

# Auswertung von Ringversuchen zur Vergleichbarkeit von Pfahlintegritätsprüfungen

Carolin WUNDERLICH, Jan FISCHER, TU BS, Braunschweig  
Ernst NIEDERLEITHINGER, BAM, Berlin  
Matthias SCHALLERT, Oswald KLINGMÜLLER, GSP, Mannheim

**Kurzfassung.** Die zerstörungsfreie Low-Strain-Integritätsprüfung ist ein weit verbreitetes Verfahren zur Beurteilung der Qualität von Ortbetonpfählen. Bei der Durchführung richten sich alle Prüfer in der Regel nach den Empfehlungen der DGGT. Bei der Prüfung von Ortbetonpfählen mittels der Integritätsprüfung sollte daher, auch bei unterschiedlichen Prüfern und Messgeräten, ein vergleichbares Ergebnis erzielt werden. Um diese Annahme zu verifizieren, wurden mehrere Ringversuche auf dem Testgelände der BAM in Horstwalde durchgeführt. Die ersten Ringversuche zeigten, dass verschiedene, bisher im Regelwerk nicht berücksichtigte Parameter vor der Messung festgelegt werden müssen, um vergleichbare Ergebnisse zu erzielen. Die ermittelte Wellengeschwindigkeit eines Ortbetonpfahles ist beispielsweise abhängig von der angesetzten Pfahllänge, dem Abstand zwischen Sensor und Impulseinleitung oder auch der Wahl der Filter.

## 1. Einführung

Die zerstörungsfreie Low-Strain-Integritätsprüfung, auch Hammerschlagmethode genannt, ist ein weit verbreitetes Verfahren zur Beurteilung der Qualität von Ortbetonpfählen. Im Laufe der Zeit hat sich das Verfahren zur Standardmethode der Qualitätssicherung für Tiefgründungen entwickelt. Bei Verdrängungs- und Bohrpfählen kann das Verfahren zum einen zur Ermittlung von Fehlstellen und zum anderen als Element des Qualitätsmanagements zur Überprüfung der korrekten Länge genutzt werden [1].

Bei der Durchführung von Low-Strain-Integritätsprüfungen richten sich alle Prüfer in der Regel nach den Empfehlungen der DGGT. Daher wird davon ausgegangen, dass bei der Prüfung von Standardpfählen jeder Prüfer ein vergleichbares Ergebnis erzielt. Um diesen Ansatz zu bestätigen, wurde ein Ringversuch mit möglichst vielen Prüfinstitutionen vorgeschlagen. Der Versuch sollte zur besseren Vergleichbarkeit der Signale unterschiedlicher Messgeräte sowie verschiedener Prüfer und so zum Verständnis von Ergebnis, Auswertung und Interpretation beitragen. Alle den Autoren bekannten Firmen und Institutionen, die auf diesem Feld tätig sind, erhielten eine Einladung zu Messungen auf dem Testgelände Technische Sicherheit der BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung Berlin in Horstwalde.

Insgesamt wurden innerhalb von ca. 1,5 Jahren drei Ringversuche mit unterschiedlichen Teilnehmerzahlen durchgeführt. Die Vorgaben für die Prüfung, die Anzahl der Teilnehmer sowie die Witterungsbedingungen bei den einzelnen Terminen waren unterschiedlich. Die Ergebnisse wurden im Rahmen einer Studienarbeit ausgewertet [2].

## 2. Grundlagen der Low-Strain-Methode

Die Grundlage der Integritätsprüfung nach dem Low-Strain-Verfahren ist die eindimensionale Stoßwellenausbreitung. Hierbei wird ein Stoßimpuls mit einem speziellen Impulshammer geringer Masse in den Pfahlkopf eingeleitet. Durch den Impuls wird eine Wellenfront in den Pfahl induziert, die sich mit einer bestimmten Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c$  [m/s] fortpflanzt. Die Wellenfront durchläuft den Pfahl, wird am Pfahlfuß reflektiert und erreicht nach der Zeit  $t = 2 \cdot L / c$  als Echo wieder die Messebene am Pfahlkopf [3]. Die Abbildung 1 zeigt schematisch die Wellenausbreitung im Pfahl.

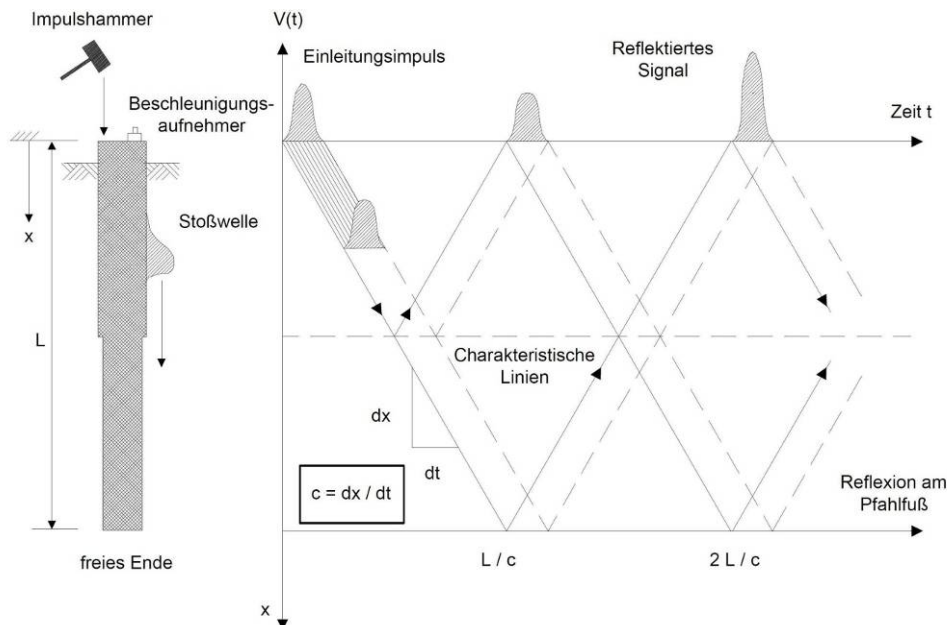


Abbildung 1: Wellenausbreitung im Pfahl [4]

Die Bewegung des Pfahlkopfes wird während der Prüfung mittels Beschleunigungsaufnehmer erfasst. Der gemessene Beschleunigungsverlauf wird in der Regel integriert und als Geschwindigkeits-Zeit-Verlauf  $v(t)$  zur Auswertung herangezogen. Reflexionen der eingeleiteten Wellenfront treten nicht nur am Pfahlfuß, sondern auch bei Impedanzwechsel auf. Dabei handelt es sich um Änderungen der Querschnitts- und Steifigkeitseigenschaften des Pfahles sowie Änderungen des den Pfahl umgebenden Bodens. Die Impedanz  $Z$  ist demnach von verschiedenen Größen wie der Querschnittsfläche  $A$ , dem Elastizitätsmodul  $E$  und der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit  $c$  im Pfahl abhängig.

Die Abbildung 2 zeigt beispielhaft ein typisches Signal eines unversehrten Pfahls auf dem Testgelände der BAM in Horstwalde. In Abbildung 3 ist ein Signal mit einer zusätzlichen Reflexion im Pfahl dargestellt. Die Reflexion deutet auf eine Inhomogenität des Pfahles hin.

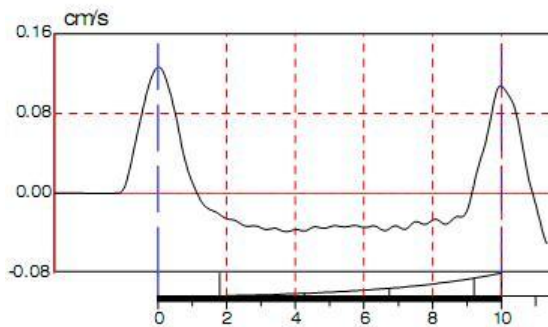


Abbildung 2: Signal eines unversehrten Pfahls

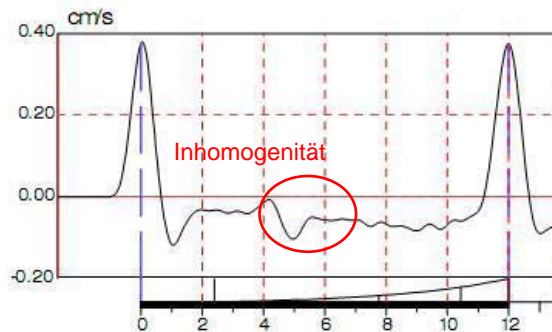


Abbildung 3: Signal eines Pfahls mit Fehlstelle

### 3. Testpfähle in Horstwalde

Die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung verfügt, ca. 60 km südlich von Berlin bei Horstwalde, über ein ausgedehntes Testgelände für großmaßstäbliche Versuche. Das Gelände dient unter anderem der Entwicklung und Validierung zerstörungsfreier Prüfverfahren verschiedenster Bereiche des Bauwesens wie z. B. für Pfahlgründungen [5].

Zur Ausstattung des Pfahlprüfstandortes gehören 10 Bohrpfähle (vgl. Abbildung 4). Die Testpfähle werden als Referenzpfähle für die Optimierung zerstörungsfreier Untersuchungsmethoden genutzt. Die bewehrten Ortbetonpfähle wurden mit verschiedenen Längen und Einbauten in den Boden eingebracht. Abbildung 5 zeigt die Herstellung der Pfähle.

Der Durchmesser aller Pfähle beträgt 62 cm, die Längen variieren zwischen ca. 9 m und ca. 12 m. Die Herstellung der meisten Pfähle erfolgte möglichst fehlerfrei, andere dagegen wurden gezielt mit künstlichen Fehlstellen versehen und teilweise mit Sensorik und Zugangsrohren ausgestattet. Die Anordnung der Fehlstellen erfolgte an ausgewählten Pfählen innerhalb und außerhalb der Bewehrung, um die Anwendung und Ergebnisse verschiedener zerstörungsfreier Prüfverfahren besser miteinander vergleichen zu können. In Abbildung 6 sind beispielhaft 5 der 10 Testpfähle mit ihren Längen und den angebrachten Fehlstellen dargestellt.

Die im Herstellungsprotokoll angegebenen Pfahllängen wurden nach der Herstellung in einer Referenzmessung mit dem Parallel-Seismik-Verfahren noch einmal überprüft und gegebenenfalls angepasst. Die endgültigen Pfahllängen wurden für die Ringversuche als Eingangsparameter vorgegeben.

### 4. Ringversuche

#### 4.1 Erster Ringversuch

Beim ersten Prüftermin bekamen die Pfahlprüfer die Vorgabe, eine Integritätsprüfung an allen zehn Pfählen durchzuführen. Auf Grundlage der vorgegebenen Pfahllängen sollte die Wellengeschwindigkeit für jeden Pfahl bestimmt werden. Da die Länge vorgegeben war, wurden von allen Prüfern vergleichbare Werte erwartet.



Abbildung 4: Pfahltestfeld Horstwalde



Abbildung 5: Herstellung der Pfähle

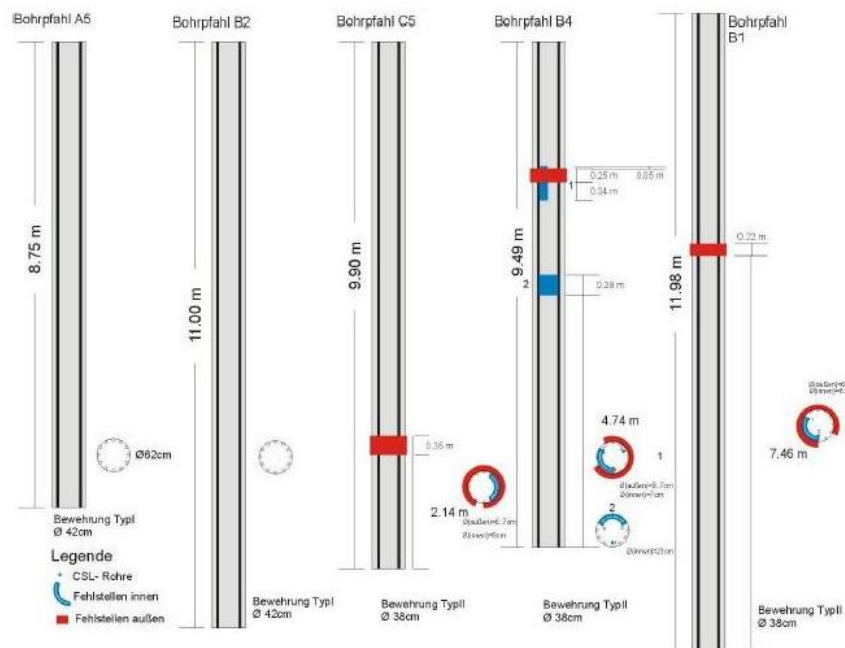


Abbildung 6: Teil der Übersicht der Testpfähle

Beim ersten Blick auf die Testergebnisse fiel aber auf, dass die ermittelten Wellengeschwindigkeiten stark voneinander abwichen. An einzelnen Pfählen gab es Differenzen von bis zu 500 m/s (ca. 12,5 %). Bei näherer Betrachtung der Prüfprotokolle ließ sich feststellen, dass die angesetzten Pfahllängen bei manchen Prüfern nicht den Vorgaben entsprachen. Die Daten waren daher nicht direkt vergleichbar. Bei einer um 1 m fehlerhaft eingegebenen Pfahllänge folgt im vorliegenden Fall eine Abweichung in der Wellengeschwindigkeit von  $\Delta c \approx 430$  m/s, bei zu kurz eingegebener Länge nach unten, andernfalls nach oben.

Um eine Vergleichbarkeit herzustellen, wurden die Daten nachträglich bearbeitet. Bei der genaueren Betrachtung der Rohdaten ist zusätzlich aufgefallen, dass auch die Filterwahl nicht einheitlich war. Es konnte festgestellt werden, dass bei deutlichen Abweichungen der gewählten Filter, z. B. zur Minimierung eines Grundrauschens, leichte Abweichungen bei der Ermittlung der Wellengeschwindigkeit möglich sind. Soweit die Rohdaten zur Verfügung standen, wurden zusätzlich zur Normierung auf die richtige Pfahllänge alle Filter entfernt und die Daten erneut ausgewertet. Wo die Rohdaten nicht zur Verfügung standen, wurden die Daten über den Dreisatz auf die richtige Pfahllänge angepasst.

Nach der Bearbeitung der Daten ließ sich feststellen, dass sich die Ergebnisse der einzelnen Prüfer weniger stark voneinander abwichen, aber es gab immer noch Differenzen in der Wellengeschwindigkeit von bis zu 375 m/s. Hierbei muss angemerkt werden, dass es nicht bei allen Daten möglich war, die Filtereinstellungen zu kontrollieren und evtl. zu korrigieren. Einige noch vorhandene Abweichungen könnten daher aus einer unzulässigen Filtereinstellung resultieren. Weiterhin war nicht klar, mit welchen Abständen zwischen Sensor und Impulseinleitung die Pfähle getestet wurden. Doch unterschiedliche Abstände führen ebenfalls zu einer Abweichung der gemessenen Wellengeschwindigkeit und werden nachfolgend beschrieben.

Abbildung 7 zeigt die Ergebnisse des ersten Ringversuches. Dargestellt ist die berechnete Wellengeschwindigkeit aus den Messergebnissen der 14 Prüfer vor und nach der Anpassung, beispielhaft für einen ausgewählten Pfahl.

Zwischen den Geräten verschiedener Hersteller ergaben sich dagegen keine signifikanten Unterschiede. Gerätefehler oder fehlerhafte Bedienung konnten ausgeschlossen werden.

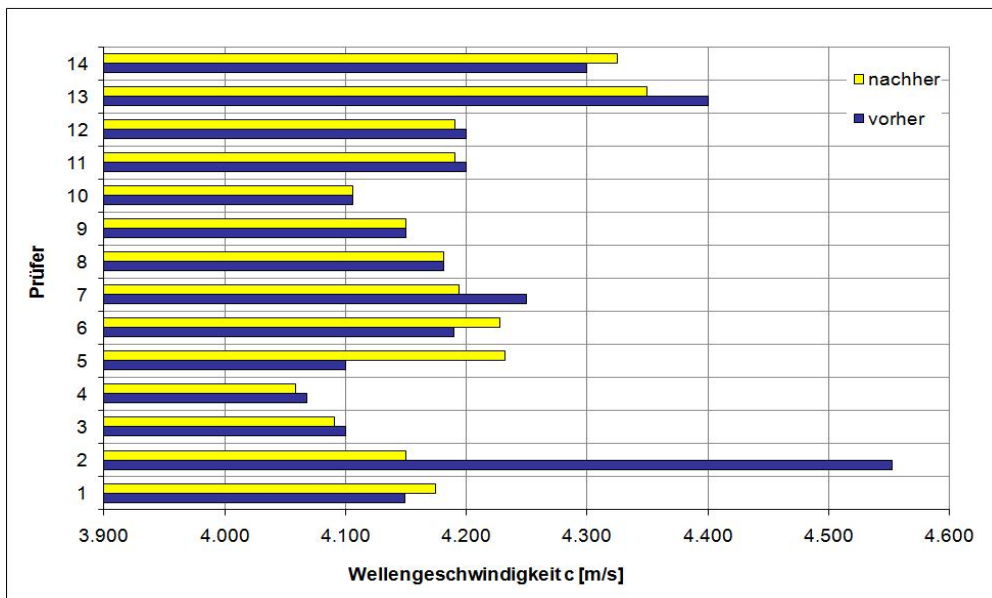


Abbildung 7: Ergebnis des 1. Ringversuchs für einen Pfahl vor und nach der Längerkorrektur

#### 4.2 Zweiter Ringversuch

Der Ablauf des zweiten Prüftermins (Nachholtermin für die am ersten Termin verhinderte Prüfer) entsprach dem des Ersten, allerdings war die Teilnehmerzahl geringer. Darüber hinaus waren, durch das Abstemmen und Säubern der Pfahlspitzen zwischen den beiden Ringversuchen, die Pfahllängen beim zweiten Messtermin größtenteils einige Zentimeter geringer.

Bei der Betrachtung der ermittelten Ergebnisse fiel auf, dass die verwendeten Pfahllängen, aus verschiedenen Gründen, auch hier nicht einheitlich waren. Daher wurden die Signale ebenfalls neu ausgewertet bzw. die Wellengeschwindigkeiten für die korrekten Längen mit dem Dreisatz angepasst.

Nach der Datenbearbeitung betrug die maximale Differenz der gemessenen Wellengeschwindigkeiten unterschiedlicher Institutionen an einem Pfahl ca. 200 m/s. Die aufgetretenen Abweichungen zwischen den einzelnen Prüfern waren damit geringer als noch beim ersten Prüftermin. Da es in den Vorgaben aber keinen Unterschied zwischen dem ersten und dem zweiten Ringversuch gab, ist anzunehmen, dass es in der

Messdurchführung weniger Unterschiede gab als beim ersten Termin und daraus die etwas geringeren Abweichungen resultieren.

### 4.3 Dritter Ringversuch

Die Abweichungen in den ermittelten Wellengeschwindigkeiten zwischen den einzelnen Prüfern waren in den beiden ersten Ringversuchen, trotz korrigierter Pfahllängen und Filtereinstellungen, signifikant. Als mögliche Ursache wurden wechselnde Abstände  $d$  zwischen dem Sensor und der Impulseinleitung identifiziert. Gemessen wird stets die Zeitdifferenz zwischen dem Eintreffen des direkten Impulssignals und der Reflektion am Pfahlfuß an der Sensorposition. Sind nun Schlagpunkt und Sensor einige Dezimeter voneinander entfernt, benötigt die direkte Welle signifikant länger zum Sensor ( $dt = d/c_{\text{Oberfläche}}$ ), während die reflektierte Welle kaum verzögert wird. Diese zu einer scheinbaren Geschwindigkeitserhöhung führende Differenz wird bei der Auswertung nicht berücksichtigt. Dieser Effekt tritt nicht auf, wenn die Startzeit mithilfe eines instrumentierten Hammers unabhängig von der Sensorposition ermittelt wird. Allerdings sind nicht alle praktisch eingesetzten Geräte damit ausgestattet.

Aufbauend auf die Erfahrungen der ersten beiden Ringversuche, wurden bei dem dritten Ringversuch ausgewählte Pfähle mit definierten Vorgaben geprüft. Ein erneutes Abstemmen der Pfahlköpfe vor dem dritten Termin führte zu einer weiteren Kürzung der Pfähle um ca. 5 cm. Die Vorgaben wurden wie folgt definiert:

1. Festlegung der Pfahllänge
2. Festlegung der Abstände zwischen Sensor und Impulseinleitung
3. Festlegung der Filtereinstellung
4. Festlegung der Hammerarten

An einem Pfahl wurde der Einfluss des Abstandes zwischen Beschleunigungsaufnehmer und Impulseinleitung überprüft. Es zeigte sich, wie erwartet, dass aus einem größeren Abstand eine höhere Wellengeschwindigkeit resultiert. Der Fußreflex erschien bei einem Abstand von  $d = 20$  cm scheinbar früher als bei einem Abstand von  $d = 7$  cm (siehe Abbildung 8). Die theoretischen Überlegungen konnten somit bestätigt werden. Im Mittel lag der Unterschied zwischen den Wellengeschwindigkeiten der hier verwendeten Abstände bei 100 m/s. Bei noch größeren Abständen entstehen noch erheblich größere Abweichungen. Bei einem Abstand zwischen Hammer und Sensor von  $d = 45$  cm resultiert, gegenüber direkt benachbarter Platzierung, rechnerisch eine um 400 m/s höhere Wellengeschwindigkeit. Damit sind die Abweichungen des ersten und zweiten Ringversuches über die unterschiedlichen Abstände erklärbar.

Um mögliche Unterschiede durch die Benutzung verschiedener Hämmer auszuschließen, wurden die Hämmer für die Prüfung ebenfalls vorher festgelegt. Bei der anschließenden Auswertung war kein nennenswerter Unterschied in den Wellengeschwindigkeiten zu erkennen.

Wie zu erwarten war, waren die aufgetretenen Abweichungen in der gemessenen Wellengeschwindigkeit je Pfahl bei dem dritten Ringversuch deutlich geringer. Die Prüfer haben größtenteils für alle getesteten Pfähle die gleichen Wellengeschwindigkeiten ermittelt. Die größte Differenz trat bei einem Pfahl mit einem Unterschied in der Wellengeschwindigkeit von 100 m/s auf. Folglich wurden die Abweichungen mit den zunehmenden Vorgaben zu Beginn des Versuchs geringer. Die Abbildung 9 zeigt die ermittelten Wellengeschwindigkeiten der drei Prüfer für alle getesteten Pfähle.

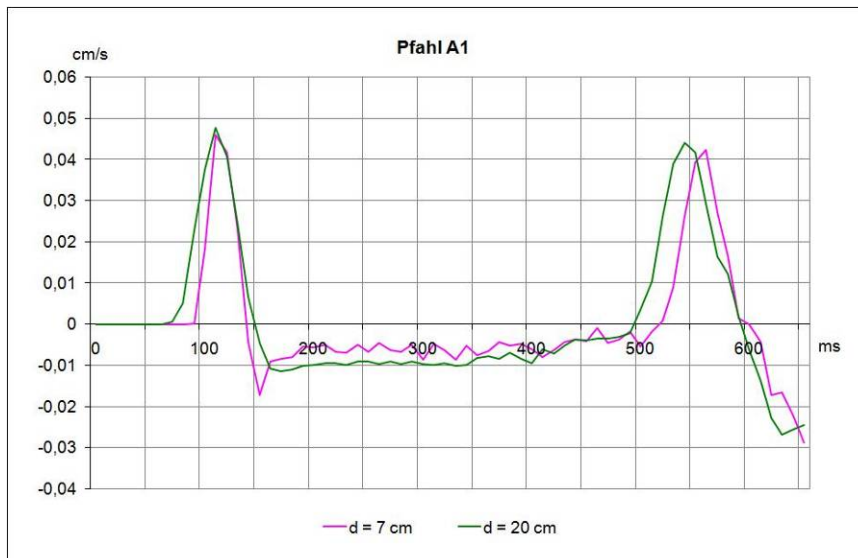


Abbildung 8: Messsignal mit zwei verschiedenen Abständen zwischen Sensor und Impulseinleitung

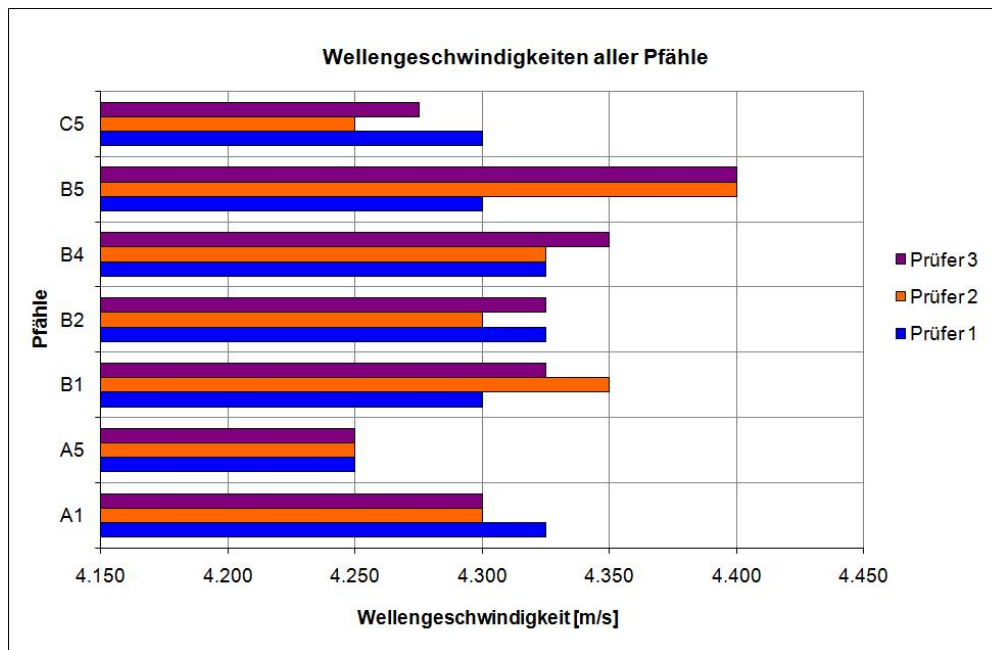


Abbildung 9: Ermittelte Wellengeschwindigkeiten des 3. Ringversuchs

Als Ergebnis des dritten Ringversuches ist festzuhalten, dass für die Erzielung vergleichbarer Ergebnisse drei wesentliche Eingangsparameter übereinstimmen müssen.

1. Die zur Auswertung verwendete Pfahllänge
2. Der Abstand zwischen Sensor und Impulseinleitung
3. Die Filtereinstellung

Sind diese Parameter bei allen Prüfern gleich, so lässt sich mit unterschiedlichen Geräten ein vergleichbares Ergebnis erzielen.

## 5. Zusammenfassung und Ausblick

Auf dem Pfahltestfeld in Horstwalde fanden drei Ringversuche zur Vergleichbarkeit von Messungen der Pfähle mit der Low-Strain-Methode statt. Die Testergebnisse der Prüfer wurden für jeden Termin separat betrachtet und bewertet. Da sich die Randbedingungen von Termin zu Termin geändert haben, wurde auf einen Quervergleich verzichtet.

Beim Vergleich der Ergebnisse der einzelnen Prüfer ließen sich, besonders beim ersten Ringversuch, starke Abweichungen in den berechneten Wellengeschwindigkeiten feststellen. Den Abweichungen wurde nachgegangen und aufgetretene Probleme, die zu den Abweichungen führten, sichtbar gemacht. Durch den dritten Prüftermin wurde deutlich, dass für eine gute Übereinstimmung der Messergebnisse und um Fehler ausschließen zu können, genau definierte Vorgaben notwendig sind. Der Grund für die starken Abweichungen beim ersten Ringversuch lag in den fehlenden Randbedingungen. Da beispielsweise die Einstellung der Filter nicht vorgegeben war, haben einige Prüfer mit, andere Prüfer ohne Filter gearbeitet. Dies führte zu einer unterschiedlichen Interpretation der Signale.

Für die Praxis bedeutet das, dass mit Schwankungen in den Ergebniswerten, wie sie beim ersten und zweiten Ringversuch auftraten, gerechnet werden muss. Bei der Prüfung von Baustellenpfählen gemäß der EA-Pfähle existieren keine genauen Vorgaben für die Filtereinstellung oder den Abstand zwischen Schlagposition und Sensor [1]. In der Regel wird auf Basis der Pfahllänge die Wellengeschwindigkeit gemessen. Anhand der aufgezeichneten Daten wird dann die Qualität des Pfahles bewertet. Es wird vorgeschlagen, die EA-Pfähle diesbezüglich zu präzisieren. Zumindest müssen alle relevanten Parameter protokolliert werden und die Rohdaten für entsprechende Korrekturen längerfristig verfügbar sein. Innerhalb einer Messserie (z. B. auf einer Baustelle) sind die Parameter soweit wie möglich konstant zu halten.

Als positiv ist festzuhalten, dass alle Prüfer und alle Messgeräte jeweils reproduzierbare Messsignale mit klar erkennbarem Fußecho erzielen konnten. Daher werden die Einsetzbarkeit der Methode und die Bewertung der Ergebnisse nicht grundsätzlich in Frage gestellt, lediglich an der Vergleichbarkeit der zahlenmäßigen Ergebnisse ist zu arbeiten.

An den bisher in Horstwalde vorhandenen Pfählen ist, aufgrund der recht kleinen Fehlstellen und des relativ homogenen Baugrundes, eine Bewertung des Einflusses dieser Parameter derzeit noch nicht möglich. Hierfür wird vorgeschlagen „neue“ Pfähle mit deutlichen Inhomogenitäten im Pfahlquerschnitt und/oder der Betonsteifigkeit zu entwickeln und erneut einen Ringversuch durchzuführen. Dies ist für 2010 vorgesehen.

## 6. Referenzen

- [1] DGGT AK 2.1: Empfehlungen des Arbeitskreises "Pfähle" (EA-Pfähle). Ernst & Sohn, Berlin, 2007
- [2] Wunderlich, C., 2009: Auswertung eines Ringversuches zur Vergleichbarkeit von Integritätsprüfungen. Studienarbeit (unpubliziert), TU Braunschweig, Institut für Grundbau und Bodenmechanik.
- [3] Stahlmann, J.; Kirsch, F.; Schallert, M.; Klingmüller, O.; Elmer, K.-H.: Pfahltests - modern dynamisch und/oder konservativ statisch? Bauen in Boden und Fels. 4. Kolloquium 20. und 21. Januar 2004, Ostfildern, Seiten:23-40
- [4] Plaßmann, B.: Zur Optimierung der Messtechnik und der Auswertmethodik bei Pfahlintegritätsprüfungen. Mitteilungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig, Heft 67
- [5] Niederleithinger, E., Wiggenhauser, H., & Taffe, A., 2009: The NDT-CE test and validation center in Horstwalde. NDT-CE 2009, Nantes, Frankreich. <http://www.ndt.net/article/ndtce2009/papers/127.pdf>