

ZfPBau-Verfahren an Elementwänden - Fallbeispiel und vergleichende Untersuchungen

Dietmar MÄHNER¹, Christian SODEIKAT², Stefan MAACK³

¹ Fachhochschule Münster, Fachbereich Bauingenieurwesen, Münster

² Technische Universität München (TUM), München

³ BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin

d.maehner@fh-muenster.de; gu56dal@mytum.de; Stefan.Maack@bam.de

Kurzfassung. Die zerstörungsfreien Prüfverfahren konnten ihre Fähigkeit bei der Untersuchung von Elementwänden in einzelnen Fallstudien erbringen. Aufbauend auf den Kenntnissen aus der Praxis und auf Testreihen im Rahmen von Laboruntersuchungen wurde ein erster Ringversuch geplant und durchgeführt. Im Rahmen dieses Ringversuchs wurden verschiedene Strukturdefekte und Einbauteile in Elementwände eingebaut. Die Messung der Wände erfolgte anschließend durch mehrere Messteams mit unterschiedlichen zerstörungsfreien Prüfverfahren. Zum Einsatz kamen hierbei das Ultraschall-Echo- und das Impact-Echo-Verfahren sowie das Impuls-Radar-Verfahren. Zur Verbesserung der Vergleichbarkeit zwischen den unterschiedlichen Prüfverfahren wurde auf die Elementwände ein einheitliches Messraster aufgebracht. Für eine möglichst objektive Messung der Wände erhielten die Messteams vor den Messungen keine Details zu den Strukturdefekten oder Einbauteilen. Die Prüfaufgabe bestand darin, die Wände mit dem jeweiligen Prüfverfahren zu untersuchen. Anschließend wurden die Ergebnisse der Messteams zentral gesammelt und ausgewertet. Anhand der zentralen Auswertung sollten Aussagen zu den eingebauten Inhomogenitäten ableitet werden. Hierdurch kann zum einen die Leistungsfähigkeit der Prüfverfahren an unterschiedlichsten Inhomogenitäten getestet werden, zum anderen können die Ergebnisse und somit die Prüfverfahren untereinander verglichen werden. Zu diesen in der Praxis immer häufiger vorkommenden Fragestellungen können grundsätzliche Aussagen zum Einsatz von zerstörungsfreien Prüfungen bei Elementwänden gewonnen werden. Über die Ergebnisse dieses Ringversuches wird nachfolgend berichtet.

Problemstellung

Aufgrund der homogenen äußeren Ansicht der Fertigteilplatten können Strukturdefekte nur schwer ermittelt werden. Im möglichen Schadensfall kann beim Einsatz von Elementwänden die sachkundige Beurteilung zu erheblichen Kosten führen, da eine Überprüfung des verdeckten Kernbetons nur über eine zerstörende Bauteilöffnung mit anschließender Instandsetzung möglich ist.

Hier können zerstörungsfreie Prüfverfahren des Bauwesens (ZfPBau) zu einer schnelleren und genaueren Beurteilung sowie zu einer schadfreien Analyse der Elementwände beitragen. In verschiedenen Studien im Rahmen von angewandter



Forschung konnten, unterstützt durch den Einsatz von zerstörungsfreien Prüfverfahren, tragfähige Sanierungskonzepte entwickelt werden [18, 19]. Ausgehend von solchen Fallstudien und den Kenntnissen über Schadensbilder an Elementwänden wurden experimentelle Versuchsreihen aufgelegt, in denen gezielt der Nachweis von Strukturdefekten unter Laborbedingungen erfolgte [1]. Im Nachgang zu diesen experimentellen Laboruntersuchungen [1] erfolgte die Planung und Durchführung eines ersten Ringversuches.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der baupraktischen Fallstudien und des Ringversuches zusammenfassend dargestellt. Weiterhin wird ein Ausblick gegeben inwieweit sich die gewonnenen Erkenntnisse auf die Anwendung der Verfahrenstechniken in der Praxis und künftige Forschungsarbeiten auswirken.

Eine Besonderheit des ersten Ringversuches zu dieser Problematik bestand in der an die Messteams gestellten Aufgabe. In Anlehnung an eine realitätsnahe Anwendung von ZfP auf der Baustelle sollten die Wände ohne Kenntnisse über die eingebauten Strukturdefekte untersucht werden. Die Ergebnisse und Auswertungen der Messteams wurden für eine größtmögliche Objektivität zentral gesammelt und bewertet. Die zentrale Auswertung erfolgte über den Abgleich der Ergebnisse der jeweiligen Messteams mit der „wahren“ Lage der Strukturdefekte und Einbauteile. Anschließend sollten aus den Ergebnissen Rückschlüsse auf die jeweiligen Strukturdefekte ermöglicht werden. Zum Einsatz bei den Messungen der Wände im Ringversuch kamen das Ultraschall-Echo-Verfahren, das Impact-Echo- und das Impuls-Radar-Verfahren.

Baupraktische Fallbeispiele

Im Rahmen angewandter Forschungsarbeiten wurden durch die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung verschiedene Untersuchungen an Elementwandkonstruktionen durchgeführt. Hierbei handelte es sich um Anfragen aus der Praxis, bei denen zu einer augenscheinlichen Schädigung des Bauwerkes gekommen ist. Das Ziel der Forschung bestand darin nachzuweisen, inwieweit sich zerstörungsfreie Prüfverfahren eignen bei den Umfang der Schädigung oder auch die Entwicklung eines Sanierungskonzeptes zu unterstützen. Nachfolgend werden die Ergebnisse der Untersuchungen vorgestellt und zusammenfassend diskutiert. Die detaillierte Erläuterungen zur Vorgehensweise bei den Messungen und zur Auswertung finden sich in den angegebene Literaturquellen.

Bei den beiden Fallstudien handelt es sich zum einen um eine wasserundurchlässige Kellerkonstruktion eines Einfamilienhauses, bei der es trotz mehrfacher Abdichtungsversuche immer wieder zu Durchfeuchtungen kam. Zum anderen um ein Lagergebäude bei dem nach Fertigstellung des Rohbaus und einsetzenden Frost großflächige Abplatzungen der Betonschalen der Elementwände und massive Rissbildung auftraten.

Schadensfall – Weiße Wanne

Bei dem dargestellten Fallbeispiel handelt es sich um eine weiße Wanne eines Einfamilienhauses. Abbildung 1 zeigt die Konstruktion in der Rohbauphase. Die weiße Wanne besteht aus Elementwänden mit einer Gesamtdicke von 25 cm, wobei der Zwischenraum mit einem wasserundurchlässigen WU-Beton verfüllt wurde. Die Dicke der Elementwände beträgt jeweils 5 cm. Abbildung 2 zeigt schematisch die Ausführung einer solchen WU-Konstruktion bei einem anstehenden Grundwasser in der Schnittansicht.



Abbildung 1: Rohbau des WU-Bauwerkes ausgeführt als Elementwandkonstruktion [18]

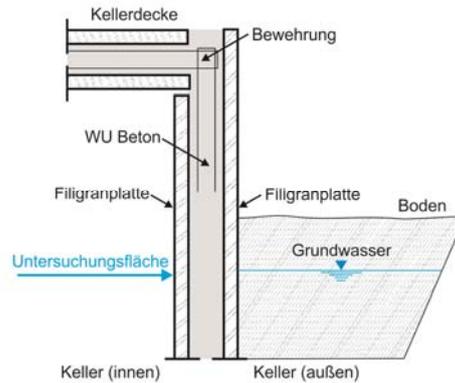


Abbildung 2: Schematische Darstellung der WU-Konstruktion im Kellerbereich

Die Untersuchungen erfolgten flächig an den Außenwänden des Kellers. Hierbei wurde der Bereich von der Bodenplatte bis zur Oberkante der anstehenden Verfüllung mit Boden erfasst. Als zerstörungsfreie Prüfverfahren kamen das Ultraschall-Echoverfahren und das Impulsradar zum Einsatz. Mit dem Ultraschall-Echoverfahren sollte hierbei der monolithische Aufbau der Konstruktion überprüft werden. Mit dem Impulsradar sollte überprüft werden, inwieweit durchfeuchtete Bereiche lokalisiert werden können. Aufbauend auf den Erkenntnissen der Untersuchungen sollte ein Plan entwickelt werden, nach dem eine gezielte Verpressung von Verdachtsbereichen erfolgen kann.

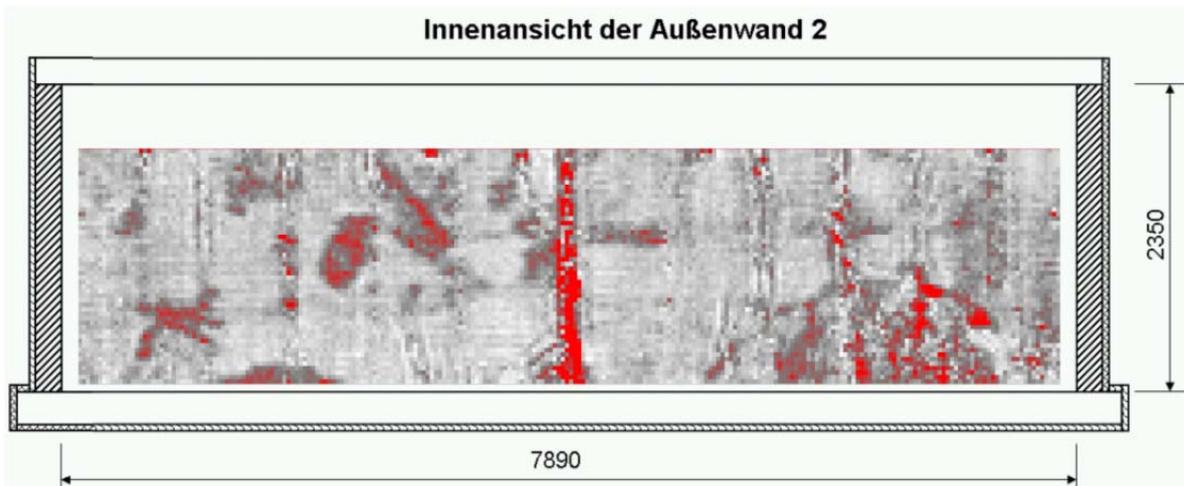


Abbildung 3: Messergebnis der Ultraschall-Echomessungen an der Außenwand 2. Der Tiefenschnitt ist für eine Laufzeit von $t = 51 \mu\text{s}$, was in etwa einer Tiefe von $t = 6 \text{ cm}$ entspricht dargestellt [18].

Für die Untersuchungen mit dem Ultraschall-Echoverfahren wurde ein automatisiertes Scannersystem eingesetzt. Mit diesem System konnten die Untersuchungsflächen mit einem gitterförmigen Messraster mit einem Punktabstand von 3 cm gemessen werden. Die Ultraschallmessungen erfolgten mit einem Transversalwellenprüfkopf mit einer mittleren Frequenz von $f = 55 \text{ kHz}$. Ein Ergebnis der Untersuchungen ist in Abbildung 3 dargestellt. Es handelt sich hierbei um einen Tiefenschnitt (C-Bild) mit einer Laufzeit von $t = 51 \mu\text{s}$. Mittels der am Bauwerk kalibrierten Geschwindigkeit von $c = 2340 \text{ m/s}$ kann diese Laufzeit in eine Tiefe von $d = 6 \text{ cm}$ umgerechnet werden. Da die Dicke der Schalen der Elementwand $d = 5 \text{ cm}$ beträgt, wurde hier eine Veränderung innerhalb der tieferliegenden Struktur der Wand vermutet. Eine detaillierte Auswertung von einzelnen Messpunkten (A-Bilder) in diesen Bereichen zeigte jedoch eine andere Ursache. In den A-Bildern ist zu erkennen, dass es sich nicht um eine Reflexion handelt. Vielmehr tritt ein stark oszillierendes Signal auf, was typisch für eine Plattenwelle (Lambwelle) ist. Diese Wellenform kann entstehen, wenn die Wellenlänge des Schallimpulses in der

Größenordnung der Bauteildicke liegt. Bei einer Ablösung der Elementwandschale wäre dies genau der Fall. Es wurde daher davon ausgegangen, dass kein akustischer Verbund zwischen der Schale und dem Kernbeton vorlag. Da an diesem Bauwerk diese Bereiche sehr gut mit den sichtbaren Durchfeuchtungen übereinstimmten, wurde in Absprache mit dem Auftraggeber festgelegt, dass hier eine gezielte Nachverpressung mit Kunstharz erfolgen soll.

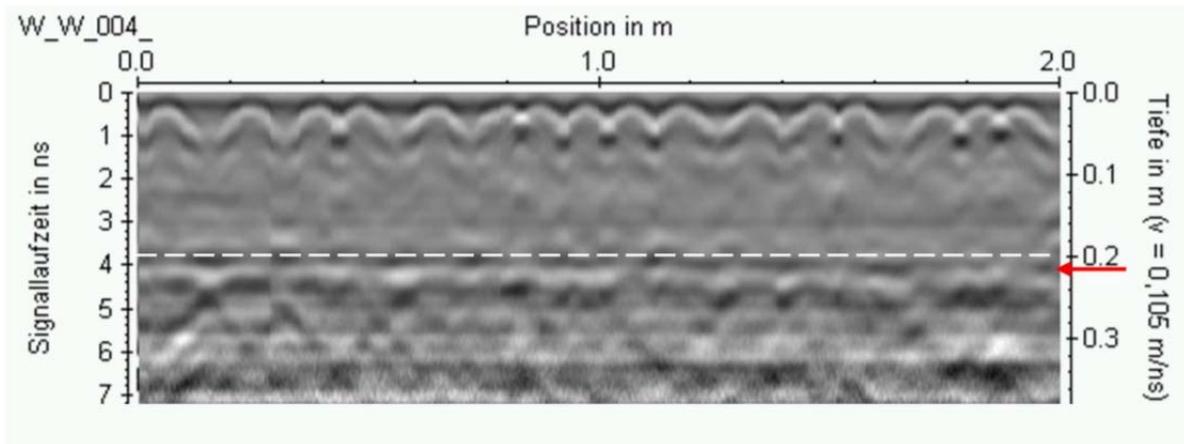


Abbildung 4: Beispielhafte Aufnahme einer Messlinie mit dem Impulsradar an einer Außenwand des Kellers [18].

Abbildung 4 zeigt das Radargramm (B-Bild) über die Höhe einer Außenwand des Kellers. Die Radaruntersuchungen erfolgten mit einer 1,5 GHz Antenne. Die Aufnahme der Messlinie erfolgte von der Decke des Kellers hin zur Bodenplatte. Zu erkennen ist, dass sich das Rückwandecho beginnend bei einer Laufzeit von $t = 3,8$ ns im oberen Bereich zu $t = 4,02$ ns im unteren Bereich des Radargramms verschiebt. Wird von einer konstanten Bauteildicke und einem homogenen Aufbau ausgegangen, ist diese Zunahme der Laufzeit auf einen sich ändernden Feuchtegehalt im unteren Teil der Kellerwand zurückzuführen. Aufgrund der räumlichen Ausbreitung der abgestrahlten Radarwelle kann jedoch eine kleine lokale Störung (Durchfeuchtung) nicht erfasst werden. Das Radarverfahren war daher in diesem Fall nicht für die Entwicklung eines detaillierten Verpressplanes geeignet.

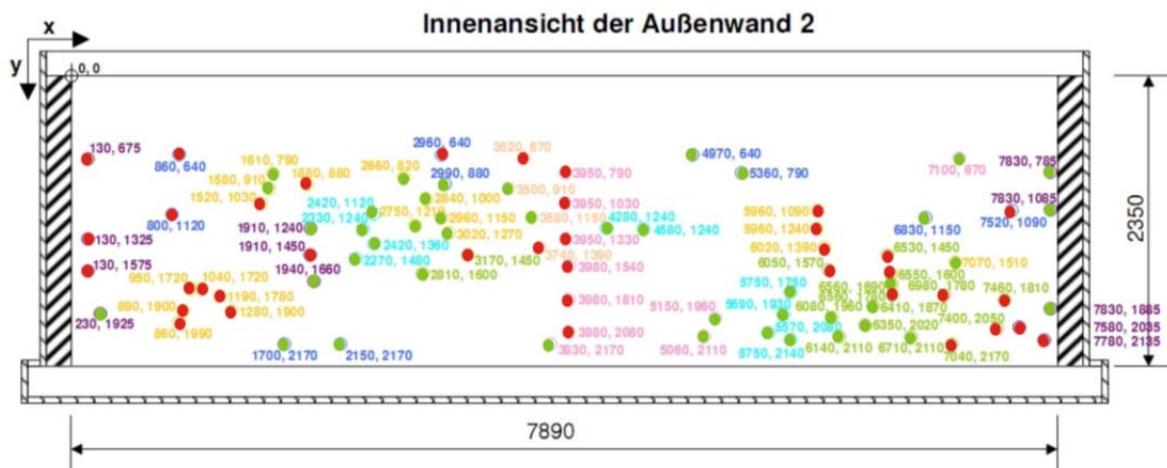


Abbildung 5: Darstellung der Verpresspunkte und des Erfolges der Verpressung an der Außenwand 2 [18].

In der Abbildung 5 sind die aus den Ultraschallmessungen bestimmten Punkte der nachträglichen Verpressung mit Kunstharz dargestellt. Jeder Punkt hat eine rote oder grüne Farbgebung. Die rote Farbe steht hierbei für keinen Verpresserfolg, die grüne Farbe hingegen für eine erfolgreiche Verpressung. Die Quote für eine erfolgreiche Verpressung beträgt ca. 52 %. Bei dieser auf den ersten Blick geringen Erfolgsquote müssen zwei Umstände beachtet werden. Erstens handelt es sich um teilweise zusammenhängende

Bereiche der Ablösung. Bei einer Verpressung unter einem hohen Druck, können sich die Bereiche bereits nach Verpressung eines Punktes gefüllt haben. Eine weitere Verpressung der benachbarten Punkte ist daher nicht mehr möglich. Zweitens erfolgten bereits im Vorfeld der Untersuchungen Versuche der nachträglichen Verpressung. Diese Bereiche können mit dem Ultraschallverfahren nicht von unverpressten Bereichen unterschieden werden und führen daher auch zu einem scheinbar negativen Ergebnis. Insgesamt wurden nach Abschluss der Arbeiten keine weiteren Durchfeuchtungen festgestellt. Dies wird daher als Erfolg für die Anwendung der Verfahrenstechnik gewertet. Die detaillierte Darstellung der Untersuchungen findet sich in [18] wieder.

Schadensfall – Lagergebäude

Bei dem untersuchten Bauwerk handelt es sich um ein Magazingebäude. Das Gebäude umfasst drei Vollgeschosse und ist überwiegend als Elementwandkonstruktion ausgeführt, Abbildung 6 und Abbildung 7. Während der Bauphase kam es an dem Gebäude zum Auftreten von Rissen und teilweise zu großflächigen Abplatzungen. Die Schäden traten nach dem ersten Frost auf. Es konnte festgestellt werden, dass im Kernbeton in diesen Bereichen Fremdstoffe mit einem hohen Wassergehalt waren, die infolge des Frostes zu den Schäden führten. Ausgehend von den Bereichen mit den augenscheinlichen Schäden sollte durch Voruntersuchungen festgestellt werden, mit welchem zerstörungsfreien Prüfverfahren die Schäden innerhalb der Struktur festgestellt werden können. Wichtig bei diesen Untersuchungen war neben der grundsätzlichen Lösung der Fragestellung auch die Wirtschaftlichkeit in der praktischen Anwendung zu beurteilen, da bei erfolgreichem Nachweis der Verfahrenstechnik eine vollständige Prüfung des Bauwerkes in Betracht gezogen wurde.



Abbildung 6: Außenansicht des Magazingebäudes



Abbildung 7: Innenansicht des Magazingebäudes

Für die Untersuchungen der Vorstudie wurden zwei Prüfverfahren ausgewählt. Das Ultraschall-Echoverfahren, um aufbauend auf den Erfahrungen an der weißen Wanne Störungen innerhalb der Wand feststellen zu können und das Impulsradar mit einer deutlich höheren Flächenleistung bei der Datenaufnahme. Die Ultraschallmessungen erfolgten mit einem Transversalwellenprüfkopf mit einer mittleren Frequenz von $f = 55 \text{ kHz}$. Bei dem Impulsradar wurde hierbei davon ausgegangen, dass sich die für die Absprengungen verantwortlichen Störungen innerhalb der Wand aufgrund eines lokal vermuteten hohen Wassergehaltes (Frosteinwirkung) deutlich abzeichnen. Bei Vergleichsmessungen für das Radarverfahren wurde festgestellt, dass eine 2,6 GHz-Antenne kein wesentlich besseres Auflösungsvermögen an dieser Konstruktion zeigt als eine 1,5 GHz-Antenne. Um möglichst tief in die Konstruktion eindringen zu können, wurde daher eine 1,5 GHz-Antenne verwendet. An dieser Stelle werden nachfolgend die Ergebnisse eines Messfeldes

erläutert. Insgesamt wurden 5 Bereiche mit mehreren Messfeldern an dem Bauwerk untersucht.



Abbildung 8: Ansicht des Untersuchungsbereiches mit Gittertapete

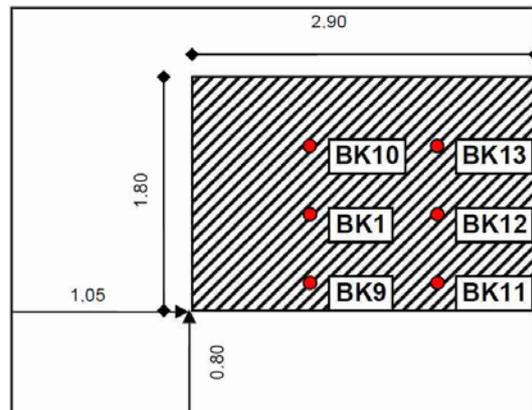


Abbildung 9: Schematische der Messfläche des Untersuchungsbereiches

Abbildung 8 zeigt den Untersuchungsbereich mit einer für das Impulsradar temporär aufgeklebten gitterförmig bedruckten Tapete. Die Messungen erfolgten gitterförmig mit einem Linienabstand von 5 cm. Die Messungen mit dem Ultraschall-Echoverfahren erfolgten mit einem Messpunktabstand von 3 cm. Um eine möglichst hohe Genauigkeit in der Positionierung der Messpunkte zu erreichen, kamen hierfür automatisierte Scanner zum Einsatz. Abbildung 9 zeigt die Messfläche für die nachfolgend dargestellten Ergebnisse beider Verfahrenstechniken.

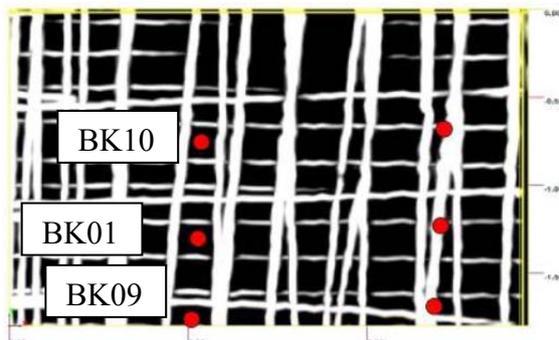


Abbildung 10: Impulsradar: Tiefenschnitt d = 6 cm

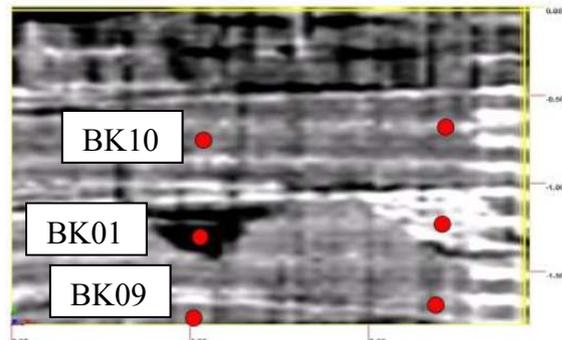


Abbildung 11: Impulsradar: Tiefenschnitt d = 9 cm

In der Abbildung 10 und Abbildung 11 sind die Ergebnisse der Radaruntersuchungen in verschiedenen Tiefenschnitten zu sehen. Abbildung 10 zeigt sehr gut die oberflächennahe schlaffe Bewehrung. Die Abbildung 11 zeigt lokale Auffälligkeiten im Signalbild in einem Tiefenschnitt von d 9 cm, die sich durch eine unterschiedliche Amplitude darstellt. In diesen auffälligen Bereichen wurden daher verschiedene Punkte für eine Beprobung durch Bohrkernentnahme festgelegt (rote Punkte in den Abbildungen). Bezeichnet sind hier die Entnahmepunkte für die Bohrkern BK01, BK09 und BK10. Neben einer Beprobung von Verdachtsstellen wurden zur Verifizierung auch Bohrkern aus Bereichen ohne Auffälligkeit entnommen. Zusätzlich den beschriebenen Auffälligkeiten zeigen sich im Radargramm Abbildung 11 noch horizontale und vertikale Reflexionen. Hierbei handelt es sich um Abschattungen der oberflächennahen Bewehrung (Abbildung 10).

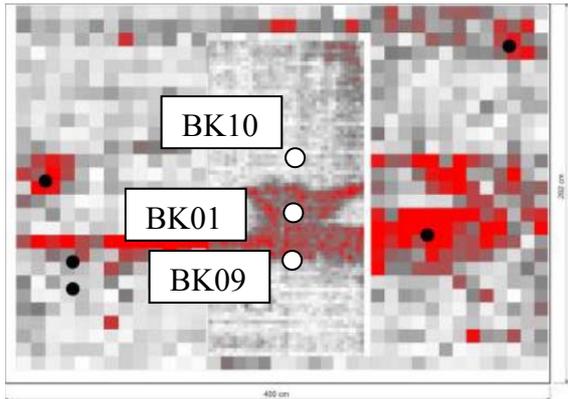


Abbildung 12: Ultraschall Tiefenschnitt d = 6 cm

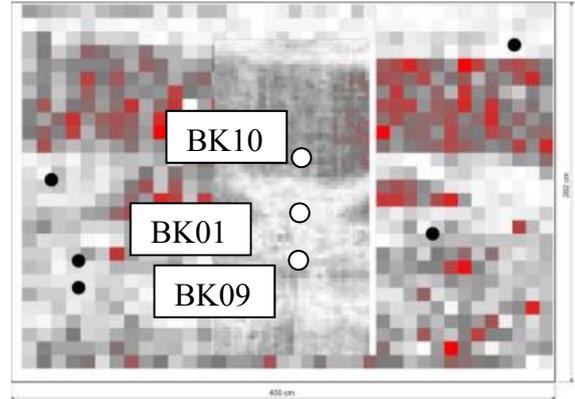


Abbildung 13: Ultraschall Tiefenschnitt d = 30 cm

Die Ergebnisse der Ultraschall-Echomessungen sind in der Abbildung 12 und Abbildung 13 zu sehen. Wie schon bei der Untersuchung der weißen Wanne beschrieben kann die Ablösung der Elementwandschale (Dicke der Schale $d = 5$ cm) vom Kernbeton in der Abbildung 12 sehr gut ermittelt werden. Die scheinbare Tiefenlage von $d = 6$ cm der Reflexion ist wieder auf die Ausbildung einer Plattenwelle zurückzuführen. In der Abbildung 13 ist die Reflexion an der Rückwand zu sehen. Bereiche an denen Reflexionen an der ersten Elementwandschale auftreten, stellen sich hier durch eine hellgraue Farbgebung dar. Dies ist durch die Abschattung dieser Bereiche durch die Ablösung begründet.



Abbildung 14: Bohrkern BK09



Abbildung 15: Bohrkern BK01



Abbildung 16: Bohrkern BK10

Die entnommenen Bohrkern BK01, BK09 und BK10 sind in der Abbildung 14 bis Abbildung 16 dargestellt. In den Abbildungen ist die Bohrrichtung bei der Entnahme durch Pfeile auf den Kernen dargestellt. Dies entspricht auch der Orientierung der Messung. Der Bohrkern BK09 zeigt eine Ablösung der ersten Elementwandschale vom Kernbeton. In der Ultraschallaufnahme der Abbildung 12 stellt sich diese Ablösung sehr gut dar. In dem Radargramm der Abbildung 10 und Abbildung 11 sind an dieser Beprobungsstelle keine Auffälligkeiten zu erkennen. Bohrkern BK01 zeigt im mittleren Bereich einen sehr porösen Beton der keine Festigkeit aufweist. Der Beton kann ohne Schwierigkeiten manuell zerstört werden. Dieser Bereich wird von beiden Messverfahren sehr gut angezeigt. Der Bohrkern BK10 zeigt einen monolithischen Verbund und entspricht somit den qualitativen Vorgaben an eine Elementwand. In den Messdaten zeigt sich hier bei beiden Verfahren keine Auffälligkeit.

Für die abschließende Beurteilung über die Eignung einer Verfahrenstechnik zur Lösung der Prüfaufgabe blieb folgendes festzuhalten. Mit beiden zerstörungsfreien Prüfverfahren konnte die Aufgabe grundsätzlich gelöst werden. Die Ablösung der Elementwand vom Kernbeton führt jedoch beim Ultraschall-Echoverfahren zu einer Abschattung der dahinter liegenden Bereiche, so dass keine Aussagen über tieferliegende Bereiche gemacht werden können. Weiterhin führt der fehlende Haftverbund in diesem Fall nach Angabe des Auftraggebers zu keiner Beeinträchtigung der Konstruktion. Zusätzlich ist zu beachten, dass mit dem Impulsradar deutlich größere Flächenleistungen bei der

Messdatenaufnahme erzielt werden können. Es wurde sich daher entschieden, die vollflächigen Untersuchungen mit dem Impulsradar durchzuführen.

Ringversuch

Angewendete Messverfahren

Im Einsatz waren aus der Gruppe der akustischen Verfahren verschiedene Ultraschall-Echo- und Impact-Echo-Messgeräte. Die Anwendung dieser Verfahren beschränkt sich vorwiegend auf punktuelle Messungen, die zu Linienscans zusammengesetzt werden können. Die mechanisch angeregten Wellen werden an Grenzflächen, wie dem Übergang von Beton zur Luft oder an Strukturdefekten innerhalb des Wandquerschnitts, reflektiert. Ein homogener Wandabschnitt liegt vor, wenn ein klares Echo der Rückwand empfangen wird. Da ein Luftspalt von wenigen Zehntel Millimetern ausreicht, um die einfallenden elastischen Wellen zu 100 % zu reflektieren, kann keine genaue Aussage zu der Mächtigkeit des Hohlraums getroffen werden.

Das verwendete Ultraschall-Echo-Verfahren (US) leitet über eine Sende- und Empfangseinheit Schallwellen im Frequenzbereich zwischen 20 kHz und 200 kHz in das Bauteil ein bzw. nimmt diese Schallwellen (Transversalwellen) aus dem Bauteil wieder auf. Die Sende- und Empfangseinheit besteht bei den hier eingesetzten Geräten aus 24 oder 48 federnd gelagerten Einzelprüfköpfen. Bei den 24 Einzelprüfköpfen wird jeweils die Hälfte als Sender oder Empfänger parallel geschaltet. Im Prüfgerät mit den 48 Einzelprüfköpfen dient jeder einzelne Prüfkopf jeweils einmal als Sender und alle anderen als Empfänger. Durch diese spezielle Vorgehensweise ergibt sich schon bei der Messung einer Stelle eine Vielzahl von Kurven mit verschiedenen Positionen des Senders bzw. Empfängers. Mit entsprechender Software lässt sich sehr schnell ein zweidimensionales Bild erzeugen [2].

Beim Impact-Echo-Verfahren (IE) werden die Schallwellen über einen mechanischen Schlag in das Bauteil eingeleitet und anschließend durch einen Empfängerkopf aufgenommen. Durch die Einleitung der Schallwellen (1 Hz bis 40 kHz) bilden sich zwischen der Bauteiloberfläche und den Grenzflächen (z.B. Rückwand, Strukturdefekte) durch Mehrfachreflexionen sogenannte stehende Wellen aus, die im Frequenzbereich als dominanter Frequenzpeak sichtbar werden [3].

Das Impuls-Radar-Verfahren (Radar) ist ein elektromagnetisches Verfahren, das kurze Impulse im Frequenzbereich von 50 MHz bis ca. 5 GHz in das Bauteil einleitet [2]. Die so entstehenden elektromagnetischen Wellen breiten sich in Abhängigkeit zu den dielektrischen Eigenschaften der Materialien im Bauteil aus [4]. An Grenzflächen mit einer sprunghaften Änderung der dielektrischen Eigenschaften, beispielsweise dem Übergang Beton/Luft, werden sie reflektiert, gestreut und gebeugt. Bei metallischen Einbauteilen (Bewehrung, Hüllrohre oder Fugenbleche) tritt eine Totalreflexion auf [4]. Das Impuls-Radar-Verfahren ist ein scannendes Verfahren, das einen deutlich schnelleren Messfortschritt ermöglicht. Daher können nach [5] mehrere hundert Meter pro Messtag untersucht werden.

Die Grundlagen und die Funktionsweise der Prüfverfahren werden hier nur angeschnitten. Eine detailliertere Beschreibung der Verfahren ist zu den bereits genannten Quellen unter anderem in [6 bis 12] enthalten.

Aufbau der Elementwände

Allgemein werden Elementwände durch zwei gegenüberliegende Fertigteilschalen (Dicke 5 – 7 cm) gebildet, die durch Gitterträger miteinander verbunden sind. Der verbleibende Zwischenraum wird auf der Baustelle mit Ortbeton ausbetoniert. Der Vorteil

der Elementwände gegenüber dem konventionellen Schalungsbau ist der geringere Aufwand auf der Baustelle durch die industrielle Vorproduktion und eine damit verbundene Qualitätssteigerung der Außenschalen [13].

Für den Ringversuch wurden drei Elementwände mit einer Länge von jeweils 2,00 m und einer Höhe von 2,36 m hergestellt. Die Gesamtdicke der Wände lag einheitlich bei 30 cm, wobei der 18 cm umfassende Kernbeton durch zwei Fertigteilshalen mit 6 cm Stärke eingefasst wurde. Die Übergänge zwischen den Wänden wurden mit verschiedenen Einbauteilen versehen, somit ergab sich eine Gesamtlänge von 6,00 m. Im Folgenden werden die einzelnen Wandteile als Wand A, B und C bezeichnet (Abbildung 17).

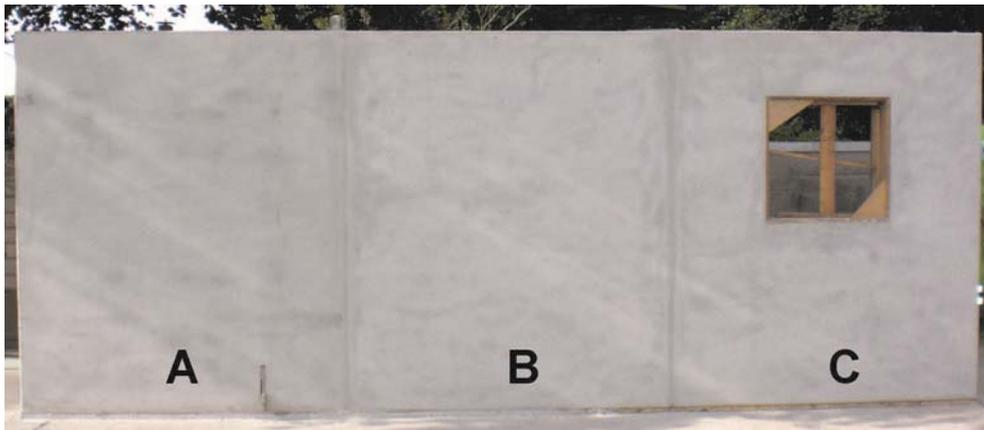


Abbildung 17: Ansicht der erstellten Elementwände

Die eingesetzte Bewehrung beschränkte sich auf Bewehrungsstäbe mit einem Durchmesser von 8 mm und einem Abstand von 20 cm in lotrechter bzw. 30 cm in waagerechter Lage. Die Gitterträger hatten untereinander einen maximalen Abstand von ca. 45 cm. Durch die industrielle Vorproduktion der Elementwände und durch den Einsatz eines Betons der Festigkeitsklasse C 40/50 lässt sich eine gleichbleibend hohe Qualität der Fertigteile erreichen. Bei der Produktion der Fertigteilshalen wurde ein Größtkorn von 16 mm in unterschiedlichen Kornfraktionen (Zusammensetzung: Sand 0/2, Kies 2/8, Splitt 8/16) verwendet und es wurde die Konsistenzklasse F3 angestrebt.

Nach dem Aufstellen der Wände erfolgte das Vornässen der Fertigteilinnenflächen - nach den Vorgaben der Din 1045-3 (Abschnitt 8 (5)) [14], WU-Richtlinie (Abschnitt 11.2.2 (6)) [15] sowie den Einbauanleitungen der Hersteller - unmittelbar vor der Betonage. Durch das vollflächige Vornässen der Betonoberflächen wird der Entzug des zur Hydratation erforderlichen Wassers verhindert [16]. Zur Betonage des Kernbetons wurde die Festigkeitsklasse C 25/30 vorgegeben. Der Kernbeton wurde mit einem Größtkorn von 16 mm hergestellt. Auf eine Anschlussmischung mit 8 mm Größtkorn im unteren Teil der Wand, wie beispielsweise in der WU-Richtlinie gefordert [15], wurde verzichtet. Abweichend vom Beton der Fertigteilshale wurde bei der Kornfraktion 8/16 des Kernbetons Kies anstelle von Splitt verwendet. Zusätzlich wurde für den Kernbeton die Konsistenzklasse F5 angestrebt. Die Betonage des Kernbetons erfolgte lagenweise in Abschnitten mit einer Steighöhe von 50 bis 80 cm je Stunde. Die Verdichtung mittels Innenrüttler wurde nach jeder eingebrachten Lage durchgeführt.

Lage der Einbauteile und Strukturdefekte

In der ersten Versuchsserie [1] wurden Strukturdefekte eingebaut, die bei Schadensfällen in der Vergangenheit maßgeblichen Einfluss auf die Qualität von Elementwänden hatten. Für die neue Versuchsreihe wurde zu einzelnen Strukturdefekten die Erkennbarkeit von unterschiedlichen Einbauteilen betrachtet. In der Abbildung 18 sind die verschiedenen Einbauteile und Strukturdefekte zu erkennen.

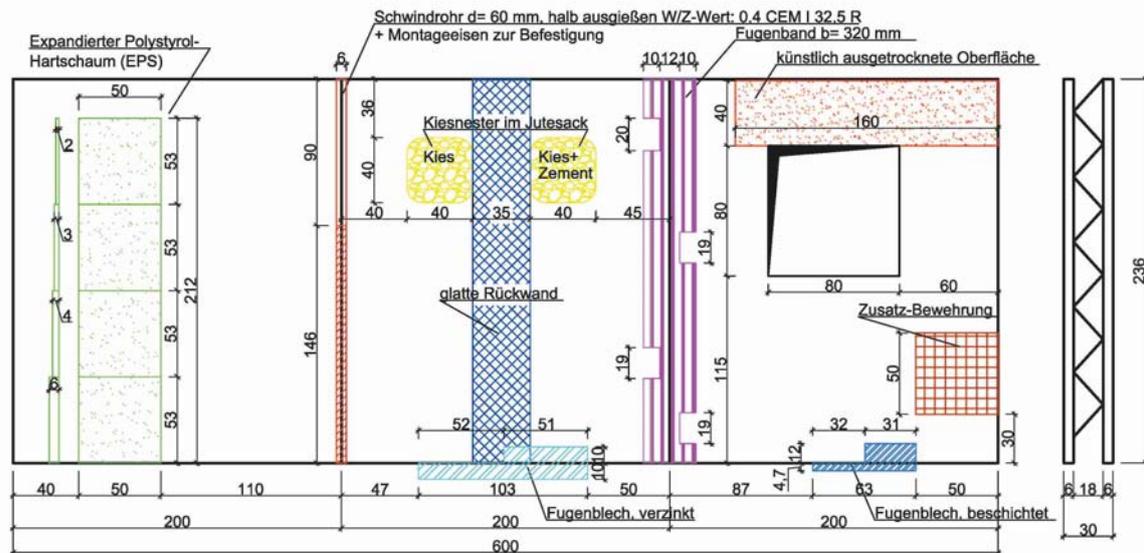


Abbildung 18: Anordnung der Strukturdefekte (farblich dargestellt)

In der Wand A wurden auf der hinteren Fertigteilschale Platten aus expandiertem Polystyrol-Hartschaum in unterschiedlicher Dicke (2 bis 6 cm) angebracht. Hierbei sollte die Detektierbarkeit von Hohlräumen mit unterschiedlicher Mächtigkeit untersucht werden (Abbildung 19, links).

Im Übergang von Wand A zu Wand B wurde ein Schwindrohr mit einem Durchmesser von 60 mm eingebaut, wie es üblicherweise zur Herstellung von Sollrissquerschnitten bei Elementstößen verwendet wird (Abbildung 19, rechts). Das Schwindrohr wurde über eine Höhe von ca. 146 cm mit Zementleim (W/Z-Wert: 0,4; CEM I 32,5 R) ausgegossen. Die Messungen sollten zeigen, ob es möglich ist, ein Schwindrohr nachzuweisen und bestenfalls, ob es sachgerecht mit dem Vergussmaterial verfüllt wurde.



Abbildung 19: Polystyrol-Hartschaum in Wand A und Schwindrohr im Übergang Wand A zu Wand B

Im oberen Bereich der Wand B wurden zwei Kiesnester mit unterschiedlichen Zusammensetzungen eingebracht. Die Kiesnester wurden mit einer Körnung von 2-4 mm und 8-16 mm zu gleichen Anteilen gemischt und mit einer definierten Menge (ca. 13 kg) in ein handelsübliches, engmaschiges Netz gefüllt (Abbildung 20, links).

Im zweiten Kiesnest wurde der Kies zusätzlich mit ca. 3 kg Portlandzement (CEM I 32,5 R) gemischt und befüllt. Insgesamt lag die Füllmenge somit bei ca. 16 kg. Besonders von Interesse waren die Auswirkungen der zusätzlichen Feianteile durch den Zement auf die Detektion des gesamten Kiesnestes. Des Weiteren wurde über die gesamte Länge der Wand B ein 50 cm breiter Streifen der hinteren Fertigteilschale geglättet (Abbildung 20, mittig). Der Hintergrund für diese Maßnahme war, dass bei Fertigteilenelementen eine vorgegebene Rautiefe der Innenflächen erzeugt werden muss, um einen ausreichenden Verbund des Kernbetons mit der Fertigteilschale zu gewährleisten [15].

Die Untersuchung mit ZiP-Messgeräten sollte mögliche Unterschiede auf den Verbund zwischen Kernbeton und Fertigteilschale feststellen. Im unteren Bereich der Wand B wurde ein verzinktes Fugenblech ($d = 1 \text{ mm}$) eingebaut, das zur Hälfte umgeknickt wurde, um ein herunter getretenes Fugenblech zu simulieren (Abbildung 20, rechts). Dieser Fall tritt auf Baustellen häufiger auf, da das Fugenblech schon bei der Betonage der Bodenplatte eingebracht wird. Das Aufstellen der Elementwände erfolgt erst anschließend im Verlauf der Bauarbeiten. Daher befindet sich der obere Teil des Fugenblechs einige Zeit ungeschützt auf der Bodenplatte und es kann zu Beschädigungen kommen. Im schlimmsten Fall kann ein kompletter Funktionsverlust der Abdichtung erfolgen und somit zu Undichtigkeiten des Bauwerks führen. Die Einbindung des Fugenblechs in die Elementwand lag bei ca. 10 cm.



Abbildung 20: Kiesnest, glatte Rückwand und verzinktes Fugenblech in Wand B

Im Übergang der Wand B zu Wand C wurde ein Elastomer-Fugenband mit einer Breite von 32 cm eingebaut. Das Fugenband wurde mit einigen Ausklinkungen versehen, die annähernd eine Höhe von 20 cm und eine Breite von ca. 10 cm besaßen (Abbildung 21). Die flächige Struktur des Fugenbandes wurde durch diese Ausklinkungen an einigen Stellen unterbrochen, um zusätzliche Aussagen zur Genauigkeit der Messverfahren zu erhalten.



Abbildung 21: Fugenband ($b = 32 \text{ cm}$) im Übergang Wand B zu Wand C

Im unteren Bereich der Wand C wurde ein beschichtetes Fugenblech ($d = 1,2 \text{ mm}$) eingebaut und wie in Wand B zur Hälfte umgeknickt (Abbildung 22, links). An der rechten Seite der Wand C wurde im Kernbeton eine zusätzliche Bewehrung in Form von Bügeln eingebracht (Abbildung 22, mittig). Der erhöhte Bewehrungsgehalt sollte weitere Aussagen zum Verhalten der unterschiedlichen Messverfahren liefern.

Im oberen Bereich über dem Fenster der Wand C wurde mittels einer thermischen Oberflächenerwärmung eine künstliche Austrocknung der Fertigteilshale simuliert (Abbildung 22, rechts). Gerade bei sommerlichen Temperaturen kann ohne Vornässen ein gestörter Verbund zwischen Fertigteilshale und Kernbeton entstehen.



Abbildung 22: Beschichtetes Fugenblech, zusätzliche Bewehrung und thermische Austrocknung in Wand C

Zusätzlich zu den eingezeichneten Fehlstellen war im Bereich des Fensters eine weitere Bewehrung in den Fertigteilshalen verlegt. Hierbei handelte es sich um jeweils zwei Stabstähle ($d = 12 \text{ mm}$) oberhalb, unterhalb und seitlich des Fensters in beiden Fertigteilshalen. Außerdem wurde für den letzten Betonierabschnitt ca. 30 cm von oben eine höhere Betonfestigkeitsklasse als die vorher verwendete Festigkeitsklasse C 25/30 verwendet.

Hohlstellen am Fenster durch unsachgemäßes Einbringen des Kernbetons konnten nach dem Ausschalen des Fensterbereiches ausgeschlossen werden. In der Abbildung 23 ist ersichtlich, dass eine vollflächige Verfüllung des gesamten Fensterbereiches vorliegt.



Abbildung 23: Fensterbereich nach der Betonage

Bis auf die Einbauteile und Strukturdefekte wurden alle anderen ausführungstechnischen Arbeitsschritte entsprechend den Vorgaben der DIN 1045-3, Abschnitt 8 ausgeführt [17].

Durchführung der Messungen

Die Messungen an den Elementwänden wurden von acht unabhängigen Messteams durchgeführt. Ein einheitliches Messraster auf den Wänden sollte die Vergleichbarkeit zwischen den verschiedenen Messverfahren und Messteams ermöglichen. Das Messraster wurde, wie in Abbildung 24 zu erkennen ist, als 20 x 20 cm Raster angelegt und an den Übergängen zur nächsten Wand, am Fenster und im oberen bzw. unteren Bereich der Wände auf 20 x 10 cm bzw. 20 x 5 cm verringert.

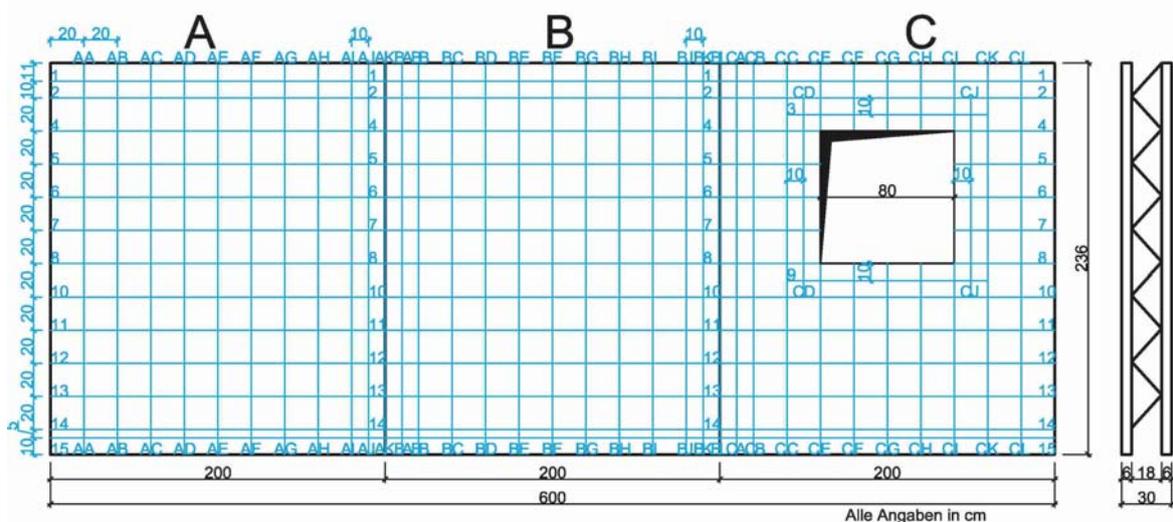


Abbildung 24: Anordnung der Messlinien (farblich dargestellt)

In der Tabelle 1 sind die Messteams mit den unterschiedlichen Messverfahren dargestellt. Die Einteilung erfolgte in Ultraschall-Echo-, Impact-Echo- und Impuls-Radar-Verfahren. Bei der Durchführung der Messungen konnte es vorkommen, dass bei gleichen Verfahren unterschiedliche Messgeräte (Hersteller) oder Auswertungsprogramme (Software) zum Einsatz kamen. Des Weiteren konnte es beim Einsatz verschiedener Messteams und den damit verbundenen Unterschieden im Umgang mit den jeweiligen

Messverfahren im punkto Genauigkeit, Dauer und Erfahrung bei der Auswertung zu einer unterschiedlichen Detektierbarkeit zwischen den Messverfahren kommen.

Tabelle 1: Einteilung der Messverfahren und Messteams

Messteam	Messverfahren
1	Ultraschall-Echo (US)
	Impuls-Radar (Radar)
2	Impact-Echo (IE)
	Ultraschall-Echo
3	Impact-Echo
	Impuls-Radar
4	Ultraschall-Echo
5	Ultraschall-Echo
6	Ultraschall-Echo
7	Ultraschall-Echo
8	Ultraschall-Echo
	Impact-Echo
	Impuls-Radar

Darstellung der Messergebnisse

Erläuterung zur Auswertung der Messergebnisse

Zur Zusammenfassung und Veranschaulichung der Messergebnisse wurde eine vereinfachte Einteilung vorgenommen. Die Ergebnisse der Messteams wurden gesammelt und zentral durch die FH Münster in „erkannt“, „teilweise erkannt“ und „nicht erkannt“ unterteilt (siehe Tabelle 2). Bedingt durch verfahrenstechnische Zwänge wurden in einigen Fällen nicht die gesamte Wand und somit nicht alle Einbauteile gemessen. Dies wurde bei der Auswertung durch die Aussage „nicht gemessen“ berücksichtigt und entsprechend gekennzeichnet (Tab. 2).

Tabelle 2: Einteilung der Fehlstellen

erkannt =	O
teilweise =	∅
nicht erkannt =	X
nicht gemessen=	

Am Beispiel der Ultraschall-Echo-Messungen von einem Messteam wird die Einteilung im Folgenden genauer erklärt. Beispielhaft ist in der Abbildung 25 (links) die Messlinie 11 von AA bis AI im Ultraschallbild dargestellt. Bei der Darstellung handelt es sich um ein sogenanntes B-Bild, das aus einer Aneinanderreihung von punktwise durchgeführten Einzelmessungen (A-Bild) entsteht.

Im A-Bild wird die Amplitude des Messsignals dargestellt. Sichtbar werden Reflexionen an Strukturdefekten innerhalb des Querschnitts oder an der Rückwand durch eine deutliche Erhöhung der Amplitude des Messsignals, da die Ultraschallwelle daran reflektiert, gestreut oder transmittiert wird. Das B-Bild ist ein Schnitt durch den Wandquerschnitt, der rechtwinklig zur Oberfläche dargestellt wird. Daher wird die Amplitude aus dem A-Bild entsprechend der Intensität durch farbliche Abstufungen im B-Bild erfasst. In der gewählten Darstellung (Abbildung 25) entspricht eine bläuliche Färbung einer niedrigen Intensität (schwache Amplitude) und eine rötliche Färbung einer hohen Intensität (ausgeprägte Amplitude).

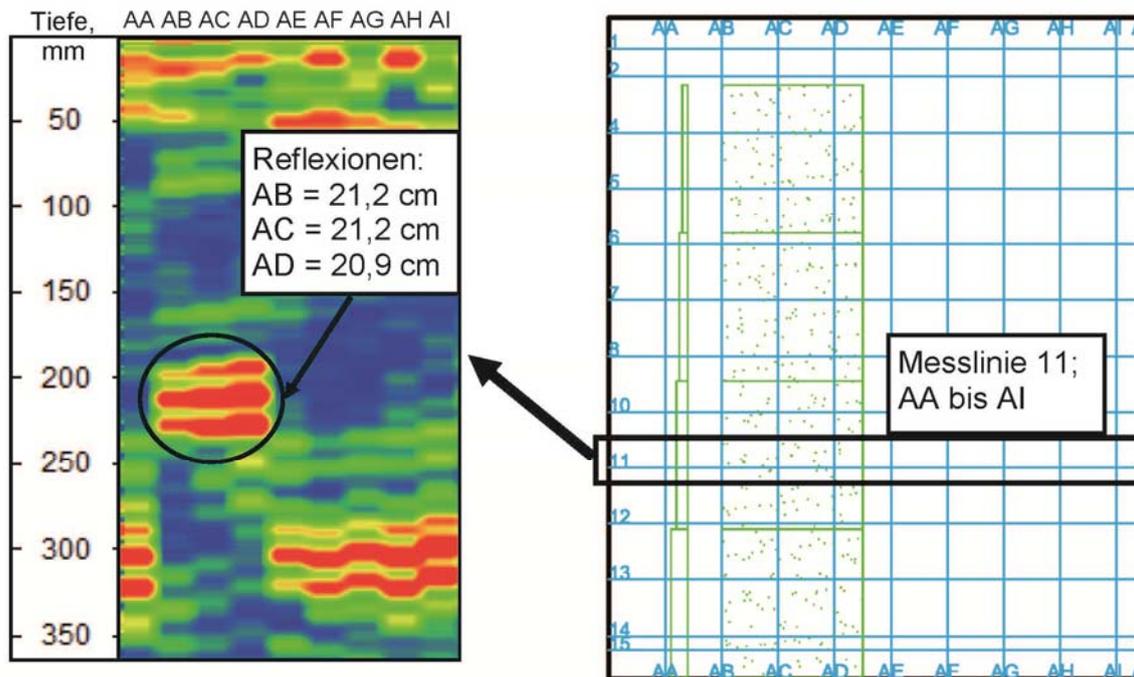


Abbildung 25: Ultraschallbild (B-Bild) der Messlinie 11 (links) und Skizze der Wand A mit einer Hartschaumplatte (rechts)

Die Wandskizze mit dem Messraster in Abbildung 25 (rechts) zeigt, dass die Polystyrol-Hartschaumplatte im Bereich von AB bis AD liegt. Hier treten im Ultraschallbild Abweichungen vom Rückwandecho auf. Die Reflexionen im Bereich der Hartschaumplatte liegen bei ca. 21 cm, was eine komplette Abschattung der Rückwand zur Folge hat. Die Abschattung der Rückwand dient häufig als sicheres Zeichen für eine Inhomogenität innerhalb des Wandquerschnittes. Im umliegenden Bereich der Hartschaumplatte zeigen sich keine Reflexionen in der Wand bzw. Abschattungen der Rückwand. Es ist zu erkennen, dass die Reflexionen erst an der Rückwand auftreten, was für einen homogenen Aufbau dieser Bereiche spricht. Die Hartschaumplatte hinterlässt auf den Ultraschallbildern der anderen Messlinien über die gesamte Höhe diese charakteristischen Abschattungen der Rückwand. Daher wird diese Inhomogenität als „erkannt“ bewertet.

Das Ultraschallbild in Abbildung 26 zeigt die Messlinie 15 von CA bis CL. Es ist erkennbar, dass eine Reflexion mitten im Wandquerschnitt auftritt. Im Punkt CH auf der Messlinie 15 ist ein deutliches Echo bei 17,9 cm vorhanden. In den anderen Punkten zeigen die Ergebnisse einen homogenen Wandaufbau, da die Reflexionen eher im Bereich der Rückwand zu finden sind. Laut des Lageplans in Abbildung 26 (rechts) müsste das beschichtete Fugenblech im Punkt CI eine deutliche Reflexion innerhalb des Wandquerschnitt hervorrufen. Es ist zwar eine geringe Reflexion im Wandquerschnitt zu erkennen, es kommt jedoch nicht zu einer Abschattung der Rückwand wie im Punkt CH oder in Abbildung 25. Daher wird der Punkt CI und somit das Fugenblech nur als teilweise erkannt bewertet.

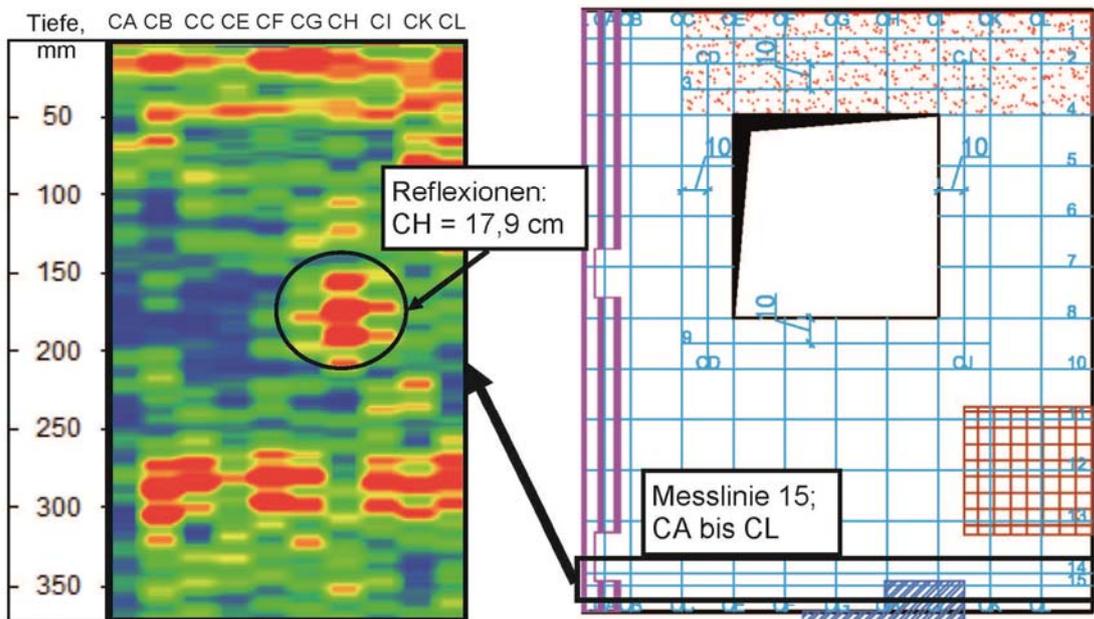


Abbildung 26: Ultraschallbild der Messlinie 15 (links) und Darstellung der Wand C mit dem „teilweise“ erkannten beschichteten Fugenblech (rechts)

Beispielhaft für eine nicht erkannte Inhomogenität ist die glatte Rückwand. Über die gesamte Höhe der Messlinie BF wurde keine Reflexion innerhalb des Wandquerschnitts nachgewiesen. Zur Verdeutlichung ist die Messlinie 13 mit dem Punkt BF dargestellt. Es ist ein homogener Wandaufbau zu erkennen, da die Reflexion des Punktes BF bei 30,4 cm liegt und somit genau im Bereich der umliegenden Rückwandreflexionen liegt, Abbildung 27.

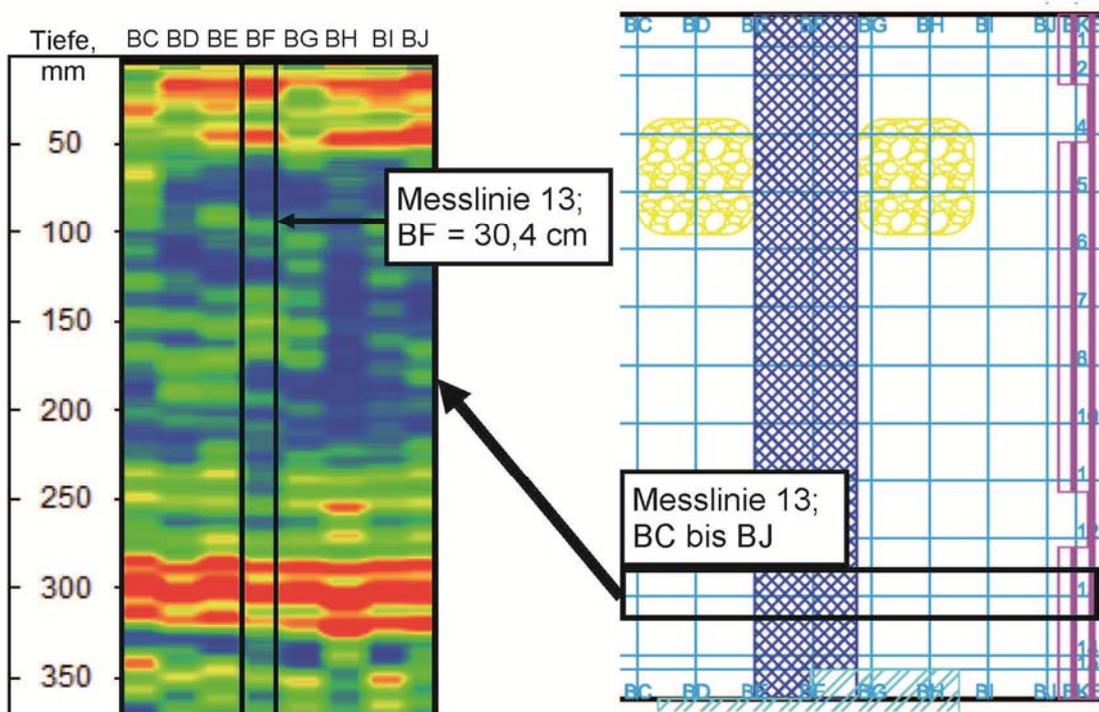


Abbildung 27: Ultraschallbild der Messlinie 13 (links) und Darstellung der Wand B mit der „nicht erkannten“ glatten Rückwand (rechts)

Gesamtauswertung der Messergebnisse

Ultraschall-Echo-Verfahren

Allgemein ist anzumerken, dass die Messverfahren in unterschiedlicher Häufigkeit von den Messteams angewendet wurden. Sieben von acht Messteams führten Messungen mit dem Ultraschall-Echo-Verfahren durch. Die beiden anderen Messverfahren, Impact-Echo- und Radar-Verfahren, wurden jeweils durch drei von acht Messteams eingesetzt.

Die Tabelle 3 zeigt die Übersicht der Ergebnisse mit dem angewendeten Ultraschall-Echo-Verfahren und den unterschiedlichen Strukturdefekten. Diese sind entsprechend ihrer Lage in der Wand in Tabelle 3 von links nach rechts angeordnet. Für die Auswertung wurde primär das Gesamtergebnis des jeweiligen Messverfahrens, unterteilt nach Ultraschall-Echo-, Impact-Echo- und Impuls-Radar-Verfahren, untersucht.

Tabelle 3: Gesamtübersicht der Ultraschall-Echo-Messungen

Messverfahren	Einbauteile / Strukturdefekte										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	EPS	Schwindrohr	Kies	Kies+Zement	glatte Rückwand	Fugenblech, verzinkt	Fugenband	Oberfläche Austrocknung	Fugenblech, beschichtet	Zusatz-Bewehrung	geänderte Betonrezeptur
US	o	o	o	o	x	x	o	∅	x	∅	∅
	o	∅	∅	o	x	x	o	∅	∅	x	∅
	o	o	o	o	x	x	o	∅	∅	∅	∅
	o	o	o	o	x		o				
	o	o	o	o	x	x	o	∅	x	x	∅
	o	o	o	o	x	x	o	∅	∅	∅	∅
	o	o	o	o	x	∅	o	∅	∅	∅	∅
	erkannt =		o								
	teilweise =		∅								
	nicht erkannt =		x								
	nicht gemessen =		/								

In der Abbildung ist zu erkennen, dass das Ultraschall-Echo-Verfahren wenige Abweichungen zwischen den Messteams zeigt, obwohl es durch die im Kapitel „Durchführung der Messungen“ beschriebenen Abweichungen bei der Detektion von Strukturdefekten zu unterschiedlichen Messergebnissen kommen könnte. Als vollständig von allen Messteams erkannt wurden die Hartschaumplatte (EPS), das Kiesnest mit Zement und das Fugenband. Das Ergebnis der Hartschaumplatte war sehr eindeutig. Daraus lässt sich schließen, dass flächige Hohlräume bzw. Strukturdefekte mit einer Mächtigkeit zwischen 2 und 6 cm einwandfrei mit dem Ultraschall-Echo-Verfahren nachweisbar sind.

Bei der Bewertung der Kiesnester ist darauf hinzuweisen, dass diese nicht exakt in ihrer Position gehalten werden konnten, da sie bei der Betonage in einer definierten Höhe auf den Kernbeton aufgesetzt wurden. Eine exakte Fixierung war infolgedessen nicht möglich. Die Bewertung der Messergebnisse erfolgte daher etwas „grober“ als bei den anderen Strukturdefekten. Festzuhalten bleibt, dass beide Kiesnester mit nur einer Ausnahme vollständig erkannt wurden. Aufgrund der Feinanteile des Zements und der damit verbundenen Füllung der Hohlräume im Kies sowie einer stofflichen Annäherung an den umgebenden Beton wurde bei der vorherigen Festlegung der Fehlstellen angenommen, dass das Kiesnest mit Zement im Vergleich zum „normalen“ Kiesnest nachteiligere Ergebnisse erzielt. Beim „einfachen“ Kiesnest wurde angenommen, dass es durch seine Struktur mit Hohlräumen besser zu lokalisieren ist. Die Messungen im Bereich des Fugenbandes zeigten eine fehlerfreie Detektierbarkeit dieses Einbauteils durch die gesamten Messteams. Die Ausklinkungen wurden bei der Bewertung nicht berücksichtigt, da nicht garantiert werden konnte, dass diese genau auf einer Messlinie lagen. Einige Messteams konnten die Ausklinkungen trotzdem nachweisen. Das Schwindrohr und das Kiesnest konnten bei sechs von sieben Messteams einwandfrei nachgewiesen werden.

Allerdings ist beim Schwindrohr anzumerken, dass die Teilfüllung mit Zementleim nicht erkannt wurde.

Relativ klare Ergebnisse wurden auch im Übergang der Wände erzielt, obwohl die Fugen zwischen den Elementwandstößen provisorisch mit Mörtel verspachtelt wurden, um einen vollflächigen Kontakt der Messgeräte zu gewährleisten. Die Ergebnisse der Einbauteile im Wandübergang (Fugenband, Schwindrohr) zeigen, dass diese Maßnahme auswertbare Ergebnisse liefern kann.

Von allen Messteams wurden die ausgetrocknete Oberfläche und die geänderte Betonrezeptur teilweise erkannt. Allgemein ist es bei diesen Strukturdefekten schwierig, eine genaue Aussage zur Bewertung zu treffen, da es sich hier zwar um eingegrenzte Flächen handelt, in denen aber nicht klar ist, wo bzw. wie sich die Strukturdefekte einstellen. Außerdem handelt es sich bei beiden Strukturdefekten um Randlagen, was eine Erkennung zusätzlich erschwert. In Randbereichen können die Schallwellen zusätzliche Reflexionen erzeugen, die eine unterschiedliche Detektierbarkeit hervorrufen können. Mit einigen Abstrichen wurden auch das beschichtete Fugenblech und die Zusatzbewehrung teilweise erkannt. Die Lage der beiden Inhomogenitäten befindet sich im Randbereich der Elementwand. Das verzinkte Fugenblech wurde nur einmal teilweise erkannt, ansonsten wurde es mehrheitlich durch die Messteams nicht erkannt. Bei der Lage dieses Einbauteils handelt es sich auch um eine Randlage, die gewisse Einflüsse hat. Außerdem bindet dieses Fugenblech nur ca. 10 cm in die Wand ein. Das beschichtete Fugenblech bindet ca. 12 cm tief in die Wand ein und ist dadurch vergleichsweise leichter erkennbar. Der Nachweis der glatten Rückwand war mit diesem Verfahren von keinem Messteam möglich. Der Verbund zwischen der glatten Rückwand und dem Beton scheint daher in diesem Fall auszureichen, um eine Detektion mit dem Ultraschall-Echo-Verfahren zu verhindern.

Impact-Echo-Verfahren

Die Messungen mit dem Impact-Echo-Verfahren sind in Tabelle 4 dargestellt. Vollständig von allen Messteams wurden die Hartschaumplatte (EPS) und das Fugenband erkannt. Das Schwindrohr und das Kiesnest mit Zement wurden fast vollständig erkannt. Teilweise wurden durch die Messteams das Kiesnest und die geänderte Betonrezeptur erkannt. Teilweise bis nicht erkannt wurden die ausgetrocknete Oberfläche, das beschichtete Fugenblech sowie die Zusatzbewehrung. Von allen Messteams mit dem Impact-Echo-Verfahren blieben die glatte Rückwand und das verzinkte Fugenblech unerkannt. Beim Vergleich der Ultraschall-Echo-Messungen mit den Impact-Echo-Messungen fällt auf, dass die Erkennung der Einbauteile und Strukturdefekte sich sehr ähnlich sind. Aus diesem Grund können die Aussagen zum Ultraschall-Echo-Verfahren weitestgehend auf das Impact-Echo-Verfahren angewendet werden.

Tabelle 4: Gesamtübersicht der Impact-Echo-Messungen

Messverfahren	Einbauteile / Strukturdefekte										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	EPS	Schwindrohr	Kies	Kies+Zement	glatte Rückwand	Fugenblech, verzinkt	Fugenband	Oberfläche Austrocknung	Fugenblech, beschichtet	Zusatz-Bewehrung	geänderte Betonrezeptur
IE	o	∅	∅	o	x	x	o	x	x	x	∅
	o	o	∅	o	x		o	∅		∅	∅
	o	o	∅	∅	x	x	o	∅	∅	∅	∅
	erkannt = o										
	teilweise = ∅										
	nicht erkannt = x										
	nicht gemessen = /										

Impuls-Radar-Verfahren

Im Vergleich zu den akustischen Verfahren lieferte das Impuls-Radar-Verfahren ein abweichendes Ergebnis. Bedingt durch die elektromagnetischen Impulse des Verfahrens lassen sich metallische Gegenstände im Wandquerschnitt besonders gut lokalisieren. Beispielsweise wurden die metallischen Einbauteile wie z.B. Fugenbleche größtenteils durch das Messverfahren nachgewiesen. Die Zusatzbewehrung, die beim Ultraschall-Echo- und beim Impact-Echo-Verfahren nur teilweise bis nicht erkannt wurde, wurde beim Impuls-Radar-Verfahren durch zwei von drei Messteams vollständig nachgewiesen. Einschränkungen in der Anwendbarkeit des Verfahrens können allerdings durch die etwas stärker bewehrten Fertigteilschalen auftreten, da sie schon im Anfangsbereich der Elementwände eine Signalstreuung verursachen können.

Wie in der Tabelle 5 ersichtlich, wurden die nicht metallischen Werkstoffe nicht eindeutig erkannt wie bei den akustischen Verfahren. Unregelmäßigkeiten und Inhomogenitäten von geringer Größe innerhalb des Werkstoffes Beton wurden nicht erkannt. Schwer zu erkennen waren auch das Kiesnest und die Austrocknung der Fertigteiloberflächen. Nur teilweise erkannt wurden die Hartschaumplatte und das Kiesnest mit Zement. Das Fugenband wurde auch durch das Impuls-Radar-Verfahren vollständig detektiert. Beim Schwindrohr waren die Ergebnisse sehr unterschiedlich. Ein Messteam konnte den Nachweis des Schwindrohres nicht erbringen. Gegenätzlich dazu wurde das Schwindrohr durch ein anderes Messteam vollständig nachgewiesen. Das dritte Messteam konnte das Einbauteil nur punktuell und somit teilweise nachweisen. Es ist allerdings bei der Einschätzung und Bewertung der Impuls-Radar-Ergebnisse darauf hinzuweisen, dass die Messteams verschiedene Antennen verwendeten, was eine mögliche Erklärung für die unterschiedlichen Messergebnisse darstellen könnte.

Tabelle 5: Gesamtübersicht der Radar-Messungen

Messverfahren	Einbauteile / Strukturdefekte											
	1 EPS	2 Schwindrohr	3 Kies	4 Kies+Zement	5 glatte Rückwand	6 Fugenblech, verzinkt	7 Fugenband	8 Oberfläche Austrocknung	9 Fugenblech, beschichtet	10 Zusatz-Bewehrung	11 geänderte Betonrezeptur	
Radar	∅	X	∅	(∅)	X	O	O	∅	∅	O	∅	
	∅	O	∅	∅	X	O	O	X	O	O	X	
	∅	∅	X	∅	X	X	O	∅	X	∅	X	
	erkannt =		O									
	teilweise =		∅									
	nicht erkannt =		X									
	nicht gemessen =		∅									

Verifizierung durch Bohrkerne

Bei der Auswertung stellte sich heraus, dass es einige Stellen gab, die zusätzlich zu den Strukturdefekten und Einbauteilen Abweichungen bei der Detektion aufwiesen. Daher wurden im Nachgang zu den Messungen einige Stellen ausgewählt, an denen Bohrkerne gezogen wurden, um gesicherte Aussagen treffen zu können. In Abbildung 28 sind die Stellen mit den jeweiligen Koordinaten aus dem Messraster zu sehen, an denen Bohrkerne gezogen wurden. Insgesamt wurden vier Bohrkerne mit einem Durchmesser von 100 mm gezogen. An drei Stellen (AG 7, BH 8, und CE 10) sind bei den Messungen Unregelmäßigkeiten in den ZfP-Messbildern einiger Messteams aufgetreten, die für eine weitere Untersuchung ausgewählt wurden.

Weiterhin konnte die Lage der Kiesnester nicht genau bestimmt werden. Um eine genaue Aussage über die Lage treffen zu können, wurde an der Stelle BD 5 ein weiterer Bohrkern gezogen.

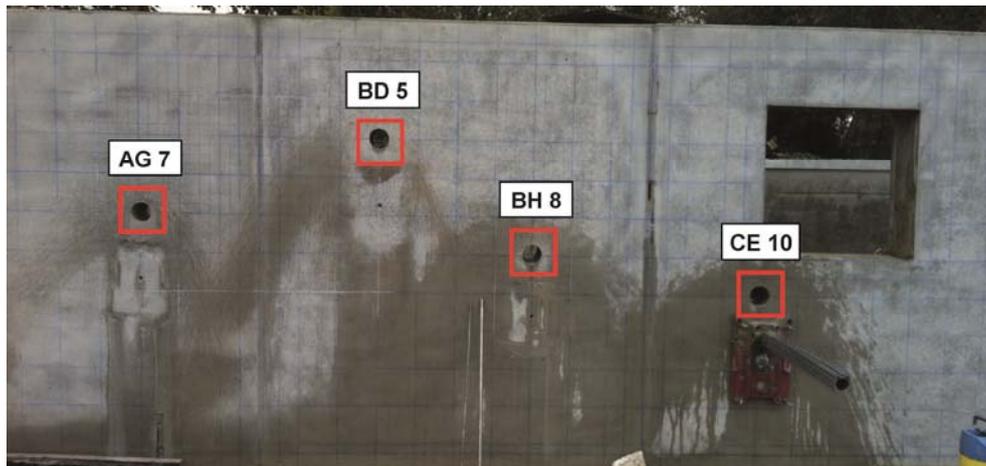


Abbildung 28: Bohrkerne zur Verifizierung der Messungen

In der Abbildung 29 sind die Bohrkerne in der jeweiligen Einzelansicht dargestellt. Auffällig ist bei den Bohrkerne ohne Strukturdefekte (AG 7, BH 8, CE 10), dass sich die Fertigteilshalen nicht mit dem Kernbeton verbunden haben. Beim Ziehen der Bohrkerne konnte keine Verbindung der beiden Flächen festgestellt werden, sodass sich die Einzelteile direkt voneinander lösten. Der nicht ausreichende Verbund der Fertigteilshalen mit dem Kernbeton und die damit einhergehende Bildung einer Grenzfläche könnte zu Reflexionen an der Fertigteilshale und somit zu verfälschten Messergebnissen geführt haben. Eine Rolle könnte dabei beispielsweise ein unzureichendes Vornässen mit einer daraus resultierenden eventuellen Störung im Verbund zwischen Fertigteilshale und Kernbeton gespielt haben. Ferner wurde an diesen Stellen bei der Überprüfung der Oberflächen eine relativ geringe Oberflächenrauheit vorgefunden, was die Ablösung begünstigt haben könnte.

Weiterhin besteht die Möglichkeit, dass die Ablösung erst durch die zerstörende Bauteiluntersuchung verursacht wurde. Hierzu sind noch weitere Untersuchungen erforderlich. Wie in der Abbildung zu erkennen ist, liegt eigentlich ein homogener Wandquerschnitt vor, der nur durch einen wenige Zehntel Millimeter großen Luftspalt unterbrochen wird. Somit liegt kein nennenswerter Strukturdefekt vor, der als Schwächung des Gesamtquerschnitts der Elementwand gezählt werden kann.

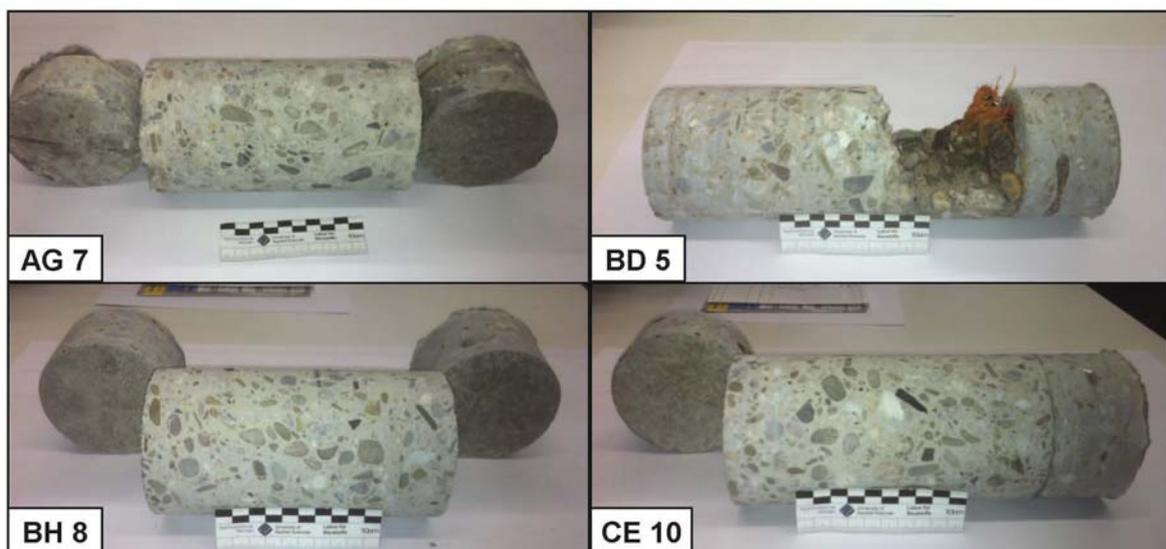


Abbildung 29: Einzelansicht der Bohrkerne (AG 7, BD 5, BH, 8, CE 10)

Die Überprüfung der Lage des Kiesnestes konnte durch den Bohrkern an der Stelle BD 5 durchgeführt werden. Das Kiesnest wurde, wie in der Abbildung 30 ersichtlich, im

unteren Bereich angebohrt. Somit kann davon ausgegangen werden, dass die Lage des Kiesnestes ungefähr mit der in der theoretischen Zeichnung festgelegten Lage übereinstimmt.



Abbildung 30: Überprüfung der Lage des Kiesnestes

Schlussfolgerung und Ausblick

Durch den Einsatz zerstörungsfreier Prüfverfahren können Schäden an Elementwandkonstruktionen detektiert werden. Das konnte in mehreren Fallstudien nachgewiesen werden. Je nach Anwendungsfall kommen hierbei unterschiedliche Prüfverfahren zum Einsatz. In ersten Testreihen an Elementwänden wurden in Labormessungen verschiedene definierte Strukturdefekte eingebaut und mit drei unterschiedlichen Messverfahren untersucht [1].

In dem vorliegenden Ringversuch wurden weiterführende Fragestellungen zur zerstörungsfreien Prüfung an Elementwänden betrachtet. Strukturdefekte und Einbauteile wurden in den Wänden platziert und durch acht unabhängige Messteams mit drei unterschiedlichen Messverfahren untersucht. Die Besonderheit bestand darin, dass den Messteams keine konkreten Angaben zu den Strukturdefekten bzw. Einbauteilen gegeben wurden. Die Ergebnisse wurden anschließend zentral gesammelt und ausgewertet, um eine größtmögliche Objektivität zu gewährleisten. Weiterhin wurde in dieser Testreihe auch der Übergang zwischen den Wänden mit entsprechenden Einbauteilen zerstörungsfrei untersucht. Obwohl an diesen Stellen eine Stoßfuge zwischen den Elementwänden entsteht, konnten auswertbare Ergebnisse geliefert werden.

Als Ergebnis kann festgehalten werden, dass die Strukturdefekte und Einbauteile überwiegend erkannt wurden. Zur geometrischen Ausbreitung konnten häufig aufgrund der Lage die Angaben zum jeweiligen Strukturdefekt bzw. Einbauteil noch spezifiziert werden. Dies setzt allerdings ein gewisses Maß an Erfahrung im Umgang mit den Messverfahren voraus. Darüber hinaus sind immer auch physikalische, technische und wirtschaftliche Faktoren für die Prüfaufgabe von entscheidender Bedeutung. Um gesicherte Aussagen treffen zu können, wird eine Kombination aus verschiedenen Verfahren als sinnvoll erachtet. Jedoch sollten zeitliche bzw. wirtschaftliche Faktoren bei der Planung berücksichtigt werden. Insbesondere das Ultraschall-Echoverfahren ist aufgrund der punktuellen Messungen sehr zeitintensiv. Ansätze für eine Beschleunigung der Verfahrenstechnik durch eine berührungslose Schallanregung ist im Rahmen der Forschung bereits erbracht [20].

Diese Testreihe hat bewiesen, dass die zerstörungsfreie Prüfung dazu geeignet ist, zahlreiche Strukturdefekte und Einbauteile zielsicher zu orten. Sie hat aber auch gezeigt, dass einige Verdachtsstellen, die von den Messteams geortet wurden, nur punktuelle

Ablösungen der Fertigteilschalen vom Kernbeton darstellten. Dennoch kann die zerstörungsfreie Prüfung dazu beitragen, die zerstörende Bauwerksöffnung zu minimieren und weitere Kosten einzudämmen.

Autoren

Prof. Dr.-Ing. Dietmar Mähner, Fachhochschule Münster, Münster

Prof. Dr.-Ing. Christian Sodeikat, Technische Universität München (TUM), München

Dr.-Ing. Stefan Maack, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin

Literatur

- [1] Mähner, D., Thünemann, S., Becker, M.: Nachweis von Strukturdefekten in Elementwänden mittels zerstörungsfreier Prüfverfahren. Beton- und Stahlbetonbau 105 (2010), Heft 12, S. 787-796.
- [2] Hasenstab, A., Walther, A.: Sonderdruck aus Bauphysik Kalender, Zerstörungsfreie Prüfverfahren zur Bestimmung von Materialparametern im Stahl- und Spannbetonbau. Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 2012.
- [3] Reinhardt, H.-W., et al.: Sonderdruck aus Betonkalender, Echo-Verfahren in der zerstörungsfreien Zustandsuntersuchung von Betonbauteilen. Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 2007.
- [4] Streicher, D., Wiggenhauser, H., Holst, R., Haardt, P.: Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen. Beton- und Stahlbetonbau 100 (2005), Heft 3, S. 216-224.
- [5] Taffe, A., Feistkorn, S., Diersch, N.: Erzielbare Detektionstiefen metallischer Reflektoren mit dem Impulsradarverfahren an Beton. Beton- und Stahlbetonbau 107 (2012), Heft 7, S. 442-450.
- [6] Sodeikat, Ch., Dauberschmidt, C., Schoßmann, A.: Ultraschall-Echo-Verfahren und Impulsradar in der Praxisanwendung eines Ingenieurbüros. Beton- und Stahlbetonbau 103 (2008), Heft 12, S. 819-827.
- [7] Reinhardt, H.-W.: Moderne ZfP bei der Bauwerkserhaltung. Bergisch Gladbach: Vortrag Abschlusskolloquium DFG-Forschergruppe FOR 384, 3. Mai 2007.
- [8] Schickert, G., Krause, M., Wiggenhauser, H.: ZfPBau-Kompodium 2004 - Verfahren der Zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen. Internetpräsenz: <http://www.bam.de/zfpbau-kompodium.htm> (2004).
- [9] Taffe, A., Wiggenhauser, H.: Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen. Bauphysik Kalender 2004. Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 2004.
- [10] Mähner, D., Rath, E., Lange D.: Bestimmung der Tunnelinnenschalendicke mit zerstörungsfreien Prüfverfahren. Beton- und Stahlbetonbau 101 (2006), Heft 8, S. 606-613.
- [11] Taffe, A., Wiggenhauser, H., Raupach, M.: Validierung zerstörungsfreier Prüfverfahren im Bauwesen. Beton- und Stahlbetonbau 103 (2008), Heft 12, S. 828-836.
- [12] Taffe, A., Wiggenhauser, H.: Zerstörungsfreie Zustandsermittlung und Qualitätssicherung in der Betoninstandsetzung. Beton- und Stahlbetonbau -Betonerhaltung 103 (2008), S. 1-13.
- [13] Mähner, D., Weber, J.: Zur Qualitätssicherung bei der Ausführung von Elementwänden für wasserundurchlässige Betonkonstruktionen. Beton- und Stahlbetonbau 104 (2009), Heft 1, S. 48-55.
- [14] DIN 1045-3: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton; Teil 3: Bauausführung, Ausgabe 08/2008. Berlin: Beuth Verlag (2008).
- [15] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: DAfStb-Richtlinie Wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton (WU-Richtlinie); Ausgabe: 2003-11 (einschl. Berichtigung 2006-03, Stand der Auslegungen 2006-03).
- [16] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: Erläuterungen zur DAfStb-Richtlinie Wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton, Heft 555. Berlin: Beuth Verlag (2006).
- [17] DIN 1045-3: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton; Teil 3: Bauausführung, Ausgabe 08/2008. Berlin: Beuth Verlag (2008).
- [18] Krause, M.; Behrens, M.; Maack, S.; Lange, M.; Milmann, B.; Wöstmann, J.; Hinzpeter, F.: Bildgebende Ortung von Ablösungen in mehrschichtigen Betonbauteilen mit dem Ultraschallecho-Verfahren: Fachtagung Bauwerksdiagnose - Praktische Anwendungen Zerstörungsfreier Prüfungen und Zukunftsaufgaben: 18. - 19. Februar 2010, Berlin. DGZfP, Berlin, 2010.
- [19] Krause, M.; Borchardt, K.; Lange, M.; Behrens, M.; Maack, S.; Mielenz, F.; Milmann, B.; Schaurich, D.; Wöstmann, J.: Kosteneinsparung durch Anwendung zerstörungsfreier Prüfverfahren für Betonbauteile beim Bauen im Bestand. Fraunhofer-IRB-Verl, Stuttgart, 2012.
- [20] Maack, S.: Untersuchungen zum Schallfeld niederfrequenter Ultraschallprüfköpfe für die Anwendung im Bauwesen. Dissertation. BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin, 2012.