

# Gefügeforensik – ZfP-Verfahren am Bauwerk

Dipl.-Ing. Torsten Harke, M.Sc.<sup>1</sup>; Chris Voigt, M. Eng.<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> MKP GmbH, Weimar

Kontakt E-Mail: torsten.harke@marxkrontal.com

**Kurzfassung.** Das Wort Forensik ist in seiner Herkunft und Bedeutung leider sehr negativ geprägt. Forensik ist ein Sammelbegriff für wissenschaftliche und technische Arbeitsgebiete, in denen kriminelle Handlungen systematisch untersucht werden. In der modernen Verwendung des Wortes forensisch wird dies als eine Form der juristischen Beweisführung und als eine Kategorie der öffentlichen Präsentation verwendet. Ersetzt man „kriminelle Handlungen“ durch Bauwerke bzw. Baumängel und entfernt man das Wort „juristisch“, so entsteht ein Kontext, der die Arbeitsweise und Methoden der Bauwerksdiagnostik bestens wiedergibt.

Der Zeitpunkt, an dem eine Bauwerksdiagnostik gefordert wird, ist oftmals das Auftreten sichtbarer Schadensbilder. Zu diesem Zeitpunkt sind dies bereits Resultate von mehreren Ursachen und zum Teil komplexen Schadensabfolgen. Dabei liegen sichtbarer Schaden und Ursache nicht immer in unmittelbarer Nähe. Auch ist der sichtbare Schaden nur der kleinste Teil eines größeren Schadensausmaßes.

Grundlage zur Ermittlung der tatsächlichen Schadensursachen ist eine systematische Untersuchung. Diese beginnt mit einer, sehr oft vernachlässigten, visuellen Inspektion der Gesamtkonstruktion und der Bestandspläne. Die daraufhin abgeleiteten Schadenshypothesen werden zielgerichtet mit den anwendbaren zerstörungsfreien Prüfverfahren systematisch untersucht, gefolgt von minimalinvasiven zerstörungswarmen Untersuchungen zur Verifizierung und Kalibrierung der ZfP-Daten. Am Ende erhält man eine Beweiskette von der eigentlichen Schadensursache bis hin zum sichtbaren Schaden und deckt das gesamte Schadensausmaß auf.

Anhand von aktuellen Beispielen werden der Ablauf und die Bedeutung derart systematischer Untersuchungen unter Zuhilfenahme von ZfP-Verfahren verdeutlicht.

## 1. Einführung

Für die bauwerksdiagnostische Erkundung und Forensik sind eine Vielzahl von Untersuchungsverfahren erforderlich. Insbesondere im letzten Jahrzehnt haben sich hierfür zerstörungsfreie Prüfverfahren im Bauwesen etabliert. Diese sind nicht mehr nur bei wissenschaftlichen Einrichtungen und Prüfinstituten im Labor anzufinden. Die größere Akzeptanz in der Fachwelt sorgt dafür, dass die Industrie Untersuchungstechnik auch für den Baustelleneinsatz anbietet.

Der Zeitpunkt, an dem eine Bauwerksdiagnostik gefordert wird, ist oftmals das Auftreten sichtbarer Schadensbilder. Zu diesem Zeitpunkt sind dies bereits Resultate von mehreren Ursachen und zum Teil komplexen Schadensabfolgen. Dabei liegen sichtbarer Schaden und Ursache nicht immer in unmittelbarer Nähe. Auch ist der sichtbare Schaden nur der kleinste Teil eines größeren Schadensausmaßes.



Grundlage zur Ermittlung der tatsächlichen Schadensursachen ist eine systematische Untersuchung und Methodik. Diese beginnt mit einer, sehr oft vernachlässigten, visuellen Inspektion der Gesamtkonstruktion und der Bestandspläne. Die daraufhin abgeleiteten Schadenshypothesen werden zielgerichtet mit den anwendbaren zerstörungsfreien Prüfverfahren systematisch untersucht, gefolgt von minimalinvasiven zerstörungssarmen Untersuchungen zur Verifizierung und Kalibrierung der ZfP-Daten. Am Ende erhält man eine Beweiskette von der eigentlichen Schadensursache bis hin zum sichtbaren Schaden und deckt das gesamte Schadensausmaß auf.

Anhand von aktuellen Beispielen werden der Ablauf und die Bedeutung derart systematischer Untersuchungen unter Zuhilfenahme von ZfP-Verfahren verdeutlicht.

## **2. Methodik der Bauwerksdiagnostik**

Um das gesamte Potential der Bauwerksdiagnostik ausschöpfen zu können, bedarf es einer Methodik, die darauf ausgerichtet ist, dem Kunden (Fachplaner, Tragwerksplaner, Anlagenverantwortlicher, etc.) genau die Zuarbeit zu liefern, die er für seine eigenen Planungen benötigt. Die Bauwerksdiagnostik fügt sich immer in Planungs- und Entscheidungsprozesse ein. Diese Vernetztheit erfordert einen intensiven Austausch zwischen den Akteuren. Dieser beginnt bestenfalls mit der Erstellung einer Aufgabenstellung für die Bauwerksdiagnostik. Der Fachplaner hält hierin seinen Informationsbedarf fest. Die Planungsziele sind zu erläutern, damit der Bauwerksdiagnostiker stets planungsorientiert denken und handeln kann. Weiterhin ist der Informationsbedarf zu erläutern, der übergeordnet für das Bauwerk oder für einzelne Bauwerks- bzw. Bauteile besteht. Übersichtspläne zum Bauwerk sind ebenso hilfreich wie Planeinzeichnungen, welche die Aufgabenstellung qualifizieren. Es ist meist erforderlich, dass die Bauwerksdiagnostik als stufenweiser Prozess ausgeführt wird. Dieser beginnt mit der Sichtung der Bestandsunterlagen, einer oftmals hilfreichen Vor-Ort-Begehung des Bauwerks und der Erstellung einer Untersuchungsplanung. In einer ersten Stufe kann es erforderlich sein das Bauwerk zunächst stichprobenhaft zu untersuchen, um einen ersten orientierenden Eindruck von der Konstruktion und deren Zustand zu erhalten. Dies ist insbesondere dann zielführend, wenn zum Bauwerk keine Bestandsunterlagen vorliegen oder der Erfolg der Untersuchungsmethoden aufgrund unbestimmbarer Randbedingungen nicht genau abschätzbar ist. Entsprechend den Ergebnissen aus der ersten Untersuchungsstufe kann sich ein neuer oder geänderter Untersuchungsbedarf ergeben, der in weiteren Untersuchungsstufen gedeckt werden kann.

Wesentliche Grundlage der Untersuchungen ist die Untersuchungsplanung. Darin werden die Ergebnisse aus der Sichtung der Bestandsunterlagen festgehalten. Die Sichtung erfolgt zielgerichtet entsprechend der Aufgabenstellung des Fachplaners. Oftmals wird der Einfachheit halber auf eine intensive Aktenrecherche verzichtet. Dieser Verzicht erweist sich zumeist als sehr unwirtschaftlich, da Informationen, die aus den Bestandsunterlagen hervorgegangen wären, mit viel Aufwand am Bauwerk neu gewonnen werden. Die Untersuchungsplanung wird durch die Feststellungen ergänzt, die während der Vor-Ort-Begehung durch den Aufsteller der Untersuchungsplanung gewonnen wurden. Aus dem Informationsbedarf entsprechend der Aufgabenstellung und den gewonnenen Informationen aus den Bestandsunterlagen und der Begehung leitet sich ein Defizit ab, für das konkrete Untersuchungsziele definiert werden. Ein Untersuchungsziel beschreibt beispielsweise, dass für ein Hauptbauteil die geometrischen Abmessungen, die Lage der Bewehrung und die Betonfestigkeit für eine Nachrechnung zu bestimmen sind. Im Idealfall übergibt der Fachplaner bereits solch konkrete Untersuchungsziele. Andernfalls werden sie mit dem Fachplaner abgestimmt oder gemeinsam entwickelt. Ein Untersuchungsziel kann mit dem

Einsatz unterschiedlicher Untersuchungsverfahren erreicht werden. So kann die Betondruckfestigkeit zerstörungsfrei mit einem Rückprallhammer oder zerstörungsarm durch Probenentnahme ermittelt werden. Die Wahl des konkreten Untersuchungsverfahrens wird unter Abwägung der Randbedingungen (erforderliche Aussagegenauigkeit, Zugänglichkeit am Bauteil, Aufwand-Nutzen-Verhältnis, etc.) in der Untersuchungsplanung dokumentiert [3]. Insbesondere die Kombination aus zerstörungsfreien (ZfP-Bau) und zerstörungsarmen Prüfverfahren kann zu wirtschaftlichen Untersuchungen führen, da mittels ZfP ein Überblick über größere Bereiche gewonnen werden kann und darauf aufbauend gezielt in bestimmten Bereichen minimalinvasive Beprobungen durchgeführt werden. In der Untersuchungsplanung werden zusammenfassend Art, Lage und Anzahl der Untersuchungen festgelegt, sodass diese Informationen auch die Grundlage für eine Ausschreibung der Vor-Ort-Untersuchungen bilden können. Darüber hinaus gibt das Dokument Hinweise zu Randbedingungen der Untersuchungen, wie beispielsweise der Zugänglichkeit zum Bauwerk, dem Vorhandensein von Strom und Wasser oder erforderlichen arbeitsschutzrechtlichen Aspekten. Der Aufsteller der Untersuchungsplanung benötigt ein breites Wissens- und Erfahrungsspektrum. Kenntnisse über historische Konstruktionen, Bauweisen und Materialien sind ebenso erforderlich wie das Wissen über material- und lastbedingte Schädigungsmechanismen. Weiterhin sind umfangreiche Kenntnisse über mögliche Untersuchungsverfahren, deren Wirkungsweise, Aussagegenauigkeit und den Grenzen insbesondere der zerstörungsfreien Verfahren erforderlich.

Die Vor-Ort-Untersuchungen sind nicht ausschließlich als gewerbliche Leistungen zu verstehen. Eine ingenieurtechnische Begleitung der Untersuchungen ist erforderlich, um die konkrete Lage der Untersuchungsbereiche objektorientiert festzulegen und damit auch auf auftretende Besonderheiten reagieren zu können, die eine Anpassung der ursprünglichen Untersuchungsplanung erfordern. Die während der Untersuchungen anfallenden Daten und Informationen sind äußerst heterogen. Alle Untersuchungsergebnisse sind strukturiert zu dokumentieren, um eine Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse zu ermöglichen.

Die Dokumentation der Ergebnisse erfolgt zumeist untersuchungsbereichsbezogen. Hierfür können Datenblätter mit einer reinen Ergebnisdarstellung dienen. Jeder Untersuchungsbereich ist dabei in einem dreidimensionalen Modell oder in zweidimensionalen Plänen zu verorten. Eine Zusammenfassung wesentlicher Ergebnisse in tabellarischer Form gibt dem auswertenden Ingenieur einen schnellen Überblick über alle gewonnenen Daten. Die Auswertung der Ergebnisse erfolgt zumeist auf statistischer Grundlage (bspw. 5%-Quantil der Betondeckung) oder im Vergleich mit Achtungs- und Grenzwerten. Dies wird insbesondere im Bestandsbau nur zum Teil durch Normen erfasst. Mit den Untersuchungsergebnissen und der daraus abgeleiteten Bewertung sind auch eine Zusammenfassung der Aufgabenstellung zu übergeben und die eingesetzten Untersuchungsverfahren zu nennen. Dies ermöglicht es bei zukünftigen Fragestellungen zum Bestandsobjekt auf die Untersuchungskampagne zurückzugreifen und die Ergebnisse in den jeweiligen Kontext der damals gültigen Aufgabenstellung zu stellen.

### **3. Praxisbeispiele für erfolgreiche Forensikarbeit im Bestand**

#### *3.1. Komplexe Schadensursachen an einer Spannbetonbrücke*

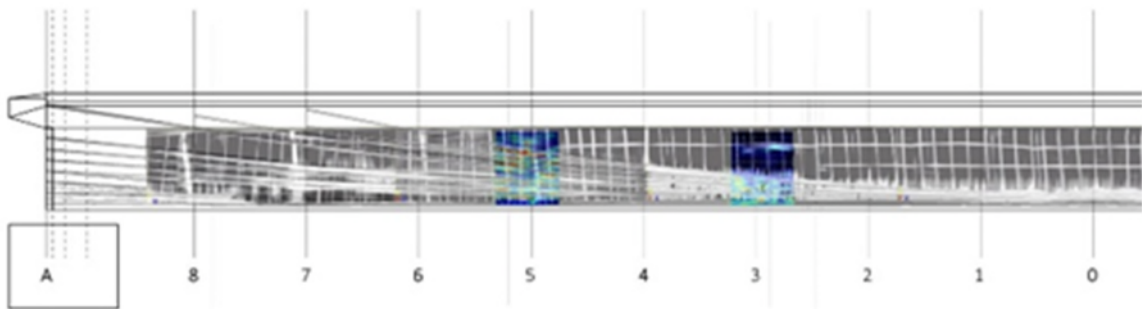
Das untersuchte Bauwerk besteht aus mehreren ein – und zweifeldrigen Überbauten. Der Anlass der Untersuchungen waren diverse Schadensbilder, welche in Teilen auf eine Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) hindeuteten, aber nicht eindeutig waren. Entsprechend der zuvor beschriebenen Vorgehensweise wurde als erstes eine Anamnese erstellt. Die Bestandsunterlagen wurden hinsichtlich widersprüchlicher Angaben und konstruktiver

Schwachstellen und Besonderheiten ausgewertet. Eine erste Vor-Ort-Besichtigung ergab weitere Kenntnisse zum Zustand der Bauwerke.



**Abb. 1** Ansicht der Überbauten des untersuchten Bauwerkes. Quelle: MKP GmbH

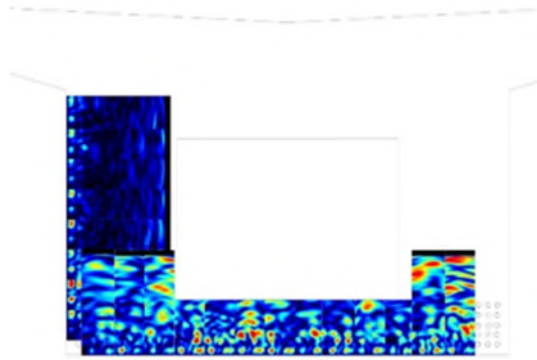
Durch einen Abgleich der Schadensbilder mit den jeweils möglichen Schadensursachen sowie der möglichen Schadensentwicklung, wurde eine Untersuchungsplanung erstellt. Neben klassischen Untersuchungen wie Schürfen etc. wurde eine Kombination aus Radar und Ultraschall zur vertieften Untersuchung gewählt.



**Abb. 2** Ansicht der flächigen Radaraufnahmen (grau) und der teilflächigen Ultraschallmessungen (farbig) am Brückensteg. Quelle: MKP GmbH

Mit Hilfe des Radars wurden flächig Aufnahmen erstellt, welche die Lage der Spannglieder und Bewehrungen nachweisen und zudem Anhaltspunkte für weitere Störungen und Auffälligkeiten im Betongefüge gaben. Es zeigte sich, dass die Spannglieder- und Bewehrungslagen laut Plan hergestellt wurden. Das Betongefüge wies aber vorwiegend im Bereich der Spanngliedlagen größere Auffälligkeiten/Störungen auf. An diesen Bereichen wurden gezielt flächige Ultraschallaufnahmen durchgeführt, um diese Anomalitäten näher zu differenzieren.





**Abb. 3** Ultraschall-B-Bilder an einer auffälligen Stelle des Brückenquerschnitts. Quelle: MKP GmbH



**Abb. 4** Detailaufnahme des Hüllrohres im Tiefpunkt mit Korrosionslöchern. Quelle: MKP GmbH

Die Ultraschallaufnahmen zeigten an den definierten Stellen ein ausgeprägt gestörtes Betongefüge. Eine gezielte Sondierungsöffnung belegte Korrosionsschäden in Form von Löchern in den Hüllrohren und davon ausgehend mehrere Rissverläufe im Beton.

Unter Zusammentragung aller Erkenntnisse aus Anamnese, visueller Aufnahme, zerstörungsfreien und zerstörungsarmen Untersuchungen sowie Laborergebnissen zum Beton konnten die Schadensursache und deren Ausmaß spezifiziert werden.

Über konstruktive Schwachstellen sowie Schäden an Abdichtungen kam es zu langandauernden Wasserzutritten mit der Folge, dass Wasser in die Spanngliedhüllrohre eindringen konnte und an den Tiefpunkten über die Korrosionsschäden am Hüllrohr wieder austrat. Mit dem Wasseraustritt wurde ein höherer Alkalianteil aus dem Verpressmörtel ausgespült und an die reaktive Gesteinskörnung des Betons getragen, was wiederum zu einer Verstärkung der AKR und der Intensivierung der Rissbildung in diesem Bereich führte.

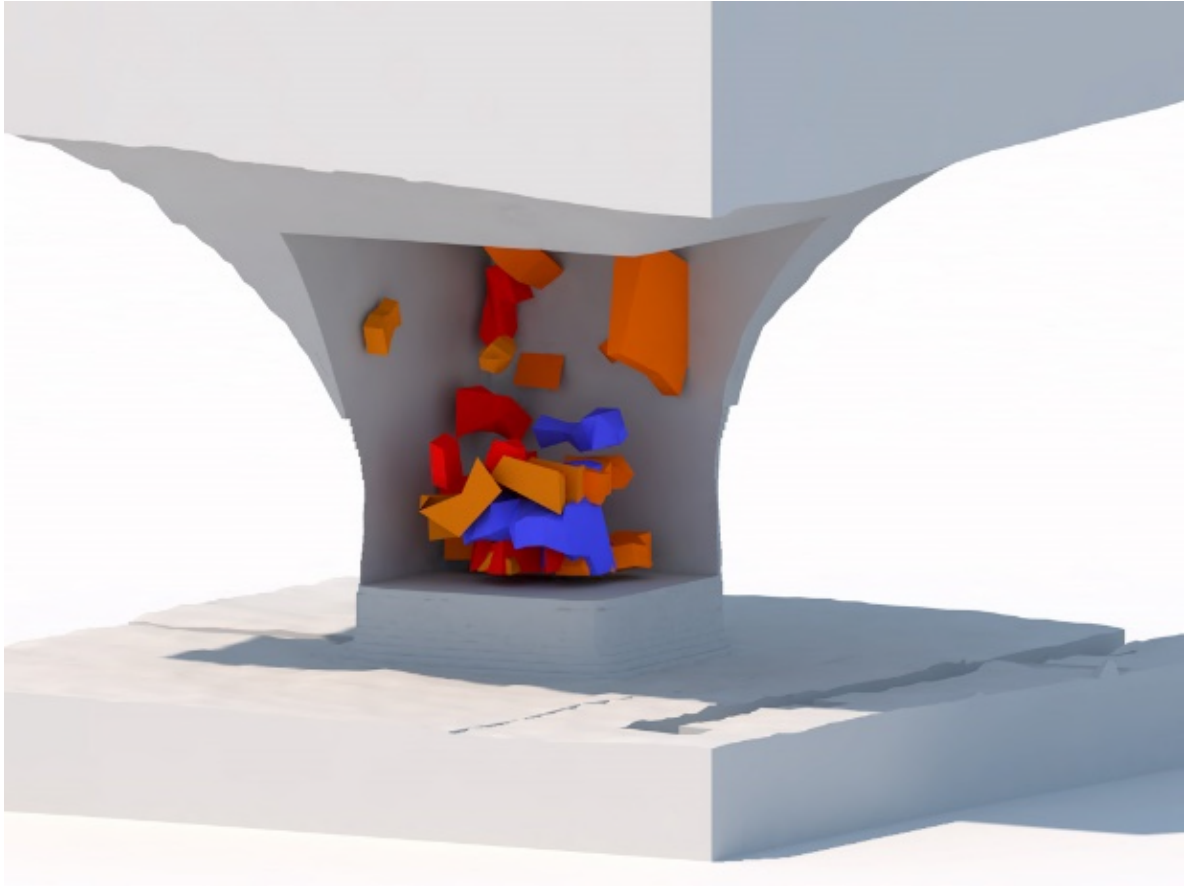
### 3.2. *Gefügeuntersuchungen an Natursteinmauerwerk*

Für Umbau- und Sanierungsplanungen in einer frühbarocken Schlossanlage musste eine Nachrechnung für diverse Gebäudeteile durchgeführt werden. Hiervon war auch ein im Grundriss ca. 25 x 25 m großer, aus Natursteinmauerwerk hergestellter Turm betroffen. Die Holzbalkendecken des Turms tragen die Lasten über die Außenwände und Stützen bis in das Kellergeschoss ab. Dort konzentrieren sich die Lasten auf massive ca. 2 x 2 m große Stützen. Statisch konnten diese Stützen aus Sandsteinmauerwerk nicht nachgewiesen werden. Eine große rechnerische Überlastung war der Anlass, bauwerksdiagnostische Untersuchungen durchzuführen.



**Abb. 5** Ansicht eines untersuchten Mauerwerkspfeilers aus Sandstein. Quelle: MKP GmbH

Der Zustand der Pfeiler wurde in einer ersten Untersuchungsstufe durch eine visuelle Begutachtung der freigelegten äußeren Mauerwerksstruktur erfasst. Hierbei wurden markante Rissbildungen dokumentiert, welche die Rechenannahmen augenscheinlich bestätigten. Zur Erkundung des inneren Mauerwerksgefüges und um die vorgeschädigten Pfeiler nicht übermäßig im Querschnitt zu schwächen, wurden in einer weiteren Untersuchungsstufe vorwiegend zerstörungsfreie Untersuchungen vorgesehen. Mittels Georadars wurden alle frei zugänglichen Pfeileraußenseiten flächig in einem kleinteiligen Raster gescannt und die Messspuren von einem Bezugspunkt (Koordinatenursprung) ausgehend eingemessen. Durch die physikalischen Eigenschaften des elektromagnetischen Signals können aus der Signalauswertung Rückschlüsse auf Unregelmäßigkeiten im Gefüge (Schichtgrenze Mauerwerk zu Luft) gezogen werden. Die einzelnen Scans wurden für jede einzelne Pfeilerfläche in der Nachbearbeitung zu einem Flächenscan verrechnet und die erkundeten Auffälligkeiten dreidimensional modelliert. Das dreidimensionale Modell mit Darstellung der potenziellen Gefügestörungen bildete die Grundlage für die Festlegung konkreter Untersuchungsstellen für validierende zerstörungsarme Untersuchungen. In einzelnen Bereichen wurden Sondierungsbohrungen im Durchmesser von 25 mm durchgeführt und mit einem Videoendoskop befahren. Die Erkundungsergebnisse wurden in Sondierungsprofilen dokumentiert. Durch die zusätzliche Integration der Sondierungsergebnisse in das dreidimensionale Modell gelang eine anschauliche Zuordnung der Auffälligkeiten in den ZfP-Daten zu den tatsächlichen Schäden.



**Abb. 6** Darstellung der Radarergebnisse als Volumenkörper im dreidimensionalen Modell eines Mauerwerkspfeilers. Quelle: MKP GmbH

Im Ergebnis konnte festgestellt werden, dass das äußerlich homogen wirkende Schichtenmauerwerk aus Naturstein im Inneren als sehr inhomogenes Bruchsteinmauerwerk ausgebildet war, welches zusätzlich diverse Fehlstellen in Form von Hohlräumen, Mörtelfehlstellen und weiteren Rissen aufwies. Auf Grundlage dieser Ergebnisse, die den äußeren Eindruck bestätigten, wurden durch die Tragwerksplaner umfassende Sicherungsmaßnahmen veranlasst.

### *3.3. Qualitätsüberprüfung im Neubau*

Neben dem Einsatz der ZfP-Verfahren an Bestandsbrücken tragen diese auch zur Qualitätsprüfung an Neubauten bei. Neben den klassischen Betondeckungsmessungen zur Überprüfung der Einhaltung der geforderten Mindestüberdeckung können auch die Ausführungsqualitäten der Betonage überprüft werden.





Abb. 7 Ansicht Untersuchungsbereich der WiB -Brücke. Quelle: MKP GmbH

Bei diesem Beispiel handelt es sich um eine Walzträger-im-Beton-Brücke (WiB-Brücke). Das Untersuchungsziel war die Überprüfung der Qualität der Betonage unmittelbar unter den Walzträgern, da hier eine hohe Wahrscheinlichkeit bestand, dass sich an dieser Stelle Hohlräume bzw. Kiesnester bei der Betonage bildeten. Wie auch bei den Bestandsbrücken ist im Vorfeld eine Auseinandersetzung mit der Planung und Konstruktion erforderlich, um geeignete Untersuchungsmethoden auszuwählen. Mit dem Untersuchungsziel, Fehlstellen zu erkunden und unter Beachtung der Bauteilstärke von 20-50 cm, dem hohen Bewehrungsgrad und des recht jungen Alters des Betons kamen Ultraschallmessungen in Frage.

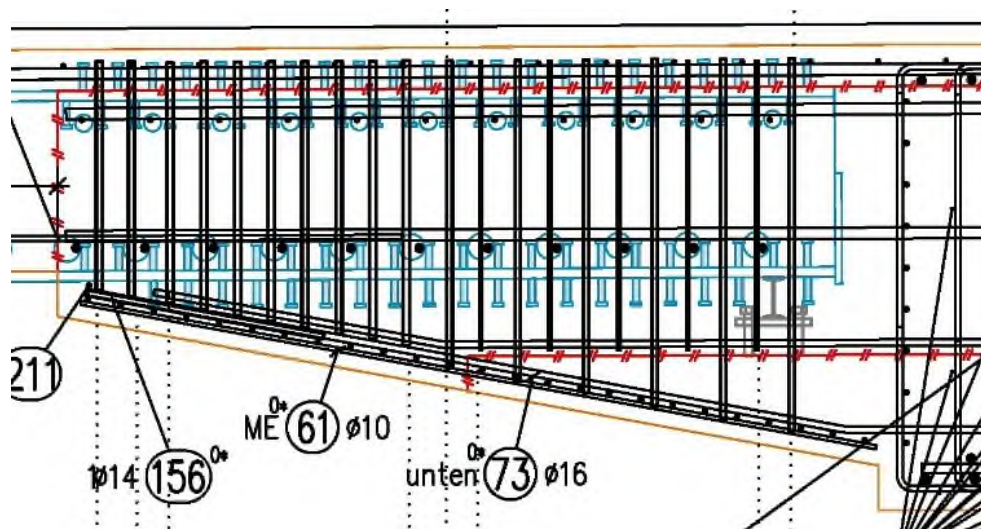
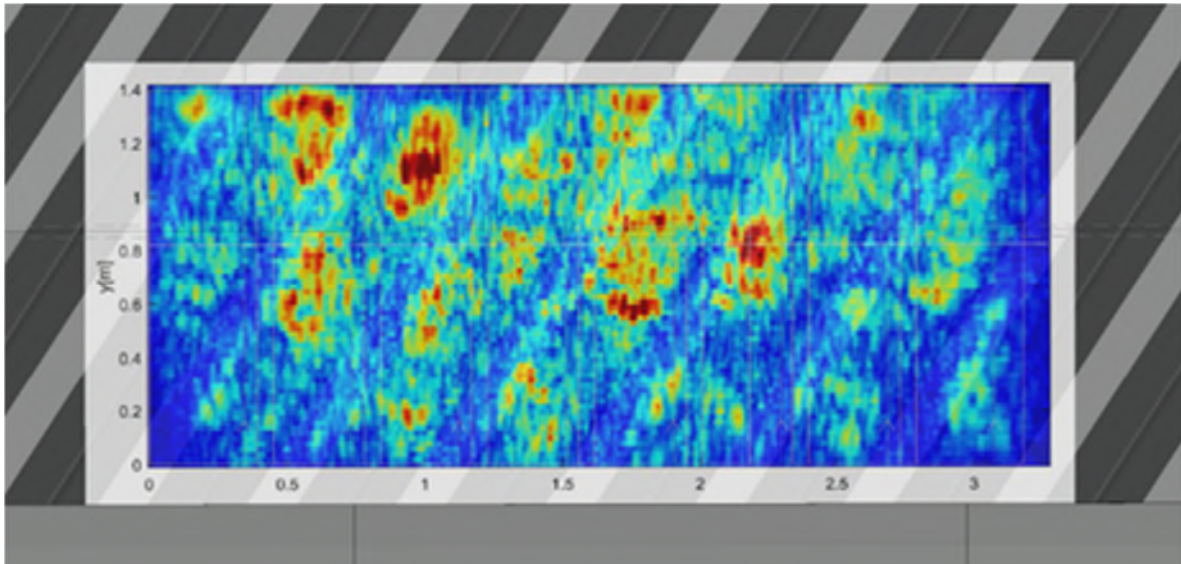


Abb. 8 Auszug aus dem Längsschnitt der zu untersuchenden Konstruktion. Quelle: MKP GmbH



Die Messungen wurden stichprobenartig in Teilflächen durchgeführt. Die Messdaten wurden ähnlich der Erkundung von Verpressfehlern in zwei Stufen ausgewertet. In der ersten Stufe wurden die Amplitudenstärken betrachtet, da diese einen ersten Verdacht auf Lufteinschlüsse geben können. Da aber unter bestimmten Voraussetzungen auch die anderen Einbauteile zu hohen Amplituden führen können, wurde im zweiten Schritt eine Phasenauswertung der Ultraschallsignale durchgeführt. Mit diesem Vorgehen konnten mehrer Flächen identifiziert werden, welche ein Verdachtsmoment für Fehlstellen aufwiesen.



**Abb. 9** Auszug aus dem 3D-Modell, Ansicht der Ultraschall-Untersuchungsfläche. C-Bild Amplitudendarstellung, rote Bereiche mit hohen Amplituden und entsprechenden Verdachtsmomenten für Fehlstellen. Quelle: MKP GmbH

Zur Validierung der Verdachtsmomente wurden an einer markanten Stelle Spiralbohrungen mit einem Durchmesser von 10 mm eingebracht und endoskopisch untersucht. Dabei wurde ein Hohlraum unter dem Walzträgerflansch mit einer Stärke von 0,5-1 cm angetroffen und der Verdacht aus den zerstörungsfreien Messungen zweifelsfrei bestätigt.



**Abb. 10** Endoskopische Aufnahme des Hohlräume unter dem Walzträger. Quelle: MKP GmbH

In den erkundeten Bereichen wurde eine Probeverpressung der Fehlstellen durchgeführt. Mittels der zuvor gewonnenen Daten und einer Ultraschallmessung nach dem Verpressen konnte auch der Verpresserfolg bestätigt bzw. überprüft werden.

## Referenzen

- [1] Bundesanstalt für Straßenwesen (2022) Rückbau von Brücken – Erfahrungssammlung – Dokumentation 2021
- [2] Bundesministerium für Digitales und Verkehr (2020) Leitfaden zur Prüfung von Instandsetzungs- und Ertüchtigungsmaßnahmen an Ingenieurbauwerken (Abgrenzung Ersatzneubau) – LPI-ING
- [3] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2007) Richtlinie für die Erhaltung von Ingenieurbauwerken – RI-ERH-ING – Leitfaden Objektbezogene Schadensanalyse, OSA
- [4] Deutscher Beton- und Bautechnikverein e. V. (2014) Anwendung zerstörungsfreier Prüfverfahren im Bauwesen – Non-Destructive Testing Methods in Civil Engineering. Eigenverlag, Berlin.
- [5] Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung e.V. Merkblätter B-Reihe DGZfP, Berlin.