

Radar, Ultraschallecho und die Bestimmung der Betondeckung an Stahl- und Spannbetonbauteilen

Doreen STREICHER*, Jochen H. KURZ**, Christian BOLLER*/**

* Universität des Saarlandes
(66123 Saarbrücken, Doreen.Streicher@bam.de)

** Fraunhofer IZFP Saarbrücken
(66123 Saarbrücken, Jochen.Kurz@izfp.fraunhofer.de)

Kurzfassung. Die Bestandsaufnahme oder Qualitätssicherung von Bauwerken aus Stahl- oder Spannbeton erfordert zunehmend den Nachweis, dass alle Bewehrungselemente eingebaut sind und ihre Lage den Anforderungen der geltenden Baurichtlinien entspricht. Zwei Bewehrungsgruppen sind von Interesse. In einer Tiefe von 3 bis 6 cm unter der Betonoberfläche ist die Rissbreiten beschränkende Bewehrung (meist Stabstahl) eingebaut. In größeren Einbautiefen befindet sich die Bewehrung zur Aufnahme der erwarteten Lasteinwirkungen. Bei Spannbeton gehören dazu die Spannlieder.

Mit Hilfe der zerstörungsfreien Prüfverfahren Radar und Ultraschallecho können diese Bewehrungselemente detektiert werden. Da die Verfahren auf unterschiedlichen physikalischen Grundprinzipien basieren, ist für die Lösung anspruchsvoller Prüfaufgaben der Einsatz beider Verfahren sinnvoll.

Für die effektive Nutzung der komplementären Information sind nicht nur die maximal möglichen Detektionstiefen von Interesse, sondern auch die Genauigkeit bei der Ermittlung der Betondeckungen über den detektierten Bewehrungselementen. Für die Untersuchungen zur Genauigkeit sind sowohl die Einflüsse des Prüfobjekts, wie Einbautiefe der Bewehrungselemente, Größe der Bewehrungselemente, Einfluss vorliegender Bewehrung und Betonsorte, als auch die Einflüsse durch Gerätekonzeption, Mess- und Auswertestrategie, zu erörtern. In diesem Beitrag werden die Einflüsse durch die Rekonstruktionsprozesse, die Wahl der Nulllaufzeit und die Wellenausbreitungsgeschwindigkeiten quantitativ beschrieben.

1. Einführung

In Ingenieurbauwerken aus Stahl- und Spannbeton sind zur Rissbreitenbeschränkung Bewehrungsstäbe aus Stahl in einer Tiefe von 3 cm bis 6 cm eingebaut. In größeren Einbautiefen befindet sich die Last aufnehmende Bewehrung. Zu ihr gehören Spannlieder, die Durchmesser bis zu 15 cm aufweisen können.

Die Bewehrungselemente sowie Hohlräume in den Bauwerken sind mit Radar und Ultraschallecho detektierbar [1]. Das Eindringverhalten und die Eindringtiefe der elektromagnetischen und elastischen Wellen sind unterschiedlich. In Tiefenbereichen, in denen mit beiden Verfahren Bewehrungselemente detektiert werden, sind ihre Ergebnisse bei der Bestimmung der Betondeckung ähnlich, aber nicht unbedingt gleich (siehe

Abbildung 1). Die Betondeckung ist der Abstand zwischen der äußeren Oberfläche der Bewehrung und der nächstgelegenen Betonoberfläche [2].

Die Frage ist naheliegend: Wie genau ist jedes Verfahren bei der Ermittlung der Betondeckung über den Bewehrungselementen?

Die Beantwortung dieser Frage ist von Bedeutung, wenn die Prüfaufgabe lautet: (a) die Lage eines Bewehrungselementes ist sehr genau und möglichst zerstörungsfrei zu bestimmen oder

(b) der ganzheitliche Aufbau eines Bauteils ist zu ermitteln.

Diese anspruchsvollen Aufgaben erfordern meist die gemeinsame Anwendung sowie eine aufeinander abgestimmte Auswertung und Interpretation der Ergebnisse von Radar und Ultraschallecho. Die gemeinsame Darstellung der Ergebnisse und die Fusion der Daten [3] sind hierfür wichtige Werkzeuge. Ziel muss es sein, dabei nicht nur eine möglichst große Abbildungsschärfe der detektierten Reflektoren zu erreichen, sondern auch die Lage der Einbauelemente richtig und präzise wiederzugeben [4].

In diesem Beitrag werden die Einflüsse auf die Bestimmung der Betondeckung durch die Rekonstruktionsprozesse, die Wahl der Nulllaufzeit und die Wellenausbreitungsgeschwindigkeiten vorgestellt und quantitativ beschrieben.

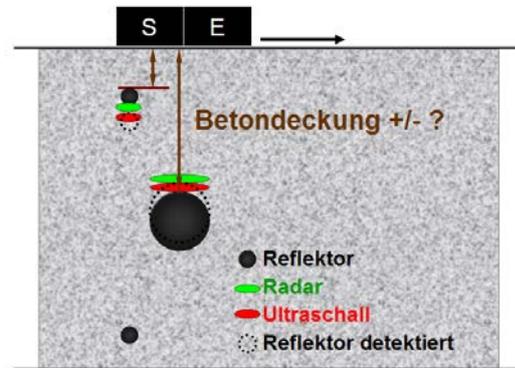


Abbildung 1 Bestimmung der Betondeckung: ein Praxisfall.

2. Messung und Auswertung

Für die Untersuchungen wurden Probekörper in Anlehnung an die Erfahrungen aus der Praxis hergestellt. Die Probekörper enthalten Prüfbereiche mit und ohne Oberflächen naher Bewehrung sowie zwei für die Baupraxis typische Bewehrungselemente in verschiedenen Einbautiefen. Es wurden Einbautiefen gewählt, in denen sowohl die Detektion der Bewehrungselemente mit beiden Verfahren gegeben ist, als auch die verfahrensspezifischen Grenzen erkennbar sind.

Die Verfahren Radar und Ultraschallecho wurden gemäß dem Entwicklungsstand als bildgebende Echoverfahren angewandt. Die Messungen erfolgten flächig, automatisiert und mit der Maßgabe, die Rekonstruktionsdaten beider Verfahren später miteinander fusionieren zu können.

2.1 Probekörper

Die zwei Probekörper wurden unter Verwendung von Normalbeton der Festigkeitsklasse C 30/37 mit einer Gesteinskörnung bis zu 32 mm-Größtkorn hergestellt. Die Prüfflächen der Testkörper sind 1,50 m x 1,50 m groß. Die Dicken betragen 0,50 m bzw. 0,30 m.

Die Probekörper sind in Abbildung 2 dargestellt. Der **Probekörper A** mit 50 cm Dicke enthält sieben Stahlrohre (Außendurchmessern 43 mm, Wandstärke 2 mm) in unterschiedlichen Einbautiefen und eine Bewehrungsmatte, bestehend aus parallel und senkrecht angeordneten Stahlstäben mit 12 mm Durchmesser. Im 30 cm dicken **Probekörper B** sind anstelle der Stahlrohre sieben Bewehrungsstahlstäbe mit einem Durchmesser von 16 mm eingebaut. Zusätzlich befinden sich im Probekörper ein Bewehrungsstab mit 12 mm Durchmesser und einer mit 20 mm Durchmesser.

Probekörper A

Probekörper B

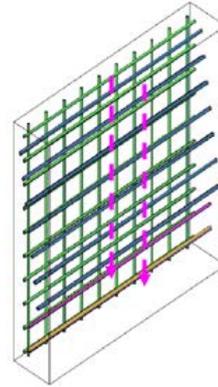
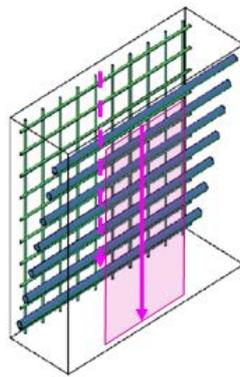


Abbildung 2 Probekörper mit Messlinien und Messfeld,
Probekörper A: Beton (1,50 m x 1,50 m x 0,50 m) mit Stahlrohren (Außen-Ø 43 mm, Wandstärke 2 mm) und einer Bewehrungsmatte (Ø 12 mm, Abstand 15 cm);
Probekörper B: Beton (1,50 m x 1,50 m x 0,30 m) mit Stahlstäben (Ø 16 mm) und einer Bewehrungsmatte (Ø 12 mm, Abstand 15 cm).

2.2 Datenaufnahme und -aufbereitung

Die Datenaufnahme erfolgte innerhalb vier gleich großer Messfelder (60 cm x 130 cm). Ihre Lage auf den Prüfflächen ist identisch. Das Messfeld am Probekörper A, auf der unbewehrten Seite ist in Abbildung 2 skizziert.

Für die **Radar**-Messungen wurde eine 1,2 GHz-Antenne der Fa. MALA direkt auf die Prüffläche aufgesetzt und entlang der in Abbildung 2 skizzierten Messspuren geführt. Pro Messfeld wurden 13 Messspuren aufgenommen. Die Aufbereitung und Auswertung der Daten erfolgte mit der REFLEXW-Software von K. J. Sandmeier [5].

Bei **Ultraschallecho** wurde ein A1220-Prüfkopf der Fa. ACSYS mit einer Mittenfrequenz von 50 kHz angeregt. Der Abstand der Messpunkte betrug 2,5 cm. Die Messungen und die Aufbereitung der Daten erfolgte mit BAM eigenen Software-Programmen. Für die 3-D-Rekonstruktionsberechnungen wurde ein vom Fraunhofer IZFP Saarbrücken entwickeltes Rekonstruktionsprogramm genutzt.

2.3 Bestimmung der Betondeckung

Die Betondeckung d über Bewehrungsstäben, Spanngliedern oder Hohlräumen wird mit Radar und Ultraschallecho nicht direkt bestimmt. Sie ist für die detektierten Elemente aus deren Laufzeit t und der für das Untersuchungsobjekt ermittelten Wellenausbreitungsgeschwindigkeit v_{Beton} zu berechnen:

$$d = f(v, t) = v_{\text{Beton}} \cdot t / 2 \quad (1).$$

Für die Laufzeitbestimmung ist der Impuls maßgebend, der bei den Messungen ausgesendet wird, an der Oberfläche des Reflektors auftrifft und von dort zur Messoberfläche reflektiert wird. Er ist durch seine Amplituden und seine Phase charakterisiert. Zur Bestimmung der Laufzeit muss innerhalb des Impulses ein Ablesekriterium, z. B. der Ersteinsatz, das Maximum oder das Minimum, gewählt werden. Hier gibt es unterschiedliche Ansätze [6, 7].

Bei den hier vorgestellten Untersuchungen wurde das mittlere Minimum oder das Maximum des Impulses, je nach Phasenverhalten der Impulse an den Reflektoren (siehe Abbildung 5), bzw. das Maximum der Einhüllenden verwendet. Diese Kriterien haben sich für die Ortung der Reflektoren mit beiden Verfahren bisher am besten bewährt. Von dieser

Laufzeit muss bei beiden Verfahren die Zeit für den zeitlichen Startpunkt der Messungen (die Nulllaufzeit) abgezogen werden. Bei Ultraschallecho kann sie durch die Kalibrierung des Messsystems ermittelt werden, bei Radar ist sie für jede Messung neu zu bestimmen. Eine exakte Ermittlung ist fast unmöglich [5].

Die materialspezifische Wellenausbreitungsgeschwindigkeit wird i. d. R. an einem Reflektor im untersuchten Bauteil bestimmt, für den die Betondeckung bekannt ist. Bei Radar ist oftmals kein geeigneter Referenzreflektor vorhanden. Die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit lässt sich anhand des Öffnungswinkels der Reflexionshyperbeln abschätzen.

3. Ergebnisse

Bei den im Folgenden als „vorhandene Betondeckung“ bezeichneten Werten handelt es sich um die Betondeckungen, die mit Maßband am Probekörper gemessen wurden.

Der Vergleich der mit Radar und Ultraschallecho ermittelten Betondeckungen und den vorhandenen Betondeckungen erfolgte zunächst auf der Grundlage der Rekonstruktionsdaten. Hiermit folgte man dem, an mehreren Bauwerken bereits angewendeten aktuellen Stand der Verfahrensentwicklung sowie dem Sachstand, dass für bisherige Untersuchungen zur Datenfusion ausschließlich rekonstruierte Daten verwendet wurden. Anschließend wurden die Daten vor den Rekonstruktionen analysiert und für die verwendeten Messsysteme die Einflüsse durch Rekonstruktionsprozess, Nulllaufzeit und Ausbreitungsgeschwindigkeit auf die Bestimmung der Betondeckung untersucht.

3.1 Einfluss der Rekonstruktionsprozesse

Bei der Rekonstruktion der Daten werden die Reflexionsamplituden in dem geometrischen Reflexionspunkt fokussiert, das Signal-Rausch-Verhältnis angehoben und dadurch die Interpretation der Ergebnisse erleichtert. Die Unterschiede vor und nach der Rekonstruktion sind für Radar in Abbildung 3 und für Ultraschallecho in Abbildung 4 dargestellt.

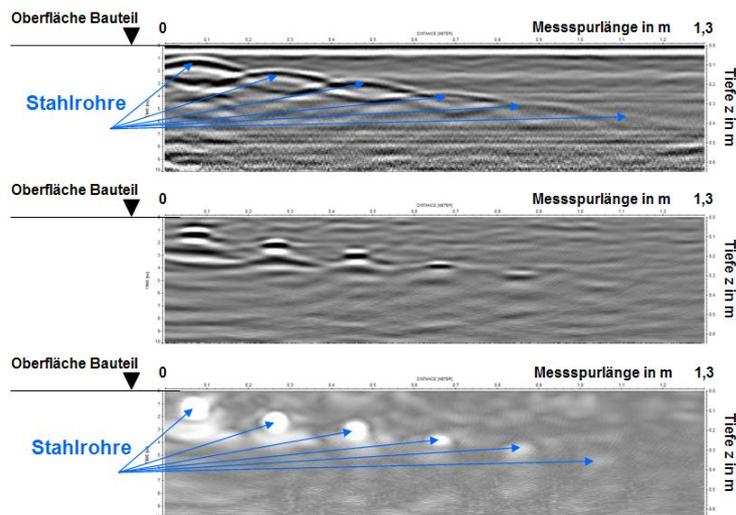


Abbildung 3 Radar, oben: Radargramm nach statischer Korrektur der Nulllaufzeit und Tiefenverstärkung; mitte: nach zusätzlichem Backgroundremoval und Rekonstruktion durch 2D-fk-Migration nach Stolt ($v = 13 \text{ cm/ns}$), unten: nach zusätzlicher Bildung der Einhüllenden.

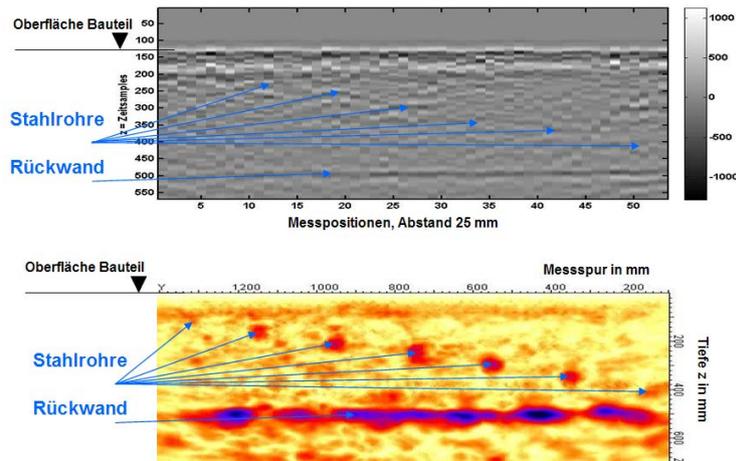


Abbildung 4 Ultraschallecho, oben: im B-Bild der gefilterten Rohdaten stellen sich die detektierten Stahlrohre als Hyperbeln dar, unten: in der Projektion der 3-D-rekonstruierten Daten kennzeichnen Amplitudenmaxima (rot) die Oberseite der Stahlrohre.

Die bildgebenden Ergebnis-Darstellungen bilden die Basis für den quantitativen Vergleich der Betondeckungen nach und vor der Rekonstruktion. Ähnliche Untersuchungen sind nicht bekannt.

Im Diagramm in Abbildung 5, rechts sind die **mit Radar ermittelten Betondeckungen** über den vorhandenen Betondeckungen aufgetragen. Die Betrachtungen erfolgten für zwei, in der Prüfpraxis angewendete Ansätze zur Bestimmung der Nulllaufzeit (in Abbildung 5 grün bzw. blau markiert). Die Ausbreitungsgeschwindigkeiten wurden durch die Hyperbelanpassung abgeschätzt. Daran anschließend erfolgten Rekonstruktionsberechnungen bis die Geschwindigkeit erreicht wurde, mit der, subjektiv beurteilt, eine optimale Fokussierung der Hyperbeln in ihren Scheitelpunkt erfolgt. Der Abstand von Sende- und Empfangsantenne wurde nicht berücksichtigt.

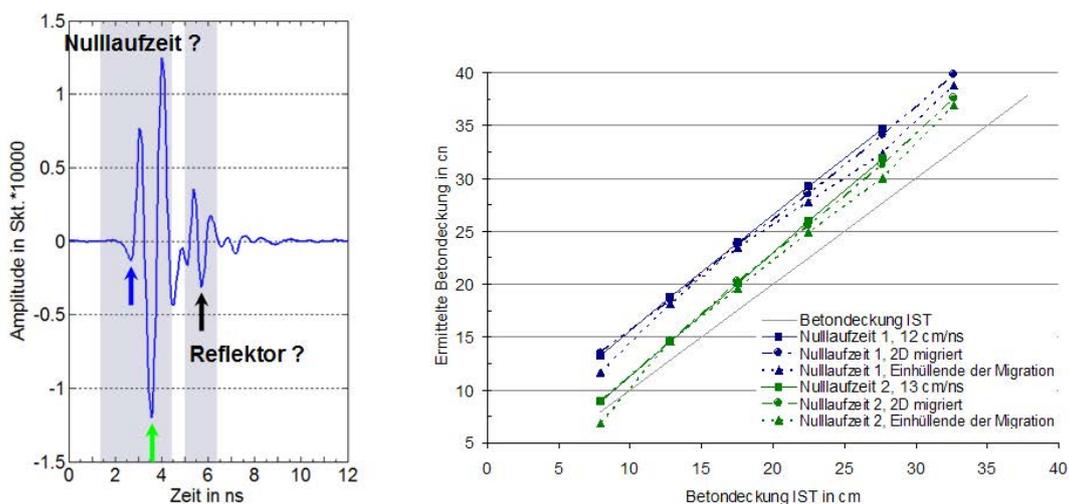


Abbildung 5 Radar, links: A-Bild mit einem Reflektor – Bestimmung der Laufzeit für den Reflektor und der Nulllaufzeit, rechts: Vergleich der ermittelten Betondeckungen mit den vorhandenen Betondeckungen.

Die Gegenüberstellung der Betondeckungen aus den Daten vor der Rekonstruktion durch 2D-fk-Migration nach Stolt, den Daten nach der Rekonstruktion sowie nach der Bildung der Einhüllenden nach Rekonstruktion zeigt, dass die Unterschiede untereinander gering sind. Der größte Unterschied beträgt 2,4 cm bei einer Betondeckung von 27,7 cm. Im Fall

der Nulllaufzeit 1 (blau) wurde eine mittlere Differenz von $0,8 \pm 0,7$ cm und im Fall der Nulllaufzeit 2 (grün) eine mittlere Differenz von $0,6 \pm 0,6$ cm ermittelt. Ausgenommen wurde dabei die kleinste Betondeckung von 7,6 cm. Der Einfluss von Luft- und Oberflächenwelle auf das Reflexionssignal ist bei ihnen noch spürbar und die Betondeckungen sind nach Bildung der Einhüllenden bis zu 2 cm kleiner.

Größer als die Unterschiede zwischen den Prozessschritten sind die Abweichungen der mit Radar ermittelten Betondeckungen von den vorhandenen Betondeckungen. Wie aus dem Diagramm in Abbildung 5, rechts ersichtlich, ergibt sich im Fall Nulllaufzeit 1 (blau) eine Abweichung von $6,0 \pm 0,4$ cm und im Fall Nulllaufzeit 2 (grün) eine Abweichung von $2,4 \pm 1,1$ cm. Die Prozessschritte bei der Rekonstruktion beeinflussen demnach die Ergebnisse bei der Ermittlung der Betondeckung weitaus geringer als die gewählte Nulllaufzeit und die daraus folgende Ausbreitungsgeschwindigkeit.

Bei **Ultraschallecho** sind die Betondeckungen, resultierend aus den Amplitudenanzeigen der rekonstruierten Daten, größer als die vorhandenen Betondeckungen und größer als die aus den A- und B-Bildern vor der Rekonstruktion ermittelten Betondeckungen. Das Verhältnis der Betondeckungen vor der Rekonstruktion zu den vorhandenen Betondeckungen ändert sich über die Tiefe.

Die Abweichungen der Betondeckungen, die mit Ultraschallecho am Probekörper A (Stahlrohren mit Innendurchmesser 39 mm) ermittelt wurden, von den vorhandenen Betondeckungen zeigt die Graphik in Abbildung 6. Bei den Stahlstäben mit 16 mm in Probekörper B sind die Effekte, insbesondere bei größeren Betondeckungen, nicht so deutlich zu beobachten. Die größere Streuung der akustischen Wellen an den Stäben erschwert die Bestimmung der Betondeckung.

Zur Sicherung der Beobachtungen wurde ein zusätzliches Probekörperpaar aus Normalbeton mit einer Gesteinskörnung bis 16 mm in die Untersuchungen einbezogen. Die Lage der 28 mm starken Bewehrungsstahlstäbe ermöglichte Betondeckungsmessungen bis zu 59 cm (Probekörper C). Sie bestätigen sowohl das tiefenabhängige Verhältnis von den Betondeckungen vor der Rekonstruktion und den vorhandenen Betondeckungen als auch die Differenzbeträge zwischen den Betondeckungen nach und vor der Rekonstruktion bei Probekörper A und zum Teil bei Probekörper B:

Probekörper A, Reflektor-Ø 39 mm:	$1,4 \pm 1,0$ cm
Probekörper B, Reflektor-Ø 16 mm:	$0,9 \pm 1,0$ cm
Probekörper C, Reflektor-Ø 28 mm:	$1,3 \pm 0,8$ cm.

3.2 Einfluss von Nulllaufzeit und Ausbreitungsgeschwindigkeit

Zur Diskussion von Nulllaufzeit und Ausbreitungsgeschwindigkeit erfolgten Regressionsanalysen für alle vier Messfelder an den Probekörpern A und B. Die Laufzeiten der Reflektoren wurden über den theoretischen Laufwegen der Wellen aufgetragen. Diese ergeben sich aus den vorhandenen Betondeckungen unter Berücksichtigung der Sender-Empfänger-Abstände.

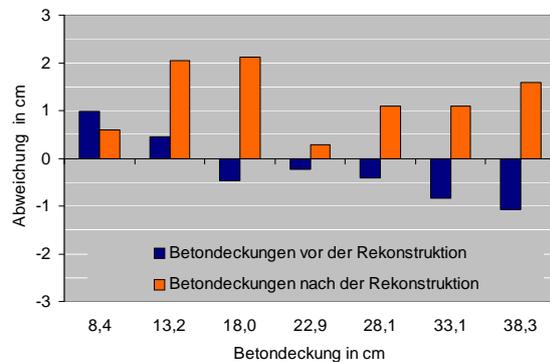


Abbildung 6 **Ultraschallecho**, Abweichungen der ermittelten Betondeckungen von den vorhandenen Betondeckungen am Probekörper A, Messeite ohne Mattenbewehrung.

Die aus den **Regressionsanalysen bei Radar** folgenden Nulllaufzeiten befinden sich im Zeitbereich nach dem Nulldurchgang zwischen Erstmaximum und Minimum. Im A-Bild in Abbildung 7, links ist der Zeitbereich rosa hinterlegt. Damit kann der in Abbildung 5 aufgezeigte Zeitbereich deutlich reduziert werden. Wie die Untersuchungen weiter gezeigt haben, wird die Zeit des Minimums durch die Impulse an oberflächennaher Bewehrung stärker gestört. Daher empfiehlt es sich, die Nulllaufzeit zur Zeit des Nulldurchganges zu ermitteln.

Die mittlere Ausbreitungsgeschwindigkeit, ermittelt aus den Anstiegen der Regressionsgeraden, beträgt 11 cm/ns.

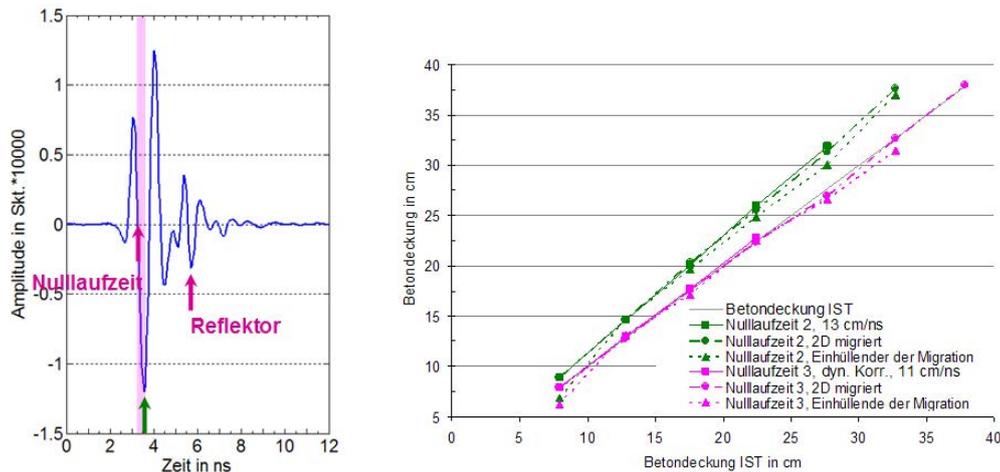


Abbildung 7 Radar, links: A-Bild mit einem Reflektor – Bestimmung der Laufzeit für den Reflektor und der Nulllaufzeit nach der Regressionsanalyse, rechts: Vergleich der ermittelten Betondeckungen mit den vorhandenen Betondeckungen.

Die in der Abbildung 7, links rosa markierten Betondeckungen wurden unter Berücksichtigung der Nulllaufzeiten zur Zeit des Nulldurchganges ermittelt. Die Genauigkeit bei der Bestimmung der Betondeckung hat sich deutlich verbessert. Die Abweichungen zur vorhandenen Betondeckung betragen nur noch $-0,2 \pm 0,3$ cm, die Unterschiede durch die Prozessschritte $0,3 \pm 0,6$ cm. Für den gesamten Überdeckungsbereich kann von einer konstanten Geschwindigkeit von $11,2 \pm 0,4$ cm/ns ausgegangen werden. Ein offener Punkt bleibt: Bei der Rekonstruktionsberechnung mit 11 cm/ns wird bei Probekörper A keine vollständige Fokussierung der Reflexionshyperbeln erreicht (siehe Abbildung 8).

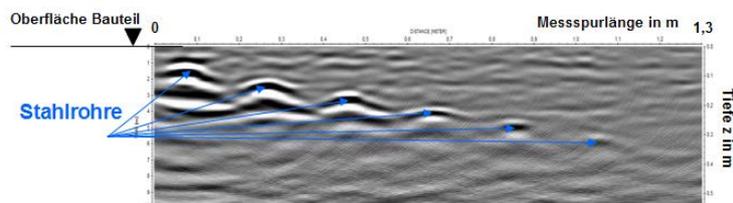


Abbildung 8 Radar, Radargramm nach statischer Korrektur der Nulllaufzeit, dynamischer Korrektur des Sender-Empfänger-Abstandes, Tiefenverstärkung, Backgroundremoval und Rekonstruktion durch 2D-fk-Migration nach Stolt ($v = 11$ cm/ns).

Bei **Ultraschallecho** wurden durch die **Regressionsanalysen** die für den Messaufbau kalibrierte Nulllaufzeit sowie die Referenzgeschwindigkeiten, die für die Probekörper an den Reflexionen der Probekörperrückwände bestimmt wurden, zunächst nicht bestätigt.

In Abbildung 9 wird der Grund ersichtlich. Im Diagramm sind die Schallgeschwindigkeiten, die unter Berücksichtigung der kalibrierten Nulllaufzeit und dem Sender-Empfänger-Abstand für die direkten Schallwege zu jedem Reflektor in Probekörper A und B bestimmt wurden, über die Betondeckungen der Reflektoren aufgetragen. Gleiches ist für den Probekörper C in Abbildung 10 dargestellt.

Die Referenzgeschwindigkeiten der Probekörper A und B und dem Probekörper C sind unterschiedlich, die Geschwindigkeitsprofile sind dennoch sehr ähnlich: Nahezu eine Übereinstimmung der Einzelwerte mit der Referenzgeschwindigkeit wird im Überdeckungsbereich von 15 cm bis 30 cm erreicht. Infolge ist die Genauigkeit bei der Bestimmung der Betondeckung mit der verwendeten Ultraschallecho-Apparatur in diesem Bereich, mit Abweichungen von maximal $\pm 0,5$ cm, am größten.

Bis zu ca. 15 cm Betondeckung sind die Schallgeschwindigkeiten deutlich geringer. In Einbautiefen ab ca. 30 cm tendieren sie zu Werten von ca. 2 % über der Referenzgeschwindigkeit.

5. Zusammenfassung und Ausblick

In Hinblick auf die Ergebnisgenauigkeit bei der Bestimmung der Betondeckung mit Radar und Ultraschallecho wurde der Einfluss durch die Rekonstruktionsprozesse, die Wahl der Nulllaufzeit und die Ausbreitungsgeschwindigkeit untersucht.

Bei den Betondeckungen nach und vor der Rekonstruktion wurden bei Radar nur geringe Unterschiede von weniger als einem Zentimeter, bei Ultraschallecho hingegen in der Größenordnung von einem Zentimeter ermittelt.

Bei Radar ist das Kriterium beim Ablesen der Nulllaufzeit für die Ergebnisse bei der Bestimmung der Betondeckung wesentlich und kann Abweichungen der Betondeckungen von mehreren Zentimetern zur Folge haben. Durch Regressionsanalysen konnte der Zeitbereich für das Ablesen der Nulllaufzeit deutlich eingeschränkt und eine Empfehlung zur Ermittlung der Nulllaufzeit gegeben werden. Unter Berücksichtigung dessen wurde eine für den gesamten Überdeckungsbereich konstante Geschwindigkeit und Genauigkeiten der ermittelten Betondeckungen von kleiner 0,5 cm nachgewiesen.

Bei Ultraschallecho ist die Nulllaufzeit eine feste, für die Messapparatur kalibrierbare Größe. Nach den Untersuchungen ändert sich die Schallgeschwindigkeit über die Bauteiltiefe. Die Genauigkeit der Betondeckungen ist im Überdeckungsbereich von 15 cm bis 30 cm mit maximal 0,5 cm Abweichung am größten. Das tiefenabhängige Geschwindigkeitsprofil wird durch die Abstrahlcharakteristik der verwendeten Prüfköpfe und die

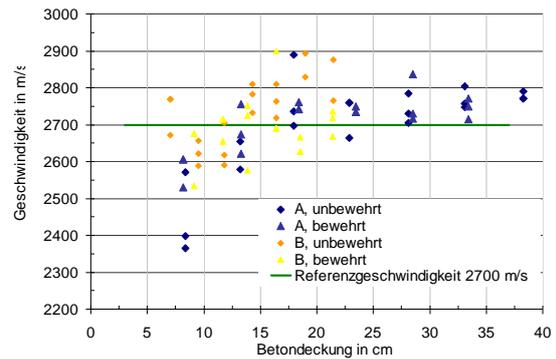


Abbildung 9 Ultraschallecho, Einzelwerte für die Schallgeschwindigkeit, errechnet aus vorhandener Betondeckung und Reflektorlaufzeit.

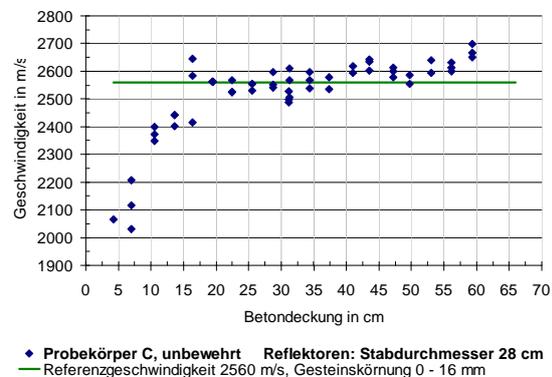


Abbildung 10 Ultraschallecho, Probekörper C, Einzelwerte für die Schallgeschwindigkeit, errechnet aus vorhandener Betondeckung und Reflektorlaufzeit.

Filterfunktion des Betons geprägt. Letzteres mutmaßlich dadurch, dass der Anteil an Haarrissen und Porenraum im oberflächennahen Tiefenbereich größer als im Bauteilinneren ist.

6. Danksagung

Die Forschungsarbeit erfolgte im Rahmen des Joint Laboratories IZFP Saarbrücken – BAM Berlin. Die Herstellung und die Untersuchungen der Probekörper erfolgten in der BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Fachgruppe 8.2 Zerstörungsfreie Schadensdiagnose und Umweltmessverfahren.

Referenzen

- [1] Streicher, D., Wiggenhauser, H. (2006): Zustandsuntersuchungen an Spannbetonbrücken, in Verkehrsbauten - Flächentragwerke (Beton-Kalender 2007), 1 Kap. V / Abschnitt 13, 581-588; Ernst & Sohn, ISBN 978-3-433-01833-0; ISSN 0342-7617
- [2] DIN Fachbericht 102 „Betonbrücken“, Deutsches Institut für Normung e.V., Fassung 2009-03
- [3] Kohl, C., Krause, M., Maierhofer, C., Wöstmann, J.: 2D- and 3D-visualisation of NDT-data using data fusion technique, in: Materials and Structures 38, RILEM 2005
- [4] Taffe, A.: Zur Validierung quantitativer zerstörungsfreier Prüfverfahren im Stahlbetonbau am Beispiel der Laufzeitmessung, Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Heft 574, Beuth Verlag Berlin, Diss. RWTH Aachen 2008
- [5] Sandmeier, K.-J. (2010), Non-destructive testing of concrete with electromagnetic and acoustic-elastic waves. Data analysis, in: Non-destructive evaluation of reinforced concrete structures, Volume 2: Non-destructive testing methods, editors: Ch. Maierhofer, H.W. Reinhardt and G. Dobmann, Woodhead publishing in materials, Cambridge, UK, ISBN 978-1-84569-950-5
- [6] Mayer, V.: Probleme der quantitativen Interpretation von Radardaten, Diplomarbeit am Geophysikalischen Institut der Universität Fridericiana Karlsruhe, November 1994
- [7] Schickert, M.: Erhöhte Abbildungsgenauigkeit bei der Ultraschallprüfung von Beton durch SAFT mit nichtlinearen Zeitskalen. DACH-Jahrestagung 1996, Lindau, 13.-15.5.1996. Berlin: Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP), 1996, S. 447-452