

PFAHLTESTS – MODERN DYNAMISCH UND / ODER KONSERVATIV STATISCH

J. Stahlmann, F. Kirsch, M. Schallert
O. Klingmüller,
K.-H. Elmer

ZUSAMMENFASSUNG

Der vorliegende Beitrag behandelt die heute hauptsächlich eingesetzten messtechnischen Verfahren zur Bestimmung der Integrität und Tragfähigkeit von Pfählen. Der Fokus liegt dabei auf den dynamischen Prüfmethode 'low-strain' und 'high-strain' Verfahren, deren Grundlagen in Kap. 3 ausführlich erläutert sind. Nach der Beschreibung der Durchführung und Auswertung sind die Anwendungsmöglichkeiten und –grenzen formuliert. Ein Vergleich der Verfahren zur Tragfähigkeitsbestimmung zeigt bei Beachtung wichtiger Grundsätze die gute Übereinstimmung deren Ergebnisse. Ist diese nicht gegeben, sollten weitere Untersuchungen erfolgen, um sichere Aussagen zu erhalten. Es kann resümiert werden, dass die dynamische Pfahlprobelastung vor allem eine erhebliche Reduktion des erforderlichen Aufwandes gegenüber einer statischen aber auch einer statnamischen Probelastung bedeutet. Dadurch wird ermöglicht, dass eine große Anzahl von Pfählen pro Tag (ca. 10 Pfähle) geprüft werden kann, was eine weitere Verringerung der Kosten zur Folge hat. Durch die Möglichkeit, eine über ein gesamtes Baufeld verteilte, große Anzahl von Pfählen zu testen, kann ein genauer Aufschluss über den Erfolg einer Pfahlgründungsmaßnahme gewonnen und somit die erzielbare Sicherheit wesentlich erhöht werden.

1 EINLEITUNG

Die dynamischen Pfahltests kommen seit über 25 Jahren in Deutschland zum Einsatz und haben sich im Laufe der Zeit bei den verschiedensten Gründungselementen bewährt. Da auch weiterhin neue Erkenntnisse und Erfahrungen gesammelt und umfangreiche Forschungstätigkeiten durchgeführt werden, soll mit diesem Beitrag der Status-quo der dynamischen Pfahlprüfungen vor dem Hintergrund der Entwicklungen der vergangenen Jahre dargestellt werden.

Das Anliegen der Autoren ist es, Theorie und Praxis der Verfahren für den Einzelnen, der durch Ausschreibung, Beauftragung oder Bewertung der Ergebnisse damit in Berührung kommt, transparent zu beschreiben, um die zukünftige Anwendung effizienter zu gestalten. Ein wesentlicher Aspekt zum Erreichen dieses Zieles ist die frühzeitige Einbindung der Pfahlprüfer in die Planung der Gründung. So können die Prüfverfahren optimal in den Bauablauf integriert und mögliche Maßnahmen bei eventuell auftretenden Störungen wie z.B. Pfähle mit nicht ausreichender Unversehrtheit oder Tragfähigkeit bereits von Beginn an diskutiert werden.

Im Folgenden ist zunächst eine Übersicht über die allgemeine Unterscheidung von Pfahlssystemen und Herstellverfahren gegeben, die ein Kriterium bei der Auswahl der Prüfverfahren darstellen wobei hier nicht der Anspruch auf Vollständigkeit erhoben werden soll.

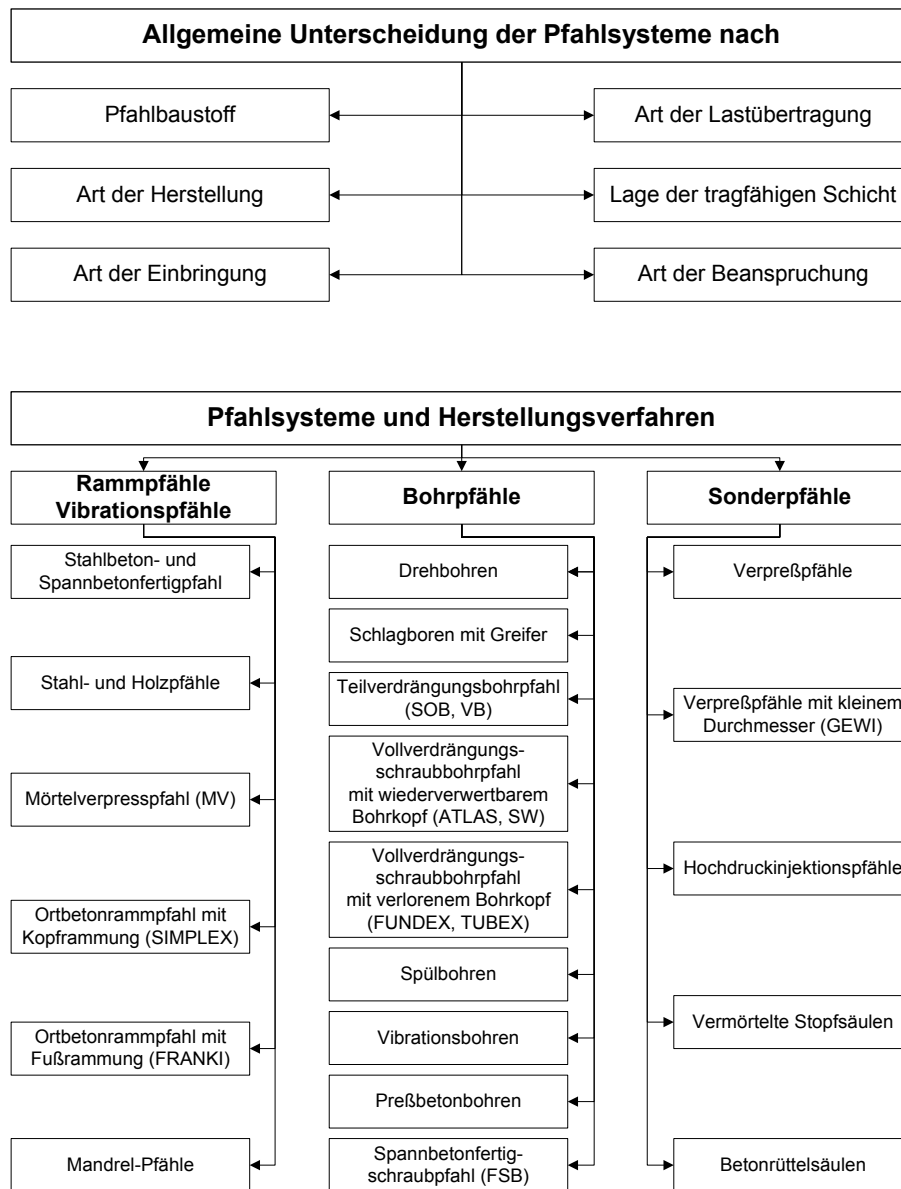


Abbildung 1: Überblick der Pfahlsysteme und Herstellverfahren

2 NORMUNG DER PFAHLPRÜFMETHODEN

Vor dem Hintergrund einer Harmonisierung der europäischen Normung wurden die 'Empfehlungen für statische und dynamische Pfahlprüfungen' herausgegeben (DGGT, 1998), die von mit den Mitgliedern des Arbeitskreises 2.1 der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik erarbeitet wurden. Das Heft, welches die Durchführung, Auswertung und Interpretation der Ergebnisse von statischen und dynamischen Pfahlprobelastungen erläutert, enthält Anweisungen für den Praktiker und beschreibt die erforderlichen theoretischen Grundlagen. Die Ausgabe von 1998 wird derzeit überarbeitet und durch das 'cross-hole' Verfahren zur Integritätsprüfung sowie die Rapid Load Tests (statnämische Probelastung) zur Ermittlung der Tragfähigkeit erweitert.

In Deutschland existiert derzeit keine Normung oder allgemeingültige Vorschrift zur Durchführung von Rapid Load Tests (statnämische Probelastung). Im Jahre 2000 wurde durch die Japanese Geotechnical Society (JGS) ein Entwurf für eine Norm zur Durchführung von statnämischen Probelastungen vorgelegt.

Einige Verfahren der Pfahlprüfung sind in vielen Ländern in die jeweilige nationale Normung aufgenommen. In der deutschen und europäischen Normung finden sich Hinweise zu den Pfahlprüfverfahren in den jeweiligen Herstellungsnormen. Darüber hinaus sind die Ausführungen in DIN 1054 zu beachten. In Tabelle 1 sind die heute gültigen Normen den bisherigen Normen gegenübergestellt.

Tabelle 1: Gegenüberstellung der bisherigen Normen mit den gültigen europäischen Normen

bisherige Normen		neue (europäische) Normen
DIN 1054:1976-11 „Zulässige Belastung des Baugrunds“	↔	DIN 1054:2003-01 „Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau“
DIN 4014:1990-03 „Bohrpfähle“	↔	DIN EN 1536 „Bohrpfähle“
DIN 4026:1975-08 „Ramppfähle“	↔	DIN EN 12699 „Verdrängungspfähle“
DIN 4128:1983-04 „Verpresspfähle mit kleinem Durchmesser“	↔	DIN EN 14199 „Pfähle mit kleinen Durchmesser (Mikropfähle)“
		DIN EN 12794 „Vorgefertigte Gründungspfähle aus Beton“

3 EINDIMENSIONALE WELLENAUSBREITUNG

3.1 Theoretische Grundlagen

Die dynamische Untersuchung eines Pfahls im Erdboden stellt ein Wellenausbreitungsproblem des elastischen Halbraumes dar. Physikalisch führt die lokale Belastung eines Kontinuums auf eine Störung, die von der Quelle emittiert und durch fortschreitende Wellen mit endlicher Geschwindigkeit in alle Bereiche des Kontinuums übertragen wird. Bei diesem Prozess wird mechanische Energie in das Kontinuum abgestrahlt und durch Materialdämpfung in Wärme umgewandelt.

Ausbreitungsprobleme enthalten typischerweise Wellenlängen, die kürzer sind als charakteristische Abmessungen des Systems. Durch Reflexion an Begrenzungsflächen und Schichtgrenzen von Pfahl und Erdboden treten Überlagerungen von gleichen fortschreitenden Wellen mit unterschiedlichen Ausbreitungsrichtungen auf, die zu stehenden Wellen bzw. Schwingungen führen. Kennzeichnend für stehende Wellen ist der lokale Austausch von elastischer und kinetischer Energie, wobei kein Energietransport über den lokalen Bereich hinaus stattfindet.

Die Einbettung des Pfahls in den umgebenden Boden ermöglicht eine Interaktion von Pfahl und Boden mit der Energieabstrahlung in den Boden, die wie eine Dämpfung auf die Pfahlschwingungen wirkt. Das dynamische Modell eines Pfahls im Boden führt damit auf den dreidimensionalen Halbraum mit entsprechend aufwendigen Lösungen.

Die Ausbreitung mechanischer Wellen in einem Kontinuum kann durch die Vektorgleichung des dynamischen Grundgesetzes beschrieben werden

$$\mu \Delta u + (\lambda + \mu) \text{grad}(\text{div} u) + f = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

mit dem Laplace-Operator Δ . Die Vernachlässigung der eingepprägten Körperkräfte f und die Einführung der elastischen Potentiale ϕ und ψ

$$u = \text{grad } \Phi + \text{rot } \Psi$$

führt mit $\text{div } \psi = 0$ auf die vektorielle Gleichung:

$$\text{grad} \left[(\lambda + 2\mu)\Delta\Phi - \rho \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} \right] + \text{rot} \left[\mu\Delta\Psi - \rho \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} \right] = 0.$$

Die hyperbolische Differentialgleichung enthält als Lösungen die zwei Wellengleichungen (a) der Kompressionswellen mit dem als Volumendehnung darstellbaren Potential ϕ mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit für Kompressionswellen c_P und (b) der Scherwellen mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit für Scherwellen c_S , die wesentlich kleiner ist als c_P .

$$(a) \quad \Delta\Phi = \frac{1}{c_P^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2}, \quad c_P = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (b) \quad \Delta\Psi = \frac{1}{c_S^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2}, \quad c_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

Zur Erfüllung der Randbedingungen treten an der freien Oberfläche des Halbraumes zusätzlich Rayleigh-Wellen auf, deren Einfluss auf die Oberfläche begrenzt ist und deren Ausbreitungsgeschwindigkeit $c_R < c_S$ beträgt.

3.2 Eindimensionale Wellengleichung

Die Reduktion der Pfahldynamik auf ein einfaches eindimensionales Pfahl-Modell erfordert zunächst die Berücksichtigung der Energieabstrahlung in den Halbraum des Bodens z.B. durch Zusatzdämpfer. Ebenfalls müssen die zugrunde gelegten Wellenlängen wesentlich größer als die Querabmessung des Pfahles sein, da sonst Querschwingungen auftreten.

Zur Darstellung der Ausbreitung eindimensionaler longitudinaler Wellen in einem Stab wird an einem differentiellen Element des ungedämpften Stabes das Gleichgewicht der dynamischen Kräfte aus Schnittkräften und Trägheitskraft angesetzt (Abb. 2).

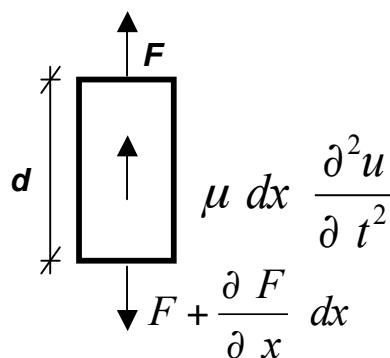


Abbildung 2: Gleichgewicht der dynamischen Kräfte am Stabelement

Bei konstantem Querschnitt A und konstanter Massenbelegung folgt für das Gleichgewicht

$$F + \frac{\partial F}{\partial x} dx = F + \mu dx \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}.$$

Mit der Längskraft F : $F = E \cdot A \cdot \varepsilon = E \cdot A \cdot \frac{\partial u}{\partial x}$ und der Massenbelegung $\mu = \rho \cdot A$

ergibt sich die partielle Differentialgleichung 2.Ordnung

$$\frac{\partial \left(E \cdot A \cdot \frac{\partial u}{\partial x} \right)}{\partial x} dx = \rho \cdot A dx \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}.$$

Durch Umformung folgt daraus die eindimensionale Wellengleichung

$$c_0^2 \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit für eindimensionalen Wellen

$$c_0 = \sqrt{\frac{E}{\rho}}.$$

Bei der Ausbreitung longitudinaler Wellen in einem Stab, dessen Querdehnung nicht behindert wird, treten sowohl Verschiebungen in Längsrichtung als auch Dehnungen in Querrichtung auf, die zu einer Reduzierung der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit c_0 gegenüber den räumlichen Kompressionswellen c_P führen. Diese longitudinalen Wellen werden als Dehnwellen bezeichnet.

Die longitudinale Ausbreitung eines elastischen Stoßes in einem Pfahl läßt sich nicht mehr durch eindimensionale Dilatations- bzw. Dehnwellen beschreiben, wenn mindestens eine der wesentlichen Wellenlängen des zusammengesetzten Wellenzuges kleiner ist als das Doppelte der Querabmessung H des Pfahles und somit Querschwingungen auftreten. Dann ist für realitätsnahe Simulationen eine dreidimensionale Modellierung unabhängig von der Pfahllänge erforderlich. Die wesentlichen Auswirkungen dieser Quereinflüsse sind in Abb. 3 dargestellt.

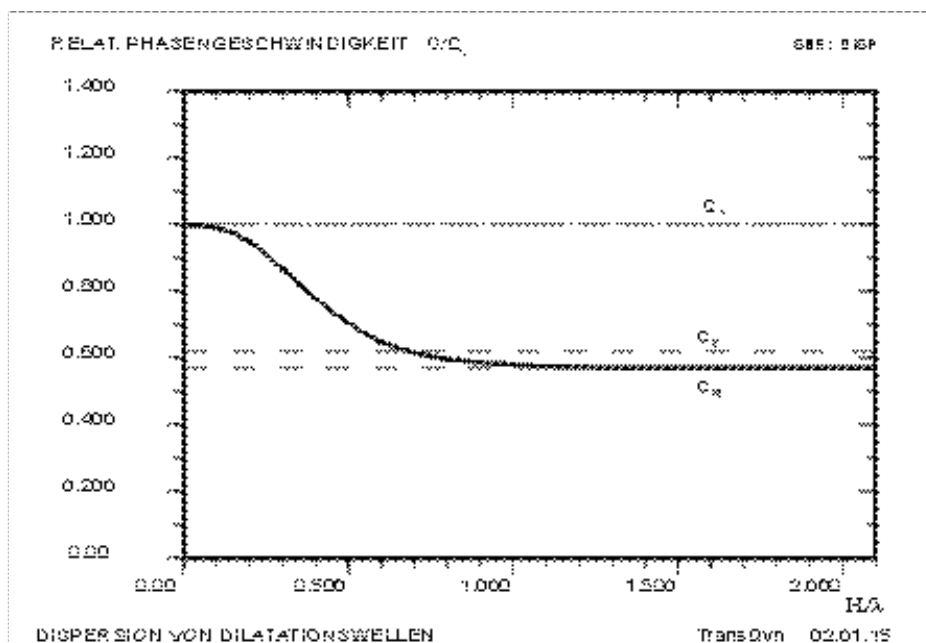


Abbildung 3: Physikalische Dispersion von Dehnwellen in einem Stab (ELMER, 2002)

Für höherfrequente Anteile mit kleineren Wellenlängen ist der Ausbreitungsvorgang physikalisch dispersiv, d.h. die longitudinale Ausbreitungsgeschwindigkeit wird als Phasengeschwindigkeit bezeichnet. Sie ist frequenzabhängig und nimmt mit der Frequenz bzw. mit der Wellenlänge ab von c_0 über c_S bis zur Ausbreitungsgeschwindigkeit für Rayleighwellen c_R .

Die Materialdämpfung des Pfahles kann durch eine zusätzliche geschwindigkeitsabhängige viskose Dämpfungskraft mit der Viskosität η_p im Kräftegleichgewicht erfasst werden

$$F = \left(E \cdot \varepsilon - \eta_p \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} \right) \cdot A.$$

Die Interaktion entlang des Pfahlmantels und am Pfahlfuß mit dem umgebenden Boden führt durch Abstrahlung von mechanischer Energie in den Halbraum zu einer wesentlichen Abnahme der Schwingungsamplituden des Pfahles. Diese Energieabstrahlung wird als geometrische Dämpfung bezeichnet und kann im eindimensionalen Modell näherungsweise durch zusätzliche Dämpfer am Fuß und entlang des Pfahlmantels simuliert werden, um dem schwingungsfähigen System Energie zu entziehen.

Das Kräftegleichgewicht der Bewegungsgleichung wird zur Berücksichtigung der Interaktion des Pfahles mit dem Boden durch zusätzliche äußere viskose Dämpfungskräfte und elastische Federkräfte erweitert zu

$$F = \mu dx \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - k \cdot u - b \cdot \frac{\partial u}{\partial t}.$$

Die Berücksichtigung der Einbettung des Pfahles in den Boden und der Materialdämpfung führt auf die erweiterte Wellengleichung des eindimensionalen Modells

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \frac{k}{A \cdot \rho} \cdot u + \frac{b}{A \cdot \rho} \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{E}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{\eta_p}{\rho} \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} = 0.$$

Grundsätzlich ist hierbei zwischen der dissipativen Materialdämpfung und der Abstrahldämpfung als eigentliche Energieabstrahlung in den Halbraum zu unterscheiden.

3.3 Numerische Modelle

Bei der Modellierung der Wellenausbreitung im Pfahl und im umgebenden Boden durch ein dreidimensionales Finite-Element Modell werden die wesentlichen Vorgänge der Interaktion von Pfahl und Boden mit Energieabstrahlung und Reflexionen an Schichtgrenzen von vorn herein durch das numerische FE-Modell erfasst.

Realitätsnahe Modelle erfordern jedoch eine sehr große Anzahl von Elementen und Zeitschritten, um die auftretenden Fehler der räumlichen und zeitlichen Diskretisierung vernachlässigen zu können. So führt die räumliche Diskretisierung nach Abb. 4 sowohl für die Modellierung von Punktmassen als auch bei der Modellierung von verteilten Massen im FE-Modell zu einer numerischen Dispersion als frequenzabhängige Abnahme der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit von der Anzahl der Elemente pro Wellenlänge. Entscheidend ist damit die Wellenlänge der höchsten Frequenz im numerischen Modell.

Bei Stoßerregung mit einem Rechteckimpuls ergibt sich aus der Stoßdauer t_s des Impulses eine Grenzfrequenz durch die erste Nullstelle im Spektrum des Impulses von

$$f_{Grenz} = \frac{1}{t_s}, \text{ die als obere Grenzfrequenz herangezogen werden kann.}$$

Üblicherweise werden etwa 10 Elemente pro Wellenlänge der höchsten interessierenden Frequenz angesetzt zusammen mit etwa 10 Zeitschritten pro Periode $T = 1/t_s$. Die Forderungen führen schnell auf sehr große Systeme, die auch für heutige Rechner sehr aufwändig sind.

Zur Vermeidung von Reflexionen der Wellen an den künstlichen äußeren Rändern von FE-Modellen sind nichtreflektierende Elemente bzw. Ränder vorzusehen, um die Abstrahlungsbedingung der Energie in den Halbraum zu erfüllen.

Numerische Modelle mit der Randelemente Methode erfüllen diese Bedingungen von Haus aus und ermöglichen wesentlich kleinere numerische Modelle.

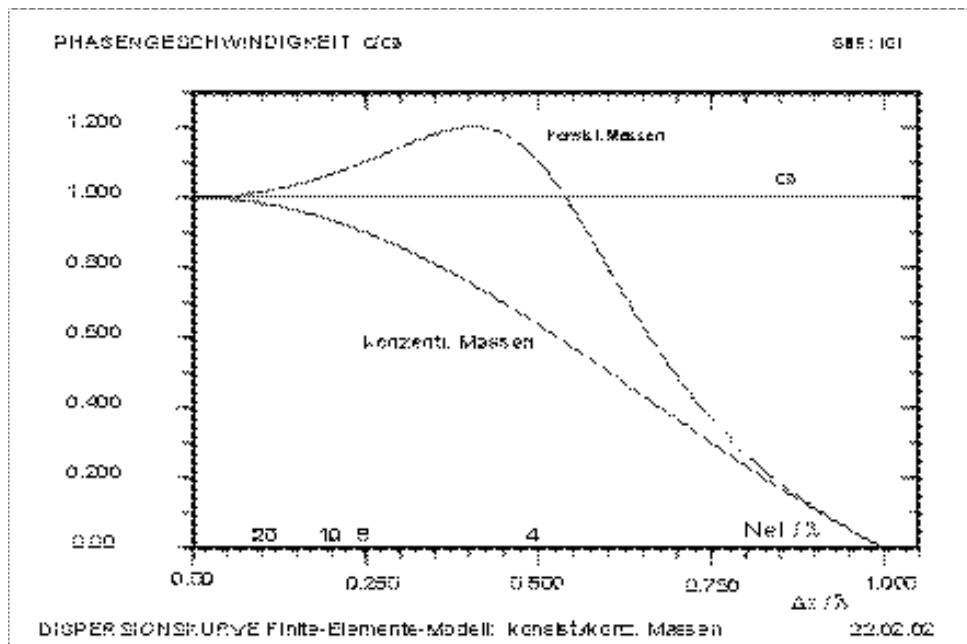


Abbildung 4: Numerische Dispersion von FE-Modellen bei konzentrierten und verteilten Massenmodellen in Abhängigkeit von der Anzahl der Elemente pro Wellenlänge.

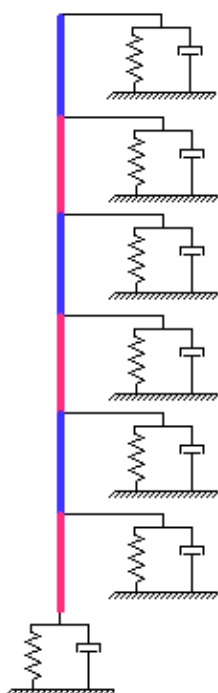


Abbildung 5: Eindimensionales FE-Modell mit Stabelementen sowie Federn und Dämpfern zur Simulation der Abstrahlungsdämpfung und Interaktion mit dem Baugrund

Das eindimensionale Modell der Wellenausbreitung im Pfahl besteht nach Abb. 5 aus linearen Stabelementen, zusätzlichen elastischen Einzelfedern und viskosen Einzeldämpfern zur Berücksichtigung der Abstrahlungsdämpfung und Interaktion mit dem Baugrund. Diese Zusatzelemente sind an die jeweiligen Knoten angekoppelt und damit an die vertikalen Verschiebungen und Geschwindigkeiten in den Knoten. Auch das eindimensionale FE-Modell unterliegt den Diskretisierungsfehlern und Einschränkungen nach Abb. 4. Der numerische Aufwand ist dagegen wesentlich geringer, so daß eine feine Diskretisierung des eindimensionalen Wellenausbreitungsvorganges von Dehnwellen möglich ist.

Die allgemein frequenzabhängige Interaktion mit dem Baugrund sowie die Abstrahlungsdämpfung werden dagegen durch übliche Ansätze für Ersatzfedersteifigkeit und Dämpfungsfaktor nur näherungsweise berücksichtigt.

4 METHODEN ZUR PFAHLPRÜFUNG

Prüfungen der axialen Grenztragfähigkeit und der Pfahlintegrität können grundsätzlich durch verschiedene Verfahren erfolgen (vgl. Abb. 6).

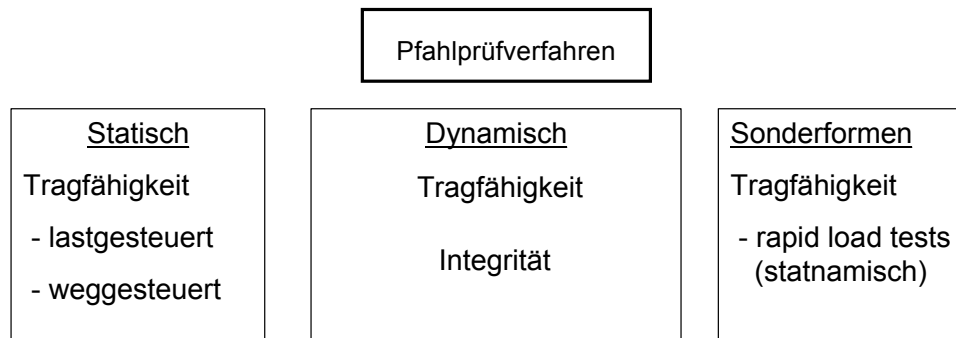


Abbildung 6: Methoden der Pfahlprüfung

Zur Bestimmung der äußeren Tragfähigkeit werden heute neben der klassischen statischen Probelastung verstärkt dynamische Probelastungen und in jüngster Zeit auch 'rapid load' Tests in Form der statnamischen Probelastung in Deutschland ausgeführt. Die Bestimmung der Unversehrtheit von Pfählen kann die Ableitung von Aussagen zur inneren Tragfähigkeit ermöglichen. Zu den am meisten verbreiteten Verfahren zählen hierbei die Stoßprüfung ('low-strain' Methode – Standard-Verfahren) und die Ultraschallmessung ('cross-hole' Verfahren). In seltenen Fällen und hauptsächlich zur Gewinnung zusätzlicher Informationen werden Kernbohrungen durchgeführt oder Pfähle freigelegt. Eine Beschreibung der einzelnen Verfahren der Integritätsprüfung ist in PLAßMANN, 2001 enthalten.

Das Verfahren der dynamischen Pfahlprüfungen wurde Anfang der siebziger Jahre in den USA entwickelt. Seit dieser Zeit wird das Verfahren auch in Deutschland eingesetzt, wobei die Bedeutung in den letzten Jahren stark gewachsen ist. Durch eine Vielzahl an Pfahlprüfungen an unterschiedlichsten Pfahlsystemen und Elementen ähnlicher Geometrie wurden dabei viele neue Wege beschritten und interessante Erkenntnisse gewonnen, die in regelmäßigen Abständen in Veröffentlichungen eingegangen sind [z.B. SIMONS et al., 1983, BALTHAUS, 1986, HARTUNG et al., 1993, RODATZ et al., 1996, RAUSCHE, KLINGMÜLLER, u.v.m.].

4.1 'low-strain' Integritätsprüfung

Das Verfahren der Integritätsprüfung nach der 'low-strain' Methode wird zur Überprüfung der Qualität von Pfählen eingesetzt. Dabei kann es einerseits zum routinemäßigen Nachweis der ordnungsgemäßen Herstellung oder andererseits zur gezielten Überprüfung von Pfählen dienen, die während der Herstellung Auffälligkeiten aufwiesen und daher einer Kontrolle ihrer Unversehrtheit unterzogen werden sollen. Mit der 'low-strain' Integritätsprüfung können die im Folgenden aufgeführten Schäden bzw. Unregelmäßigkeiten erfasst werden:

- Fehlstellen entlang des Pfahlschaftes in unterschiedlichen Ausprägungsformen,
- Scherflächen unbewehrter Pfähle,
- Querschnittsminderungen, beispielsweise an Schichtgrenzen,
- Abweichungen von der planmäßigen Solllänge,
- Geringe Wellenausbreitungsgeschwindigkeit als Hinweis auf mangelhafte Betonqualität,
- Einschnürungen infolge fehlerhafter Herstellung.

4.1.1 Prinzip

Die Integritätsprüfung nach dem 'low-strain' Verfahren beruht auf der Einleitung eines Stoßimpulses in den Pfahlkopf und der Messung der Bewegungen in Form von Beschleunigung oder Geschwindigkeit des Pfahlkopfes. Aus diesen Bewegungen kann die Ausbreitung der Stoßwelle bzw. ihrer Reflexionen nachvollzogen werden. Durch den Aufprall eines speziellen Hammers wird eine Wellenfront in den Pfahl induziert, die sich mit einer bestimmten Ausbreitungsgeschwindigkeit c [m/s] fortpflanzt. Der vom Hammer eingeleitete Impuls durchläuft den Pfahl, wird am Pfahlfuß reflektiert und erreicht als Echo wieder die Messebene am Pfahlkopf. Die Zeit bis zum Eintreffen der Welle, meist als Laufzeit bezeichnet, ergibt sich aus (vgl. Abb. 7)

$$t = \frac{2 \cdot l}{c}$$

An Änderungen der Querschnittseigenschaften, wie Elastizitätsmodul, Dichte, Querschnittsfläche oder Bodenwiderstand, treten ebenfalls Wellenreflexionen auf, die ihrer Tiefenlage entsprechend nach einer bestimmten Zeit am Pfahlkopf gemessen werden.

Üblicherweise wird der Geschwindigkeits-Zeit-Verlauf zur Beurteilung der Pfahlintegrität herangezogen. Abb. 7 zeigt schematisch die Wellenausbreitung im Pfahl.

In Tabelle 2 sind Werte für die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit für den in der Praxis auftretenden Messbereich angegeben.

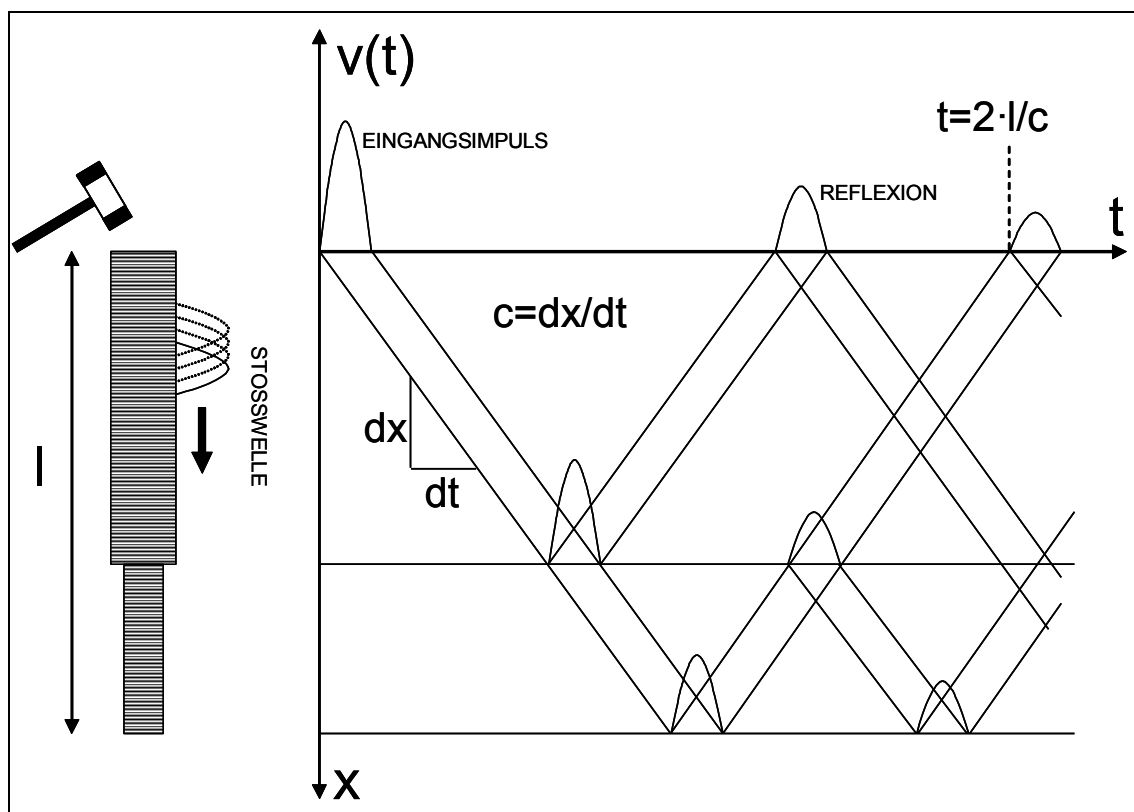


Abbildung 7: Wellenausbreitung bei der Integritätsprüfung nach dem 'low-strain' Verfahren

Tabelle 2: Zusammenhang zwischen Wellengeschwindigkeit und Elastizitätsmodul bei dynamischer Beanspruchung für $\rho = 2,45 \text{ t/m}^3$

Wellengeschwindigkeit c [m/s]	Elastizitätsmodul bei dynamischer Beanspruchung E_{dyn} [MPa]	entspricht etwa der Betonfestigkeitsklasse	Elastizitätsmodul nach DIN 1045 E [MPa]
3.000	22.050	B5	18.000
3.250	25.878	B10	22.000
3.500	30.013	B15	26.000
3.750	34.453	B25	30.000
4.000	39.200	B35	34.000
4.250	44.253	B55	39.000

4.1.2 Praxis der Testdurchführung

Zur Durchführung der Integritätsprüfung ist es erforderlich, dass der Pfahlkopf frei zugänglich und bis auf den gesunden Beton abgestemmt ist. Überbeton, der zu einem vergrößerten Pfahlquerschnitt führt, ist zu entfernen und der Pfahlkopf von losen Teilen zu säubern. Der Beton muss eine ausreichende Festigkeit zur Einleitung des Stoßimpulses aufweisen. Die Festigkeitsentwicklung ist stark von der Betonzusammensetzung abhängig, in der Regel sollte jedoch zwischen Pfahlbetonage und Prüfzeitpunkt ein Zeitraum von sieben Tagen nicht unterschritten werden.

Der Beschleunigungsaufnehmer ist bei der Messung kraftschlüssig möglichst starr an die Pfahlkopfoberfläche anzukoppeln, um die Bewegungen so genau wie möglich zu erfassen. Die praktische Durchführbarkeit macht jedoch in der Regel eine völlig starre Ankopplung unmöglich, so dass der Beschleunigungsaufnehmer entweder von Hand angepresst oder unter Verwendung eines Spezialwachses mit dem Pfahlkopf verbunden wird. Zur Impulseinleitung werden spezielle Hämmer verwendet. Es ist gute Testpraxis, die Lage der Impulseinleitung über den Pfahlkopf verteilt zu variieren, um die Eindeutigkeit des Messsignals zu gewährleisten.

Auf seinem Weg durch den Pfahl verliert die Stoßwelle an Energie, was allgemein unter dem Begriff Dämpfung zusammengefasst wird. Zusätzlich zur Dämpfung kann die gemessene Bewegung des Pfahlkopfes aber auch durch Störungen beeinflusst sein. Mitschwingende Bewehrung, Oberflächenrauigkeit des Pfahlmantels oder ähnliches führen zu einem unruhigen Signalverlauf. Daher wird das Messsignal vor der eigentlichen Auswertung durch Verstärkungsfunktionen und Filter im Hinblick auf eine Zuschärfung der Aussagemöglichkeiten angepasst.

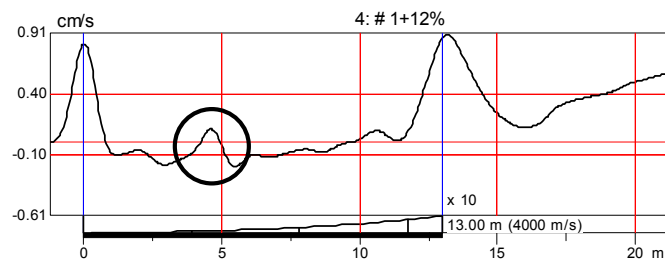
4.1.3 Auswertung der Messsignale

Stand der Technik bei der Analyse der Messdaten ist die visuelle Begutachtung des Geschwindigkeits-Zeitverlaufs. Dabei wird das Messsignal in eine der in den Empfehlungen des Arbeitskreises 2.1 (DGGT, 1998) festgelegten Ergebnisklassen eingeordnet. Diese sind:

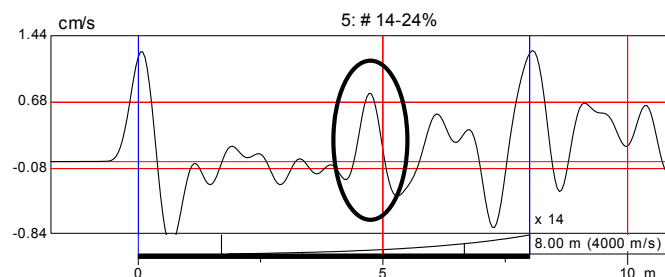
- Klasse 1: Der Pfahl ist in Ordnung
- Klasse 2: Der Pfahl ist nicht in Ordnung, geringe Qualitätsminderung
- Klasse 3: Der Pfahl ist nicht in Ordnung, erhebliche Qualitätsminderung
- Klasse 4: Das Messsignal ist nicht auswertbar

Dabei ist die Anwendung der Klasse 2 problematisch, weil hier im Einzelfall zu entscheiden ist, ob und - wenn ja - welche Sanierungsmaßnahmen zu ergreifen sind, während eine Einordnung in Ergebnisklasse 3 in der Regel dazu führt, dass der Pfahl ohne Sanierung nicht zum Lastabtrag herangezogen wird. Die bislang mit der Ordnungszahl 4 benannte Ergebnisklasse soll in der Neuauflage der Empfehlungen mit 0 bezeichnet werden.

Hinweise zur einheitlichen Vergabe der Ergebnisklassen sind in KIRSCH, F.; KLINGMÜLLER, O. (2003) zu finden. Zur Veranschaulichung sind in Abb. 8 Beispiele für die Ergebnisklassen 2 und 3 angegeben.



EK 2



EK 3

Abbildung 8: Unterschiedliche Ergebnisklassen der Integritätsprüfung

4.1.4 Anwendungsmöglichkeiten und –grenzen

Der optimale Anwendungsbereich der Methode umfasst Ortbetonpfähle in nichtbindigen Böden mit einem Verhältnis von Durchmesser zu Länge größer als 1:30 und einer Länge von 5 m bis 20 m. Mit der 'low-strain' Integritätsprüfung werden Fehlstellen entlang des Pfahlschaftes, Scherflächen, Querschnittsminderungen, Längenabweichungen und Zonen mangelhafter Betonqualität erkannt.

Die Bestimmung der Länge einer Bewehrung ist nicht möglich, auch wenn der Bewehrungskorb eine starke Fußaussteifung aus Flacheisen besitzt. Die Kontrolle von Bohrpfahlwänden oder Schlitzwänden muss im Einzelfall geprüft werden. Allerdings muss hier eine Querschnittsverminderung nicht unbedingt auf eine Undichtigkeit hinweisen. Die Längenbestimmung von Spundwänden ist nur dann möglich, wenn der Wellendurchgang nicht durch Gurtungen oder Anker gestört ist, die Wände einseitig abgegraben sind und ihre Einbindelängen nicht zu groß sind. Stahlpfähle und Verbausträger können im Allgemeinen nicht geprüft werden. Bei Mikropfahl-

len (z.B. Gewi-Stäbe, $d=50$ mm mit Verpresskörper und Gesamtdurchmesser unter 200 mm) ist die Prüfung in der Regel nicht möglich.

Das Verfahren ist nur für die Bestimmung der Unversehrtheit von Pfählen geeignet. Aussagen über die Tragfähigkeit sind nur indirekt möglich, wenn Querschnittsänderungen auch Auswirkungen auf das Tragverhalten nach sich ziehen. Aufgrund der Unsicherheiten bei der Bestimmung der Eingangswerte ist das Verfahren als Abrechnungsgrundlage beispielsweise für den Betonverbrauch auf einer Baustelle nicht geeignet.

4.1.5 Qualitätskontrolle der Pfahlprüfer

Aus obigen Ausführungen wird ersichtlich, dass die Durchführung und Auswertung von Integritätsprüfungen nach dem 'low-strain' Verfahren fundierte Fachkenntnis und ausreichende Erfahrung in der Ergebnisanalyse voraussetzt. Detaillierte Kenntnisse der Herstellungsverfahren der unterschiedlichen Pfahlsysteme sind dabei ebenso erforderlich wie Grundlagenwissen im Grund- und Spezialtiefbau. Daher sollten die mit Integritätsprüfungen betrauten Ingenieure regelmäßig an Schulungen und Fortbildungsveranstaltungen teilnehmen. Mit dem Unterausschuss für dynamische Prüfmethode des Arbeitskreises 'Pfähle' der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V. existiert ein Gremium, dessen Mitglieder sich zum offenen Umgang - selbstverständlich nur nach Rücksprache mit dem Auftraggeber und gegebenenfalls unter Anonymisierung der Baumaßnahme - mit den Ergebnissen ihrer Untersuchungen verpflichtet haben. Bei Bedarf können einzelne Mitglieder dieses Gremiums zu einer Begutachtung von Messsignalen herangezogen werden. Es ist vorgesehen, eine Qualitätssicherung der Integritätsprüfung dahingehend einzuführen, dass eine unabhängige und öffentliche Institution - beispielsweise ein Hochschulinstitut - einzelnen Prüfern nach erfolgreicher Teilnahme an Fortbildungsmaßnahmen inkl. eines Befähigungsnachweises ein Zertifikat als Pfahlprüfer ausstellt.

Denn obwohl die Testdurchführung durchaus einfach und schnell zu erlernen ist, bedarf sowohl die Durchführung vor Ort als auch die anschließende Signalanalyse einer ausreichenden Qualifikation.

Pfähle werden immer noch mit einer sehr viel größeren Sicherheit bemessen, als es den Bemessungsvorgaben entspricht. Die Belastungen werden konservativ angegeben, die Bodenparameter werden aus den Baugrunduntersuchungen konservativ abgeschätzt. Auch die tatsächliche innere Tragfähigkeit wird oft nicht vollständig ausgenutzt. Trotz einer eingeschränkten Pfahlqualität, wie sie in vielen Fällen durch eine Integritätsprüfung nachgewiesen wurde, kommt es daher oft nicht zu Schäden.

Dabei kann die Methode bei regelmäßigem Einsatz dazu beitragen, aufwendige Sanierungsmaßnahmen im Schadensfall zu verhindern und das noch immer unnötig hohe Sicherheitsniveau der Pfahlbemessung absenken zu helfen. Eine erfolgreiche Integritätsprüfung weist nämlich nicht nur die Qualität des Pfahles und damit seine innere Tragfähigkeit nach, sondern bestätigt gleichzeitig durch den Nachweis der Querschnittskonstanz und der planmäßigen Länge indirekt auch seine äußere Tragfähigkeit.

Bei Verwendung partieller Sicherheitsfaktoren in den neuen Sicherheitskonzepten (EC7 oder DIN 1054-100) bestünde die Möglichkeit, die durch die routinemäßige Integritätsprüfung gewonnene zusätzliche Sicherheit zu bewerten und ihre Durchführung mit einer Reduktion des be-

treffenden partiellen Faktors zu honorieren. Voraussetzung dafür wäre, dass die Integritätsprüfung durch die Planung als Element der Qualitätssicherung in das Qualitätsmanagement der Tiefgründung eingebunden und von unabhängigen qualifizierten Ingenieuren durchgeführt wird.

4.2 'high-strain' Tragfähigkeitsprüfung

Die dynamische Pfahlprobelastung nach dem 'high-strain' Verfahren ist eine geeignete Methode, um Aussagen über die Tragfähigkeit von Pfählen treffen zu können. Das Verfahren wird in Deutschland alternativ und ergänzend zu statischen Probelastungen angewendet. Unterschiedliche Möglichkeiten zur Qualitätssicherung durch dynamische Probelastungen sind beispielsweise in HUCH et al., 1999, KIRSCH et al., 2001 und SCHALLERT et al., 2003 gegeben.

Grundsätzlich bestehen bei der Anwendung des Verfahrens verschiedene Möglichkeiten der Ermittlung der Tragfähigkeit. Bei den im Folgenden beschriebenen Möglichkeiten wird die statische Tragfähigkeit aus dem Verhalten unter dynamischer Beanspruchung bestimmt.

1. *Rammbegleitende Messung* (Rammpfähle und Spundbohlen)
Ermittlung von Tragfähigkeitsänderungen über die Rammtiefe bereits während der Herstellung durch die kontinuierliche messtechnische Begleitung des Rammvorgangs
2. *End-of-Driving-Test* (Rammpfähle und Spundbohlen)
Ermittlung der Tragfähigkeit des Systems durch Auswertung der letzten Schläge (Prüfschläge) des Rammbaren von einer rammbegleitenden Messung
3. *Restrike-Test* (Rammpfähle und Spundbohlen, Bohr- (Ortbeton-) pfähle)
Ermittlung der Tragfähigkeit des Systems nach ausreichender Standzeit bzw. Hydratationszeit (> 10 Tage) durch wenige Prüfschläge

In vielen Fällen ist mit zunehmender Standzeit eines Pfahles nach dessen Herstellung mit einem Tragfähigkeitszuwachs (*Setup Effect*) zu rechnen, der in Abhängigkeit vom Pfahlssystem sowie vom anstehenden Boden bis ca. 50% der ermittelten Anfangstragfähigkeit zum Zeitpunkt der Herstellung betragen kann. Während einer Rammung wird der den Pfahl umgebende Boden gestört, so dass sich zunächst geringe Widerstandskräfte am Pfahlmantel entwickeln. Dies begünstigt den Rammfortschritt und wird bei Ortbetonrammpfählen durch Fußplatten mit Überschnitt (z.B. Simplexpfahl) bewusst genutzt. Nach einer Standzeit von einigen Tagen bis Wochen verfestigt sich der Boden im Mantelbereich, so dass die eingeleitete Belastung auch über Mantelreibungskräfte abgetragen werden kann. In bestimmten Fällen können zeitabhängige Vorgänge im Boden jedoch auch zur Tragfähigkeitsreduktion führen. Um diese zeitabhängigen Effekte zu erfassen und gezielt zu nutzen, sollten die betrachteten Pfähle nach einiger Zeit einem erneuten *Restrike-Test* unterzogen werden. Zu weiteren Ausführungen hinsichtlich zeitabhängige Tragfähigkeitsänderungen sei auf die Literatur [z.B. SEIDEL et al., 2000] verwiesen.

4.2.1 Prinzip und Testdurchführung

Bei einem Rammschlag wird die in den Pfahl eingeleitete Stoßkraft meist ungleichmäßig über den Pfahlquerschnitt verteilt. Mit dem Auftreffen eines Fallgewichtes auf der Pfahlkopfoberfläche ist ein mechanischer Spannungsanstieg im Pfahl verbunden, der sich als Stoßwellenfront

vom Pfahlkopf aus abwärts bewegt. Hierbei wird die am Pfahlkopf auftretende Dehnung und Beschleunigung gemessen. In Anlehnung an das Prinzip von St. Venant kann davon ausgegangen werden, dass die Stoßwellenfront nach einem Ausbreitungsweg, der mindestens dem 1,5 - fachen des Pfahldurchmessers entspricht, als eben angesehen werden kann. Die Messgeber werden aus diesem Grund, und um eventuell auftretende Exzentrizitäten ausgleichen zu können, in einem entsprechenden Abstand unterhalb der Oberkante der Pfähle auf mindestens zwei gegenüberliegenden Seiten angebracht. Die Freilegung des Pfahls bis in die entsprechende Tiefe ist demzufolge erforderlich. Messkabel und Messcomputer mit A/D-Wandlung und entsprechender Software vervollständigen die Messeinrichtung. Beispielhaft für Ortbetonpfähle sind in Abb. 9 der prinzipielle Messaufbau sowie die für diese Pfahltypen erforderlichen Arbeitsschritte zur Vorbereitung der dynamischen Probelastungen dargestellt.

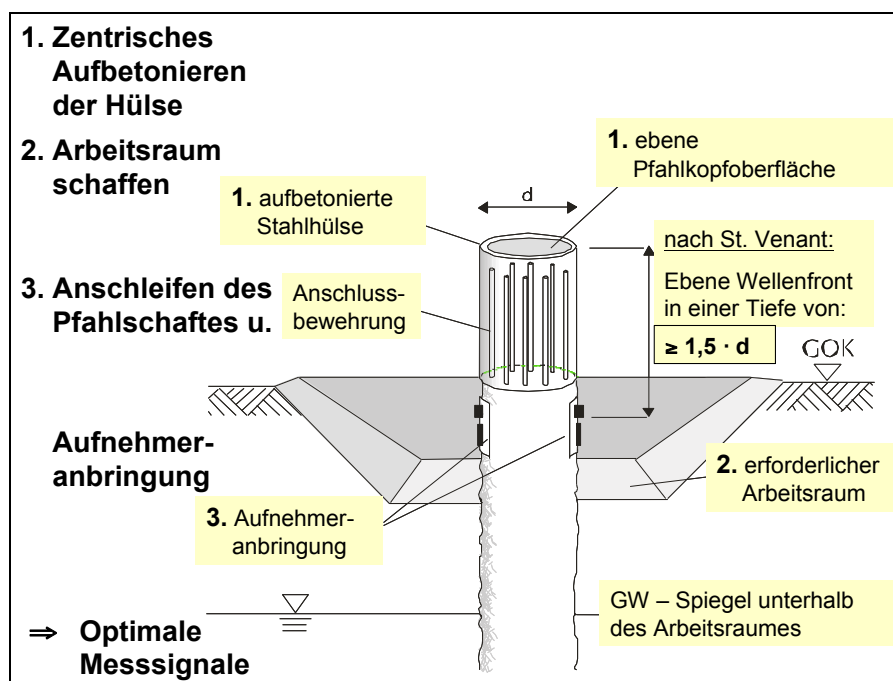


Abbildung 9: Prinzipieller Messaufbau und Vorbereitung eines Ortbetonpfahles

Die Fallhöhe des verwendeten Fallgewichtes sollte variabel einstellbar sein, um die nötige Sensitivität zu gewährleisten bzw. Schäden am Pfahlkopf zu vermeiden. Die Fallhöhe muss also an die Aufgabenstellung, d.h. die nachzuweisende äußere sowie die inneren Tragfähigkeit angepasst werden. Die dynamische Belastung entspricht dem Produkt aus Fallmasse und Fallhöhe, also der potentiellen Energie. Die tatsächliche Prüflast, die den Pfahl belastet, ist von der Dämpfung des Gesamtaufbaus der Belastungseinrichtung abhängig und erreicht nicht den theoretischen Wert. Aus langjähriger Erfahrung hat sich gezeigt, dass die untere Grenze der einzusetzenden Fallmasse mindestens 1-2% der nachzuweisenden Tragfähigkeit des Pfahles bzw. 10-15% der Pfahlmasse betragen sollte.

Bei der Befestigung der Aufnehmer am Pfahlschaft bzw. am Rammrohr ist zu beachten, dass die Aufnehmer spannungsfrei montiert werden, da insbesondere bei den Dehnungsaufnehmern bereits kleine Unebenheiten der Oberfläche des Pfahlmantels zu Messwertverfälschungen führen.

Die Prinzipien der Wellenausbreitung, auf denen das Verfahren beruht, sind in Kapitel 3 dargestellt. Aus der Lösung der Differentialgleichung ergibt sich die Proportionalität von Pfahlnormalkraft F und Geschwindigkeit v der zum Pfahlfuß laufenden Stoßwelle, solange kein Einfluss aus dem umgebenden Boden auf den Pfahl einwirkt.

$$F = \frac{EA}{c} v$$

Der Proportionalitätsfaktor wird auch als Pfahlimpedanz Z bezeichnet und ist nur von Material- bzw. Querschnittswerten abhängig.

$$Z = \frac{EA}{c} = A\sqrt{E \cdot \rho}$$

Die Proportionalitätsbedingung dient als ein Kriterium bei der Beurteilung der Qualität des aufgezeichneten Messsignals. Ist diese Proportionalität nicht vorhanden, so kann auf eine fehlerhafte Messung geschlossen werden, die zur Ermittlung der Tragfähigkeit nicht geeignet ist. Abb. 10 zeigt ein typisches Messsignal, bei dem die Proportionalität von Beginn der Messung bis zum 1. Peak, der den Zeitpunkt der Stoßwelleneinleitung am Pfahlkopf beschreibt, gegeben ist. Die Größe der Klaffung zwischen den beiden abgebildeten Kurven nach dem 1. Peak ist ein Maß für die Größe der am Pfahl angreifenden Widerstandskräfte. Prinzipiell muss während der Messung bzw. unmittelbar nach einem Rammschlag die Qualität des Messsignals überprüft und gegebenenfalls die Ursachen für evtl. vorhandene Messfehler beseitigt werden. Ursachen für Messfehler können z.B. sein.

- fehlerhafte Anbringung der Aufnehmer
- feuchte oder defekte Aufnehmer, Kabel oder Steckverbindungen
- unebene Pfahlkopfoberfläche
- Beton nicht ausreichender Festigkeit im Pfahlkopfbereich

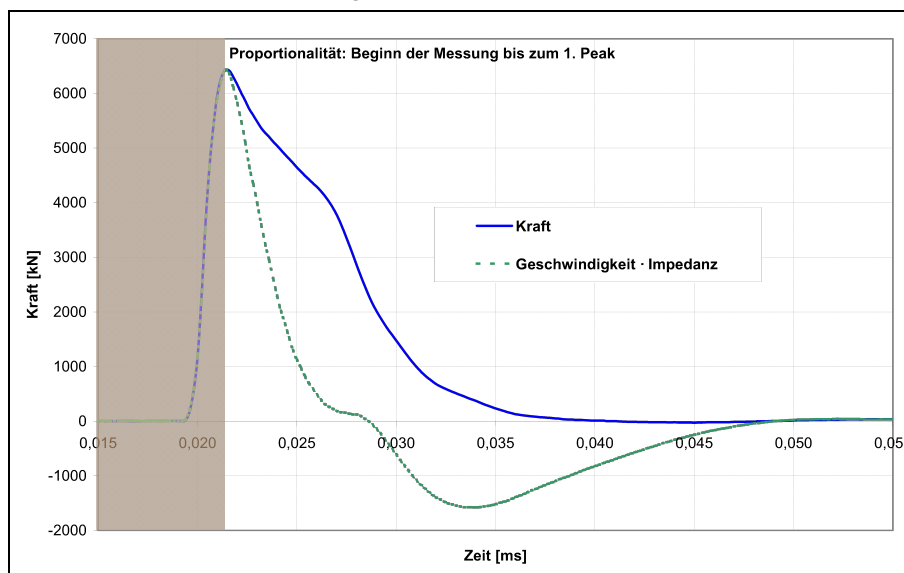


Abbildung 10: Messsignalqualität – Proportionalität

Die Berechnungsannahmen erfordern, dass bei der Durchführung des dynamischen Pfahltests alle Widerstände aktiviert werden. Dies lässt sich erreichen, wenn durch den einzelnen Schlag eine bleibende Verschiebung des Pfahls erzielt werden kann. Die Größe der erforderlichen Verschiebung ist vom anstehenden Boden abhängig und sollte für den Prüfschlag ≥ 2 mm erreichen.

4.2.2 Auswertung der Messsignale

Die einzelnen Verfahren zur Messauswertung werden unterschieden in „direkte“ und „erweiterte“ Verfahren. Die direkten Verfahren ermöglichen direkt am Ort der Messung Aussagen zur erreichten Tragfähigkeit, während bei den erweiterten Verfahren im Anschluss an die Messung eine Identifikation des realen Pfahl-Boden Systems durch Modellbildung und anschließender Iteration durchgeführt wird. Zu den heute am meisten verbreiteten Verfahren gehören Produkte von GRL Engineers, Inc., USA und das TNOWave-Verfahren von Profound B.V., Niederlande. Beispielhaft wird im Folgenden auf das CASE-Verfahren (direkt) und das CAPWAP-Verfahren (erweitert) näher eingegangen.

Bei den direkten Verfahren ergibt sich die statische Tragfähigkeit R_{stat} nach Ermittlung des Gesamtwiderstandes im dynamischen Test R_{tot} und der Berechnung und Subtraktion des dynamischen Anteils R_{dyn} .

$$R_{\text{tot}} = \frac{1}{2} (F_1 + Z \cdot v_1 + F_2 - Z \cdot v_2) \quad R_{\text{stat}} = R_{\text{tot}} - R_{\text{dyn}}$$

Beim CASE-Verfahren wird R_{dyn} vollständig als elasto-plastisch an der Pfahlspitze wirkend angenommen. Dabei muss ein Dämpfungsbeiwert J_c für den anstehenden Boden festgelegt werden. Dies kann entweder anhand einer Kalibrierung an den Ergebnissen aus statischen Probelastungen oder bei ausreichender Erfahrung mit den anstehenden Böden auch direkt aus dem Bodenaufschluss erfolgen. Der auf diese Art ermittelte CASE-Dämpfungsbeiwert sollte durch eine CAPWAP-Auswertung (erweitertes Verfahren) überprüft werden. Richtwerte für Dämpfungsbeiwerte der direkten Verfahren sind für verschiedene Bodenarten in DGGT, 1998 angegeben. R_{dyn} berechnet sich unter Berücksichtigung des dimensionslosen CASE-Dämpfungsbeiwerts J_c zu

$$R_{\text{dyn}} = J_c \cdot Z \cdot v \quad \Rightarrow R_{\text{stat}} = (1 - J_c)[F_1 + Z \cdot v_1]/2 + (1 + J_c)[F_2 - Z \cdot v_2]/2$$

In Abb. 11 sind die Zusammenhänge (Theorie der Wellenausbreitung und CASE-Auswertung) anhand eines Messsignals anschaulich dargestellt.

Die Anwendung des CASE-Verfahrens ist jedoch auf homogenes Pfahlmaterial ohne Querschnittswechsel beschränkt. Existieren planmäßige Querschnittswechsel (Stahlflügelpfahl), so muss das Gesamtsystem nach einem erweiterten Verfahren modelliert werden.

Hierbei wird ein diskretes Pfahl-Boden-Modell verwendet, dessen Grundzüge bereits 1960 von Smith vorgestellt wurden. In Abb. 12 ist das Modell dargestellt, welches derzeit einer Analyse nach dem CAPWAP-Verfahren zugrunde liegt.

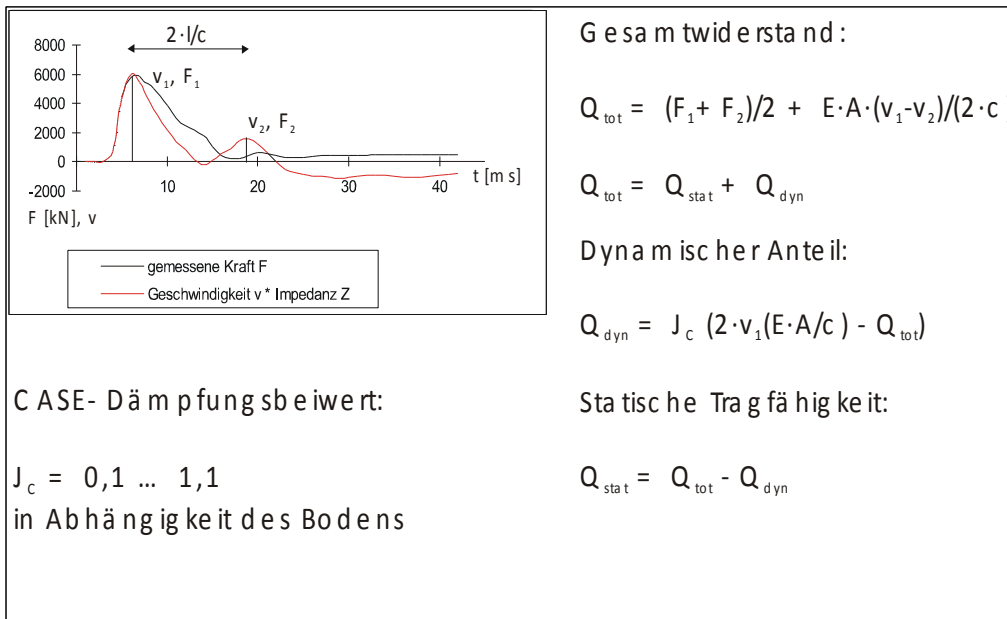


Abbildung 11: Direktes Verfahren - CASE-Auswertung

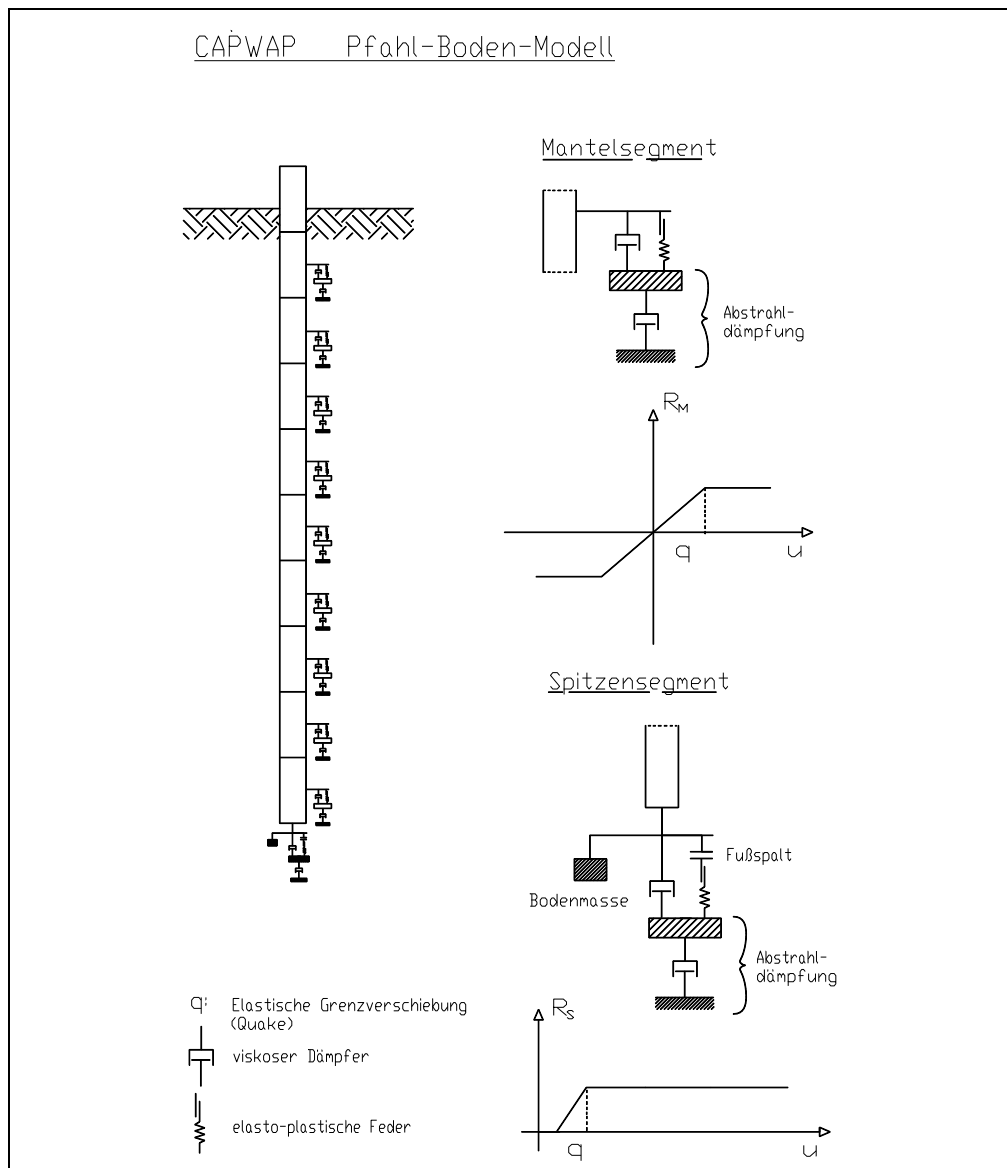


Abbildung 12: Erweitertes Verfahren – CAPWAP-Modell

Grundsätzlich ist die Auswertung des dynamischen Pfahltests nach dem CAPWAP-Verfahren eine Form der Systemidentifikation und als solches ein inverses Problem. Anhand eines registrierten Messsignals werden Rückschlüsse auf mechanische Eigenschaften der Gesamtstruktur gezogen. Dazu muss das reale Bauteil mit seiner Umgebung zunächst in ein mechanisches Modell überführt werden. Fehler, die bei der Messung und bei der Modellbildung auftreten und nicht vollständig auszuschließen sind, können durch die anschließende numerische Analyse nicht behoben werden. Der Erfolg eines dynamischen Pfahltests ist deshalb in hohem Maße von der Sorgfalt abhängig, mit der die Messsignale aufgezeichnet werden.

Bei der Auswertung werden das gewählte Modell und dessen Parameter an der vor Ort durchgeführten Messung kalibriert. Bei diesem iterativen Berechnungsgang werden die Messkurven eines Schlages als Grenzwert betrachtet, den es bestmöglich anzugleichen gilt, indem die Boden- und Pfahlparameter (Dämpfung, Steifigkeit, Geometrie, etc.) des zugrundeliegenden mechanischen Modells variiert werden. Ist eine optimale Übereinstimmung zwischen dem gemessenen und dem berechneten Kurvenverlauf erreicht, also der Fehler zwischen den beiden Kurven ein Minimum, so wird die Iteration beendet. Dabei ist als Fehler einerseits der integrale Fehler über die gesamte Berechnungszeit und andererseits der Fehler zu verstehen, der zu jedem einzelnen Zeitschritt in Form einer Abweichung von Messergebnis und Rechenwert auftritt. Das statische Verhalten des Pfahles kann an dem auf diese Weise ermittelten Modell bestimmt werden. Es sei bemerkt, dass die Berechnung, die durch iteratives Anpassen der Modellparameter erfolgt, keine theoretisch eindeutige Lösung liefert. Diese Mehrdeutigkeit ist einerseits auf die Modellbildung als solche, andererseits auf mögliche Messfehler und zu große Fehlerschranken zurückzuführen (KLINGMÜLLER, 1991). Durch die Überprüfung der Plausibilität des Ergebnisses kann jedoch eine Aussage über die Tragfähigkeit des Pfahles getroffen werden, die für die baupraktische Fragestellung eine genügend genaue Bestimmung der Tragfähigkeit des Pfahles erlaubt. Als Ergebnis einer CAPWAP-Auswertung ergibt sich dann eine Aufteilung der Tragfähigkeit in Spitzendruck und Mantelreibung sowie deren Verteilung über die Pfahlänge. Zusätzlich wird die rechnerische Last – Setzungs – Linie ermittelt (vgl. Abb. 13).

ib - tubs

CAPWAP® Ver. 2000-1

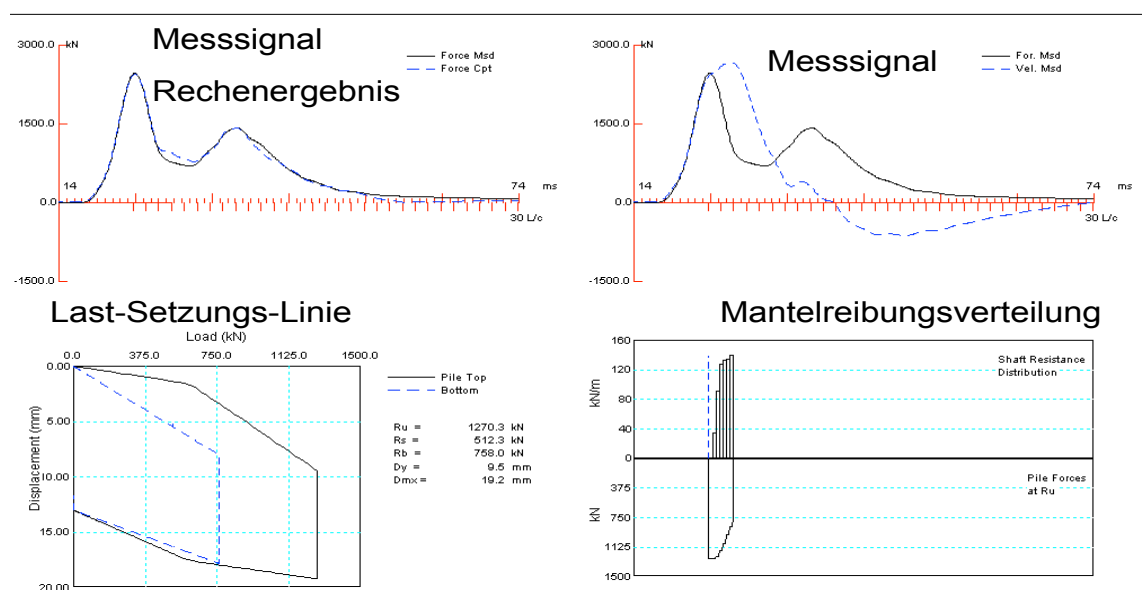


Abbildung 13: Ergebnisse einer CAPWAP-Auswertung

4.2.3 Anwendungsmöglichkeiten, -grenzen

Die durch dynamische Probelastungen prinzipiell prüfbaren Querschnittsformen und daraus abgeleiteten Pfahlsysteme, für die heute ausreichend Erfahrungen vorliegen, sind in Abb. 14 zusammengefasst. Weiterhin sind für die jeweiligen Querschnitte die empfohlenen Varianten der Aufnehmeranbringung gezeigt.

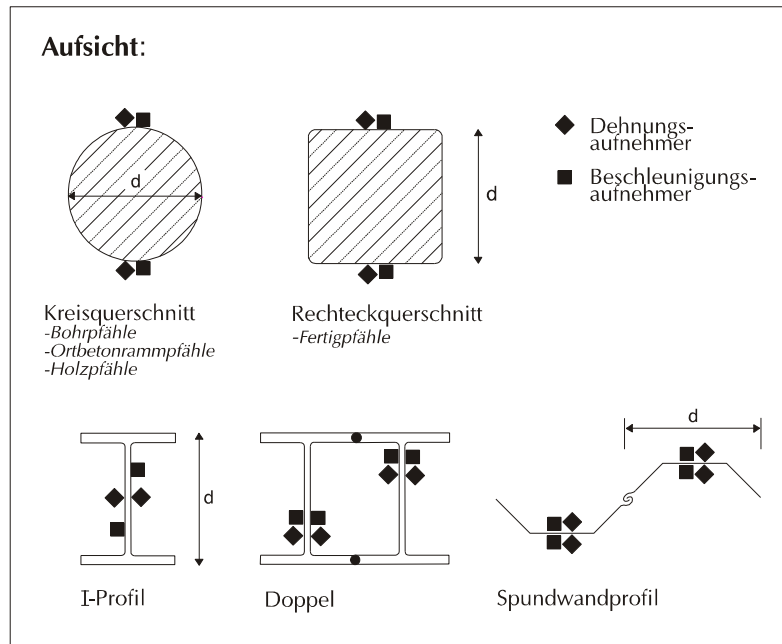


Abbildung 14: prüfbare Pfahlsysteme und empfohlene Aufnehmeranbringungen

Grundsätzlich lassen sich für das 'high-strain' Verfahren keine allgemeingültigen Grenzen der Anwendung definieren. In besonderen Situationen müssen jedoch einige verfahrensbedingte Grundsätze beachtet werden, um einen effizienten Einsatz zu gewährleisten und um sichere Aussagen zu erhalten.

Die Größe der Belastungseinrichtung muss für den jeweiligen Anwendungsfall angepasst sein. Es wurde bereits erwähnt, dass mindestens 1-2% der nachzuweisenden Tragfähigkeit bzw. 10-15% der Pfahlmasse an Fallmasse zur Verfügung stehen muss, um ausreichend große Verschiebungen des Pfahls je Prüfschlag relativ zum Boden zu erreichen. So kann gewährleistet werden, dass Aussagen über die Grenztragfähigkeiten getroffen werden können. Reicht die am Pfahlkopf eingeleitete Energie nicht aus, um alle angreifenden Widerstandskräfte zu wecken, können auch Aussagen zur Tragfähigkeit gemacht werden (*nachgewiesene Tragfähigkeit*). In solchen Fällen ist es jedoch möglich, dass noch Tragreserven vorhanden sind, die nicht mobilisiert werden konnten. Eine solche Anwendungsgrenze für die heute zur Verfügung stehenden Freifallgewichte für Ortbetonpfähle kann sich beispielsweise bei Großbohrpfählen mit großem Durchmesser (> 1,50 m) ergeben. Dies ist jedoch stark vom jeweiligen Baugrundaufbau abhängig und nicht als allgemeingültige Anwendungsgrenze zu verstehen. Abhilfe können in solchen Fällen die Konstruktion entsprechend großer Freifalleinrichtungen sein.

Durch die dynamische Belastung beim 'high-strain' Verfahren können Zugspannungen im Pfahl entstehen. Diese können bei unbewehrten Ortbetonpfählen bei Überschreiten der Zugfestigkeit des Pfahlbetons zu Rissen führen. Die Anwendung des Verfahrens ist in diesen Fällen beson-

ders von der Prüflast und der darauf abgestimmten Belastungsgröße während des Tests sowie vom Baugrund abhängig und im Einzelfall zu prüfen.

Während bei Rammpfählen der zur Herstellung verwendete Rammbar zur Aufbringung des Prüfschlages verwendet werden kann und somit im Hinblick auf die Pfahlneigung keine Einschränkungen bei der Durchführung des 'high-strain' Verfahrens gegeben sind, können durch ein Freifallgewicht nur Lotpfähle einer dynamischen Probelastung unterzogen werden. Dies ist in der Regel bei Bohrpfählen aber auch bei Vibrationspfählen der Fall. Sollen in diesen Fällen Probelastungen durchgeführt werden, muss eine entsprechende Belastungseinrichtung vorgehalten werden.

4.2.4 Qualitätskontrolle der Prüfer

Auch für die Durchführung und Auswertung dynamischer Probelastungen gelten sinngemäß die Ausführungen, wie sie in Kapitel 4.1.5 für Integritätsprüfungen genannt sind. Die Pfahlprüfungen sollten durch erfahrene Ingenieure erfolgen, die Ihre Qualifikationen in geeigneter Form nachweisen können. Die Prüfer sollten anstreben, diese durch eine systemunabhängige Zertifizierung bestätigen zu lassen. Für die Theorie und praktische Anwendung des 'high-strain' Verfahrens wird eine Zertifizierung derzeit durch die Fa. Foundation QA, Australien vorgenommen.

4.3 Rapid Load Tests (Statnämische Probelastung)

4.3.1 Prinzip und Testdurchführung

Die statnämische Probelastung wird hier als Sonderform der Pfahlprüfmethoden behandelt, da dieses Verfahren auch in Deutschland immer mehr zum Einsatz kommt. Das Konzept wurde Mitte der Achziger Jahre von der Fa. Berminghammer, Canada entwickelt. In Zusammenarbeit mit der TNO, Niederlande (heute Profound B.V.) wurde dieses Konzept zu der heute zur Verfügung stehenden Version weiterentwickelt. Das Verfahren vereint Aspekte statischer sowie dynamischer Pfahlprüfungen.

Im Wesentlichen beruht das Verfahren auf dem Newtonschen Gesetz. Eine Reaktionsmasse wird direkt auf den Pfahlkopf aufgesetzt. Dabei ist darauf zu achten, dass eine glatte Pfahlkopfoberfläche vorliegt. Die Reaktionsmasse wird durch eine Treibladung vom Pfahl weg beschleunigt. Die daraus resultierende Kraft wird betragsmäßig äquivalent in den Pfahl eingeleitet (vgl. Abb. 15). Die Größe der Reaktionsmasse wird durch das Aufsetzen von beispielsweise mit Kies gefüllten Behältern an die Prüflast angepasst, die durch ein Gestänge geführt sind. Die erforderliche Masse beträgt ca. 5-10% der nachzuweisenden Tragfähigkeit. Nach der Beschleunigung vom Pfahl weg wird der Rückprall auf den Pfahlkopf durch ein hydraulisches Auffangsystem verhindert.

Als Mindestmessgrößen werden die eingeleitete Kraft durch eine Kraftmessdose und die Relativverschiebung des Pfahles durch ein Lasersystem erfasst. Die gemessene Kraft F_{stn} (statnämische Kraft) und die Verschiebung u werden als Funktionen über die Zeit dargestellt (vgl. Abb. 16).

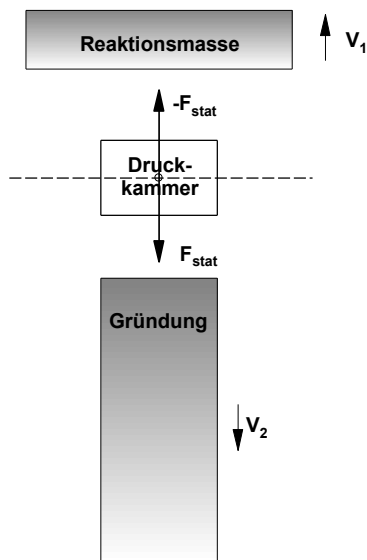


Abbildung 15: Prinzip der statnamischen Probelastung

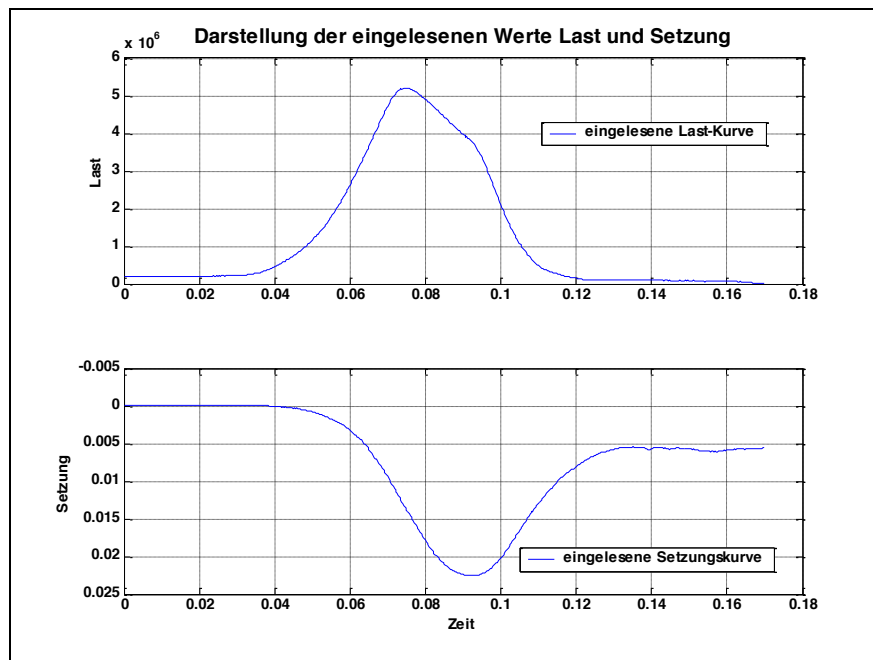


Abbildung 16: Gemessene Größen bei der statnamischen Probelastung

4.3.2 Auswertung der Messsignale

Durch Differentiation der Verschiebungsdaten über die Zeit, werden sowohl die Geschwindigkeit als auch die Beschleunigung am Pfahlkopf ermittelt. Zusätzlich können Beschleunigungsgeber am Pfahlkopf befestigt werden, so dass eine Kontrolle der errechneten Beschleunigung vorgenommen werden kann und ein Ersatzsystem bei Ausfall der Laservorrichtung vorliegt.

Die Auswertung erfolgt nach der 'Unloading Point Methode'. Im Gegensatz zur klassischen dynamischen Pfahlprüfung herrscht bei der statnamischen Prüfung eine relativ lange Impuls- bzw. Belastungsdauer vor. Der Pfahl wird demzufolge nicht als Mehrmassensystem sondern als Einmassenschwinger modelliert. Das mechanische Modell ist in Abb. 17 dargestellt.

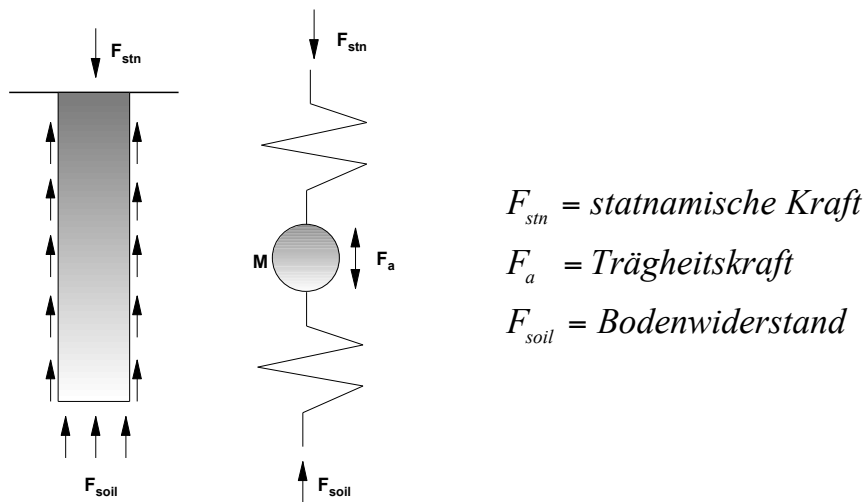


Abbildung 17: Modellbildung bei der statnamischen Probelastung

Der gemessene Gesamtwiderstand F_{stn} ergibt sich aus der Massenträgheit des Pfahls und dem Bodenwiderstand F_{soil} .

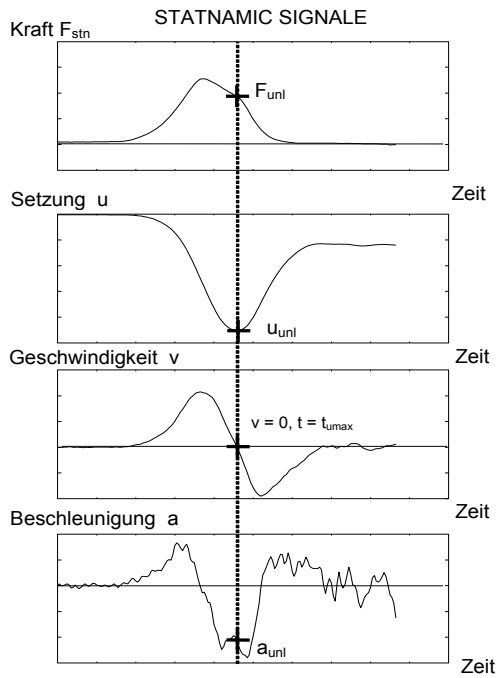
$$F_{stn}(t) = F_{soil}(t) + F_a(t) \qquad F_{soil}(t) = \underbrace{F_s(t)}_{\text{Statischer Widerstand}} + \underbrace{F_p(t)}_{\substack{\text{Widerstand} \\ \text{Porenwasserdruck}}} + \underbrace{F_b(t)}_{\text{Widerstandskraft des Bodens}}$$

mit	$F_u(t) = k \times u(t)$	mit	$k = \text{Federsteifigkeit}$
	$F_v(t) = C \times v(t)$		$C = \text{Dämpfungsfaktor}$
	$F_p(t) = P \times v(t)$		$P = \text{Porenwasserdruckdämpfung}$
			$u = \text{Beschleunigung}$
			$v = \text{Geschwindigkeit}$

Umgeformt ergibt sich der statische Widerstand zu $F_u(t) = F_{stn}(t) - C \times v - m \times a$.

Im umgeformten Gleichungssystem sind der statische Bodenwiderstand und der Dämpfungsfaktor unbekannte Größen. Am Punkt der maximalen Setzung, dem so genannten 'Unloading Point', erreicht die Pfahlverschiebung ihr relatives Maximum und die Geschwindigkeit ist aufgrund der Richtungsumkehr der Pfahlbewegung gleich Null (vgl. Abb. 18). Daraus ergibt sich, dass an dieser Stelle keine geschwindigkeitsabhängigen dynamischen Anteile im Messsignal enthalten sind und die zugehörige Kraft der Summe aus statischem Bodenwiderstand und der Massenträgheit des Pfahles gleichgesetzt werden kann. Der Unloading Point wird daher auch als statischer Punkt bezeichnet.

Im Weiteren wird die Last – Setzungs – Kurve ermittelt (vgl. Abb. 19). Da es sich bei dem zugrundegelegten Modell um einen Einmassenschwinger handelt, muss lediglich noch die Dämpfungskonstante des Gesamtsystems ermittelt werden.



am 'Unloading Point' gilt:

$$F_{unl} = F_{stn}(t_{u\max})$$

$$a_{unl} = a(t_{u\max})$$

eingesetzt ergibt sich:

$$F_u(t_{u\max}) = F_{unl} - m \times a_{unl}$$

Abbildung 18: Funktionaler Zusammenhang am 'Unloading Point' (aus Workshop dyn. Pfahlprüfungen)

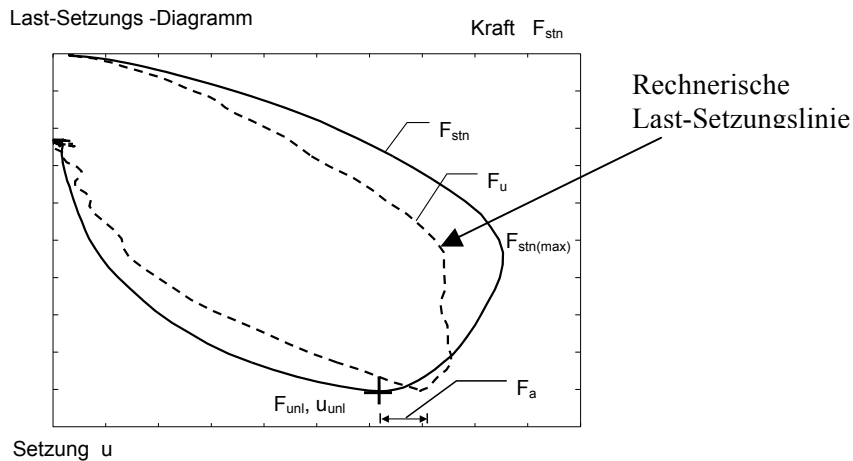


Abbildung 19: Ermittlung der Last – Setzungs – Kurve (aus Workshop dyn. Pfahlprüfungen)

Es wird die Annahme getroffen, dass im Zeitraum von $F_{stn(max)}$ bis F_{unl} der Boden ein nachgiebiges Verhalten aufweist und somit $F_u = F_{unl}$ gilt. Für diesen Bereich ergibt sich daraus

$$F_{stn} = F_u + F_v + F_a = F_{unl} + F_v + F_a \Leftrightarrow F_v = F_{stn} - F_{unl} - F_a$$

Damit ermittelt sich die Dämpfungskonstante des Gesamtsystems zu

$$C_{mean} = \frac{F_{stn} - F_{unl} - F_a}{v}$$

Anschließend wird der statische Widerstand F_u an allen Stellen der Last-Setzungs-Kurve ermittelt und wie in Abb. 19 (gestrichelte Linie) dargestellt.

4.3.3 Anwendungsmöglichkeiten, -grenzen

Durch die Unabhängigkeit von der Erdbeschleunigung kann das Verfahren flexibel in lotrechter, horizontaler und schräger Lage bei nahezu allen Pfahlarten (auch unbewehrte Ortbetonpfähle) angewendet werden. Die Belastung der Pfähle beim Test kann mit den weltweit existierenden Einrichtungen bis zu ca. 30 MN durchgeführt werden.

Aufgrund der benötigten Reaktionsmasse von 5-10% der Prüflast, vergrößert sich bei steigenden Pfahlabmessungen und Prüflasten der Aufwand zur Vorbereitung der Prüfung durch die Vorhaltung und den Transport einer entsprechenden Anzahl und Größe an Behältern im Vergleich zur erforderlichen Belastungseinrichtung bei dynamischen Probelastung. Dies gilt auch für das Trägergerät der Behälter.

4.4 Statische Probelastung

Das Verfahren der statischen Probelastung wird seit vielen Jahrzehnten zur Tragfähigkeitermittlung von Pfählen angewendet und ist allgemein bekannt, so dass auf eine detaillierte Beschreibung an dieser Stelle verzichtet bzw. auf die Literatur z.B. DGGT, 1998 verwiesen wird. Unterschieden wird bei Durchführung und Auswertung in die folgenden drei Anforderungsklassen.

- einfache Anforderungen: - Messen der Verschiebung des Pfahlkopfes in Abhängigkeit von Belastung und Zeit.
- mittlere Anforderungen: - zusätzliche Instrumentierung des Pfahlfußes (Mantelreibung – Spitzendruck)
- höhere Anforderungen: - zusätzliche Instrumentierung des Pfahlschaftes (Mantelreibungsverteilung über die Tiefe)

Ein Beispiel für eine instrumentierte axiale statische Probelastung ist in KIRSCH et al., 2001 beschrieben. Im Folgenden werden die wesentlichen Unterschiede der Pfahlprüfverfahren zur Bestimmung der Tragfähigkeit zusammengefasst.

4.4.1 Vergleich: Probelastungen Statisch - Statnamisch - Dynamisch

In Abb. 20 sind die bei den drei Verfahren gemessenen Größen und die erforderlichen Massen (Reaktionskräfte) in Prozent der nachzuweisenden Last gegenübergestellt.

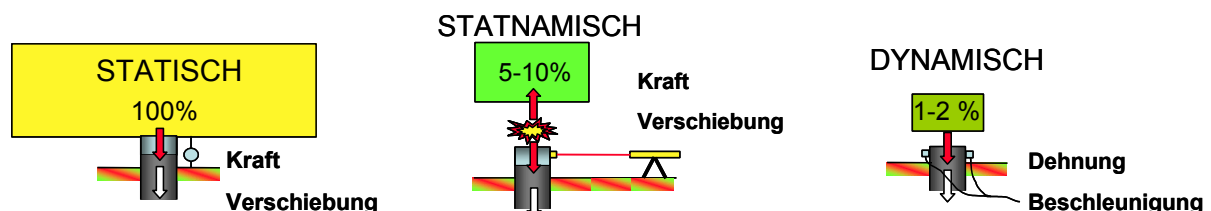


Abbildung 20: Messgrößen und erforderliche Massen im Vergleich (aus Workshop dyn. Pfahlprüfungen)

Allen Verfahren ist gemein, dass die zur Auswertung herangezogenen Messgrößen, in Höhe des Pfahlkopfes erfasst werden. Ein wesentlicher Unterschied ist jedoch in der Größenordnung

der bereitzustellenden Massen (Kräfte) zu vermerken, was sich erheblich auf den erforderlichen zeitlichen und wirtschaftlichen Aufwand auswirkt.

Im Vergleich der Dauer der Belastung während der Prüfung kann die statnämische als Sonderform der dynamischen Probelastung eingestuft werden, obwohl die Impulsdauer hier um den Faktor 3-4 differiert (vgl. Abb. 21). Dieser Unterschied ist jedoch ausschlaggebend für die stark voneinander abweichende Modellbildung bei beiden Verfahren (vgl. Abb. 12 und 17) und somit für die beschriebenen unterschiedlichen Auswerteverfahren. Hier liegen die Prinzipien der statnämischen Prüfung näher an denen der statischen Probelastung.

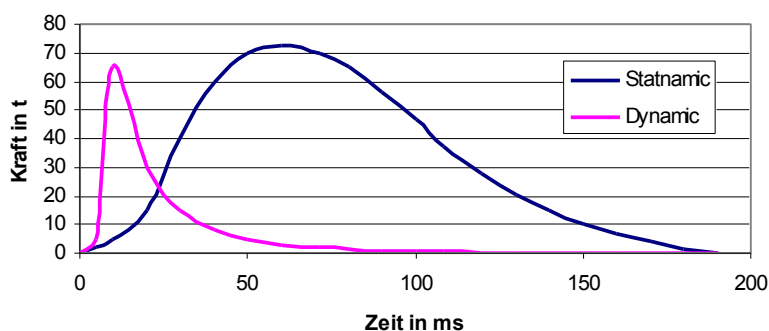


Abbildung 21: Impulsdauer

Während bei der statnämischen und der statischen Probelastung mit einfachen Anforderungen lediglich die Gesamttragfähigkeit ermittelt wird, können durch dynamische Probelastungen Aussagen über Spitzendruck, Mantelreibung und deren Verteilung über die Tiefe, die mit dem Baugrundaufbau direkt verglichen werden kann, getroffen werden.

5 ANWENDUNG DER PFAHLPRÜFUNGEN IN DER BAUPRAXIS

Neben den jeweiligen örtlichen Anforderungen wie Belastungssituation, Baugrundaufbau sowie wirtschaftlichen Aspekten sind herstellungsbedingte Risiken bei der Auswahl von geeigneten Pfahlssystemen und deren Prüfmethode zu berücksichtigen. Im Folgenden sind die bekanntesten Risiken für bestimmte Pfahltypen zusammengestellt:

- Mitreißen der frischen Betonsäule beim Ziehen der Verrohrung
→ Ortbetonpfähle
- Hydraulischer Grundbruch (Ziehgeschwindigkeit, Wasserauflast, Voreilung)
→ Bohrpfähle
- Bodeneinbruch, Bodenauflockerungen
→ Bohrpfähle
- Einhaltung geforderter Geometrien (Achse, Durchmesser)
→ Rammfähle, Ortbetonpfähle
- strömendes Grundwasser (Bodeneinschlüsse, Einschnürungen)
→ Ortbetonpfähle
- Verschleppung von Kontaminaten
→ nahezu alle Pfahltypen
- Hindernisse im Baugrund
→ Rammfähle, Fertigpfähle, Sonderpfähle

Beim Auftreten solcher Ereignisse ist die Wahrscheinlichkeit von Pfahlschäden groß. Weitere Schadensursachen können unzureichende Baugrunderkundungen, Planungsfehler oder Versäumnisse gegenüber den Anforderungen zur Qualitätssicherung sein. Daraus wird die Notwendigkeit einer stetig wachsenden Anzahl von Pfahlprüfungen deutlich.

In bestimmten Fällen sollte die Möglichkeit bzw. die Erfordernis der Kombination mehrerer Pfahlprüfmethoden in Betracht gezogen werden. Im Einzelfall können die im Folgenden aufgeführten Kombinationen sinnvoll sein.

- 'low-strain' Integritätsprüfung – 'cross-hole' Ultraschallmessungen (in diesem Beitrag nicht näher erläutert)
- Dynamische Probelastungen ('high-strain' Verfahren) - 'low-strain' Integritätsprüfung
- Statische Probelastung – Dynamische Probelastungen ('high-strain' Verfahren)
- Dynamische Probelastungen ('high-strain' Verfahren) – Rapid Load Tests

Kommen Kombinationen zur Anwendung, sollten im Hinblick auf die Vergleichbarkeit der Ergebnisse einige Grundsätze beachtet werden. Dazu gehören

- Die Schaffung gleicher Testbedingungen für die Testverfahren,
- Vergleichbare Baugrundverhältnisse bei unterschiedlichen Testpfählen,
- Ausreichende Standzeit der Pfähle nach der Herstellung,
- Ausreichender Zeitabstand zwischen verschiedenen Prüfverfahren zur Tragfähigkeitsbestimmung an einem Pfahl.

Im Folgenden sind Ergebnisse beispielhaft einige Ergebnisse von Tragfähigkeitsprüfungen gezeigt, um die Vergleichbarkeit zu verdeutlichen. Der erste Vergleich beinhaltet Ergebnisse von dynamischen und statischen Probelastungen. Insgesamt werden hier die Ergebnisse von 30 Pfählen unterschiedlicher Pfahltypen in unterschiedlichen Baugrundverhältnissen einbezogen, wobei der direkte Vergleich statisch-dynamisch entweder am gleichen oder am benachbarten Pfahl bei gleichem Baugrundaufbau erfolgte. Es lässt sich feststellen, dass die Abweichungen der Ergebnisse voneinander bei optimaler Messdurchführung immer $\leq 20\%$ beträgt. Größere Abweichungen werden als nicht akzeptabel eingeschätzt. In solchen Fällen sollten nähere Untersuchungen zur Ursachenforschung unter Berücksichtigung der erwähnten Grundsätze beim Ergebnisvergleich betrieben werden.

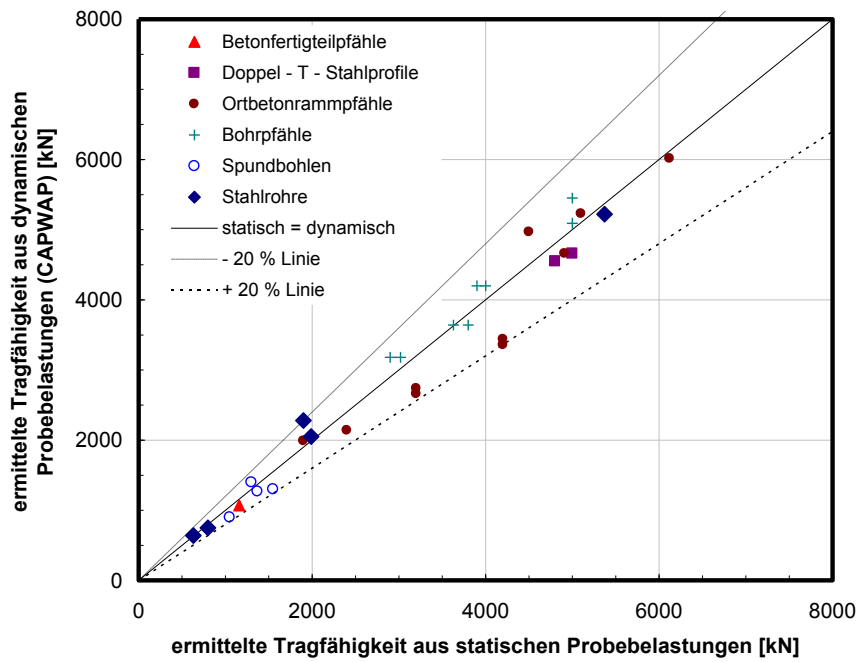


Abbildung 22: Vergleich der Ergebnisse von statischen mit dynamischen Pfahlprüfungen

In Abb. 23 sind die Ergebnisse eines dynamischen und eines statnamischen Pfahltests an zwei benachbarten Pfählen mit gleichen Eigenschaften gegenübergestellt. Die Abweichung in der ermittelten Tragfähigkeit beträgt hier ca. 7%.

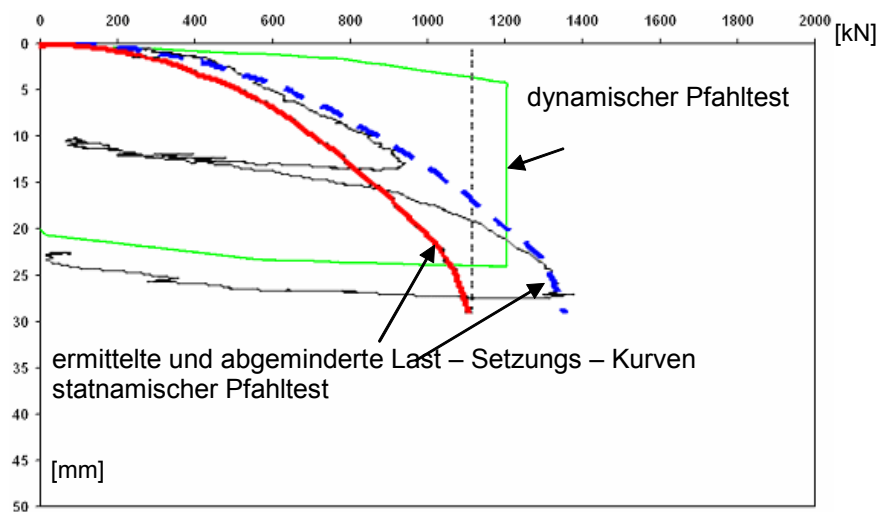


Abbildung 23: Vergleich der Ergebnisse von dynamischen mit statnamischen Pfahlprüfungen

LITERATUR

BALTHAUS, H. (1986)

Zur Bestimmung der Tragfähigkeit von Pfählen mit dynamischen Pfahlprüfmethoden, Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig, Heft 21

DGGT, DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR GEOTECHNIK (1998)

Empfehlungen für statische und dynamische Pfahlprüfungen des Arbeitskreises 2.1 der DGGT. Institut für Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig.

ELMER, K.-H. (2002)

The complex behavior of traveling waves and numerical methods, Poceedings of the 4th International Conference on Structural Dynamics, Volume I, Munich, Germany, 2-5 Sept. 2002.

HARTUNG, M.; MEIER, K.; RODATZ, W. (1993)

Dynamische Pfahltests an vertikal zu belastenden Spundwänden, Bautechnik 70 Heft 10, Verlag Ernst & Sohn

HUCH, T.; KIRSCH, F. (1999):

Dynamische Messungen bei der Pfahlherstellung, Pfahl-Symposium 1999, Fachseminar am 25./26.02.99 in Braunschweig, Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig, Heft 60

JAPANESE GEOTECHNICAL SOCIETY,

Committee on Standardization of Pile Loading Tests (2000)

Method for Rapid Load Test of Single Piles (JGS 1815 – 2000)

KIRSCH, F.; HUCH, T.; SCHALLERT, M. (2001)

Der Einsatz dynamischer Pfahlprüfungen zur Gründungsoptimierung des Container Terminals Altenwerder, Pfahl-Symposium 2001, Fachseminar am 22./23.02.01 in Braunschweig, Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig, Heft 65

KIRSCH, F.; KLINGMÜLLER, O. (2003)

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, S. 640 – 650.

KLINGMÜLLER, O. (1991)

Dynamische Pfahlprüfung als Optimierungsproblem, Dynamische Pfahltests, Fachseminar am 21./22.01.1991 in Braunschweig, Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig, Heft 38

PLAßMANN, B. (2000)

Optimierung der Meßtechnik und Auswertemethodik bei Pfahlintegritätsprüfungen, Mitteilungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig, Heft 19, S. 21-51.

RODATZ, W.; ERNST, U.; WIENHOLZ, B. (1996)

Dynamic pile tests on PSp 1000 double sheet piles, Stresswave '96, Fifth international conference on the application of stress-wave theory to piles, Orlando, Florida USA, 1996

SCHALLERT, M; FRITSCH, M. (2003)

Qualitätssicherung von Pfahlgründungen am Beispiel einer Schneckenbohrpfahlgründung, Pfahl-Symposium 2003, Fachseminar am 20./21.02.03 in Braunschweig, Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig, Heft 71

SEIDEL, J.P.; KALINOWSKI, M. (2000)

Pile set-up in sands, Proc. 6th Int. Conf. Appl. Stress-Wave Theory to Piles, Balkema

SIMONS, H.; FRÜCHTENICHT, H.; MESECK, H. (1983)

Dynamische Pfahltests, Bauingenieur Heft 58, Springer-Verlag

WORKSHOP 'Dynamische Pfahlprüfungen – Tragfähigkeit und Integrität' (2003)

Seminar am 19.02.2003 in Braunschweig, Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig, unveröffentlicht

AUTOREN

Prof. Dr.-Ing. Joachim Stahlmann, Dipl.-Ing. Fabian Kirsch, Dipl.-Ing. Matthias Schallert:
Institut für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig, Gaußstr. 2, 38106
Braunschweig, j.stahlmann@tu-bs.de, f.kirsch@tu-bs.de, m.schallert@tu-bs.de

Dr.-Ing. Oswald Klingmüller, Gesellschaft für Schwingungsuntersuchungen und dynamische Prüfverfahren, Mannheim, Käfertaler Str. 164, 68167 Mannheim, ok@gsp-mannheim.de

Dr.-Ing. Karl-Heinz Elmer, Curt-Risch-Institut für Dynamik, Schall- u. Meßtechnik, Universität Hannover, Appelstr. 9A, 30167 Hannover, elmer@cri.uni-hannover.de