

# Bestimmung der Geometrie einer Fundamentplatte mit dem Ultraschall-Echo- Verfahren unter Anwendung geophysikalischer Migrationsmethoden

Maria GROHMANN \*, Ernst NIEDERLEITHINGER \*, Stefan BUSKE \*\*

\* BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, 12205 Berlin  
\*\*TU Bergakademie Freiberg, 09599 Freiberg

**Kurzfassung.** Das Ultraschall-Echo-Verfahren ist ein klassisches Verfahren in der zerstörungsfreien Prüfung zur Bestimmung der Geometrie von Bauteilen. Die Prüfaufgaben beinhalten unter anderem die korrekte Dickenbestimmung der Baukörper sowie die Lokalisierung von Einbauteilen und Fehlstellen. Stand der Technik bei den Abbildungsverfahren ist die SAFT-Rekonstruktion (Synthetic Aperture Focusing Technique). Diese Verfahrensfamilie hat Schwierigkeiten bei der Darstellung von steilen Grenzflächen und komplizierten Strukturen, wie beispielsweise Stufen oder Unterkanten von Hohlräumen und Hüllrohren. Als Alternative werden seit einiger Zeit geophysikalische Migrationsmethoden evaluiert. Am Beispiel eines Stahlbetonfundamentes mit verschiedenen Bewehrungsgehalten, unterschiedlichen Dicken sowie zwei Pfahlköpfen wurden die Kirchhoff-Migration und die Reverse-Time Migration (RTM) getestet. Die strahlenbasierte Kirchhoff-Migration arbeitet ähnlich wie die SAFT-Rekonstruktion. Die RTM basiert auf der vollständigen Wellengleichung.

In einem ersten Schritt wurden die Methoden an einem synthetischen, auf der akustischen Wellengleichung basierenden zweidimensionalen Modell getestet. Im zweiten Schritt wurden reale Messdaten, die mit Scherwellenprüfköpfen an der Fundamentplatte aufgenommen wurden, bearbeitet. Der Einsatz eines Scannersystems vereinfachte die Messungen. Die Experimente, die in diesem Manuskript vorgestellt werden, sind von bedeutendem Interesse für die Evaluierung geophysikalischer Migrationsmethoden an analogen Modellen.

Ein Vergleich der Migrationsergebnisse mit den bisherigen SAFT-Ergebnissen zeigt insbesondere für die RTM eine deutliche Verbesserung in der Abbildung der Bauteilgeometrie. Vertikale Kanten konnten dargestellt sowie die Lage und Struktur der Rückwände exakter reproduziert werden. Grenzen bestehen noch bei der Darstellung der Pfahlköpfe, da die von dem zylinderförmigen Pfahl kommenden Signale verrauscht sind. Ursachen dafür sind u.a. die Bewehrung, Randeckeffekte sowie Mehrfachreflexionen an dem Pfahlschaft.

## 1. Einführung

Synthetic Aperture Focusing Technique - Algorithmen (SAFT, [6]) zur Rekonstruktion von Ultraschall-Echo-Daten bilden steil stehende Grenzflächen oder die Rückseiten von



Hohlräumen und Einbauten nicht zuverlässig ab. Für eine bessere Strukturaufklärung und Detektion von Fehlstellen wurden in einer umfangreichen Studie zwei geophysikalische Migrationsverfahren evaluiert: die Kirchhoff-Migration und die Reverse-Time Migration (RTM). Das Testobjekt war ein Stahlbetonfundament.

Der Schwerpunkt der hier dargestellten Ergebnisse liegt bei der RTM. Die RTM wurde durch McMechan [4] und Baysal et al. [1] 1983 eingeführt und hat sich zu einem Standard-Abbildungsverfahren in der seismischen Industrie entwickelt. Müller et. al [5] bestätigte 2012 die Anwendbarkeit der RTM auf synthetische Ultraschall-Echo Daten an Beton in der zerstörungsfreien Prüfung.

## 2. Stahlbetonfundament RuFUS

Das in dieser Arbeit untersuchte Messobjekt ist das Stahlbetonfundament RuFUS (Abbildung 1). Die Fundamentplatte entstand im Rahmen des EU-Forschungsprojektes RuFUS (Re-use of Foundations on Urban Sites) am Prüfstandort der BAM in Horstwalde.

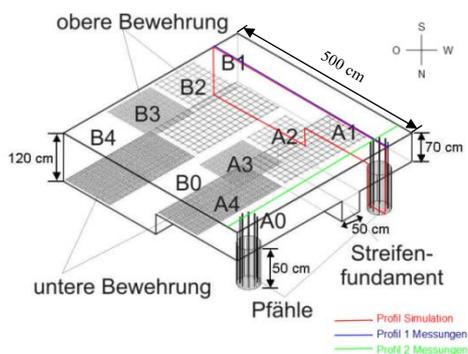


Abbildung 1: Geometrie der Fundamentplatte RuFUS [7]



Abbildung 2: „Innenansicht“ vor der Betonage [7]

Die Fundamentplatte ist in verdichtetem Sandboden eingebettet und besteht aus Bereichen unterschiedlicher Dicke, zehn verschiedenen Bewehrungsgehalten, einem Streifenfundament sowie zwei Pfählen. Unter der Fundamentplatte liegt eine 5 cm dicke Magerbetonschicht. Abbildung 2 zeigt u.a. die Magerbetonschicht sowie die verschiedenen Bewehrungsgehalte vor dem Betonieren. Die Zielstellungen waren eine Dickenbestimmung in beiden Tiefenbereichen, die Abbildung der vertikalen Stufe, der zwei Pfähle und des Streifenfundamentes. Weiterhin sollten die Abhängigkeit der Auflösung der Migrationsergebnisse von Störfaktoren sowie 3D-Effekte untersucht werden.

## 3. Reverse-Time Migration

Die Reverse-Time Migration (RTM) ist eine wellengleichungsbasierte Migrationsmethode. Sie basiert in dieser Arbeit auf der numerischen Lösung der vollständigen akustischen Wellengleichung. Für die Ultraschall-Echo-Messungen an der Fundamentplatte wurden horizontal polarisierte Transversalwellen angeregt, welche an Grenzflächen nicht zu anderen Wellenarten konvertieren. Unter dieser Annahme konnte zur Vereinfachung ein akustischer Code verwendet werden.

Bei der RTM wird die Wellenausbreitung vollständig berücksichtigt, wie z.B. der geometrische Amplitudenverlust oder multiple Reflexionen. Letztere werden jedoch nicht korrekt abgebildet. Ein großer Vorteil der RTM ist die Möglichkeit, stark geneigte Reflektoren darzustellen. Die Kirchhoff-Migration und SAFT-Rekonstruktion weisen Schwierigkeiten bei der Darstellung von steilen Grenzflächen und von Streukörpern mit

komplexen Geometrien auf. Ein großer Nachteil der RTM ist die sehr lange Rechenzeit sowie ein enormer Bedarf an Speicherkapazität.

Der hier verwendete RTM-Algorithmus stammt aus dem Softwarepaket Madagascar [3] und verwendet die Finite-Differenzen Methode im Zeitbereich, um die Schallwellenausbreitung zweidimensional zu simulieren. Die RTM beinhaltet die folgenden Schritte:

- 1.) Wahl eines geeigneten Geschwindigkeitsmodells mit Hilfe von Voruntersuchungen.
- 2.) Berechnung des Wellenfeldes von der Punktquelle aus durch das gewählte Geschwindigkeitsmodell vorwärts in der Zeit.
- 3.) Zeitumgekehrte Ausbreitung des Wellenfeldes durch das gewählte Geschwindigkeitsmodell. Die Daten der Empfänger werden dabei als Quellen genutzt.
- 4.) An jeder Untergrundposition wird auf das Schusswellenfeld aus 2.) und das Empfängerwellenfeld aus 3.) eine Kreuzkorrelation ohne Zeitverschiebung angewendet, um die Reflektoren zu lokalisieren.
- 5.) Stapelung der Kreuzkorrelationsergebnisse aller Schüsse.

#### 4. Anwendung auf synthetische Daten

Die geophysikalischen Migrationsverfahren wurden im ersten Schritt an synthetischen Daten getestet um deren prinzipielle Anwendbarkeit zu testen sowie geeignete Messparameter (u.a. Anzahl und Positionen der Sender und Empfänger, Aufzeichnungszeit) für die Ultraschall-Echo-Messungen an der Fundamentplatte zu bestimmen.

Als Beispiel wurde der in Abbildung 1 rot markierte zweidimensionale Schnitt durch die Fundamentplatte gewählt. Die Sektion enthält die vertikale Stufe, einen Pfahl und ist nur im unteren Bereich der Fundamentplatte bewehrt (Bewehrungsmatten A1 und B1).

Die Struktur des Modells für die Simulation ist in Abbildung 3 zu sehen. Die entsprechenden Geschwindigkeits- und Dichtewerte sind in Tabelle 1 aufgeführt.

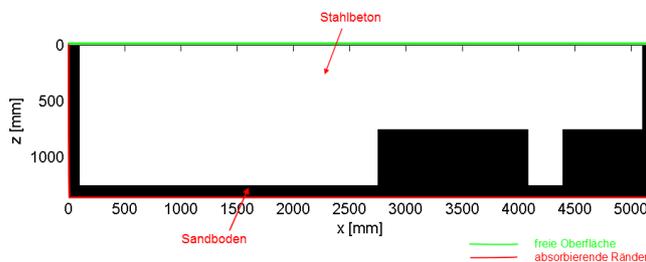


Tabelle 1: Geschwindigkeits- und Dichtewerte für die Simulation

Material	$V_s$ [m/s]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
Sandboden	300	1800
Stahlbeton	2750	2400

Abbildung 3: Modell für die Simulation mit vertikaler Stufe und Pfahl (Ost-West-Schnitt)

Die verwendeten Randbedingungen sind entsprechend markiert. Zur Vereinfachung der Simulation und Migration der synthetischen Daten ist das Modell stark idealisiert. Es enthält keine streuenden Zuschläge. Die 5 cm dicke Magerbetonschicht ist in die Betondicke eingerechnet. Die Bewehrung wurde nicht berücksichtigt.

Für die Simulationen wurden folgende Parameter verwendet: Modellgröße: 5200 x 1350 Gitterpunkte, Gitterpunkt Abstand: 0,001 m, Frequenz des Quellsignals: 25 kHz, Abtastintervall:  $1 \cdot 10^{-7}$  s. Ein Rickerwavelet diente als Quellsfunktion. Tabelle 2 enthält die Parameter, mit denen das in dieser Arbeit beste Migrationsergebnis erzielt wurde.

Tabelle 2: Parameter der Simulation und RTM ( $v_{sc}$  – Transversalwellengeschwindigkeit Stahlbeton,  $v_{ss}$  – Transversalwellengeschwindigkeit Sandboden,  $\rho_c$  – Dichte Stahlbeton,  $\rho_s$  – Dichte Sandboden)

Parameter	
Anzahl der Quellen	33
Anzahl der Empfänger	242

Abstand der Quellen	0,15 m
Abstand der Empfänger	0,02 m
Quellposition Nr. 1	0,02 m
Empfängerposition Nr. 1	0,02 m
Aufzeichnungszeit	0,00111 s
Geschwindigkeit Vorwärtsmodellierung	$v_{sc} = 2750 \text{ m/s}$ , $v_{ss} = 300 \text{ m/s}$
Geschwindigkeit RTM	$v_{sc} = 2750 \text{ m/s}$ , $v_{ss} = 300 \text{ m/s}$
Dichte Vorwärtsmodellierung	$\rho_c = 2400 \text{ kg/m}^3$ , $\rho_s = 1800 \text{ kg/m}^3$
Dichte RTM	$\rho_c = 2400 \text{ kg/m}^3$ , $\rho_s = 1800 \text{ kg/m}^3$
Dicke der Stahlbetonschicht	1,25 m

Abbildung 4 zeigt die Struktur des Geschwindigkeits- und Dichtemodells, welche für die RTM verwendet wurde. Die Außengrenzen der Fundamentplatte wurden als bekannt vorausgesetzt. Die Modelle enthalten keine Informationen über die innere Struktur der Fundamentplatte, wie die vertikale Stufe und den Pfahl. Das RTM-Migrationsergebnis ist in Abbildung 5 dargestellt. Die Positionen der Empfänger sind grün und die Positionen der Quellen rot markiert.

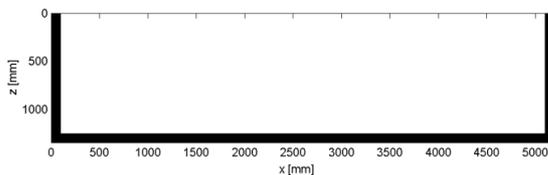


Abbildung 4: Struktur des Geschwindigkeits- und Dichtemodells für die RTM

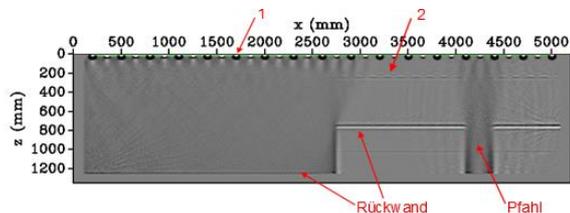


Abbildung 5: Ergebnis der Reverse-Time Migration mit den optimierten Parametern

Die Reflektoren sind bezüglich ihrer Lage und Dimension korrekt abgebildet. Migrationsartefakte wurden mit der Wahl eines kleinen Empfänger- und Quellenabstandes minimiert. Grenzen bestehen noch in der Darstellung des oberen Pfahlschaftes.

Die halbkreisförmigen Artefakte an den Quellpositionen (1) sind durch die direkten Wellen bedingt. Die parallel zu der Rückwand verlaufenden Reflektoren (2) sind durch multiple Reflexionen der Rückwand in den synthetischen Daten entstanden.

Des Weiteren produziert die RTM, bedingt durch die Verwendung der vollständigen Wellengleichung, deutliche Quellartefakte (dunkel schattierte Bereiche). Die Ursache dieser Artefakte sind unerwünschte Kreuzkorrelationen von Wellen, die sich in die gleiche Richtung ausbreiten [2]. Im linken Teil des Migrationsergebnisses sowie im Pfahlbereich zeigen sich stärkere Quellartefakte, da in diesen Bereichen die Lage der Unterkante der Stahlbetonschicht in den Startmodellen für die Migration mit der wahren Tiefe übereinstimmt.

## 5. Anwendung auf Messdaten

### 5.1. Durchführung der Ultraschall-Echo-Messungen

An der Fundamentplatte wurden zwei Messprofile aufgenommen (Abbildung 1). Profil 1 entspricht dem Profil, welches für den Test der Migrationsmethoden an synthetischen Daten verwendet wurde. Aus Platzgründen wird nur dieses Profil hier vorgestellt.

Die Messungen erfolgten mit einer multistatischen Anordnung, d.h. der Sende- und Empfangsprüfkopf sind voneinander getrennt und beide Prüfköpfe verändern ihre Positionen und Abstände. Die Prüfköpfe (Abbildung 6) bestehen aus 32 zusammenschalteten piezoelektrischen Transversalwelleneinzelprüfköpfen. Die Messfrequenz betrug 25 kHz. Zur Vereinfachung der Messung wurde ein Scanner

(Abbildung 7) eingesetzt, mit welchem der Empfangsprüfkopf für die jeweilige Sendeposition automatisch von Messpunkt zu Messpunkt verschoben werden konnte. Die Länge des Scanners beträgt 1,2 m. Es wurden für alle Quellpositionen nur die in positive Profilrichtung liegenden Empfängerpositionen abgetastet und der Scanner wurde, je nach Lage der Quellposition, maximal einmal umgesetzt. Die maximalen Offsets lagen zwischen 0,1 m und 2,3 m. Der Abstand der 32 Quellpositionen betrug 15 cm, der Empfängerabstand 2 cm.



Abbildung 6: Prüfkopfarray mit 32 Einzelprüfköpfen



Abbildung 7: Scanner auf der Fundamentplatte RuFUS mit dem Empfängerprüfkopfarrays (E)

Abbildung 8 zeigt beispielhaft die Messdaten des Schusspunktes Nr. 8 bei 1,15 m (ausgehend vom östlichen Rand der Fundamentplatte). In den Daten sind u.a. die direkte Welle (1) und die Reflexion des Wellenfeldes an der Rückwand (2) sowie eine multiple Rückwandreflexion (3) zu erkennen. Weiterhin ist die Reflexion der direkten Welle an der östlichen (4) und westlichen oberen Kante (6) der Fundamentplatte sichtbar. Bei ca. 92 cm ist der Scheitelpunkt einer Reflexionshyperbel (5) zu sehen, welche durch einen in der Fundamentplatte eingebrachten Metallbügel verursacht wird (Abbildung 9). Alle Messdaten wurden vor der Migration wie folgt bearbeitet: Dämpfen des Übersprechens, zeitliche Interpolation, Anwendung eines Bandpassfilters mit den Grenzfrequenzen 8 kHz und 100 kHz.

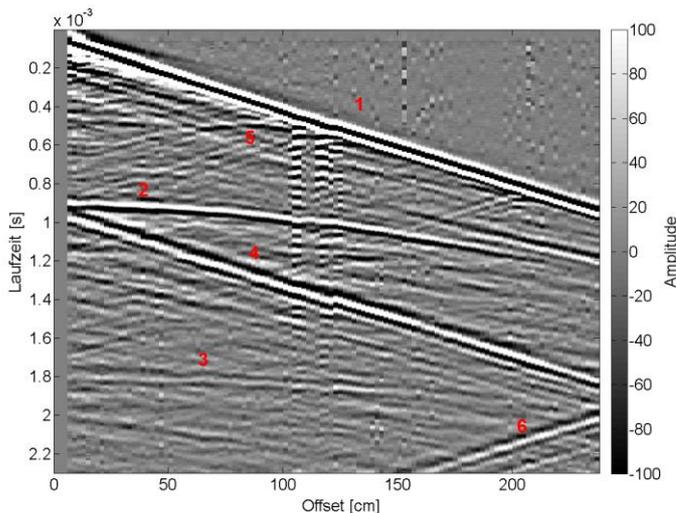


Abbildung 8: Messdaten des Schusspunktes Nr. 8 bei 1,15 m

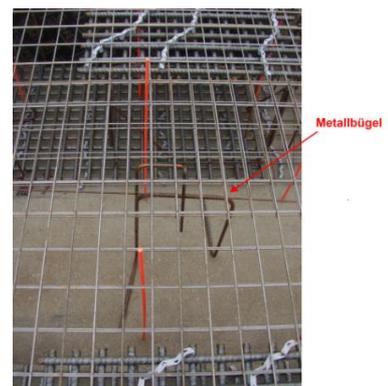


Abbildung 9: Eingebrachter Metallbügel in der Fundamentplatte

## 5.2. Migrationsergebnisse - Profil 1

Das Geschwindigkeits- und Dichtemodells, welches für die in diesem Abschnitt vorgestellten Migrationsergebnisse verwendet wurde, ist in Abbildung 4 dargestellt. Für den Stahlbeton wurde anhand einer ersten Geschwindigkeitsanalyse eine Scherwellengeschwindigkeit von 2740 m/s gewählt. Die Simulationsparameter wurden in Abschnitt 4 erwähnt. Die weiteren Migrationsparameter sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 3: Parameter der RTM ( $v_{sc}$  – Transversalwellengeschwindigkeit Stahlbeton,  $v_{ss}$  – Transversalwellengeschwindigkeit Sandboden,  $\rho_c$  – Dichte Stahlbeton,  $\rho_s$  – Dichte Sandboden)

Parameter	
Anzahl der Quellen	32
Anzahl der Empfänger	variiert
Abstand der Quellen	0,15 m
Abstand der Empfänger	0,02 m
Quellposition Nr. 1	0,02 m
Empfängerposition Nr. 1	0,031 m
Aufzeichnungszeit	0,0017 s
Geschwindigkeit RTM	$v_{sc} = 2740 \text{ m/s}$ , $v_{ss} = 300 \text{ m/s}$
Dichte RTM	$\rho_c = 2400 \text{ kg/m}^3$ , $\rho_s = 1800 \text{ kg/m}^3$
Dicke der Stahlbetonschicht	1,25 m

Für das Migrationsergebnis in Abbildung 10 wurden die mit einem Bandpassfilter (Grenzfrequenzen: 8 kHz/100 kHz) bearbeiteten Messdaten verwendet. Die Rückwand ist in der korrekten Tiefe, aber nicht deutlich bis zu den Modellrändern reproduziert worden. In der Struktur der Rückwand sind leichte "Wellen" erkennbar und die Rückwand fällt im Bereich der oberen Stufenecke leicht ab. Die Lage des Pfahlkopfes ist an der richtigen Position dargestellt, jedoch ist der Beginn der oberen Stufenecke um ca. 10 cm nach rechts (westliche Richtung) verschoben. Bei ca.  $x = 2100 \text{ mm}$  und  $z = 300 \text{ mm}$  ist ein kreisförmiger Reflektor zu erkennen, welcher den Bauplänen nach dem Metallbügel (Abbildung 9) zugeordnet werden kann.

In dem Ergebnis der Stapelung der Migrationsergebnisse der Schusspunkte Nr. 27 bis 32 (Abbildung 11) zeichnet sich die Rückwand mit einem kleinen Tiefenversatz deutlich bis zum rechten Modellrand ab. Auffällig ist hier der Phasensprung der Rückwand, welcher eventuell durch Ablösungen in diesem Tiefenbereich entsteht. Die Stapelung der Migrationsergebnisse der Schusspunkte Nr. 7 bis 15 (Abbildung 12) zeigt deutlicher, dass die vertikale Kante der Stufe reproduziert wurde. Die Messdaten wurden in diesem Beispiel zusätzlich mit einer AGC und einer Spurnormierung bearbeitet. Auf die Messdaten des Ergebnisses in Abbildung 13 wurde weiterhin eine 3D/2D-Korrektur angewendet. Die Rückwand ist jetzt am Fuß der Stufe deutlicher und durchgehend sichtbar.

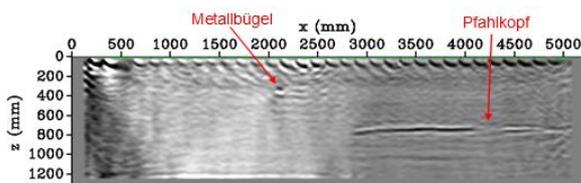


Abbildung 10: Ergebnis der RTM

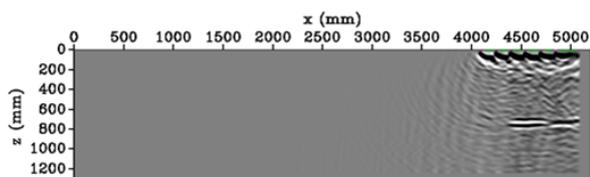


Abbildung 11: Ergebnis der RTM für die Stapelung der Einzelschussschnitte der Schusspunkte Nr. 27 bis Nr. 32

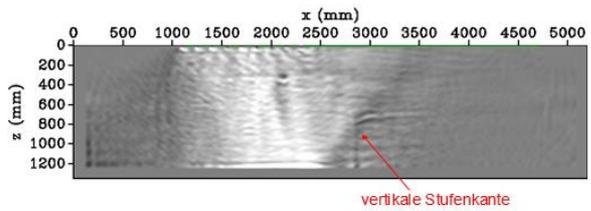


Abbildung 12: Ergebnis der RTM für die Stapelung der Einzelschusssektionen der Schusspunkte Nr. 7 bis Nr. 15

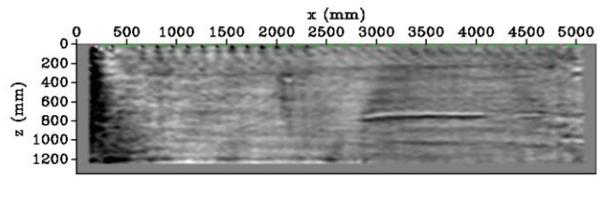


Abbildung 13: Ergebnis der RTM für die Messdaten nach Anwendung einer 3D/2D-Korrektur

### 5.3. SAFT-Ergebnis Profil 1

Abbildung 14 zeigt das Ergebnis der 3D-SAFT-Rekonstruktion des ersten Profils. Die Messungen erfolgten im Juli 2004 mit dem Prüfkopfarray A1220. In dem Array dienen 12 Transversalwelleneinzelprüfköpfe jeweils parallel als Sender, die weiteren 12 als Empfänger. Die Aufnahme der Messdaten erfolgte daher mit einem konstanten Sender-Empfänger-Abstand (bistatische Messanordnung), sowie flächendeckend mit Hilfe einer mäanderförmigen Abtastung. Der Messpunktabstand betrug 5 cm und die Messfrequenz 33 kHz.

Für den SAFT-Algorithmus wurde eine Rekonstruktionsgeschwindigkeit von 2700 m/s gewählt. Dem Stand der Technik entsprechend werden in den SAFT-Ergebnissen die Werte der Einhüllenden farblich codiert dargestellt. Schwarz entspricht hohen und weiß niedrigen Werten der Einhüllenden.

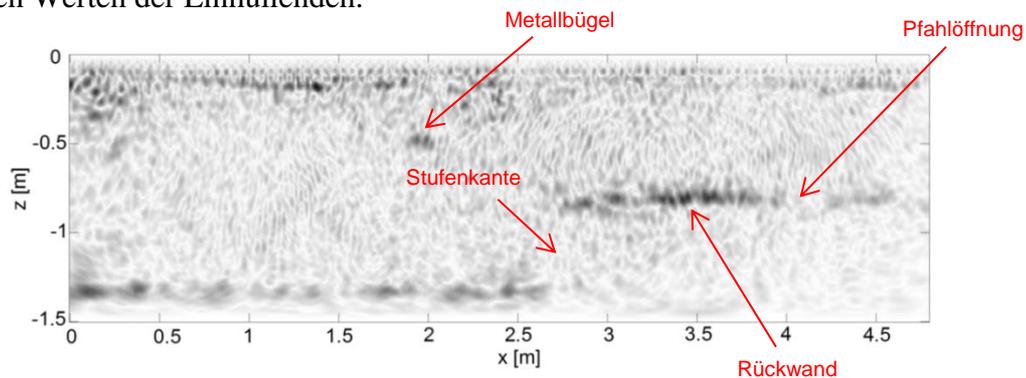


Abbildung 14: Ergebnis der SAFT-Rekonstruktion für das Profil 1

Bis auf die vertikalen Kanten sind in dem Ergebnis der SAFT-Rekonstruktion alle Reflektoren abgebildet (Abbildung 14). Die Rückwand ist jedoch weniger durchgängig dargestellt und sie weist im Bereich der senkrechten Stufenkante unterschiedliche x-Positionen auf. Der Versatz in x-Richtung beträgt ca. 7,14 cm. Wahrscheinlich ist die Ursache die bistatische Messanordnung und der große Messpunktabstand von 5 cm.

## 6. Diskussion

Der Vergleich der Ergebnisse der RTM mit denen der SAFT-Rekonstruktion zeigte eine deutliche Verbesserung der Abbildung der Bauteilgeometrie. Dabei muss jedoch berücksichtigt werden, dass im Unterschied zur RTM für die SAFT-Rekonstruktion eine bistatische Messanordnung eingesetzt wurde und mit einem Messpunktabstand von 5 cm und nicht 2 cm gemessen wurde.

In den RTM-Ergebnissen ist ein horizontaler Versatz der Stufe zu sehen. Da die Pfahlöffnung in diesem Profil an der korrekten Position abgebildet worden ist, ist dieser Versatz der Stufe wohl real und ist auf einen Fehler im Bauplan zurückzuführen. Die

Abbildung der Pfahlgeometrie gelang nicht, da die Messdaten sehr verrauscht aus dem Pfahl kommende Signale zeigen. Störeffekte sind hierbei die Bewehrung, Randeffekte, Mehrfachreflexionen an dem Pfahlschaft, 3D-Effekte sowie die Schallschwächung im Beton.

Die Wellenbildung der Rückwand könnte durch die Migrationsalgorithmen bedingt oder beim Gießen des Konstruktionsbetons auf die Magerbetonschicht entstanden sein. Letzteres ist eventuell auch die Ursache für den Abfall der Rückwand im Bereich der Stufenecke. Des Weiteren können auch Materialinhomogenitäten diesen Verlauf der Rückwand verursachen.

Problematisch ist die Wahl der Prüfkopfarrays, denn der RTM-Code arbeitet mit Punktquellen. Damit können bei der RTM keine gleichartigen Schuss- und Empfängerwellenfelder entstehen.

Es konnte keine Abhängigkeit der Auflösung der Rückwand von den unteren Bewehrungsmatten festgestellt werden. Ferner zeigte die Anwendung der 3D/2D-Korrektur keine starke Verbesserung der Migrationsergebnisse.

## 7. Zusammenfassung und Ausblick

Die Versuche an synthetischen Daten und an Messdaten ergaben vielversprechende Resultate und zeigten, dass die RTM eine Weiterentwicklung der derzeit zur Verfügung stehenden SAFT-Algorithmen darstellt. Mit Hilfe der RTM konnte ein Fortschritt in der Abbildung der Lage und Struktur der Unterkante der Fundamentplatte und die Darstellung senkrechter Kanten erreicht werden.

Eine Abbildung der Pfahlgeometrie könnte möglicherweise durch den Einsatz eines anderen Messsystems, welches eine bessere Amplitudenauflösung gewährleistet, erzielt werden. Für eine bessere Auflösung der Reflektoren wäre auch ein anderes Scannersystem denkbar mit dem problemlos für jede Quellposition die gesamte Profillänge abgetastet werden kann. Dies würde ebenfalls die Ausbildung von Artefakten sowie Messungenauigkeiten verringern.

Für eine Analyse des Versatzes und des Phasensprunges der Rückwand im Bereich der Modellränder ist das Ziehen eines Bohrkerns erforderlich. Für die Reduzierung der Artefakte in den RTM-Ergebnissen sowie der besseren Abbildung der Reflektoren sollten andere Abbildungsbedingungen getestet werden, welche nicht auf der Kreuzkorrelation beider Wellenfelder beruhen (wie z.B. die Anwendung einer Dekonvolution). Des Weiteren wäre eine Erweiterung auf einen dreidimensionalen elastischen Code für die RTM und eine Anpassung des Codes an die Messtechnik bezüglich der Signaleinspeisung sinnvoll.

## Referenzen

- [1] Baysal et. al, 1983, *Reverse-Time-Migration*, Geophysics 48, 1514 – 1524
- [2] Diaz, E., Sava, P., 2012, *Understanding the reverse time migration backscattering: noise or signal?*, Proceedings of the 82<sup>nd</sup> Annual International Meeting, Society of Exploration Geophysicists.
- [3] Fomel, S., Sava, P., Vlad, I., Liu, Y., Bashkardin, V., 2012, *Madagascar: open-source software project for multidimensional data analysis and reproducible computational experiments*, Journal of Open Research Software, DOI: <http://dx.doi.org/10.5334/jors.ag>.
- [4] Mc Mechan, G. A., 1983, *Migration by extrapolation of time dependent boundary values*, Geophysical Prospecting 31, pp. 413 - 420.
- [5] Müller, S., Niederleithinger E., Bohlen, T., 2012, *Reverse Time Migration: A Seismic Imaging Technique Applied to Synthetic Ultrasonic Data*, International Journal of Geophysics, Volume 2012.
- [6] Schickert, M., Krause, M., Müller, W., 2003, *Ultrasonic Imaging of Concrete Elements Using Reconstruction by Synthetic Aperture Focusing Technique*, Journal of Materials in Civil Engineering, 15, pp. 235-246.
- [7] Taffe, A., 2008, *Zur Validierung quantitativer zerstörungsfreier Prüfverfahren im Stahlbetonbau am Beispiel der Laufzeitmessung*, Dissertation, RWTH Aachen