

Scannendes Prüfgerät zur Detektion von Delaminationen in Betonfahrbahndecken

FA 8.238

Forschungsstellen: Technische Universität München, Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung (Prof. Dr.-Ing. habil. C. Große)

Technische Universität München, Lehrstuhl und Prüfamts für Verkehrswegebau (Prof. Dr.-Ing. S. Freudenstein)

Bearbeiter: Eger, M. / Freudenstein, S. / Groschup, R. / Große, C.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Bonn

Abschluss: November 2017

1 Aufgabenstellung

In Betonbauweise erstellte Bundesautobahnen (ca. 30 % des Autobahnnetzes) sind zum Teil von Schadensbildern betroffen, welche die Restlebensdauer der Fahrbahnen entscheidend herabsetzen. Zu solchen Schädigungen zählen Delaminationsstörungen und horizontale Risse im Inneren der Fahrbahndecke. Diese Schädigungen können ohne jegliche, auf der Oberfläche erkennbare, Anzeichen auftreten.

Um messtechnisch begründete Informationen über die strukturelle Substanz von Betonfahrbahndecken zu erhalten, die über stichprobenhafte Messungen hinausgehen, sind zerstörungsfreie Prüfverfahren notwendig, die sich in scannender Betriebsweise und somit zeit- und kosteneffizient anwenden lassen. Die Verfügbarkeit von scannenden Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung von Beton und Stahlbeton beschränkt sich aktuell hauptsächlich auf Verfahren mit elektrischen, magnetischen beziehungsweise elektromagnetischen Messprinzipien (zum Beispiel Wirbelstromverfahren zur Bewehrungsdetektion, Impulsradar und Potenzialfeldmessung mit Radelektroden). Scannende Anwendungen auf Basis von anderen Messprinzipien beruhen oft auf einem Stop-and-Go-Betrieb und sind deshalb messtechnisch aufwendig, da zum Beispiel Scannerrahmen installiert oder Prüfköpfe wiederholt angekoppelt werden müssen.

Innen liegende Risse mit geringen Öffnungsweiten in Betonkörpern können aufgrund von Beschränkungen im Auflösungsvermögen in der Regel nicht mit elektromagnetischen Verfahren abgebildet werden. Solche Schadensbilder können dagegen gut mit elastischen Wellen, die direkt mit der Schädigung wechselwirken, erfasst werden. Die Ultraschalltechnik beruht auf elastischen Wellen und ist damit prinzipiell sehr gut zur Abbildung von Rissen geeignet. Sie ist jedoch nur sehr aufwendig in scannender Weise einsetzbar. Deshalb beschränkt sich die Anwendung dieses Verfahrens in der Praxis oft auf ausgewählte Bereiche. Eine Extrapolation der lokalen Befunde auf nicht direkt durch die Messung erfasste Bereiche ist in der Regel nicht möglich.

Ziel dieses Forschungsvorhabens ist deshalb die Entwicklung und Erprobung eines Messprinzips einschließlich der Umsetzung in einen Funktionsprototyp, der scannende Messungen auf Betonfahrbahnen ermöglicht, um Bereiche mit horizontalen Rissen und Delaminationen zu identifizieren. Mithilfe der Mess-

ergebnisse sollen Bereiche eingegrenzt werden können, in denen kritische Schädigungen vorliegen.

2 Untersuchungsmethodik

Zunächst wurden im Rahmen einer Literaturstudie verschiedene zerstörungsfreie Verfahren im Hinblick auf deren Eignung zur Abbildung von im Forschungsvorhaben relevanten Schäden (das heißt horizontale Risse mit geringen Öffnungsweiten) und auf deren Automatisierbarkeit bewertet. Insbesondere floss die Tauglichkeit zum Betrieb in kontinuierlicher Bewegung in die Bewertung mit ein. Ausgehend von der Bewertung des Potenzials bestehender Verfahren wurde eine Weiterentwicklung des Impakt-Echo-Verfahrens angestrebt. Das Impakt-Echo-Verfahren nutzt wie das Ultraschallverfahren elastische Wellen, bietet aber aufgrund der zugrunde liegenden physikalischen Prinzipien großes Potenzial, um ein Messgerät zur Anwendung in kontinuierlicher Messfahrt von einer bewegten Plattform aus zu erstellen.

Vor der eigentlichen Implementierung eines Messsystems wurde durch numerische Simulationen verifiziert, dass das gewählte physikalische Messprinzip sensitiv auf relevante Schadensbilder reagiert. Wichtigstes Ergebnis der Simulationen war dabei eine Abschätzung zu erwartender Messeffekte und -frequenzen bei relevanten Schadensbildern und Ausdehnungen der Schäden. Delaminierte Bereiche können durch Impaktanregung zu flexuralen Schwingungen angeregt werden, wodurch Luftschall im hörbaren Frequenzbereich entsteht.

Schließlich wurde ein Prototyp auf Basis des luftgekoppelten Impakt-Echo-Messprinzips erstellt und iterativ während des Projektverlaufs erweitert und optimiert. Um das Gerät zu testen, wurde es auf verschiedenen Probekörpern (künstlich hergestellte Probekörper und Ausbaustücke aus Betonfahrbahndecken) und auf realen Autobahnen eingesetzt.

Die Fahrbahndecken, an denen Testmessungen durchgeführt werden konnten, wiesen zum Teil Schäden in Form horizontaler Risse im Bereich der Querscheinfugen auf. Bei einigen dieser Schäden war die Ursache der Schäden unbekannt, bei anderen wiederum war aus Voruntersuchungen bekannt, dass die Risse aufgrund von AKR (Alkali-Kieselsäure-Reaktion) entstanden.

Die Anzeigen des Messgeräts wurden, wo immer dies möglich war, mit Referenzmessungen durch Ultraschall-Puls-Echo oder mit Bohrkernbeprobungen verglichen. Aufbauend auf den Ergebnissen der Testmessungen wurden die Verfahren zur Auswertung und Bewertung der gewonnenen Impakt-Echo-Rohdaten optimiert.

3 Untersuchungsergebnisse

Der erstellte Prototyp beruht auf dem Impakt-Echo-Verfahren mit luftgekoppelter Signalaufzeichnung. Als Sensorelement wurde ein Mikrofonarray bestehend aus 35 MEMS (Micro Electro Mechanical System)-Mikrofonen eingesetzt. Die gewählte Anordnung hat den Vorteil einer ausgeprägten Richtcharakteristik. Somit können bei Einsatz auf einem scannenden Prüfgerät Störgeräusche vom Umgebungslärm beziehungsweise vom Messgerät selbst wirkungsvoll unterdrückt werden. Die größte

Empfindlichkeit entsteht für Schallsignale, die von der Betonoberfläche abgestrahlt werden. Hinsichtlich der Richtcharakteristik ist zu beachten, dass diese erst ab ca. 2 000 Hz deutlich ausgeprägt ist. Zur Impaktanregung wurde ein Impaktormodul auf Basis eines Doppelhubmagneten mit elektronischer Ansteuerung entwickelt. Der gesamte Prototyp ist modular konzipiert, das heißt, es kann eine variable Anzahl an Impaktoren um ein Sensorarray angeordnet werden. Ebenso kann eine variable Anzahl an Sensorarrays parallel betrieben werden. In der hier erstellten finalen Ausbaustufe des Geräts können bis zu drei Sensorarrays mit jeweils drei Impaktoren zeitgleich betrieben werden. Damit ist mit einmaliger Überfahrt über einen zu untersuchenden Streckenabschnitt die simultane Aufzeichnung von drei Messspuren möglich.

Beim Impakt-Echo-Verfahren werden die aufgezeichneten Rohdaten vom Zeit- in den Frequenzbereich transformiert. Eigenschaften der Signalspektren können mit Eigenschaften (zum Beispiel Dicke, Rissbildungen) der Fahrbahndecke korreliert werden. Horizontal delaminierte Bereiche werden durch die Impaktanregung zu Biegeschwingungen angeregt, die wiederum Luftschallsignale abstrahlen, welche durch die Sensorik im Prototyp registriert wird.

Aus den Testmessungen und aus Befunden der numerischen Simulationen wurden Kriterien zur Dateninterpretation abgeleitet. Ist eine eindeutige Dickenresonanz identifizierbar, das heißt, wird ein einzelnes Frequenzmaximum angezeigt, das mit der Dicke der Betondecke korreliert, so kann die Platte als unbeschädigt angesehen werden. Bei bekannter P-Wellengeschwindigkeit des vorliegenden Betons ist so eine Dickenbestimmung möglich.

Im Fugenbereich ist eine Abschwächung der Dickenresonanz zu erwarten. Je flacher die Kerbschnitttiefe, desto geringer ist dieser Effekt. Eine Querscheinfuge kann aufgrund von Geometrieeffekten (Überlagerung von Oberflächenwellen, mit Körperschallwellen) eine Verschiebung der Dickenresonanz im Fugenbereich zu tieferen Frequenzen hervorrufen. Frequenzanzeigen mit hoher Amplitude und mit deutlich geringerer Frequenz als der Dickenresonanz können als flexurale Vibrationen delaminierter Bereiche interpretiert werden. Bei kurzen Delaminationen (< 5 cm) und dicken Platten (> 30 cm) kann es zu Überlagerungseffekten von Dickenresonanz und flexuralen Moden kommen. Reststeifigkeit, Delaminationstiefe und Größe des delaminierten Bereichs beeinflussen die gemessene Frequenz. Eine direkte Tiefenbestimmung einer Delamination ist deswegen nicht möglich. Risse im Fugenbereich bewirken neben der Entstehung einer flexuralen Vibrationsmode oft eine graduelle Verringerung der Dickenresonanzfrequenz und Abschwächung ihrer Amplitude in einem größeren Bereich um die Fuge.

4 Folgerungen für die Praxis

Im Rahmen des bearbeiteten Forschungsvorhabens wurde ein Prototyp eines scannenden Prüfsystems zur Anwendung an Fahrbahndecken aus Beton erstellt. Mit dem hier entwickelten System steht erstmals ein feldtaugliches Gerät zur Verfügung, welches auf Basis eines akustischen Messprinzips kleinräumige Rissbildungen und Delaminationsstörungen in scannender

Weise qualitativ abbilden kann. Somit konnte eine wesentliche Verbesserung bestehender Prüftechnik erreicht werden.

Aufgrund des physikalischen Messprinzips sind für den Praxiseinsatz gewisse Einschränkungen zu beachten. Bei Vorliegen mehrerer horizontaler Rissebenen trägt nur die oberste Rissebene zum Messeffekt bei. Das heißt, das Verfahren kann bei Detektion einer Rissbildung keine Aussage darüber liefern, ob unter einem detektierten Riss noch weitere Rissebenen vorliegen. Außerdem ergibt sich durch die kombinierten Effekte von verwendeten Wellenlängen, Ausdehnung des verwendeten Sensorarrays und des gesamten Prüfaufbaus eine Auflösungsgrenze in Bezug auf die kleinste abbildbare räumliche Ausdehnung einer Rissbildung. Diese Auflösungsgrenze kann zum gegenwärtigen Stand der Arbeiten noch nicht abschließend absolut angegeben werden und sollte weiter systematisch untersucht werden.

Auch wenn ein flächendeckender Einsatz aufgrund von Limitationen durch die maximale Scangeschwindigkeit noch nicht möglich ist, kann das System ökonomisch sinnvoll zur Bewertung des substanziellen Zustands von Fahrbahndecken aus Beton eingesetzt werden. Hierzu wäre zum Beispiel die Prüfung ausgewählter Fugenbereiche in Autobahnabschnitten gleicher Bauart zu empfehlen, um repräsentative Aussagen über den Bauwerkszustand zu gewinnen.

Darüber hinaus sollte geprüft werden, inwiefern das entwickelte Messprinzip mit Modifikationen auch an anderen Strukturen (zum Beispiel Brücken, Fahrbahnen in Asphaltbauweisen, Tunnelschalen, Start- und Landebahnen) zur Anwendung kommen kann. Die Entwicklungsarbeiten sollten mit Fokus auf Automatisierung, Steigerung der Robustheit und Messgeschwindigkeit fortgesetzt werden.