

Ermittlung von Art und Tiefe unbekannter Gründungselemente

Frank Rausche, GRL Engineers, Inc.

Oswald Klingmüller, GSPmbH

Einleitung

Im Zuge der Inspektion oder Renovierung von bestehenden Bauwerken oder wenn Schäden an einem Bauwerk auftreten, taucht die Frage auf, welche Belastungen die bestehende Gründung übernehmen kann. Bei Fluss-Brücken ist auch wichtig, dass die Gründungen sicher bis unter die erwartete Kolkentiefe reichen. Bei einer Nachbemessung tritt auch der Fall ein, dass nicht einmal der Gründungstyp eines Bauwerkes bekannt ist und aus den Ergebnissen zerstörungsfreier Prüfungsmethoden ermittelt werden muss.

Im Jahre 1987 kam es im US Staat New York während eines schweren Unwetters zum Einsturz einer Interstate I-90 Brücke über den Schoharie Creek. Dabei kamen acht Benutzer des Freeways ums Leben. Seither hat die Federal Highway Administration die Bestimmungen für die Gründungen von Brückenneubauten verschärft und verlangt, dass die Kollsicherheit von existierenden Brücken dokumentiert würde. Es stellte sich aber bald heraus, dass die Methoden zur Ermittlung der Art und Form von Tiefgründungen recht begrenzt sind. Die FHWA (Federal Highway Authority – Bundesautobahnamt) vergab daher einige Forschungsaufträge, die z. B. in NCHRP 1996 (National Cooperative Highway Research Programme) beschrieben werden.

Eine Untersuchung von bestehenden Fundamenten muss i.a. auf eine Reihe verschiedener Methoden zurückgreifen, die von einfachen Rammsondierungen bis zu komplizierten elektronischen Messungen reichen. Einige dieser Methoden sollen in diesem Beitrag beschrieben und ihre Einsatzmöglichkeiten aufgezeigt und abgegrenzt werden. Anwendungsbeispiele sollen dabei die Möglichkeiten dieser Methoden illustrieren.

Vorgehensweise

Wenn der Zustand einer Brücke ermittelt werden soll, dann muss als erstes bestimmt werden, ob es sich um eine Flach- oder Tiefgründung handelt. Das ist nicht immer einfach weil, z.B. bei älteren Brücken, die Baupläne und Bohrerergebnisse nicht mehr oder nur unvollständig existieren und der Brückenunterbau möglicherweise in tiefem Wasser steht. Als erstes werden aber in jedem Fall die relevanten Unterlagen gesucht und überprüft.

Wenn keine Baupläne oder andere klare Angaben über die Gründung der Brücke gefunden werden können, dann wird als erstes eine einfache Sondierung im Flachgründungsbereich vorgenommen. Wird, z. B. eine tragfähige Schicht oder Fels in geringer Tiefe gefunden, dann kann auf eine Flachgründung geschlossen werden. Im Bundesstaat North Carolina wurden z.B. die Sondierungen mit einer Rammsonde mit 12 mm Durchmesser und einem 11 kg Rammgewicht vorgenommen (Bild 1). Wenn diese leichte Rammsonde auf wenig Widerstand in der Nähe der Geländeoberkante auftrifft, kann versucht werden, durch geeignete Sondierungen oder andere Methoden die Unterkante der Pfahlplatte bzw representative Pfähle zu finden. In diesem Fall müssen auch Bohrungen vorgenommen werden, um tragfähige und kolksichere Bodenschichten zu finden. Die Untersuchung muss dann noch den Typ und die Länge der Pfähle bestimmen, was, weil es nicht sehr viele beweisichernde Verfahren gibt, nicht immer einfach oder möglich ist.

Zur Verfügung stehende Methoden

Bei Beton- und Holzpfählen kommt am häufigsten die Hammerschlag- oder Low Strain Methode in mindestens vier Varianten zum Einsatz. Diese Methode ist besonders beliebt bei der Prüfung von Mastfundamenten (Rausche, 2005), wird aber auch häufig bei der Bestimmung der Kolksicherheit von Brücken mit Tiefgründungen verwendet. Bei Stahlpfählen ist diese Methode auf ungefähr 10 m lange Pfähle begrenzt. Robinson und Webster (2008) berichten aber auch über einen erfolgreichen Einsatz der Low Strain Methode bei Pfählen aus Stahlträgerprofilen mit etwa 11,5 m Länge. Es gibt die folgenden vier Varianten der Low Strain Methode.

- (a) PEM (Pulse Echo Method), hierbei wird eine axiale Stosswelle im Pfahl mit Hilfe eines leichten Hammers erzeugt und die Geschwindigkeit mit einem auf der Oberfläche oder an der Seite des Pfahles angebrachten Beschleunigungsgebers gemessen. Das ist bei Pfählen unter einem Bauwerk nicht immer einfach und wird durch Reflexionen vom Bauwerk erschwert. Die maximale Pfahllänge hängt von Boden- und Pfahlbeschaffenheit ab und muss i.a. geringer als 25 m oder 30 Pfahldurchmesser, unter sehr günstigen Umständen 50 m oder 60 Pfahldurchmesser, sein.
- (b) TRM (Transient Response Method) misst zusätzlich zur Geschwindigkeit die Kraft des Hammerschlages und wertet die Messergebnisse im Frequenzbereich aus. Die Pfahllänge ist kürzer als bei (a). Der Vorteil der Frequenzanalyse ist, dass in günstigen Fällen, die Frequenz der Fundamentplatte von der Frequenz der Pfähle getrennt werden kann.
- (c) TVM (Two Velocity Method) verlangt, bei Pfählen unter einem Bauwerk, dass wenigstens die Pfahlseite über mindestens 1,5 m freigelegt wird, sodass zwei Beschleunigungsgeber angebracht werden können. Die zweite Messung hilft sowohl bei der Unterscheidung zwischen Reflexionen vom unteren Pfahlteil und vom obenliegenden Bauwerk als auch bei der Festlegung der Wellengeschwindigkeit.
- (d) BWM (Bending Wave Method) unterscheidet sich von PEM dadurch, dass ein horizontaler Schlag am Pfahlkopf ausgeführt wird, der Biegewellen im Pfahl verursacht, von denen erwartet wird, dass sie weniger vom Boden abgeschwächt werden. Gemessen wird in diesem Fall die Bewegung rechtwinklig zur Pfahlachse. Der Nachteil dieser Messung ist, dass Biegewellen dispersiv sind und daher je nach Frequenzanteil verschiedene Wellengeschwindigkeiten haben.

Die zweite Gruppe möglicher Messungen erfordert, dass ein Bohrloch in unmittelbarer Nähe des Pfahles bis unter die zu erwartende Tiefe des Fundamentes oder der Pfähle vorgenommen wird. Es gibt hauptsächlich zwei Verfahren:

- (a) PST (Parallel Seismic Test); das Bohrloch wird mit Wasser gefüllt und ein empfindliches Hydrophon misst dann in verschiedenen Tiefen Druckwellen, die durch einen Hammerschlag am Pfahl verursacht werden und erst durch den Pfahl und dann durch den Boden, Verrohrung und Wasser das Hydrophon erreichen. Je tiefer die Lage des Hydrophons umso länger die Zeit bis zur Ankunft der Druckwelle, die sich am schnellsten durch den Pfahl fortpflanzt. Unter dem Pfahlfuss wird die Wellenankunft deutlich durch die längere Distanz im Boden verzögert.

Die PST Methode kann in einigen Varianten durchgeführt werden, z. B. indem mehrere Hydrophone zu gleicher Zeit im Bohrloch verwendet werden (Super PST) oder indem die Pfahlkopfbewegung gemessen wird, während eine Sonde in den Boden gerammt wird. Anstelle des Hydrophones wurden auch schon Versuche gemacht, bei denen die Stosswelle an der Spitze eines „Seismic Cones“ nahe am Pfahl gemessen wurde.

Da gewöhnlich die Schlagenergie über die Tiefe stark abnimmt, ist je nach Pfahl- und Bodenbeschaffenheit und der Entfernung vom Pfahl zum Hydrophon, die Pfahllänge, die auf diese Weise bestimmt werden kann, auf etwa 15 m begrenzt.

- (b) LITE (Length Inductive Test Equipment) ist das verlässlichste Verfahren zur Ermittlung der Länge von Stahlpfehlen oder Stahlspundwänden. In diesem Fall wird ein Induktivgeber im trockenen oder mit Wasser gefüllten Bohrloch abgelassen. Der Sensor reagiert auf Metall im Bereich von etwa 450 mm. Die Länge des Stahlpfehles kann daher mit guter Genauigkeit ohne obere Tiefengrenze ermittelt werden, solange es möglich ist, das Bohrloch genügend nahe am Pfahl zu bohren.

Es gibt noch andere Messmöglichkeiten, die aber nur in Ausnahmefällen helfen können. Unter anderem können die folgenden Methoden genannt werden.

- (a) Ultraschall Resonanz (z.B. der Acoustic Concrete Tester, ACT) kann die Stärke und den Zustand von Betonplatten oder -Balken messen, solange die Stärke nicht 900 mm überschreitet.
- (b) Ultraschall Single Hole (SHSL) oder Cross Hole Sonic Logging (CSL) oder die Gamma-Gamma Single Hole Methoden verlangen, dass mindestens ein Bohrloch (oder ein von vorneherein im Pfahl eingebautes Rohr) von 50 mm Durchmesser im

Betonpfahl vorhanden ist. Die Bohrung gibt dabei wahrscheinlich mehr Auskunft als diese zerstörungsfreien Methoden, die hauptsächlich über die Beschaffenheit des Betons Auskunft geben.

- (c) Ground Penetrating Radar (GPR) kann im grobkörnigen Boden gute Auskünfte über in mässigen Tiefen im Boden verborgene Fundamente liefern.



Bild 1: Einsatz einer leichten Rammsonde unter einer Brücke

- (d) Time Domain Reflectometry (TDR) Ist noch im frühen Entwicklungsstadium, ist aber vielversprechend bei Kolküberwachungen. Bei diesem Verfahren wird ein Paar elektrischer Leiter im Beton oder Boden eingebaut. Ein elektrischer Impuls wird reflektiert, wo eine Veränderung der elektrischen Eigenschaften des die Leiter umgebenden Materials eintritt (Yu et al. 2005). Die Zeit zwischen Impuls und Reflexion ergibt die Entfernung zum Materialwechsel (z.B. die Grenze zwischen Wasser und Boden am Flussbett).
- (e) Geophysikalische Methoden, die seismische Signale im Boden mit Hilfe grosser Gruppen akustischer Geber aufnehmen und mit Hilfe der Tomographie auswerten,

können Aufschluss über Bodendichte und Steifigkeit (und daher auch über die Geometry eines Betonpfahles) als 3-dimensionale Abbildungen geben. Dieses Verfahren ist auch in der Entwicklung und ist auch vielversprechend.

BEISPIELE

1. Brückensetzungen in Ohio

Eine drei-feldrige Brücke, die in Gallia County, Bundesstaat Ohio, im Jahre 1938 gebaut worden war, wies an den zwei Stützen grössere Setzungen auf, während die Widerlager keine bemerkenswerten Schäden aufwiesen. Die „Integral Foundation“ bestand aus Pfählen, die bis zu einem Querträger, auf dem die Brückenplatte ruhte, reichten (Bild 2). Die Rammpfähle waren achteckige, vorgespannte, 406 mm starke Rammpfähle, die, laut Bauplänen, i.a., 13,7 m lang sein sollten. Eine Ausnahme waren die Pfähle unter einem der beiden Widerlager, dessen Pfähle mit 10,7 m Länge angegeben worden waren.

Um die Ursache der Setzungen feststellen und eine vernünftige Sanierungsweise empfehlen zu können, wurde zunächst die Low Strain Messung an allen Pfählen vorgenommen. Dazu wurde ein Beschleunigungsgeber am Pfahl angeschraubt (1 m unter OK Pfahlkopf bei den Widerlagern und 2 m an den Stützen) und ein Hammerschlag auf der Fahrbahn über dem jeweilig geprüften Pfahl aufgebracht (Bild 2). Geschwindigkeits-Zeitkurven von zwei Widerlagerpfählen (oberstes und unterstes Diagramm) und von je zwei Stützenpfählen sind im Bild 3 zu sehen. Sie wurden unter der Annahme einer Wellengeschwindigkeit im Pfahl von 3.650 m/s ausgewertet und zeigen deutlich die Reflexion vom Pfahlfuss oder von einem grösseren Defekt. Einschliesslich der 2 m Pfahllänge über dem Geber ergab die Messung Pfahllängen von 7,9 bis 11,6 m (26 bis 38 ft im Bild 3) an Stelle der geplanten 13,7 m. Die Widerlagerpfähle zeigen deutlich grössere Pfahllängen. Natürlich hängt die Genauigkeit dieser Längenermittlung von der Annahme der Wellengeschwindigkeit ab, die leicht um $\pm 10\%$ variieren kann. In diesem Beispiel war die Auswertung der PEM Kurven (Pulse Echo Methode) relativ einfach, hauptsächlich weil der Hammerschlag oben auf der Fahrbahn aufgebracht werden konnte. In komplizierteren Fällen hätte ein zweiter Beschleunigungsgeber am Pfahl angeschraubt werden können, um die Aussagegenauigkeit zu verbessern.

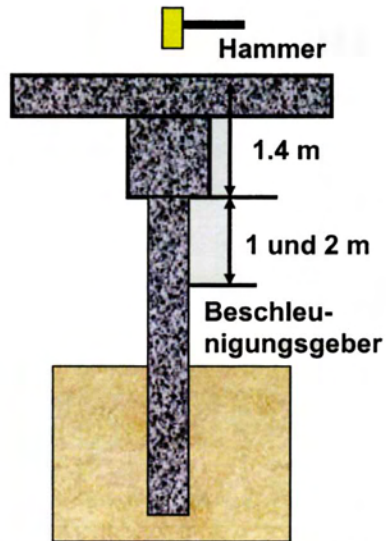


Bild 2: Testanordnung für die Brücke in Ohio

Brückensetzungen in Pennsylvania

Eine Brücke, die vor ungefähr 40 Jahren in Pittsburgh, Pennsylvania gebaut worden war, wies an zwei Hauptlagern grössere Differentialsetzungen (mehr als 50 mm) auf. Die Brücke war auf Stahlpfählen gegründet worden. Das Bodenprofil bestand aus sehr dichtem tonigem Sand und Kiessand über einem Tonstein, der leicht bis stark verwittert war und erst bei 16.5 m (50 ft) höhere Festigkeiten aufwies. Die Bohrungen trafen auch auf armierte Betonreste und andere Metallteile in der Nähe der Geländeoberkante.

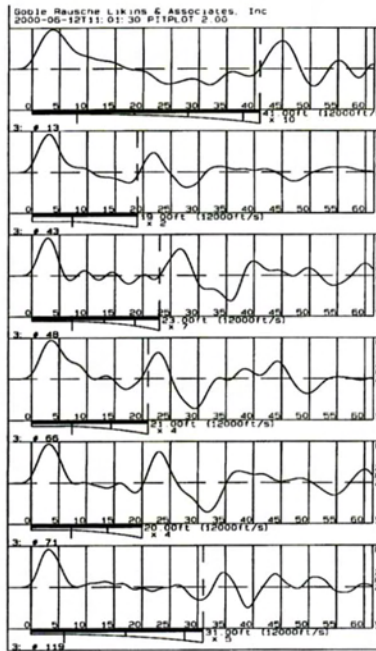


Bild 3: Low Strain Test Ergebnisse der Brückengründung in Ohio

Um die Länge der Stahlpfähle bestimmen zu können (Typ HP 10x42, d.h. 254 mm Seitenlänge und 62 kg/m) wurde eine LITE (Length Inductive Test Equipment) Messung vorgenommen. Dazu wurden zwei Bohrungen mit einem Abstand von 450 mm von der planmäßigen Achse des Vertikalpfahles vorgenommen und mit PVC verrohrt (Bild 4). Die Induktivmessungen zeigten die Präsenz eines elektrischen Leiters bis in eine Tiefe von etwa 13,1 m wo die gemessene Induktivspannung plötzlich auf Null abnahm (Bild 5). Es kann daraus geschlossen werden, dass die Pfähle nur bis in den verwitterten nicht aber in den gesunden Tonstein gerammt worden waren. Ähnliche Messungen an anderen Stützen ergaben noch geringere Eindringungen, allerdings mit einigen Spannungsänderungen des Induktivstroms, woraus auch geschlossen werden könnte, dass diese Pfähle möglicherweise beim Einrammen beschädigt worden waren.



Bild 4: Induktivmessungen in PVC verrohrten Bohrlöchern

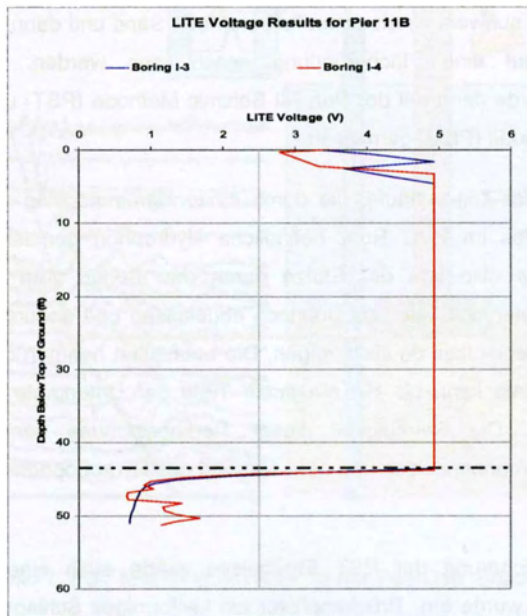


Bild 5: Spannungs-Tiefe Diagramm vom Induktiv Test (LITE).

Brücke Über den Pee-Dee River

In den Jahren 2004 und 2005 beauftragte die Strassenverwaltung des US Bundesstaates North Carolina mehrere Ingenieurbüros, etwa 150 Brücken auf ihre Kolkssicherheit hin zu untersuchen. Diese Arbeiten umfassten sowohl eine Überprüfung der verfügbaren Unterlagen als auch den Umständen entsprechende Messungen. Eine dieser Untersuchungen wurde an der etwa 500 m langen, 25-feldrigen Pee-Dee Brücke vorgenommen (Bild 6). Die Brücke ist ungefähr 50 Jahre alt und, da keine Originalunterlagen aufzufinden waren, war es nicht sicher, ob es sich um eine Flach- oder Tiefgründung handelte. Um die Kolkssicherheit zu ermitteln, wurde daher zunächst die Wassertiefe und die Tiefe von Oberkante Flachgründung oder Pfahlplatte durch Sondierungen gemessen. Die Strassenbehörde beauftragte auch Taucher, den Zustand der Pfeiler zu dokumentieren. Zur Untersuchung der Bodenverhältnisse sowie für anschliessende PST Messungen wurden dann Bohrungen in der Nähe von den vier Stützenreihen mit grösster Wassertiefe, auf etwa 5 m Tiefe unter Flussbett ausgeführt. Die Bohrlöcher wurden mit 100 mm Durchmesser PVC verrohrt. Die Bohrungen trafen im Bereich von Bent 15 auf weniger als einen halben Meter Sand und dann verwitterten Fels. Es konnte also auf eine Flachgründung geschlossen werden. Die Stärke der Fundamentplatte wurde dann mit der Parallel Seismic Methode (PST) und zusätzlich mit der Pulse Echo Methode (PEM) gemessen.

Bild 7 zeigt die Druck-Zeit-Verläufe, die durch einen Hammerschlag gegen die Stütze verursacht, durch das im PVC Rohr befindliche Hydrophon gemessen wurden. Die Druckwelle wanderte also von der Stütze durch den Boden zum Hydrophon. Das Hydrophon wurde tiefer und tiefer ins Bohrloch abgelassen und dadurch entstanden die Kurven, die die Wellenlaufzeit deutlich zeigen. Die Laufzeiten nehmen deutlich bei 5,8 m Tiefe zu. Dieser Punkt kann als die maximale Tiefe der Unterkante Fundamentplatte interpretiert werden. Die Genauigkeit dieser Tiefenbestimmung hängt nur von der Genauigkeit der Hydrophonposition und dem Abstand des Hydrophons vom Fundament ab.

Zur weiteren Absicherung der PST Ergebnisse wurde auch eine PEM Messung durchgeführt. Dazu wurde am Brückenpfeiler ein keilförmiges Schlagstück angedübelt, um eine möglichst axiale Druckwelle im Pfeiler zu erzeugen zu können. Der

Beschleunigungsgeber wurde ebenfalls in einer gewissen vertikalen Entfernung vom Stosspunkt am Pfeiler angeschraubt (Bild 8). Die Geschwindigkeitskurven, die auf diese Weise gemessen werden, sind nicht nur das Ergebnis der nach unten laufenden Stosswelle und ihrer nach oben laufenden Reflexionen. Der Hammerschlag verursachte auch eine nach oben laufende Druckwelle, die dann teilweise an Querträgern oder am Überbau reflektiert wurden. Ausserdem bringt es die nicht ideale Stosseinleitung mit sich, dass Scher- und Oberflächenwellen, die Interpretation der Geschwindigkeits-Zeitkurven erschweren. Auch in diesem Falle hätte vielleicht ein zweiter Beschleunigungsgeber klarere Ergebnisse liefern können. Auf die Biegewellenmethode wurde allerdings verzichtet, da PEM und PST zusammen schlüssige Ergebnisse lieferten. Im übrigen wird sehr empfohlen, bei diesen komplizierten Verhältnissen die Lage des Stoss- und des Messpunktes zu variieren.

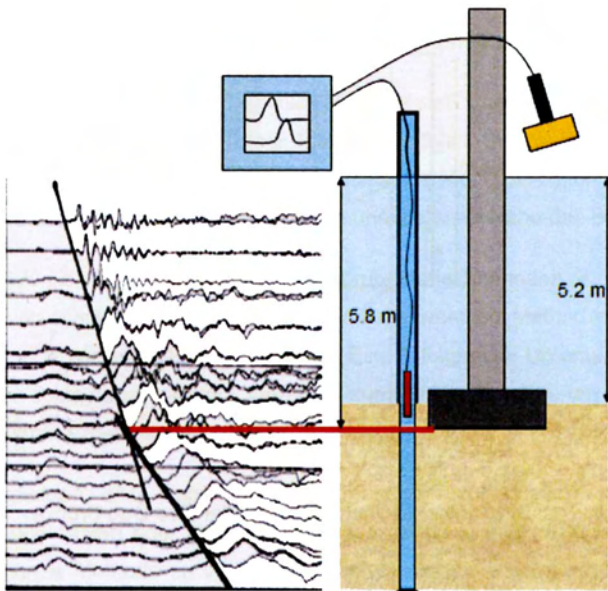


Bild 7: PST Messung am Bent 15 der Pee-Dee Brücke



Bild 6: Ansicht der Pee-Dee River Brücke; Bent 15 ist die zweite Stützenreihe von rechts

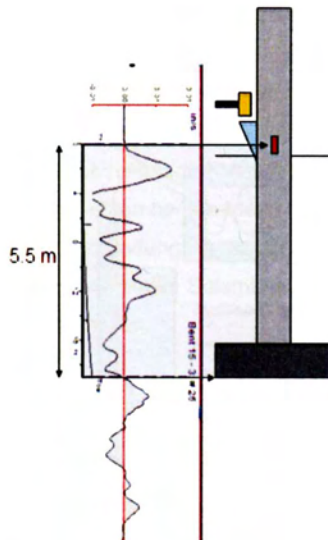


Bild 8: Low Strain Messung am "Bent 15" der Pee-Dee Brücke

Im Beispiel der Stütze 15 der Pee-Dee Brücke wurden aus mehreren unklaren PEM Bewegungsmessungen, die Geschwindigkeits-Zeitkurve von Bild 8 ausgewählt. Unter der Annahme einer Wellengeschwindigkeit von 4.100 m/s ergab sich dabei eine Fundamenttiefe von 5,5 m, die mit der PST gemessenen Tiefe von 5,8 m hinreichend

genau übereinstimmte. Wegen des Alters des Pfeilerbetons ist die Wellengeschwindigkeit von 4.100 m/s eine vernünftige Annahme.

Zusammenfassung und Empfehlungen

Die Pulse Echo Methode ist wohl die am weitesten verbreitete und erfolgreichste zerstörungsfreie Methode zur Ermittlung der Tiefe von unbekanntem Gründungselementen. Sie ist besonders beliebt, weil sie keine umfangreichen Vorarbeiten verlangt. Allerdings ist ihre Genauigkeit wegen der unbekanntem Wellengeschwindigkeit in allen Baumaterialien ausser Stahl beschränkt. Auch ist diese Methode beim Stahlpfahl (oder bei der Spundwand) in ihrer Anwendung auf ziemlich kurze Pfähle beschränkt.

Für Stahlpfähle ist die Induktivmethode weitaus erfolgreicher und genauer als andere Methoden. Sie verlangt aber, dass ein Bohrloch nahe am Pfahl gebohrt werden muss.

Die Genauigkeit der Parallel Seismic Methode ist ebenfalls unabhängig von der Wellengeschwindigkeit und kann bei Mauern, Pfählen und anderen Fundamentarten helfen. Allerdings ist dieses Verfahren wie auch seine Modifizierungen auf mässige Tiefen beschränkt und verlangt auch ein Bohrloch in unmittelbarer Nähe des Bauwerks.

Grundsätzlich gibt es nicht sehr viele zerstörungsfreie Methoden zur Ermittlung der Art und Tiefe von Flach- und Tiefgründungen und die wenigen Methoden, die es gibt, sind hinsichtlich ihrer Aussagefähigkeit begrenzt. Eine erfolgreiche Untersuchung unbekannter Gründungen sollte daher mehrere Verfahren zum Einsatz bringen, um auf diese Weise zu möglichst klaren Ergebnissen zu kommen.

Um zu vermeiden, dass wegen der Unkenntnis der Gründungsart und -tiefe Bauwerke mehr als nötig saniert oder gar ersetzt werden, ist es wichtig neue Methoden zu finden und bestehende Methode zu verbessern. Vielversprechende Entwicklungen werden z.Zt unter anderem mit Time Domain Reflectometry, Ground Penetrating Radar, Cross Hole Testing (mit Hoch- und Niederfrequenzgebern) und geophysikalischer Tomography verfolgt.

Quellen

NCHRP, 1996. Nondestructive Testing of Unknown Subsurface Bridge Foundations - Results of NCHRP Project 21-5; Book Code: HRD213

Rausche, F., 2005. Non-destructive evaluation of deep foundations, Proc., 5th Int. Conf. on Case Histories in Geotechnical Engineering, New York, Paper OSP 5.

Richardson, E.V. and Davis, S.R. 2001. Evaluating the scour at bridges, US Department of Transportation; Federal Highway Administration Publication No. FHWA NHI 01-001; Hydraulic Engineering Circular No. 18.

Robinson, B. and Webster, S. (2008). "Successful Testing Methods for Unknown Bridge Foundations" Proceedings of the Fifth Highway Geophysics-NDE Conference. North Carolina Department of Transportation, Chen and Mulla, editors; Seiten 101-110.

Yu, X. and Zabilansky, L. L., 2006. Time Domain Reflectometry for automated bridge scour monitoring. GeoShanghai, ASCE GSP, Shanghai, China

Dr., Dipl.-Ing. Frank Rausche
GRL Engineers, Inc.

4535 Renaissance Parkway
Cleveland, Ohio 44128 , USA

Dr.-Ing. Oswald Klingmüller
GSP mbH

Steubenstraße 46
D-68163 Mannheim