

Qualitätssicherung von Pfahlwänden mit der Ultraschallmethode - eine Machbarkeitstudie

Ernst NIEDERLEITHINGER, BAM, Berlin
 Markus HÜBNER, GGU, Karlsruhe
 Joram AMIR, Piletest Ltd., London, Großbritannien
 Hilmar MÜLLER, BAW, Karlsruhe

Kurzfassung. Anders als bei Einzelpfählen gibt es bisher für die Prüfung von Pfahlwänden keine etablierte Vorgehensweise. Erste Versuche zeigten das Potential der Ultraschallmethode (cross-hole sonic logging) bei Messungen über mehrere Pfähle Informationen über die Kontaktstellen und mögliche Fehlstellen innerhalb der Pfähle zu ermitteln. Um die Möglichkeiten und Grenzen dieses Verfahrens näher zu beleuchten, wurde auf dem Testgelände der BAM in Horstwalde ein Referenzprobekörper hergestellt. Erste Messungen mit verschiedenen Geräten zeigen, dass ab einer gewissen Größe Fehler an Kontaktstellen zu identifizieren sind. Probleme mit den einbetonierten Zugangsröhren oder andere Einflüsse können den Messerfolg aber beeinträchtigen. Die Ergebnisse können für die Interpretation von Feldmessungen verwendet werden.

1. Einführung

Überschnittene Bohrpfahlwände sind ein im Grundbau häufig eingesetzter Konstruktionstyp. Sie bestehen aus unbewehrten, oft mit weniger druckfestem Beton ausgeführten Primärpfählen, zwischen die nach einigen Tagen überschneidend bewehrte Sekundärpfähle gebohrt werden (Abbildung 1, Abbildung 3). Das Ergebnis ist eine dichte, vertikal und lateral belastbare Wand. Zu den Einsatzbereichen gehören der Verbau von Baugruben, Böschungssicherung oder hydraulische Barrieren (auch für Altlasten). Sie werden sowohl als temporäre Bauwerke als auch mit dauerhaft tragender Funktion ausgeführt.

Die Qualitätssicherung geschieht konventionell wie bei Einzelpfählen durch Lotung, gegebenenfalls Neigungsmessung und Protokollierung des Bohr- und Betoniervorganges. Trotz aller Bemühungen kommt es im Einzelfall zu Problemen bei der Herstellung. Die Fehlstellen sind aber in der Regel von der Oberfläche aus nicht zu erkennen und zeigen sich erst beim Aushub durch Undichtigkeiten oder gar größere Hohlstellen (Abbildung 2).

Zerstörungsfreie Prüfverfahren, wie sie für Einzelpfähle schon seit langem eingeführt und bewährt sind [1], stehen für Pfahlwände bisher nicht zur Verfügung. Die Integritätsprüfung ist hier nur von beschränkter Aussagekraft [2][3]. Die Ultraschallmethode liefert bei normaler Anwendung nur Informationen über einzelne Pfähle und nur innerhalb des Bewehrungskorbes und ist in den unbewehrten Primärpfählen mangels Zugang nicht direkt anwendbar. Erste Versuche mit Ultraschall-Transmissionsmessungen über mehrere Pfähle hinweg waren erfolgversprechend, ließen aber Fragen offen [3]. Daher wurde an einem speziell entwickelten Probekörper diese Art der Anwendung evaluiert.

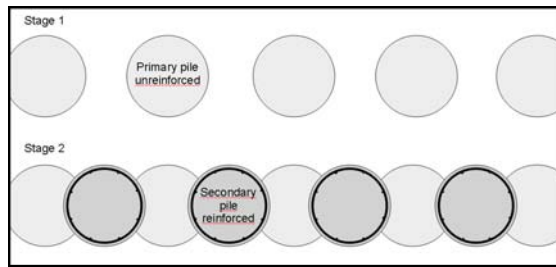


Abbildung 1: Konstruktion einer überschnittenen Bohrpfahlwand



Abbildung 2: Überschnittene Pfahlwand mit Fehler an einer Kraftwerksbaustelle der Siemens Energy in Frankreich.



Abbildung 3: Bau einer überschnittenen Bohrpfahlwand an einer Schleuse in Norddeutschland.

2. Die Ultraschallmethode zur Pfahlprüfung

Die Ultraschallmethode (Englisch Crosshole Sonic Logging) ist ein etabliertes Verfahren zur Qualitätsprüfung von Betonbohrpfählen. Am Bewehrungskorb werden hierfür 2 bis 8 Stahlrohre befestigt und mit einbetoniert. Ein Sender (40 - 80 kHz) und ein Empfänger werden dann nach Aushärten parallel in jeweils 2 der Rohre hinabgelassen (Abbildung 4). Alle 1-5 cm werden Transmissionsmessungen durchgeführt. Die Darstellung erfolgt als B-Bild (Wasserfalldiagramm). Den Daten werden Laufzeiten sowie Amplituden entnommen, evtl. bearbeitet und umgerechnet und als Logs dargestellt (Abbildung 5). Der Test wird für alle Rohrkombination wiederholt. Anwendung und Interpretation sind in vielen Ländern genormt oder über Empfehlungen geregelt ([1][4][5]). In den meisten Fällen sucht der Prüfenieur nach lokalen Anomalien.

Die Methode kann durch tomographische Auswertungen erweitert werden, entweder mit Messungen in der gleichen Tiefe mit verschiedenen Rohrkombinationen (Horizontalschnitte) oder mit gesonderten Messungen mit unterschiedlichen Sender- und Empfängertiefen (Vertikalschnitte, 3D Volumina). Letzteres ergibt eine bessere Abdeckung und Auflösung von Inhomogenitäten. In der Praxis wird dies aber aufgrund des hohen Aufwandes selten eingesetzt.

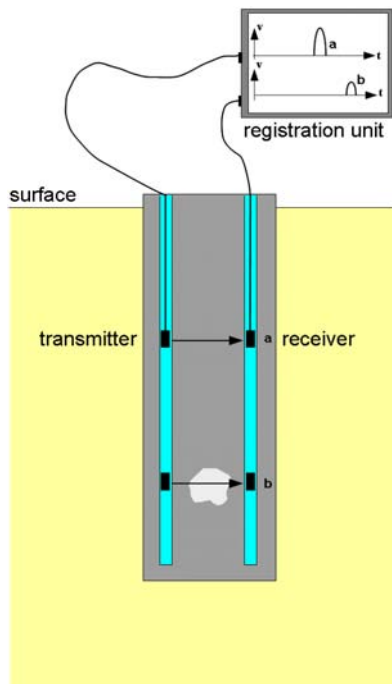


Abbildung 4: Prinzip der Ultraschallprüfung

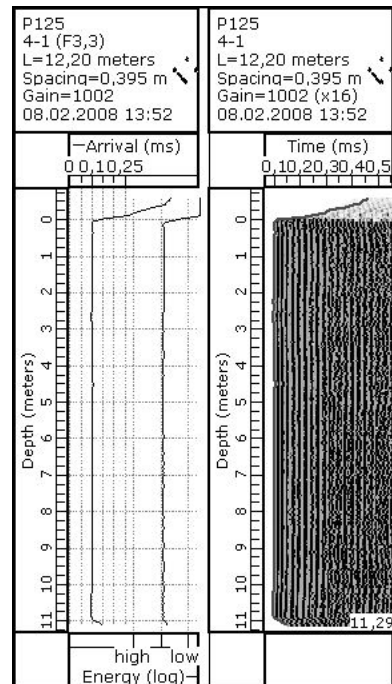


Abbildung 5: Beispiel für ein Ergebnis einer Ultraschallprüfung. Rechts B-Bild, links Logs (Laufzeit und Amplitude).

Messungen mit der Ultraschallmethode erfolgen normalerweise innerhalb eines Pfahles. Von besonderem Interesse bzgl. Statik und Dichtwirkung sind aber auch Informationen über die Nahtstellen. Über Messungen über Pfahlgrenzen hinweg lagen bisher keine publizierten Erfahrungen vor. Im Rahmen des Baus der Hochwasserschutzwand in Grimma, bei der die Gründung als überschnittene Bohrpfehlwand ausgeführt wurde und besondere Qualitätsanforderungen an die hydraulische Dichtwirkung gestellt wurden, führte einer der Autoren erste Untersuchungen zur Anwendbarkeit bei der Durchschallung mehrerer Pfähle durch [3]. Die Messungen waren erfolgreich, ließen aber Fragen bei der Interpretation offen. Daher wurde beschlossen einen Referenzprobekörper mit definierten Fehlstellen herzustellen.

3. Der Referenzprobekörper

Das BAM Testgelände Technische Sicherheit ist ein ehemaliges militärisches Übungsgelände. Auf diesem wird neben vielen anderen Aktivitäten ein Test- und Validierungszentrum für zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen aufgebaut [7]. Großformatige Probekörper (z. B. Bohrpfähle, Platten, und Brückenteile) stehen dort für Forschung, Validierung und Ausbildung zur Verfügung. Das Inventar wird ständig erweitert und ist für Partner zugänglich.

Da es bei konventioneller Bauweise nahezu unmöglich ist, in eine überschnittene Bohrpfehlwand kontrolliert Fehler an den Nahtstellen einzubringen, wurde der Referenzprobekörper anders hergestellt. Zunächst wurden drei bewehrte Säulen (Höhe 4 m, Durchmesser 0,9 m) als Modell für die Sekundärpfähle hergestellt. Diese sind intern bis auf um einige der Zugangsröhren gewickelte Filzlagen (künstliche Ablösungen) fehlerfrei. Nach der Ausschalung wurden an die einander zugewandten Seiten verschieden große Fehlstellen angebracht (Abbildung 6). Anschließend wurden die Zwischenräume in Form angeschnittener Säulen (eigentliche Primärpfähle) betoniert. Abbildung 7 zeigt den fertigen Probekörper.



Abbildung 6: Anbringen der Fehlstellen an die bewehrten Pfähle.



Abbildung 7: Ansicht des fertigen Probekörpers

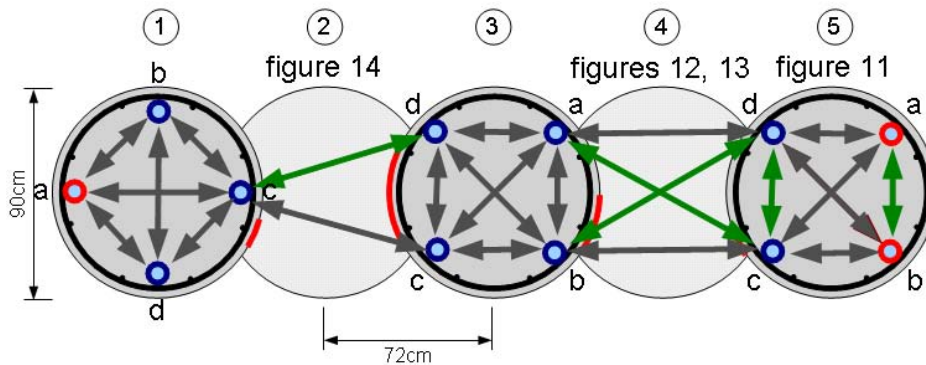


Abbildung 8: Aufsicht des Probekörpers mit Testrohren (blau), möglichen und im Text diskutierten Rohrkombinationen (grün: hier diskutiert, grau sonst) sowie Fehlstellen (rot).



Abbildung 9: Messungen am Referenzprobekörper mit der Ultraschallmethode (CHUM, Piletest Ltd.).



Abbildung 10: Messungen am Referenzprobekörper mit der Ultraschallmethode (CHAMP, PDI).

4. Messungen

Die hier dargestellten Messungen fanden einige Monate nach Herstellung des Probekörpers statt. In der Praxis geschieht dies wenige Tage oder Wochen nach der Betonage. Ob dies einen Einfluss auf die Ergebnisse hat, ist in Praxisversuchen noch zu klären. Es kamen zwei verschiedenen Messgeräte zum Einsatz: Das CHUM von Piletest Ltd (Abbildung 9) und der CHAMP von PDI (Abbildung 10).

4.1. Messungen innerhalb von Pfahl 5

Zunächst wurden Messungen in Rohrpaaren innerhalb der bewehrten Sekundärpfähle (der im Probekörper zuerst betonierten Säulen) durchgeführt. An einigen der Zugangsrohre sind durch teilweises oder vollständiges Bekleben mit Filz gezielt Delaminationen herbeigeführt worden. Abbildung 11 zeigt zwei der Logs als Beispiel.

Alle Messungen in Rohrpaaren ohne die erwähnten beabsichtigten Fehler zeigten keinerlei Auffälligkeiten. Als Beispiel ist das Ergebnis für Rohrpaar 5c-5d (Lage s. Abbildung 8) in Abbildung 11 links dargestellt. Das B-Bild ist einheitlich (außer natürlich für den Rohrbereich über 0 m außerhalb des Betons). Die Linienplots für Laufzeit und Amplitude weisen keine signifikanten Anomalien auf.

In Rohrpaar 5a-5b (rechts in Abbildung 11) zeigen sich an den Positionen der beabsichtigten Fehler Anomalien in allen drei Darstellungsvarianten. Am deutlichsten sind sie bei der unteren Fehlstelle, die deutlich länger ist als die übrigen. Zudem sind beide oberen Fehlstellen nur teilweise abgelöst (Umkleben von 90 bzw. 180° des Umfangs). Diese Ablösungen und ihr messtechnischer Nachweis zeigen die Eignung des verwendeten Materials zur Fehlstellenerzeugung und dienen als zusätzliche Tiefenkalibration. Über Fehlstelle 5b1 ist noch eine weitere, schwache Indikation zu erkennen: Nach der Auswertung der übrigen Logs ist dies womöglich eine unbeabsichtigte Delamination bei Rohr 5a.

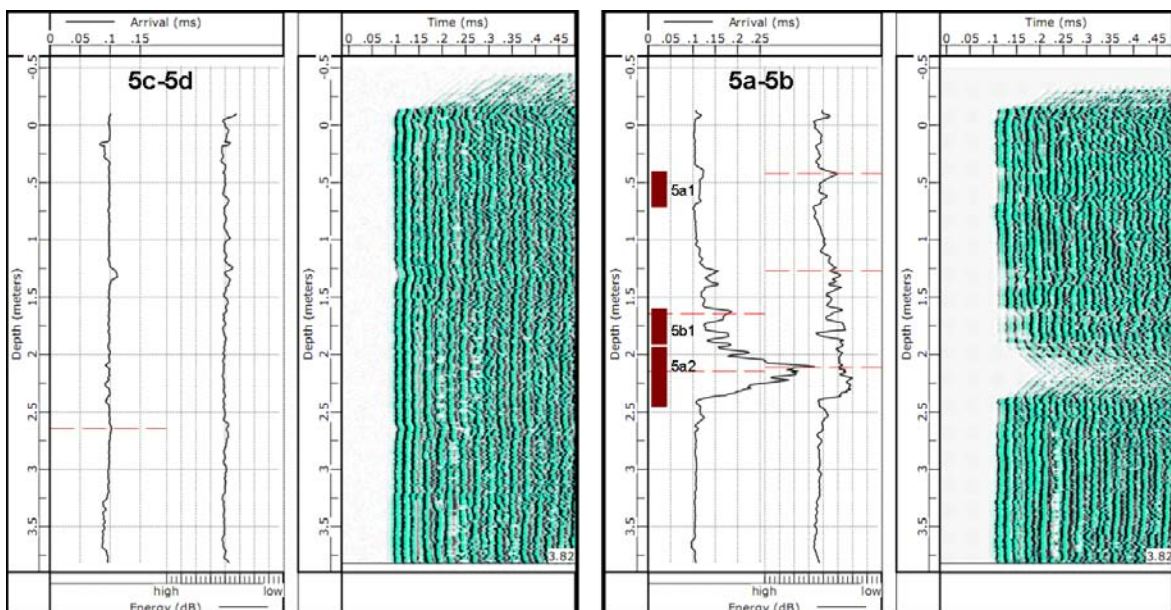


Abbildung 11: CSL Logs von Rohrpaaren innerhalb von Pfahl 5 des Referenzprobekörpers. Links Rohrpaar 5c-5d, ohne Fehler. Rechts Rohrpaar 5a-5b, beabsichtigte Fehler rot markiert. CHAMP/PDI.

4.2. Messungen über Pfahl 4

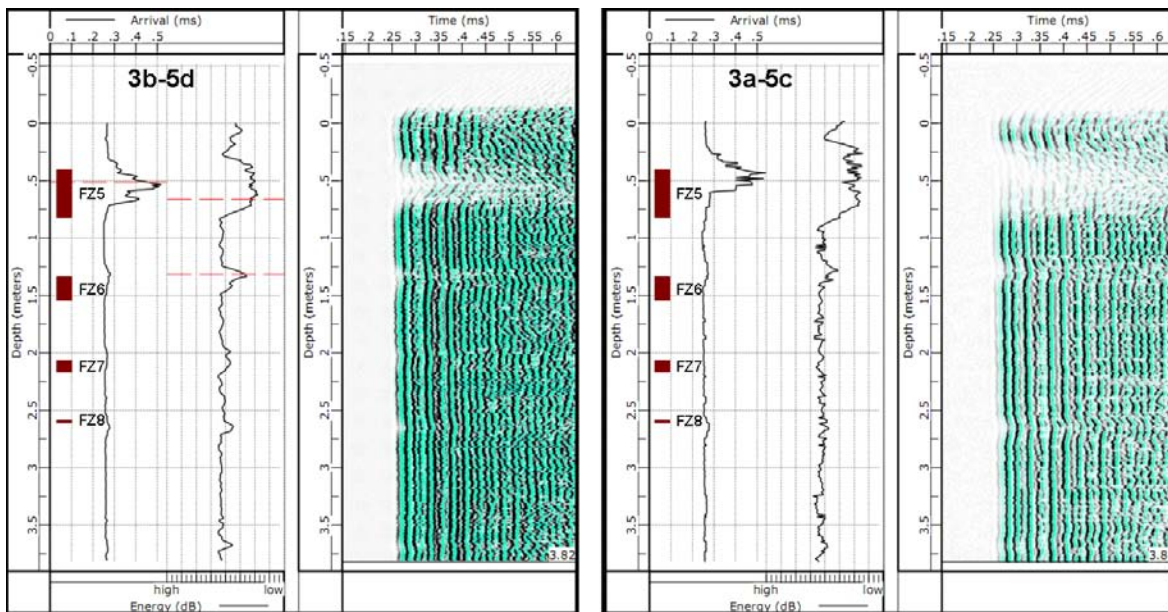


Abbildung 12: CSL Logs von Rohrpaaren jeweils beidseits von Pfahl 4 des Referenzprobekörpers. Links Rohrpaar 3b-5d (Strahlweg über beabsichtigte Delaminationen), rechts Rohrpaar 3a-5c (Strahlweg neben beabsichtigten Delaminationen). Vertikale Position der Delaminationen rot markiert. CHAMP/PDI.

Die Nahtstelle zwischen Pfahl 3 und 4 wurde mit vier aufgeklebten Filzstücken präpariert. Sie bedecken jeweils horizontal 50 % der Nahtstelle (s. Abbildung 8) und sind 5 bis 40 cm hoch. Abbildung 12 zeigt zwei der Logs mit Strahlwegen von Pfahl 3 nach Pfahl 5. Bei beiden (wie auch allen anderen über Pfahl 4 laufenden Logs) musste die Verstärkung der Instrumente bei der Messung nur geringfügig (etwa Faktor 2) gegenüber den Logs innerhalb eines Pfahles angehoben werden.

Der Strahlweg des linken Logs aus Abbildung 12 verläuft direkt durch die Fehlstellen. Im B-Bild und dem Energie-Log sind alle vier Fehlstellen zu identifizieren. Die oberste (40 cm Höhe) ist stark ausgeprägt, die zweite (20 cm) noch signifikant, aber schon an der Grenze dessen, was in realen Daten den Standards nach als relevant bezeichnet werden würde. Die beiden unteren (10 und 5 cm hoch) sind sehr schwach. Dies bestätigt in etwa die Ergebnisse von Amir & Amir [8]. Danach ist ein Fehler in der Mitte zwischen zwei Rohren dann detektierbar, wenn seine Größe ein Drittel der Distanz zwischen den Rohren (hier 105 cm) übersteigt. Die Schwelle für eine sichere Detektion wäre demnach 35 cm. Die Erkennbarkeit der kleineren Fehlstellen am Probekörper ist eventuell den gegenüber Baustellenverhältnissen günstigen Messbedingungen geschuldet.

Die Anzeigen sind gegenüber den Fehlstellen systematisch um gut 10 cm versetzt. Die Ursache ist wohl ein unterschiedliches Bezugsniveau für Konstruktion und Messung. Dies wird noch geprüft.

Die Laufzeiten ändern sich in jedem Fall nur unwesentlich. Es scheint stets noch ein verbleibender akustischer Kontakt durch die Fehlstellen hindurch vorhanden zu sein. Die Signale sind aber bei den breiteren Fehlstellen so schwach, dass sie im B-Bild kaum zu erkennen sind und die automatische Laufzeitbestimmung sie nicht mehr zuverlässig identifiziert. Ein Senken der Detektionsschwelle kommt bei dem hier verwendeten Algorithmus nicht in Frage, da dies zu Fehlinterpretationen in anderen Bereichen des Logs führt.

Der direkte Strahlweg für das rechte Log (Rohrpaar 3a-5c) führt an den Delaminationen vorbei (Lage s. Abbildung 8). Dennoch sind in den Logs (Abbildung 12 rechts) die beiden oberen Fehlstellen zu erkennen. Dies liegt daran, dass sich die Energie nicht fokussiert als Strahl ausbreitet und auch in diesem Fall ein erheblicher Teil der Energie durch die Fehlstellen reflektiert oder absorbiert wird. So werden Fehlstellen erkennbar, auch wenn sie nicht direkt im Strahlweg liegen. Es kann damit aber auch eine Ablösung über die ganze Breite der Nahtstelle vorgetäuscht werden. Dies ist bei der Interpretation zu berücksichtigen.

Um evtl. vorhandene Instrumenteneffekte zu untersuchen, wurden Messungen mit einem zweiten Gerät durchgeführt. Die Ergebnisse für das Rohrpaar 3b-5d sind in Abbildung 13 dargestellt (vergl. Abbildung 12 links). Hier ist die zweite Fehlstelle von oben im Wasserfalldiagramm eher etwas deutlicher zu erkennen, dafür sind die unteren Fehlstellen im Linienplot der Dämpfung (attenuation) eher schwächer. Dies hängt natürlich jeweils stark von gewählter Verstärkung, Farbcode und anderen Einstellungen ab. Der bei der zu diesem Gerät gehörenden Software verwendete Detektionsalgorithmus erkennt die schwachen Ersteinsätze der unteren Fehlstellen etwas besser. Dementsprechend verläuft der Linienplot der Einsatzzeit in diesen Bereichen flach. Insgesamt lässt sich aus den Ergebnissen keine eindeutige Präferenz für das eine oder andere Instrument ableiten.

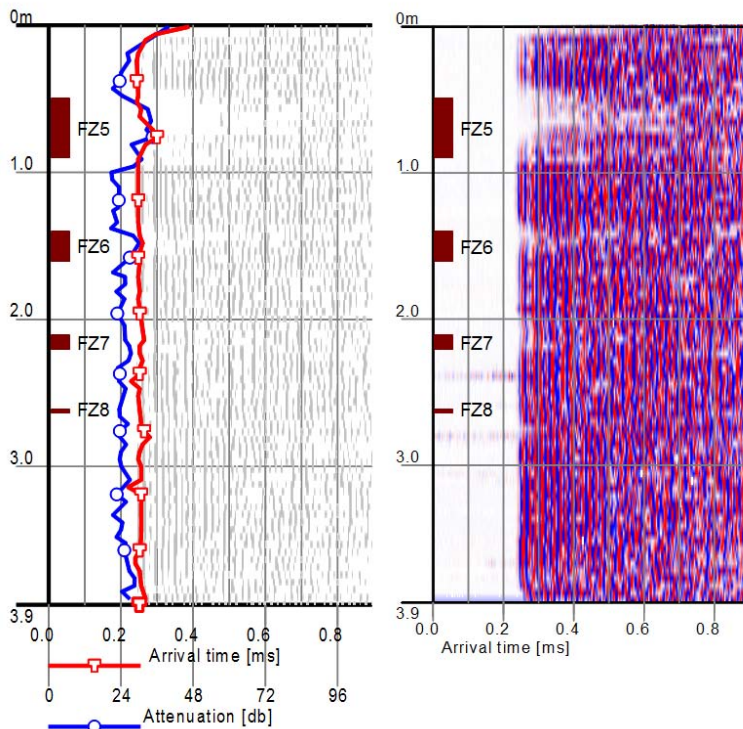


Abbildung 13: CSL von Rohrpaar 3b-5d (Wiederholung von Abbildung 12 links). CHUM/Piletest.

4.3. Messungen über Pfahl 2

Die Nahtstelle zwischen Pfahl 2 und 3 wurde anders präpariert als die oben beschriebene zwischen 3 und 4. Drei Matten mit je 40 cm Höhe wurden über die gesamte Breite der Nahtstelle aufgeklebt. Die oberste besteht aus Styrodur, die mittlere aus dem schon erwähnten Filz, die untere aus Klebeband. Da der Bewehrungskorb in Pfahl 1 um 45° gegenüber den anderen gedreht ist, ergeben sich nur zwei sinnvolle Strahlwege (s. Abbildung 8). Beide Logs, die wiederum jeweils mit beiden Messapparaturen gefahren wurden, erbrachten beinahe identische Ergebnisse.

Das Log von Rohrpaar 1c-3d ist für beide Geräte in Abbildung 14 dargestellt. Alle Messungen mussten mit extrem erhöhter Verstärkung gefahren werden (Faktor 20 bis 100 gegenüber den übrigen Logs). Selbst dann wurden nur an der Oberkante und der Unterkante „normale“ Signale registriert. Über weite Strecken ist kein Signaldurchgang zu beobachten. Die Verläufe der Linienplots in den Logs wurden mit Hilfe von Methoden aus der Bildverarbeitung (CHAMP) bzw. Filterung erzielt (CHUM). Die regelgerecht ausgewerteten Daten sind bis zur Unkenntlichkeit verrauscht. Eine Korrelation zur Lage der Fehlstellen ist bestenfalls andeutungsweise zu erkennen.

Es gibt zwei Erklärungsmöglichkeiten für die Daten. Einerseits kann eines der Zugangsrohre weitgehend delaminiert sein. Die Logs innerhalb der Einzelpfähle 1 und 3 geben darauf aber keinen Hinweis. Andererseits können die Pfähle an den Nahtstellen unbeabsichtigt beinahe vollständig separiert sein. Dies wird durch Kernbohrungen und Endoskopie im Winter 2010 geklärt.

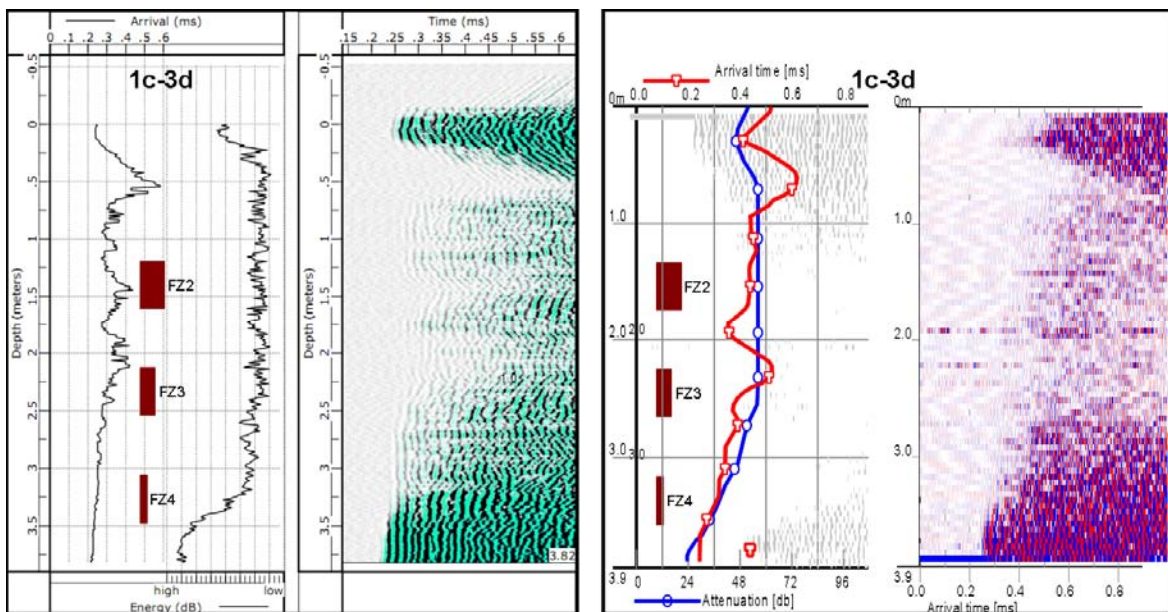


Abbildung 14: CSL Log zu Rohrpaar 1c-3d. beabsichtigte Fehler rot markiert. Links CHAMP/PDI, rechts CHUM/Piletest.

5. Zusammenfassung und Ausblick

An einem eigens hergestellten Referenzprobekörper, einem 1:1 Modell eines Ausschnitts aus einer überschnittenen Bohrpfahlwand, wurden Transmissionsmessungen nach der Ultraschallmethode (Crosshole Sonic Logging) von Pfahl zu Pfahl durchgeführt. Damit sollte getestet werden, ob sich Delaminationen an den Nahtstellen zwischen den Pfählen abbilden lassen.

An einer der Nahtstellen ließen sich die Fehlstellen, ab einer gewissen Größe, gut detektieren. Das Detektionslimit lag für unseren Probekörper bei einer 20 cm hohen Fehlstelle bei 50% Überdeckung der Nahtstelle. Wichtig ist, dass die Detektion im Wesentlichen auf verringerter Signalstärke am Empfänger beruht. Auch Logs von Rohrpaaren, deren direkter Strahlweg die Fehlstellen nicht kreuzt, können beeinflusst werden. An der zweiten Nahtstelle wurden die Effekte der beabsichtigten Fehlstellen von den Auswirkungen einer unbeabsichtigten Delamination, deren Ursache noch zu klären ist, überdeckt.

Die Anwendbarkeit der Methodik wird an einer realen Baustelle bis zum Frühjahr 2010 getestet und verifiziert. Zur Ermittlung der Detektionslimits unter Realbedingungen sind noch weitere Untersuchungen notwendig.

6. Danksagung

Ein Teil der vorgestellten Messungen wurde im Rahmen einer von der Bundesanstalt für Wasserbau finanzierten Vorstudie durchgeführt.

Der Referenzprobekörper wurde von Mitarbeitern der BAM-Fachgruppe VIII.2 unter teils widrigen Bedingungen entworfen und gefertigt. Kerstin Borchardt, Marco Lange, Sean Smith und Christoph Richter sei an dieser Stelle gedankt. Bei den Messungen und der Manuskripterstellung half Tony Ballhause.

7. Referenzen

- [1] DGGT AK 2.1: Empfehlungen des Arbeitskreises „Pfähle“ (EA Pfähle). Ernst& Sohn, Berlin, 2007.
- [2] Klingmüller, O., & Kirsch, F., 2004: A quality and safety issue for cast-in-place piles 25 years of experience with low-strain integrity testing in Germany: From scientific peculiarity to day-to-day practice. Current Practice and Future Trends in Deep Foundations, American Society of Civil Engineers, Geotechnical Special Publication No. 125, 2004, S. 202-221
- [3] Niederleithinger, E., Schallert, M., Klingmüller, O., & Bobbe, A., 2010: Quality assurance of a secant pile wall using three different non-destructive test methods. Accepted for proceedings of ISSMGE “Geotechnical Challenges in Megacities”, Moskau.
- [4] ASTM D6760 - 08 Standard Test Method for Integrity Testing of Concrete Deep Foundations by Ultrasonic Crosshole Testing
- [5] NF P94-160-1 Octobre 2000: Sols : reconnaissance et essais - Auscultation d'un élément de fondation - Partie 1 : méthode par transparence (French CSL standard).
- [6] Niederleithinger, E., Schallert, M., Klingmüller, O., & Bobbe, A., 2010: Quality assurance of a secant pile wall using three different non-destructive test methods. Accepted for proceedings of ISSMGE “Geotechnical Challenges in Megacities”, Moskau.
- [7] Niederleithinger, E., Wiggerhauser, H., & Taffe, A., 2009: The NDT-CE test and validation center in Horstwalde. Proceedings of NDTCE'09, Nantes, France. (<http://www.ndt.net/article/ndtce2009/papers/127.pdf>)
- [8] Amir, J.M. & Amir, E.I., 2009: Capabilities and Limitations of Cross Hole Ultrasonic Testing of Piles, Proc. Conf. Contemporary Topics in Deep Foundation, ASCE GSP 185, Orlando.