ULTRASCHALLPRÜFUNG UND HAMMERSCHLAGPRÜFUNG

Oswald Klingmüller, Matthias Schallert, Beatrice Gottlöber, Christian Mayer

ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Beitrag wird die Ultraschallprüfung („cross-hole sonic logging“ – CSL) mit der Hammerschlagprüfung („low-strain“-Integritätsprüfung) verglichen. Die beiden Verfahren der Integritätsprüfung von Pfählen werden beschrieben, wobei auf die Durchführung und Auswertung der Ultraschallprüfung näher eingegangen wird.

Da die Durchführung, Auswertung und Interpretation von Ultraschallprüfungen in Deutschland derzeit in keiner Norm geregelt ist, werden Möglichkeiten zur Beurteilung der Messergebnisse aufgezeigt. An Fallbeispielen werden Unterschiede der Prüfmethoden erläutert.

In Anwendungsempfehlungen werden die Grenzen und Schwierigkeiten der beiden Prüfmethoden aufgezeigt.

1 EINLEITUNG

Zur Qualitätsprüfung von Bohrpfählen werden vor allem zwei Verfahren eingesetzt:

1. Die Hammerschlagprüfung, bei welcher durch die Stoßwelleneinleitung mit einem Hammerschlag aufgrund der Untersuchung von Wellenausbreitungs-phänomenen, Reflexionen und Refraktionen die Qualität der Pfähle bestimmt wird,
2. die Ultraschallprüfung (cross-hole sonic logging – CSL oder Carrotage Sonique), bei der die Betonqualität durch Messung zwischen eingebauten Rohren bestimmt wird.

Bei der Hammerschlagprüfung besteht die Schwierigkeit darin, aus den Reflexionen und vor allem dem mehr oder weniger deutlichen Fußecho die richtigen Schlussfolgerungen zu ziehen.

Bei der Ultraschallprüfung wird aus den Messungen von einem Messpunkt zum anderen die Betonqualität bestimmt. Hierbei kommt es darauf an, nicht nur die Ankunftszeit der Welle richtig zu bestimmen, sondern auch die Abminderung der eingetragenen Energie auszuwerten.

Das Vorgehen bei der Ultraschallmethode wird ausführlich unter Bezugnahme auf die neuen Empfehlungen der DGGT erläutert. Anhand von Fallstudien wird der Unterschied beider Methoden und der Anwendungsbereich gezeigt.

2 HAMMERSCHLAGPRÜFUNG

Mit einem handelsüblichen leichten Handhammer mit Kunststoffkappe (Nylon o.ä.) wird auf den Pfahlkopf geschlagen und dadurch eine Stoßwelle in den Pfahl eingetragen. Die Messung der Bewegung am Pfahlkopf (in der Regel werden Beschleunigungsaufnehmer verwendet, da sie dem Messbereich am besten angepasst sind) zeigt, dass der Bewegung, die eine direkte Wirkung des Hammerschlags ist, erst eine Phase relativer Ruhe am Pfahlkopf folgt. Erst wenn Reflexionen von Störstellen oder vom Pfahlende wieder am Pfahlkopf auftreten, werden Bewegungen gemessen.

Im Bild 1 ist der Hammerschlag als gestrichelte Linie dargestellt, die Bewegung des Pfahlkopfes als Geschwindigkeit (aus der gemessenen Beschleunigung integriert) als durchgezogene Linie. Eine positive Geschwindigkeit zeigt eine Bewegung nach unten als direkte Folge des Hammerschlages. Die Kontaktzeit des Impulses zwischen Hammer und Pfahlkopfoberfläche beträgt hier 1,1255 Millisekunden.

Nach 4,22 Millisekunden zeigt eine Bewegung nach oben an, dass eine Druckwelle reflektiert wurde, das ist ein Anzeichen für eine Impedanzvergrößerung. Nach 7,03 Millisekunden zeigt die Bewegung nach unten (also in gleicher Richtung wie die des Hammerschlags), dass die Reflexion vom Pfahlfuß den Pfahlkopf erreicht hat.

In Deutschland wird dieses Verfahren sehr häufig entsprechend den Empfehlungen der DGGT angewendet.

Das Verfahren der Hammerschlagprüfung wird in Deutschland seit vielen Jahren als Standardverfahren zur Pfahlintegritätsprüfung eingesetzt und ist demzufolge weitestgehend bekannt, so dass an dieser Stelle für weitergehende Informationen auf entsprechende Literatur verwiesen sei (Plaßmann, B. (2002), Kirsch, F.; Klingmüller, O. (2003), Stahlmann et al. (2004)).

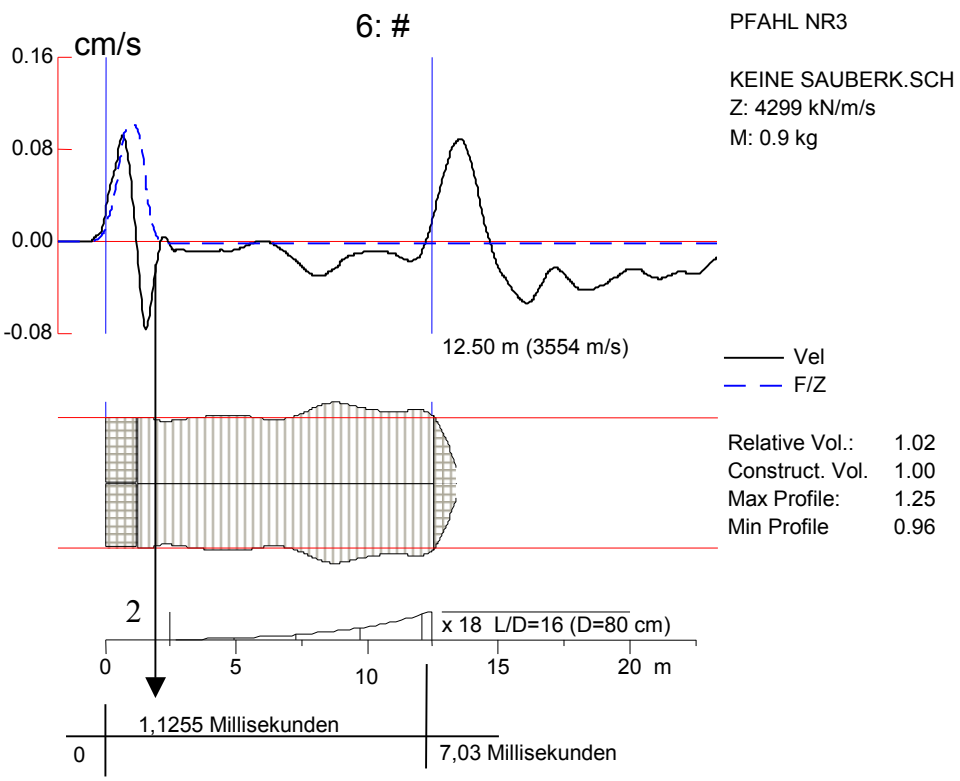


Bild 1: Geschwindigkeitszeitverlauf mit Impedanzprofil

3 ULTRASCHALLPRÜFUNG

3.1 Prinzip, Durchführung und Messwerte

Durch die Ultraschallprüfung kann die Betonqualität von Pfählen überprüft werden. Im englischen Sprachraum nennt man dieses Verfahren cross-hole sonic logging (CSL). Dazu werden ein Ultraschallgeber und ein in seiner Frequenz angepasster Empfänger parallel in vorab am Bewehrungskorb installierten Stahlrohren (Durchmesser ca. 50 mm) mit konstanter Geschwindigkeit entlang des Pfahlschaftes bewegt. Die Anzahl der Messrohre richtet sich nach dem Pfahldurchmesser. In der Regel wird pro 25 cm Pfahldurchmesser ein Messrohr eingebaut (für einen 90 cm Pfahl 4 Rohre). Zur besseren Übertragung des Ultraschallsignals werden die Messrohre mit Wasser gefüllt. Es werden nur longitudinale Wellen durch das Wasser und die Außenwand der Messrohre in den umgebenden Beton übertragen. Sender und Empfänger werden gleichmäßig zum Messrohrende herabgelassen. Ultraschallsignale des Senders laufen durch den Beton und werden vom Empfänger aufgezeichnet. In Bild 2 sind der Messaufbau und -ablauf dargestellt.

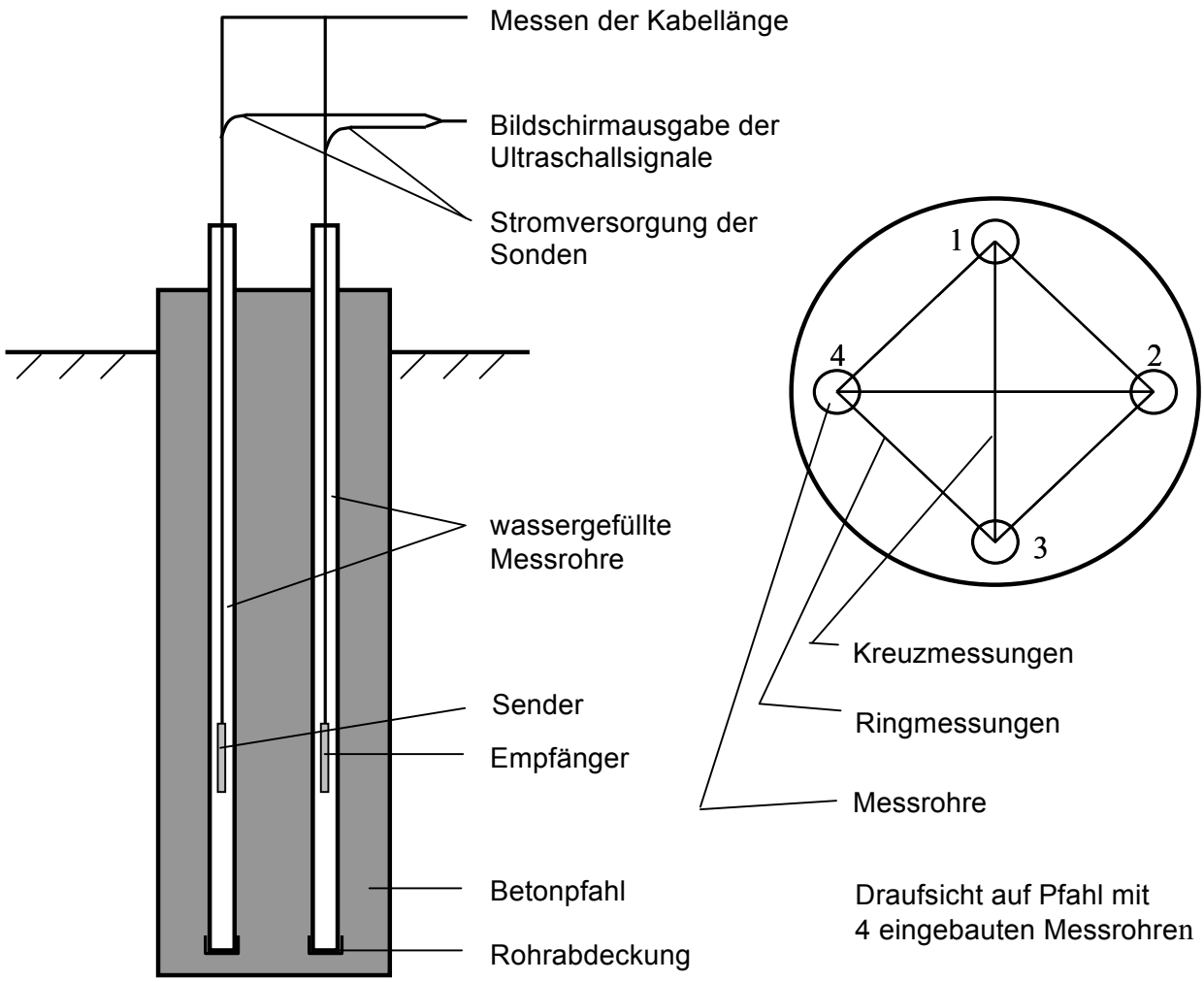


Bild 2: Messaufbau für Ultraschallprüfungen

Während des Messvorgangs werden kontinuierlich Ultraschallimpulse vom Sender abgegeben, die sich mit der für Beton spezifischen Wellengeschwindigkeit im Pfahl ausbreiten. Die Impulse werden vom Empfänger nach der Zeit t aufgezeichnet. Die Laufzeit t der Welle ist vom Abstand der Messrohre L und der Wellengeschwindigkeit c abhängig.

$$t = \frac{L}{c}$$

t = Zeit [s]
L = Abstand der Messrohre [m]
c = Wellengeschwindigkeit [m/s]

Die Laufzeit und die übertragene Energie der Welle zwischen Sender und Empfänger werden gemessen.

Aus der gemessenen Laufzeit und dem entsprechenden Abstand der Messrohre, der jedoch nach der Pfahlherstellung nur an der Pfahlkopfoberfläche gemessen werden kann, kann die Wellengeschwindigkeit berechnet werden.

Bild 3 zeigt das Ergebnis einer Ultraschallprüfung.

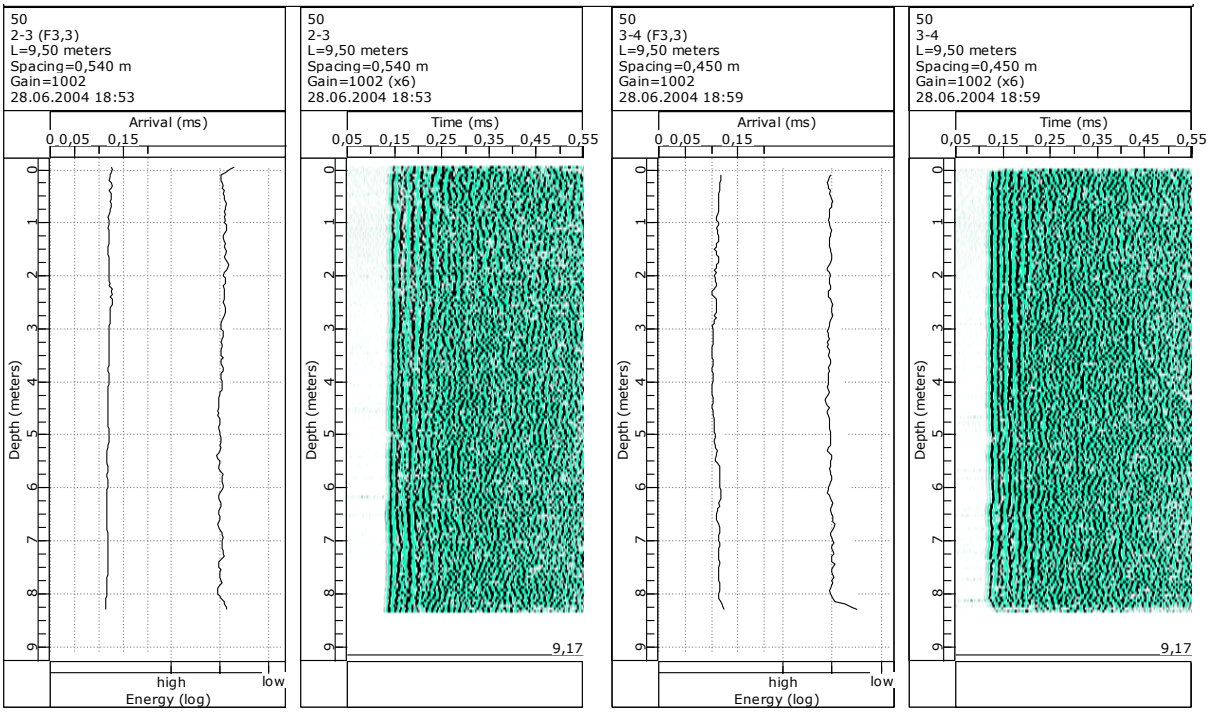


Bild 3: Ergebnis einer Ultraschallintegritätsprüfung eines fehlerfreien Pfahles

Die Ankunftszeiten der Ultraschallwelle sind zusammen mit der Energie des empfangenen Signals für jeden Messquerschnitt über die Tiefe als Linien aufgetragen (linke Bildseite). Der jeweilige Zeitverlauf des empfangenen Signals ist auf der rechten Bildseite ebenfalls für jeden Messquerschnitt über die Tiefe dargestellt. Zur übersichtlichen Darstellung sind die Zeitverläufe als Punktstrecke gezeigt, wobei jedem positiven Wert ein grüner Punkt und jedem negativen Wert ein schwarzer Punkt zugeordnet ist. Sind die Signale gleichartig und reproduzierbar ergeben sich parallele grüne und schwarze Linien.

Treten vor Erreichen der Welle am Empfänger Impedanzveränderungen (Hohlräume, Kiesnester etc.) auf, so vergrößert sich die Laufzeit bzw. die Wellengeschwindigkeit sinkt.

Die Ankunftszeit des Ultraschallsignals wird bei der Durchführung der Messung mit einer über die Tiefe gleich bleibenden Triggerschwelle automatisch ermittelt. Dabei wird als Triggerschwelle ein prozentualer Anteil der maximalen Amplitude des gesendeten Ultraschallsignals verwendet.

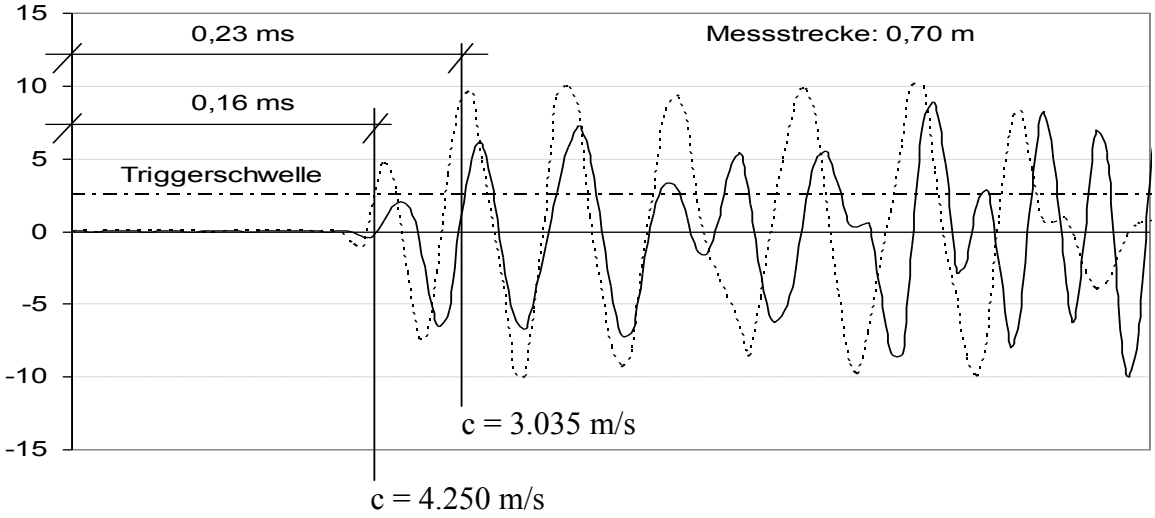


Bild 4: Ultraschallwellen verschiedener Intensität im Zeitbereich

Die ankommende Welle kann schwankende Intensitäten aufweisen. Bei einer geringen Anfangsintensität wird so auf einen späteren Zeitpunkt getriggert. Es ergibt sich ein höherer Wert für die Ankunftszeit und somit eine geringere Wellengeschwindigkeit, obwohl die Welle schon viel früher am Empfänger angekommen ist (siehe Bild 4). Dies ist bei der Triggereinstellung vor Messdurchführung sowie bei der Auswertung der Ultraschallprüfung entsprechend zu berücksichtigen.

Neben einer Zunahme in der Ankunftszeit zeigt sich bei einer Anomalie im Pfahl auch eine Energieabnahme. Der Energiegehalt des empfangenen Ultraschallsignals wird aus der Integration des Signals über die Zeit errechnet.

Bei der Durchführung der Messung muss daher besonders auf die Einstellung des Vergrößerungsfaktors geachtet werden, da dieser nach Beendigung der Messung nicht mehr geändert werden kann. Der Vergrößerungsfaktor muss bei jeder Messung so an das Ultraschallsignal angepasst werden, dass das Signal vollständig integriert werden kann. Zur Erklärung ist in den Bildern 5a und 5b der Verlauf eines Signals mit angepasstem und mit zu hoch eingestelltem Vergrößerungsfaktor dargestellt. Die markierte Fläche stellt die Integrationsfläche zur Ermittlung des Energiegehalts dar. In Bild 5b ist das Signal aufgrund einer zu hoch gewählten Verstärkung gekappt. Die Integrationsfläche ist nicht vollständig.

Bei der Auswertung der Messungen ist es weiterhin von Bedeutung, die Integrationszeit für die Bestimmung des Energiegehaltes so zu wählen, dass Anomalien nicht „übersehen“ werden. In den Bildern 6a und 6b ist zur Veranschaulichung ein Beispiel dargestellt, in welchem links das Messergebnis mit einer korrekten und auf der rechten Seite mit einer inkorrekten Integrationszeit dargestellt ist.

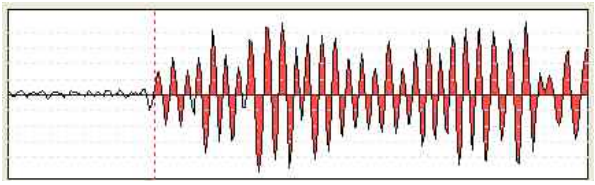


Bild 5a: angepasster Vergrößerungsfaktor

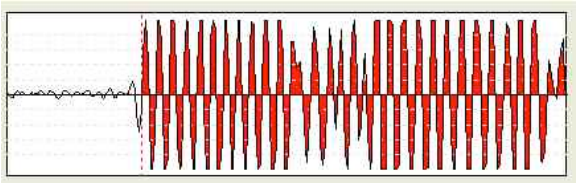


Bild 5b: zu hoher Vergrößerungsfaktor

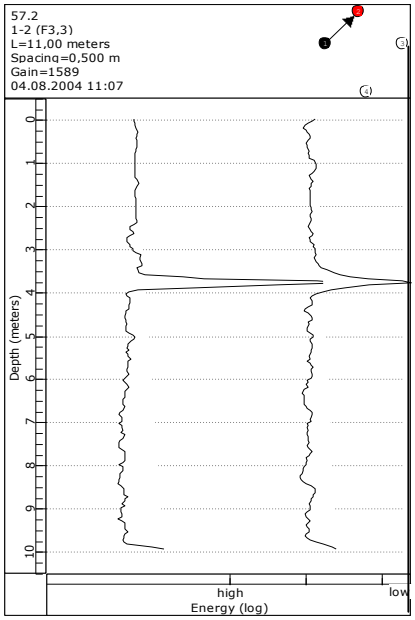


Bild 6a: Integrationszeit korrekt

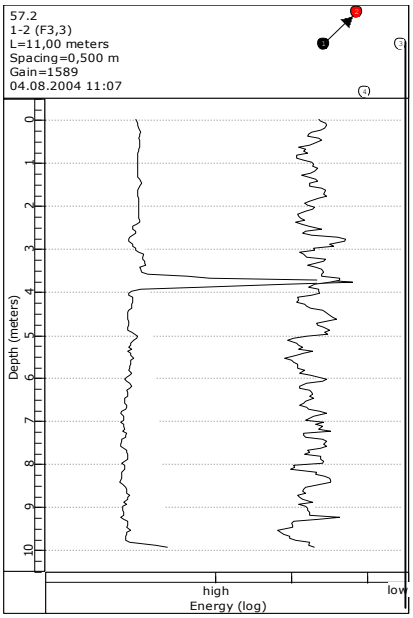


Bild 6b: Integrationszeit inkorrekt

In Bild 7 ist die erforderliche Messausrüstung abgebildet. Im linken Bildbereich erkennt man den Messcomputer zur Aufzeichnung der Messdaten. Die Kabelrollen mit den Sensoren (schwarze Stäbe vorn rechts) und die Messeinrichtungen zur Bestimmung der Tiefenlage der Sensoren (Rollen) sind im rechten Teil des Bildes dargestellt

Bild 7: Ultraschallmessgerät (Cross-Hole Analyzer CHA) und Sensoren

3.2 Auswertung und Interpretation

Die Durchführung, Auswertung und Interpretation von Ultraschallprüfungen ist in Deutschland nicht geregelt. Zur Auswertung der Messungen ist man also gehalten, internationale Richtlinien anzuwenden. In der französischen Norm NF P 94-160-1 wird eine Vergrößerung der von > 20% im Vergleich zu einer fehlerfreien Betonzone als Anomalie definiert, deren genaue Eigenschaft durch weitergehende Untersuchungen festzustellen ist. Der amerikanische Standard ASTM D6760-02 'Standard Test Method for Integrity Testing of Concrete Deep Foundations by Ultrasonic Crosshole Testing' enthält keine Angaben zur Beurteilung der Pfahlqualität.

Da in Deutschland keine Normen zur Interpretation von Ultraschallsignalen existieren, erarbeiten die Mitglieder des Unterausschusses ’Stoßprüfungen’ des AK 2.1 der DGGT derzeit für Deutschland einheitliche Richtlinien zur Durchführung und Auswertung von Ultraschallprüfungen.

In Anlehnung an die ’Empfehlungen für statische und dynamische Pfahlprüfungen’ für Integritätsprüfungen nach der Hammerschlagmethode können auch für die Ultraschallprüfung Ergebnisklassen definiert werden.

1. Der Pfahl ist in Ordnung:	schnelle Laufzeitvergrößerung ≤ 1,2-fach
2. Geringfügige Qualitätsminderung:	schnelle Laufzeitvergrößerung 1,2 - 2-fach
3. Starke Qualitätsminderung:	schnelle Laufzeitvergrößerung ≥ 2-fach

Eine solche Klassifikation hat sich vor allem bei der Prüfung einer großen Zahl von Pfählen als sinnvoll erwiesen.

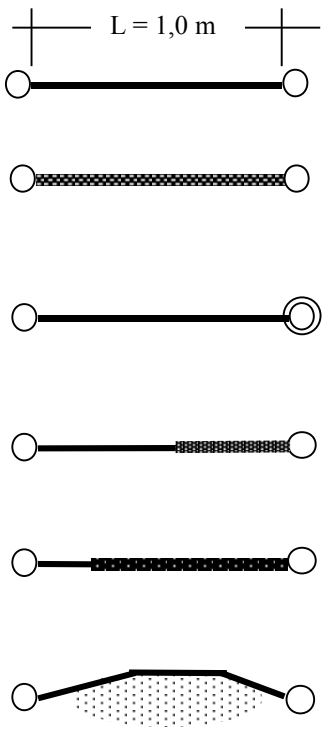
Bei der Einteilung in die Bewertungsklassen muss berücksichtigt werden, wie groß die Abweichungen der Wellengeschwindigkeit und über welchen Bereich im Querschnitt und in Längsrichtung des Pfahls sie festzustellen sind.

Zur Unterstützung der Bewertung können integrale Qualitätsindikatoren bestimmt werden.

Zur Veranschaulichung des Problems sind im Bild 8 verschiedene Möglichkeiten gezeigt, warum eine Wellengeschwindigkeit in einer bestimmten Messstrecke von einem Normalwert abweichen kann.

Theoretisch können Informationen über die Form und die Eigenschaften einer Fehlstelle aus dem Vergleich der empfangenen Signale und deren Energiegehalt gewonnen werden. Der Wellendurchgang durch eine Messtrecke mit gleichmäßig minderwertigem Beton sollte vom Wellendurchgang durch minderwertigen Beton auf einer Teilstrecke oder beim Umlaufen eines Kiesnestes unterschieden werden können. Die Komplexität der Phänomene der Ausbreitung mechanischer Wellen in

einem festen Körper und insbesondere in einem vergleichsweise inhomogenen Material wie Beton erschwert jedoch die eindeutige Interpretation des empfangenen Signals.



Ankunftszeit	Wellengeschwindigkeit
ΔT = 1.000/4.000 **0,250 ms**	**4.000 m/s**
Beton mit geringer Ausbreitungsgeschwindigkeit ΔT = 1.000/3.500 **= 0,2857 ms**	**3.500 m/s**
Lufthohlraum um Messröhre – Größe 1 cm ΔT = 990/4.000+10/340 **=0,2769 ms**	**3.611 m/s**
400 mm schwacher und 600 mm gesunder Beton ΔT = 400/3.000 + 600/4.000 **=0,2833 ms**	**3.529 m/s**
800 mm mittelschwacher and 200 mm gesunder Beton ΔT = 800/3.500 + 200/4.000 **=0,2786 ms**	**3.590 m/s**
Ausbreitung der Welle um die Fehlstelle ΔT = 1.100/4.000 **=0,275 ms**	**3.636 m/s**

Bild 8: Ultraschallwellenausbreitung, Ausbreitungs-/Ankunftszeit und Wellengeschwindigkeit

Bisher wurde noch kein Modell zur genauen Charakterisierung der festgestellten Fehlstellen durch die Form des Ultraschallsignals entwickelt. Nur der Energiegehalt des aufgezeichneten Signals kann als Indikator herangezogen werden. Eine geringe übertragene Energie ist in der Regel mit einer geringen Wellengeschwindigkeit verbunden.

Eine Fehlstelle im Pfahlbeton kann dann sicher erkannt werden, wenn sowohl die Energie als auch die Wellengeschwindigkeit im betroffenen Querschnitt abnehmen und die Informationen aus allen Messstrecken bei der Bewertung berücksichtigt werden.

Als Zusammenfassung kann gesagt werden, dass durch Ultraschallprüfung Abweichungen in der Qualität des Betons zwischen zwei Messröhren in einer bestimmen Tiefe / Querschnitt festgestellt werden können aber ohne eine genaue Charakterisierung der Fehlstelle hinsichtlich Ausdehnung oder Grad der Qualitätsminderung. Für die Messwertauswertung der Ultraschallprüfung werden folgende Schritte vorgeschlagen.

1. Bestimmung der lokalen Laufzeiten (Wellengeschwindigkeiten) und Bestimmung der durchschnittlichen Wellengeschwindigkeit über die Tiefe ohne Berücksichtigung von Bereichen mit Abweichungen > 20%.

2. Wenn in einem Querschnitt eine Abweichung in der Wellengeschwindigkeit von mehr als 20% auftritt: Prüfen der Energie und der Signalformen. Wenn eine Anomalie bestätigt ist, werden alle Durchschnittswerte und maximalen Laufzeiten in diesem Querschnitt bestimmt.

3. Berechnung der gewichteten Wellengeschwindigkeit mit Hilfe der folgenden Formel:

$$\eta = \frac{\sum \chi_{ij} * a_{ij}}{\sum a_{ij}}$$

wobei

a_{ij} :Abstand zwischen Messröhren i und j

ca_{ij} : mittlere Wellengeschwindigkeit für den Weg i-j

c_{ij}: Wellengeschwindigkeit für Weg i-j in Querschnitt mit Anomalie $c_{ij} < 0{,}8\ ca_{ij}$

$\chi_{ij} := c_{ij} / ca_{ij}$:Verhältnis von vorhandener Wellengeschwindigkeit in Fehlstelle zu mittlerer Wellengeschwindigkeit für Weg i-j.

4. Berechnung einer Resttragfähigkeit unter Berücksichtigung der tatsächlichen Betonfestigkeit aus Rückstellproben oder Druckprüfungen an Kernen.

5. Berechnung der reduzierten Beanspruchbarkeit in der Tiefe der Anomalie und Bestimmung der inneren Resttragfähigkeit. Kann die Sicherheit nicht nachgewiesen werden, sind Ertüchtigungsmaßnahmen vorzusehen.

Die in 3. vorgeschlagene Bestimmung eines Qualitätsindikators ist keine Ableitung im strengen wissenschaftlichen Sinn sondern ist als ingenieurmäßig pragmatisches Vorgehen anzusehen.

Bei der Anwendung sollte die Komplexität des tatsächlichen Geschehens und der Messtechnik nicht aus den Augen verloren werden.

Bei dieser Bewertung ist weiterhin zu bedenken, dass jeweils lediglich der Messquerschnitt bewertet wurde. Besonders bei kleiner Schrittweite kann die Ausdehnung über die Pfahlachse auch ein wesentlicher Aspekt der Pfahlbewertung sein.

Wird der Qualitätsindikator verwendet, um eine Abminderung der Druckfestigkeit zu bestimmen, sollte sich auf die tatsächliche Druckfestigkeit, bestimmt an Rückstellproben oder Kernen, bezogen werden. Bei konsequenter Anwendung eines Sicherheitskonzeptes mit partiellen Faktoren für die Beanspruchbarkeit, kann das Ergebnis einer solchen Ultraschallprüfung in einen Nachweis einfließen.

Eine Abschätzung der Ausdehnung und Auswirkung einer Fehlstelle kann dadurch erfolgen, dass angenommen wird, dass für den defekten Bereich eine untere Wellengeschwindigkeit z.B. Luft angesetzt wird. Dann kann aus der Größe der Abweichung in der Wellengeschwindigkeit die Größe des defekten Bereichs wie folgt direkt bestimmt werden.

- für Messtrecke a-b mit der Länge L_{ab} und Laufzeit T_{ab}
- Bestimmung der Ausdehnung des intakten Betons L_1 mit der durch die Ultraschallmessung bestimmten Wellengeschwindigkeit c_1 für intakten Beton,
- Bestimmung der Ausdehnung des defekten Bereichs L_2 mit c_2

Geometrie : $L_1 + L_2 = L_{ab}$

Laufzeit : $L_1 / c_1 + L_2 / c_2 = T_{ab}$

Die Auflösung dieses linearen Gleichungssystems ergibt die Ausdehnung L_1 des intakten Bereichs sowie die Ausdehnung des defekten Bereichs L_2. Je nachdem welche Wellengeschwindigkeit für den defekten Bereich gewählt wird, verändert sich auch die Größe des defekten Bereichs.

Durch eine weitergehende Auswertung können aus den Messwerten auch Schnittbilder (als Längs- und Querschnitte) oder räumliche Darstellungen erzeugt und so die Größe der Fehlstellen veranschaulicht werden. Bild 9 zeigt eine solche Tomographiedarstellung eines Pfahles.

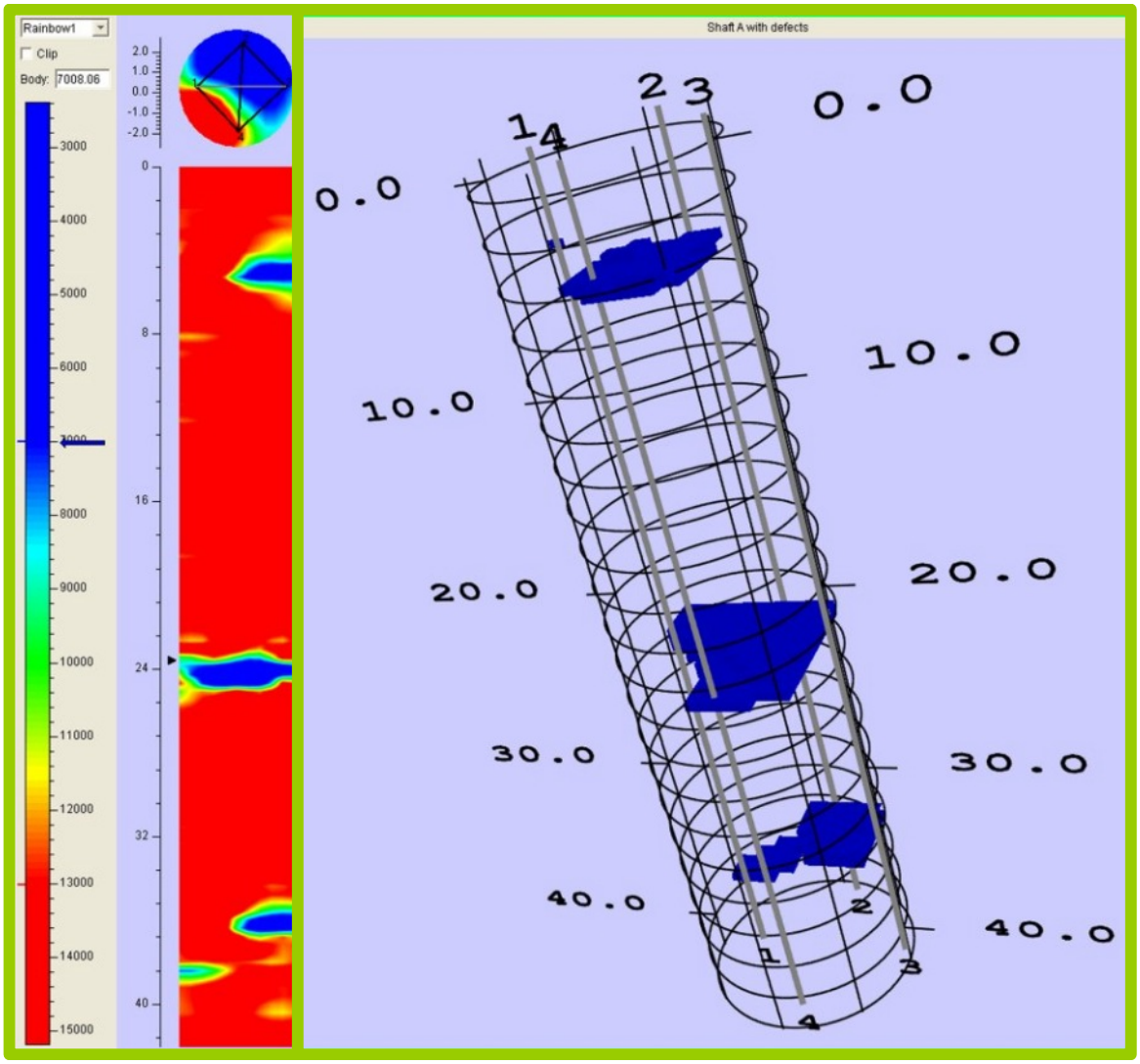


Bild 9: Tomographiedarstellung eines Pfahles

Für die Ermittlung solcher Schnittbilder wird ein Verfahren angewendet, wie es aus der medizinischen „Computer"- Tomographie bekannt ist. Der Querschnitt wird in eine Anzahl Felder mit jeweils zu bestimmenden Wellengeschwindigkeiten aufgeteilt. In Bild 10 ist als Beispiel der in Felder eingeteilte Querschnitt eines Pfahles mit 5 Messröhren dargestellt.

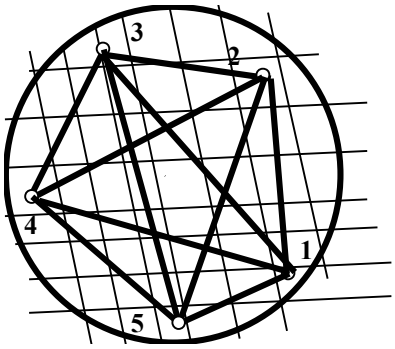


Bild 10: Modell für die Berechnung der möglichen Ausdehnung des defekten Bereichs aus „Computer"-Tomographie

Im Beispiel sind 69 Felder gewählt. Zur Bestimmung der 69 unbekannten Wellengeschwindigkeiten gibt es für die 10 Messstrecken 10 Gleichungen. Es kann sich also nur dann eine eindeutige Lösung ergeben, wenn zusätzliche Annahmen getroffen werden.

Eine Grundlösung kann durch die zweite Gaußsche Transformation erzielt werden. Mit den bekannten Wellengeschwindigkeiten ist dann wieder ein Qualitätsindikator zu bestimmen, um den Pfahl vom ingenieurmäßigen Standpunkt zu bewerten.

4 VERGLEICH DER VERFAHREN

4.1 Allgemeines

- Für die Hammerschlagprüfung muss die Pfahlkopfoberfläche frei zugänglich und eben (evtl. anschleifen) sein. Der Pfahlbeton muss mindestens 7 Tage alt sein. Bei der Ultraschallprüfung müssen Messrohe für die Sensoren mit der Bewehrung einbetoniert werden.
- Für die Ultraschallprüfung müssen die zu testenden Pfähle durch den Einbau der Messrohre schon vor dem Betonieren festgelegt werden, für die Hammerschlagprüfung können beliebige Pfähle nach Fertigstellung ausgewählt werden.
- Bei der Hammerschlagprüfung werden Aussagen über die Pfahleigenschaften in der Tiefe aus Messungen am Pfahlkopf gemacht. Zur Interpretation der Messungen wird eine mechanische Modellbildung der Wellenausbreitung benötigt. Deswegen gilt das Verfahren als indirekt und der Auftraggeber, der in der Regel keine umfassende Kenntnis der Wellenmechanik besitzt, muss dem Tester vertrauen. Bei der Ultraschallprüfung werden Sonden in den Messrohren herabgeführt. Da die Messrohre über die ganze Pfahllänge verlaufen, kann ein Beobachter direkt nachvollziehen, dass Messergebnisse einer bestimmten Tiefe zugeordnet werden. Dabei wird jedoch gern übersehen, dass die Bewertung der Messergebnisse im Hinblick auf die Pfahleigenschaften einer sorgfältigen Signalauswertung und ingenieurmäßigen Interpretation bedarf.
- Bei der Hammerschlagprüfung wird in den Pfahl eine Stoßwelle eingeleitet. Bei der Ultraschallprüfung durchläuft den Pfahl eine Ultraschallwelle.
- Die Messgröße der Hammerschlagprüfung ist die Schwingbeschleunigung des Pfahlkopfes. Bei der Ultraschallprüfung werden die Laufzeit und der Intensitätsverlauf des ankommenden Signals gemessen.
- Durch Integration der Messgröße erhält man im Fall der Hammerschlagprüfung die Auswertegröße, die Pfahlkopfgeschwindigkeit. Bei

der Ultraschallprüfung wird aus der Laufzeit der Welle die Wellengeschwindigkeit berechnet. Dies ist eine Auswertegröße. Des Weiteren wird durch Integration über die Zeit des Intensitätsverlaufes der Energiegehalt der ankommenden Welle berechnet. Dies ist die zweite Auswertegröße der Ultraschallprüfung.

- Bei beiden Prüfverfahren kann die sich ergebende Wellengeschwindigkeit als Qualitätsmerkmal angesehen werden. Ein Vergleich der bei Hammerschlag- und Ultraschallprüfung ermittelten Wellengeschwindigkeiten erwies sich als nicht einfach. Es wurde weitgehend festgestellt, dass die Ultraschallprüfung höhere Wellengeschwindigkeiten aufzeigte als die Hammerschlagprüfung. Bei der Hammerschlagprüfung ergibt sich in Abhängigkeit der Pfahllänge eine über die Tiefe gemittelte Wellengeschwindigkeit. Zwischen eingeleiteter Druckwelle und reflektierter Zugwelle wird nicht unterschieden. Bei der Ultraschallprüfung ist die Wellenausbreitung durch unterschiedliche Medien (Wasser im Messrohr, Messrohrmaterial, Beton) beeinflusst. Beim Vergleich der Wellengeschwindigkeit von Ultraschall- und Hammerschlagprüfung muss bei der Auswertung der Ultraschallprüfung zum Abgreifen der Ankunftszeit der erste Wellenausschlag der ankommenden Welle zugrunde gelegt werden. Ein voreingestellter und über die Tiefe gleich bleibender Schwellwert zur Ermittlung der Ankunftszeit, wie es bei der Auswertung von Ultraschallprüfungen üblich ist, kann für den Vergleichsfall nicht verwendet werden. Bei der Ultraschallprüfung kann der Messrohrabstand nur am Pfahlkopf erfasst werden. Durch abdriftende Messrohre von der Vertikalen wird eine über die gesamte Tiefe des Pfahls gemittelte Wellengeschwindigkeit verfälscht. Beim Ablesen der Wellengeschwindigkeit im oberen Pfahlbereich und entsprechende Mittlung über die Messstrecken ergibt sich eine Wellengeschwindigkeit, die nahezu mit der Wellengeschwindigkeit der Hammerschlagprüfung übereinstimmt. Bei kürzeren Pfählen spielt der Einfluss von abdriftenden Messrohren keine so große Rolle. Hier wurden mit der über die Länge gemittelten Wellengeschwindigkeit bereits gute Übereinstimmungen gefunden.
- Die Ultraschallprüfung zeigt eine Auflösung bezogen auf die Pfahllängsachse, die bis in die Größe der Sensorlänge (5 cm) reichen kann. Bei der Hammerschlagprüfung ist die Fehlstellenauflösung maßgeblich von der Grenzwellenlänge der erzeugten Stoßwelle abhängig (Plassmann, 2002).
- Die Ultraschallprüfung erfasst den Beton im Innern des Bewehrungskorbes, während die Hammerschlagprüfung sich auf den Gesamtquerschnitt bezieht. Fehlstellen im Bereich der Betondeckung können daher bei der Ultraschallprüfung im Allgemeinen nicht erkannt werden.

- Für die Durchführung einer Hammerschlagprüfung wird für einen Pfahl in der Regel von 5 bis 10 Minuten ausgegangen. Der Zeitaufwand für eine Ultraschallprüfung ist abhängig von der Anzahl der eingebauten Messröhren und der Pfahllänge. Bei vier Messrohren kann mit der Ultraschallprüfung etwas mehr als 1 Pfahl pro Stunde geprüft werden, mit der Hammerschlagprüfung können in dieser Zeit bis zu 10 Pfähle geprüft werden. Dies ist jedoch abhängig von der Art der Pfahlkopfvorbereitung und der Signalqualität.

Parameter	**Hammerschlagprüfung**	**Ultraschallprüfung**
Pfahlvorbereitung	evtl. anschleifen der Oberfläche	Führungsrohre mit Bewehrung einbetonieren
Stichprobe	Pfahl frei wählbar	vor Betonieren festgelegt
Durchführung	am Pfahlkopf	über gesamte Pfahllänge
Erzeugte Wellenart	Stosswelle	Ultraschallwelle
Messgröße	Pfahlkopfbeschleunigung	• Laufzeit • Intensitätsverlauf des eingehenden Signals
Auswertegröße	Pfahlkopfgeschwindigkeit	• Laufzeit (→Wellengeschwindigkeit) • Energie
Auflösung bezogen auf Pfahlachse	je nach Hammer, >50 cm	Sensorlänge (ca. 5 cm)
Prüfquerschnitt	Gesamtquerschnitt	Beton im Innern des Bewehrungskorbes
Durchführung (je Pfahl)	5 – 10 Minuten (im Normalfall)	ca.1 h, bei 4 Messrohren
Auswertung (je Pfahl)	mindestens 10 Minuten	ca. 1 h, bei 4 Messrohren

Tabelle 1: Vergleich von Hammerschlag- und Ultraschallprüfung

- Die Auswertung der Messergebnisse einer Hammerschlagprüfung erfordert wenige Minuten. Die Auswertung einer Ultraschallprüfung ist auf Grund der verschiedenen Messrichtungen (Ring- und Kreuzmessungen) umfangreicher.

Für einen 25 Meter langen Pfahl mit 4 Messröhren kann die Auswertung bis zu 1 Stunde dauern. Werden Fehlstellen gefunden, ist bei beiden Verfahren ein sehr viel größerer Zeitaufwand erforderlich.

In Tabelle 1 sind die wesentlichen Unterschiede der beiden Verfahren der Integritätsprüfung gegenübergestellt.

4.2 Fallbeispiele

An zwei Beispielen werden die Unterschiede der beiden verschiedenen Pfahlintegritätsprüfungsverfahren weiter erläutert.

Beispiel 1:

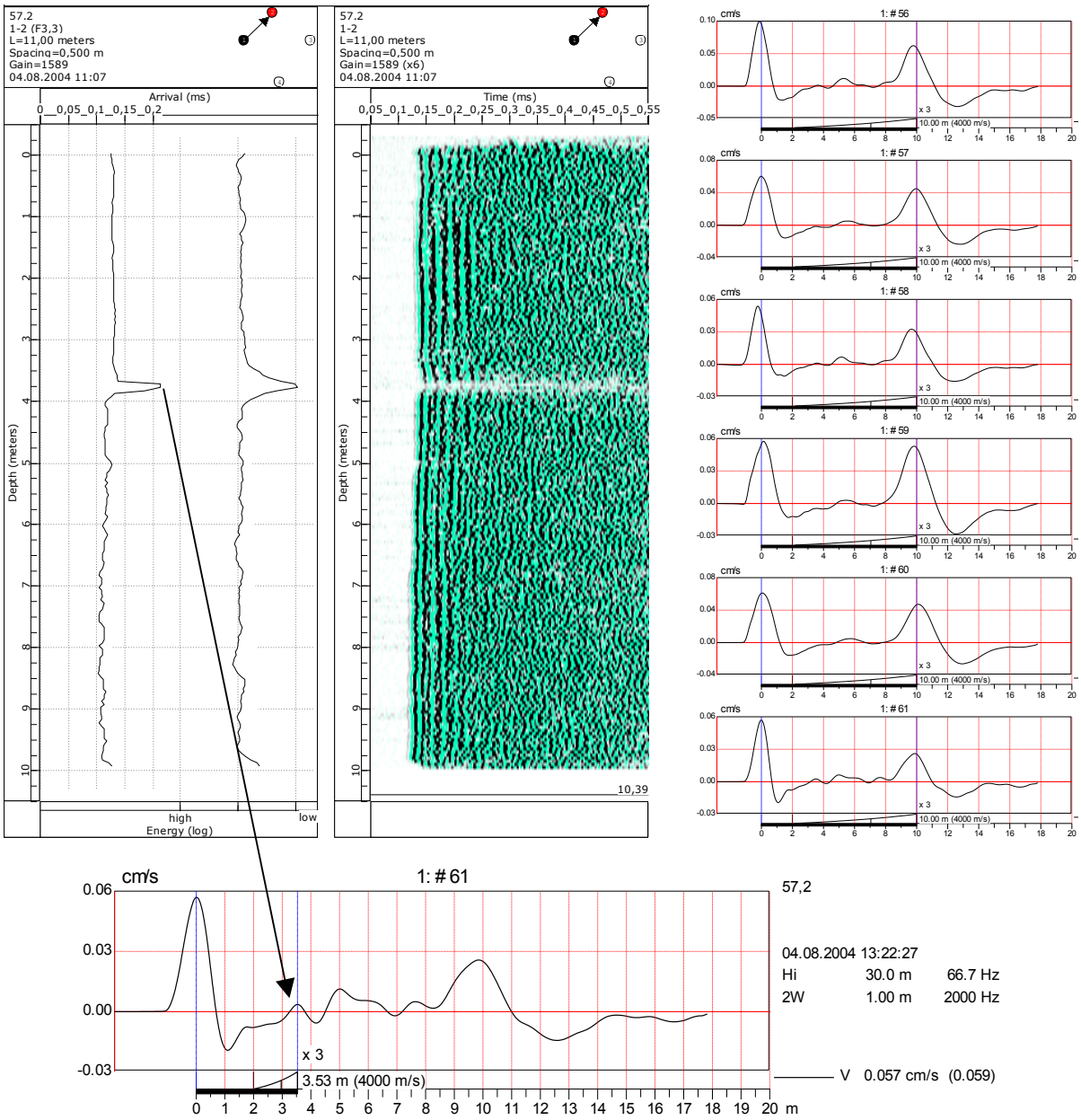


Bild 11: Ultraschallsignal mit Anomalie und zugehöriges Signal der Hammerschlagprüfung

Bei der Ultraschallprüfung zeigte sich in einer Tiefenlage von ca. 3,7 m eine deutliche Anomalie. Zusätzlich wurde an dem Pfahl auch eine Hammerschlagprüfung durchgeführt. Während bei der Ultraschallprüfung (Bild 11 links) eine Fehlstelle in der Messstrecke deutlich zu erkennen ist, zeichnet sich eine Impedanzminderung in der Hammerschlagprüfung (Bild 11 rechts) nur schwach ab. Wird im Auswerteprogramm der Hammerschlagprüfung der Pfahl lediglich bis zur Tiefenlage der Fehlstelle betrachtet, wird die Impedanzminderung deutlicher (Bild 11 unten).

Aufgrund des großen Durchmessers des Pfahles von 1,20 m und der mehr im Inneren des Pfahles angeordnete Messröhren (siehe Bild 12) wird bei der Ultraschall-Prüfung hauptsächlich der innere Pfahlbereich geprüft. So können Fehlstellen im Inneren des Pfahls durch die Ultraschallprüfung erkannt werden.

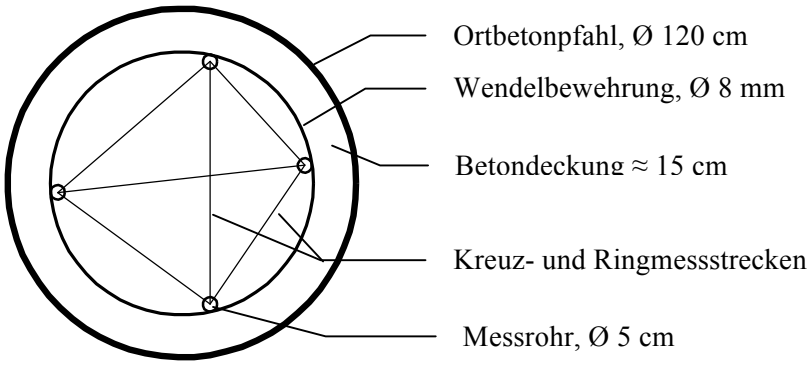


Bild 12: Anordnung der Messrohre in Beispiel 1

Bei der Hammerschlagprüfung fällt die durch die Ultraschallprüfung ermittelte Fehlstelle nicht so stark ins Gewicht, da das Signal sich über den gesamten Querschnitt ausbreiten kann.

Dieses Beispiel zeigt den Einfluss der Auflösung der Messsignale bezogen auf die Pfahlachse.

Beispiel 2

Eine Ultraschallprüfung ergab in allen drei Messrichtungen eine Veränderung der Betoneigenschaften zum Pfahlfuß hin (Bild 13). Die Messungen ergaben eine durchschnittliche Wellengeschwindigkeit von 3.600 m/s.

Eine Hammerschlagprüfung, der eine erhöhte Wellengeschwindigkeit von 4.200 m/s zugrunde gelegt wurde, zeigt durch die sehr breite Pfahlfußreflexion (geringe Anstiegszeit) ebenfalls eine gewisse Veränderung der Betoneigenschaften am Pfahlfuß, allerdings wäre bei Verwendung einer Wellengeschwindigkeit von 3.600 m/s eine Impedanzminderung oberhalb des Pfahlfußes deutlich geworden.

Bei der Auswertung und Interpretation der Hammerschlagprüfung ist auch zu berücksichtigen, dass der Pfahl mit ca. 23 m Länge und einem geringen Querschnitt von 60 cm ein ungünstiges Verhältnis L/D = 38 aufweist.

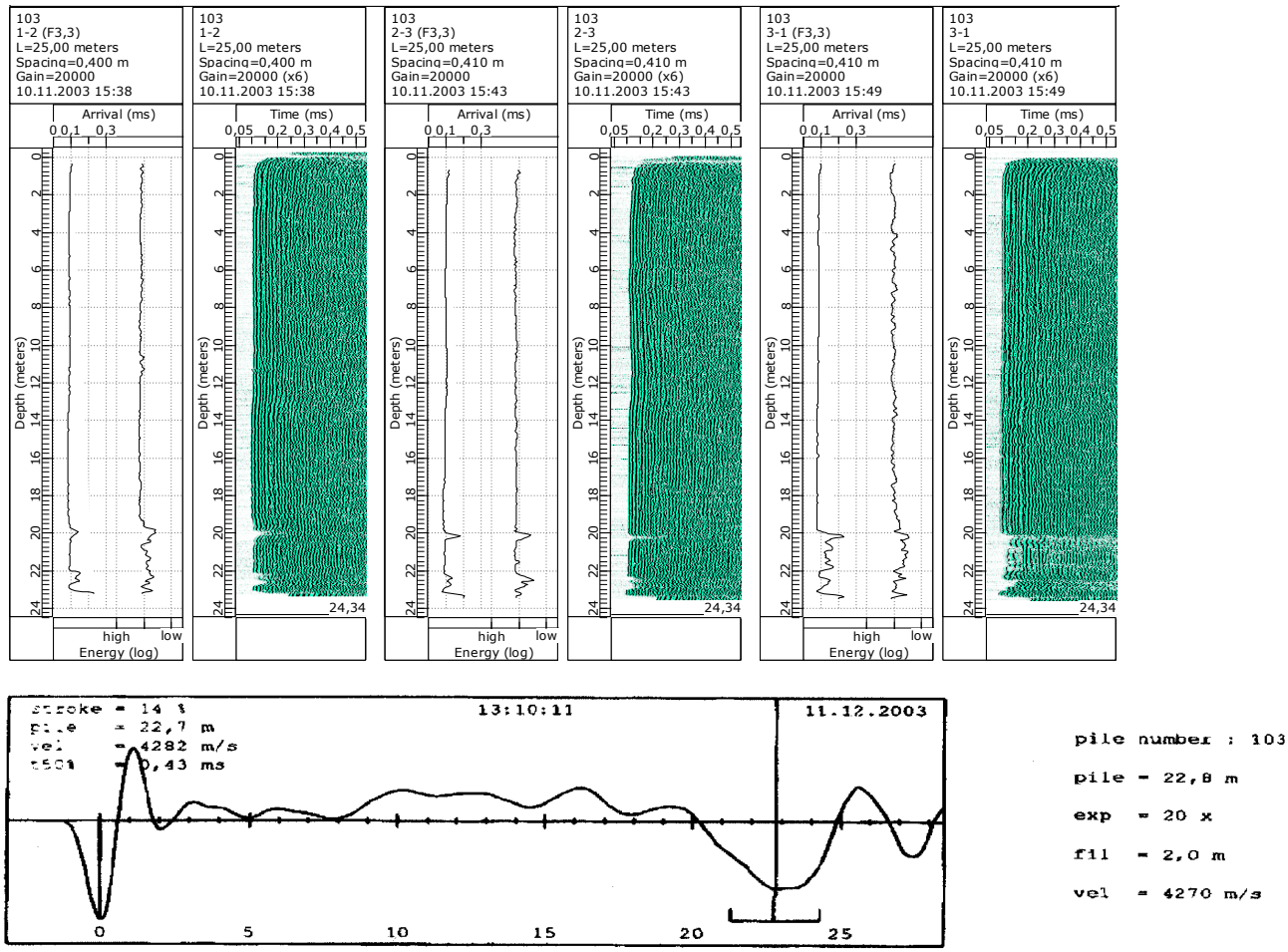


Bild 13: Ultraschallsignal mit Schaden im Pfahlfussbereich und zugehöriges Signal der Hammerschlagprüfung

5 ANWENDUNGSEMPFEHLUNGEN

Die Entscheidung, welches Prüfverfahren eingesetzt wird, ist von verschiedenen Faktoren abhängig.

Bei langen Pfählen mit geringem Durchmesser (etwa L/D > 20) und / oder hoher Mantelreibung, kann die Energie der Stoßwelle bei der Hammerschlagprüfung zu gering und das Signal der reflektierten Welle sehr schwach sein. Aussagen über die Integrität im unteren Pfahlbereich sind in solchen Fällen nur möglich, wenn die Fußreflexion eindeutig identifiziert werden kann. Da nicht von vornherein gesagt werden kann, ob die Hammerschlagprüfung zu einer eindeutigen Beurteilung führt, sollte in solchen Fällen die Ultraschallprüfung gewählt werden. Extreme Schichtwechsel, sehr steife Böden oder Böden mit Verwitterungsbereichen können die Ergebnisse der Hammerschlagprüfung beeinflussen, so dass in einigen Fällen

keine exakten Aussagen zur Pfahlbeschaffenheit möglich sind, ohne weitergehende Informationen zu berücksichtigen (Bodenprofil, Kernbohrung etc.).

Bei sehr kleinen Pfahldurchmessern ist der Einbau von Messröhren für die Sensoren und dadurch die Ultraschallprüfung nicht sinnvoll, da der zu prüfende Bereich im Vergleich zum Gesamtquerschnitt relativ klein ist. Bei sehr großen Pfahldurchmessern (> 2 m) wird der Abstand der Kreuzmessungen (Diagonalen) sehr groß, dass Ultraschallsignal wird dadurch stark abgeschwächt, dass der Empfänger das Signal nicht mehr aufzeichnen kann.

6 AUSBLICK

Die Ausführungen in diesem Beitrag zeigen, dass die beiden Verfahren der Integritätsprüfung von Ortbetonpfählen einander nicht ersetzen können. Entsprechend der Prüfvoraussetzungen und weiteren örtlichen Gegebenheiten kann sowohl das eine oder das andere Verfahren geeignet sein, Pfahlgründungen zu prüfen. In vielen Fällen (sehr lange Pfähle, große Dämpfung, Verdacht auf Risse) ist eine Kombination beider Prüfverfahren sinnvoll.

Da die Durchführung, Auswertung und Interpretation Ultraschallprüfungen in Deutschland derzeit in keiner Norm geregelt ist, sollten für eine einheitliche Bewertung Richtlinien oder Empfehlungen erarbeitet werden.

Literatur

Deutsche Gesellschaft für Geotechnik (DGGT),
Arbeitskreis 2.1, Empfehlungen für statische und dynamische Pfahlprüfungen, Eigenverlag: Institut für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig, 1998

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

Plaßmann, B.
Zur Optimierung der Messtechnik und der Auswertemethodik bei Pfahlintegritätsprüfungen, Dissertation am Institut für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig, 2002

Stahlmann, J.; Kirsch, F.; Schallert, M.; Klingmüller, O.; Elmer, K.-H.,
Pfahltests - modern dynamisch und/oder konservativ statisch, 4. Kolloquium 'Bauen in Boden und Fels', Technische Akademie Esslingen, 20.-21.01.2004

ASTM International, D6760-02 'Standard Test Method for Integrity Testing of Concrete Deep Foundations by Ultrasonic Crosshole Testing'

norme française, NF P 94-160, partie 1-4, ‘Auscultation d’un élément de fondation’, afnor 1993

Autoren

Dr.-Ing. O. Klingmüller, Dipl.-Ing. B. Gottlöber Dipl.-Ing. C. Mayer GSP Gesellschaft für Schwingungsuntersuchungen und dynamische Prüfmethoden mbH, Käfertaler Str. 164, 68167 Mannheim Tel.: +49 (0)621 33 13 61 Fax: +49 (0)621 33 42 52 e-mail: ok@gsp-mannheim.de web: www.gsp-mannheim.de	Dipl.-Ing. M. Schallert IGB·TUBS Institut für Grundbau und Bodenmechanik, TU Braunschweig Gaußstraße 2, 38106 Braunschweig Tel.: +49 (0)531 391-2325 Fax: +49 (0)531 391-4574 e-mail: m.schallert@tu-bs.de web: www.IGB-TUBS.de