

geo tech nik

JAHRGANG 16 (1993), HEFT 2: S. 57 - 100

GEOTECHNIK, eine Zeitschrift für Bodenmechanik, Felsmechanik, Grundbau und Ingenieurgeologie, ist das Organ der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V. und erscheint viermal im Jahr. Ein Nachdruck ist nur mit Genehmigung der Schriftleitung zulässig. Namentlich gezeichnete Beiträge stellen die Meinung des Autors dar.

SCHRIFTLÉITUNG:

Prof. Dr.-Ing. W. Wittke, Vorsitzender
Prof. Dr.-Ing. U. Smolczyk, Schriftleiter
Prof. Dr.-Ing. G. Gudehus, Karlsruhe,
Leiter der Fachsektion Bodenmechanik
Dr.-Ing. E.h. M. Nußbaumer, Stuttgart,
Leiter der Fachsektion Grundbau
Dr. Ing. C. Erichsen, Stuttgart
Leiter der Fachsektion Felsmechanik
Prof. Dr. E. Krauter, Mainz
Leiter der Fachsektion Ingenieurgeologie
Prof. Dr.-Ing. R. Floss, München,
Leiter der Fachsektion Kunststoffe in der Geotechnik

SCHRIFTLÉITUNGSBEIRAT:

Prof. Dr.-Ing. E. Franke, Darmstadt
Prof. Dr.-Ing. D. Franke, Dresden
Dr.-Ing. K. Hilmer, Nürnberg
Dipl.-Ing. P. v. Soos, München

REDAKTION:

Dr. W. Sadgorski (Annahme von Manuskripten)
Rotbuchenstraße 73, D-8000 München 90
Telefon: privat 089 / 690 71 97
dienstl. (Bay. Landesamt f. Wasserwirtschaft)
089 / 12 10-16 59

Dr.-Ing. R. Herrmann
c/o Landesgewerbeanstalt Bayern, Grundbauinstitut
Postfach 3022, D-8500 Nürnberg 80
Telefon: 09 11 / 65 55 - 5 52
Telefax: 09 11 / 65 55 - 5 99

DRUCK:

polyfoto Vogt KG, Breitscheidstraße 44, 7 Stuttgart 1
Telefon: 07 11 / 61 06 41 - 42

GESCHÄFTSFÜHRUNG + VERTRIEB:

Prof. Dr.-Ing. K.H. Idel
Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V.,
Hohenzollernstraße 52, D-4300 Essen 1,
Telefon: 02 01 / 78 27 23
Telefax: 02 01 / 78 27 43

Bank: Dresdner Bank AG (BLZ 360 800 80)
Kto. 4 024 230
Postgiroamt Essen (BLZ 360 100 43)
Kto. 17 032

Inhalt

	Seite
EDITORIAL	57
HAUPTAUFSÄTZE	
Bermen auf der Luftseite von Flußdeichen von M. Tonneijck	59
Zur Größe der Kapillarkohäsion von Sanden von P. Bilz u. J. Vieweg	65
Dynamische Integritätsprüfung und Qualitätssicherung bei Bohrpfehlen von O. Klingmüller	72
TECHNISCHE BERICHTE	
Überkonsolidierte Schluffe Klasse 6 (leichter Fels) oder Klasse 7 (schwerer Fels) von L. Becker	81
VERÖFFENTLICHUNGSSCHAU	83
AUS WISSENSCHAFT UND TECHNIK	85
NACHRUFE	86
NACHRICHTEN AUS DER SCENE	88
DGEG-MITTEILUNGEN	96
PATENTSCHAU	97
TAGUNGSKALENDER	100

Anzeigen auf S. 64, 71, 90, 91 und 96 bitte beachten

An unsere Leser: Die unangemessen gesteigerten Postversandkosten haben uns veranlaßt, den Umfang des Heftes zu reduzieren und auf ein Titelbild zu verzichten. Wir bitten um Verständnis.

Dynamische Integritätsprüfung und Qualitätssicherung bei Bohrpfählen

Dynamic integrity test and quality controlling with bored piles

von Oswald Klingmüller*

ZUSAMMENFASSUNG

Wenn eine dynamische Integritätsprüfung bei Bohrpfählen nachträglich durchgeführt wird, besteht die Gefahr, daß Pfähle für unbrauchbar erkannt werden. Die Folgen für die Bauleitung können sehr unangenehm, d.h. kostenintensiv (Behebung des Schadens zur Gewährleistung des geplanten Sicherheitsniveaus der Pfahlgründung) sein. Es bestehen deswegen sehr hohe Anforderungen an die Zuverlässigkeit der Messung und Interpretation.

Die Vorteile des Verfahrens zur Qualitätssicherung von Tiefgründungen werden hingegen wenig genutzt. Die Erhöhung der Sicherheit von Pfahlgründungen durch konsequente Qualitätssicherung setzt voraus, daß auch die dynamische Integritätsprüfung in den Bauablauf mit eingeplant wird, so daß eventuelle Maßnahmen, die sich aus dem Ergebnis ableiten, noch mit gerechtfertigtem Aufwand durchgeführt werden können. Die Möglichkeiten der dynamischen Integritätsprüfung als nachträglicher Test sowie als Qualitätssicherung werden an Beispielen diskutiert.

1. Einführung in die Methode unter besonderer Berücksichtigung der Qualitätsindikatoren

Die Integritätsprüfung mit der Hammerschlagmethode (auch "Low-Strain"- Methode oder Impakt-Echo-Methode) ist als Verfahren zur Qualitätskontrolle von Bohrpfählen bekannt. Auf der Grundlage der eindimensionalen Wellentheorie können durch einen einfachen Schlag mit dem Hammer auf den Pfahlkopf Informationen über den Pfahlquerschnitt und die Pfahllänge erhalten werden (siehe Bild 1).

Aus der Geschwindigkeit am Pfahlkopf können Aussagen über die Beschaffenheit des im Boden verborgenen Pfahles abgeleitet werden. Wenn der Pfahl aus homogenem Material besteht und einen gleichbleibenden Querschnitt vom Pfahlkopf bis zum Pfahlfuß aufweist, zeigt sich das daran, daß der Pfahlkopf sich lediglich aufgrund der Schlageinleitung und aufgrund der Pfahlfußreflexion nach unten bewegt und die Geschwindigkeit am Pfahlkopf einen positiven Wert erhält. Bei Querschnittsabweichungen sowie bei einer Dämpfung der Stoßbewegung durch die Einbindung in den Boden ergibt sich auch zwischen Stoßeinleitung und Pfahlfußreflexion eine positive oder negative Pfahlkopfgeschwindigkeit.

SUMMARY

When low strain integrity testing is carried out on cast in situ piles, there is a remarkable danger of a certain percentage of piles to be rejected. This might easily lead to very difficult situations and costly consequences for the site management.

The optimum benefit from pile integrity testing however can be gained, if the method is used as a tool of quality assessment of foundation piles. But that means that the method has to be carefully incorporated into the construction schedule and work programme of a building site in cooperation of client, consultant and contractor. The problem is discussed and the proposal for application demonstrated by considering various site experiences.

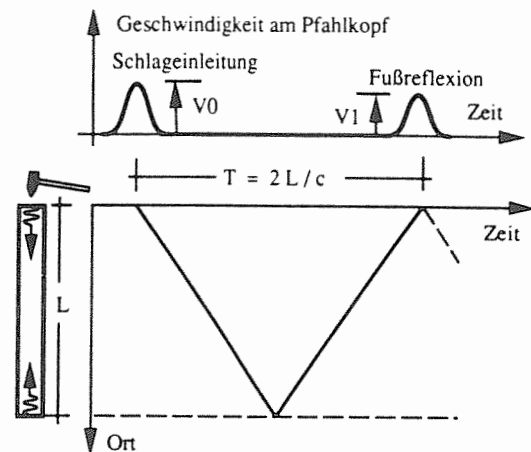


Bild 1 Grundlegendes Prinzip der Integritätsprüfung mit der Hammerschlagmethode

In einfachen Fällen können die Signale aufgrund der Erfahrung interpretiert werden. Wenn die Signalabweichungen jedoch durch eine Kombination von Materialinhomogenitäten, Querschnittsabweichungen und/oder Bodeneinflüssen verursacht werden, wird die Interpretation schwierig und nicht immer eindeutig. Eine Hilfe bei der Auswertung der Signale stellen dann die nunmehr zur Verfügung stehenden Verfahren der Computersimulation (z.B. PITWAP und TNOWave) dar.

Unabhängig von der Interpretation des Zeitverlaufs der Pfahlkopfgeschwindigkeit im Hinblick auf Querschnittsabweichungen sollte in jedem Fall der Zusammenhang zwischen der Pfahllänge, Laufzeit der Welle und der Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Welle untersucht werden. Die

* Oswald Klingmüller, Gesellschaft für Schwingungsuntersuchungen und dynamische Prüfmethode mbH, Mannheim

Laufzeit der eingeleiteten Stoßwelle vom Pfahlkopf zum Pfahlfuß und zurück ist verknüpft mit der Pfahllänge über die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle in der Gleichung

$$T = 2 \cdot L / c \quad (1)$$

mit T - Laufzeit der Stoßwelle vom Pfahlkopf zum Pfahlfuß und zurück,

L - Pfahllänge vom Aufnehmer zum Pfahlfuß,

c - Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle (Materialeigenschaft:

$$c_{\text{beton}} = 3,5 - 4,0 \text{ m/ms,}$$

$$c_{\text{stahl}} = 5,7 \text{ m/ms;}$$

$$\text{zum Vergleich: } c_{\text{luft}} = 0,343 \text{ m/ms,}$$

$$c_{\text{wasser}} = 1,5 \text{ m/ms;).}$$

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Wellen in festen Körpern ist abhängig von ihrer Elastizität und Dichte:

$$c = \sqrt{E/\rho} \quad (2)$$

mit

E - Elastizitätsmodul des Pfahlmaterials,

ρ - Dichte des Pfahlmaterials.

Da die Dichte bei Bohrpfählen nur geringfügig vom Mittelwert abweicht, auch wenn das Mischungsverhältnis nicht exakt eingehalten wurde, ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle eng mit dem Elastizitätsmodul verknüpft und stellt damit einen guten Indikator für die Betonqualität dar.

Unter der Annahme, daß die tatsächliche Pfahllänge mit der planmäßigen Pfahllänge L_d übereinstimmt, ergibt sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit aus

$$c = 2 \cdot L_d / T_m \quad (3),$$

wo T_m die gemessene Zeit ist.

Wenn sich aus dieser Berechnung ein Wert für c ergibt, wie er üblicherweise für Beton bekannt ist, kann angenommen werden, daß der Pfahl bezüglich Länge und Betonqualität den Planvorgaben entspricht. Ist c zu klein (also z.B. < 3 m/ms) kann es entweder sein, daß der Pfahl zu lang ist (unwahrscheinlich, aber nicht unmöglich) oder daß der Beton von schlechter Qualität ist und gegebenenfalls zu geringe Festigkeiten aufweist. Ist c zu hoch (also z.B. $> 4,5$ m/ms), dann ist der Pfahl entweder kürzer als planmäßig oder der Beton hat besonders gute Qualität mit hoher Festigkeit (unwahrscheinlich, aber nicht unmöglich).

In einigen Fällen ist es möglich, aufgrund von Testmessungen an genau vorbestimmter Teillänge eines Pfahles oder durch die Untersuchung von Bohrkernen einen vorhandenen Wert der Wellen-

geschwindigkeiten zu bestimmen. Bei einer bekannten Wellengeschwindigkeit c_{exakt} kann dann die vorhandene Pfahllänge bestimmt werden:

$$L = \frac{1}{2} \cdot c_{\text{exakt}} \cdot T_m \quad (4).$$

Bei diesen Auswertungen sollte jedoch immer beachtet werden, daß die Werte Meßwerte sind und insofern statistische Streuungen vorliegen.

Ein anderes Merkmal für Pfahlbeschaffenheit und/oder Betonqualität ist das Verhältnis der Intensität der eingeleiteten Stoßwelle, gegeben durch die Amplitude v_0 (siehe Bild 1) zur Intensität der reflektierten Stoßwelle, gegeben durch die Amplitude v_1 . Nach der Theorie der eindimensionalen Wellenausbreitung in homogenen elastischen Körpern ohne Dämpfung führt die Reflexion zu einer Verdopplung der Geschwindigkeit am Pfahlkopf. Ist die Pfahlkopfgeschwindigkeit der Reflexion kleiner, also $v_1 < 2 \cdot v_0$, so ist dies auf die Dämpfung einerseits und auf jegliche Brechungen durch Gefüge- und/oder Querschnittsänderungen zurückzuführen.

Die durch die reine Materialdämpfung zu erwartende Abnahme der Pfahlkopfgeschwindigkeit kann wie folgt abgeschätzt werden. In der Baudynamik wird Dämpfung entweder durch die Lehrsche Dämpfung in Prozent der kritischen Dämpfung oder durch das logarithmische Dekrement angegeben. Das logarithmische Dekrement δ ist der Quotient der Logarithmen zweier im Zeitbereich benachbarter Amplituden einer gedämpften Schwingung und kann für kleine Dämpfungsmaße aus dem Lehrschen Dämpfungsmaß ermittelt werden:

$$\delta = 2\pi \cdot D \quad (5).$$

Bei Problemen der Wellenausbreitung ist die Zeit, mit der eine Schwingung abläuft, bzw. die Periode T_0 , also der Abstand zweier Amplituden, mit dem Weg, den die Welle in dieser Zeit zurücklegt, der Wellenlänge λ , über die Ausbreitungsgeschwindigkeit c als einer Materialkonstanten gekoppelt:

$$\lambda = c \cdot T_0 \quad (6).$$

Aus dem Verhältnis zweier Amplituden im Zeitbereich kann also für eine gegebene Dämpfung das Verhältnis von Amplituden bei einer sich eindimensional ausbreitenden Welle für einen bestimmten Abstand errechnet werden.

Zum Beispiel ergibt sich für eine Materialdämpfung von 5% ein logarithmisches Dekrement von $\delta = 2\pi \cdot 0,05 = 3,14$ (7).

Für eine Periode von $T_0 = 10^{-3}$ s (1 ms), entsprechend der doppelten Stoßdauer eines Hammerschlages und eine Wellengeschwindigkeit $c = 3,5$ m/ms ergibt sich eine Abminderung der lo-

garithmierten Amplitude des eingeleiteten Impulses um

$$\delta^* = 0,9 \text{ pro Meter} \quad (8).$$

Bei einem Pfahl von $L = 12 \text{ m}$ ergibt sich damit eine Abminderung der eingeleiteten Stoßwelle

$$v_1 = 2 \cdot 0,9^{24} \cdot v_0 = 0,16 \cdot v_0 \quad (9).$$

Der Faktor 2 ergibt sich daraus, daß bei der theoretischen Lösung ohne Dämpfung die Reflektion eine doppelt so große Intensität hat wie die eingeleitete Welle. Der Exponent 24 berücksichtigt, daß sich das Dekrement auf die Logarithmen bezieht und die Welle die doppelte Pfahllänge ($2 \cdot 12 \text{ m}$) zu durchlaufen hat.

Da die Dämpfung im Beton aber einer der unbestimmtesten Materialparameter ist und zudem die Abminderung auch von der Impulslänge abhängt, läßt sich der abgeleitete Zusammenhang lediglich für eine grobe Abschätzung der Abminderung verwenden.

Nur bei kurzen Pfählen mit glatter Oberfläche ist zu erwarten, daß die reflektierte Welle dem durch die Dämpfung bestimmten Wert entspricht. In praktischen Fällen ist die Abminderung aus der Wirkung des Bodens und den normalen Querschnitts- und Gefügeschwankungen in einem Pfahl sowieso sehr viel größer als die Abminderung allein aus Materialdämpfung.

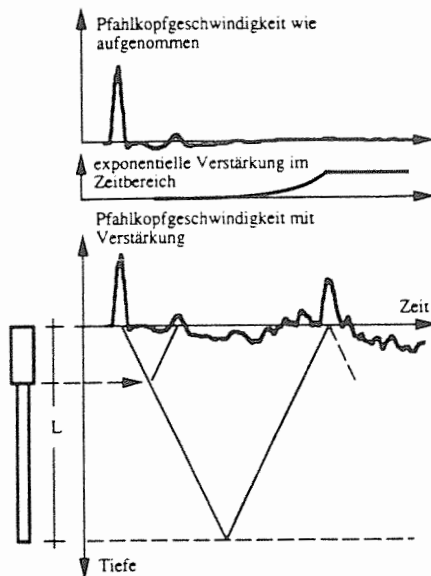


Bild 2 Gedämpftes Signal wie aufgenommen und mit exponentieller Verstärkung

Um trotz der starken Abminderung noch eine Messung interpretieren zu können, muß eine Verstärkung durchgeführt werden. Üblicherweise wird hierbei eine exponentielle Verstärkung im Zeitbereich gewählt (siehe Bild 2), da bei anderen Arten der Verstärkung durch Rauschen oder Störeinflüsse die Interpretation des Signals erschwert wird. Im Bild 2 wurde für einen 23 m langen Schneckenbohrpfahl eine 30-fache Verstärkung benötigt, um eine klare Fußreflektion

erkennen zu können. In Bild 2 ist außerdem zu erkennen, daß die Verstärkung auch Meßfehler, wie z.B. eine Verschiebung der Nulllinie oder auch Rauscheinflüsse verstärkt. Die Verstärkung wird deswegen zweckmäßig zu dem Zeitpunkt abgebrochen, zu dem die Fußreflektion auftreten soll ($T = 2 \cdot L/c$, s.o.).

Beim Vergleich vieler Pfähle zeigt sich zwar eine gewisse Abhängigkeit des Verhältnisses der Amplituden v_1 und v_0 von Pfahltyp und Pfahllänge, aber eine konsequente Auswertung zur Beurteilung der Pfahlqualität verlangt noch weitergehende, auch statistische Untersuchungen (vgl. Abschnitt 5).

2. Probleme mit der derzeitigen Anwendungspraxis

In einigen Ländern (z.B. Österreich), wurde die Nützlichkeit der Methode erkannt und die Integritätsprüfung als qualitätssichernde Maßnahme in die Vorschriften aufgenommen ([1]). In anderen Ländern ist die Anwendung zumindest nicht verboten (Deutschland), oder sie wird als zusätzliche Maßnahme empfohlen (Eurocode 7 [3], cf.[4]). Die Durchführung der Methode ist dann nicht durch Vorschriften geregelt, sondern lediglich Empfehlungen von Arbeitsausschüssen legen einen mehr oder weniger verbindlichen Rahmen fest. In diesem Umfeld gibt es für eine Qualitätssicherung mit der Hammerschlagmethode keinen Bonus in dem Sinn, daß in die Tragfähigkeit ein höheres Vertrauen (sprich kleinerer Sicherheitsfaktor) gesetzt wird oder daß auf andere, kostspieligere Maßnahmen der Qualitätssicherung verzichtet werden kann.

Da das Verfahren damit nur kostet und nichts bringt, bleibt die Anwendung auf Fälle beschränkt, wo im Sinne einer gutachtlichen Stellungnahme das Urteil eines unabhängigen Außenstehenden bezüglich der Qualität der Pfähle eingeholt wird, wenn es z.B. aufgrund der Beschaffenheit der Pfähle im sichtbaren Bereich Zweifel an der Beschaffenheit der Pfähle in größerer Tiefe gibt.

Das heißt aber auch, daß die Durchführung in einem mißtrauischen bis feindseligen Umfeld erfolgt, da Bauherr, Gutachter, Behörden und Pfahlhersteller in der Baubesprechung schon ihre gegensätzlichen Standpunkte in kontroversen Diskussionen dargelegt haben.

Nachdem dann mit der Klärung der Schuldfrage und der Diskussion über das weitere Vorgehen oft schon einige Zeit verstrichen ist, wenn die Integritätsprüfung beauftragt wird, ist diese in einem engen Zeitfenster (möglichst "gestern") unter den argwöhnischen Augen aller Beteiligten durchzuführen. Durch den Fortgang der Arbeiten

entsteht auch der Fall, daß Pfahlköpfe nicht mehr zugänglich oder hinter einer dichten Anschlußbewehrung versteckt sind.

Die Durchführung der Tests erfolgt somit unter erschwerten Bedingungen. Nicht nur, daß die Beteiligten und oft auch mitgebrachte Kollegen ein Recht beanspruchen, sich vom Spezialisten alles erklären zu lassen, sondern die Vorbereitung der Pfähle ist mangelhaft, und für das Anbringen der Meßwertaufnehmer muß erst eine Oberfläche mit Pfahlbeton hergestellt werden. Oft wird als erstes verlangt, daß der Pfahl geprüft wird, dessen Beschaffenheit am meisten bezweifelt wird, und es wird erwartet, daß nach einem einzigen Hammerschlag sofort eine vollständige Diagnose aufgestellt werden kann.

Die Folgen einer negativen Beurteilung können sehr kostenintensiv sein:

1. Aufgraben oder Ziehen des Pfahls zur Überprüfung des Ergebnisses,
2. Sanierung durch Verpreßmaßnahmen,
3. Sanierung durch einen neuen Pfahl.

In allen Fällen ist das Beistellen zusätzlichen schweren Gerätes notwendig. Für die Herstellung eines neuen Pfahls muß nicht nur das Pfahlgerät vorhanden sein, sondern für das Gerät muß an der entsprechenden Position auch eine Zugangsmöglichkeit bestehen.

Da der neue Pfahl nicht in der Achse des alten Pfahls stehen kann, muß durch eine neue Statik eine Umverteilung der Lasten und gegebenenfalls eine Zulagebewehrung ermittelt werden. Wesentliche zusätzliche Kosten können auch durch den Terminverzug entstehen.

Da die Kosten für eine dynamische Integritätsprüfung verhältnismäßig gering sind, wird sie oft beauftragt, ohne daß an die möglicherweise kostenintensiven Folgen gedacht wird. Derjenige, der die dynamische Integritätsprüfung durchführt, muß sich dieser Verantwortung bewußt sein und somit folgendes beachten:

1. Er sollte keine Beurteilungen auf der Grundlage einer Messung an einem einzigen Pfahl aufstellen, sondern immer weitere Pfähle zum Vergleich heranziehen können.
2. Er sollte keine Ergebnisse versprechen, die nicht vollständig durch die eindimensionale Wellentheorie erklärt werden können.
3. Er sollte quantitative Angaben (z.B. 10% Querschnittsverringerung) nur im Bereich der tatsächlich erzielbaren Genauigkeit für Bohrpfähle mit einer Länge bis 15 m (vgl. [2]) abgeben.

Wenn es aufgrund der Umstände möglich ist, Angaben über Pfähle zu machen, die in ein Fundament eingebunden sind oder die nicht direkt am Pfahlkopf geschlagen werden können oder

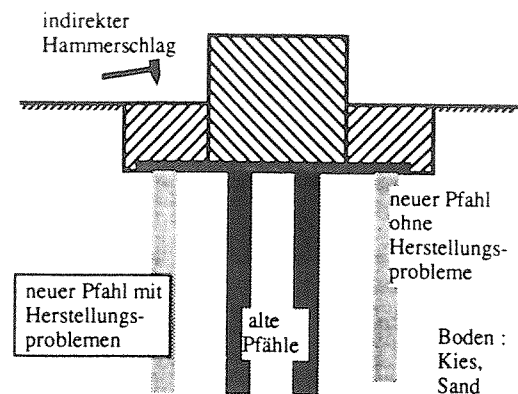


Bild 3 Fundamentverstärkung durch angeschlossene Blöcke mit Pfählen

wenn die Erfahrung und die Querschnittsverhältnisse es ermöglichen, auf einseitige Fehlstellen zu schließen, ist dies als zusätzliches Ergebnis vorteilhaft. Wenn aber aufgrund des Angebots eine Verpflichtung zu solchen Aussagen besteht, ergeben sich unnötige Erklärungsnotstände, wenn die Verhältnisse diese Aussagen nicht zulassen.

3. Beispiel einer nachträglichen Untersuchung bei Fehlervermutung

Als Beispiel für eine solche schwierige Situation der Durchführung der Integritätsprüfung sei die in Bild 3 dargestellte Erweiterung eines Rohrleitungsfundaments angeführt.

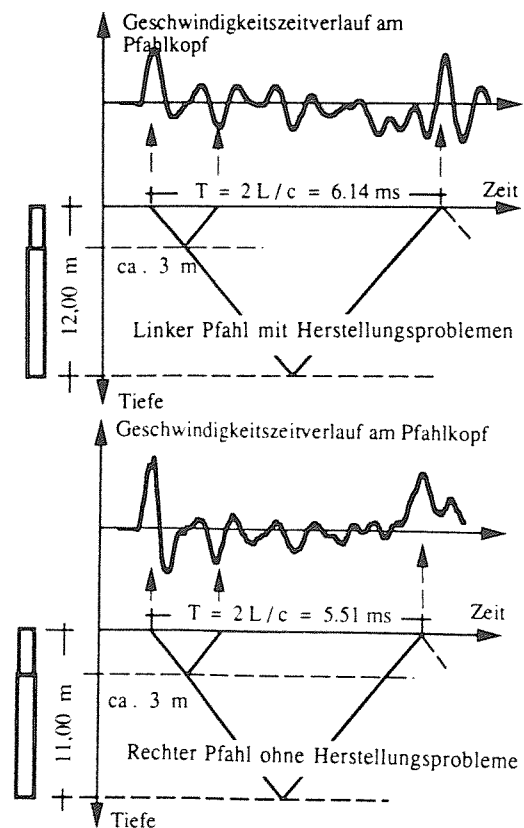


Bild 4 Prüfung eines Problempfahles

Bei der Herstellung des linken Pfahles wurde ein vorzeitiges Abbinden angenommen, da beim Ziehen des Hüllrohres das übliche Nachsacken des Betons nicht auftrat. Es wurde daraufhin vermutet, daß durch das Haften des Pfahlbetons am Hüllrohr eine Einschnürung verursacht sein könnte.

Zur Zeit der Prüfung war der Pfahl schon in den Fundamentblock eingebunden, und die Prüfung konnte nur indirekt erfolgen durch einen Hammerschlag auf den Fundamentblock (s. Bild 3).

Die erste Aufgabe des Integritätsprüfers bestand darin, den Auftragsumfang zu verdoppeln, d.h. zu erreichen, daß auch der Nachbarpfahl, der gleich sein sollte, aber etwas kürzer, und bei dem die Herstellung fehlerfrei verlief, geprüft werden konnte.

Die Messung des Pfahles mit der Fehlervermutung zeigt zwar eindeutig keine Reflektion, die auf eine schwerwiegende Gefügestörung schließen läßt (Ausschlag nach oben), aber der sehr vom Normalfall (vgl. Bild 1) abweichende Verlauf läßt Zweifel aufkommen, ob überhaupt der Wellendurchgang durch den Pfahl erfaßt wurde oder ob Schwingungen der Fundamentblöcke, bzw. Oberflächenwellen und Reflektionen an den Blockübergängen gemessen wurden. Insofern war auch die deutliche Reflektion zur Zeit $T = 2 \cdot L/c$ nicht eindeutig als Fußsignal festzulegen. Erst durch die Prüfung des zweiten Pfahles ergab sich eine größere Sicherheit bezüglich der Interpretation. Einerseits weist er einen ähnlichen

Signalverlauf auf, andererseits und das ist eher noch wichtiger, zeigt sich auch hier für den etwas kürzeren Pfahl ein eindeutiges Fußsignal zur Zeit $T = 2 \cdot L/c$.

Aus der Gegenüberstellung der Signale konnte die Interpretation des Einzelsignals bestätigt werden, und damit wurde die Brauchbarkeit für den linken Pfahl mit der Fehlervermutung nachgewiesen.

4. Bestimmung des Anwendungsbereichs der Methode mit Demonstrationspfählen

Während der letztjährigen 4. Konferenz für die Anwendung der Stoßwellenmethode auf Pfähle in Den Haag wurde ein "Demonstration Day" veranstaltet, bei dem neben der Durchführung von Rammversuchen (einschließlich eines Wetttrammens) und zugehörigen Tragfähigkeitsprüfungen, auch eine Konkurrenz zur Integritätsprüfung an zehn verschiedenen präparierten Testpfählen veranstaltet wurde. Neben den verschiedenen Demonstrationen an Modellpfählen in kleinem Maßstab war dies, nach den drei Probepfählen der Firma Bauer in Deutschland (über die Ergebnisse wurde in [6] und [8] berichtet) und den 24 Pfählen, die im Rahmen der Jahrestagung der belgischen Gruppe der internationalen Gesellschaft für Erd- und Grundbau für Integritätstests zur Verfügung gestellt waren (siehe [5]), der dritte Versuch, die Anwendbarkeit oder Nichtanwendbarkeit der Methode nachzuweisen.

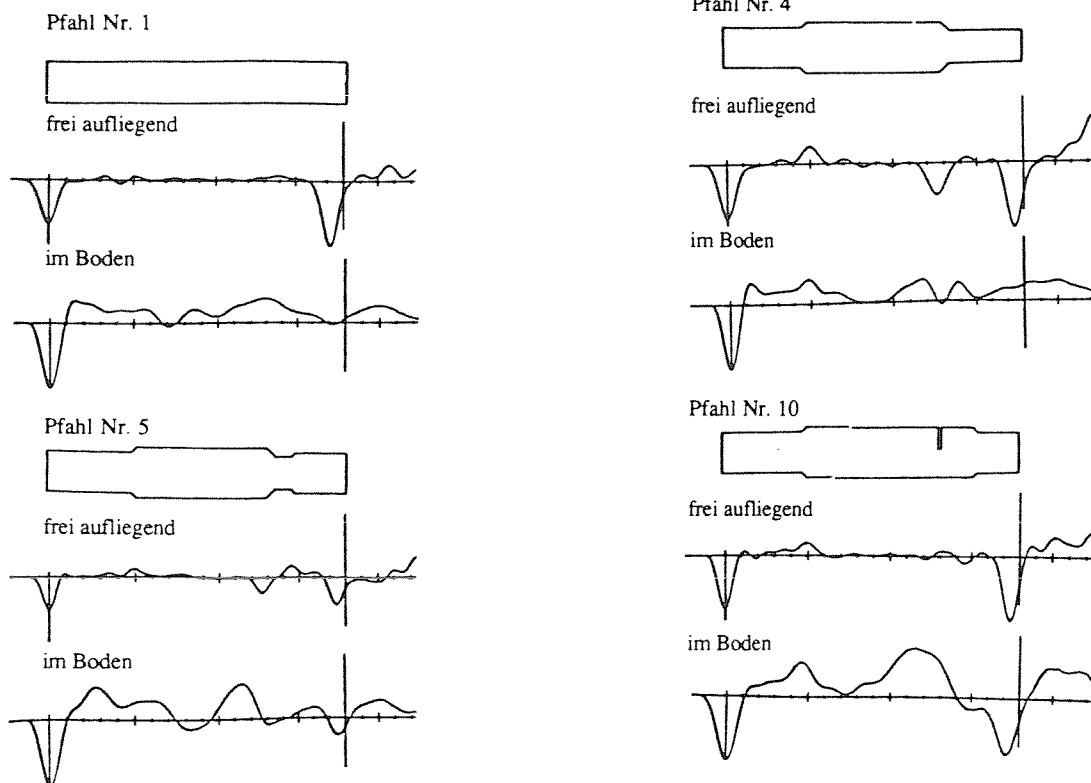


Bild 5 Integritätsprüfung an präparierten Demonstrationspfählen

Die zehn Pfähle in Den Haag waren in einer Schalung hergestellte Betonfertigpfähle mit quadratischem Querschnitt. Die Pfähle hatten eine Länge von 18 m bis auf einen, der 17 m lang war.

Dieser kürzere und einer der 18 m langen Pfähle wiesen einen gleichmäßigen Querschnitt auf, die anderen 8 waren in unterschiedlicher Weise mit Stufen, Querschnittsvergrößerungen oder Querschnittsverringerungen, sowie einige mit Einschnitten von 1 cm über den halben Querschnitt versehen. Es wurden von jedem Typ zwei identische Pfähle hergestellt, wobei der eine Pfahl oberirdisch auf einen einfachen Balkenrost gelegt und durch eine Plane verdeckt war, der jeweils andere in ein Hüllrohr eingestellt war, welches nachträglich verfüllt wurde. Die vorhandenen Querschnittsänderungen waren auf einer Skizze zusammengestellt, und die Aufgabe bestand nun darin, die Messungen an den verdeckten, liegenden sowie an den nicht sichtbaren, eingegrabenen Pfählen den bekannten Profilen zuzuordnen. Eine vollständige Darstellung der Ergebnisse befindet sich in Vorbereitung (s.a. [7]).

Anhand von vier von zehn Pfählen (s. Bild 5) kann der sichere Anwendungsbereich der Methode erkannt werden. Wie zu erkennen ist, zeichnen sich die Querschnittsabstufungen bei den freien Pfählen (vor allem bei Pfahl Nr.4) deutlich ab. Allerdings sind bei allen Signalen geringfügige Abweichungen des Signals von einer horizontalen Linie zu erkennen, auch ohne daß entsprechende Querschnittsänderungen vorliegen. Ob diese Abweichungen durch eine ungleichmäßige Verdichtung des Pfahlbetons oder durch die Auflagerung auf den Balken zurückzuführen ist, kann allein aus der eindimensionalen Stoßwellentheorie nicht eindeutig abgeleitet werden.

Bei den eingegrabenen Pfählen 4 und 10 ist die Querschnittserweiterung ebenfalls durch eine deutliche Reflektion dargestellt, die Querschnittsverringerung weiter unten ist jedoch nicht zu erkennen. Alle eingegrabenen Pfähle zeigen zudem Signalabweichungen, die nicht als Reflektionen anzusehen sind, sondern durch die unterschiedliche Einbindung der Pfähle in den Boden verursacht werden. Aus dem Vergleich der Signale ist lediglich deutlich zu erkennen, daß die Verdichtung des eingefüllten Bodens bei allen Pfählen in sehr unterschiedlicher Weise durchgeführt wurde. Es ist somit nicht möglich, durch Vergleich der Signale die Bodeneinflüsse von den Querschnittsveränderungen zu trennen.

Bei den Pfählen 5 und 10 ist das Fußsignal deutlich, bei Pfahl 1 schwach, aber wenigstens eindeutig zu identifizieren. Da bei Pfahl 4 gar kein Fußsignal auftritt, muß angenommen werden, daß der Pfahl beim Einstellen in das Hüllrohr beschädigt wurde.

Die eindeutige Erkennbarkeit des Fußsignals war auch der Grund dafür, daß der kürzere Pfahl (hier nicht dargestellt) von jedem Wettbewerber eindeutig identifiziert wurde.

Der 1 cm-Einschnitt in Pfahl 10 ist aus den Signalabweichungen nicht zu ersehen. Eine 50%-ige Querschnittsreduzierung sollte beim freien Pfahl auf jeden Fall deutlicher zu sehen sein als die dargestellte Abstufung weiter unten. Der Grund, daß ein solcher Einschnitt (bzw. Riß) durch die Methode nicht als Signalabweichung dargestellt wird, ist darin zu sehen, daß sich die Refraktion aus der Querschnittsverringerung mit derjenigen aus der direkt nachfolgenden Querschnittserweiterung überdeckt, da die Stoßfront selbst eine Länge von über 1m besitzt, wie aus der Zuordnung der Ortsachse (Pfahl) zur Zeitachse (Signal) in Bild 5 zu ersehen ist.

Als sicherer Anwendungsbereich ergibt sich aus diesen Erfahrungen und damit als Bestätigung der früheren Untersuchungen an Testpfählen:

- Bestimmung der Länge bzw. der Betonqualität über die Wellengeschwindigkeit,
- Bestimmung größerer Querschnittsveränderungen, wenn der Bodeneinfluß durch Vergleichsmessungen bestimmt werden kann.

5. Beispiele für Qualitätskontrolle

Anhand von Beispielen soll die Ausnutzung des in Abschnitt 4 erläuterten sicheren Anwendungsbereichs bei der Qualitätskontrolle gezeigt werden.

Auf einer Baustelle wurden 200 Schneckenbohrpfähle hergestellt. Im Zuge einer eigenständigen Qualitätssicherung wurden 9 Pfähle (fast 5%) überprüft. Aus der Zusammenstellung aller Meßergebnisse in den Tabellen 1 bis 3 ist der hohe Qualitätsstandard dieser Baustelle zu erkennen.

Pfahl	L [m]	T ₁ [ms]	T ₂ [ms]	T [ms]	c [m/ms]
72	10,5	0,35	5,96	5,61	3,74
73	10,5	0,41	6,01	5,60	3,75
75	10,5	0,39	5,92	5,53	3,80
85	6,0	0,31	3,62	3,31	3,63
86	6,0	0,31	3,41	3,10	3,87
96	10,0	0,27	6,27	6,00	3,33
97	10,0	0,33	5,97	5,64	3,55
99	10,0	0,36	6,06	5,70	3,51
100	10,0	0,35	5,85	5,50	3,64

Tabelle 1 Meßwerte

Die angegebenen Zeiten T_1 und T_2 gelten hierbei für die Spitzenwerte der Geschwindigkeit für den eingeleiteten Schlag, T_1 , sowie für die Fußreflektion, T_2 (vgl. Bild 6). Die Laufzeit der Welle ist die Differenz $T = T_2 - T_1$. Die Wellengeschwindigkeit c wird mit Gl.(1) bzw.(3) bestimmt.

Die Auswertung zeigt, daß die Wellengeschwindigkeiten verhältnismäßig eng beieinander liegen. Die statistische Auswertung ergibt zudem, daß die Streuung gering ist, daß also eine gleichmäßige Betonqualität erzielt wurde (vgl. Tabelle 2).

größter Wert	3,87
kleinster Wert	3,33
Mittelwert	3,65
Standard-Abweichung	0,17
Variationskoeffizient	4,56%

Tabelle 2 Statistische Auswertung

Nach aufsteigenden Wellengeschwindigkeiten sortiert

Pfahl	L	T_1	T_2	T	c
96	10,0	6,27	0,27	6,00	3,33
99	10,0	6,06	0,36	5,70	3,51
97	10,0	5,97	0,33	5,64	3,55
85	6,0	3,62	0,31	3,31	3,63
100	10,0	5,85	0,35	5,50	3,64
72	10,5	5,96	0,35	5,61	3,74
73	10,5	6,01	0,41	5,60	3,75
75	10,5	5,92	0,39	5,53	3,80
86	6,0	3,41	0,31	3,10	3,87

Tabelle 3 Systematische Auswertung

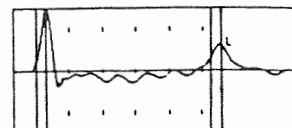
Der kleinste Wert der Wellengeschwindigkeit erscheint mit $c = 3,33$ m/ms zwar etwas gering, bei einer Sortierung der Wellengeschwindigkeiten kann aber erkannt werden, daß die Pfähle 96 bis 100, also die Pfähle in einer Achse die geringeren Wellengeschwindigkeiten aufweisen, die Pfähle der anderen Achse, 72 bis 75, die größeren Wellengeschwindigkeiten. Dies Ergebnis deckt sich nunmehr wiederum mit den Herstelldaten der Pfähle. Die Pfähle in dieser Achse waren zum Zeitpunkt der Prüfung gerade 7 Tage alt, während die anderen Pfähle einige Tage älter waren.

Die Zeitverläufe der Pfahlkopfgeschwindigkeiten in Bild 6 zeigen für alle Pfähle ein deutliches Fußsignal.

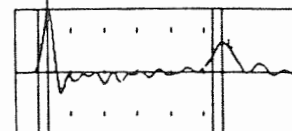
Die Schwankungen der Signale sind gering und können nicht irgendwelchen Querschnittsunregelmäßigkeiten zugeordnet werden. Sie sind im wesentlichen darauf zurückzuführen, daß alle Pfähle auf der Oberseite durch einen harten Mörtel geglättet waren. Daß dadurch bei Schlägeinleitung Oberflächenwellen ohne Bezug zu den Pfahleigenschaften erzeugt werden, läßt sich nicht verhindern.

Die in Bild 6 angegebenen Vergrößerungsfaktoren sind erforderlich, um die Pfahlfußreflektion auf die gleiche Intensität zu bringen wie die

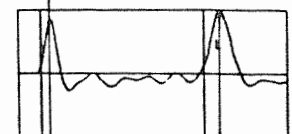
Pfahl Nr.72
L = 10,5 m
Laufzeit: 5,61 [ms]
Vergrößerungsfaktor: 10



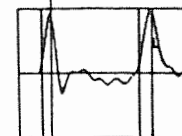
Pfahl Nr.73
L = 10,5 m
Laufzeit: 5,60 [ms]
Vergrößerungsfaktor: 8



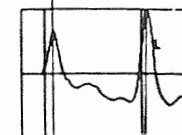
Pfahl Nr. 75
L = 10,5 m
Laufzeit: 5,53 [ms]
Vergrößerungsfaktor: 5



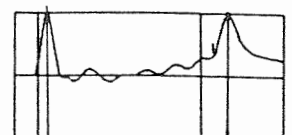
Pfahl Nr.85
L = 6,0 m
Laufzeit: 3,31 [ms]
Vergrößerungsfaktor: 4



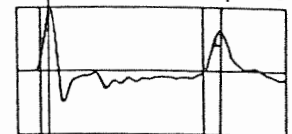
Pfahl Nr.86
L = 6,0 m
Laufzeit: 3,10 [ms]
Vergrößerungsfaktor: 3



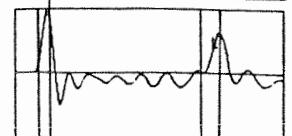
Pfahl Nr.96
L = 10,0 m
Laufzeit: 6,00 [ms]
Vergrößerungsfaktor: 5



Pfahl Nr.97
L = 10,0 m
Laufzeit: 5,64 [ms]
Vergrößerungsfaktor: 19



Pfahl Nr.99
L = 10,0 m
Laufzeit: 5,70 [ms]
Vergrößerungsfaktor: 12



Pfahl Nr.100
L = 10,0 m
Laufzeit: 5,5 [ms]
Vergrößerungsfaktor: 8

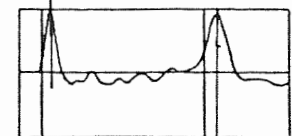


Bild 6 Integritätsprüfung einer Stichprobe als Qualitätssicherung

Stoßeinleitung. Es ist zu erkennen, daß die längeren Pfähle einen höheren Vergrößerungsfaktor aufweisen als die kürzeren, was auch zu erwarten war. Um aus den Unterschieden der Vergrößerungsfaktoren für gleiche Pfahllängen jedoch auf die Betonqualität zu schließen, reichen vorhandene Erfahrungen und Daten noch nicht aus.

Ein nicht zu unterschätzender Nebeneffekt der Integritätsprüfung auf dieser Baustelle war, daß die Pfahlbohrmannschaft sehen konnte, wie das Ergebnis ihrer Arbeit überprüft werden kann. Nicht nur die Bauleitung sondern auch der Bohrmeister und seine Kolonne werden diese Erfahrung in ihrer zukünftigen Arbeit berücksichtigen.

In **Bild 7** sind zwei Auswertungen von Integritätsprüfungen an allen Pfählen der entsprechenden Baustellen einander gegenübergestellt. Dadurch stand eine genügend große Datenmenge zur Verfügung, die die Darstellung der relativen Häufigkeiten ermöglicht. Im oberen Teil sind die Ergebnisse der Auswertung von 1000 Pfählen einer Baustelle dargestellt, bei der die Integritätsprüfung als wesentliche qualitätssichernde Maßnahme schon in der Angebotsphase eingeplant und bei der späteren Pfahlherstellung in den Ablauf integriert war. Im unteren Teil des Bildes ist die Auswertung von 100 Pfählen einer anderen Baustelle dargestellt, bei der aufgrund von Zweifeln an der Qualität der Pfähle die Maßnahme erst nachträglich durchgeführt wurde mit all den Schwierigkeiten, die in Abschnitt 2 geschildert wurden.

Bei der ersten Baustelle mit der planmäßigen Qualitätssicherung durch Integritätsprüfung sind die Wellengeschwindigkeiten (vergl. Formel (3)) sehr nah um den Mittelwert gruppiert und alle im üblichen Bereich für Pfahlbeton. Im unteren Teil von **Bild 7** hingegen verteilen sich die Wellengeschwindigkeiten zwischen den Werten 2,5 m/ms und 6 m/ms, so daß angenommen werden muß, daß zumindest für einige der Pfähle eine geringe Betonqualität vorliegt, für einige andere, daß sie nicht die planmäßige Pfahllänge erreichten. Es war nicht ganz einfach, bei dieser Diagnose zu einer Lösung für die Abnahme der Pfähle zu kommen.

6. Integritätsprüfung als Maßnahme der Qualitätssicherungsstrategie

Aus den vorherigen Ausführungen wird ersichtlich, daß der meiste Nutzen aus der Integritätsprüfung gezogen wird, wenn sie als zerstörungsfreie Prüfmethode in ein Konzept der Qualitätssicherung eingebunden ist. In einem solchen Konzept müßte zwischen den beteiligten Partnern - Bauherr, Statiker, Pfahlhersteller, gegebenenfalls Behörde oder Prüfstatiker - von vornherein

Einvernehmen über die Einbettung der Integritätsprüfung in den Bauablauf erzielt werden.

Ein erster Schritt hierzu ist die gemeinsame Festlegung eines Abnahmeverfahrens:

Abnahmeverfahren

- Durchführungsregeln
- Beurteilung der Meßergebnisse
 - Beschreibung des Signals
 - Beschreibung des Pfahls
- Bewertung
 - abgenommen = 1
 - abgelehnt = 0

Mit Bezug auf die besonderen Erfordernisse einer Baustelle, bzw. des Pfahltyps, sowie die Möglichkeiten der einheitlichen Signalaufbereitung sollten die Empfehlungen der DGEG [2] in den Durchführungsregeln konkretisiert werden:

Durchführungsregeln

1. Am Pfahlkopf muß die Einleitung eines Hammerschlags in den Pfahlbeton möglich sein, der Pfahlkopf muß gesäubert sein und eine geglättete Schlagfläche muß vorbereitet sein.
2. Die Hammerschläge müssen reproduzierbar sein, eine festgelegte Anzahl gleichartiger Signale ist zu speichern.
3. Bei der Auswertung soll ein Mittelwert einer festgelegten Anzahl von Signalen gebildet werden.
4. Vergrößerungsfaktoren und Signalglättung sind für alle auszuwertenden Signale einheitlich zu wählen.

Aufgrund dieser Vereinbarung über die Durchführung der Messung kann von allen Parteien das Meßergebnis als korrekt akzeptiert werden. Die Einheitlichkeit der Signalaufbereitung ist dabei ein unbedingtes Erfordernis, um durch Vergleich bestimmte Einflüsse, z.B. des Bodens, von den Pfahleigenschaften zu trennen.

Um zu vermeiden, daß in größeren Gremien über die Bedeutung einzelner Signalverläufe gestritten wird, sollte von vornherein ein Bewertungsmuster erstellt werden, das die komplexe Signalinformation auf die interessierenden Aussagen zur Pfahlqualität reduziert.

Ein solches Bewertungsmuster kann aus einer Signalbeschreibung und einer Pfahlbeschreibung bestehen:

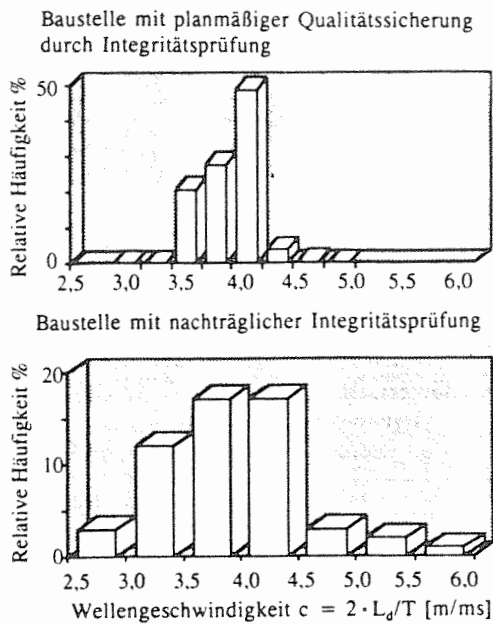


Bild 7 Relative Häufigkeiten für Wellengeschwindigkeiten

Bewertungsmuster	
Signalbeschreibung	normaler Zeitverlauf
	Reflektion vom Pfahlfuß stark
	Reflektion vom Pfahlfuß schwach
	keine Reflektion vom Pfahlfuß erkennbar
	Abweichung nach oben
	Abweichung nach unten
Pfahlbeschreibung	planmäßiger Querschnittsverlauf
	Querschnittsabnahme
	Querschnittszunahme
	geringe Wellengeschwindigkeit
	(< 3.5 m/ms) /
	sehr junger Beton
	schlechte Betonqualität
	hohe Wellengeschwindigkeit
	(> 4.5 m/ms) /
	gute Betonqualität
	alter Beton
	Pfahl zu kurz

Zusätzlich kann noch vereinbart werden, daß bei einer nicht vorhandenen Fußreflektion eine Nachprüfung mit einem härteren Stoß, z.B. durch Verwendung eines Fallgewichtes, erfolgen muß, und daß bei unklarer Signalausgabe eine Computersimulation durchgeführt werden muß.

Insbesondere, wenn Bodeneinflüsse aufgrund des Signals nicht eindeutig von Pfahleigenschaften zu trennen sind, ergibt sich bei der Durchführung einer Computersimulation (Programme wie PIT-WAP oder TNOWave stehen zur Verfügung) die Möglichkeit, die Pfahleigenschaften genauer zu ermitteln.

Als Ergebnis der Bewertung interessiert in der Regel vor allem, ob der Pfahl abgenommen oder nicht abgenommen wurde.

7. Schlußfolgerungen

Wenn die Integritätsprüfung mit der Hammerschlagmethode dazu benutzt werden soll, in Streitfällen aufgrund eines eindeutigen Bildes des im Boden verborgenen Pfahles zu entscheiden, spielt oft auch das Glauben oder Nichtglauben an die Gesetze der Physik und der eindimensionalen Wellentheorie und ihrer Anwendbarkeit in diesem speziellen Fall eine Rolle. Dies um so mehr, wenn erwartet wird, daß aus dem Signalverlauf auch geringfügige Änderungen der Pfahleigenschaften erkannt werden können.

Wenn hingegen beachtet wird, daß durch die Hammerschlagmethode eine zwar einfach anwendbare, aber deswegen auch verhältnismäßig grobe Bestimmung der Pfahleigenschaften möglich ist, können die tatsächlichen Vorteile des Verfahrens als zerstörungsfreie Prüfmethode in der Qualitätssicherung von Pfahlgründungen genutzt werden. Mit geringem Vorbereitungsaufwand ist die Prüfung von ca. 6 Pfählen in der Stunde möglich, wodurch die Methode gerade auch für Reihenuntersuchungen an großen Stichproben geeignet ist. Die Möglichkeit, durch Auswahl beliebiger, nicht vorbereiteter Pfähle nach ihrer Fertigstellung aufgrund der Integritätsprüfung das Erreichen des geplanten Gründungshorizontes zu gewährleisten, bietet zudem einen Sicherheitsgewinn, der gegebenenfalls bei der Bemessung der Pfähle berücksichtigt werden kann. Diese Leistungsfähigkeit der Methode kann sie als zumindest gleichberechtigt neben die in den bestehenden Vorschriften vorgesehenen Maßnahmen der Qualitätssicherung stellen.

Literatur

- [1] Önorm B4440 Pfähle, zitiert nach [4]
- [2] FRANKE, E./ SEITZ, J.M.(1991): Empfehlungen des Arbeitskreises 5 der DGEG, Geotechnik 14, S.139 - 153.
- [3] CEN (1991): Eurocode 7, Part 1, Geotechnical Design, General Rules, Chapter 7, Pile Foundations.
- [4] SEITZ, J.M.(1992): Low-Strain Integritätsprüfungen bei Bohrpfählen. Bautechnik 69, S.
- [5] Groupement Belge de la Société Internationale de Mécanique des Sols et des Travaux de Fondation, (1987): Essais dynamiques de pieux intégrité et capacité portante. Journées d'études, Nov. Bruxelles
- [6] BALTHAUS, H.-G./ Meseck, H. (1984): Integritätsprüfungen an Ortbetonpfählen. TIS Tiefbau Ingenieurbau Straßenbau, S.470 - 479.
- [7] WHEELER, P.(1992): Stresswave competition, Ground Engineering, Nov.
- [8] ULRICH, G./ STOCKER, M. (1983): Integritätsuntersuchung an präparierten Betonpfählen. DGEG-Symposium Meßtechnik im Erd- und Grundbau, München.