

# Validierung automatisierter und bildgebender ZfP-Verfahren am Florida Department of Transportation

Daniel ALGERNON, Dennis R. HILTUNEN  
 University of Florida – Civil and Coastal Engineering Department, Gainesville, FL,  
 USA

**Kurzfassung.** Um die Bestandsdauer von Brückenbauwerken zu erhöhen, plant das Florida Department of Transportation (FDOT) den verstärkten Einsatz von ZfP-Verfahren wie u.a. Ultraschall, Bewehrungssuchgerät, Impact-Echo, Radar und Laser-Profilometer zur Zustandsbestimmung und baubegleitenden Qualitätssicherung. Um diese Verfahren effektiv in der Praxis einsetzen zu können, müssen deren Möglichkeiten und Grenzen hinsichtlich der Lösung einer bestimmten Prüfaufgabe bekannt sein und dazu unter definierten Bedingungen untersucht werden. Zu diesem Zwecke wurden Labortestkörper mit bekannten Materialeigenschaften angefertigt und unterschiedliche Prüfprobleme eingebracht. Um die Validierung der ZfP-Verfahren so objektiv und unabhängig vom jeweiligen Bediener zu machen, wird ein vollautomatisiertes Scanner-System verwendet. Dabei konnte auf der Arbeit und dem Erfahrungsschatz der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) auf diesem Gebiet aufgebaut werden.

Durch eine bildgebende Auswertung wird die Interpretierbarkeit der Ergebnisse erheblich gesteigert und die Gefahr der Fehldeutung von Artefakten verringert. Die Bilder werden schon während der Messung, quasi in Echtzeit erhalten, was insbesondere beim Einsatz in der Praxis erhebliche Vorteile bringt.

## Einführung

Um die Bestandsdauer von Brückenbauwerken zu erhöhen, plant das Florida Department of Transportation (FDOT) den verstärkten Einsatz von Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung (ZfP-Verfahren) wie u.a. Ultraschall, Bewehrungssuchgerät, Impact-Echo, Radar und Laser-Profilometer zur Zustandsbestimmung und baubegleitenden Qualitätssicherung. Aufbauend auf der an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) geleisteten Arbeit [u.a. 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10], insbesondere im Bereich der Automatisierung und Validierung von ZfP-Verfahren sowie der Visualisierung der Ergebnisse, sollte innerhalb eines vom FDOT finanzierten Projektes die Grundlage für ein NDT Validation Center am State Materials Office (SMO) in Gainesville, FL, geschaffen werden. Ziel ist es dabei, definierte Bedingungen zu schaffen, unter welchen die unterschiedlichen ZfP-Verfahren hinsichtlich ihrer Eignung zur Lösung unterschiedlicher Prüfprobleme untersucht werden können. Dafür müssen die Prüfprobleme in geeigneten Probekörpern nachvollzogen werden. Unter anderem ist dabei zu beachten, dass die Probekörper

eine ausreichende Größe haben, da sonst die an den Bauteilgrenzen entstehenden Randeffekte die Ergebnisse zu sehr beeinflussen [8, 9].

Im Rahmen dieses Projekts sollten die aus der Sicht des FDOT für deren Bauwerke relevantesten Prüfprobleme untersucht werden. Diese sind: die Ermittlung der Betondeckung bewehrter Bauteile, Dickenbestimmung, Spannkanaluntersuchungen und die Bestimmung von Materialparametern als Eingangswerte für Belastungstests.

Um diese Untersuchungen so unabhängig wie möglich vom jeweiligen Benutzer zu machen, wurde ein automatisierter Teststand errichtet (Abbildung 1).



**Abbildung 1: Teststand bestehend aus vollautomatisierten Scannersystemen, die an einem Stahlgestell befestigt sind . Der Probekörper wird von einem Gabelstapler im Stahlrahmen positioniert und über Hydraulikzylinder gehalten.**

Der Teststand besteht aus zwei Scannersystemen, die an einem Stahlrahmen angebracht sind. Die zu untersuchenden Probekörper werden mit Hilfe eines Gabelstaplers in den Rahmen gestellt und mittels Hydraulikzylindern darin gehalten. Dadurch wird ein stabiles System für den Laborbetrieb erhalten. Für den Einsatz in der Praxis können die beiden Scanner ohne Probleme vom Stahlrahmen gelöst werden und sind leicht zum Einsatzort zu transportieren.

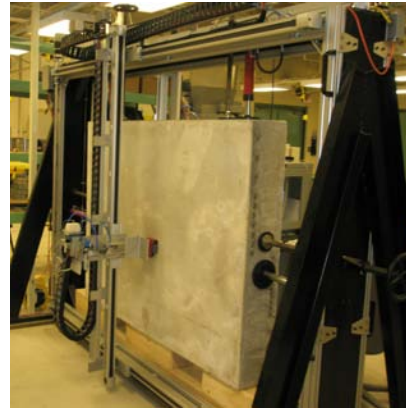
## **Probekörper**

Um die vier wesentlichen Fragestellungen

- Messung der Betondeckung
- Dickenmessung
- Spannkanaluntersuchung
- Bestimmung von Materialkennwerten

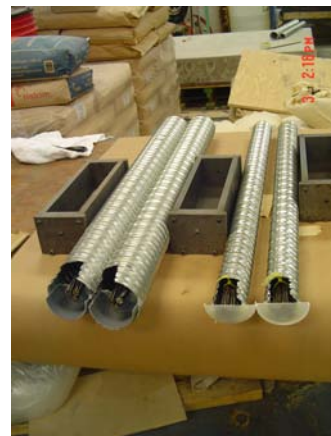
zu betrachten, wurden zunächst vier Probekörper konzipiert und erstellt. Alle Probekörper besitzen die gleichen Randabmessungen von 2 m x 1.5 m.

Einer der Probekörper widmet sich der Betondeckungsmessung und verfügt über unterschiedlich bewehrte Bereiche (Abbildung 2). Die dabei variierten Parameter sind u.a. Betondeckung, Stababstand, Stabdurchmesser und die Anzahl der Bewehrungslagen (x- und y-Richtung).



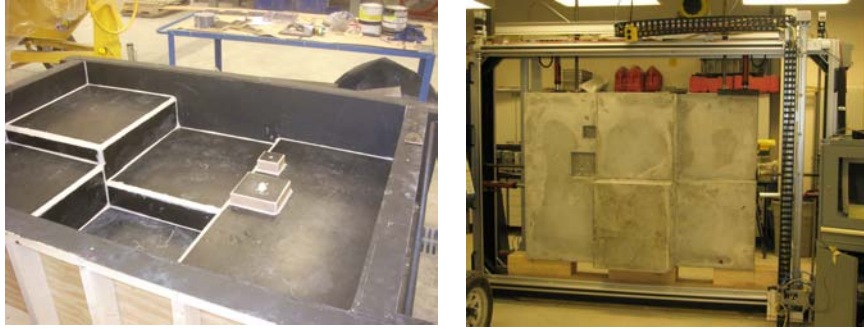
**Abbildung 2: Probekörper mit Bewehrungsstahl unterschiedlichen Durchmessers, mit variierendem Abstand, in unterschiedlicher Tiefe und in mehreren Lagen (x- und y-Richtung).**

In einen weiteren Probekörper wurden zur Erprobung der ZfP-Verfahren hinsichtlich der Spannkanaluntersuchung vier Hüllrohre mit unterschiedlichem Durchmesser und in unterschiedlicher Tiefe eingebracht. Im Inneren der Hüllrohre befinden sich Spannlitzen (unverspannt eingebracht), die bereichsweise vollständig verpresst, unverpresst oder nur zur Hälfte verpresst sind. Dies dient dazu, die Verfahren hinsichtlich der Ortung von Verpressfehlern zu erproben.



**Abbildung 3:**  
**links: Schalung des Probekörpers mit Spannkanälen, die bereichsweise verpresst, unverpresst oder nur halb verpresst sind.**  
**rechts: Die Hüllrohre vor dem Einbau.**

Zur Erprobung der Verfahren hinsichtlich ihrer Eignung zur Bestimmung von Dicken an Bauteilen mit komplexen Geometrien wurde ein Probekörper geschaffen, der aus sechs Teilbereichen mit fünf unterschiedlichen Dicken besteht, wobei in einem der Bereiche zusätzlich kleinere Bereiche mit verminderter Dicke vorgesehen wurden (Abbildung 4).



**Abbildung 4: Probekörper mit sechs Bereichen unterschiedlicher Dicke zur Validierung von ZfP-Verfahren hinsichtlich der Dickenbestimmung an Bauteilen mit komplexer Geometrie.**

Zusätzlich wurde als Referenz ein Probekörper ohne jegliche Einbauten hergestellt, der die gleichen Abmessungen wie die zuvor aufgeführten Probekörper besitzt (mit Ausnahme jenes Körpers mit unterschiedlichen Dickenbereichen, der sich entsprechend in der Dicke von der des Referenzblocks unterscheidet). Mit Hilfe dieses Referenzkörpers sollen einerseits Fehlinterpretationen vermieden werden, die aus Geometrieffekten herrühren. Treten beispielsweise bei Messungen an dem bewehrten Probekörper Effekte auf, von denen nicht eindeutig gesagt werden kann, ob sie durch die Bewehrung verursacht werden oder rein von der Geometrie des Probekörpers, so können die Ergebnisse einfach mit denen des Referenzblocks verglichen werden. Sind die Effekte auch hierin erkennbar, so ist klar, dass es sich dabei um Geometrieffekte handelt, die vollkommen unabhängig von der Bewehrung sind. Ebenso eignet sich dieser Probekörper zur Erprobung von ZfP-Verfahren hinsichtlich ihrer Eignung bestimmte Materialkenngrößen wie E-Modul, Poissonzahl oder Dichte des Betons zu bestimmen.

Zusätzlich zu den eben genannten vier Probekörpern existieren zwei weitere Probekörper mit eingebauten Spankanälen, verpressten sowie unverpressten Bereichen, Verankerungsbereichen, Bewehrung und sehr realistischer Oberfläche, an denen manuelle Messungen durchgeführt wurden (Abbildung 5).



**Abbildung 5:**  
**Links: Probekörper mit eingebauten Spankanälen, Verankerungsbereichen, Bewehrung und sehr realistischer Oberfläche.**  
**Rechts: manuelle Ultraschallmessung.**

## Bildgebende Auswertung

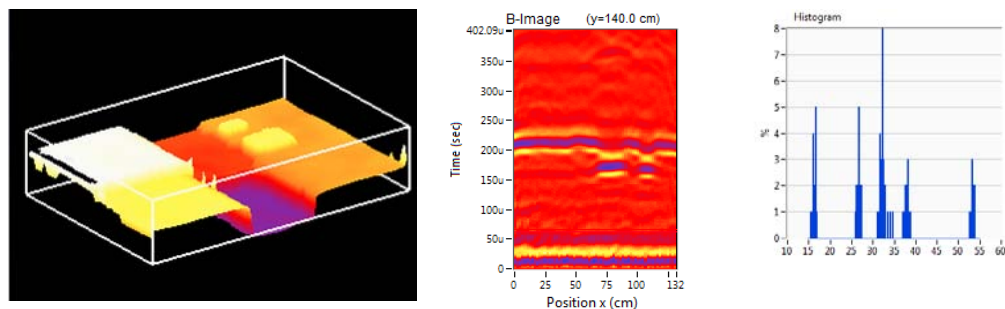
Die von scannenden Messungen gewonnenen Daten eignen sich in besonderer Weise zur bildgebenden Darstellung der Messergebnisse.

Eine Form der Darstellung ist die sogenannte B-Scan Visualisierung, wie es Abbildung 6, Mitte zu sehen ist. Hierbei werden die gemessenen Kurven entlang einer Linie mittels einer Farbskala nebeneinander geplottet, wodurch quasi eine Querschnittsdarstellung entlang der Scanlinie erhalten wird.

Durch Darstellung der für jeden Messpunkt ermittelten Tiefe mit der höchsten Amplitude innerhalb eines festgelegten Bereichs, kann eine 3D-Visualisierung (Abbildung 6, links) erhalten werden. Diese besitzt hohen Anschauungswert und vereinfacht dementsprechend die Interpretation der Messergebnisse.

Die Bilder können schon während der Messung gemeinsam mit einer statistischen Auswertung (Abbildung 6, rechts) erhalten und begleitend ausgewertet werden, was insbesondere beim Einsatz in der Praxis erhebliche Vorteile bringt.

Aus den am Probekörper mit unterschiedlichen Dickenbereichen mit Ultraschall gemessenen Daten gehen die verschiedenen Dicken, insbesondere auch die der kleineren Bereiche, klar hervor.



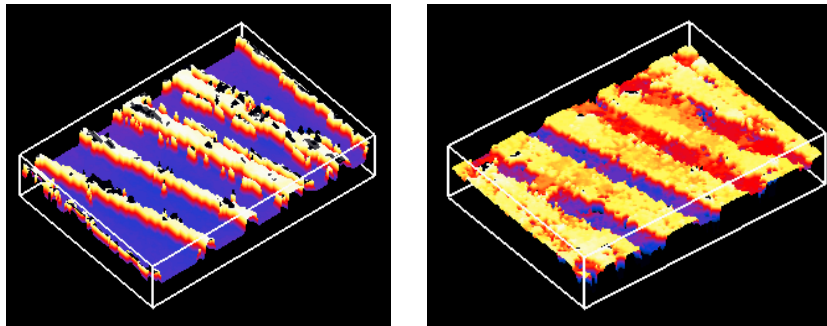
**Abbildung 6: Visualisierung der Ergebnisse einer scannenden Ultraschallmessung am Probekörper Bereichen unterschiedlicher Dicke.**

**links: 3D-Darstellung der gemessenen Dicken.**

**Mitte: B-Scan. Die gemessenen Kurven entlang einer Linie werden mittels einer Farbskala nebeneinander geplottet, wodurch quasi eine Querschnittsdarstellung entlang der Scanlinie erhalten wird.**

**Rechts: Histogramm der gemessenen Dicken.**

In Abbildung 7 sind die 3D-Visualisierungen der am Probekörper mit eingebauten Spannkanälen gemessenen Ultraschall- und Impact-Echo-Daten dargestellt. Während sich in den Impact-Echo-Ergebnissen die Spannkanäle nur als scheinbare Verschiebung der Rückwand zu größeren Tiefen hin abbilden und sich somit nur ihre Lage in der Ebene bestimmen lässt, können sie mit Ultraschall auch in der Tiefe geortet werden.

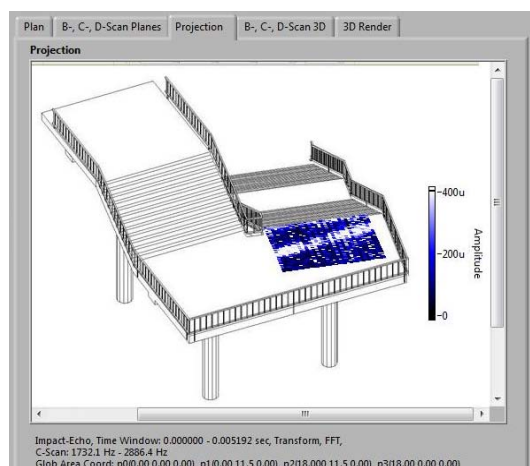


**Abbildung 7: 3D-Visualisierung der am Probekörper mit eingebauten Spannkanälen gewonnenen Messergebnisse.**

**Links: Ultraschall.** Die Lage in der Ebene, Tiefe und die Unterschiede im Durchmesser der Hüllrohre gehen aus den Ergebnissen hervor.

**Rechts: Impact-Echo.** Die Lage der Spannkanäle in der Ebene geht aus den Messergebnissen hervor, da sich diese als scheinbare Verschiebung der Rückwand zu höheren Dicken hin zeigen. Eine Ortung in der Tiefe ist demnach nicht möglich.

Ein weiteres Visualisierungs-Modul macht es möglich, die aus scannenden Messungen in Form von Bildern gewonnenen Ergebnisse mit weiterem Bildmaterial (Fotos, Zeichnungen, 3D-CAD-Modellen) zu verknüpfen und zu überlagern (Abbildung 8), wodurch die Interpretierbarkeit weiter erhöht und die Auswertung anschaulicher und dementsprechend erleichtert wird.



**Abbildung 8: Visualisierungs-Modul zur Überlagerung der Messergebnisse mit zur Verfügung stehendem Bildmaterial wie Zeichnungen, Fotos oder 3D-CAD Plots.**

## Fazit

Am Florida Department of Transportation ist in Anlehnung an die erfolgreiche Arbeit der BAM im Rahmen eines von der University of Florida durchgeführten Projektes die Basis für ein ZFP-Validierungszentrum entstanden.

Hierzu wurden die relevanten Prüfaufgaben in Probekörpern nachgebildet und ein Teststand mit zwei vollautomatisierten Scannern errichtet. Ein Software-Paket übernimmt die Steuerung der Scanner, Datenerfassung und visualisiert die gemessenen Daten in verschiedenen Darstellungen, wodurch die Auswertung sehr anschaulich wird und die Interpretierbarkeit der Ergebnisse entsprechend erhöht wird.

## Danksagung

Für die Förderung des hier beschriebenen Projektes sei dem Florida Department of Transportation ganz herzlich gedankt.

Für die Beratung und Unterstützung bei der Umsetzung dieses Projektes sei der Fachgruppe VIII.2 der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung ganz herzlich gedankt.

## Referenzen

- [1] Taffe, A.: Zur Validierung quantitativer zerstörungsfreier Prüfverfahren im Stahlbetonbau am Beispiel der Laufzeitmessung. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 574, (2008).
- [2] Colla, C., Schneider G. und H. Wiggenhauser: Automated Impact-Echo: Method improvements via 2- and 3-D imaging of concrete elements, SFR'99, London (1999), p. 1-11.
- [3] Wiggenhauser, H., Streicher, D., Algernon, D., Wöstmann, J. and M. Behrens: Automated application and combination of non-destructive echo methods for the investigation of post-tensioned concrete bridges. Proceedings of Concrete Platform, Queen's University of Belfast, pp. 261-269, (2007).
- [4] Streicher, D., Algernon, D., Wöstmann, J., Behrens, M. and H. Wiggenhauser: Automated NDE of Post-Tensioned Concrete Bridges using Imaging Echo Methods. 9th European Conference on NDT : ECNDT Berlin 2006 (DGZfP-Proceedings BB 103-CD), pp. 985-992, (2006).
- [5] Kohl, C., Krause, M., Maierhofer, C. and J. Woestmann: 2D- and 3D-visualisation of NDT-data using a data fusion technique. Materials and Structures 38(2005)9, pp. 817-826.
- [6] Helmerich, R., Niederleithinger, E., Stoppel, M. and Wiggenhauser, H.: The role of advanced non-destructive techniques in condition assessment of existing bridges. Proceedings of the 2nd International Conference "Reliability, Safety and Diagnostics of Transport Structures and Means 2005", University of Pardubice, pp. 111-118, (2005).
- [7] Wiggenhauser, H.: Impact-Echo. Bauphysikkalender, Ernst & Sohn, Berlin, pp. 358-365. (2004).
- [8] Lausch, R., Wiggenhauser, H. und F. Schubert: Geometrieeffekte und Hüllrohrortung bei der Impact-Echo-Prüfung von Betonbauteilen – Experimentelle und modelltheoretische Ergebnisse. DGZfP Jahrestagung 06.-08. Mai 2002 in Weimar, DGZfP-Berichtsband BB-80-CD, Plakat 34, (2002).
- [9] Algernon, D., Wiggenhauser, H. and F. Schubert. A new Approach for the Investigation of Geometry Effects in Impact-Echo Measurements – Experimental Results and Numerical Simulations. Proceedings of the 9th ECNDT, June 25-29, 2006, Berlin, CD-ROM, (2006).