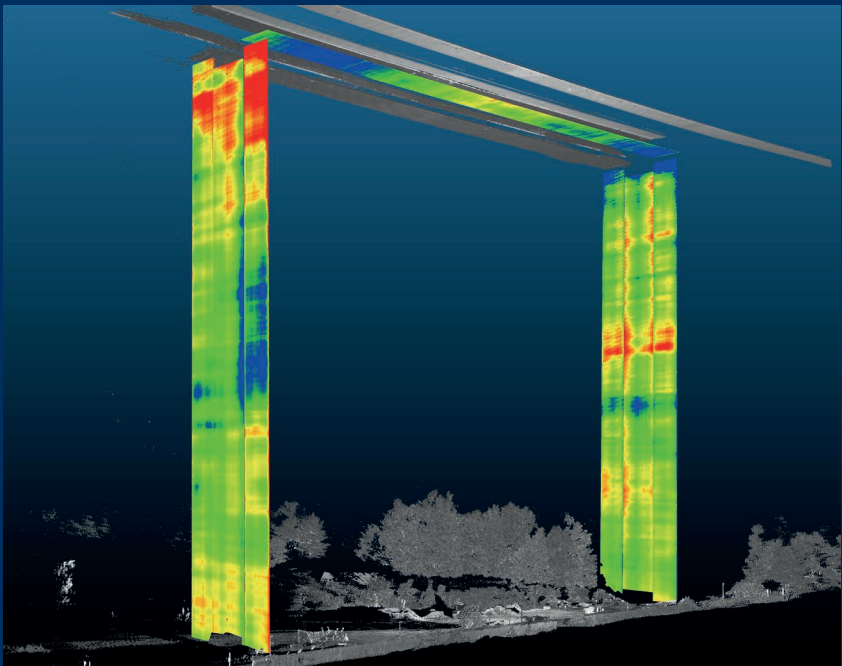




**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

FAKULTÄT BAUINGENIEURWESEN

Schriftenreihe
Konstruktiver Ingenieurbau Dresden
Heft 55



Manfred Curbach, Steffen Marx,
Silke Scheerer, Torsten Hampel (Hrsg.)

**11. SYMPOSIUM
EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN
VON BAUKONSTRUKTIONEN**

08. März 2021



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

FAKULTÄT BAUINGENIEURWESEN

Manfred Curbach, Steffen Marx,
Silke Scheerer, Torsten Hampel (Hrsg.)

**11. SYMPOSIUM
EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN
VON BAUKONSTRUKTIONEN**

08. März 2021

Schriftenreihe
Konstruktiver Ingenieurbau Dresden
Heft 55

Herausgeber der Reihe:

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach
Prof. Dr.-Ing. Peer Haller
Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Häußler-Combe
Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Kaliske
Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx
Prof. Dr.-Ing. Richard Stroetmann

Institut für Massivbau
Technische Universität Dresden
D - 01062 Dresden

Tel. +49 351 463-3 65 68
Fax +49 351 463-3 72 89

© 2021 Technische Universität Dresden

Alle Rechte vorbehalten. Nachdruck, auch auszugsweise, nur mit schriftlicher Genehmigung der Herausgeber. Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichnungen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie als solche nicht eigens markiert sind. Für die Inhalte sind die Autor*innen verantwortlich.

Herausgeber: Manfred Curbach, Steffen Marx, Silke Scheerer, Torsten Hampel
Redaktion: Silke Scheerer
Layout: Stefan Gröschel und Silke Scheerer
Korrekturen: Silke Scheerer, Sabine Wellner und Theresa Fritsche
Anzeigen: Sabine Wellner
Umschlag und Druckvorbereitung: Stefan Gröschel

Titelbild: 3D-Punktwolke des fünften Feldes der Siegtalbrücke; zur Veranschaulichung wurden bereichsweise unterschiedliche Einfärbungen verwendet: Intensitätswerte (Graustufendarstellung) und Ebenheitsabweichungen (Regenbogendarstellung) | © Dr.-Ing. Florian Schill, Fachgebiet Geodätische Messsysteme und Sensorik, TU Darmstadt Institut für Geodäsie

Der Tagungsband ist open access auf der Homepage des Instituts für Massivbau der TU Dresden verfügbar: <https://tu-dresden.de/bu/bauingenieurwesen/imb>.

Druck: addprint AG · Am Spitzberg 8a · 01728 Bannewitz

Veröffentlicht: Dresden, März 2021

ISSN 1613-6934
ISBN 978-3-86780-665-7

Inhalt

Grußwort	5
Torsten Hampel, Sabine Wellner und Silke Scheerer	
Experimentelle Untersuchung von Balkenreihentragwerken	8
Oliver Steinbock, Olaf Mertzsch und Sabine Wellner	
Experimentell gestützte Nachweise von Eisenbahn-Stampfbetonbrücken	20
Marc Gutermann und Werner Malgut	
Berührungslose Überwachung von Brücken mit großer Stützweite	32
Florian Schill und Gregor Schacht	
Ultraschalluntersuchung von Baukonstruktionen	46
Sebastian Schulze	
Monitoring von Kräften und signifikanten Bauwerksparametern in einer Stahlbetonbrücke zur Analyse von Schädigungsprozessen	54
Jens Kühnapfel, Gunter Hahn, Markus Fischer und Stefan Mortag	
Structural Health Monitoring der Maintalbrücke Gemünden zur Unterstützung einer prädiktiven Instandhaltung	66
Ralf Herrmann, Ronald Schneider, Patrick Simon, Falk Hille, Samir Said und Matthias Baeßler	
Rissweitenmessung mittels nachträglich angebrachten, verteilten faseroptischen Messsystemen	78
Alois Vorwagner, Maciej Kwapisz, Werner Lienhart, Madeleine Winkler und Urs H. Grunicke	
Verbesserte Bestimmung des Chloridgehaltes in Beton durch neues Messverfahren	88
Fritz Binder und Stefan L. Burtscher	
Spanndrahtbruchdetektion mit Schallemissionsmonitoring	96
Max Käding, Gregor Schacht und Steffen Marx	
Ansätze zur objektspezifischen Ermittlung und Bewertung von KKS-Schutzkriterien	106
Ulrich Schneck	
Probebelastung einer mit Carbonbeton verstärkten Plattenbrücke	118
Oliver Steinbock, Nina Josiane Giese und Manfred Curbach	
Experimentelle Tragfähigkeitstests des OML in den Jahren 2019 und 2020	130
Sabine Wellner, Torsten Hampel und Silke Scheerer	

Ultraschalluntersuchung von Baukonstruktionen

Dr.-Ing. Sebastian Schulze

Hupfer Ingenieure Bauwerksuntersuchungen GmbH, Hamburg

KURZFASSUNG

Das Ultraschallechoverfahren ist eines der Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen (ZfPBau), das sich in der Baupraxis durchsetzen konnte. Dieser Beitrag zeigt dies anhand von zwei Beispielen aus der jüngeren Praxis: (1) An einem Neubau mit erheblichen Verdichtungsmängeln im Beton konnten schadhafte und schadfreie Bereiche eindeutig unterschieden und die Beseitigung der Mängel dadurch umfassend und mit geringen Kosten durchgeführt werden. (2) An einer Spannbetonbrücke konnte für die Erstellung der Rückbaustatik die Ist-Lage der Spannglieder mit der Soll-Lage gemäß den Bestandsplänen abgeglichen sowie der Verpresszustand der Spannglieder stichprobenartig festgestellt werden.

Der Beitrag soll die Praxistauglichkeit des Ultraschallechoverfahrens demonstrieren und einen tieferen Einblick in das große Potential des Verfahrens vermitteln.

Anmerkung: Weite Teile dieses Beitrags wurden ausführlich bereits in [1] publiziert, für den vorliegenden Beitrag gekürzt und um Grundlagen zum Ultraschallechoverfahren ergänzt.

1 Einleitung

Der Stand der Technik bei der Zustandsbewertung von Stahlbetonbauten beschränkt sich zurzeit noch weitgehend auf visuelle und handnahe Untersuchungen im Bestand, wie z. B. Schadkartierung, Abklopfen, Rissdokumentation. Diese Untersuchungen werden in der Regel von den „erstinstanzlichen“ Objektbetreuern veranlasst – also von Architekten, Statikern und Instandsetzungsplanern. An Brücken werden regelmäßige Prüfungen von zertifizierten Bauwerksprüfern nach DIN 1076 [2] durchgeführt, ebenfalls weitgehend handnah. Das Alter o. g. Prüfnorm – Erscheinungsjahr 1999 – unterstreicht dabei die fehlende Aktualität dieser Herangehensweise, insbesondere vor dem Hintergrund der Entwicklung der Bauwerksdiagnostik in den vergangenen 20 Jahren, denn diese hat mittlerweile zunehmend an Akzeptanz und damit an Wert für die Baupraxis gewonnen.

Regelmäßig zum Einsatz kommen bereits seit geraumer Zeit die Verfahren der zerstörungsfreien Bestimmung der Tiefenlage der Beweh-

rung im Beton (Betondeckungsmessung) sowie der Potentialfeldmessung für die Untersuchung der Korrosionsaktivität der Bewehrung. Diese Verfahren ergeben in der Regel quantitative und statistisch bewertbare Resultate.

Zu beiden Verfahren gibt es ausführliche Verfahrensbeschreibungen [3], [4], die den allgemein anerkannten Stand der Wissenschaft und Technik widerspiegeln und auf die auch in Ausschreibungstexten immer häufiger Bezug genommen wird.

Neben den händischen und quantitativen Verfahren bilden die volumenabbildenden Verfahren die dritte und komplexeste Gruppe der ZfPBau. Dabei werden qualitativ bewertbare, bildgebende Ergebnisse erzeugt. Zu nennen sind hier v. a. (Geo-/Impuls-)Radar und Ultraschall(-echo).

2 Ultraschall im Bauwesen: Stand der Technik

Das Ultraschallechoverfahren ist im Bauwesen erst seit der Entwicklung niederfrequenter

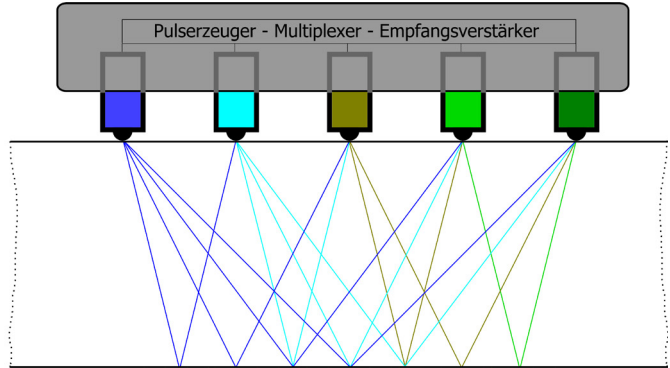


Bild 1: Einsatz und Messprinzip eines multistatischen Ultraschallarrays; beschleunigte Messdatenaufnahme durch Mehrfachanordnung von Sendern und Empfängern

Punktkontaktprüfköpfe sinnvoll nutzbar, die – im Gegensatz z. B. zu medizinischen Prüfköpfen – ohne Koppelmittel auskommen. Durch den Einsatz multistatischer Arrays, die eine beschleunigte Durchführung sowie eine gewisse bildgebende Darstellung direkt vor Ort ermöglichen (Bild 1), ist mittlerweile ein wirtschaftlicher Einsatz möglich.

Tabelle 1 enthält Richtwerte für Detektionsgrenzen beim Einsatz von Ultraschallecho zur Untersuchung von Stahl- und Spannbetonbauten. Die Angaben sind als ungefähre Maximalwerte unter guten Randbedingungen zu verstehen, die insbesondere bei Neubauten mit i. d. R. hochverdichtetem Beton und Bewehrungsstäben mit größerem Durchmesser als in historischen Bauten vorliegen. Bei Bestandsbauten können Ver-

schmutzungen, Aussinterungen/Auswaschungen und Risse an der Betonoberfläche sowie ein höheres Luftporenvolumen die Aussage-sicherheit von Messdaten einschränken. An größeren Lunkern oder flächigen Luftsichten erfolgt dabei – anders als z. B. beim Einsatz von Radar an Beton – stets eine vollständige (totale) Reflexion der einfallenden Welle, über dahinter liegende Bauteilschichten kann mit Ultraschallecho keine Aussage mehr getroffen werden.

3 Eingrenzung von Schadbereichen an einem Neubau

3.1 Ausgangssituation

Diese Einschränkung bei der Einsetzbarkeit von Ultraschall kann bei der Beurteilung eines

Aufgabe	Detektionsgrenze	Maßgebende Einflussparameter
Schlaffe Bewehrung mit Durchmesser \varnothing in Tiefenlage t	bis $t/\varnothing \approx 30:1$ ca. $3-5 \text{ cm} < t \leq \text{ca. } 80 \text{ cm}$ $\varnothing \geq 10-12 \text{ mm}^*$	Größtkorn des Betonzuschlags, Zustand der Messoberfläche, Verdichtungsqualität/Porengehalt des Betons
Tiefenlage von Spannbewehrung	bis ca. $150 \text{ cm}^{**/****}$	Größtkorn des Betonzuschlags, Zustand der Messoberfläche, Verdichtungsqualität/Porengehalt des Betons
Identifikation des Verpresszustands von Hüllrohren	bis ca. 50 cm^{**}	Qualität des Verbunds zwischen Beton/Hüllrohr/Verpressmörtel, Abschattung des Hüllrohrs durch andere Einbauteile
Detektion von Bauteilrückwänden	bis ca. 250 cm	Zustand der Messoberfläche, Verdichtungsqualität/Porengehalt des Betons

* abhängig vom Größtkorndurchmesser | ** abhängig vom Hüllrohrdurchmesser | *** Hüllrohre mit $\varnothing < 50 \text{ mm}$ wie schlaffe Bewehrung

Tabelle 1: Praktische Detektionsgrenzen des Ultraschallechoverfahrens [1]

mutmaßlich schadhafte Bauteile von Vorteil sein, wie das folgende Beispiel illustriert.

Beim Neubau eines Hamburger U-Bahnhofs (Bild 2) wurde versehentlich eine mit Stahlfasern versehene Betoncharge eingebracht. Der Beton wurde über Rohranschlüsse in die allseits geschlossene Schalung eingebracht und war daher während des Einbaus nicht sichtbar. Eine Frischbetonprüfung fand bei dieser Charge offenbar nicht oder erst nach Einbringen des

Betons statt. Nach dem Ausschalen des Betons war zu erkennen, dass sich die Stahlfasern an einigen Stellen, insbesondere in stark bewehrten Bereichen und an Schalungsankern, bündelweise aufkonzentriert hatten, was zum Teil große offene Lunker mit freiliegender Bewehrung zur Folge hatte (Bild 2, unten links).

In anderen Bereichen waren auf der Bauteiloberfläche nur Schlieren und Ablaufspuren zu erkennen, was auf tieferliegende Entmischungen



Bild 2: Übersichtsfoto der Baustelle und exemplarische Detailfotos der visuell erkennbaren Schäden

gen und/oder geschlossene Lunker schließen ließ (Bild 2, unten rechts).

de Messspuren aufgenommen werden, die im Folgenden dargestellt sind.

Wie oben beschrieben, reflektieren oberflächlich nicht sichtbare Lunker Ultraschallsignale vollständig. Dagegen sind in gut verdichteten Bereichen die vorhandenen Stabdurchmesser von 12 bis 14 mm auch in größeren Tiefen gut sichtbar (vgl. Tabelle 1). Daher kann durch den Einsatz von Ultraschallecho hier eine eindeutige Bewertbarkeit der Integrität des Bauteilinnern erwartet werden.

3.2 Nachweis der Integrität der Bauteilquerschnitte

Die Ergebnisse der Messungen an den Längsseiten sind in Bild 4 dargestellt. Die Ultraschallbilder stellen eine vollständige Rekonstruktion des tatsächlichen Bauteilquerschnitts dar. Jedes einzelne Bewehrungseisen der inneren und der äußeren Lage ist eindeutig sichtbar, auch die Rückseiten der dargestellten Wandquerschnitte sind ununterbrochen erkennbar. Der Nachweis der fehlerfreien Verdichtung des gesamten Bauteilquerschnitts ist somit, trotz des versehentlichen Einbaus von Stahlfasern zusätzlich zur konventionellen Stabbewehrung, erbracht. Ergänzende Bohrkernentnahmen konnten diese Erkenntnis festigen (Bild 5).

Bild 3 zeigt die untersuchten Wände im Horizontalschnitt durch das gesamte Bauwerk. An der Außenseite der Maschinenraumwand (grüne Markierung) sind offene Lunker vorhanden (vgl. Bild 2), daher konnte das innere Gefüge hier nicht flächig untersucht werden. An der Innenseite sowie an den Längswänden (blaue Markierungen) konnten hingegen durchgehen-

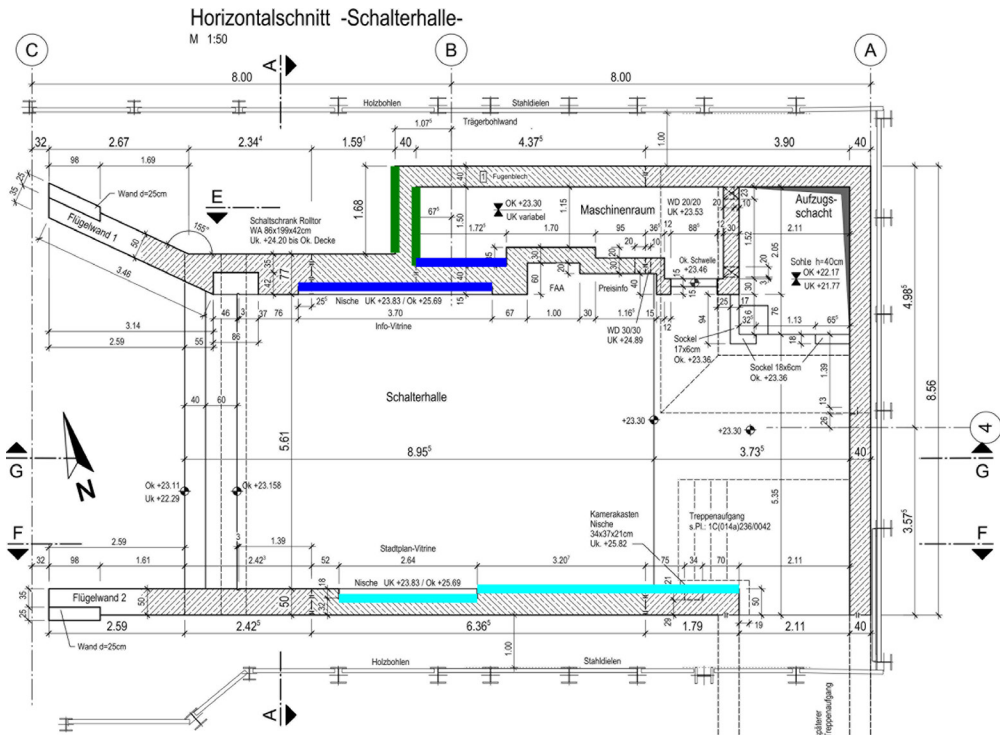


Bild 3: Übersicht der Untersuchungsgebiete

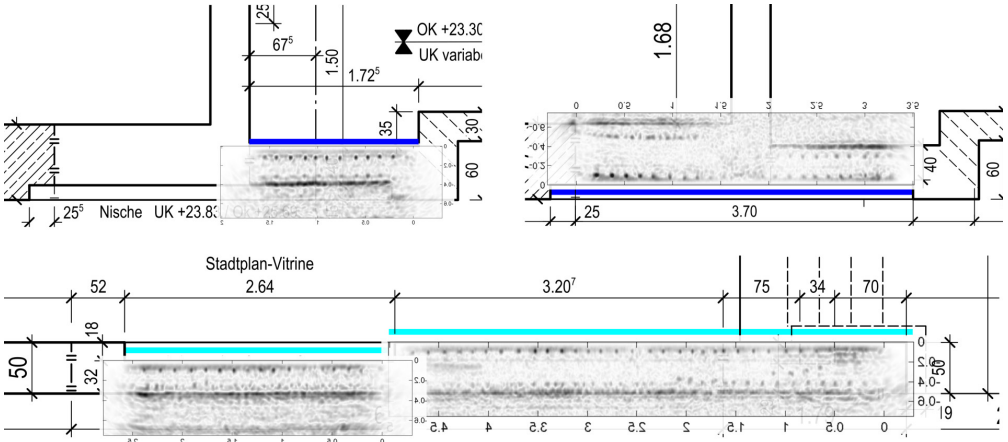


Bild 4: Horizontalschnitte mit Darstellung der Ultraschallmessspuren an den Längswänden



Bild 5: Kernbohrung durch Wandquerschnitt (im hellblauen Bereich in Bild 4); die angeschnittenen Stahlfasern im Bohrloch nahe der Wandoberfläche sind gut erkennbar

In fast allen Bereichen, in denen aufgrund der an der Oberfläche sichtbaren Spuren mit innenliegenden Verdichtungsmängeln zu rechnen war, konnte auf diese Weise eine fehlerfreie Verdichtung des Bauteilinnern nachgewiesen und daher auf eine aufwändige Sanierung verzichtet werden. Lediglich an der Außenwand waren wenige Quadratmeter Wandfläche umfassend instand zu setzen.

4 Lage und Verpresszustand von Spanngliedern an einer Bestandsbrücke

4.1 Ausgangssituation

Für die Huntebrücke bei Oldenburg (Bild 6, links) ist vom Land Niedersachsen aufgrund von Tragfähigkeitsdefiziten ein Ersatzneubau geplant. Beim Bestand sowie beim Neubau handelt es sich um jeweils zwei Teilbauwerke, die während der geplanten Bauzeit wechselseitig für die Verkehrsführung beider Fahrrichtungen genutzt werden können, um Sperrzeiten zu vermeiden [5].



Bild 6: Untersichten der untersuchten Spannbetonbrücke und Messung an einem der Plattenbalken

Für die Rückbaustatik der Teilbauwerke war die Ist-Lage der Spannlieder auf etwaige Abweichungen zu den Soll-Lagen zu überprüfen. Um „Überraschungen“ (unverträgliche Lastumlagerungen) während des Rückbaus zu vermeiden, war außerdem stichprobenartig der Verpresszustand der Hüllrohre festzustellen.

4.2 Durchführung der Untersuchung

Die Untersuchung wurde von einem Brückenuntersichtgerät aus vorgenommen, stichprobenartig nahe den Hoch- und Tiefpunkten der Spannliedführung der Längsträger (Bild 6, rechts).

Die Lageüberprüfung (vertikal und Tiefe) der Spannlieder erfolgte überwiegend stichprobenartig anhand von Einzelmessungen. Für die Untersuchung des Verpresszustands wurden an der Seite des Plattenbalkens Messspuren in engem Messraster aufgenommen. Zur Überprüfung der zerstörungsfrei gewonnenen Erkenntnisse wurden die Hüllrohre minimalinvasiv angebohrt und das Innere der Hüllrohre endoskopisch in Augenschein genommen. Angebohrt wurde in den Hochpunkten der Spannliedlage der obere Rand der Hüllrohre, in den Tiefpunkten der untere Rand, um Beschädigung der Spannplitzen zu vermeiden.

4.3 Untersuchungsergebnisse

Bild 7 zeigt exemplarisch einen Vergleich zwischen Bestandsplänen und Ist-Lage der Spannlieder (Fotomontage) sowie die Ergebnisse einer Messspur etwa drei Meter von der Spannliedhochlage entfernt (Achse 110). Die detektierten Spannlieder sind im Querschnitt (Bestandsunterlagen hier nur für die Hochlage über Stütze 3 in Achse 107 vorhanden, Soll-Lage blau markiert) sowie im Längsschnitt markiert.

Auf dem Ultraschallbild des Balkenquerschnitts sind sämtliche Nutzanzeigen eindeutig identifizierbar: oberflächennahe Bewehrungsseisen (schwarz), Spannlieder (grün) und die Balkenrückwand (Punktlinie), die von den Spannliedern teilweise verdeckt wird. An den drei Spannliedern ist sowohl die Vorderseite als auch die Rückseite des Hüllrohrs erkennbar. Der Nachweis der vollständigen Verpressung der Hüllrohre ist damit an dieser Stelle erbracht.

Am untersten Hüllrohr wurden die Ultraschallergebnisse der Hüllrohre endoskopisch verifiziert. Bild 8 zeigt in der oberen Hälfte des Bohrkanals den umgebenden Beton und in der unteren Hälfte den feineren Verpressmörtel, getrennt durch den tangential angebohrten Hüllrohrmantel. Das Hüllrohr ist frei von Luft einschlüssen vollständig mörtelgefüllt.

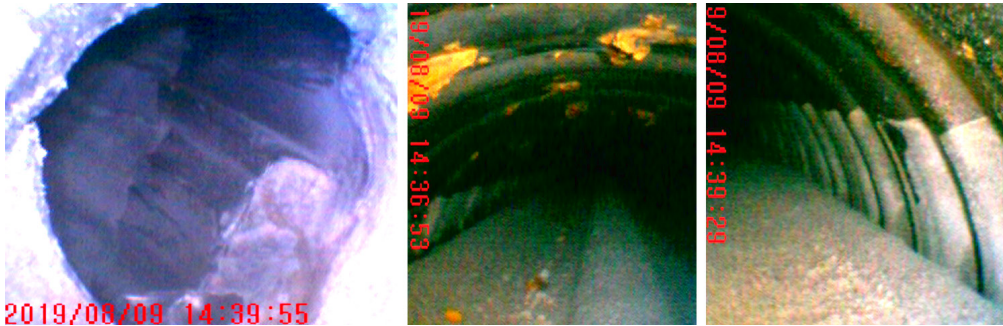


Bild 9: Frontalblick und Seitenblicke mit Endoskop in angebohrtes Hüllrohr mit unzureichender Mörtelverfüllung

die Litzen sind aufgrund der „Mörtelbeschichtung“ augenscheinlich unbeschädigt.

Auch über einer weiteren Stütze deuten Messergebnisse auf nicht oder unvollständig verfüllte Hüllrohre hin. Dabei konnte festgestellt werden, dass der innere Hüllrohrquerschnitt vollständig mörtelgefüllt ist, die oberen Hüllrohrwindungen hingegen keinen Verpressmörtel enthalten. Diese unvollständige Verpressung hat, mutmaßlich infolge Schwindens des Verpressmörtels, dazu geführt, dass Ablösungen zwischen Mörtel und Hüllrohr das Eindringen der Schallwellen ins Hüllrohrinnere verhindern und folglich keine Rückwand sichtbar ist.

5 Fazit

Die Beispiele zeigen eindrucksvoll die Praxisrelevanz des Ultraschallechoverfahrens im Bauwesen. Beide Messeinsätze konnten inklusive der Nebenleistungen Endoskopie bzw. Kernbohrung mit einem Zeitaufwand von jeweils zwei Personentagen vor Ort durchgeführt werden. Neben der Integritätsprüfung des Betons bzw. der Spannglieder konnte jeweils auch die Lagegenauigkeit der schlaffen Bewehrung geprüft werden.

Die Untersuchung des Verpresszustands von Spanngliedern ist eine sehr spezialisierte Anwendung des Ultraschallechoverfahrens. Messergebnisse liegen, wie dargestellt, mit hoher Wahrscheinlichkeit „auf der sicheren Seite“, d. h. falsch positive Interpretationen sind möglich und müssen entsprechend bewertet bzw. falsifiziert wer-

den. Falsch negative Interpretationen, d. h. Anzeige einer Hüllrohrrückwand, obwohl das Hüllrohr unverfüllt ist, sind hingegen unwahrscheinlich.

Eine Verifizierung von Messergebnissen ist in jedem Falle angeraten und, wie gezeigt werden konnte, auch schadfrei möglich.

Literatur

- [1] Schulze, S.: Bauwerksuntersuchung mit Ultraschall. Beton- und Stahlbetonbau 115 (2020) 9, S. 653–661
- [2] DIN 1076:1999-11: Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen – Überwachung und Prüfung.
- [3] Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. (Hrsg.): Merkblatt für Elektrochemische Potentialmessungen zur Detektion von Bewehrungsstahlkorrosion. Berlin, 2014
- [4] Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V. (Hrsg.): Betondeckung und Bewehrung – Sicherung der Betondeckung beim Entwerfen, Herstellen und Einbauen der Bewehrung sowie des Betons nach Eurocode 2. Berlin, 2015
- [5] Niedersächsische Landesbehörde für Straßenbau und Verkehr, BIM-Pilotprojekt A 29 Huntebrücke: https://www.strassenbau.niedersachsen.de/startseite/projekte/bim_building_information_modeling/pilotprojekte/a_29_huntebruecke/a-29-huntebruecke-174316.htm [geprüft am 01.10.2020]
- [6] Schulze, S.: Einsatz von Ultraschallecho zur Spanngliedortung bei der Verstärkung von Brückenbauwerken. Beton- und Stahlbetonbau 110 (2015) 8, S. 521–528

Bildquellen

Alle Bilder: Sebastian Schulze; die Bilder 2–4 und 6–9 wurden bereits in [1], Bild 1 links in [6] veröffentlicht, für den vorliegenden Beitrag aber teilweise modifiziert.

Schriftenreihe Konstruktiver Ingenieurbau Dresden Heft 55

Das 11. Symposium „Experimentelle Untersuchungen von Baukonstruktionen“ (SEUB) fand am 08. März 2021 als digitale Veranstaltung an der TU Dresden statt. Im vorliegenden Buch sind die schriftlichen Beiträge zusammengestellt.

In der Keynote Lecture wurde über Versuche an einem Brückenbauwerk sowohl in situ als auch im Prüflabor berichtet – eine Verifizierung, die nur selten vorkommt. Danach spannte sich der thematische Bogen über die Tragfähigkeit von Gewölbebrücken, berührungslose Messverfahren im Praxistest, über Monitoring und schwingungsbasierte Messungen an Bauwerken hin zu faseroptischen Messsystemen und ihren Einsatzmöglichkeiten bei der Risserfassung. In weiteren Beiträgen wurde eine neue Methode zur verbesserten Bestimmung des Chloridgehalts im Beton vorgestellt, über ein Verfahren zur Spanndrahtbruchdetektion mittels Schallemission und über das Potential des kathodischen Korrosionsschutzes berichtet. Mit einem Bericht über eine erfolgreiche Probelastung einer mit Carbonbeton verstärkten Plattenbrücke endete die Tagung.

Das 12. SEUB ist für März 2023 geplant.

Der vorliegende Tagungsband ist als digitale Version Open Access auf der Homepage des Instituts für Massivbau der TU Dresden abrufbar.

ISSN: 1613-6934

ISBN: 978-3-86780-665-7