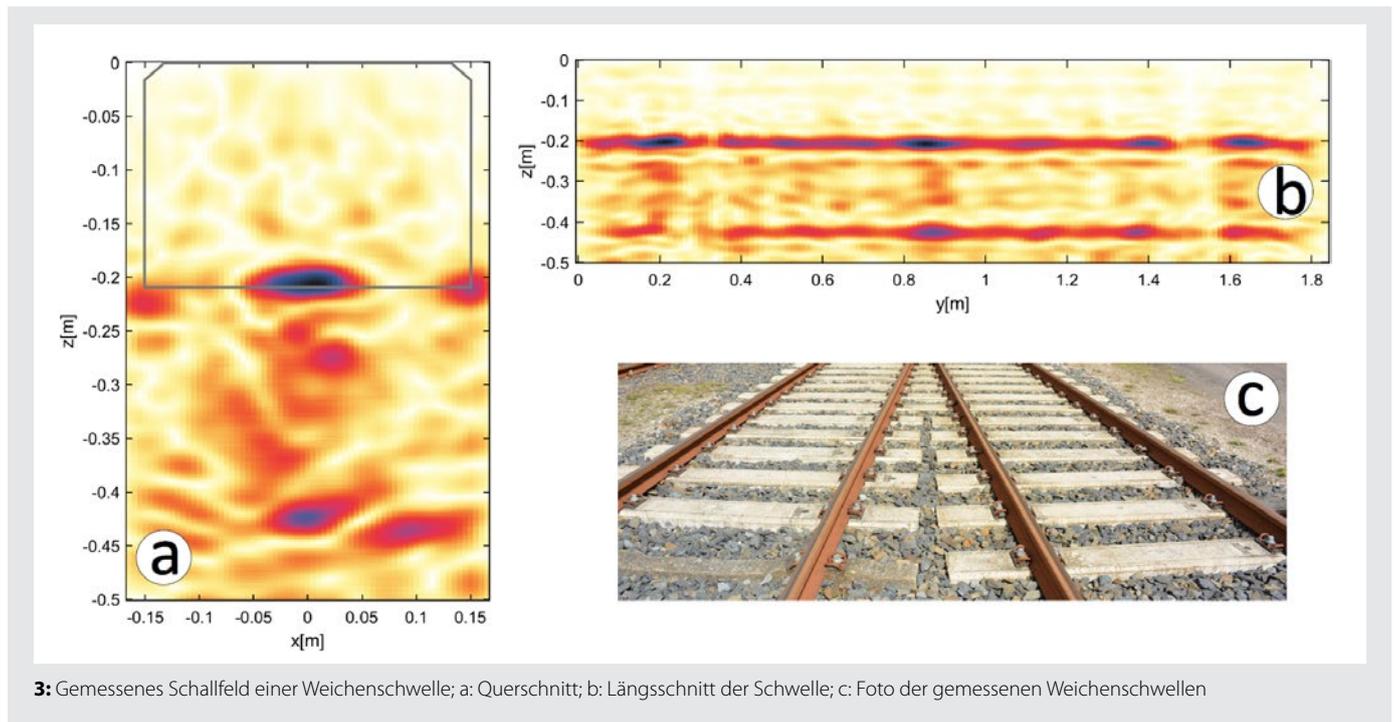
Bild 2a zeigt ein Ultraschallgerät, das auch als multistatisches Array bezeichnet werden kann. Die jeweils vier (aus insgesamt 48) in einer Reihe angeordneten piezoelektrischen Wandler sind synchronisiert. Die Grundidee besteht darin, dass jede dieser Wandler-Reihen pro Messung einmal als Sender fungiert, während alle weiteren die reflektierten Signalanteile empfangen.

Dadurch kann eine Vielzahl an verschiedenen Schallwegen zur Strukturanalyse genutzt werden (siehe blaue Linien in Bild 2a). Eine Ultraschallwelle breitet sich in Form einer Halbkugel aus, daher werden auch Materialbereiche außerhalb der direkten und dargestellten Schallwege erfasst.

Versuchsdurchführung

Ziel der Versuche ist die Erprobung der Ultraschallmesstechnik für die Zustandsbewertung von Spannbetonschwellen des Typs B70 und Weichenschwellen. Um eine möglichst große Bandbreite an Schwellenzuständen abzudecken, wurde an drei verschiedenen Standorten gemessen. Fabrikkneue Schwellen, wie in Bild 2a gezeigt, wurden direkt auf dem Gelände der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung untersucht. Auf einem privaten Abstellgleis im Norddeutschen Raum wurden Messungen an Schwellen durchgeführt, die einer langjährigen Verwitterung bei moderater Belastung ausgesetzt waren. Auf einem Baustoffrecyclinghof wurden aufbereitete, ausgemusterte und geschädigte Schwellen geprüft.

Die Messdatenaufnahme erfolgt durch die manuelle Positionierung des Geräts auf der Schwellenoberseite. Die Schwellen wurden, wie in Bild 2a gezeigt, geprüft. Das Prüfsystem nimmt ein Schallfeld in der x-z-Ebene auf. Dies entspricht dem Querschnitt der Schwelle. Beim gewähl-



ten Messpunktabstand von 5 cm konnten bis zu 48 Querschnitte je Schwelle aufgenommen werden. Im Bereich der Schiene wurde im Gleis keine Messung durchgeführt. Die Prüfzeit pro Schwelle beträgt je gewählter Auflösung zwischen 3 und 8 Minuten. Vom Schwellenkopf bis zur Schienenbefestigung wurden fünf Querschnitte aufgezeichnet. Dieser Bereich des Schwellenkopfes stellt den Schwerpunkt der Studie dar. Ziel ist die Evaluierung des Ultraschallverfahrens an Spannbetonschwellen im Hinblick auf Sickenrisse, Kopfrisse und Treibrisse.

Ergebnisse der Ultraschallprüfung an Spannbetonschwellen

Unauffällige Signaltbilder

Bild 2b zeigt das Schallfeld an einer fabrikneuen B70-Spannbetonschwelle, gemessen mit einer mittleren Frequenz von 75 kHz. Die Umriss der B70-Schwelle wurden zur Orientierung nachträglich hinzugefügt. Die verwendete Farbskala zeigt die Amplitude des empfangenen Ultraschallsignals. Je dunkler die Farbe, desto stärker das empfangene Echo. In Schwellenmitte ist bei einer Tiefe von ca. $z=20$ cm eine sog. Anzeige, also ein signifikantes Echo, zu erkennen. Dies ist die Schallreflexion von der Unterseite der Schwelle. In gleicher Tiefe von $z=20$ cm treten an beiden Rändern bei

ca. $x = \pm 15$ cm zwei weitere Echos deutlich hervor. Dies sind Schallfeldfokussierungen an den unteren Kanten der Schwelle. Diese bezeichnen wir im Weiteren als Kantenechos. In einer Tiefe von ca. 28 cm treten weitere Signale auf. Diese Signale kommen weiterhin aus der Schwelle und nicht aus dem Boden, da die Schallwelle an den Außenkanten der Schwelle jeweils komplett reflektiert wird. Dieses Signal entsteht, wenn die Schallwelle nicht den direkten, sondern einen verlängerten Schallweg nimmt. In diesem Fall wird ein Teil der Wellenenergie von den Seitenwänden hin zur Unterseite reflektiert und von dort wieder an die Oberseite. Durch den größeren Weg ist die Schalllaufzeit verlängert und das Echo wird einer größeren Tiefe zugeordnet. Insgesamt ist das Schallfeld mit dem starken Rückwandecho und den beiden Kantenechos unauffällig und der vermutete Schwelenzustand ist gut. Im Bereich der vier Spannstäbe sind leichte Amp-

litudenerhöhungen zu erkennen. Diese Spanngliedanzeigen deuten das räumliche Auflösungsvermögen der Ultraschallechomethode bei guter Betonqualität an. Dieses Schallfeld betrachten wir im weiteren Verlauf als Referenz für andere Schwellen, deren Zustand unbekannt ist.

In Bild 3 wurden Weichenschwellen im Bereich einer Weiche gemessen. Die Belastung ist moderat, da hier Schienenfahrzeuge nur unregelmäßig verkehren und dies ausschließlich mit Schrittgeschwindigkeit.

Die Signalamplitude in Bild 3a ist im Bereich der Unterseite und der beiden Schwellenkanten deutlich erhöht. Die grauen Konturlinien der Weichenschwellen wurden wieder nachträglich eingefügt. Ansonsten sind keine starken Reflexionen innerhalb der Schwelle erkennbar. Unterhalb des Rückwandechos ist in einer Tiefe von ca. $z=42$ cm eine weitere Reflexion deutlich zu erkennen, das zweite Rückwandecho. In diesem Fall wird die Schallwelle an der Unterseite, an der Oberseite und dann noch einmal an der Unterseite reflektiert. Der Schallweg und die damit verbundene Schalllaufzeit sind somit verdoppelt; daher entspricht die ermittelte Tiefe der doppelten Schwellenhöhe. Nur bei geringer Signaldämpfung im Material bildet sich das zweite Rückwandecho so klar ab. Weiterhin zeigt Bild 3b einen Längsschnitt von der Schwelle. Das erste und das zweite Rückwandecho bilden sich in der erwartete

Die Ultraschallprüfung kann die Sichtprüfung um Informationen über äußerlich nicht sichtbare Schäden ergänzen.

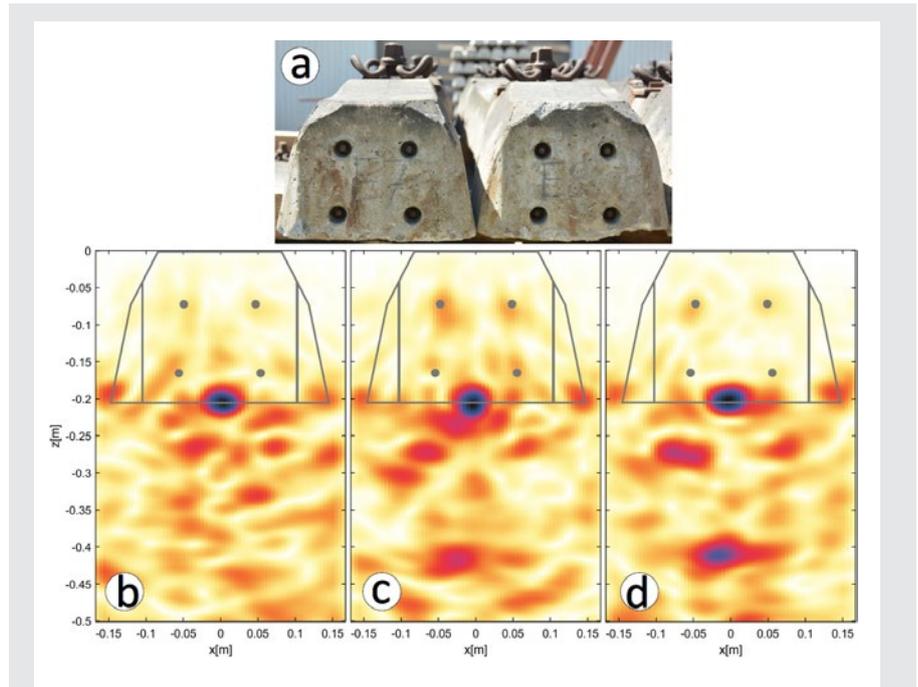
ten Tiefe entlang der gesamten Schwelle deutlich ab. Diese Ultraschallmessungen sind eine Indikation für einen sehr guten Materialverbund zwischen Zementmatrix und Zuschlägen. Das große Potenzial der Technik bei der Untersuchung der Weichenschwellen ergibt sich aus der einfacheren Geometrie.

Im Baustoffrecyclinghof werden Schwellen angeliefert, die im Rahmen von Sanierungsarbeiten aus dem Gleis entnommen wurden. Alter, Hersteller, Belastung und Entnahmeort der Schwellen sind dabei in der Regel unbekannt. Jede einzelne Schwelle wird sichtgeprüft und entweder wiedergenutzt, wiederaufbereitet oder aussortiert. Bild 4a zeigt ein Foto von zwei B70-Schwellen, die nach Sichtprüfung der Wiederaufbereitung zugeführt wurden für eine anschließende Weiternutzung.

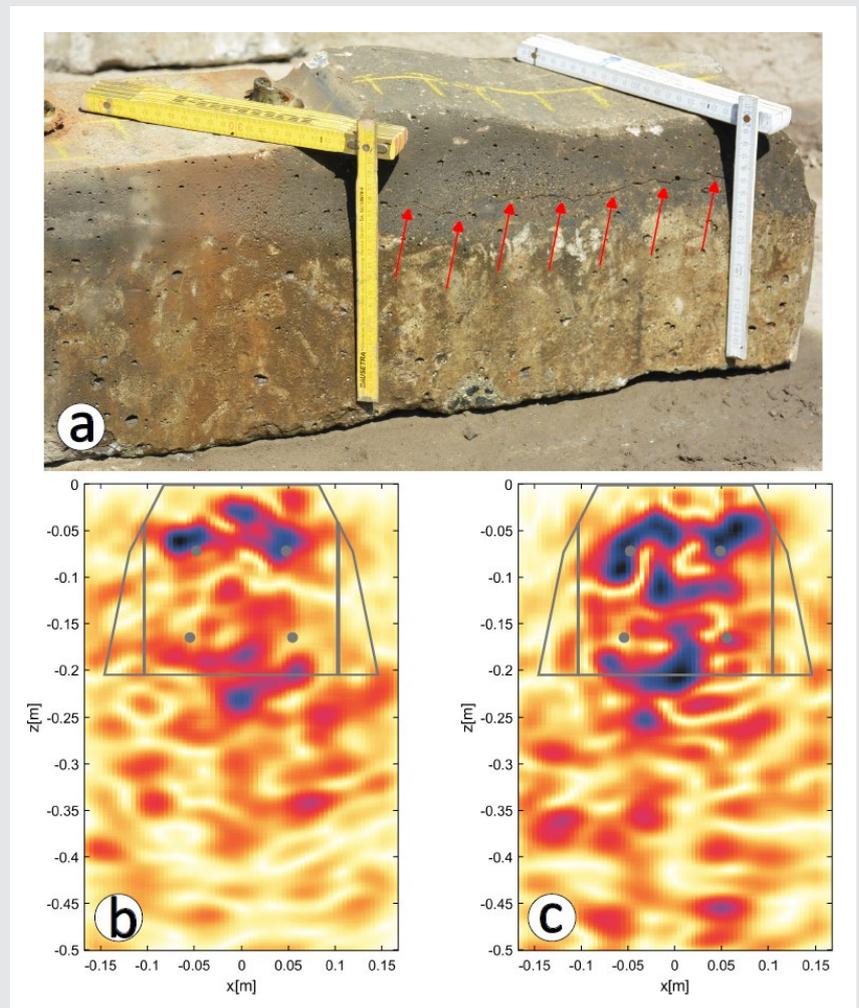
An beiden Schwellen wurden Ultraschallmessungen durchgeführt und die entsprechenden Schallfelder der Querschnitte sind in Bild 4b-d dargestellt. Bei allen drei Querschnitten ist das Rückwandecho klar zu erkennen. Weiterhin bildet sich in Bild 4c das zweite Rückwandecho leicht und in Bild 4d deutlich aus. Die Signalamplitude der Kantenechos ist deutlich geringer als im Referenzfall. Insgesamt ist das Schallfeld in allen Querschnitten unauffällig und der vermutete Schwellenzustand ist gut. Lediglich die Abschwächung des Kantenechos deutet daraufhin, dass die Schwellen schon einer längeren Verwitterung ausgesetzt waren. Verkehrslasten, Frost-Tau-Wechsel, chemische Zersetzung des Zements tragen zur Entstehung von Mikrorissen zwischen Zementmatrix und Zuschlägen bei. Diese führen zu einer stärkeren Dämpfung des Ultraschallsignals und einer Amplitudenabschwächung tieferliegender Echos.

Signalbilder mit Auffälligkeiten

Bild 5a zeigt eine B70-Schwelle mit einem Kopfriss in einem Abstand zur Oberseite von ca. 5 cm bis 7 cm. Auch auf der anderen Schwellenkopfseite war in ähnlicher Tiefe ein äußerer Riss deutlich erkennbar. Vermutlich durchläuft der Riss den gesamten Schwellenkopf. Das gemessene Schallfeld an zwei Querschnitten im Kopfbereich ist in Bild 5b und c gezeigt. In beiden Bildern sind mehrere Signalreflexionen in ca. 3 cm bis 8 cm Tiefe zu erkennen und erstrecken sich über die gesamte Schwellenbreite. Dies ist ein Hinweis darauf, dass ein horizontaler Riss den Schwellenkopf

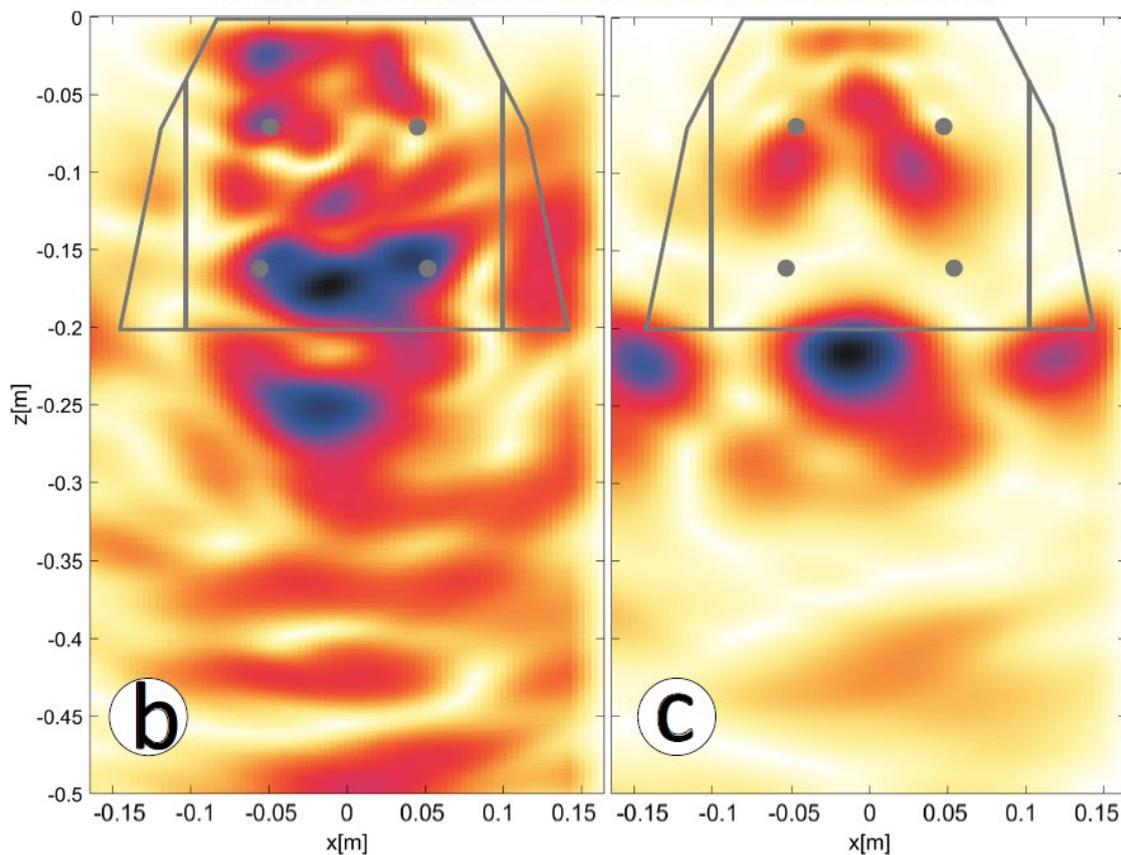


4: Messungen an wiederaufbereiteten B70-Schwellen; a: Foto der beiden untersuchten Schwellen; b und c: Querschnitte der linken Schwelle; d: Querschnitt der rechten Schwelle



5: B70-Schwelle mit Kopfriss; a: Foto mit Rissflanke; b und c: Signalbild vom Schwellenkopf

Homepageveröffentlichung unbefristet genehmigt für Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung / Rechte für einzelne Downloads und Ausdrücke für Besucher der Seiten genehmigt / © DW Media Group GmbH



6: B70-Schwelle mit unterseitiger Abplatzung; a: Foto mit Abplatzung; b: Signalbild 5 cm entfernt von der Außenseite; c: Signalbild 25 cm entfernt von der Außenseite

durchläuft. In der Tiefe der Rückwand werden zwar erhöhte Amplituden gemessen, aber Form und Verteilung entsprechen nicht dem erwarteten Echo von der Schwellenunterseite. Ein Grund liegt in der Reflexion des Impulses im oberen Bereich der Schwelle durch die beschriebenen Gefügestörungen. Auf Basis der

Ultraschallreflexionen ist der vermutete Schwellenzustand „defekt durch Kopfriss“.

Bild 6a zeigt eine B70-Schwelle mit unterseitiger Abplatzung. Das Ultraschallbild mit 5 cm Abstand zur Außenkante in Bild 6b zeigt starke Reflexionen in ca. 16 cm Tiefe auf Höhe der unteren Bewehrung. Weiterhin sind keine Kantenechos zu er-

kennen. Dies stimmt sehr gut mit der tatsächlichen Schwellengeometrie überein. Im oberen Bereich des Ultraschallbildes bei ca. 3 cm bis 7 cm sind weitere Reflexionen zu erkennen. Dies können Einflüsse von der Oberkante sein, da die Messung nur 5 cm Seitenabstand hatte. Bei einem Abstand von 25 cm zur Außenseite ist wieder das

erwartete Rückwand- und Kantenecho von der Schwellenunterseite zu erkennen. Die Reflexionen in Bild 6c in ca. 10 cm Tiefe können nicht direkt zugeordnet werden, lassen aber eine innere Gefügestörung vermuten. Auf Basis der Ultraschallreflexionen ist der vermutete Schwellenzustand „Unterseitige Abplattung im Außenbereich“.

Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Machbarkeitsstudie zeigt, dass das Ultraschallverfahren grundsätzlich geeignet ist, unauffällige von defekten Spannbetonschwellen zu unterscheiden. Schäden wie Kopfrisse und unterseitige Abplattungen, welche bei einer Sichtprüfung im Schotterbett eventuell unentdeckt bleiben, können im Schallfeld der Ultraschallechomessung deutlich erkannt werden. Das Verfahren hat das Potenzial, die Sichtprüfung als objektives Messverfahren für die Untersuchung von äußerlich nicht sichtbaren Defekten zu ergänzen. Weitere Untersuchungen könnten auch den Einsatz zur wiederkehrenden Prüfung über längere Zeiträume rechtfertigen, indem charakteristische Signalbilder für spezifizierte Schwellenzustände an wenigen Messpositionen zum Vergleich mit eigenen Messdaten entwickelt werden. So kann die Zustandsveränderung von Schwellen über den gesamten Lebenszyklus erfasst und bewertet werden. Die Anzahl an untersuchten Schwellen in dieser Machbarkeitsstudie ist gering und nicht repräsentativ für das Schienennetz. Um eine für den erfolgreichen praktischen Einsatz notwendige Aussagesicherheit zu

erzielen, sind weiterführende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten nötig.

Die B70-Schwelle stellt durch ihre Geometrie eine große Herausforderung für die marktüblichen Ultraschallgeräte dar. Sowohl eine gezielte Anpassung der Prüfkopfanzordnung im Messgerät als auch die Integration der Schwellengeometrie als Vorwissen für die Schallfeldauswertung können die Messauflösung und Aussage-sicherheit deutlich steigern. Insgesamt besteht weiterer Forschungsbedarf, um die Wahrscheinlichkeiten für die Detektion der spezifizierten Schadensbilder und auch die Genauigkeit bei der Lokalisierung und quantitativen Beschreibung angeben zu können. Auch eine Automatisierung der Datenaufnahme ist denkbar.

Die Geometrie der Weichenschwelle ist schon deutlich kompatibler mit marktüblicher Messtechnik. Im Weichenbereich ist ein maschinelles Schwellentauschen meist unmöglich. Ein manuelles Tauschen ist mit hohem Arbeitsaufwand und Ausfallzeiten verbunden. Bei manueller Messung beträgt die Messzeit pro Schwelle ca. 5 Minuten. Eine zerstörungsfreie Ermittlung des Schwellenzustandes, um gezielt nur defekte Schwellen auszutauschen, kann bereits heute von hohem ökonomischen Nutzen sein. Hier wäre die Entwicklung einer Prüfanweisung zusammen mit Infrastruktur-eigentümern sinnvoll.

Danksagung

Wir danken Herrn Claus und Michael Schwarzer von der ERDTRANS GmbH für den Zugang und die Unterstützung bei den Schwellenmessungen. ●

Literatur

[1] Gabler, G.; Krumnow, N.: Behandlung von Rissen und Abplattungen bei Spannbetonschwellen. EI – Der Eisenbahningenieur, 9/2022, S. 86-90.
 [2] Hempe, T.; Müller, T.; Srocka, F.: Qualitätsoffensive Betonschwellen. EI – Der Eisenbahningenieur, 6/2017, S. 20-24.
 [3] Haban, F. X.: Theoretische und experimentelle Untersuchungen an Spannbetonschwellen. Doktorarbeit, Technische Universität München, 2016.
 [4] Zoëga, A.; Krause, M.; Kurz, J.; Maack, S.; Küttenbaum, S.; Boßmann, N.: Ultraschalluntersuchungen zur Rissdetektion an Spannbetonschwellen. Messtechnik im Bauwesen, Ernst & Sohn Special 3/2017, S. 20–22.
 [5] Maack, S.; Küttenbaum, S.; Epple, N.; Aligholizadeh, M.: Die Ultraschall-Echomethode - von der Messung zur bautechnischen Kenngröße: Studie zur Leistungsfähigkeit der Messmethode am Referenzmaterial Polyamid und an Beton. Beton- und Stahlbetonbau, 116/2021, S. 1-12.

Summary

For the visualisation of damages in concrete sleepers using non-destructive ultrasonic testing

Prestressed concrete sleepers are exposed to weathering and stress and consequently undergo a continuing condition deterioration. The informative value in assessing the condition can be significantly increased by non-destructive testing methods such as ultrasonic. In this article, the results of the measurements are shown which have been made at different locations in Germany. Head and bead cracks or even spalling on the underside can be detected. Ultrasonic testing can supplement the visual check by information on externally non visible damages. The presentation of the ultrasonic method is followed by the presentation of initial results in order to demonstrate the potential of the method for determining the condition of concrete sleepers.



Natürlich können wir auch Bahnhöfe.

Am Knotenpunkt Duisburg wurden im laufenden Betrieb nicht nur Weichen- und Gleisbauerneuerungen durchgeführt – auch ein provisorischer Bahnsteig für den Fernverkehr war gefragt. Für uns kein Problem. Denn als Teil der Eiffage Infra-Bau SE sind wir bestens in ein Netzwerk von Spezialisten der Baubranche eingebunden. Und können so die unterschiedlichsten Dienstleistungen aus einer Hand anbieten.

Willkommen im Team!

Sie möchten sich beruflich verändern und bei uns einsteigen? Fragen rund um Bewerbung und Karriere beantwortet Ihnen gerne **Frau Stefanie Bertram**, **T +49 2325 9551-0, bewerbungen.er@eiffage.de**

Weitere Infos finden Sie hier:
www.eiffage-infra.de/rail