

Thermal Integrity Profiling – ein neues Verfahren zur Integritätsprüfung von Ortbetonpfählen

Dr.-Ing. Oswald Klingmüller, Dipl.-Ing. Christian Mayer, Dr.-Ing. Matthias Schallert

GSP mbH, Mannheim / Germany

Abstract

Ortbetonpfähle werden bei bestimmten Bodenverhältnissen häufig als die bevorzugte Tiefgründungsvariante ausgeführt. Optimierte Herstellungsverfahren ermöglichen auch für große geometrische Abmessungen immer kürzere Installationszeiten. Neben der herstellungsbegleitenden Qualitätssicherung kommen im weiteren Bauablauf immer öfter Integritätsprüfungen nach der Herstellung zum Einsatz.

Die herkömmlichen Verfahren der Pfahlintegritätsprüfung erfolgen einerseits nach der Erhärtung des Betons und haben andererseits Einschränkungen z.B. bei der Bewertung der Betonqualität im unteren Pfahlsegment bei großer Pfahllänge (Hammerschlagmethode) oder im Pfahlquerschnitt außerhalb des Bewehrungskorbes (Ultraschallmessung).

Beim Thermal Integrity Profiling - TIP - wird die Verteilung der Abbindewärme beim Aushärten des Betons genutzt, um die Betonqualität über den gesamten Querschnitt und über die gesamte Pfahllänge frühzeitig zu bewerten. Eine gleichmäßige Temperaturverteilung zeigt eine gleichmäßige Umschließung des Sensors mit Beton an. Niedrigere Temperaturen sind Hinweise auf z. B. Einschlüsse, Risse oder geringere Betonqualität.

Eine erste erfolgreiche Erprobung dieses Messsystems in Deutschland konnte 2015 ausgeführt werden. Im Beitrag werden das Verfahren sowie die Ergebnisse dieses Beispiels erläutert und Vergleiche zu internationalen Anwendungen gegeben.

1. Einleitung

Mit dem Thermal Integrity Profiler steht jetzt eine Messtechnik zur Verfügung, die es erlaubt, die Qualität und die gleichmäßige Ausbreitung des Betons (Überdeckung der Bewehrung) direkt nach dem Betonieren nachzuweisen. Das Verfahren ist nicht nur auf

frei stehende Ortbetonpfähle anwendbar sondern eignet sich auch für Bohrpfahlwände und Schlitzwände. Je nach der Möglichkeit, Sensoren einzubauen, können auch HDI-Körper, Dichtwände oder Baugrubensohlen überprüft werden [ASTM D7949].

Low-Strain-Integritätsprüfung (auch Hammerschlagmethode) und Ultraschallprüfung (Cross Hole Sonic Logging) sind eingeführte Verfahren zur Qualitätsprüfung von Ortbetonpfählen. Jedes Verfahren hat seine speziellen Leistungsbereiche und Anwendungsmöglichkeiten (siehe Abb. 1).

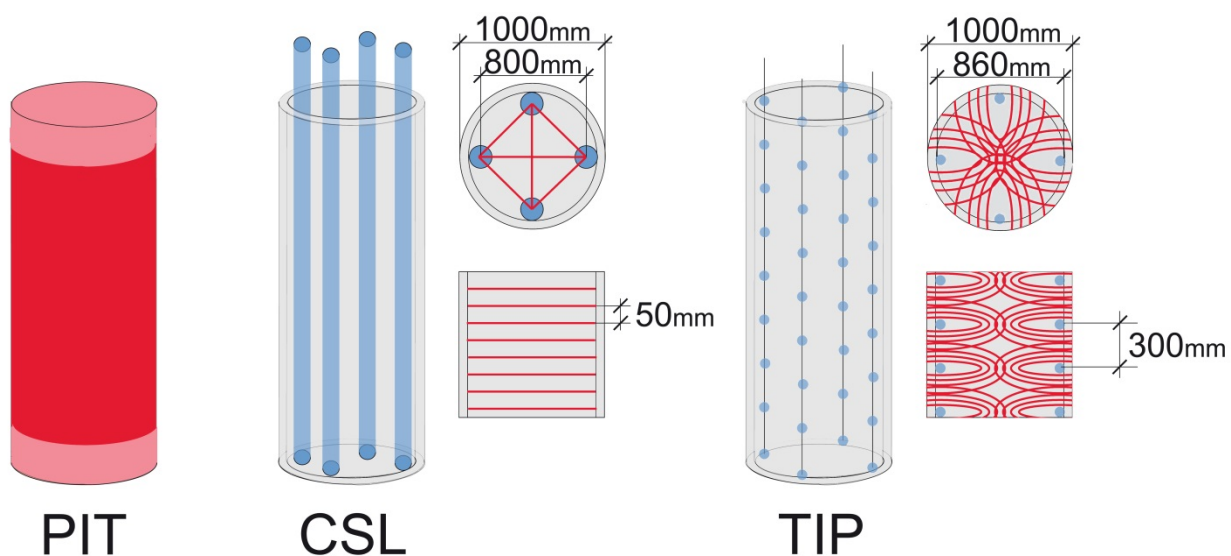


Abbildung 1: Pfahlabschnitte, die von der Messung sicher erfasst werden, links: Low-Strain-Integritätsprüfung (Hammerschlagmethode – PIT), mitte: Ultraschallprüfung (Cross-Hole-Sonic Logging – CSL), rechts: Thermal Integrity Profiling (TIP)

Mit der **Low-Strain-Integritätsprüfung** [EA-PFÄHLE 2012, KAPITEL 12.2], dem am leichtesten einsetzbaren Verfahren, werden Hinweise auf wesentliche Abweichungen von den planmäßigen Eigenschaften (z.B. E-Modul, Dichte, Querschnittsfläche, Länge) bestimmt. Es wird das ganze Pfahlvolumen erfasst. Die Genauigkeit, mit der Abweichungen von der planmäßigen Pfahlform bestimmt werden kann, ermöglicht die Einteilung der Pfähle in 3 Klassen: gut, geringe Abweichung, schlecht. Der bevorzugte Anwendungsbereich betrifft Ortbetonpfähle in Lockerboden bis 15 m Länge bzw. ein Verhältnis Länge / Durchmesser < 30. Eine ausführliche Beschreibung ist u.a. in [KIRSCH U. KLINGMÜLLER 2003] zu finden.

Bei anderen Pfahltypen oder größeren Pfahllängen, bei Einbindung in bindigen Boden oder Festgestein, ist die Aussagekraft zunehmend von den tatsächlichen Gegebenheiten abhängig. Die Beurteilung von Fehlern im Pfahlkopf- oder Pfahlfußbereich bedarf besonderer Prüfmethodik und/oder fortgeschrittener Auswertungsmethoden (signal matching, Modellbildung).

Mit der **Ultraschallprüfung** [EA-PFÄHLE 2012, KAPITEL 12.3] wird die Homogenität des Betons im Inneren des Bewehrungskorbes festgestellt. Durch die Messung der Laufzeit der Ultraschallwellen auf einer Strecke zwischen Sender und Empfänger kann eine Bewertung vorgenommen werden. Da der Beton im Innern des Bewehrungskorbes und nur auf den Messstrecken zwischen den Messrohren erfasst wird, wird von der Homogenität des gemessenen Betons auf den gesamten Pfahlbeton geschlossen. Der bevorzugte Anwendungsbereich betrifft Ortbetonpfähle mit einem Durchmesser ab ca. 1m. Üblich ist, die Messung in 5 cm Abständen entlang der Pfahlachse durchzuführen. Die Aussage in Bezug auf die Ausdehnung von Fehlern in Richtung der Pfahlachse ist differenzierter als bei der Hammerschlagmethode. In EA-Pfähle ist gezeigt, wie aus den Messungen in einem Querschnitt ein Bewertungsparameter für diesen Querschnitt bestimmt werden kann. Eine mögliche Minderung der inneren Tragfähigkeit lässt sich so ingenieurmäßig abschätzen. Da die Messrohre von OK-Bewehrung bis UK-Bewehrung geführt werden, werden auch der Pfahlkopfbereich und der Pfahlfußbereich erfasst.

Eine Gegenüberstellung beider Methoden ist in [KLINGMÜLLER ET AL. 2005] gegeben.

Mit dem **Thermal Integrity Profiler** steht jetzt eine Messtechnik zur Verfügung, die es erlaubt, die Betonqualität direkt nach dem Betonieren nachzuweisen. Wie die schematische Skizze (Abb. 1) zeigt, wird durch die Temperaturmessung der Pfahlbeton nahezu vollständig, insbesondere auch der Bereich außerhalb des Bewehrungskorbes erfasst, d.h. es wird eine gleichmäßige Betonüberdeckung nachgewiesen.

Das Verfahren ist nicht nur auf frei stehende Ortbetonpfähle anwendbar sondern eignet sich auch für Bohrpfahlwände und Schlitzwände. Es können auch alle Arten von Verpresskörpern auf Zementbasis untersucht werden.

2. Grundlagen

Bei diesem Verfahren wird die Temperaturentwicklung des Betons beim Aushärten (Hydratation) gemessen. Aus einem gleichmäßigen Anstieg der Abbindewärme wird auf die Gleichmäßigkeit der Betonqualität über die gesamte Pfahllänge und auf die Regelmäßigkeit der Pfahlform geschlossen.

Ausgangspunkt ist die Annahme, dass beim Abbindevorgang die Temperatur ansteigt. Dieser Anstieg ist im Innern des Pfahls deutlicher als am Rand. Die Temperatur an einer Messposition im Pfahl ist proportional zum Pfahldurchmesser (bzw. Abstand zum umgebenden Boden, Abb. 2). Werden Temperatursensoren im gleichen Abstand von der Pfahlmitte, z.B. am Bewehrungskorb, montiert, sollten alle einen gleichmäßigen Anstieg (und gegebenenfalls Abfall) anzeigen.

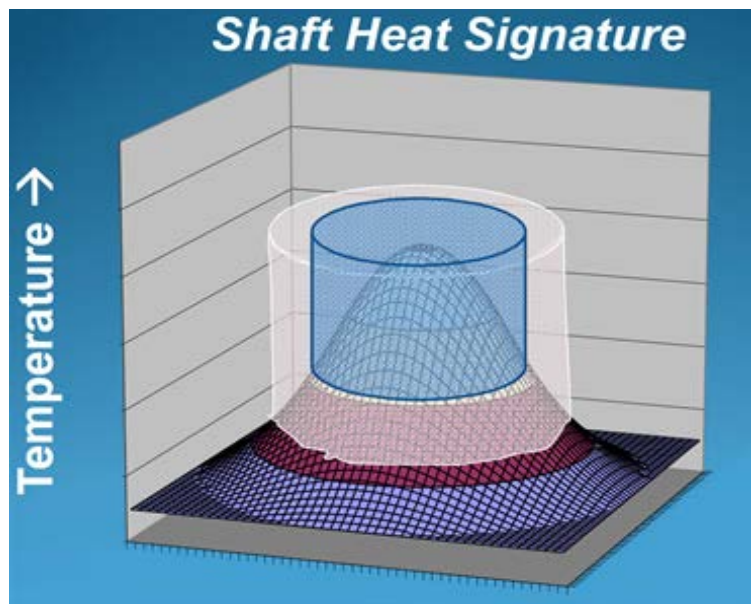


Abbildung 2: Temperaturprofil im Pfahlquerschnitt, [LIKINS, RAUSCHE, MULLINS 2012]

Wird von einem Sensor eine geringere Temperatur gemessen, ist anzunehmen, dass in einem bestimmten Bereich in dessen Umgebung die Betonqualität, bzw. der Zementgehalt, abweicht (siehe Abb. 3) oder der Abstand zum umgebenden Boden geringer ist (z. B. Einschnürungen, Luft- oder Bodeneinschlüsse im Beton, Risse). Es kann davon ausgegangen werden, dass der Sensor/Messdraht nicht gleichmäßig von Beton umschlossen ist. Pfahlabschnitte mit Ausbauchungen (größere Querschnittsfläche) können somit durch höhere Temperaturen erkannt werden.

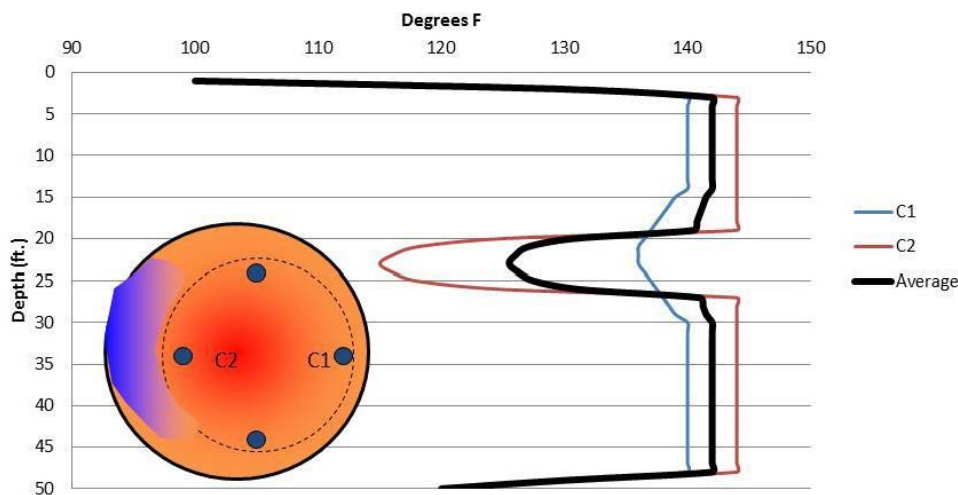


Abbildung 3: Pfahldefekt nahe Thermal Wire C2, [SELOUNTOU 2013]

3. Durchführung der Messung und Vorteile des Verfahrens

Die Temperaturmessung erfolgt entweder mit Messsonden, die durch eingebaute Rohre im Pfahl eingesetzt werden (Abb. 4), oder mit Messdrähten, die mit der Bewehrung eingebaut und während des Abbindevorganges durch eine Steuereinheit (Datenlogger) abgetastet werden (Abb. 5).

Die Sensoren der Messsonden nutzen Infrarottechnik und werden in die Messrohre, eingeführt, um die Temperatur über die Pfahlänge zu messen. Jede Sonde enthält 4 Sensoren, um die Durchschnittstemperatur je Messort mit einer Genauigkeit von $\pm 1^{\circ}\text{C}$ aufzunehmen. Der Messort entlang der Pfahlänge wird durch eine gesonderte Messung elektronisch erfasst.

Bei Verwendung der thermischen Messdrähte (Thermal Wire[®]), die mit individuellen MEMS arbeiten, wird die Temperaturentwicklung in wählbaren Zeitintervallen (z.B. alle 15 Minuten) durch die Prozessoreinheit kontinuierlich erfasst. Die Temperatursensoren (Genauigkeit von $\pm 1^{\circ}\text{C}$) sind in definiertem Abstand zueinander in bekannter Tiefe unterhalb der Oberkante des Gründungselements angeordnet.

Bei beiden Methoden, Sonden in Messrohren oder thermische Messdrähte, wird empfohlen, eine gerade Anzahl im Querschnitt anzuordnen. Bei einem Pfahldurchmesser von z.B. 1m sollten 4 Rohre oder Messdrähte angeordnet werden.



Abbildung 4: Thermal Integrity Profiler TIP (links) mit Messsonde (rechts)



Abbildung 5: Thermal Wire® an der Bewehrung

Die Messung sollte zum Zeitpunkt der höchsten Temperatur im Beton, d.h. wenn der Temperaturunterschied zum umgebenden Boden am größten ist, durchgeführt werden und erfolgt abhängig von den örtlichen Gegebenheiten ca. 12 - 48 Stunden nach Herstellung. Eine gleichmäßige Temperaturverteilung im Beton zeigt eine gleichmäßige Umschließung des Messrohres bzw. des Messdrahtes mit Beton an.

Es kann so auch festgestellt werden, ob beim Betonieren eventuell Abweichungen in der Betondeckung aufgetreten sind oder der Bewehrungskorb ausmittig oder nicht axial angeordnet ist (siehe Abb. 2 und 3).

Die Temperaturen werden durch die an der Bewehrung montierten TAP-Einheiten (Thermal Acquisition Port, Datenlogger) erfasst und können zu jedem beliebigen Zeitpunkt

zur Auswertung in ein Messgerät TIP (Thermal Integrity Profiler) mit einem Bildschirm und Auswertesoftware übertragen werden. Auf diesem Bildschirm kann bereits die Temperaturentwicklung und -verteilung angezeigt werden.

Während der Messung erhält der Ingenieur die Temperaturverläufe über die Pfahlänge und dadurch sofort Hinweise auf evtl. vorhandene wesentliche Mängel (Abb. 6).

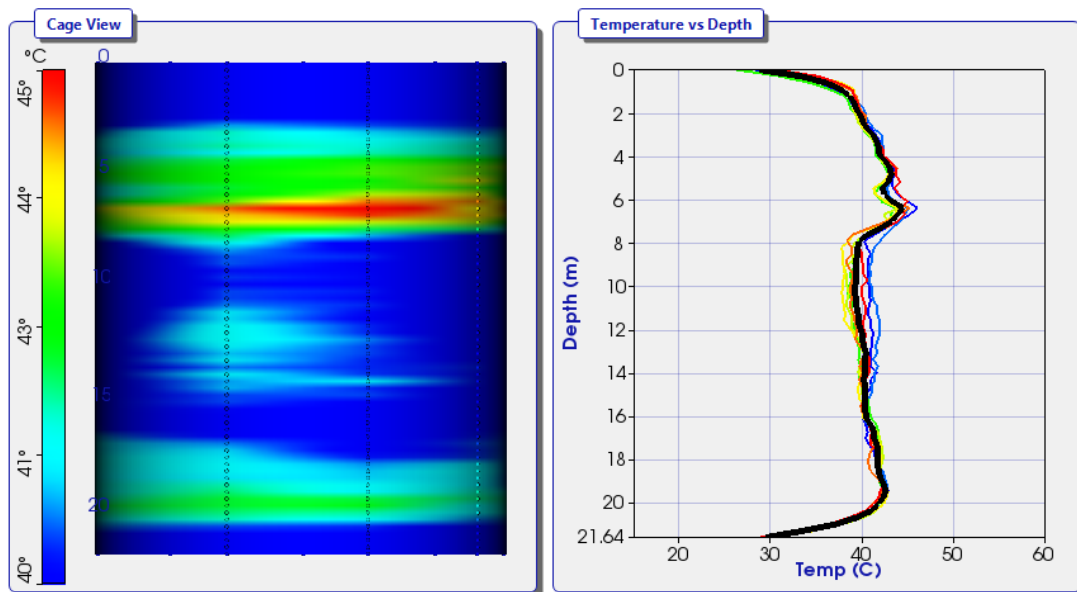


Abbildung 6: Temperaturverlauf über die Pfahlänge

Weitergehende Analysen durch Modellierung der Temperaturentwicklung und deren Ausbreitung auf Basis der gemessenen Temperaturen, der Bodenart, der klimatischen Bedingungen und der thermischen Eigenschaften des verwendeten Betons ermöglichen eine dreidimensionale Darstellung eines Temperaturprofils des untersuchten Pfahls und zweidimensionale Quer- und Längsschnitte in bestimmter Tiefe bzw. radialer Orientierung (siehe Abb. 7).

Das Verfahren wurde in den USA und Kanada sowie auf mehreren Großbaustellen in Großbritannien eingesetzt. Prototypische Anwendungen gab es auch in der Schweiz. In Deutschland wurden im vergangenen Jahr erste Erfahrungen gewonnen.

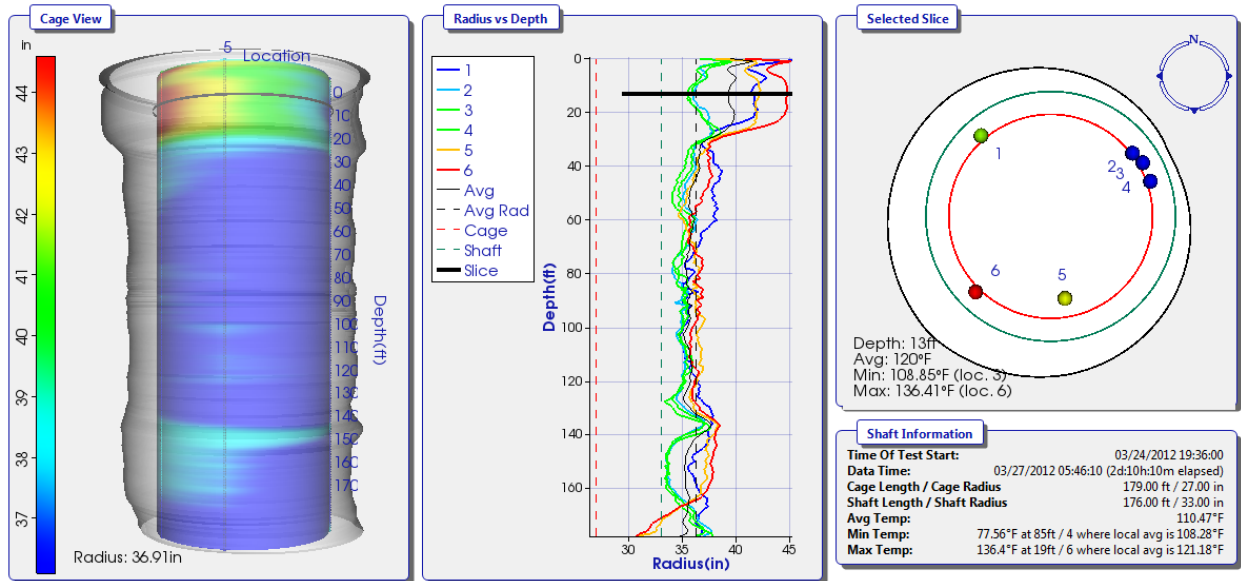


Abbildung 7: Visualisierung der Temperaturmessung

4. Anwendungsbeispiele

4.1 Test Fundamentplatte

Für die Vorbereitung der Anwendung dieser Messtechnik für Pfähle in Deutschland wurden als erstes Versuchsprojekt Thermodrähte in eine Bodenplatte eingebaut, die im Rahmen des Forschungsprojektes REFUND, ein Projekt im Rahmen der Forschungsinitiative Zukunft Bau, auf dem Testgelände der BAM in Horstwalde betoniert wurde.

Im Randbereich der Fundamentplatte wurden 3 Thermal Wire® in verschiedenen Höhenlagen eingebaut (Abb. 8).

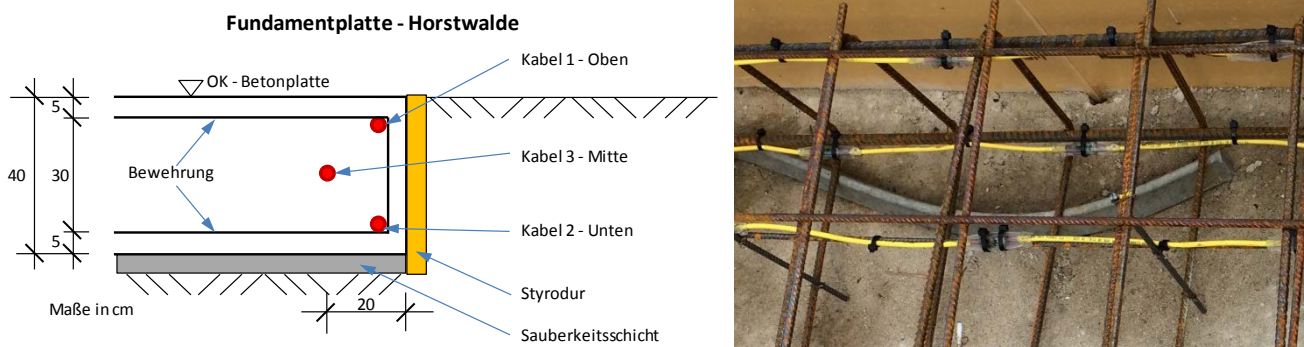


Abbildung 8: Anordnung von Thermo-Wire® in Fundamentplatte

Da die Messung an heißen Sommertagen vorgenommen wurde, zeigt sich aufgrund der großen freiliegenden Oberfläche der Fundamentplatte ein deutlicher Einfluss der Außentemperaturen (Abb.9). Besonders deutlich zeichnet sich diese Beeinflussung im oberflächennahen Sensorkabel (blaue Kurve - Nr.1, Abb.9) ab.

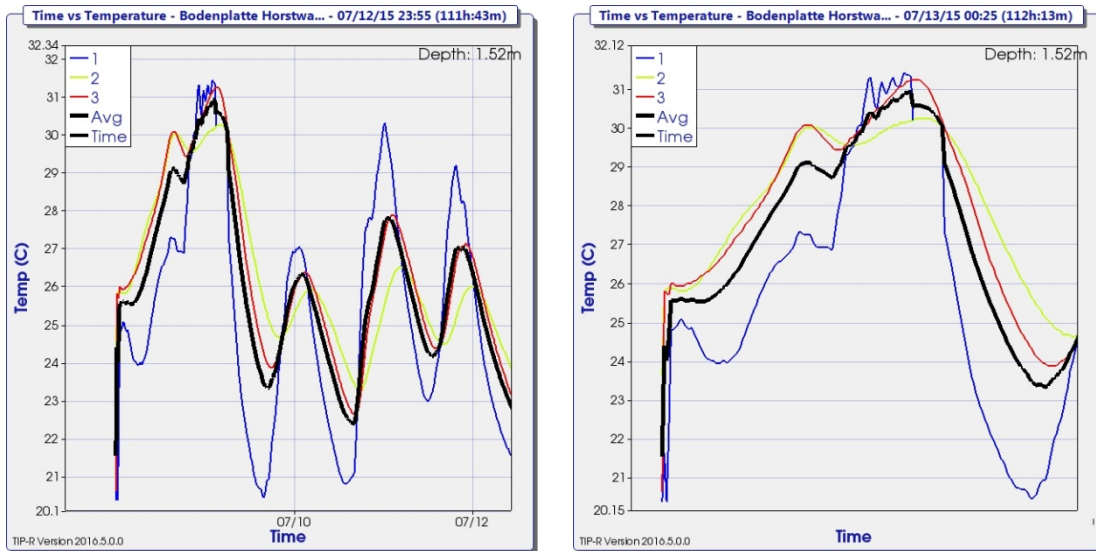


Abbildung 9: Anordnung von Thermo-Wire® in Fundamentplatte

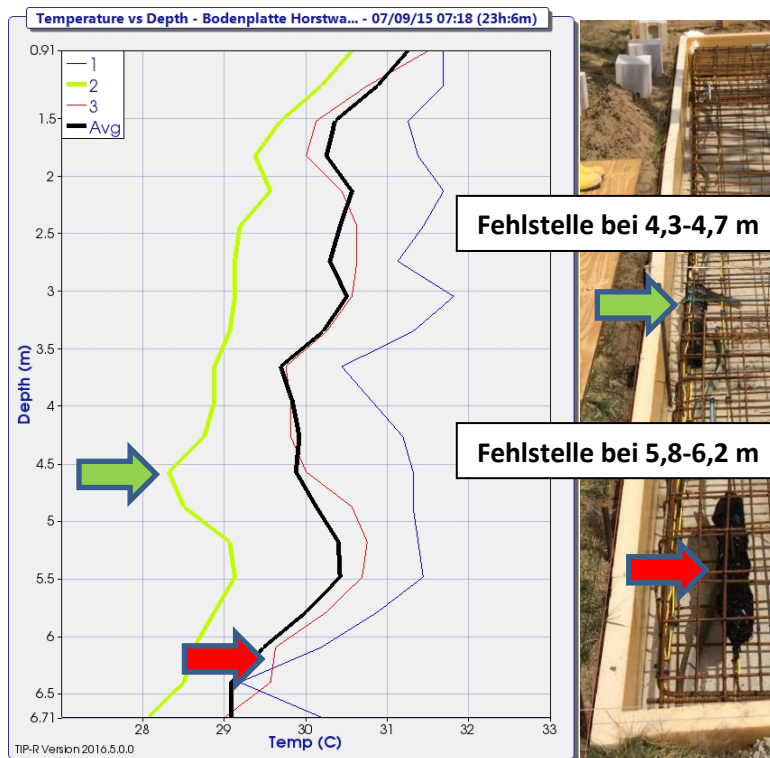


Abbildung 10: Temperaturverläufe in der Bodenplatte, Fehlstellen

Abb. 10 zeigt die gemessenen Temperaturzeitverläufe der 3 thermischen Messdrähte (1: oben, 2: unten, 3: mittig). Der Vergleich der Sensoren zu gleichem Zeitpunkt lässt aus dem Unterschied in der Entwicklung der Abbindewärme über den gewählten Messzeitraum von 4 Tagen eine Interpretation zu.

Neben der reinen Erfassung der Temperaturentwicklungen wurden im Bereich der Sensorkabel Fehlstellen eingebaut. Bei dem unteren Kabelstrang (Nr. 2) wurde eine Fehlstelle im Bereich von 4,3 – 4,7 m und beim mittleren Kabel im Bereich von 5,8-6,2 m angeordnet.

Der Einfluss der Fehlstelle, die in die Bodenplatte im Bereich von 4,3 - 4,7 m um das untere Sensorkabel (Nr. 2, grüne Kurve in Abb.10) eingebaut war, ist deutlich zu erkennen. Der Bereich der 2. Fehlstelle um das mittlere Sensorkabel Nr. 2 wird durch die schnellere Temperaturabnahme am Plattenrand sowie durch die Außentemperatur stark beeinflusst und zeichnet sich deswegen nicht so deutlich ab.

4.2 Einsatz bei Bohrpfählen

Bei einem zweiten Anwendungsbeispiel konnte diese Technik das 1. Mal erfolgreich bei Ortbetonpfählen in Deutschland eingesetzt werden. Es wurden Messungen an 3 Schneckenbohrpfählen auf einer Baustelle in Mannheim ausgeführt (Abb. 11).

Bei diesem Pfahlsystem wird die Bewehrung vor dem Betonieren über das innere Seelenrohr eingebracht. Die Bauwerkspfähle haben eine planmäßige Länge von ca. 19 m und einen Durchmesser von 65 cm und sind durchgehend bewehrt. Der Korbdurchmesser beträgt ca. 35 cm und die Korblänge ca. 19,4 m. Da die Bewehrung aus einem Korbstück bestand, konnten die jeweils 2 thermischen Messdrähte vor der Betonage vollständig eingebaut werden (Abb. 12).

Die Temperaturmessungen wurden direkt nach dem Betonieren begonnen und über einen längeren Zeitraum von bis zu 100 Stunden kontinuierlich im Takt von 15 Minuten mit den TAPs fortgeführt. Die Erfassung des Datenvolumens über diese lange Zeitspanne sowie die Stromversorgung über die Akkus der TAPs war problemlos möglich. Es wurden Zwischenauslesungen der Daten auf den TIP durchgeführt ohne die laufende Messung zu beeinflussen. Dadurch konnten frühzeitig relevante Informationen über die Pfahlbeschaffenheit gewonnen werden.



Abbildung 11: Pfahlbaustelle in Mannheim

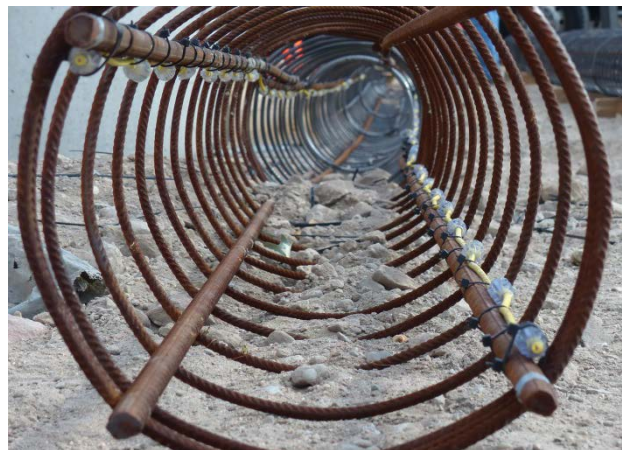


Abbildung 12: Thermische Messdrähte am Bewehrungskorb

Für alle Pfähle zeigte sich eine gleichmäßige Temperaturentwicklung. Der Maximalwert der Hydratationswärme zeigte sich bereits nach ca. 15 Stunden. Über die Pfahltiefe lag das Maximum bei ca. 1-2 m unter Pfahlkopf.



Abbildung 13: Messwerterfassung über TAPs, Auslesung der Messdaten mit TIP

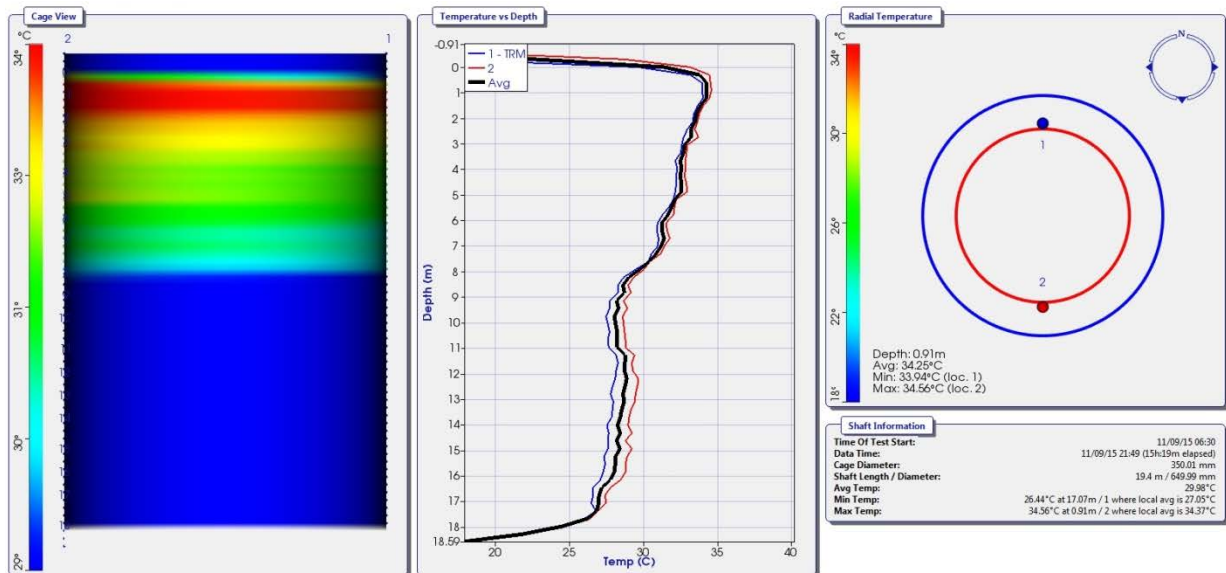


Abbildung 14: Temperaturverläufe über Pfahlänge und Radius

Unter Berücksichtigung weiterer Angaben über das tatsächliche Betonvolumen und die Betonrezeptur kann in einer erweiterten Auswertung die Betondeckung über die Pfahltiefe überprüft werden (Abb. 15). In Ergänzung und für eine anschauliche Darstellung kann die Bodenschichtung berücksichtigt werden.

Zum Vergleich der thermischen Integritätsprüfungen wurden an den Test-Pfählen auch Low-Strain-Integritätsprüfungen durchgeführt. In Abb. 16 ist der Geschwindigkeits-Zeitverlauf des Test-Pfahles dargestellt, der zuvor mit der TIP-Reporter-Software ausgewertet wurde.

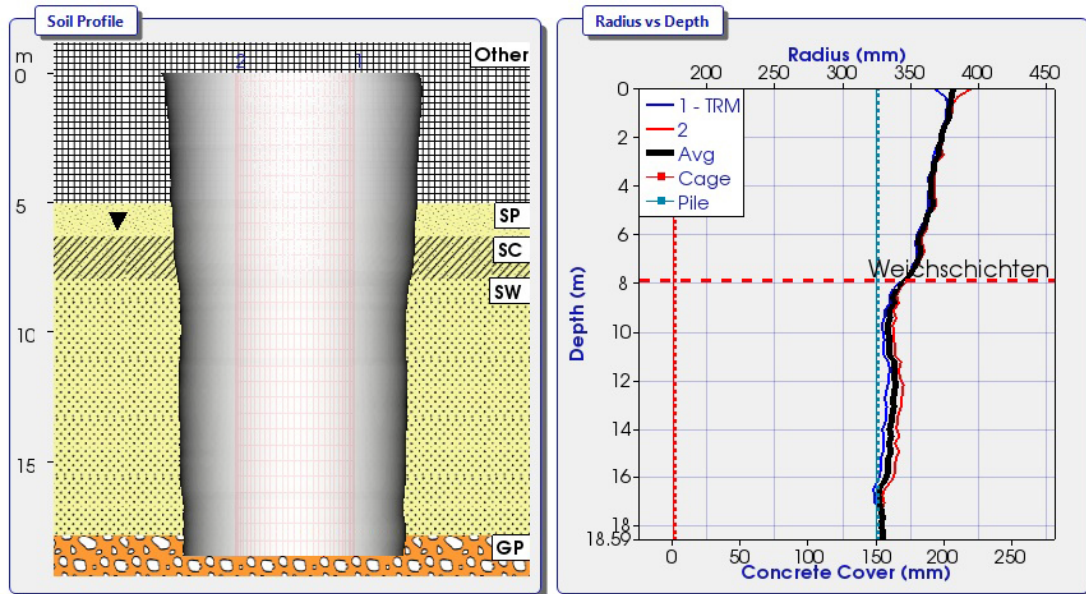


Abbildung 15: Visualisierung der Betondeckung mit Bodenschichtung

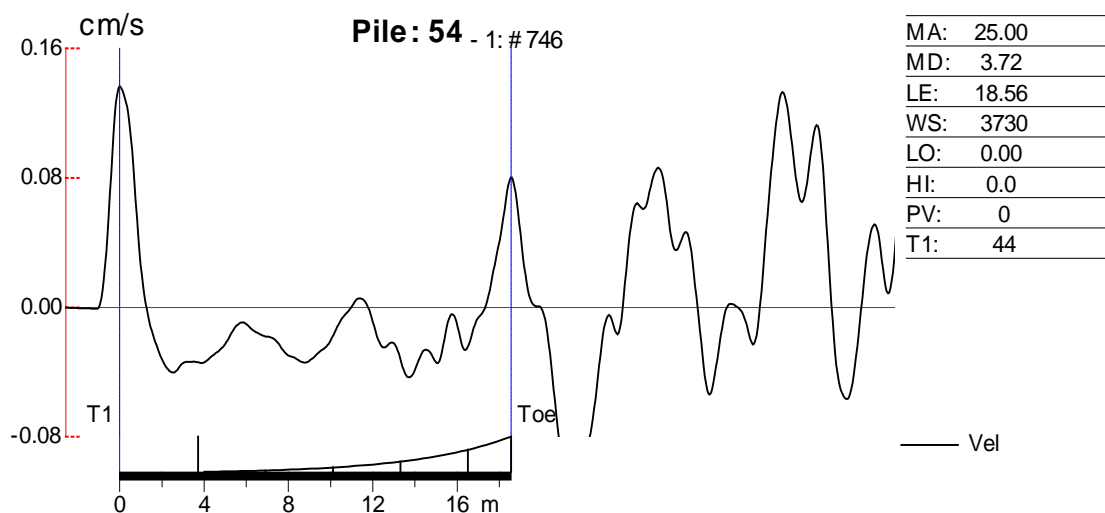


Abbildung 16: Signalverlauf der Low-Strain-Integritätsprüfung

Die Querschnittsaufweitungen in den oberen Weichschichten (Auffüllung, Ton) können durch die Hammerschlagmethode bestätigt werden. Es zeigt sich hier auch durch die Informationen der thermischen Integritätsprüfung, dass die Impedanzzunahmen im tieferen Bereich ab 12 m Tiefe auf eine größere Bodendämpfung zurückzuführen sind.

4.3 Anwendungen im Ausland

Die TIP-Methode wurde ursprünglich an der University of South Florida entwickelt [MULLINS ET AL. 2007, 2010], von Pile Dynamics, Inc. weiterentwickelt und steht nun als ausgereiftes System zur Verfügung, das bereits seit einigen Jahren erfolgreich in den USA und zunehmend auch in Europa eingesetzt wird.

In [PISCSALKO ET AL. 2015] sind eine Reihe von Ergebnissen der TIP-Anwendung gegeben, die sowohl lokale Fehlstellen im Pfahlbeton als auch Lageabweichungen der Bewehrung zeigen. Aus den gegebenen Fallbeispielen wurde gefolgert, dass Fehlstellen, die eine größere Fläche des Querschnitts als 10% annehmen, sicher erkannt werden, wenn im Querschnitt mehrere Temperaturmessungen durchgeführt werden. Es wird empfohlen je ca. 30 cm Pfahldurchmesser einen thermischen Messdraht bzw. ein Messrohr zu installieren. Fehlstellen, die kleiner als 10% der Querschnittsfläche einnehmen, können ggfs. vom nächstgelegenen Sensor noch erkannt werden. Darüber hinaus beschreiben die Autoren, dass insbesondere bei Schneckenbohrpfählen mit unregelmäßigem Querschnitt und großem L/D Verhältnis die Aussagemöglichkeiten der Hammerschlagmethode eingeschränkt sind, was durch Überlagerungen von Wellenanteilen, die an Ausbauchungen und Einschnürungen reflektiert werden, begründet ist. Weiterhin ist eine Pfahlfußreflexion in solchen Fällen oft nicht eindeutig interpretierbar. In einem Vergleich beider Methoden wird gezeigt, dass die TIP-Messung an Pfählen mit 45 cm Durchmesser (Länge / Durchmesser ca. 50) die mangelfreie Pfahlbeschaffenheit nachweisen konnte, während die PIT-Messung nicht eindeutig interpretiert werden konnte. Es wurden 221 von 444 Pfählen der Baustelle mit thermischen Messdrähten ausgestattet [BECKER ET AL. 2015].

An einem Großbohrpfahl mit einer Länge von 30 m und 1,5 m Durchmesser, in den 4 thermische Messdrähte am Bewehrungskorb installiert wurden, zeigen die Autoren [PISCSALKO ET AL. 2015] einen Vergleich aller 3 hier behandelten Methoden der Integritätsprüfung (Abb. 17). In dem beschriebenen Fall war der Beton in geringer Tiefe unter dem Pfahlkopf außerhalb der Bewehrung vollständig aufgelöst (siehe Abb. 17). Da der Defekt direkt unter dem Pfahlkopf auftrat, wurde er durch die einfache Low-Strain-Integritätsprüfung nicht angezeigt. Auch durch die Ultraschallprüfung konnte der Defekt nicht bestimmt werden, da der Fehler außerhalb des Bewehrungskorbes lag.

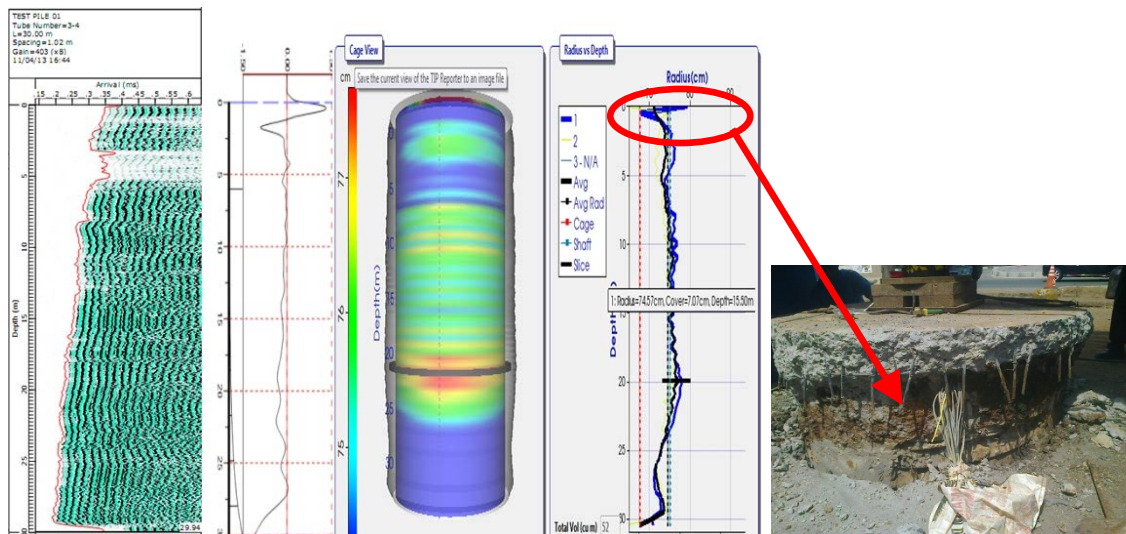


Abbildung 17: Vergleich von CSL, PIT und TIP, freigelegter Pfahlkopf (rechts)

[PISCSALCO ET AL. 2015]

Weitere Anwendungsbeispiele sind ausführlich z.B. in [MULLINS 2010; LIKINS U. MULLINS 2011; SELLOUNTOU ET AL. 2013 UND BECKER ET AL. 2015] beschrieben, anhand deren Ergebnisse die in diesem Beitrag getroffenen Schlussfolgerungen untermauert werden.

5. Zusammenfassung, Ausblick und Danksagung

Erste erfolgreiche Anwendungen in Deutschland zeigten, dass im Bereich der Integritätsprüfung von Pfählen zwei Lücken geschlossen werden konnten, zum einen eine Überprüfung der Betondeckung und zum anderen die frühzeitige Verfügbarkeit der Informationen über die Pfahlbeschaffenheit noch bevor der Pfahlbeton erhärtet ist und belastet werden kann. Wenn ausreichend Erfahrungen vorliegen und Bewertungskriterien wie für die Low-Strain-Integritätsprüfung und die Ultraschallprüfung entwickelt wurden, kann in einem nächsten Schritt auch die Aufnahme in die Empfehlungen des Arbeitskreises Pfähle erfolgen.

Messungen der Abbindewärme können aber auch bei anderen Bauwerken, z.B. Bohrpfahlwänden, Schlitzwänden und Verpresskörpern aller Art eine wesentliche Ergänzung der Qualitätssicherung darstellen. Während Messtechnik und Auswertung als bekannt vorausgesetzt werden können, ist hinsichtlich der Montage der thermischen Messdrähte, insbesondere bei Bauteilen, die von der Oberfläche nicht direkt zugänglich sind, noch Entwicklungsbedarf gegeben.



Abbildung 18: Erfolgreiche TIP-Messungen in Mannheim

Wir bedanken uns bei der Firma Kurt Fredrich Spezialtiefbau GmbH für die tatkräftige Unterstützung und Zusammenarbeit auf der Baustelle, bei David Burell von PDI, Cleveland, für die Unterstützung beim ersten Einbau der thermischen Messdrähte und bei Winfried Herold, ehemals Betonlabor Bilfinger+Berger, Wiesbaden, für die Unterstützung im betontechnologischen Bereich.

Literatur

ASTM D7949-14: Standard Test Methods for Thermal Integrity Profiling of Concrete Deep Foundations, 2014.

Becker, M. L.; Coleman, T. L.; Belardo, D. S.: Thermal Integrity Profiling of ACIP Piles, *Proc. of the Intern. Foundation Congress and Equipment Expo, San Antonio, Texas, USA, 2015.*

Empfehlungen des Arbeitskreises Pfähle (EA-Pfähle): Hrsg. Arbeitskreis „Pfähle“ der DGGT - Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V.: 2. Auflage, Verlag Ernst & Sohn Berlin, (2012).

Kirsch, F.; Klingmüller, O.: Erfahrungen aus 25 Jahren Pfahlintegritätsprüfung in Deutschland – Ein Bericht aus dem Unterausschuss 'Dynamische Pfahlprüfung' des Arbeitskreises Pfähle der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V., *Bautechnik 80, Heft 9, 2003.*

Klingmüller, O.; Schallert, M.; Gottlöber, B.; Mayer, Ch.: Ultraschallprüfung und Hammerschlagprüfung, *Pfahl-Symposium 2005, Mitteilungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Braunschweig, Heft Nr. 80.*

Likins, G. E.; Mullins, G.: Structural Integrity of Drilled Shaft Foundations by Thermal Measurements, *Structural Engineer, November 2011, pages 46-48.*

Likins, G. E.; Rausche, F.; Mullins, G.: Integrity Testing of Drilled Shafts with the Thermal Integrity Profiler (TIP), *ADSC WCC Educational Session Sacramento, CA , USA, 2012*

Mullins, G.: Thermal Integrity Profiler of Drilled Shafts, *DFI Journal Vol 4., No. 2 December 2010: Deep Foundations Institute, Hawthorne, NJ, USA, Dec., 2010, pp. 54-64.*

Mullins, G. and Kranc, S.: Thermal integrity testing of drilled shafts, *Final Report, FDOT Project BD544-20, University of South Florida, USA, May 2007.*

Piscsalko, G.; Cotton, D.; Belardo, D.; Likins, G. E.: Using Thermal Integrity Profiling to Confirm the Structural Integrity of foundation applications, *Proc. of the Intern. Foundation Congress and Equipment Expo, San Antonio, Texas, USA, 2015.*

Piscsalko, G.; Alvarez, C.; Belardo, D.; Galvan, M.: Using Thermal Integrity Profiling to Evaluate the Structural Integrity of Soil Nails, *DeepFoundations Institute 39th Annual Conference on Deep Foundations, Atlanta, Georgia; USA, 2014.*

Sellountou, A., Alvarez, C., Rausche, F.: Thermal Integrity Profiling: A Recent Technological Advancement in Integrity Evaluation of Concrete Piles, *Proc. of the First International Conference, Seminar on Deep Foundations: 2013, Santa Cruz, Bolivia.*

Autoren

Dr.-Ing. Oswald Klingmüller

ok@gsp-mannheim.de

Dipl.-Ing. Christian Mayer

cm@gsp-mannheim.de

Dr.-Ing. Matthias Schallert

ms@gsp-mannheim.de

GSP - Gesellschaft für Schwingungsuntersuchungen

und dynamische Prüfmethode mbH

www.gsp-mannheim.de

Steubenstraße 46, 68163 Mannheim

Tel.: 0621 33 13 61