

Möglichkeit zur Schadenseingrenzung mittels Ultraschallecho-Untersuchungen am Beispiel einer Spannbetonbrücke und einer Tiefgaragenbodenplatte sowie Bestimmung der Lage von Fundamenten unter der Bodenplatte mittels Radar

Andreas HASENSTAB¹, Y. SCHIEGG, B. MÜHLHAN²

¹Ingenieurbüro Dr. Hasenstab GmbH, Augsburg, Deutschland

²Technik und Forschung im Betonbau AG, Wildegg, Schweiz

Kurzfassung: In der Vergangenheit hat sich gezeigt, dass sich an mehreren Stellen einzeln auftretende Schäden an Ingenieurbauwerken bei der Instandsetzung oft als umfassendere Problemstellung darstellten und die Instandsetzung dann unverhofft ein Mehrfaches der ursprünglich geplanten Aufwendung erforderte.

Um diese unerwartete Kostensteigerung und Verlängerung der Bauzeit zu verhindern, ist es möglich, Bauwerke mittels zerstörungsfreier Prüfungen großflächig zu untersuchen und so Schäden einzugrenzen sowie ungeschädigte von geschädigten Bereichen abzugrenzen. So können die vorhandenen Mittel für die Umbauten und Instandsetzungen gezielt eingesetzt werden.

An Hand einer Spannbetonbrücke in der Schweiz (Überführung der Eisenbahn über eine Autobahn) wird eine systematische Untersuchung eines Brückenträgers mittels **Ultraschallecho** sowie die graphische Darstellung als Flächenauswertung dargestellt werden. Ergebnisse von anschließenden Sondierungen werden ergänzend vorgestellt.

Das verwendete akustische Verfahren Ultraschall-Echo eignet sich sehr gut, um im mineralischen Werkstoff Beton innere Schäden wie Kiesnester indirekt über ein Ausbleiben des Rückwandechos zu detektieren. An ungeschädigten Bereichen kann dies durch ein deutliches Echo an der Bauteilrückseite dargestellt werden. Die Grundlagen für dieses Ultraschallechoverfahren an Beton wurden von Dr. Krause an der BAM, entwickelt.

Die Leistungsfähigkeit des Ultraschallechoverfahrens wird im zweiten Praxisbeispiel, einer undichten Bodenplatte einer Tiefgarage eines Kaufhauses, aufgezeigt. Bei der Bodenplatte, welche noch nach etwa 300 Verpressversuchen nach wie vor undicht war, konnten die vorhandenen wasserführenden Kiesnester und Hohlstellen sowie Minderdicken der Bodenplatte mittels einer flächigen Messung eindeutig dargestellt werden. Die Ergebnisse der Ultraschall-Messungen und die bestätigenden Bohrkernaufnahmen werden im zweiten Beitrag vorgestellt.

Mit dem elektromagnetischen **Radarverfahren** kann Bewehrung sehr gut lokalisiert werden. Außerdem ist es möglich, die Lage und die Abmessung von Fundamenten unter einer Bodenplatte zu bestimmen. Diese Möglichkeiten werden

im dritten Praxisbeispiel dargestellt, einem Bestandsbau aus den 60er Jahren mit lückenhafter Bestandsstatik, der aufgestockt werden sollte (Laständerung).

1. Ziele der zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen

Das Ziel einer Anwendung der zFPBau-Verfahren ist

- die zerstörungsfreie Bauwerksuntersuchung,
- frühes Erkennen und Eingrenzung von Schäden,
- die Kostenabschätzung bei Instandsetzung sowie
- die zerstörungsfreie Dokumentation und Integritätsprüfung des Bauteilzustandes.

Hierbei kann es sich – in Abhängigkeit vom Baustoff – um Schäden wie

- Hohlstellen, Kiesnester,
- fehlende Bewehrung und
- Innenfäule

oder um Fragestellungen wie Lage der

- Spannglieder, Leitungen,
- vorhandenen Bewehrung und
- deckengleicher Unterzüge und
- Bauteilmessungen etc. handeln.

2. Zerstörungsfreie Prüfverfahren

Eine grobe Zusammenstellung der verwendeten Verfahren kann Tabelle 1 entnommen werden. Eine umfangreiche Liste der zFP-Bau-Verfahren kann dem Kompendium der BAM [1] oder dem Bauphysikkalender [2] entnommen werden.

Tabelle 1: Zerstörungsfreie Prüfverfahren im Bauwesen (zFPBau) [HAS2008]

Elektromagnetische Verfahren:	Akustische Verfahren:	Sonstige Verfahren:
Radar	Ultraschall-echo	Bohrwiderstand, LIBS,
Thermographie (passiv / aktiv)	Impact Echo	Endoskopie,
Durchstrahlung	Pfahlprüfung	Potentialfeldmethode, Rückprallhammer, Bewehrungsortung

2.1. Radar (auch Impulsradar, Georadar)

Radar ist ein zerstörungsfreies Prüfverfahren, mit dem Störungen und Inhomogenitäten in massiven Körpern (Bauwerken, Bauteilen, Boden) durch Reflexionen von elektromagnetischen Wellen festgestellt werden können. Gemessen wird die Laufzeit und Amplitude der empfangenen Radarwellen und deren Messposition.

Die Anwendungsmöglichkeiten von Radar sind vielfältig. So wird Radar

- im Beton- und Stahlbetonbau,
- in historischen Bauwerken (Mauerwerk, Holz [3]),

¹ BAM2004

² WAL2012

- für Verkehrswege (Schichtaufbau, Tragschicht),
- für Erdbauwerke/Dämme,
- für Baugrunduntersuchungen sowie
- in der Archäologie

mit dem Ziel verwendet, den strukturellen Aufbau (Schalen, Abmessungen), Einbauteile (Bewehrung, Klammern, Dübel, Anker, Leitungen, Fundamente) und Schadstellen (Risse, Ablösungen) zu orten.

Die physikalischen Grenzen von Radar sind

- das Vorhandensein von Metall (z. B. einer Alufolie in einer Bitumenbahn) → führt zu Totalreflexion,
- nasse Oberflächen → führt teilweise zu extremer Signaldämpfung.

Je nach Umgebung und Antennengröße kann die Messung von Hand, mit einem kleinen Wagen oder vom Auto aus durchgeführt werden. Weiterführende Literatur zum Thema Radar kann [4] und [5] entnommen werden.

2.2. Ultraschallecho

Die Ultraschall-Echotechnik beruht auf der Reflexion von Schallwellen an Diskontinuitäten wie Werkstoff-Inhomogenitäten, Grenzflächen, Hohlstellen oder der Bauteilrückwand.

Im Bauwesen kann Ultraschallecho an Beton [6], [7] und Holz [8], [9] angewendet werden. Einsatzmöglichkeiten sind

- die Bestimmung von Bauteilabmessungen (gleichmäßige Dicke, Aussparungen),
- die Ortung von Schäden (Hohlstellen, Kies-nester, Ablösungen, Rissen parallel zur Oberfläche, Fäulnis, Äste) sowie
- die Ortung von Schichtwechselln und stofflichen Inhomogenitäten.

Bei Vorhandensein eines Echosignals von der Bauteilrückseite kann davon ausgegangen werden, dass das Bauteil in diesem Bereich ungeschädigt ist.

Grenzen von Ultraschallecho liegen zum einen in der Zugänglichkeit des Bauteils (ein direktes Ankoppeln an das Bauteil ist erforderlich), zum anderen wenn eine Materialschicht auf dem zu untersuchenden Bauteil aufgebracht ist (z. B. Estrich und Folie auf einer Betonplatte).

3. Praxisbeispiele

Im folgenden Abschnitt werden die erläuterten zerstörungsfreien Prüfverfahren an Hand von Beispielen dargestellt.

3.1. Spannbetonbrücke (Überführung der Eisenbahn über eine Autobahn in der Schweiz) mit Verdacht auf inneren Hohlräumen

Fragestellung:

Während Instandsetzungsarbeiten an der Unteransicht einer Spannbetonbrücke aus den 60er Jahren sind Bereiche mit starken Betonmischungen (Kiesnester) sowie bereits in

³ HAS2007

⁴ MAI2006

⁵ WAL2012

⁶ WAL2012

⁷ STR2008

⁸ HAS2005

⁹ HAS2008

der Vergangenheit instand gestellte Zonen aufgefallen. Nun stellte sich die Frage, ob weitere, von außen nicht erkennbare Strukturschäden wie Kiesnester oder Hohlräume im Inneren der Betonkonstruktion vorhanden sein könnten.

Lösungsansatz:

Ausschließen von inneren Schäden durch zerstörungsfreien Ultraschallecho-Prüfungen an Messlinien entlang der Brücke.



Abbildung 1: Brückenbauwerk im Überblick und Untersuchung mittels Ultraschallecho direkt am Bauwerk

Die Brücke wurde in zwei Messabschnitten untersucht.

Zu Beginn wurden die Bereiche mit den offensichtlichen Schäden untersucht, wobei ein Messlinienabstand von 1m angewandt wurde. Wenn die Auswertung vor Ort (in situ) einen Verdacht auf eine innere Schädigung ergab, wurden die Ausdehnung der Schäden mittels zusätzlicher Messlinien eingegrenzt.

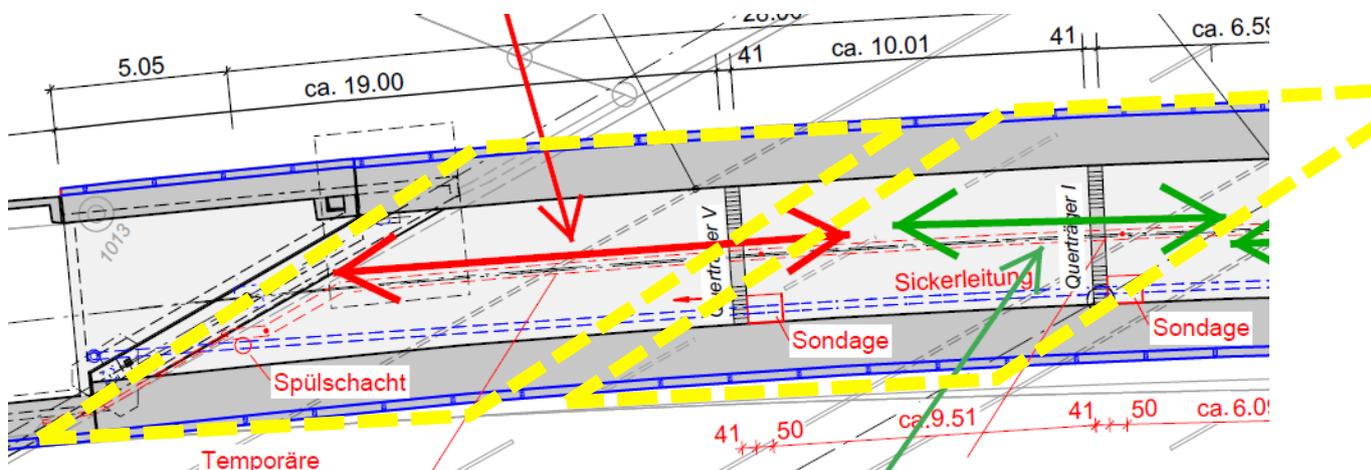


Abbildung 2: Brückenbauwerk im Überblick mit Untersuchungskampagne 1 (links) und Untersuchungskampagne 2 (rechts)

Exemplarisch sind nachfolgend die Ergebnisse entlang einer Messlinie dargestellt:

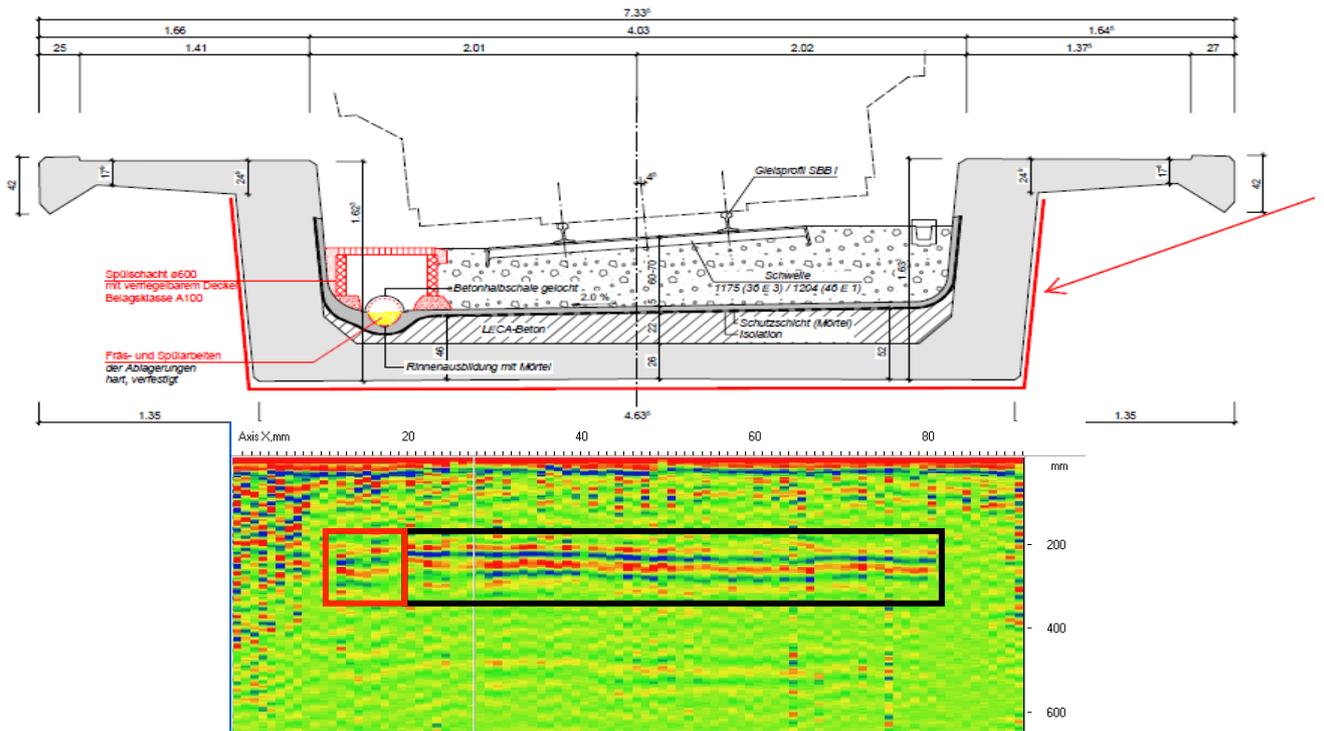


Abbildung 3: Schnitt des Brückenbauwerks und zugehörige Ergebnisse einer Messung mit Ultraschallecho entlang der Untersicht; ein deutliches Echo von der Bauteilrückseite (schwarzer Kasten) deutet auf eine homogene Struktur ohne innere Schäden hin, Bereich mit schwächeren Echos und längeren Laufzeiten (roter Kasten) deutet auf mögliche Inhomogenität im Beton hin. Im Bereich der Stege gibt es keine Echos, da der Schallweg zu lange ist (Die Steghöhe ist über 1,6 m).

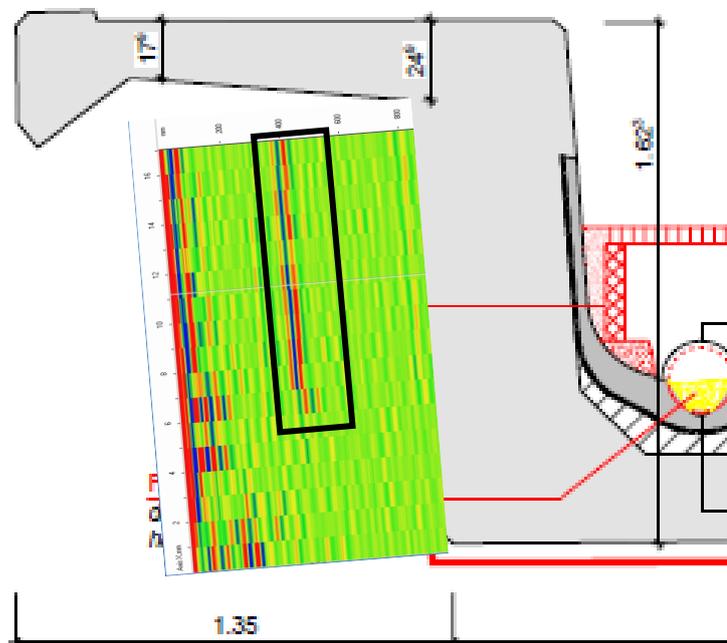


Abbildung 4: Schnitt des Brückenbauwerks und zugehörige Ergebnisse einer Messung mit Ultraschallecho entlang der Höhe des Steges; Deutliche Echos von der Bauteilrückseite (schwarzer Kasten) deuten auf eine homogene Struktur ohne innere Schäden hin. Im Bereich der Untersicht gibt es keine Echos, da der Schallweg zu lange ist (Die Trogbreite ist grösser als 7 m).

Die einzelnen Messlinien wurde dann flächige ausgewertet.

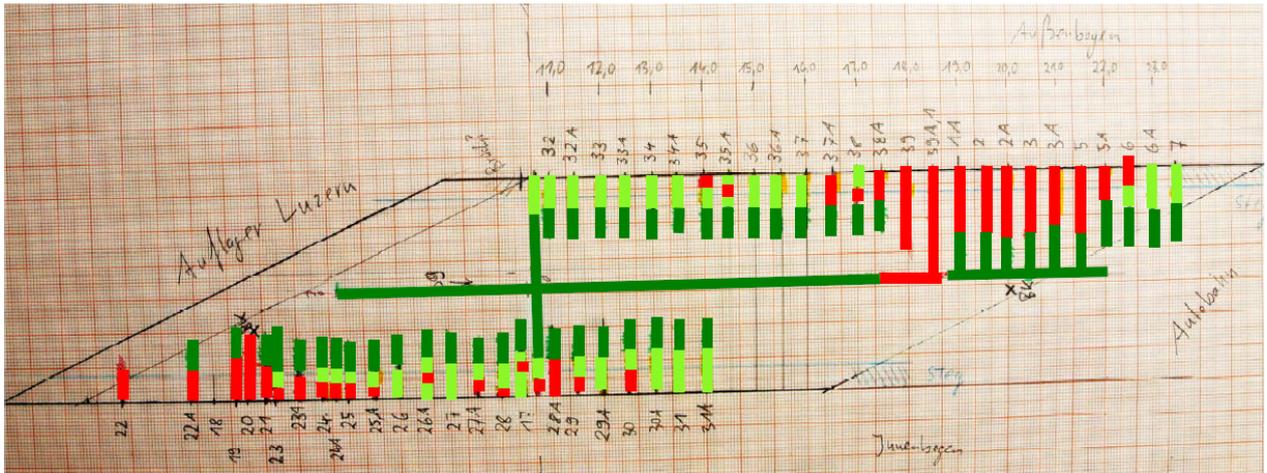


Abbildung 5: Plan der Brücke mit Auswertung der Ultraschallechomessungen; dunkelgrün: Echo an Oberseite der Betonplatte, Schäden wie Kiesnester oder Hohlräume können ausgeschlossen werden; hellgrün: „saubere Signale“ oder Echos an Spanngliedern etc. -> Annahme, dass hier kein Schaden vorliegt; rot: inhomogene Signale, kein Echo von der Oberseite der Betonplatte; keine Echos, denen eindeutig Spannglieder zuzuordnen wären

Mit der genauen Angabe der möglichen inneren Schäden wurden mehrere Sondierungen durchgeführt und die Messergebnisse bestätigt (siehe folgende Abbildung).

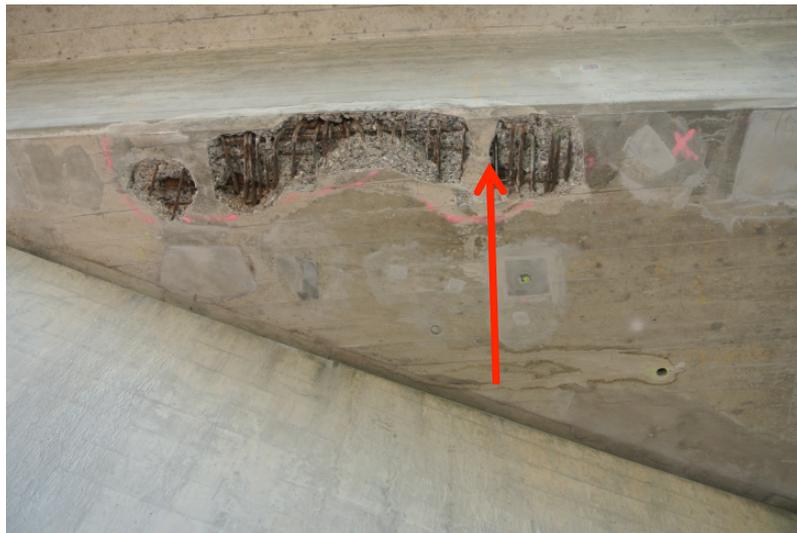


Abbildung 6: Sondage nach Vorgebe aus den Ultraschallechomessungen bestätigen innere Schäden (Kiesnester bei engen Bewehrungsabständen)

Nach dem erfolgreichen Bestätigen der Ultraschallechomessungen wurde die zweite Hälfte der Brücke auch untersucht, um auch hier mögliche Schäden zu lokalisieren.

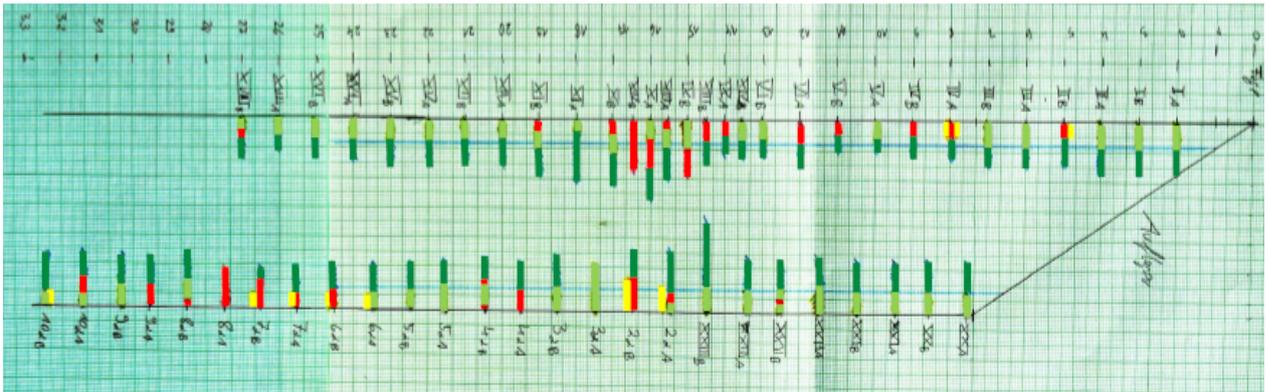


Abbildung 7: Plan der Brücke mit Auswertung der Ultraschallechomessungen; Farbcodierung wie vorherige Auswertung. Die Messung ergab, dass nur sehr kleine Bereiche eine Schädigung aufwiesen.

Nutzen für den Auftraggeber:

Mit den Messungen konnte gezeigt werden, dass sich die Schäden im Bauwerk nur auf wenige Bereiche beschränken. So konnte die Sanierung der Bereiche genau geplant und auch die Sperrungen der Autobahn auf ein Minimum reduziert werden.

3.2. Boden einer Tiefgarage eines Kaufhauses in Süddeutschland mit undichter WU-Bodenplatte

Nach dem Austrocknen einer 50 cm dicken neu betonierten WU-Bodenplatte fiel auf, dass sich an einigen Stellen immer wieder Wasser sammelte. Auch nach Trocknungsmaßnahmen und Abpumpen waren binnen eines Tages wieder neue, mehrere Quadratmeter große Pfützen aufgetreten.

Daraufhin wurden sehr umfangreiche Verpressversuche unternommen (Betrag in Euro?), welche nur teilweisen Erfolg brachten.



Abbildung 8: links: Bohrkerntnahmestelle mit Wasserspiegel im Bohrloch, der trotz 1,5 m Wassersäule knapp an der Oberkante der Bodenplatte bleibt; rechts: lokal feuchte Bereiche

Fragestellung:

Kann zerstörungsfrei eine Aussage über innere Schäden in der Betonplatte getroffen werden?

Lösung:

Zerstörungsfreie Prüfungen der Bodenplatte mit Ultraschallecho und Feuchtemessung

Bei den Ultraschallechomessungen wurden ein Handgerät mit Sende-Empfangseinheit und ein multistatisches Array verwendet.
Die Ultraschallechomessungen wurden entlang von Messlinien am Bauwerk durchgeführt.



Abbildung 9: Ultraschallechomessung mit Einzelprüfkopf auf der Bodenplatte

Folgend ist exemplarisch das Ergebnis einer Ultraschallechomessung dargestellt. Hier kann sehr deutlich zwischen einem homogenen Bereich mit sehr deutlichem Rückwandecho (mit schwarzem Kasten markiert) und dem daneben befindlichen inhomogenen Bereich unterschieden werden.

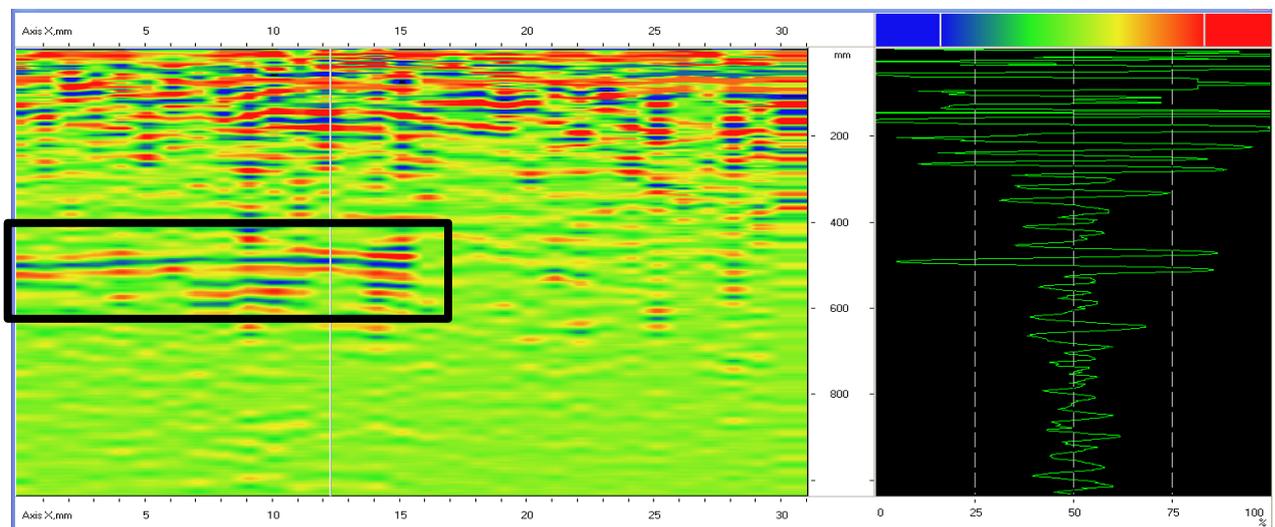


Abbildung 10: Ergebnis einer Ultraschallechomessung mit sehr deutlicher Rückwandreflexion (schwarzer Kasten)

Um die Messgeschwindigkeit zu erhöhen wurde ergänzend ein multistatisches Array (Ultraschallechomessgerät) verwendet, mit dem eine schnellere Untersuchung der Bodenplatte möglich ist.

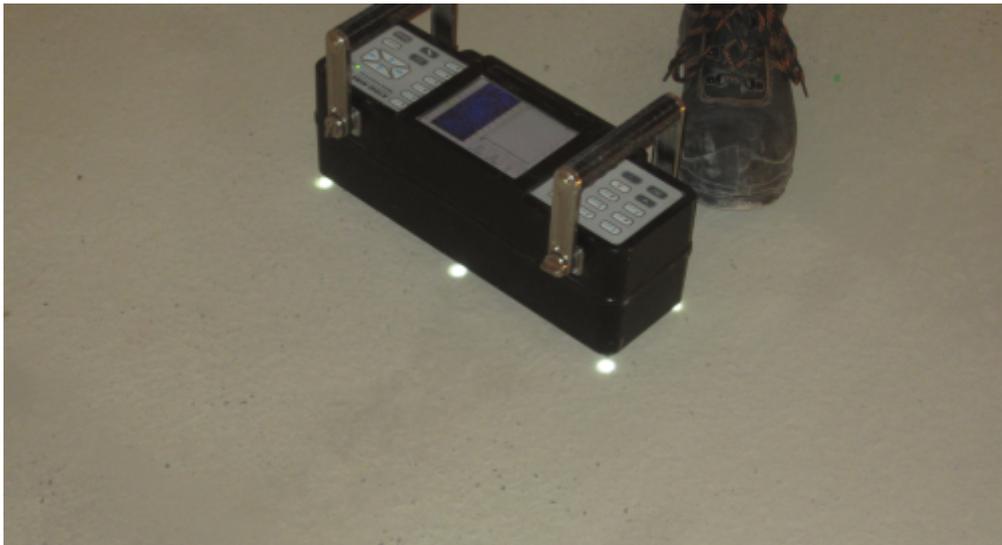


Abbildung 11: Ultraschallechomessung mit multistatischem Array auf der Bodenplatte

Bei der Auswertung der Ergebnisse des multistatischen Arrays wurde zwischen Bereichen mit deutlichem Echo von der Bauteilrückseite, schwachen Echos und Bereichen ohne Echo unterschieden.

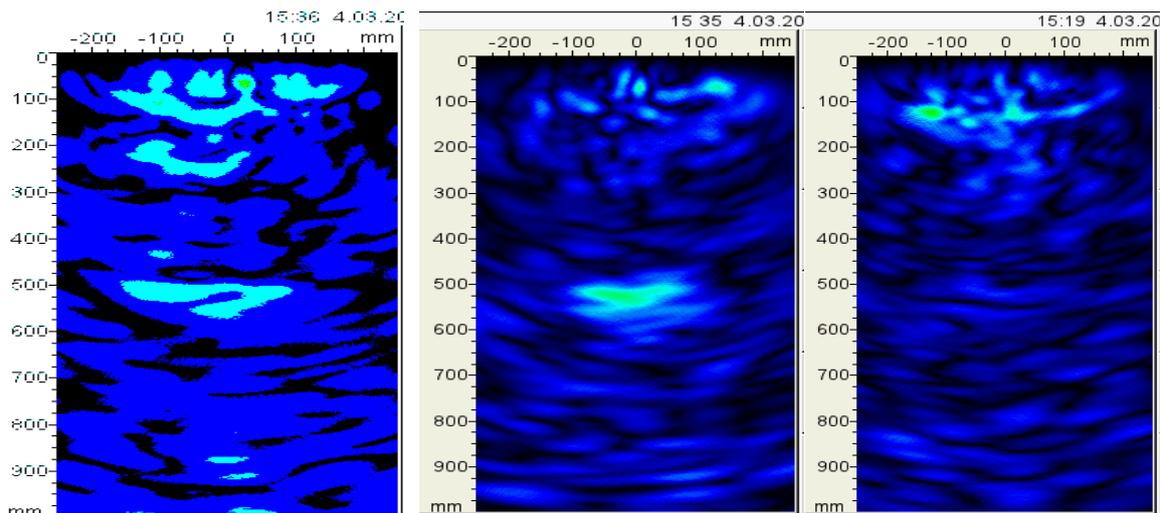


Abbildung 12: Ultraschallechomessung mit multistatischem Array auf der Bodenplatte;
 links sehr deutliches Echo an Bauteilrückseite; teils Echos an der oberen Bewehrung;
 Mitte: sehr deutliches Echo an Unterseite der Platte, keine Schädigung
 rechts: kein Echo an Unterseite der Platte; inhomogene Struktur

Bei Vergleichsmessungen zeigte sich jedoch, dass bei einem höheren Bewehrungsgrad in der Nähe der Stützen mit dem multistatischen Array keine Echos von der Bauteilrückseite durch die störende Bewehrung empfangen wurde – mit dem einzelnen Sendempfangskopf hingegen schon. Aus diesem Grund wurde großflächig mit dem multistatischen Array gemessen – und die Messung in den Bereichen um die Stützen mit dem Einzelkopf ergänzt. Die Auswertung der Messergebnisse erfolgte flächig.

Die ausgewerteten Ergebnisse wurden am Bauwerk zur besseren Bestimmung der zu injizierenden Bereiche angezeichnet. So konnten „gesunde Bereiche“ von „inhomogenen Bereichen“ unterschieden werden und das Verpressen optimiert werden.

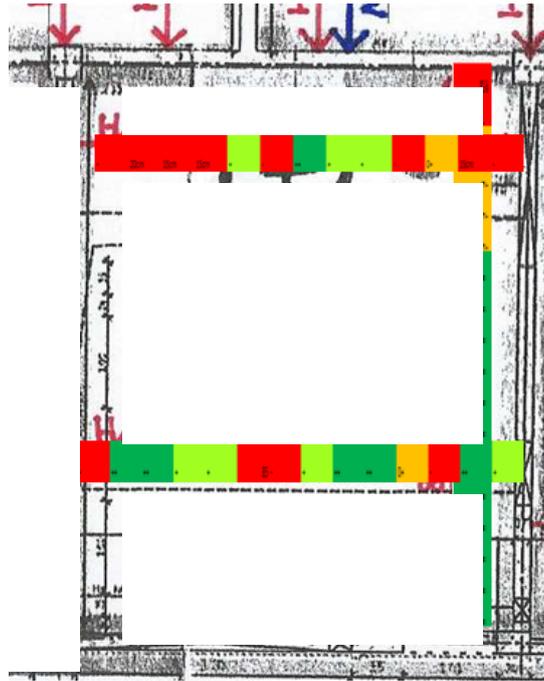


Abbildung 13: Plan mit Ergebnissen der Ultraschallechomessungen

Weiter wurden Feuchtemessungen mit dem kapazitiven Feuchtemessgerät G820 der Firma Denzl durchgeführt. Die Messungen erfolgten mit einem Sensor direkt am Bauwerk.



Abbildung 14: links: Feuchtemessung auf der Bodenplatte rechts: Messlinie über singulären Feuchtepunkt und Messlinie in Richtung Wand

Die Auswertung der Feuchtemessung ergab, dass die Feuchtestellen sehr punktuell auftreten.

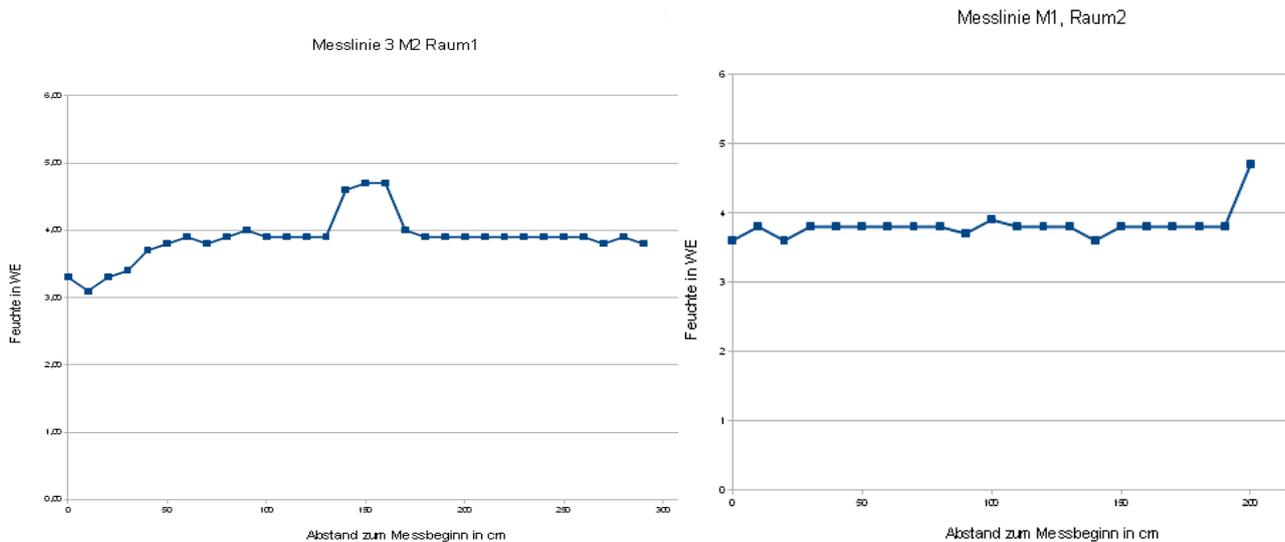


Abbildung 15: Ergebnis von Feuchtemessungen; links: Feuchtezunahme bei Punkt singulärer Feuchtestelle mit aufsteigender Feuchte; rechts: Feuchtemessung mit Zunahme an der Wand

Nutzen für den Auftraggeber:

Mit den flächigen zerstörungsfreien Prüfungen konnte eindeutig gezeigt werden, dass es einen Zusammenhang zwischen inhomogener Betonstruktur und Feuchteschäden gibt. Weiter konnte gezeigt werden, dass auch Wasser in augenscheinlich "intakte" Bereiche gelangt. Diese "intakten" Bereiche wurden gezielt mittels Verpressen von Zementsuspension von den "inhomogenen Bereichen" getrennt. Der nun eingegrenzte Schaden wurde dann systematisch abgedichtet. So konnte die zu Beginn nahezu unlösbare Aufgabe des Wassereintrittes mit wenigen Messtagen auf wenige lokale Bereiche eingegrenzt und instandgesetzt werden.

3.3. Bestandsbau aus den 60er Jahren ohne Statik und Angaben über die Gründung

Für eine Aufstockung eines Gebäudes aus den 60er Jahren war eine statische Neurechnung erforderlich.

Fragestellung:

- Lage der Bewehrung
- Betonqualität
- Abmessung der Fundamente

Lösung:

Die **Lage der oberen Bewehrung** wurde zerstörungsfrei mittels Bewehrungsortungsgerät bestimmt – die realen Durchmesser der Eisen mittels minimal zerstörender Sondage.

Die **Lage der tiefer liegenden Eisen** wurde mit Radar bestimmt.

Die **Betonqualität** wurde zerstörungsfrei entlang mehrerer Messspuren an Stützen und Unterzügen mit Ultraschallecho untersucht und an markanten Stellen mittels

Bohrkernuntersuchungen durch die KIWA Bautest GmbH ergänzt, welche ebenfalls für die Bestimmung der Betondruckfestigkeit zuständig war.

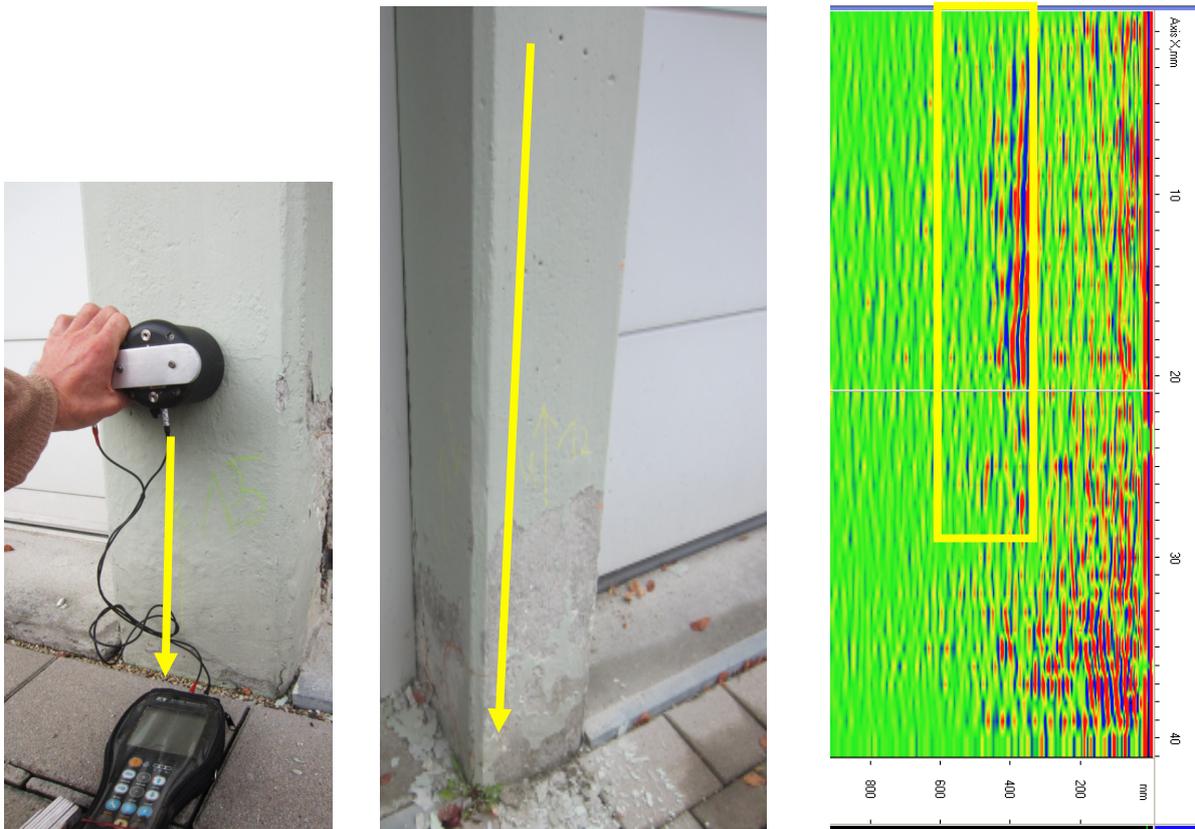


Abbildung 16: Ultraschallechomessung an Stütze; links: Messung; Mitte Lage der Messspur; rechts: Echo an Bauteilrückseite gelb markiert

Die Ultraschallechomessungen ergaben, dass die Betonqualität bei den untersuchten Stützen vom oberen Bereich in Richtung der Stützenfüsse abnimmt. So konnten die Bohrkernge gezielt entnommen werden. Die lokal schlechte Betonqualität machte eine Ergänzung der Stützen erforderlich.

Die Fundamente wurden ebenfalls mit dem elektromagnetischen Radarverfahren untersucht. Die Messlinien erfolgten auf der Bodenplatte neben den Stützen.

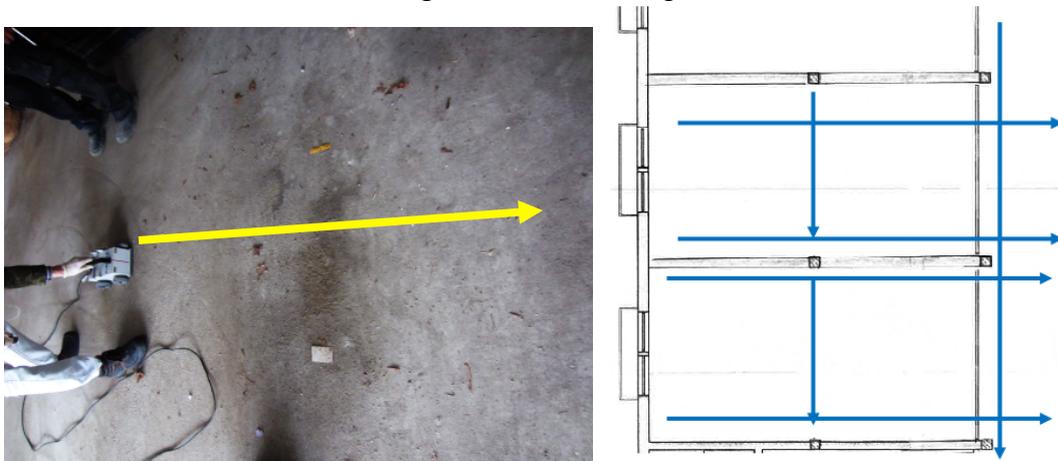


Abbildung 17: links: Lage einer Radarmessspur auf der Bodenplatte zum Sondieren der Fundamente rechts: Planausschnitt des Bauwerks mit Lage von Radarspuren

Durch die enge Bewehrung der Bodenplatte war die Auswertung der Radarmessungen sehr aufwendig, Folgend beispielhaft eine Messspur mit Lage der Fundamente:

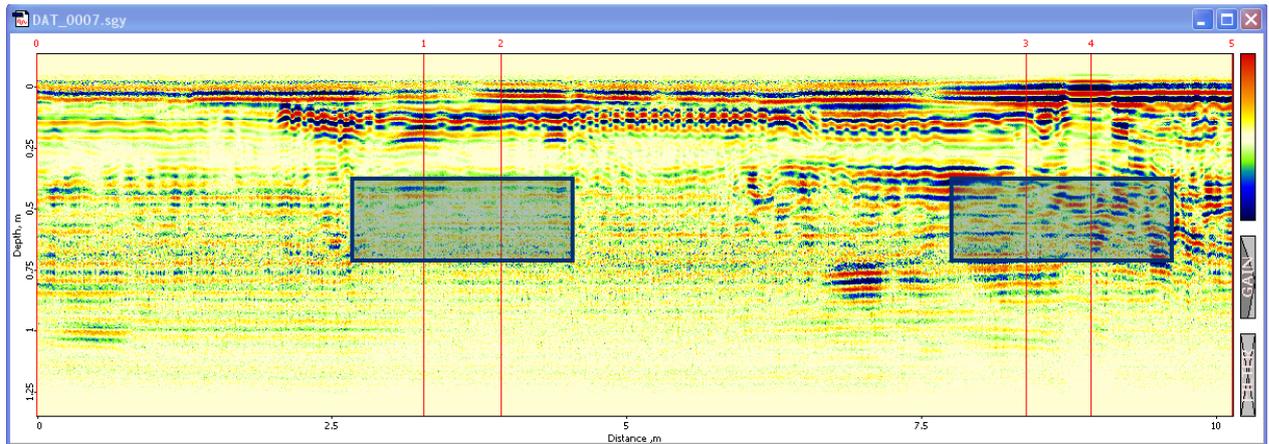


Abbildung 18: Ergebnis einer Radarmessung, Messfrequenz 1,5GHz; Bezeichnung siehe Kopfzeile, Lage siehe Plan; Fundamente eingezeichnet

Mittels mehrerer Messspuren konnte so die Lage der Fundamente eindeutig bestimmt werden, um im Plan markiert werden (siehe folgende Abbildung).

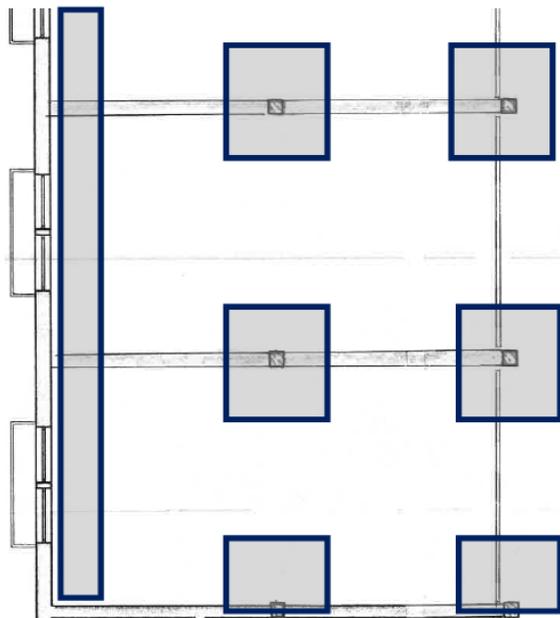


Abbildung 19: Ergebnis der Radarmessungen an der Bodenplatte zum Sondieren der Fundamente, Lage der Fundamente blau dargestellt

Nutzen für den Auftraggeber

Trotz fehlender Statik war es möglich, die vorhandene Konstruktion an Hand der Ergebnisse der zerstörungsfreien Prüfungen und minimaler Sondieröffnungen nachzurechnen und durch eine Aufstockung zu ergänzen.

So konnte, entgegen einem kompletten Neubau des Gebäudes, das vorhandene Bürobauwerk nahezu ohne Nutzungseinschränkung weiter genutzt werden und die Aufstockung realisiert werden. Ein Umzug der Büros wäre zum derzeitigen Zeitpunkt aufgrund des Mangels an leerstehende Büroflächen bzw. Containern durch die erforderliche winterfeste Unterbringung der großen Zahl von Flüchtlingen nahezu unmöglich gewesen.

4. Zusammenfassung:

An Hand der vorgestellten Beispiele konnte gezeigt werden, dass es möglich ist, bei Bauwerken zerstörungsfrei

- die Lage von Fundamenten unter der Bodenplatte bei fehlender Statik
- Hohlräume und Schäden in einer WU-Bodenplatte
- Kiesnester in einer Spannbetonbrücke

zu bestimmen und so die Instandsetzung zu optimieren. So konnten bei allen genannten Projekten die Arbeiten auf die wirklich geschädigten Zonen konzentriert werden bzw. trotz fehlender Statik eine Aussage über die Konstruktion getroffen werden.

5. Literatur

[BAM2004] Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM): ZfPBau-Kompodium, <http://www.bam.de/zfpbau-kompodium.htm> (2004)

[WAL2012] Walter, A. und A. Hasenstab: Zerstörungsfreie Prüfverfahren zur Bestimmung von Materialparametern im Stahl- und Spannbetonbau in: Fouad N. (Hrsg.); Bauphysik-Kalender 2012, Berlin: Ernst und Sohn (2012)

[HAS2008] Hasenstab, A., Jost, G., Taffe, A., Wiggenhauser, H.: Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen – angewandte Forschung und Praxis. Jahrestagung DGzFP DACH, St. Gallen 2008

[HAS2007] Hasenstab, A., Homburg, S., Maierhofer, C., Arndt, R.: Holzkonstruktionen mit Radar und Thermografie zerstörungsfrei untersuchen Tagungsband der DGzFP-Jahrestagung 2007, Poster 14, 14.-16.05.2007 Fürth

[MAI2006] Maierhofer, Ch., Arndt, R., Borchardt, K., Hasenstab, A., Röllig, M. and J. Wöstmann, Structural assessment with radar and active thermography. In: Radic, J., Rajcic, V., Zarnic, R. (eds.); Proceedings of the International Conference Cultural Heritage, The Construction Aspects of the Heritage Protection, Dubrovnik, Croatia, 14-17 October 2006, pp. 77-85

[HAS2005] Hasenstab, A.: Integritätsprüfung von Holz mit dem zerstörungsfreien Ultraschall-echoverfahren. Dissertation an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) und der Technischen Universität Berlin, Fakultät VI, Prof. Dr. Hillemeier (TU Berlin), Prof. Scheer (TU Berlin), Dr. Krause (BAM)

[HAS2008] Hasenstab, A.: **Ultraschall- Echo – ein ZfP-Verfahren zum Lokalisieren von Fehlstellen in Brettschichtholz (BSH) und Vollholz – Praxisbeispiele**, (Bauwerksdiagnose Berlin, 21.-22.02.2008, Poster 14 2006, Berlin)

[HAS2012] Hasenstab A., Steiger A., Hunkeler F., Schiegg Y.: Zerstörungsfreie Prüfung an Tiefbauten in der Schweiz mit Ultraschallecho und Radar Tagungsband der DGzFP Fachtagung Bauwerksdiagnose, 23.-24. Februar 2012, Berlin

[STR2008] Straußberger D., Hartmann I., Hasenstab A.: **Straßenuntersuchungen mit Radar, Ultraschallecho und FWD**, (Bauwerksdiagnose Berlin, 21.-22.02.2008, Poster 13 2006, Berlin)

[TAF2006] Taffe A., Wiggenhauser H.: Garant für gute Qualität, Werkzeug für fundierte Analysen: Was leisten zerstörungsfreie Prüfverfahren im Bauwesen? (DIB 2006 7-8, Seite 22)

[WIG2004] Wiggenhauser, H. und A. Taffe: *Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen*, in: Cziesielski, E. (Hrsg.); Bauphysik-Kalender 2004, Berlin: Ernst und Sohn (2004) Kap. C1, S. 305-418