

Zerstörungsfreie und minimalinvasive Prüfung von Holzbrücken

Frank LEHMANN, Gerhard DILL-LANGER, Kai HÖRSTING, Markus KRÜGER,
Christian GROßE, Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart, Stuttgart
Reinhold FRENZL, Regierungspräsidium Stuttgart, Stuttgart

Kurzfassung. An insgesamt 16 Holzbrücken wurden zerstörungsfreie und zerstörungsarme Prüfungen zur Detektion von Schädigungen durch Innenfäule durchgeführt. Dabei kamen Ultraschall-, Bohrwiderstands- und Holzfeuchtemessungen zur Anwendung. Zudem wurden unter Laborbedingungen an verschiedenen Brett-schicht- und Vollholzquerschnitten wesentliche Einflussparameter auf die Ultraschallmessungen untersucht und die verschiedenen Verfahren hinsichtlich ihrer Aussagekraft bewertet.

1 Einführung

Holz ist einer der ältesten Werkstoffe der Menschheit. Es ist trotz seiner geringen Rohdichte sehr fest und hält bei geringer Verformung hohen Belastungen stand. Darüber hinaus ist Holz leicht zu bearbeiten und besitzt eine hohe Lebensdauer. Werden jedoch grundlegende Regeln des Holzschutzes vernachlässigt oder die Konstruktion keiner fachgerechten Wartung unterzogen, können biotische Schäden entstehen, zu denen beispielsweise Pilzbefall zählt. Neben sichtbaren Schädigungen an der Oberfläche, wie beispielsweise Oberflächenfäule oder Risse, stellen vor allem die nicht sichtbaren Strukturänderungen durch Innenfäule eine Gefährdung dar.

Aufgrund eines entsprechenden Schadensfalls an einer Holzbrücke ordnete das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung eine Sonderprüfung für alle 186 im Bereich der Bundesfernstraßen befindlichen Holzbrücken an. Hierbei sollten die Bauwerke unter Einsatz von zerstörungsfreien oder zerstörungsarmen Prüfverfahren, unter anderem mittels Ultraschallverfahren, auf Schädigungen durch Innenfäule untersucht werden. Im Regierungsbezirk Stuttgart wurden in der Folge 16 Brückenbauwerke geprüft und der Einsatz von Ultraschallverfahren zur Detektion von Fäulnisschädigungen evaluiert.

2 Eingesetzte zerstörungsfreie und zerstörungsarme Prüfverfahren für Holz

2.1 Sichtprüfung

Die Sichtprüfung ist i.d.R. die erste durchgeführte Prüfungsart an einem Bauteil oder einem Bauwerk, da hier bereits viele Mängel oder Hinweise auf Schädigungen erkannt werden können. Sie setzt eine handnahe Zugänglichkeit aller relevanten Stellen und eine ausreichende Kenntnis des zu untersuchenden Bauwerkstoffs voraus. Die Brückenprüfungen nach DIN 1076 [1] sind in großen Teilen erweiterte Sichtprüfungen.

2.2 Ultraschallverfahren

Durch die ausgeprägte Anisotropie und Inhomogenität von Holz und Holzbauteilen unterscheiden sich die derzeitigen Möglichkeiten in der zerstörungsfreien Prüfung mittels Ultraschallverfahren deutlich von denen der Prüfung von Beton oder gar Stahl. Es gibt derzeit keine Norm oder Richtlinie, die die Anwendung von Ultraschallverfahren zur Prüfung von Holzbauteilen regelt. Aus den Forschungsergebnissen der letzten Jahre geht hervor, dass zur Prüfung von Voll- und Brettschichtholz mit Ultraschall-Laufstrecken im Bereich von mehreren Dezimetern eine Hochvolt-Ultraschallquelle in Verbindung mit niederfrequenten Ultraschall-Transversalwellen vorteilhaft ist. Im Folgenden wurde daher ein handelsübliches Ultraschall-Scherwellenarray mit 200 V Impulsamplitude bei einer Anregefrequenz von 55 kHz verwendet.

Die Schallgeschwindigkeit in Holz hängt von einer Vielzahl an Einflussfaktoren ab. Dabei sind insbesondere zu nennen:

- die Anisotropie, d.h. der Winkel zwischen Holzfaserrichtung und Einschallrichtung,
- der Feuchtegehalt und
- Holzfehler, z.B. Äste.

Bei Untersuchungen zu Schallgeschwindigkeiten kommt es daher zu einer erheblichen Streuung der Messergebnisse. Ebenso macht dieser Umstand eine exakte Kalibrierung der verwendeten Messgeräte nahezu unmöglich. Durch die Mittelung mehrerer Messungen oder den Einsatz von Sensorarray-Prüfköpfen kann zwar der Einfluss von Ästen oder anderen kleinen Strukturänderungen, die nicht als Schädigung zu werten sind, verringert werden, jedoch wird dadurch die Fehlerauflösung verschlechtert.

Für weiterführende Informationen zur Ultraschallprüfung von Holz sei hier auf *Hansenstab* [3] verwiesen.

2.3 Bohrwiderstandsmessungen

Bei der Bohrwiderstandsmessung wird der Eindringwiderstand einer feinen Bohrnadel in das zu prüfende Holz gemessen und in Abhängigkeit der Tiefe aufgezeichnet. Anhand der so gewonnenen Kurven kann eine Beurteilung des strukturellen Aufbaus des Messobjekts und des Holzzustands erfolgen. Ein geringer Bohrwiderstand korreliert dabei mit einer geringen Rohdichte des Holzes. Der Bohrwiderstand eines von Fäulnis befallenen Bereichs liegt in der Regel unterhalb der Messgrenze.

2.4 Holzfeuchtemessungen

Die Durchführung von Holzfeuchtemessungen nach dem elektrischen Widerstandsprinzip ist in der DIN EN 13183-2 [2] geregelt. Dabei werden zwei bis auf die Spitzen nichtleitend ummantelte Elektroden in das Prüfobjekt eingeschlagen und der elektrische Widerstand zwischen den Elektroden gemessen. Die Holzfeuchte lässt sich mittels Kalibrierkurven für die gemessene Holzart ermitteln. Feuchten größer als 20 % begünstigen Pilzwachstum im Holz und sind damit als kritisch einzustufen [3].

3 Untersuchungen an Referenzkörpern

Als Referenzmessungen zu den Brückenprüfungen wurde ein Versuchsprogramm unter Variation verschiedener Parameter durchgeführt. Dabei wurde unter anderem das Reflexionsverhalten von Ultraschallwellen (Ultraschall-Echo-Verfahren, UE) an Innenfäule im Vergleich zu Hohlstellen untersucht. Dazu wurden Sägeschnitte in einen Brettschichtholz-

träger eingebracht und Ultraschallmessungen an dem Querschnitt durchgeführt. Anschließend wurden die Hohlstellen mit feuchten Sägespänen verpresst und erneut der Träger mit Ultraschall untersucht. In Abbildung 1 ist der B-Scan vor und nach der Verpressung mit Sägespänen dargestellt.

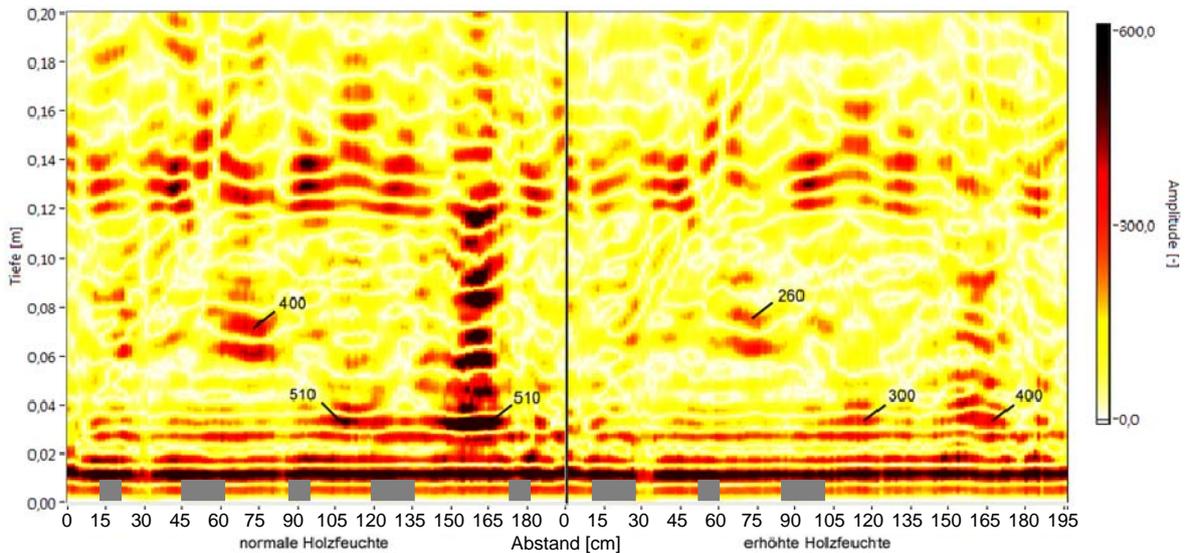


Abbildung 1. UE-Messung an einem Brett-schicht-holzträger mit Fehlstellen (links), bzw. mit Verpressung durch feuchte Sägespäne (rechts). Die Lage der Fehlstellen ist an der Abszisse mit grauen Balken gekennzeichnet. Messpunktsabstand 1,5 cm.

Die Einzelmessungen sind hierbei horizontal (B-Scan) nebeneinander angeordnet; der Signalverlauf entspricht der positiven Ordinatenrichtung. Die jeweiligen Signalamplituden sind über die rechts angegebene Farbskala codiert. Der Abstand der Einzelmessungen ist unterhalb der Abbildung angegeben, wobei das Messraster 1,5 cm beträgt. Der linke Bildteil entspricht den Messungen am Träger mit Fehlstellen ohne Verpressung, der rechte den Messungen am Träger mit verpressten Fehlstellen. Die Amplitude des Rückwandechos bei 12 cm ist in beiden Messungen nahezu identisch, während die Reflexionen an den Fehlstellen auf etwa 2/3 des Ursprungswerts abfallen. Die Fehlstelle zwischen 20 und 30 cm mit einer Ausdehnung von 10 x 10 cm in 6 cm Tiefe kann infolgedessen nicht mehr ausreichend klar identifiziert werden. Es ist zu vermuten, dass die Reflexion an realer Innenfäule günstigenfalls eher dem zweiten untersuchten Fall entspricht. Die Reduktion der Reflexionsamplituden liegt zum einen an der erhöhten Dämpfung der Wellen im feuchten Bereich des Holzes, zum anderen an dem verringerten Impedanzkontrast zwischen Holz und Sägespänen im Vergleich zu Holz und Luft.

Zum direkten Vergleich der UE-Messungen mit der vorhandenen Holzstruktur wurde im Anschluss an die Messungen ein Träger zersägt. In Abbildung 2 ist die Schnittfläche unterhalb der zugehörigen UE-Messung zu sehen. Deutlich zu erkennen sind in beiden Teilbildern die mit Sägespänen verpressten Fehlstellen. Einige kleinere Reflexionen lassen sich Ästen und Harzeinschlüssen zuordnen. Im Allgemeinen zeichnet die UE-Messung ein gutes Abbild der tatsächlich vorhandenen Holzstruktur.

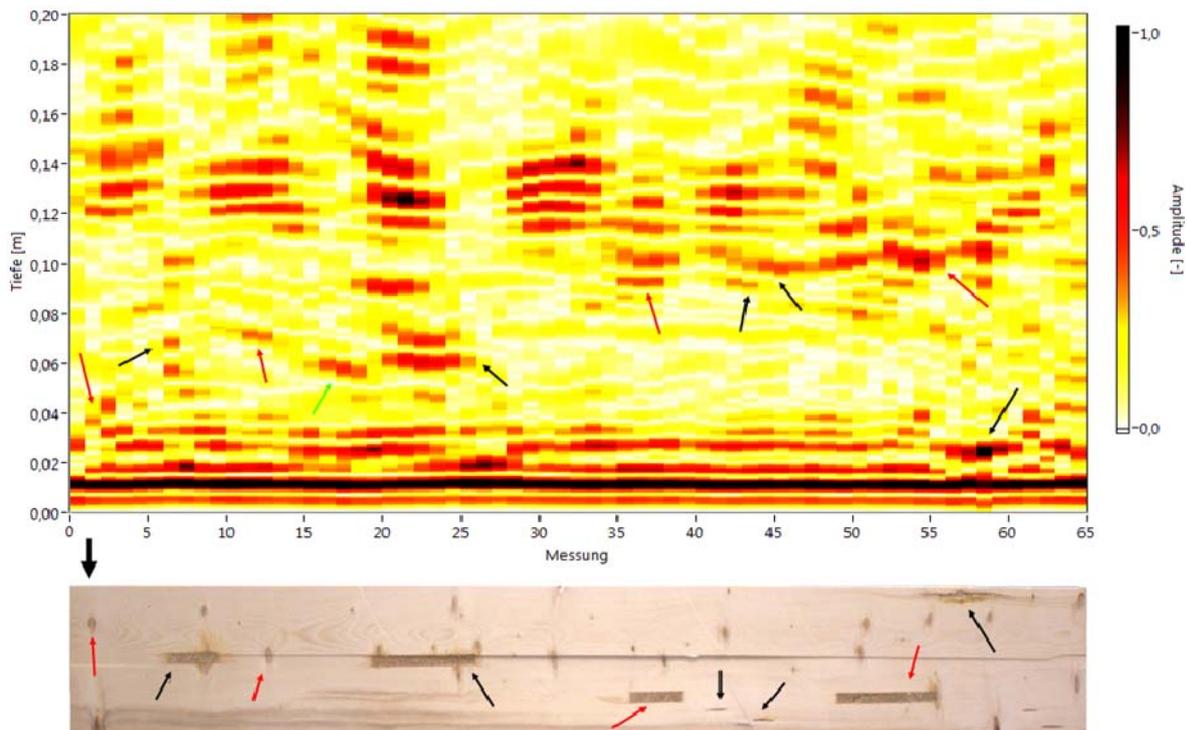


Abbildung 2. Vergleich zwischen Ultraschallmessungen und vorhandener Holzstruktur.

4 Messungen an Brückenbauwerken

An insgesamt 16 Holzbrücken wurden zerstörungsfreie und zerstörungssarme Untersuchungen zur Detektion von Schädigungen durch Innenfäule durchgeführt. Aufgrund der festgestellten Schädigungen wurden 4 Brücken ganz oder teilweise gesperrt. Im Folgenden werden die am stärksten von Schädigungen betroffenen Brückenbauwerke vorgestellt.

4.1 3-Feld-Trogbrücke bei Stuttgart-Büsnau

Bereits bei der visuellen Prüfung wurden die Nebenträger (vgl. Abbildung 3) als kritisch eingestuft, da mehrere Verbindungsmittel von Hand aus dem Holz gezogen werden konnten. Bei der anschließenden Prüfung wurden zwei Bohlen entfernt, bei denen die Nagelverbindungen gelockert waren und somit lediglich auf den Nebenträgern auflagern. Es wurde dabei eine fortgeschrittene Fäulnis der Nebenträger festgestellt (Abbildung 5). Bei anschließend durchgeführten Ultraschallmessungen sollte die räumliche Ausdehnung des Schadens quantitativ untersucht werden. Bei den UE- und UT-Messungen entlang der Nebenträger wurden etliche Stellen mit Verdachtsmomenten auf eine Fäulnisschädigung gefunden. Abbildung 4 zeigt beispielhaft das Ergebnis von UE-Messungen am Nebenträger NII.

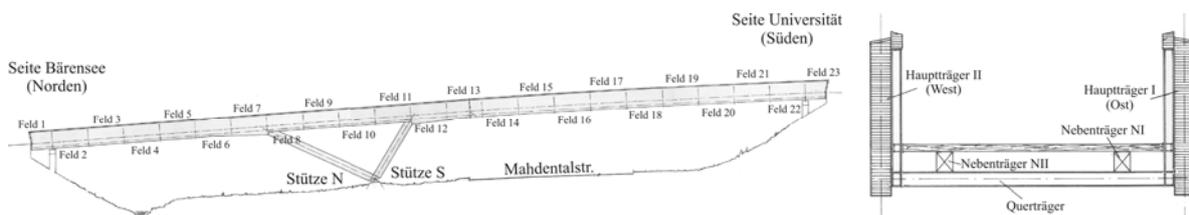


Abbildung 3. Ansicht und Querschnitt der Brücke bei Stuttgart-Büsnau.

Im Vergleich zu Labormessungen ist die Interpretation der Messergebnisse, v.a. im A-Scan, schwierig. Bis zu der Solltiefe von 20 cm sind viele Reflexionen vorhanden, deren Herkunft nicht eindeutig geklärt werden kann. Eine Kalibrierung der Wellengeschwindigkeit vor Ort war anhand der Einzelmessungen nicht möglich. Erst im B-Scan lässt sich eine durchgehende Linie zwischen 16 und 18 cm erkennen, die das Rückwandecho anzeigt. Im Bereich der Messungen 3 bis 13 ist diese nicht zwischen 16 und 18 cm vorhanden, woraus sich hier eine langgestreckte Fehlstelle vermuten lässt.

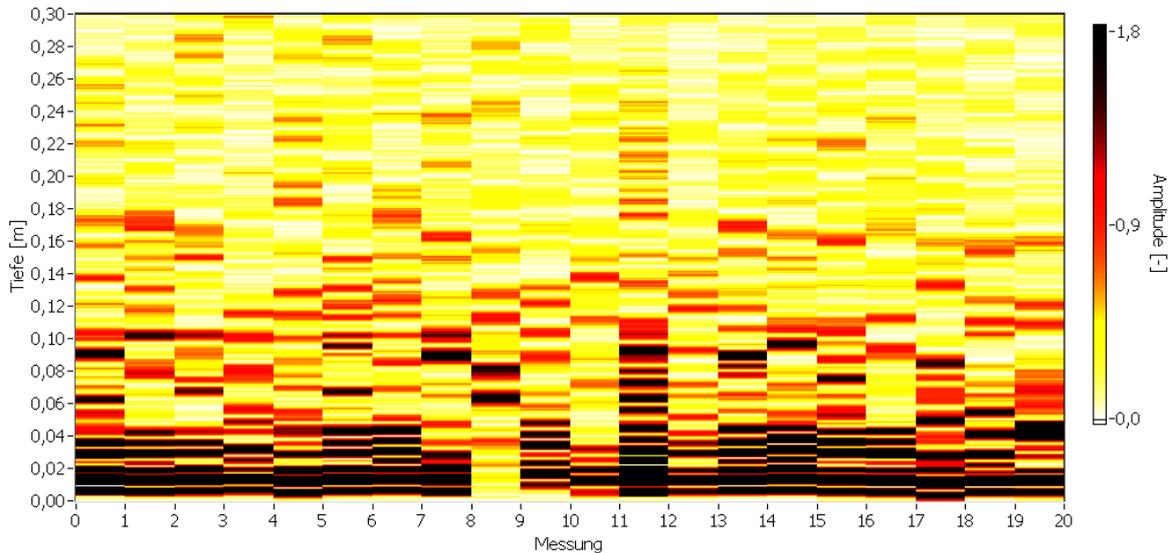


Abbildung 4. Ultraschall-Echo Messung am Nebenträger NII. Messraster 0,20 m.

Zur Kontrolle des Verdachts wurden mehrere Bohrwiderstandsmessungen durchgeführt. Abbildung 6 zeigt exemplarisch Daten einer der Bohrwiderstandsmessungen durch den Bohlenbelag und den anschließenden Nebenträger. Nach ca. 70 mm Bohrweg fällt der Bohrwiderstand unter die Registriergrenze ab. In diesem Bereich liegt eine Schädigung der Holzstruktur vor, die von einer dünnen Deckschicht von ca. 10 mm Stärke verdeckt ist (vgl. Abbildung 5). Die Innenfäule erstreckt sich über etwa ein Viertel des gesamten Bauteilquerschnitts; ab 145 mm ist im Bohrwiderstandsdiagramm wieder die typische Wellenform durch Früh- und Spätholz zu erkennen. Die festgestellten Schädigungen konnten durch umfangreiche Holzfeuchtemessungen weiter bestätigt und zusätzliche Schädigungsstellen erkannt werden. In den Nebenträgern zeigt sich ein Anstieg der Holzfeuchte über den Querschnitt von unten 18 % auf oben > 48 %, was dem obigen Befund entspricht.



Abbildung 5. Geschädigter Nebenträger NII nach der zerstörenden Überprüfung der Messergebnisse.

An den Stößen der Hauptträger und an den Stützenfüßen konnten aufgrund der innenliegenden Stahlbleche und zugehörigen Verbindungsmittel weder Ultraschall- noch Bohrwiderstandsmessungen durchgeführt werden. Die zerstörungswarmen Holzfeuchtemessungen zeigten aber an beiden Positionen stark erhöhte Werte im Bereich zwischen 25 und 45 %. Bei einer anschließenden zerstörenden Prüfung konnte am Stützenfuß eine Fäulnisbeschädigung bestätigt werden.

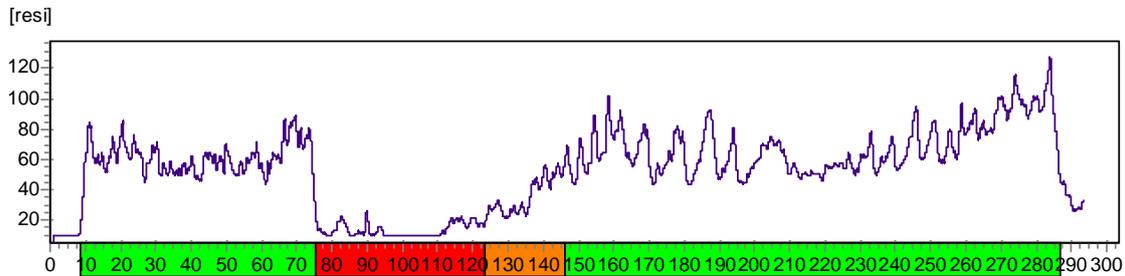


Abbildung 6. Vergleichende Bohrwiderstandsmessung an Nebenträger NII (zu Messung 5 in Abbildung 4).

Als Hauptursache für die ausgeprägte Innenfäule der Nebenträger wurde eine unzureichende Abdichtung auf den Trägern in Kombination mit den von oben durch die Bohlen geschlagenen Nägeln identifiziert. Diese waren in großen Teilen korrodiert und infolgedessen im Querschnitt reduziert. Durch die so entstandenen Hohlräume zwischen Nagel und Holz konnte das Wasser ungehindert weit in die Nebenträger eindringen, wo es anschließend nur langsam wieder an die Oberfläche gelangen konnte. Die daraus resultierende dauerhaft hohe Holzfeuchte führte zur der aufgetretenen Innenfäule. Insbesondere aufgrund der fortgeschrittenen Fäulnis der Nebenträger und der fäulnisbedingten, unzureichenden Befestigung der Bohlen an den Nebenträgern wurde eine Sperrung der Brücke für motorisierten Verkehr und Reiter empfohlen.

4.2 Sechsstegige 4-Feld-Plattenbalkenbrücke bei Stuttgart-Weilimdorf

An einer Stütze des Bauwerks (Abbildung 7) wurde bei der Sichtprüfung eine kleine von Ameisen genutzte Öffnung entdeckt. Eine in der unmittelbaren Nähe durchgeführte Bohrwiderstandsmessung lieferte lediglich bei 10 und 250 mm (Ein- und Austritt der Bohrnadel) einen geringen Widerstand (Abbildung 8).

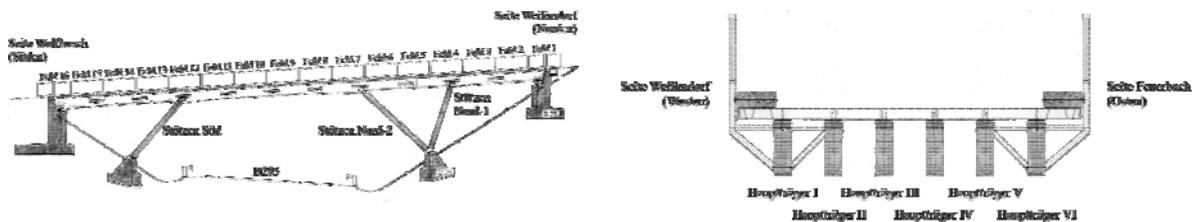


Abbildung 7. Ansicht und Querschnitt der Brücke bei Stuttgart-Weilimdorf.

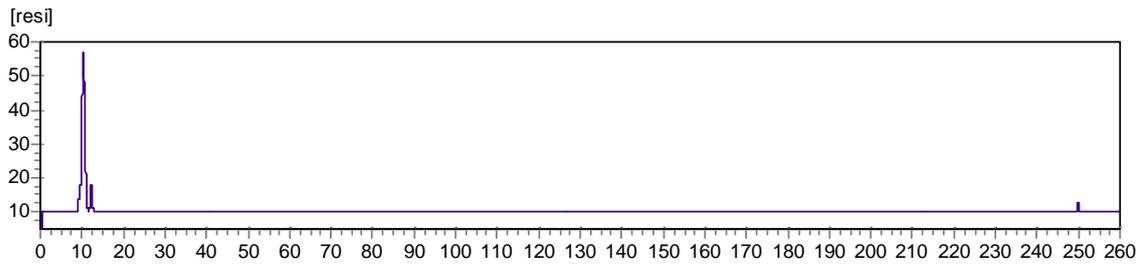


Abbildung 8. Bohrwiderstandsmessung an einer geschädigten Stütze.

Bei der anschließenden zerstörenden Öffnung der Stütze wurde die umfassende Schädigung mehrerer Brettschichtholzlamellen auf einer Breite von etwa 15 cm über die gesamte zugängliche Höhe festgestellt (Abbildung 10).

Die durchgeführten Holzfeuchtemessungen ließen darauf schließen, dass als Schadensursache ein lokaler Eintrag von Wasser trotz der vorhandenen Holzverkleidung erfolgt. Die Ameisen traten sekundär als Nutznießer des verrotteten Holzes auf.

4.3 Sechsstegige 3-Feld-Plattenbalkenbrücken bei Ellwangen-Neunheim

Aufgrund vormals festgestellter Fäulnisschädigungen waren alle Haupttragelemente der Brücke nachträglich 3-seitig zum vermeintlichen Witterungsschutz mit einer Blechverkleidung versehen worden. Im Zuge der Sonderprüfung wurden einzelne Bleche für die Inspektion entfernt.

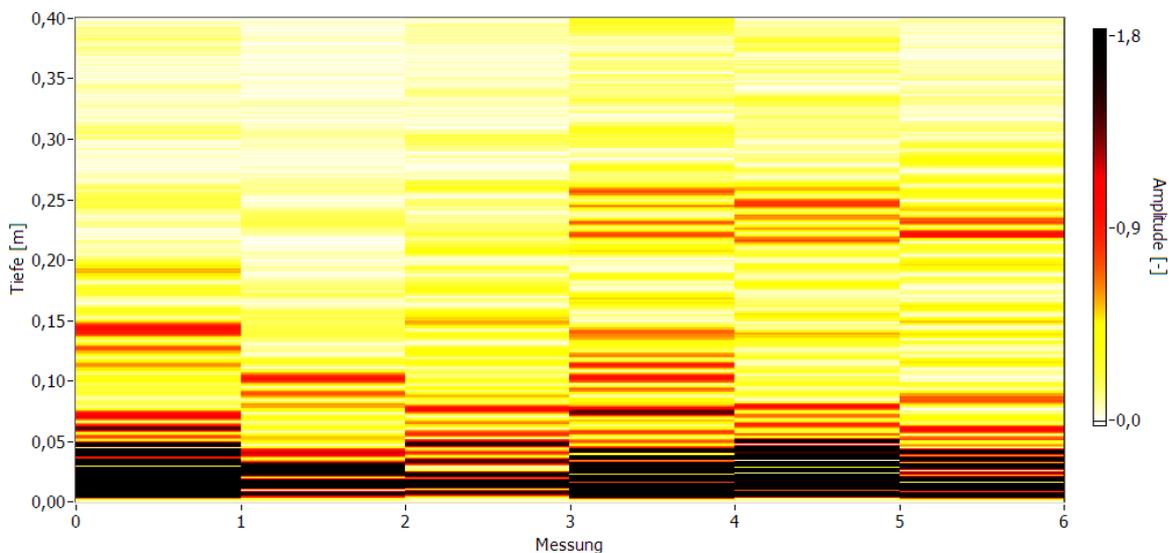


Abbildung 9. UE-Messung an einem Hauptträger von unten nach oben. Messrater 10 cm.

Die in Abbildung 9 dargestellte vertikale UE-Messung eines Hauptträgers zeigt für die ersten 3 Werte kein Echo in der Solltiefe von 24 cm. Daraufhin wurden Bohrwiderstands- und Holzfeuchtemessungen durchgeführt, deren Ergebnisse eine großflächige Schädigung mehrerer Hauptträger bestätigten (Abbildung 11). Teilweise waren die Träger über die gesamte Querschnittshöhe von 75 cm vermodert. Die Brücke wurde umgehend gesperrt.



Abbildung 10. Fehlstelle an der Stütze einer Brücke bei Stuttgart-Weilimdorf nach der zerstörenden Untersuchung.



Abbildung 11. Vermoderte Stelle am Hauptträger einer Brücke bei Ellwangen-Neunheim.

Als Schadensursache wurde bei dieser Brücke die nachträglich zum Schutz der Konstruktion angebrachte Blechverkleidung in Verbindung mit einem Wassereintrag über den Bohlenbelag ermittelt. Wegen der Bleche war eine Luftzirkulation am Holz nicht möglich und von oben eintretendes Wasser konnte nur schlecht verdunsten. Die visuelle Prüfbarkeit wurde zudem stark eingeschränkt, weswegen das Ausmaß des Fäulnisprozesses lange unerkannt blieb.

5 Schlussfolgerungen

Der Einsatz verschiedener zerstörungsfreier und zerstörungsarmer Prüfverfahren an Holzbauteilen ermöglicht wichtige Erkenntnisse über die untersuchten Bauwerke. Im Vergleich zu den regelmäßig durchgeführten visuellen Brückenprüfungen können auch Schädigungen erkannt werden, die hauptsächlich unter der Holzoberfläche vorhanden sind. Für die erfolgreiche Detektion, quantitative Erfassung und Bewertung der Fäulnisschäden sind folgende Bedingungen, Voraussetzungen und Methoden – nach Relevanz geordnet – maßgeblich:

1. Für eine zutreffende Beurteilung von Holzbrücken ist die handnahe Inaugenscheinnahme aller tragenden Teile eine unabdingbare Voraussetzung. Dies umfasst neben der Verfügbarkeit geeigneter technischer Hilfsmittel wie Hubsteiger oder Brückenuntersichtgerät auch zwingend die temporäre Entfernung von Verkleidungen an allen zu beurteilenden Traggliedern.
2. Für die Detektion und die zutreffende Einschätzung von Schadensstellen ist eine ausreichende Kenntnis der Eigenschaften und des Schädigungsverhaltens des Werkstoffes Holz sowie der grundlegenden Prinzipien des Holzbaus eine weitere wichtige Voraussetzung.
3. Die einfachste und vermutlich wichtigste minimalinvasive Prüfmethode ist die Holzfeuchtemessung nach dem Widerstandsprinzip mittels Einschlagelektroden. Aufgrund des engen Zusammenhangs zwischen länger andauernder Durchfeuchtung und holzerstörendem Pilzbefall kann ein hinsichtlich Holzfäule gefährdeter Bereich durch Holzfeuchtemessungen in vielen Fällen eingegrenzt werden.
4. Die Bohrwiderstandsmethode erlaubt eine eindeutige Identifizierung auch innenliegender Fäulnisschäden. Hierbei ist einschränkend zu bemerken, dass die Interpretation der Bohrwiderstandskurven ein hohes Maß an Erfahrung und zusätzlich gewisse Kenntnis der Holz Anatomie erfordert. Die Schäden sind nur bei (wenigstens lokal) fortgeschrittenem Stadium der Holzschädigung leicht zu erkennen und die Re-

sultate gelten jeweils nur für einen Messpunkt. Zudem ist die Bohrtiefe begrenzt und es sind bestimmte geometrische Randbedingungen der Zugänglichkeit für das Bohrwiderstandsgerät erforderlich.

5. Die ultraschallbasierten zerstörungsfreien Verfahren können von Experten erfolgreich eingesetzt werden, um geschädigte und ungeschädigte Bereiche flächig voneinander abzugrenzen. Die Streuung der Resultate ist jedoch beim derzeitigen Stand der Technik so hoch, dass der alleinige Einsatz des Verfahrens zur Fehlstellendetektion in Holzbauteilen noch nicht empfehlenswert ist. Desweiteren ist das Verfahren an eine Reihe von Voraussetzungen gekoppelt. So darf für erfolgreiche Echo-Messungen die Dicke der Holzelemente einen Wert von ca. 25 cm nicht deutlich überschreiten. Bei Holzarten mit sehr hoher Rohdichte ist das Verfahren nicht oder nur unter günstigen Voraussetzungen anzuwenden. Das Vorhandensein von flächigen Verbindungsmitteln oder Einbauteilen aus Stahl schließt die Verwendung sowohl der Ultraschallverfahren, als auch von Bohrwiderstandsmessungen an diesen Stellen aus. Insgesamt befindet sich die Anwendung der Ultraschallverfahren auf die Schadensdetektion in Holzbauteilen noch in einem Forschungs- bzw. Entwicklungsstadium und kann nur in Sonderfällen von wissenschaftlich geschulten Experten als ergänzendes Analyseverfahren angewandt werden.

Durch die Kombination der vier aufgeführten zerstörungsfreien und zerstörungsarmen Verfahren kann die Aussagefähigkeit der Messergebnisse verbessert werden. Eine alleinige Untersuchung mit einem einzelnen Verfahren wird nach dem momentanen Kenntnisstand als nicht sinnvoll erachtet.

6 Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei Herrn S. Aicher, Herrn N. von Ruckteschell und Herrn J. Hezel für die Mitwirkung an dem Projekt. Besonderer Dank gilt Herrn K. Kammerer vom Regierungspräsidium Stuttgart für die Unterstützung bei den Messungen.

7 Referenzen

- [1] NORM: DIN 1076: 1999-11. *Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen - Überwachung und Prüfung*
- [2] NORM: DIN EN 13183-2: 2002-07. *Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz - Schätzung durch elektrisches Widerstands-Messverfahren*
- [3] HASENSTAB, A.: *Integritätsprüfung von Holz mit dem zerstörungsfreien Ultraschallverfahren*. Berlin, Technische Universität, Fakultät VI, Dissertation, 2005.
- [4] HÖRSTING, K.: *Zerstörungsfreie Untersuchung von Holzbauteilen auf Fehlstellen und Fäulnisschädigungen unter Verwendung von Ultraschallverfahren*. Stuttgart, MPA Universität Stuttgart, Diplomarbeit, 2009.