

# Codawelleninterferometrie zur Detektion von Spannungszuständen in Betonbauteilen

Ernst NIEDERLEITHINGER<sup>1</sup>, Martin HERBRAND<sup>2</sup>, Matthias MÜLLER<sup>3</sup>

<sup>1</sup> BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin

<sup>2</sup> WTM ENGINEERS GmbH, Hamburg

<sup>3</sup> Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Bergisch Gladbach

**Kurzfassung.** Informationen zu in Betonbauteilen stattfindenden Umlagerungsprozessen sowie Druckspannungsverteilungen können mit konventioneller Messtechnik bislang nicht zweifelsfrei beantwortet werden. Ultraschallmessungen mit eingebetteten Sensoren könnten hier eine sinnvolle Ergänzung zur konventionellen Messtechnik sein. Durch Einsatz der Codawelleninterferometrie (CWI) sind hiermit schon sehr kleine Änderungen im Material detektierbar.

Um diese neue Methodik zu evaluieren, wurde das Forschungsprojekt „Querkräfttragfähigkeit von Spannbetonbrücken – Erfassung von Spannungszuständen in den Spannbetonversuchsträgern mit Ultraschallsensoren“ durch die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) initiiert. In diesem Projekt wurden durch die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) Ultraschall-Transducer in mehrere Spannbetonträger des Instituts für Massivbau der RWTH Aachen eingebettet, die anschließend bis zum Bruch belastet wurden.

Der Belastungsversuch an einem der Spannbetondurchlaufträger zeigte das große Potential dieser Methodik. Die im Netzwerk erfassten Änderungen der Ultraschallwellengeschwindigkeit geben die Spannungsverhältnisse im Längsschnitt des Trägers schon bei sehr niedrigen Belastungen qualitativ richtig wieder und zeigen bei hohen Belastungen eine gute Korrelation zum Rissbild. Dabei weisen räumliche Anomalien und Änderungen in der Charakteristik der Geschwindigkeitsänderungen oft schon auf Rissbildung hin, wenn diese noch nicht an der Oberfläche sichtbar ist. Dies zeigt das Potential im Hinblick auf eine Frühwarnung. Hierfür und ebenso in Bezug auf eine Quantifizierung der Effekte ist aber noch Entwicklungsarbeit notwendig. Ein Vorteil der Methodik ist, dass die Transducer nicht direkt am Ort der Änderung platziert werden müssen und einen relativ großen Bereich um die Transducer herum erfassen.

## 1. Einführung

Die Altersstruktur der ca. 39.500 Brückenbauwerke im Bundesfernstraßennetz und die überproportionale Zunahme des Güterverkehrs haben dazu geführt, dass viele dieser Bauwerke bis an die Grenze ihrer Leistungsfähigkeit beansprucht werden [1]. Vor diesem Hintergrund wird derzeit die Tragfähigkeit einer großen Anzahl als prioritär erkannter Brückenbauwerke mit Hilfe einer neu erstellen, einheitlichen Nachrechnungsrichtlinie [2] rechnerisch beurteilt.

Bei der Nachrechnung bestehender Spannbetonbrücken nach [2] kommt es hinsichtlich der Querkräfttragfähigkeit häufig zu rechnerischen Defiziten. Neben anderen Ursachen lässt sich dies auch auf die bisherigen, über Jahrzehnte entwickelten Nachweis-



formate zurückführen, die im Wesentlichen auf Versuchen an einfeldrigen Versuchsträgern hergeleitet wurden. Mit dem Ziel, das Verständnis zum Tragverhalten bestehender Spannbetonbrücken zu erweitern und genauere Bemessungsmodelle für die Nachrechnung abzuleiten, wurden im Rahmen des Forschungsprojekts „Beurteilung der Querkraft- und Torsionstragfähigkeit von Brücken im Bestand – erweiterte Bemessungsansätze“ [3] Belastungsversuche an zweifeldrigen Spannbetonbalken durchgeführt.

Bis zum heutigen Tag sind die im Bauteil stattfindenden Umlagerungsprozesse, die bereits mit Beginn der Mikrorissbildung einsetzen, sowie die Druckspannungsverteilung infolge der Interaktion aus Biegung und Querkraft nicht abschließend erforscht. Ultraschallmessungen mit eingebetteten Sensoren [4] könnten hier zukünftig eine sinnvolle, Ergänzung zur konventionellen Messtechnik sein. Durch Einsatz einer neuartigen Auswertetechnik, der Codawelleninterferometrie (CWI), sind hiermit schon sehr kleine Änderungen im Material detektierbar [5].

Um diese neue Methodik über alle Beanspruchungsbereiche von der Gebrauchslast bis zum Bruch zu untersuchen, wurde das Forschungsprojekt „Querkrafttragfähigkeit von Spannbetonbrücken – Erfassung von Spannungszuständen in den Spannbetonversuchsträgern mit Ultraschallsensoren“ [6] durch die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) initiiert. In diesem Projekt wurden durch die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) Ultraschall-Transducer in mehrere Spannbetonträger des Instituts für Massivbau der RWTH Aachen eingebettet, die anschließend bis zum Bruch belastet wurden. Nachfolgend wird das innovative Monitoringkonzept mit eingebetteten Ultraschall-Transducern vorgestellt und Ergebnisse im Vergleich zu Rissbildern gezeigt. Die Methodik und ein Teil der Ergebnisse wurden in [7] bereits ausführlich vorgestellt.

## **2. Monitoring mit Ultraschall**

### *2.1 Ultraschall-Transmissionsmessungen*

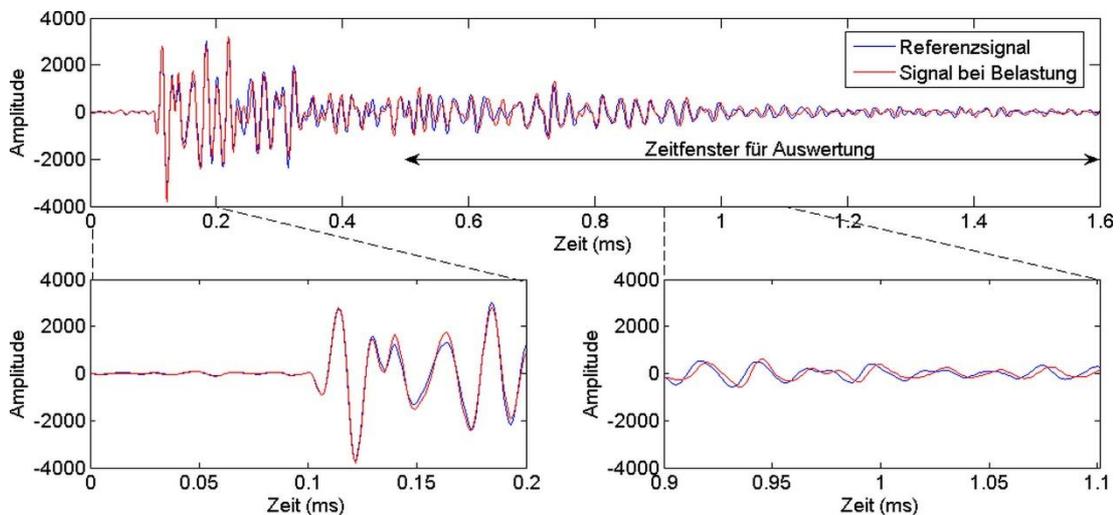
Ultraschall-Transmissionsmessungen werden seit Jahrzehnten erfolgreich zur Prüfung und Qualitätssicherung von Baustoffen und Bauteilen im Bauwesen eingesetzt. Sie sind z. B. in DIN 12504-4 geregelt [8]. Das DGZfP Merkblatt B4 wird demnächst in aktualisierter Form neu veröffentlicht. Wesentlicher Indikator ist die Wellengeschwindigkeit von Kompressionswellen (Longitudinalwellen), vereinzelt werden auch die Geschwindigkeit von Scherwellen oder die Amplituden bzw. deren Dämpfung herangezogen. Ziel ist meist die Bestimmung von Änderungen in der Druckfestigkeit oder die Verfolgung von Schädigungen. Direkte analytische Zusammenhänge zwischen den gemessenen physikalischen Parametern und den gesuchten bautechnischen Werten gibt es nicht. In Versuchen lassen sich jedoch statistisch quantitative, material- und objektspezifische Zusammenhänge finden.

Zu folgenden relevanten Material- und Zustandsgrößen bzw. zu den Änderungen bestehen Zusammenhänge, oft mit Querabhängigkeiten [4]: Zementtyp, Wasser-Zementwert, Zuschlag, Verdichtung, Bewehrung, Porosität, Wassersättigung, Druckfestigkeit, Rissverteilung, Rissgröße, Temperatur, (mechanische) Spannung u. a. m.

Die Verwendung von in das Objekt eingebetteten Ultraschalltransducern hat vor allem bei Messungen an Bauwerken folgende prinzipielle Vorteile: Konstante Ankopplung, Verringerung externer Einflüsse, Sicherheit vor Vandalismus und mögliche Positionierung nahe dem interessierenden Bereich. Ultraschalltransducer können in Bauwerken über Jahrzehnte funktionstüchtig bleiben [8]. An eingebetteten Ultraschalltransducern wird schon seit längerem geforscht [10]. Im Rahmen der hier vorgestellten Untersuchungen wurden die für die BAM proprietär entwickelten Transducern ACS S0807 eingesetzt [4][11].

## 2.2 Codawelleninterferometrie

Die meisten Ultraschall-Transmissionsmessungen beruhen auf Laufzeitmessungen bis zum ersten Eintreffen des Signals (direkte Wellen, „Ersteinsatz“) vom Sender zum Empfänger. Ändert sich etwas in der Struktur oder in den elastischen Eigenschaften des Materials, ändern sich der Wellenweg und/oder die Geschwindigkeit, was sich in einer veränderten Laufzeit bemerkbar macht. Diese Änderung ist aber oft so gering, dass sie nur schwer quantitativ zu messen ist. In späteren Teilen des registrierten Signals, der sogenannten Coda, haben die Wellen aber sehr viel längere Wege zurückgelegt und den interessierenden Bereich durch Reflexion und Streuung mehrfach durchlaufen. Hierdurch sind die Laufzeitunterschiede größer und machen sich in Signalverschiebungen bemerkbar. Der Einflussbereich ist größer und die einzelnen Wellenwege sind nicht zu trennen. Man spricht daher auch von diffusen Wellen (Bild 3 unten).



**Abb.1.** Signale einer Ultraschall-Transmissionsmessung, wiederholt im gleichen Objekt mit gleicher Anordnung ohne (blau) bzw. mit geringer (rot) Belastung. Das später zur Auswertung herangezogene Zeitfenster ist oben markiert.

Abb. 1 zeigt den Einfluss einer kleinen Last auf ein Ultraschall-Transmissionssignal. Die blaue Kurve wurde vor Beginn der Belastung mit einer zentral angeordneten Sender-Empfänger-Kombination in einem der Träger aufgenommen. Die rote Kurve entspricht dem Messsignal bei geringer Belastung. Während sich die Laufzeit der direkten Welle (Einsatzzeit zu Beginn des Signals) nicht messbar verschiebt, zeigt sich im späten Teil, der Coda, eine signifikante Verschiebung.

Diese Unterschiede können mit Hilfe der Codawelleninterferometrie (engl. coda wave interferometry, CWI) erfasst werden. Die Methode erfordert eine Referenzmessung vor der Änderung im Objekt und erfasst nur relative Unterschiede zu diesem Referenzzustand. Die Methode wurde ursprünglich in der Seismologie entwickelt [13][14][15]. Seit kurzem werden zumindest im Labormaßstab auch Messungen an Beton durchgeführt [5].

Die Berechnung der Geschwindigkeitsänderung kann auf unterschiedliche Weise erfolgen. Für diesen Bericht wurde die sogenannte Stretching-Methode eingesetzt [16]. Hierbei wird das Signal mit einem sehr kleinen Faktor gedehnt bzw. gestaucht und anschließend mit dem Referenzsignal verglichen. Die Ähnlichkeit der Signale wird über die Kreuzkorrelation ohne Zeitverschiebung für einen bestimmten Wertebereich berechnet, um den optimalen Wert (größtmöglicher Korrelationskoeffizient) zu finden. Dieser Faktor entspricht der Geschwindigkeitsänderung im Material. Der dabei erzielte Korrelationskoeffizient ist ein Maß dafür, wie gut sich die Signalveränderung durch eine

reine Geschwindigkeitsveränderung erklären lässt. Die Codawelleninterferometrie kann relative Geschwindigkeitsänderungen in der Größenordnung von 0,01 % detektieren [17]. Bei zu großen Änderungen der Signalform, wie sie auch hier auftraten, versagt sie jedoch. Man kann dann zu einem schrittweisen Verfahren übergehen [18].

Die ermittelte Geschwindigkeitsänderung ist ein gewichtetes Mittel für den Volumenbereich um die für die Messung gewählten Transducer. Gewichtungsfunktion und erfasster Volumenbereich sind von dem Abstand der Transducer, der Geometrie des Objekts samt Einbauteilen sowie dem akustischen Streuverhalten des Betons abhängig. Letzteres ist primär bestimmt von Zuschlags- und Porenverteilung. Zur Rekonstruktion flächenhafter oder volumetrischer Verteilungen aus mehreren Einzelmessungen sind in der Forschung Ansätze verfügbar und wurden auch schon an belasteten Betonbauteilen getestet [19], [20], [21], [22]. Die Berechnungen sind jedoch sehr aufwändig und bisher nur für einfache Objektgeometrien anwendbar. Daher werden in dieser Studie die ermittelten Werte jeweils dem Mittelpunkt der Transducerkonfiguration zugeordnet und dazwischen interpoliert.

### 3. Belastungsversuche an Durchlaufträgern

Das Versuchsprogramm am Institut für Massivbau der RWTH Aachen bestand aus insgesamt fünf Querkraftversuchen an Spannbetondurchlaufträgern die aufbauend auf einer zuvor durchgeführten Versuchsserie geplant wurden [24]. Alle Versuchsträger verfügten über eine Gesamtlänge von 12 m und eine Spannweite je Feld von 5,75 m. Die Querschnittshöhe der Träger betrug 80 cm bei einer Stegbreite von 25 cm, wobei die Profilform zwischen Rechteck- und I-Profil variiert wurde. Abb. 2 zeigt DLT 1.3 als Beispiel. Die Träger wurden durch jeweils zwei parabelförmige Spannglieder im nachträglichen Verbund vorgespannt. Die ersten drei Versuche (DLT 1.1 bis 1.3) wurden mit einer Einzellast je Feld belastet. Zwei weitere Versuchsträger (DLT 1.4 und 1.5) wurden mit einer Streckenlast belastet. In die verschiedenen Träger wurden jeweils 8 bis 20 Ultraschalltransducer montiert. Die Anordnung für den Träger DLT 1.3 ist in Abb. 3 dargestellt.

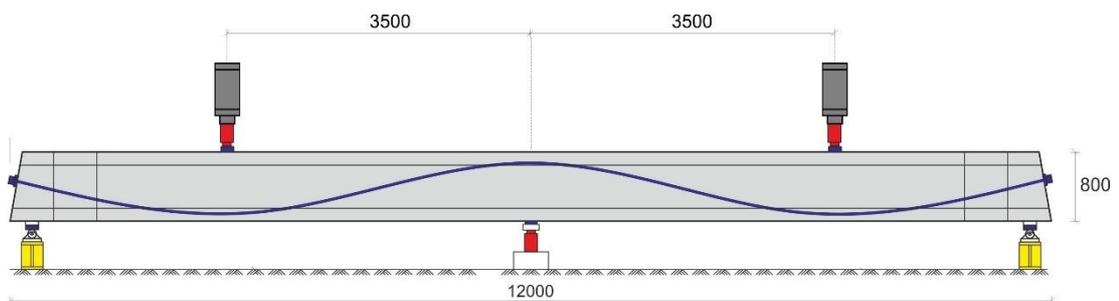


Abb. 2. Aufbau des Belastungsversuchs an Träger DLT 1.3

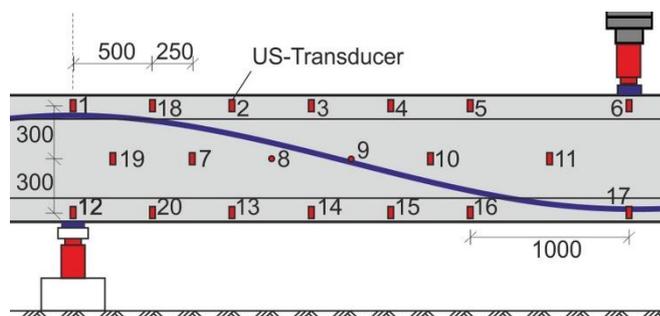
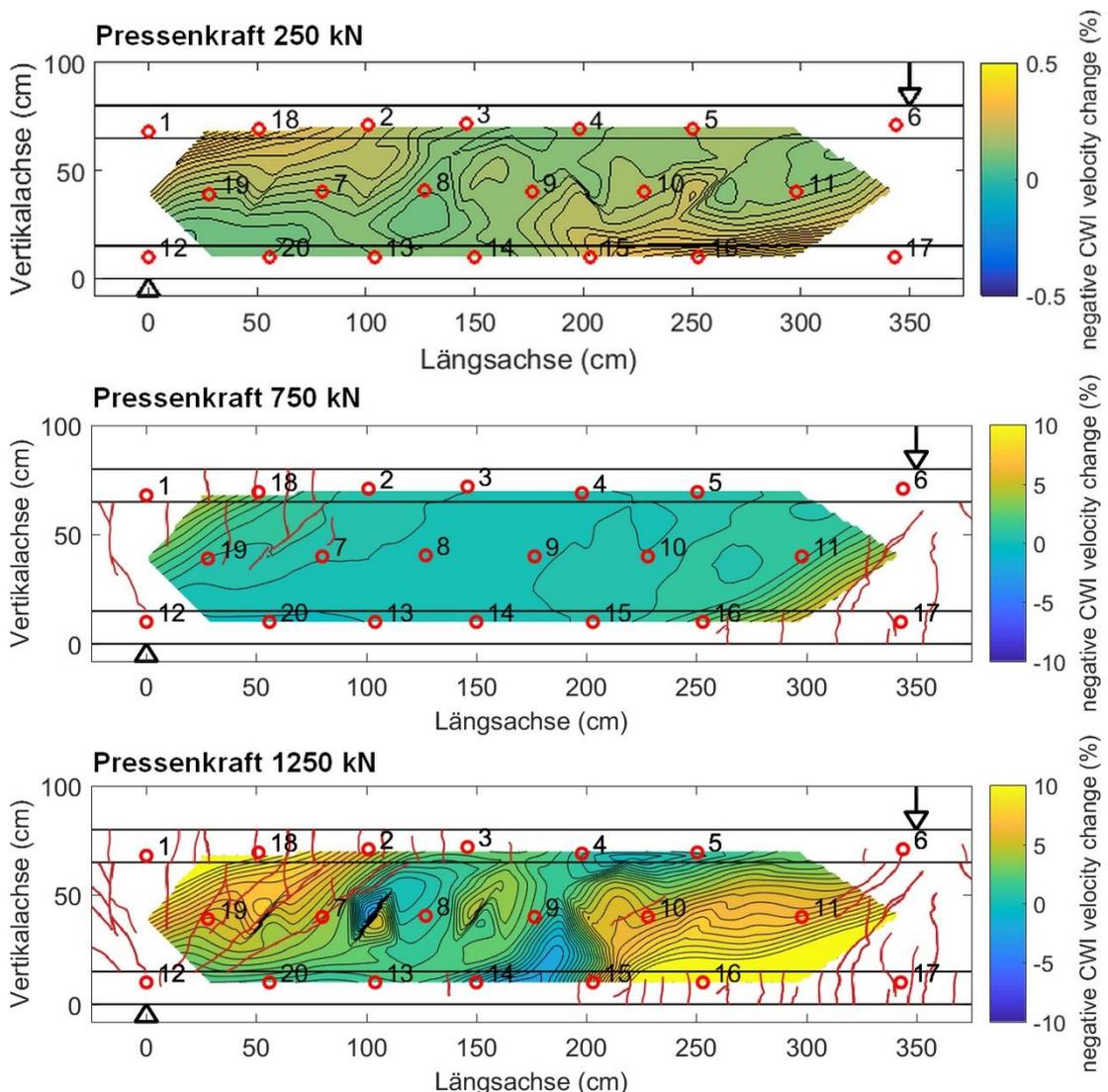


Abb. 3. Ausschnitt aus Abb. 2 mit Position der Ultraschall-Transducer

## 4. Messergebnisse

### 4.1 Träger DLT 1.3

Die Geschwindigkeitsänderungen wurden dem Mittelpunkt des jeweiligen Transducerpaares zugeordnet und zu Vertikalschnitten für verschiedene Versuchszeitpunkte interpoliert. Abb. 4 zeigt einige dieser Vertikalschnitte im Vergleich mit dem jeweiligen manuell aufgenommenen Rissbild. Oben ist die Änderung der Ultraschallwellengeschwindigkeit bei einer niedrigen Belastung (250 kN) vor visuell sichtbarer Rissbildung dargestellt. Das Vorzeichen in Konsistenz zu früheren Publikationen umgekehrt. Gelbe Farben zeigen daher eine Geschwindigkeitsabnahme, blaue Farben eine Zunahme. Die Geschwindigkeitsänderungen sind gering (einige %), aber signifikant. Die stärkste Abnahme zeigt sich rechts (im Feldbereich des Trägers) unten und links (im Stützbereich des Trägers) oben, also in Bereichen, in denen große Biegezugbeanspruchungen auftreten. In Bereichen, die primär einer Kompression unterliegen, erfolgt eine leichte Geschwindigkeitszunahme.



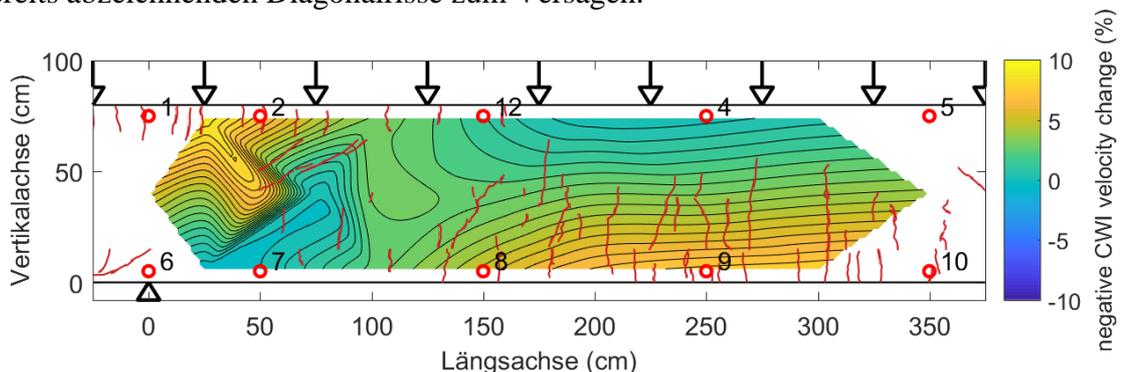
**Abb. 4.** Träger DLT 1.3: Verteilung der Änderung der Ultraschallwellengeschwindigkeit im Vertikalschnitt längs der Trägerachse bei Pressenkraft 250 kN (oben), 750 kN (mittig) und 1250 kN (unten). Farbcode zwischen oberem und mittlerem Bild geändert. Lager- und Pressenposition durch Dreieck bzw. Pfeil markiert. Rote Linien: Rissbild.

Bei höherer Belastung (750 kN, Abb. 4 Mitte) verstärkt sich dieser Trend. Die Geschwindigkeitsänderungen liegen um den Faktor 10 höher, so dass ein anderer Farbcode zur Darstellung verwendet werden musste. Das Rissbild korreliert mit dem Ultraschallbild - Risse treten im Wesentlichen in den Zonen höherer Geschwindigkeitsabnahme auf. Bei Betrachtung des Rissbildes ist zu beachten, dass im rot umrandeten Bereich aufgrund eines Farbauftrages für Verformungsmessungen nach der Methode der Bildkorrelation keine Risse aufgenommen werden konnten.

Bei noch höherer Last (1250 kN, Abb. 4 unten) verstärkt sich die Geschwindigkeitsabnahme ebenso wie die Rissbildung. Auch hier ist der geometrische Zusammenhang evident. Zusätzlich zeigen sich in Trägermitte (z. B. zwischen Transducer 7 und 8 sowie 8 und 9) engräumige Anomalien. Diese entstehen, da die Messungen mit unterschiedlich ausgerichteten Transducerpaaren unterschiedliche Werte ergeben (8-9: geringe Geschwindigkeitszunahme, 3-14: deutliche Geschwindigkeitsabnahme). Dies weist auf Rissentstehungsprozesse in überwiegend horizontaler Richtung hin, die eine Schallausbreitung vor allem in vertikaler Richtung behindern. Sichtbar wird eine Rissbildung an der Oberfläche hier aber erst bei weiter erhöhter Belastung.

#### 4.2 Träger DLT 1.5

Zwei der Träger wurden nicht mit Punktlasten sondern mit Linienlasten beaufschlagt. Dies erfolgte durch eine Kette von Druckzylindern. Dabei ergibt sich eine andere Spannungs- und Rissverteilung. Abb. 5 zeigt das Ergebnis für den lediglich mit 10 Ultraschalltransducern bestücktem Träger DLT 1.5 bei einer Last von 170 kN, bei der schon deutliche Risse im Träger erkennbar sind. Entsprechend den Erwartungen zeigt sich hier in der Druckzone oben rechts eine gleichmäßige Geschwindigkeitszunahme und gegenüber (unten) eine gleichmäßige Geschwindigkeitsabnahme. Nahe dem Lager (unten links) zeigt sich zwischen den Transducern 1/2/6/7 eine starke Anomalie. In dieser Zone kommt es später entlang der sich bereits abzeichnenden Diagonalrisse zum Versagen.



**Abb. 5. Träger DLT 1.5:** Verteilung der Änderung der Ultraschallwellengeschwindigkeit im Vertikalschnitt längs der Trägerachse bei Pressenkraft 170 kN (Flächenlast). Lager- und Pressenposition durch Dreieck bzw. Pfeil markiert. Rote Linien: Rissbild.

Festzuhalten ist die auch hier sehr gute Korrelation zum Rissbild. Auch mit halbiertes Transducerzahl ließen sich die Spannungsverhältnisse gut abbilden.

### 5. Diskussion

Die Ergebnisse der Messungen von Änderungen der Wellengeschwindigkeiten mit eingebetteten Ultraschalltransducern und der Codawelleninterferometrie bestätigen grundsätzlich die Ergebnisse anderer Studien, z. B. Labormessungen bei geringer Belastung

[17]. Hierbei wurde stets eine Geschwindigkeitszunahme bei Kompression und eine Abnahme bei Dehnung festgestellt. Auch die zunehmende Nichtlinearität bei höherer Belastung bis hin zum Versagen wird durch andere Autoren bestätigt (z. B. [18]). Die Sensitivität bei sehr niedrigen Lasten zeigt sich in den hier präsentierten Versuchen ebenso wie die Robustheit der Berechnung mit schrittweiser Referenz (ebenso [17][18]).

Für die flächenhaften Darstellungen wurde in dem hier vorgestellten Projekt ein vereinfachtes Verfahren entwickelt, das anders als aufwändigere, tomographische 3D-Methoden (z. B. [20]) bei beliebigen Objektgeometrien anwendbar ist. Dieses zeigt bei geringen Belastungen ähnliche Ergebnisse wie Technikumsversuche mit der Tomographie (z. B. [21]) und erzeugt erst bei sehr hoher Belastung Artefakte. Diese können aber als Indikation für Rissentstehungsprozesse dienen.

## 6. Zusammenfassung und Ausblick

Die Verfolgung eines Belastungsversuchs an einem Spannbetondurchlaufträger mit eingebetteten Ultraschalltransducern und Auswertung mit Codawelleninterferometrie zeigten das große Potential dieser Methodik. Die im Netzwerk erfassten Änderungen der Ultraschallwellengeschwindigkeit geben die Spannungsverhältnisse im Längsschnitt des Trägers schon bei sehr niedrigen Belastungen qualitativ richtig wieder und zeigen bei hohen Belastungen eine gute Korrelation zum Rissbild. Dabei weisen räumliche Anomalien und Änderungen in der Charakteristik der Geschwindigkeitsänderungen oft schon auf Rissbildung hin, wenn diese noch nicht an der Oberfläche sichtbar ist. Dies zeigt das Potential im Hinblick auf eine Frühwarnung. Hierfür und ebenso in Bezug auf eine Quantifizierung der Effekte ist aber noch Entwicklungsarbeit notwendig.

Die diesem Artikel zugrundeliegenden Arbeiten wurden von der Bundesanstalt für Straßenwesen unter dem Aktenzeichen FE 89.312/2015/ finanziert.

## Referenzen

- [1] Marzahn, G.: Die Tragfähigkeitsreserven vieler älterer Brücken sind weitestgehend aufgebraucht. Zur Weiterentwicklung der Nachrechnungsrichtlinie für die Entscheidung über Verstärkung oder Ersatz. In: Der Prüfenieur 42 (5/2013), S. 20–29.
- [2] Nachrechnungsrichtlinie: Richtlinie zur Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand (Nachrechnungsrichtlinie) Ausgabe 05/2011. BMVBS, 2011.
- [3] Hegger, J. et al.: Beurteilung der Querkraft und der Torsionstragfähigkeit von Brücken im Bestand – erweiterte Bemessungsansätze. BAST Verbundforschungsprojekt FE 15.0591/2012/FRB, Zwischenbericht, 2016.
- [4] Niederleithinger, E.; Wolf, J.; Mielentz, F.; Wiggenhauser, H.; Pirskawetz, S.: Embedded Ultrasonic Transducers for Active and Passive Concrete Monitoring. Sensors 15, no. 5 (May 2015): 9756–72. doi:10.3390/s150509756.
- [5] Planès, T.; E. Larose.: A Review of Ultrasonic Coda Wave Interferometry in Concrete. Cement and Concrete Research 53 (November 2013): 248–55. doi:10.1016/j.cemconres.2013.07.009.
- [6] Niederleithinger, E., et al.: Querkrafttragfähigkeit von Spannbetonbrücken - Erfassung von Spannungszuständen in Spannbetonversuchsträgern mit Ultraschallsensoren. 2. Zwischenbericht zum BAST-Forschungsvorhaben FE89.0312/2015, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Vorhaben 8274, 2017.
- [7] Niederleithinger, E., Herbrand, M., Müller, M.: Monitoring von Querkraftversuchen an Spannbetondurchlaufträgern mit Ultraschall und Codawelleninterferometrie. Bauingenieur 11-2017, Seite 474-481
- [8] DIN EN 12504-4:2004: Prüfung von Beton in Bauwerken-Teil 4: Bestimmung Der Ultraschallgeschwindigkeit.
- [9] Niederleithinger, E.; Krompholz, R.; Müller, S.; Lautenschläger, R.; Kittler, J.: 36 Jahre Talsperre Eibenstock – 36 Jahre Überwachung des Betonzustands Durch Ultraschall. In: 38. Dresdner

Wasserbaukolloquium 2015 „Messen Und Überwachen Im Wasserbau Und Am Gewässer“, Dresden, 2015.

- [10] Song, G.; Gu, H.; Mo, Y.-L.: Smart Aggregates: Multi-Functional Sensors for Concrete Structures—a Tutorial and a Review. *Smart Materials and Structures* 17 (2008), No. 3: 033001. doi:10.1088/0964-1726/17/3/033001.
- [11] Wolf, J.; Niederleithinger, E.; Mielentz, F.; Grothe, S.; Wiggenhauser, H.: Überwachung von Betonkonstruktionen mit eingebetteten Ultraschallsensoren. *Bautechnik* 91 (2014), Heft 11, S. 783–96, doi:10.1002/bate.201400073.
- [12] Niederleithinger, E.; Wolf, J.; Mielentz, F.; Wiggenhauser, H.; Pirskawetz, S.: “Embedded Ultrasonic Transducers for Active and Passive Concrete Monitoring.” *Sensors* 15, no. 5 (May 2015): 9756–72. doi:10.3390/s150509756.
- [13] Snieder, R.: Coda Wave Interferometry and the Equilibration of Energy in Elastic Media. *Physical Review E* 66, no. 4 (October 2002). doi:10.1103/PhysRevE.66.046615.
- [14] Snieder, R.: The Theory of Coda Wave Interferometry. *Pure and Applied Geophysics* 163, no. 2–3 (February 2006): 455–73. doi:10.1007/s00024-005-0026-6.
- [15] Grêt, A.; Snieder, R.; Scales, J.: Time-Lapse Monitoring of Rock Properties with Coda Wave Interferometry. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 111, no. B3 (March 2006): n/a-n/a. doi:10.1029/2004JB003354.
- [16] Sens-Schönfelder, C.; Wegler, U.: Passive Image Interferometry and Seasonal Variations of Seismic Velocities at Merapi Volcano, Indonesia. *Geophysical Research Letters* 33, no. 21 (November 1, 2006). doi:10.1029/2006GL027797.
- [17] Larose, E.; Hall, S.: Monitoring Stress Related Velocity Variation in Concrete with a  $2 \cdot 10^{-5}$  Relative Resolution Using Diffuse Ultrasound. *J. Acoust. Soc. Am.* 125 (2009): 1853–57. doi:10.1121/1.3079771.
- [18] Shokouhi, P.; Niederleithinger, E.; Zoëga, A.; Barner, A.; Schöne, D.: Using Ultrasonic Coda Wave Interferometry for Monitoring Stress-Induced Changes in Concrete. In *23rd SAGEEP Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (Proceedings)*, 650–54. Keystone, Colorado, USA: Environmental and Engineering Geophysical Society, 2010.
- [19] Pacheco, C.; Snieder, R.: Time-Lapse Travel Time Change of Multiply Scattered Acoustic Waves. *The Journal of the Acoustical Society of America* 118, no. 3 (2005): 1300. doi:10.1121/1.2000827.
- [20] Planes, T.; Rosseto, V.; Larose, E.; Margerin, L.: “Locating a Small Change in a Multiple Scattering Environment (LOCADIF): Application to Monitoring Concrete.” *The Journal of the Acoustical Society of America* 128, no. 4 (2010): 2375. doi:10.1121/1.3508438.
- [21] Niederleithinger, E.; Sens-Schönfelder, C.; Grothe, S.; Wiggenhauser, H.: Coda Wave Interferometry Used to Localize Compressional Load Effects on a Concrete Specimen. In *Proceedings of 7th European Workshop on Structural Health Monitoring (EWSHM)*. Nantes, France, 2014.
- [22] Zhang, Y.; Planès, T.; Larose, E.; Obermann, A.; Rospars, C.; Moreau, G.: Diffuse Ultrasound Monitoring of Stress and Damage Development on a 15-Ton Concrete Beam. *The Journal of the Acoustical Society of America* 139, no. 4 (April 2016): 1691–1701. doi:10.1121/1.4945097.
- [23] Payan, C.; Garnier, V.; Moysan, J.: Potential of Nonlinear Ultrasonic Indicators for Nondestructive Testing of Concrete. *Advances in Civil Engineering* 2010 (2010): 1–8. doi:10.1155/2010/238472.
- [24] Herbrand, M.; Classen, M.: Shear Tests on Continuous Prestressed Concrete Beams with External Prestressing. *Structural Concrete* Vol. 16 (2015), Iss. 3, S. 428-437.
- [25] Herbrand, M.; Classen, M.; Adam, V.: Querkraftversuche an Durchlaufträgern aus Spannbeton mit Rechteck- und I-Querschnitt. *Bauingenieur* 92 (2017), Heft 11.