

Empfehlungen zur Auswertung von Ultraschall-Messsignalen bei der Integritätsprüfung von Pfählen

- 1. Grundlagen der Ultraschall-Integritätsprüfung**
- 2. Beispiel**
- 3. Empfehlungen**

Zusammenfassung

Ultraschall-Integritätsprüfung ist eine Methode zur Bestimmung der Homogenität des Materials von starren Körpern. Eine Standardanwendung dieser Messmethode ist das Testen von Ortbetonbohrpfählen. Abweichungen in der Homogenität des Materials werden durch Abweichungen der Ausbreitungsgeschwindigkeit von Ultraschallwellen festgestellt. Diese Abweichungen werden als Anomalien bezeichnet. Normen (z.B. USA-ASTM D6760-02 oder France-NF P94-160-1) legen die technischen Voraussetzungen zur Durchführung dieser Tests sowie die Eigenschaften der Messgeräte fest. Es wird allerdings in keiner Norm eine Empfehlung zur Bewertung der Messergebnisse bezüglich der Gebrauchstauglichkeit der Pfähle und des Einflusses der festgestellten Anomalien gegeben. Dieses Problem wird erläutert und als Ergebnis wird zur Abschätzung der Gebrauchstauglichkeit von Pfählen ein Qualitätsindikator abgeleitet.

Mannheim, 30. Dezember 2002

Dr. Ing. O. Klingmüller

1. Grundlagen der Ultraschall-Integritätsprüfung

Bei der Ultraschall-Integritätsprüfung wird die Laufzeit sowie die Signalstärke einer Ultraschallwelle, welche von einem Sender zu einem Empfänger übertragen wird, gemessen. Die übertragende Ultraschallwelle läuft horizontal zwischen Sender und Empfänger. Sender und Empfänger befinden sich in separaten parallelverlaufenden Messröhren.

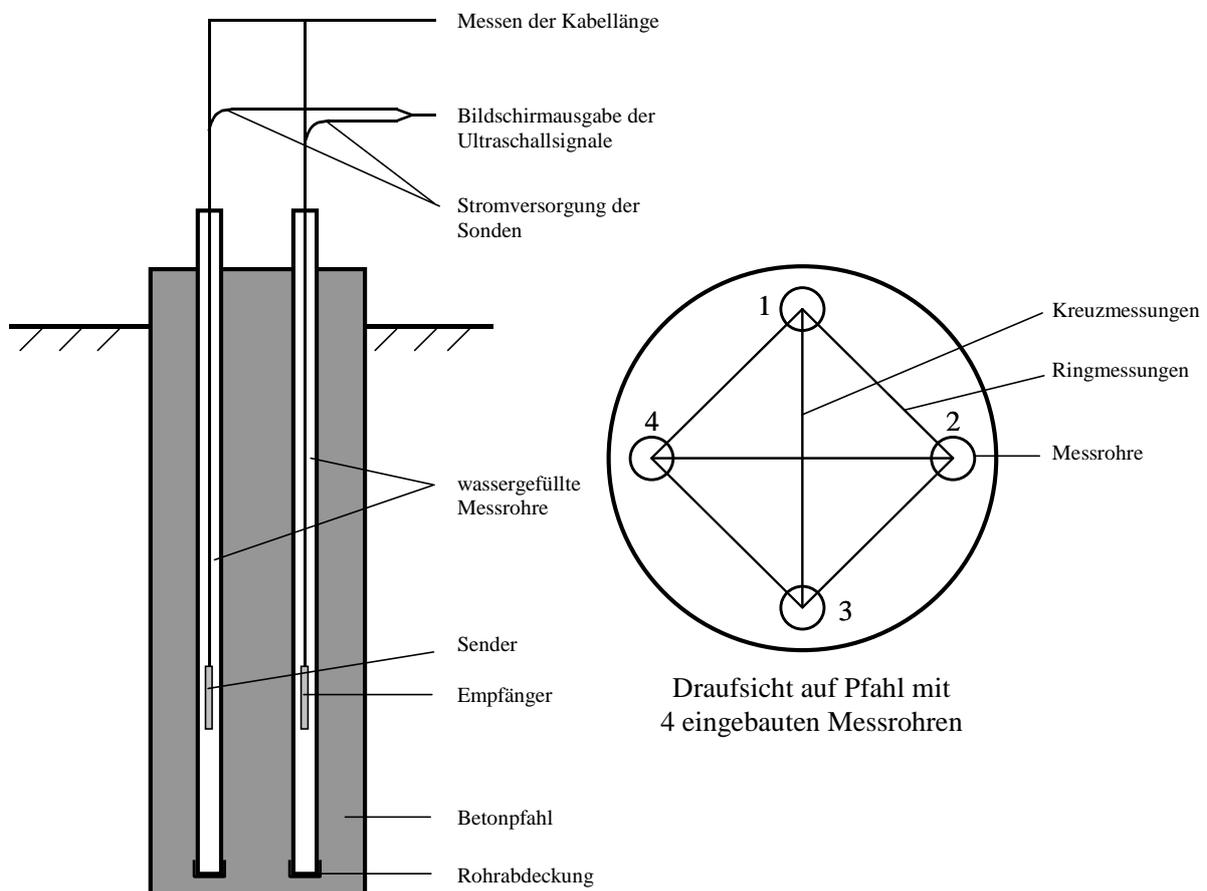


Bild 1: Ultraschall-Integritätsprüfung

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

Messröhrende herabgelassen. Ultraschallsignale des Senders laufen durch den Beton und werden vom Empfänger aufgezeichnet. In Bild 1 sind der Messaufbau und -ablauf dargestellt.

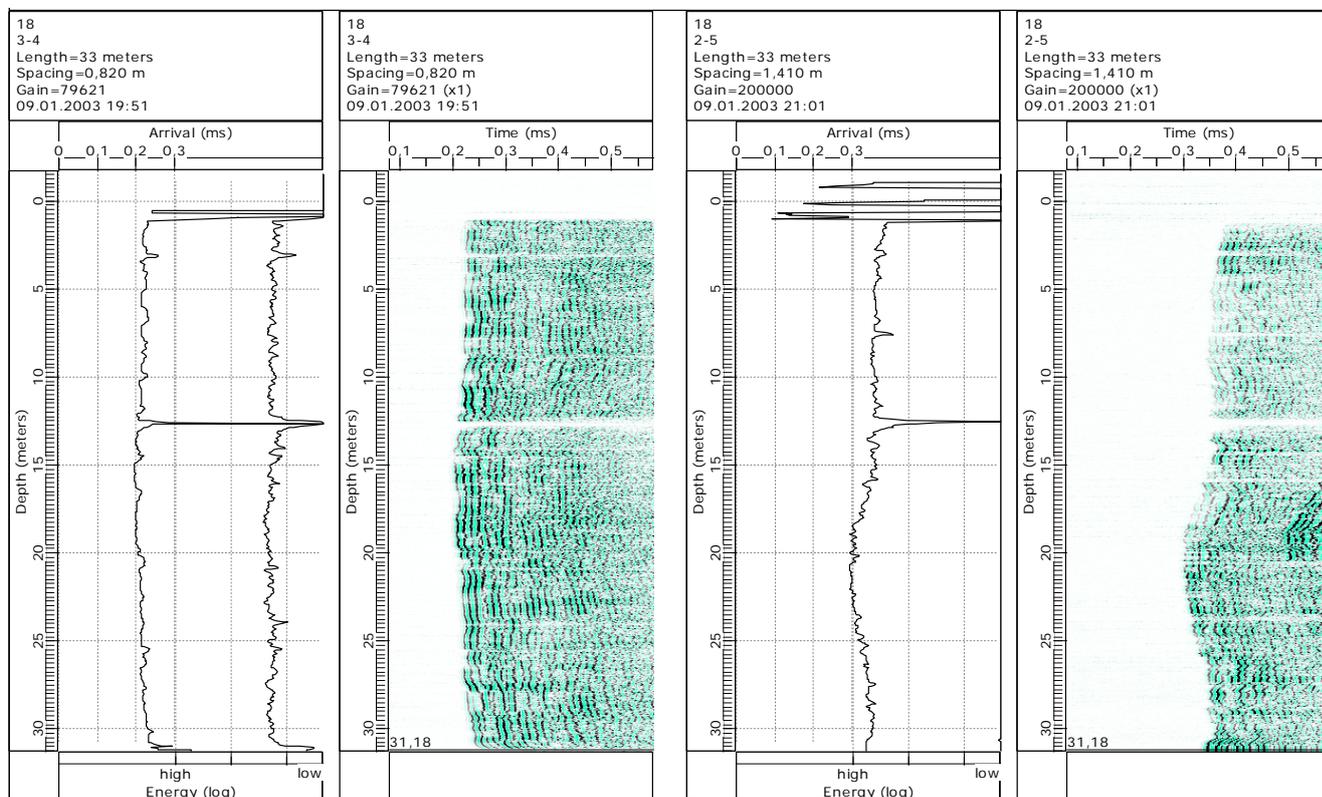


Bild 2 : Ergebnis einer Ultraschallintegritätsprüfung

Bild 2 zeigt das Ergebnis einer Ultraschallprüfung. 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.

In homogenem Beton ist die Wellengeschwindigkeit einer Ultraschallwelle konstant, im Allgemeinen liegt sie im Bereich von 3500 – 4000 m/s, je nach Betonqualität oder Alter kann die Wellengeschwindigkeit allerdings auch Werte zwischen 3000 – 4500 m/s annehmen.

Das vorrangige Ziel der Ultraschall-Integritätsprüfung ist nicht die Bestimmung des absoluten Betrages der Wellengeschwindigkeit der Ultraschallwelle, sondern viel mehr die Überprüfung der Gleichmäßigkeit der Wellengeschwindigkeit im gesamten Pfahl. In Erdschlüssen, Kiesnestern oder anderen die Homogenität des Betons beeinflussenden Verunreinigungen sinkt die Ausbreitungsgeschwindigkeit im Vergleich zu Bereichen mit gesundem Pfahlbeton.

Unterschiedliche Erklärungen der Messergebnisse sind möglich.

Aus Bild 2 wird ersichtlich, daß aus den gemessenen Ankunftszeit kein eindeutiger Rückschluss auf die Art der Fehlstelle möglich ist. Die längere Laufzeit der Ultraschallwelle zwischen den Messröhren kann durch Beton mit geringer Qualitätsminderung auf der ganzen Messstrecke oder durch Beton mit stärkerer Qualitätsminderung auf einem Teilstück der Messstrecke hervorgerufen werden. Bei Entmischung des Betons kann die Ultraschallwelle die Fehlstelle umlaufen, was ebenfalls eine spätere Ankunftszeit zur Folge hat.

Für eine genaue Bestimmung jeder einzelnen Fehlstelle müssen weitere Informationen vorhanden sein.

- Um das Vorhandensein von Lufträumen im Bereich der Messrohrstöße auszuschließen, müssen detaillierte Zeichnungen über die Lage der Verbindungsstücke vorhanden sein. Die Bildung von Lufträumen im Bereich eines intakten Messrohres ist sehr unwahrscheinlich, im Bereich der Messrohrstöße allerdings möglich.
- Für die Bestimmung von Fehlstellen sind auch Bodenuntersuchungen auszuwerten. Daraus ist zu ersehen, in welchen Schichten Grundwasserströmungen eventuell zu Auswaschungen des Zements führen können.

- Als weitergehende Untersuchung kann eine low-strain-Integritätsprüfung Informationen über die Ausdehnung einer Fehlstelle geben. Dazu sind allerdings nur Pfähle mit einer Länge von nicht mehr als 20 Meter geeignet.
- Zur Bestätigung des Testergebnisses und als späterer Sanierungszugang (z. B. Verpressen) kann eine Kernbohrung durchgeführt werden.
- Der Vergleich der Testergebnisse mit den Bohrprotokollen muss Aufschluss über eventuelle Herstellungsprobleme (Stützflüssigkeit, Verrohrung, etc.) geben.

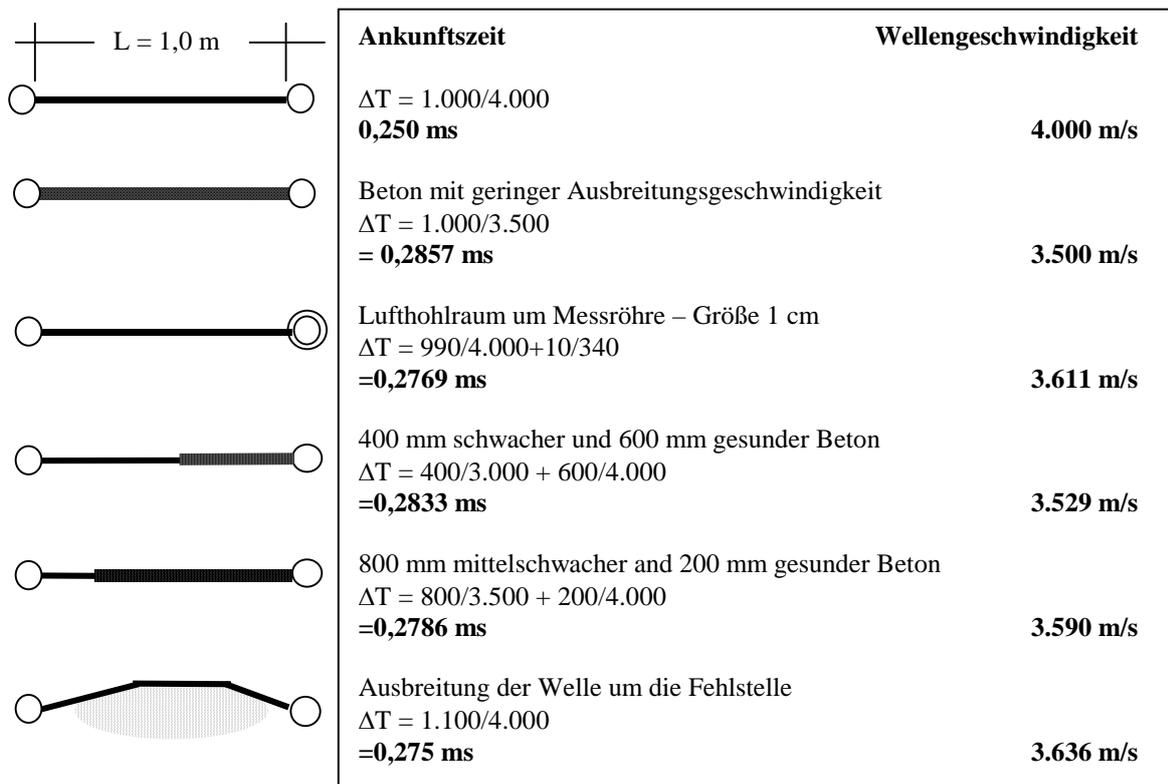


Bild 2: Ultraschallwellenausbreitung,
Ausbreitungs-/Ankunftszeit und Wellengeschwindigkeit

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 minderwertigen 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 verhindert aber eine eindeutige Interpretation des empfangenen Signals.

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.

Auf eine Fehlstelle im Pfahlbeton kann somit erkannt werden, wenn sowohl die Energie als auch die Wellengeschwindigkeit im betroffenen Querschnitt abnehmen.

Als Zusammenfassung kann gesagt werden, dass durch Ultraschall-Integritätsprüfung Abweichungen in der Qualität des Betons zwischen zwei Messröhren in einer bestimmten Tiefe / Querschnitt festgestellt werden können aber ohne eine genaue Charakterisierung der Fehlstelle hinsichtlich Ausdehnung oder Grad der Qualitätsminderung.

Aus diesem Resultat der Ultraschallmessung müssen Rückschlüsse auf die Gebrauchstauglichkeit und Tragfähigkeit der Pfähle gezogen werden.

2. Empfehlungen für die Durchführung und Auswertung der Ultraschallprüfung

Alle möglichen Messstrecken sind zu messen (3 Rohre - 3 Messstrecken, 4 Rohre - 6 Messstrecken, 5 Rohre - 10 Messstrecken etc.).

Für die Messwertauswertung der Ultraschall-Integritätsprüfung werden folgende Schritte vorgeschlagen.

1. Bestimmung der Laufzeiten (Wellengeschwindigkeiten) über die Tiefe und Bestimmung der durchschnittlichen Wellengeschwindigkeit 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

c_{aj} : mittlere Wellengeschwindigkeit für den Weg i-j

c_{ij} : Wellengeschwindigkeit für Weg i-j

in Querschnitt mit Anomalie $c_{ij} < 0,8 c_{aj}$

$\chi_{ij} := c_{ij} / c_{aj}$: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 Beanspruchung in der Tiefe der Anomalie und Sicherheitsnachweis für Resttragfähigkeit und reduzierte Beanspruchung. 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 auch noch 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 eingebaut werden.

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 direkt bestimmt werden.

Z.B. für Messtrecke a-b mit der Länge L_{ab} mit Laufzeit T_{ab}

Ausdehnung des intakten Betons L_1 mit der durch die Ultra-Schall-Messung bestimmten Wellengeschwindigkeit c_1 für intakten Beton,

Ausdehnung des defekten Bereichs L_2 mit c_{L2}

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

Laufzeit : $L_1/c_1 + L_2/c_{L2} = T_{ab}$

Die Auflösung dieses linearen Gleichungssystems ergibt die Ausdehnung L_2 des intakten Bereichs sowie die Ausdehnung des defekten Bereichs. Je nachdem welche

Wellengeschwindigkeit für den defekten Bereich gewählt wird, verändert sich auch die Größe des defekten Bereichs.

Ein weiterer Ansatz der Auswertung nutzt die Algorithmen der in der Medizin bekannten Computer-Tomographie (ob auf der Grundlage von Röntgen-Strahlen oder Kernspinnresonanzen ist für diese Betrachtung unerheblich).

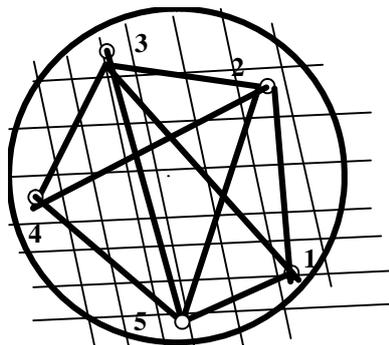


Bild 4 : Modell für die Berechnung der möglichen Ausdehnung des defekten Bereichs aus "Computertomographie"

Die Berechnung verläuft als Inverse einer üblichen Strömungsberechnung mit Finiten Elementen ab. Der betrachtete Querschnitt wird in "Finite-Elemente" aufgeteilt und jedem Element, welches von der Welle gekreuzt wird, wird eine unbekannte Wellengeschwindigkeit (bzw. deren Kehrwert) zugeordnet. Im Bild 4 ist als willkürliches Beispiel eine Aufteilung in 42 Elemente vorgenommen worden. Zur Bestimmung der 42 unbekanntes Wellengeschwindigkeiten (bzw. ihrer Kehrwerte) stehen die 10 Gleichungen der 10 gemessenen Ausbreitungsstrahlen zur Verfügung. Die Lösung dieses unterbestimmten Gleichungssystems ist wie die vorige Lösung auf dem Strahl nicht eindeutig und kann als Kunst bezeichnet werden, auf jeden Fall ist es für die Anbieter dieser Programme der medizinischen Computertomographie schätzenswertes Know-How.

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

Zur Darstellung des Berechnungsergebnisses der Tomographie kann die Verteilung der Wellengeschwindigkeiten geglättet werden. Da Ergebnis wird häufig in einer Falschfarbendarstellung veranschaulicht.

3. Beispiel

In einem Ortbetonbohrpfahl wurden für eine Ultraschalluntersuchung Ring- und Kreuzmessungen an allen eingebauten Messrohren und allen 10 Richtungen durchgeführt (siehe Beispiel Bild 2). Die Länge des Pfahles wurde untersucht und die gemessene Länge mit der Solllänge (35m) verglichen. In einer Tiefe von 24 bis 25 Meter und in der Tiefe von 32 bis 33 Meter zeigte das Ultraschallsignal sowohl eine Verlängerung der Ankunftszeit als auch einen Energieverlust in allen 10 gemessenen Richtungen. Diese Signalabweichungen sind der in dieser Tiefe eingebauten Osterbergzelle und ihrem Stahlrahmen zuzuschreiben und stellen keine Anomalie des Betons dar.

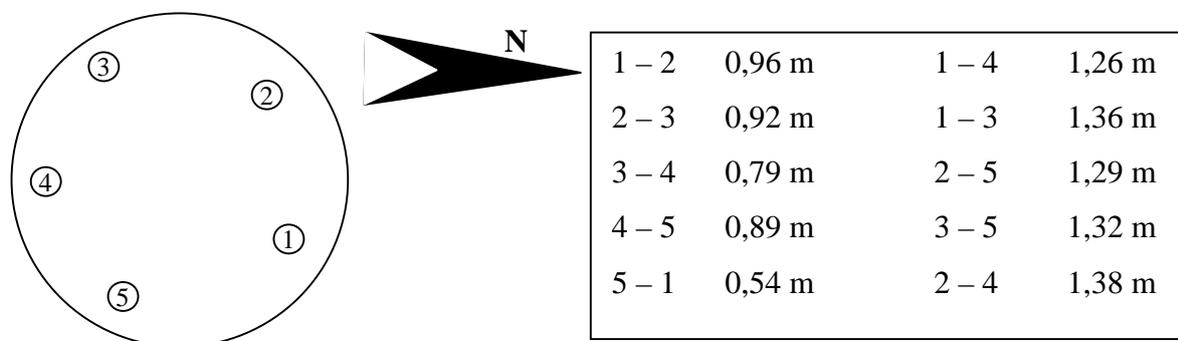


Bild. 2: Anordnung und Nummerierung der Messrohre, Messrohreabstand

Die Messrohre ragten ca. 1 Meter über den Pfahlkopf hinaus, die Wellenausbreitung im Beton beginnt daher ca. 1 Meter unterhalb des Messbeginns.

In einer Tiefe von 14 Meter zeigt das Messsignal zwischen den Messrohren 4 – 5, 1 – 5, 3 – 5, 2 – 5, und 2 – 4 eine Verzögerung der Ankunftszeit sowie einen Abfall der Energie (siehe Tabelle 1). Dies ist auf eine geringe Anomalie im Bereich um Messrohr 5 zurückzuführen. Da die Anomalie nur in einem Querschnitt gefunden wurde, hat sie eine Höhe von ca. 10 cm.

In Tabelle 1 sind die mittlere Ankunftszeit in Bereichen mit gesundem Pfahlbeton, die maximale Ankunftszeit in 14 m Tiefe, die Abweichung der Ankunftszeit in 14 m Tiefe, die entsprechende Wellengeschwindigkeit in Regionen mit gesundem Pfahlbeton und die minimale Wellengeschwindigkeit in 14 m Tiefe zwischen den Messrohren dargestellt.

Richtung zwischen Messröhren Nr.	Abstand zwischen Messröhren [m]	Mittlere Ankunftszeit in Regionen mit gesundem Pfahlbeton [ms]	Maximale Ankunftszeit in 14 Meter Tiefe	Abweichung[%]	Wellengeschwindigkeit in Regionen mit gesundem Pfahlbeton [m/s]	Wellengeschwindigkeit in 14 Meter Tiefe [m/s]
1- 2	0,96	0,22	0,22	0%	4.364	4.364
1- 3	1,36	0,34	0,34	0%	4.000	4.000
1- 4	1,26	0,3	0,3	0%	4.200	4.200
1- 5	0,54	0,15	0,22	47%	3.600	2.455
4- 5	0,89	0,22	0,25	14%	4.045	3.560
3- 4	0,79	0,23	0,23	0%	3.435	3.435
2- 3	0,92	0,22	0,22	0%	4.182	4.182
3- 5	1,32	0,35	0,45	29%	3.771	2.933
2- 5	1,29	0,32	0,44	38%	4.031	2.932
4- 2	1,38	0,35	0,48	37%	3.943	2.875
				Mittlere Wellengeschwindigkeit	3.957	3.493

Tabelle 1 : Ankunftszeit, Wellengeschwindigkeit in gesundem Pfahlbeton und in Anomalie

In Bezug auf die vorhergehende Diskussion, sind die folgenden möglichen Schadensursachen zusammengestellt:

1. Im Bereich der Verbindungsmuffe der Messröhre 5 befindet sich in 14 Meter Tiefe Luft. Die Dicke der Luftschicht ist ca. 0,5cm bis 1cm. Neben dieser Luftschicht befindet sich gesunder Pfahlbeton.

- In 14 Meter Tiefe ist um das Messrohr 5 ein Bereich mit Einschlüssen, entmischtem Beton oder ein Bereich mit zu wenig Zementleim. Die Ausdehnung dieser Fehlstelle ist abhängig von der Abweichung vom gesunden Pfahlbeton. Für eine große Abweichung ist die Ausdehnung geringer, für eine geringe Abweichung ist die Ausdehnung größer. Daher ist die genaue Wellengeschwindigkeit im Bereich der Anomalie nicht bekannt. Eine Vorhersage der Ausdehnung der Fehlstelle ist daher immer eine Abschätzung.
- Eine alternative Abschätzung der Ausdehnung und Auswirkung einer Fehlstelle kann dadurch erfolgen, dass angenommen wird, dass für den defekten Bereich die Wellengeschwindigkeit der Luft angesetzt wird. Dann kann aus der Größe der Abweichung in der Wellengeschwindigkeit die Größe des defekten Bereichs direkt bestimmt werden.

Z.B. für Messtrecke 3-5

Ausdehnung des intakten Betons L1

Ausdehnung des Luftbereichs L2 mit $c_{\text{Luft}} = 340 \text{ m/s}$

Geometrie : $L1 + L2 = 1,32$

Laufzeit : $L1/3957 + L2/340 = 0,45$

Lösung : Betonstrecke $L1 = 1,28 \text{ m}$, Luftstrecke $L2 = 0,04 \text{ m}$

Entsprechend werden die Luft-Strecken für die anderen Messtrecken (Rohrpaare) errechnet. Werden die Luftstrecken jeweils auf den Strahlen zwischen den Rohren, ausgehend von Rohr 5, aufgetragen, ergibt sich Bild 3.

Wenn dazu angenommen wird, dass sich der Defekt auf den Bereich außerhalb der Bewehrung erstreckt ergibt sich die Gesamtfläche des defekten Bereichs im Querschnitt zu $0,010 \text{ m}^2$.

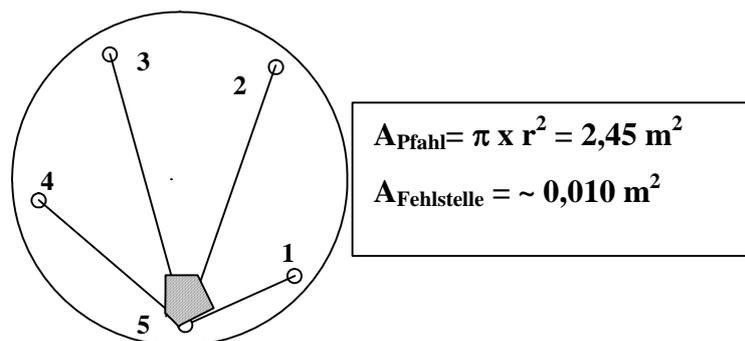


Bild 3 : Mögliche Ausdehnung des defekten Bereichs

Auch wenn der Defekt nur auf die innere Fläche - innerhalb der Bewehrung - bezogen wird, ergibt sich die Reduktion zu weit unter 1%.

Wenn im defekten Bereich ein unbrauchbares Betonmaterial mit einer geringen Wellengeschwindigkeit von 2.000 m/s angenommen wird, ergibt sich ein sehr viel größerer defekter Bereich mit $L2 = 0,53$ m.

Direction between access tube no.	Space between access tubes [m]	Average arrival time at area with sound concrete [ms]	Maximum arrival time at 14 m depth [ms]	average wave velocity in sound concrete m/s	wave velocity in sound concrete m/s	ratio	weighted ratio
1- 2	0,96	0,22	0,22	4.364	4.364	1,00	0,96
1- 3	1,36	0,34	0,34	4.000	4.000	1,00	1,36
1- 4	1,26	0,3	0,3	4.200	4.200	1,00	1,26
1- 5	0,54	0,15	0,22	3.600	2.455	0,68	0,37
4- 5	0,89	0,22	0,25	4.045	3.560	0,88	0,78
3- 4	0,79	0,23	0,23	3.435	3.435	1,00	0,79
2- 3	0,92	0,22	0,22	4.182	4.182	1,00	0,92
3- 5	1,32	0,35	0,45	3.771	2.933	0,78	1,03
2- 5	1,29	0,32	0,44	4.031	2.932	0,73	0,94
4- 2	1,38	0,35	0,48	3.943	2.875	0,73	1,01
	total 10,71		averages	3.957	3.493		total 9,41
					deviation		12,1%

Tabelle 2 : Bestimmung eines Qualitätsindikators für den Querschnitt

Wird der Bereich der Abminderung direkt aus dem Verhältnis von aktueller zu durchschnittlicher Wellengeschwindigkeit bezogen, so ergibt sich eine größere Gesamtabminderung von 12,1% für den Querschnitt (siehe Tabelle 2).

Siehe auch ASTM Standard: Die Messmethode liefert nicht den genauen Typ einer Fehlstelle, sondern nur, dass eine Fehlstelle vorhanden ist.