Oswald Klingmüller

DOI: 10.1002/gete.201200020

# Vorgaben des EC7 für dynamische Pfahlprobebelastungen und Regelungen im deutschen Normenhandbuch – Vorschlag zur Vereinfachung

Der Eurocode 7 (EC7) enthält in seinen Entwürfen seit 1994 die dynamische Pfahlprobebelastung als zulässigen Nachweis für die Tragfähigkeit von Pfählen. Die Definitionen der verschiedenen dynamischen Pfahlprobelastungen und der verschiedenen Auswertungsverfahren in den Textabschnitten und auch die erforderlichen Nachweise zur Herstellung einer Vergleichbarkeit von statischen und dynamischen Pfahlprobebelastungen erforderten eine Klarstellung, die in der Neufassung der DIN 1054 vorgenommen wurde und dann in das Normenhandbuch, die deutsche Anwendungsnorm für den EC7, übertragen wurde. Im Beitrag wird die Beziehung von EC7 und Normenhandbuch erläutert und anhand des Wortlauts des EC7 dargestellt, warum eine Klarstellung im Normenhandbuch erforderlich wurde. Es wird auch ein Vorschlag formuliert, der zur Vereinfachung der Regelung führen kann.

**Regulations of EC7 for Dynamic Pile Load Tests and Specifications of the German National Application Document – Proposal for a Simplified Concept.** *In 2011 the German Institute of Standards (DIN) published the "Handbook Eurocode 7 – Geotechnical design – Part 1: General rules" which combines DIN EN 1997-1:2009, DIN EN 1997-1/NA:2010 (national appendix) and DIN 1054:2010 (additional national rules to DIN EN 1997-1) to one work of German rules in geotechnical design. The paper presents the current situation and the problems of application of the code specifications with respect to the current practice of dynamic testing. A simplification of specifications and also a basis for a consistent safety concept is proposed.*

## 1 Einführung – statische und dynamische Pfahlprobebelastungen

Bei Probebelastungen wird ein Mehrfaches der Gebrauchslast als Prüfkraft aufgebracht. Bei statischen Probebelastungen wird diese Prüfkraft in mehreren Laststufen nach einer definierten Belastungsgeschichte durch hydraulische Pressen aufgebracht (siehe EA-Pfähle 2012, [1]). Die Pressen werden entweder gegen eine Totlast gestützt oder gegen eine Umlenkkonstruktion. Je nach der Größe der Prüfkraft kann der Aufwand erheblich sein.

Bei der dynamischen Probebelastung wird die Prüfkraft über ein schweres Fallgewicht aufgebracht (wie beim Rammen von Pfählen). Da beim Rammen von Pfählen die Wirkung der Kraftaufbringung durch ein fallendes Gewicht für das Einbringen genutzt wird, wurden auch zuerst bei Rammpfählen Verfahren entwickelt, den Bodenwiderstand aus der Beobachtung des Rammvorganges zu bestimmen. In Rammformeln wird aus der bleibenden Setzung und der Rammenergie der Widerstand des Pfahles errechnet. Die wesentliche Eingangsgröße, Rammenergie, ergibt sich einfach als potenzielle Energie aus Fallmasse und Fallhöhe. Energieverluste, z. B. in einem Rammfutter oder einer Rammhaube, werden über empirische Faktoren abgeschätzt.

Eine Verbesserung der Berechnung ergab sich, als 1960 durch den Vorschlag von *Smith* [2] eine Simulation des Rammvorganges im Computer möglich wurde. Auch bei dieser Verbesserung des Verfahrens besteht die größte Unsicherheit in der tatsächlich eingeleiteten Energie. Fortgeschrittene Messtechnik ermöglichte dann gegen Ende der 60er Jahre die Bestimmung der Energie durch Messungen der Dehnungen und Beschleunigungen am Pfahlkopf.

Durch die Messungen ergab sich dann auch die Möglichkeit der direkten Auswertung. Vereinfacht wird dabei angenommen, dass ein Pfahlbodenwiderstand $R_{tot}$ (oder $R_{ult}$ oder $R_U$) ermittelt werden kann, der aus einem statischen Anteil $R_s$ und einem dynamischen Anteil $R_d$ besteht:

$$R_{tot} = R_s + R_d \tag{1}$$

Der statische Anteil $R_s$ ist dann der gesuchte und für die Bemessung maßgebliche Pfahlwiderstand.

Die Größe des dynamischen Widerstandes $R_d$ ist nicht nur abhängig vom Boden und von den Pfahleigenschaften, sondern auch von der Art der Lastaufbringung – Größe der Fallmasse, Fallhöhe, Rammfutter, gegebenenfalls Abfangung. In einem vereinfachten Modell wird der dynamische Anteil des Widerstandes als geschwindigkeitsproportional angenommen, mit j als Dämpfungskonstante:

$$R_d = j \cdot v \tag{2}$$

Zuerst wurde die Bestimmung des Widerstandes aus der dynamischen Lastverschiebungskurve am Unloading Point entwickelt. Der Unloading Point ist der Punkt der maximalen Verschiebung, an dem eine Bewegungsumkehr des als starr angenommenen Pfahls unter dem Rammschlag erfolgt. In diesem Punkt ist die Geschwindigkeit $v = 0$ und eine geschwindigkeitsproportionale Dämpfungskraft verschwindet [3].

Beim Unloading Point-Verfahren wird der Pfahl als Massepunkt angenommen. Deswegen ist das Verfahren nicht in der Lage, das Verhalten von Pfählen unter dynamischer Belastung ausreichend zuverlässig zu beschreiben. Als Verbesserung wurde ein Verfahren auf der Grundlage der eindimensionalen Wellentheorie entwickelt [4] [5]. Für die Bestimmung der Dämpfungskraft $R_d = j \cdot v$ werden bei diesem Verfahren empirische Dämpfungskonstanten j eingesetzt. Die empirischen Dämpfungsfaktoren wurden durch Vergleiche mit statischen Versuchen bestimmt (siehe [1], Abschnitt 10.5.2).

Anstatt die Dämpfungskraft unter Verwendung von empirischen Dämpfungsfaktoren zu berechnen, ist es möglich, die Dämpfungskraft bzw. die dynamischen Anteile am Widerstand zu berechnen, wenn mit einem numerischen Verfahren das Verhalten des Pfahls unter dynamischer Belastung bestimmt wird.

Bei der sogenannten vollständigen Modellbildung werden die gemessenen Dehnungen und Beschleunigungen mit der Berechnung an einem Computermodell des Pfahls im Boden verknüpft. Das ursprüngliche Feder-Masse-Modell [2] wurde hierfür weiterentwickelt [6]. In vielen Vergleichen statischer und dynamischer Probebelastungen wurde nachgewiesen, dass diese Widerstände nur wenig voneinander abweichen (siehe Bild 1).

Zusammenfassend können also folgende dynamische Verfahren zur Tragfähigkeitsbestimmung unterschieden werden:

- Rammformeln (vor 1960, siehe z. B. [13]),
- Pfahlberechnung durch Computermodell (1960 [2]),
- Unloading Point-Methode (1970 [3]),
- direkte Auswertung von Messungen am Pfahlkopf mit eindimensionaler Wellentheorie (z. B. CASE-Formel 1975 [4]),
- Auswertung von Messungen am Pfahlkopf mit vollständiger Modellbildung (z. B. CAPWAP, 1979 [5] [6]).

Die Durchführung von dynamischen Probebelastungen wurde seit den 80er Jahren zu einem wichtigen und weltweit eingesetzten Verfahren der Tragfähigkeitsbestimmung von Pfählen. Diese Praxis fand dann auch ihren Niederschlag in Regelungen und Empfehlungen (ASTM 4945 [16], DGEG-Empfehlungen 1986 [9], 1998 [14], EC7 1997 [7], EA-Pfähle 2007 und 2012 [1], Handbuch EC7 [8]).

Die Ausführung dynamischer Probebelastungen wurde Standard bei Rammpfählen vor allem Offshore. Auch auf Ortbetonpfähle wird das Verfahren seit nunmehr über dreißig Jahren angewendet. Bei Ortbetonpfählen werden zur Einleitung der Prüfkraft Freifallgewichte eingesetzt, deren Gewichtskraft in der Regel 1 bis 2 % der nachzuweisenden Prüflast betragen. Mit einem 10-t-Gewicht kann z. B. je nach Bodenverhältnissen eine Tragfähigkeit von 500 bis 1.000 t (5 bis 10 MN) nachgewiesen werden.

Die Verwendung schwererer Fallmassen kann bei Ortbetonpfählen vorteilhaft sein. Durch Abfangung oder weiche Rammfutter kann die Kontaktzeit verlängert und die Stoßkraft bei gleicher Energie verringert werden. Für solche Belastungen wird zwar auch die Bezeichnung Rapid Load-Test (auch unter den Bezeichnungen Hybridnamic, Statnamic, Statrapid) verwendet, ein eigenständiges Verfahren ist dieses Vorgehen aber nicht [12].

## 2 Vorgaben des EC7

Die Anwendung dynamischer Probebelastungen für die Bestimmung der axialen statischen Tragfähigkeit von Pfählen wird im EC7 [8] in den Abschnitten 7.4.1, 7.5.3 sowie in mehreren Abschnitten in Kapitel 7.2.6 angesprochen. Während die Abschnitte 7.4.1 und 7.5.3 als Einführungen in das Nachweiskonzept für axiale Tragfähigkeit eher allgemeine Festlegungen treffen, bezieht sich der Abschnitt 7.6.2.4 ausdrücklich auf die Verfahren, bei denen am Pfahlkopf die Dehnung und die Beschleunigung bzw. die Kraft und die Geschwindigkeit als zeitabhängige Größen gemessen werden. Der Zeitbereich der Messung ist kleiner als 1 s.

Im Abschnitt 7.6.2.4 wird noch in einer Anmerkung darauf hingewiesen, dass durch die Verwendung der vollständigen Modellbildung Mantelreibung und Spitzendruck ermittelt werden können und dass das Modell im Computer die Simulation der statischen Probebelastung mit der Bestimmung einer Lastsetzungskurve ermöglicht. Abschnitt 7.6.2.5 enthält Vorgaben für die Anwendung von Rammformeln. Insbesondere wird festgelegt, dass da-

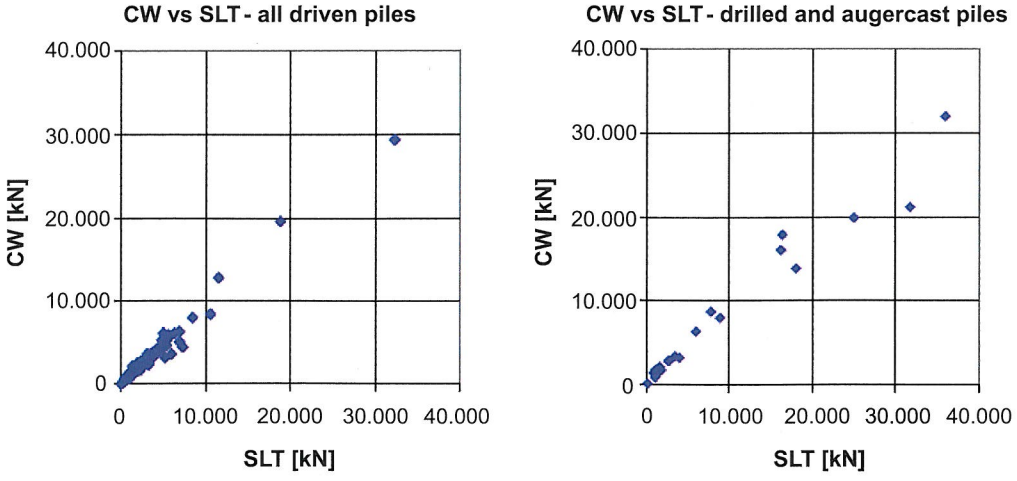


*Bild 1. Korrelation der statischen Widerstände aus dynamischen Versuchen mit vollständiger Modellbildung (hier CAPWAP bzw. CW) und den Widerständen aus statischen Probebelastungen (bezeichnet SLT, aus [10])*
*Fig. 1. Korrelation of static resistances of dynamic load tests with signal matching (here CAPWAP or CW resp.) and resistances as determined by static load tests (denoted SLT, see [10])*

bei mindestens 5 Pfähle pro Pfahl-Boden-Profil zu prüfen sind. In Abschnitt 7.6.2.7 wird die dynamische Pfahlprobebelastung beim Nachrammen behandelt.

Im Abschnitt 7.6.2.6 wird auf die Bestimmung der axialen Tragfähigkeit mit Anwendung des Wellengleichungsverfahrens eingegangen. Die Anforderungen an das Verfahren werden allerdings nicht behandelt. Ebenso wird nicht angegeben, welche Eingangsdaten aus dem Rammvorgang verwendet werden sollen, da die Berechnung entweder mit der Eindringung pro Schlag bei Erreichen der Endtiefe durchgeführt oder das komplette Rammprotokoll nachgerechnet werden kann.

Im Sicherheitskonzept des EC7 wird ein charakteristischer Wert des Pfahlwiderstandes gebildet aus

$$R_{c,k} = R_m/\gamma_R = R_m/\gamma_t \cdot (\xi_5 \text{ oder } \xi_6) \qquad (3)$$

mit

| | |
|---|---|
| $R_m$ | Messwert der Grenztragfähigkeit, |
| $\gamma_R$ | Teilsicherheitsbeiwert, |
| $\gamma_t$ | Widerstandsfaktor, |
| $\xi_5$ oder $\xi_6$ | Korrelationsfaktoren, $\xi_5$ für den Mittelwert, $\xi_6$ für den Mindestwert. |

Die Korrelationsfaktoren werden durch Modellfaktoren abgemindert oder vergrößert. Aus den zusätzlichen Angaben zur Wahl der Modellfaktoren in der Zusammenstellung der empfohlenen Korrelationsbeiwerte in der Tabelle A11 wird ersichtlich, dass die Autoren des EC7 eine Hierarchie der Zuverlässigkeit der Verfahren durch die Durchführung und die Auswertung sehen:

- Rammformel: Modellfaktor $\eta_D = 1{,}2$,
- Rammformel mit Messung der elastischen Verformungen: Modellfaktor $\eta_D = 1{,}1$,
- Auswertung mit einer geschlossenen Formel auf der Grundlage der eindimensionalen Wellentheorie (z. B. CASE) und empirischen Dämpfungsfaktoren: Modellfaktor $\eta_D = 1{,}0$,
- Auswertung mit vollständiger Modellbildung (signal matching, z. B. CAPWAP): Modellfaktor $\eta_D = 0{,}85$.

Die Zusammenstellung der Modellfaktoren in Tabelle A11 bezieht sich nicht direkt auf die Erläuterungen in den Abschnitten 7.6.2.4 bis 7.6.2.7. Im Abschnitt 7.6.2.5 ist nicht erwähnt, dass die Messung der elastischen Verformung während des Rammens zu einer Erhöhung der Sicherheit (und damit zu einer Reduktion des Modellfaktors) führen kann. Für die in Abschnitt 7.6.2.6 erwähnte Berechnung mit der Wellengleichungsmethode ist kein Modellfaktor angegeben.

## 3 Regelungen im Normenhandbuch

Der EC7 soll gewährleisten, dass im europäischen Wirtschaftsraum einheitliche technische Regelungen angewendet werden. Es ist deswegen nicht möglich, die Vorgaben des EC7 bei der Einführung in den einzelnen Teilnehmerländern zu ändern.

Durch nationale Anwendungsdokumente werden die Vorgaben den speziellen Gegebenheiten in den einzelnen Ländern angepasst. Diese Anwendungsdokumente können aber lediglich Widerstandsfaktoren oder Korrelationsfaktoren entsprechend nationalen Sicherheitsstandards festlegen oder durch spezielle Erläuterungen und Anwendungshinweise die Rahmenvorgaben des EC7 der nationalen Praxis anpassen. Im deutschen Normenhandbuch – Handbuch EC7 [8] – wird durch Erläuterungen versucht, die Vorgaben des EC7 etwas zu strukturieren. Ausgehend von der implizit angegebenen Hierarchie in der Durchführung und der Auswertung gibt das Normenhandbuch [8] in einer Anmerkung zu Abschnitt 7.6.1.4 eine Einteilung in Stoßversuche und dynamische Probebelastungen vor:

*Stoßversuch*:
mit
1) Rammformeln,
2) verbesserte Rammformeln mit gemessener maximaler elastischer Verformung,
3) Wellengleichungsverfahren.

*Dynamische Pfahlprobebelastung*:
mit
4) dynamische Pfahlprobebelastungen mit Auswertungen nach dem direkten Verfahren,
5) dynamische Pfahlprobebelastungen mit Auswertungen nach dem erweiterten Verfahren mit vollständiger Modellbildung.

Weitere Hinweise zu den verschiedenen Verfahren, deren Anwendungsgrenzen und Anwendungsbedingungen siehe EA-Pfähle 2012, 5.3 und 10 [1].

Gegenüber der Tabelle A11 des EC7 wurde die Tabelle A7.2 im Normenhandbuch zur Vervollständigung um einen Modellfaktor für die Auswertung mit der Wellengleichung erweitert:

- Rammformel: Modellfaktor $\eta_D = 1{,}2$,
- Rammformel mit Messung der elastischen Verformungen: Modellfaktor $\eta_D = 1{,}1$,
- Auswertung mit der Wellengleichungsmethode: Modellfaktor $\eta_D = 1{,}05$,
- Auswertung mit einer geschlossenen Formel auf der Grundlage der eindimensionalen Wellentheorie (z. B. CASE) und empirischen Dämpfungsfaktoren: Modellfaktor $\eta_D = 1{,}0$,
- Auswertung mit vollständiger Modellbildung (signal matching, z. B. CAPWAP): Modellfaktor $\eta_D = 0{,}85$.

Während der EC7 allgemein verlangt, dass nachgewiesen wird, dass die statischen Widerstände aus dynamischen Prüfungen den statischen Widerständen aus statischen Prüfungen entsprechen, wird im Normenhandbuch ein spezieller Zuschlag zu den Korrelationsfaktoren (siehe auch Abschnitt 2) durch

$$\xi_i = (\xi_{o,i} + \Delta\xi) \cdot \eta_D \qquad (4)$$

vorgegeben. Der Erhöhungswert $\Delta\xi$ ist in Abhängigkeit von der Zuverlässigkeit, mit der Tragfähigkeiten aus dynamischen Versuchen den Tragfähigkeiten aus statischen Versuchen gleichgesetzt werden können, zu wählen:

- $\Delta\xi = 0$: für die Kalibrierung dynamischer Auswerteverfahren an statischen Pfahlprobebelastungsergebnissen auf dem gleichen Baufeld;

- $\Delta\xi$ = 0,10: für die Kalibrierung dynamischer Auswerteverfahren an statischen Pfahlprobebelastungsergebnissen an einer vergleichbaren Baumaßnahme;
- $\Delta\xi$ = 0,40: für die Kalibrierung dynamischer Auswerteverfahren aufgrund belegbarer oder allgemeiner Erfahrungswerte für Pfahlwiderstände, z. B. aus [6] [1]. Die Anwendung des direkten Verfahrens, wie z. B. CASE- oder TNO-Verfahren, ist nicht zulässig.

Gegenüber den Vorgaben des EC7 ermöglicht diese Regelung, dynamische Pfahlprobebelastungen auch dann durchzuführen, wenn es keine direkten statischen Probebelastungen auf demselben Baufeld gibt.

## 4 Sicherheitskonzept – partielle und äquivalente globale Sicherheitsfaktoren

Ohne auf die Regelungen im Einzelnen einzugehen, werden im Folgenden die Sicherheitsfaktoren und das grundlegende Sicherheitskonzept erläutert.

In Tabelle A3 des EC7 werden Lastfaktoren für ständige Belastung mit 1,35 und für veränderliche Belastung mit 1,5 angegeben. Wenn für die Bestimmung eines globalen Sicherheitsfaktors für die Pfahlbemessung der Anteil der ständigen Belastung zu 70 % angenommen wird, ergibt sich ein zusammengefasster Lastfaktor zu 1,395. Als Widerstandsfaktor wird in Tabelle A2.3 zu $\gamma_R$ = 1,1 festgelegt. Für die Bestimmung der Korrelationsfaktoren sind die Anzahl der geprüften Pfähle und auch der Modellfaktor zu beachten.

Der größte Korrelationsfaktor wird für die dynamische Prüfung von 2 Pfählen zu 1,6 angegeben. Wird eine vollständige Modellbildung durchgeführt, ist der Korrelationsfaktor mit dem zugehörigen Modellfaktor zu multiplizieren: 1,6 · 0,85 = 1,36. Der kleinste Korrelationsfaktor ergibt sich für die Prüfung von 20 Pfählen und Auswertung mit vollständiger Modellbildung zu 1,25 · 0,85 = 1,0625. Für Auswertung mit vollständiger Modellbildung liegt der äquivalente Sicherheitsfaktor zwischen 1,395 · 1,1 · 1,25 · 0,85 = 1,63 und 2,09.
Wenn aufgrund der Art der Kalibrierung (bei vergleichbarer Baumaßnahme aus Erfahrungswerten) ein Zuschlag vorgenommen werden muss, ergibt sich für $\Delta\xi$ = 0,40 ein maximaler äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor von 2,61.

Aus vorstehenden Ausführungen wird ersichtlich, dass das Sicherheitsniveau sich an dem früher verwendeten Sicherheitsfaktor 2 orientiert, aber aufgrund des Konzeptes der partiellen Sicherheitsfaktoren eine erheblich differenziertere Berücksichtigung der unterschiedlichen Gegebenheiten ermöglicht.

## 5 Kalibrierung – Äquivalenz von statischen und dynamischen Probebelastungen

Das Vorgehen bei der dynamischen Pfahlprüfung erfordert einen sehr viel geringeren Aufwand als die statische Probebelastung. Aber die schnellen Bewegungen und Dehnungsänderungen des Pfahlkopfes beim Auftreffen der Fallmasse definieren ein dynamisches Problem und müssen bei der Auswertung der Messungen in einem mechanischen Modell berücksichtigt werden.

Die Normung [7] [8] verlangt für Nachweise aufgrund von dynamischen Probebelastungen, dass die Vergleichbarkeit mit statischen Probebelastungen nachgewiesen wird. In den verschiedenen Abschnitten des EC7 (7.4.1, 7.5.3, 7.6.2.4) werden jeweils unterschiedliche Formulierungen für diese Anforderung gewählt.

Vereinfacht wird die Darstellung des Zusammenhangs statischer und dynamischer Prüfungen als Kalibrierung bezeichnet. Es ist anzunehmen, dass die Fachleute, die in den Komitees die Anforderung formuliert haben, sicher sind, dass von den Anwendern der Normen verstanden wird, wie zu verfahren ist.

Anscheinend wurde bei der Formulierung des EC7 davon ausgegangen, dass dynamische Probebelastungen immer einen zu hohen Widerstand oder eine zu hohe Tragfähigkeit liefern und dass es durch die statische Probebelastung möglich ist, einen Abminderungsfaktor zu bestimmen.
Wie *Likins* u. a. [10] [11] ausführlich dargestellt haben, sind beim Vergleich statischer und dynamischer Probebelastungen immer auch die Randbedingungen der statischen und der dynamischen Probebelastungen zu beachten.

Das Erfordernis und die Problemstellung der Kalibrierung ist in den Lastsetzungskurven (Bild 2) für Ortbetonpfähle in weichem Seeton und in Bild 3 für Ortbetonpfähle im Mergel zu erkennen. Im Seeton zeigen sich bei statischer Belastung Kriechsetzungen bei den Laststufen über 600 kN. Im Mergel zeigt sich, dass die Lastsetzungskurve des statischen Versuchs schon ab 1 MN ein weicheres Verhalten gegenüber den beiden auf unterschiedliche Weise durchgeführten dynamischen Probebelastungen zeigt.

In beiden Fällen ist aber die Kalibrierung nicht in Form einer Bestimmung eines Skalierungsfaktors direkt ausführbar:
- Im Seeton wurde die statische Prüfung an einer 15 m langen Säule durchgeführt, die dynamischen Prüfungen an einer 18 m und einer 19 m langen Säule.
- Die statische Prüfung im Mergel war auf die zweifache Gebrauchslast ausgelegt, ein Tragfähigkeitszuwachs bei höheren Setzungen bis zur Grenzsetzung d/10 (hier 60 mm) wurde nicht bestimmt. Im gemessenen Belas-

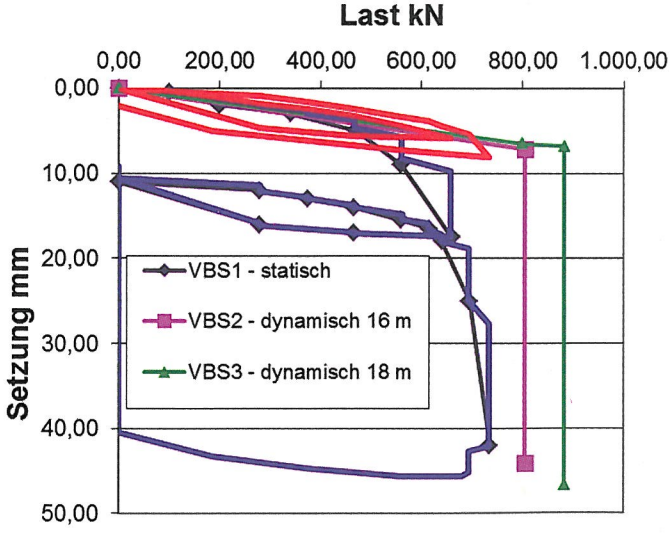


*Bild 2. Ortbetonpfähle (Rüttelstopfsäulen) in bindigem Boden*
*Fig. 2. Vibro Cast-in-place concrete piles in cohesive soil*

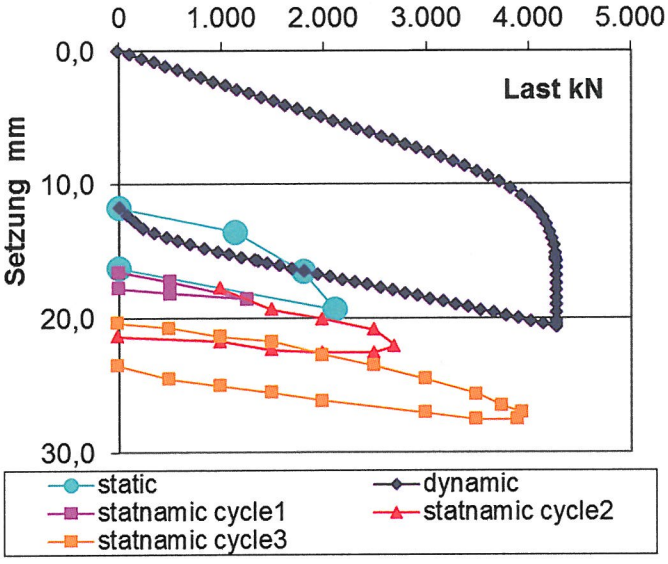


*Bild 3. Ortbetonpfähle im Mergel*
*Fig. 3. Cast-in-place piles in till*

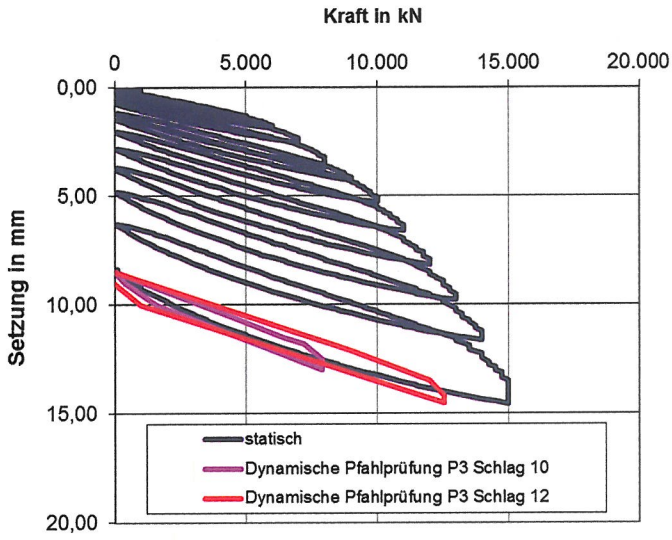


*Bild 5. Ortbetonpfahl im Tonstein – Freifallgewicht 10 t*
*Fig. 5. Cast-in-place piles in hard clay – drop mass 10 t*

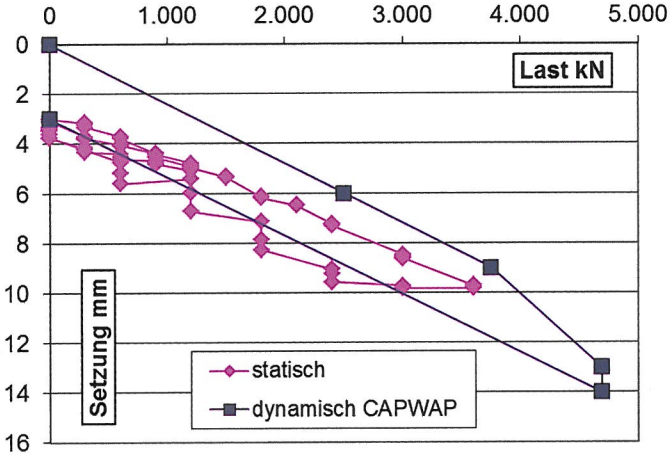


*Bild 4. Fertigbetonpfähle im dichtgelagerten Sand*
*Fig. 4. Driven precast concrete piles in dense sand*

tungsbereich war das Kriechkriterium eingehalten. Insofern kann es möglich sein, die im dynamischen Versuch bestimmten Bodenwiderstände von 4 MN für Nachweise zu verwenden, allerdings wäre es erforderlich, hierzu weitere Untersuchungen durchzuführen oder bei der statischen Probebelastung die Last zu erhöhen.

Die Lastsetzungskurve in Bild 4 zeigt das Ergebnis einer Prüfung eines Fertigbetonpfahls in mitteldichten bis sehr dichten Sanden. Die statische Prüfung wurde mehrere Wochen nach den dynamischen Prüfungen durchgeführt und zeigt demnach durch das Festwachsen ein etwas steiferes Verhalten als das Ergebnis der dynamischen Prüfung.

Die Lastsetzungskurve in Bild 5 zeigt, dass die dynamischen Probebelastungen häufig weniger Tragfähigkeit nachweisen als die statischen. Während Pressenkräfte für die statischen Probebelastungen auf die doppelte Gebrauchslast ausgelegt wurden, wurden die dynamischen Probebelastungen im Tonstein mit einer verfügbaren Belastungseinrichtung (hier ein 10-t-Fallgewicht) durchgeführt. Der nachweisbare statische Anteil des Bodenwiderstandes ist jedoch auch abhängig von der Größe des Fallgewichtes und den Bodeneigenschaften und kann im Vorfeld nur abgeschätzt werden. Deswegen wird meist die Bezeichnung „aktivierter statischer Bodenwiderstand" gewählt. Das 10-t-Freifallgewicht konnte nur nahezu 9 MN statischen Bodenwiderstand aktivieren gegenüber einem Widerstand von 15 MN im statischen Versuch.

Die Kalibrierung dynamischer Probebelastungsergebnisse an den Ergebnissen statischer Probebelastungen entsprechend Normenhandbuch [8] ist eigentlich nur dann möglich, wenn das Nachweiskonzept mit Streuungsfaktoren und Zuschlägen vorher aufgestellt wird und die Probebelastungen dementsprechend ausgelegt werden.

## 6 Stand der Technik bei dynamischen Pfahlprobebelastungen und Probleme mit der Anwendung des EC7

### 6.1 Auswertungsverfahren

Während sich die Anwendung der dynamischen Probebelastung in den vergangenen 30 Jahren entwickelt hat – allerdings in den verschiedenen europäischen Ländern sehr unterschiedlich –, sind die Regelungen des EC7 seit der ersten Ausgabe 1994 unverändert. Auch die Anmerkungen und Erläuterungen im deutschen Normenhandbuch [8] können die grundlegenden Schwierigkeiten bei der Anwendung des EC7 nicht aufheben.

In Bezug auf die zugelassenen Verfahren ist festzustellen:

- die Verschärfung der Rammformel durch die Messung der elastischen Stauchung am Pfahlkopf hat als Verfahren ausschließlich historischen Charakter,
- die Bestimmung von Widerständen durch die Anwendung der Wellengleichungsmethode auf der Grundlage von Angaben aus dem Rammprotokoll ist ein Verfahren, welches höchstens in Ausnahmefällen zum Einsatz kommt (bei einer normativen Festlegung sollte zudem genau definiert sein, wie und mit welchen Eingangsdaten die Berechnung durchgeführt wird).

Es wäre also sinnvoll und möglich, beide Verfahren nicht mehr aufzuführen.

Durch die Entwicklung der Computertechnologie in den letzten 30 Jahren hat sich das Verfahren der vollstän-

digen Modellbildung als Standard herausgebildet. Lediglich durch die Größe der Modellfaktoren wird deutlich, dass das Verfahren der vollständigen Modellbildung bevorzugt wird. Der tatsächlichen Praxis, nach der ausschließlich das Verfahren der vollständigen Modellbildung herangezogen wird und die Auswertung mit Rammformeln oder nach dem direkten Verfahren (z. B. CASE-Formel) nur in Verbindung mit der vollständigen Modellbildung eingesetzt wird, wird diese versteckte Bevorzugung nicht gerecht. Die Auswertung mit der vollständigen Modellbildung sollte besser eindeutig als alleiniges Verfahren für Tragfähigkeitsnachweise mit dynamischer Probebelastung zugelassen werden.

### 6.2 Sicherheitskonzept – Korrelationsfaktoren

Das Sicherheitskonzept, d. h. die Festlegung von Korrelations- und Modellfaktoren, basiert auf der Angabe zweier getrennter Tabellen für statische und dynamische Probebelastungen [8]. Auch die im Normenhandbuch vorgenommene Klarstellung, dass bei einer Kombination von statischen und dynamischen Ergebnissen nach geotechnischer Prüfung der jeweils höchste zulässige Widerstand gelten kann, löst das Problem der Kombination nicht wirklich.

- Wenn statische Probebelastungen durch eine Anzahl dynamischer Probebelastungen ergänzt werden, ermöglicht das „entweder/oder"-Schema nicht, die tatsächliche Verbesserung der Sicherheit zu bewerten.
- Bei großen Rammpfahlgründungen ist es üblich, durch eine Anzahl statischer und dynamischer Probebelastungen das Rammkriterium festzulegen. Da dann bei jedem Pfahl die Einhaltung des Rammkriteriums überprüft wird, ergibt sich eine zusätzliche Sicherheit, die im Konzept der getrennten Korrelationsfaktoren nicht berücksichtigt werden kann.
- Durch Kalibrieren soll erreicht werden, dass der statische Widerstand aus einer dynamischen Prüfung dem aus einer statischen Prüfung gleichgesetzt werden kann. Dass dann aber andere Korrelationsfaktoren vorgesehen sind, widerspricht dieser Intention.
- Das jetzige Konzept der Korrelationsfaktoren berücksichtigt nicht, dass es einen sehr großen Erfahrungsschatz für Rammpfähle gibt, der auch eine homogene Datenbasis für statistische bzw. wahrscheinlichkeitstheoretische Auswertungen bietet, wohingegen für Ortbetonpfähle weniger Ergebnisse vorliegen und diese aufgrund der Vielzahl von Varianten (verrohrt, bentonitgestützt, Schneckenbohrpfähle ohne und mit Verdrängung, Ortbetonrammpfähle, Beton-Rüttelstopfsäulen usw.) nur sehr eingeschränkt einer statistischen Auswertung zugänglich sind.
- Das jetzige Konzept der Korrelationsfaktoren berücksichtigt auch nicht, dass der statische Widerstand aus einer dynamischen Prüfung im tragfähigen, mitteldicht bis sehr dicht gelagertem Sand oder Kies ausreichend genau bestimmt werden kann, während bei der Einbindung in bindigen Boden immer die Zeitabhängigkeit der Setzungen unter konstanter Belastung berücksichtigt werden muss.

Da also einige Vorgaben des EC7 nicht auf die tatsächliche Praxis der dynamischen Pfahlprüfung anwendbar sind, ist aus Sicht des Verfassers eine Neufassung erforderlich. Im Zuge einer Überarbeitung des EC7 sollten die Regelungen vereinfacht und auf die tatsächliche Praxis angepasst werden. Bei dieser Erneuerung könnte auch versucht werden, die Regelungen in ein konsistentes Sicherheitskonzept einzubetten.

## 7 Vorschlag zur Vereinfachung

Konsistente Regelungen für dynamische Pfahlprobebelastungen sollten dem Umstand Rechnung tragen, dass die vollständige Modellbildung sich als Auswertungsstandard durchgesetzt hat und dass dieses Verfahren auf einer geschlossenen mechanisch-mathematischen Theorie basiert.

Insofern sollte die Regelung folgende Vorgaben enthalten:

*A*

Die Tragfähigkeit von Pfählen kann mit der Dynamischen Pfahlprobebelastung (Messung der zeitabhängigen Kraft und Geschwindigkeit am Pfahlkopf bei Stoßbelastung) bestimmt werden, wenn die Auswertung mit vollständiger Modellbildung erfolgt und die Vergleichbarkeit zur Tragfähigkeit aus einer statischen Probebelastung nachgewiesen ist.

a) Die vollständige Modellbildung ist das einzige Verfahren, das in der Lage ist, das Verhalten des Pfahls im Boden richtig zu beschreiben und die Messungen auszuwerten. Vor allem ist es mit dem Verfahren möglich, Pfähle im geschichteten Baugrund genau zu beschreiben. Bei Pfählen mit veränderlichem Querschnitt und insbesondere bei Bohrpfählen lässt sich mit geeigneten Programmen eine ausreichend genaue Beschreibung des Pfahls im Boden erzielen. Da bei den anderen möglichen Verfahren, Rammformeln und direktes Verfahren, empirische Faktoren benötigt werden, sollten diese Auswertungen immer durch statische Probebelastungen oder Auswertungen mit der vollständigen Modellbildung abgesichert werden.
   Bei Rammpfahlgründungen ergibt sich durch die Auswertung einer Anzahl Pfähle mit der vollständigen Modellbildung eine sinnvolle Kombination der Verfahren.
   Bei Bohrpfählen muss die Anwendung ausschließlich mit der vollständigen Modellbildung ausgeführt werden, da es erforderlich ist, das Querschnitts-Profil und die Beton-Eigenschaften zu modellieren.
b) Der Unterschied zwischen einer statischen Belastung und einer dynamischen Belastung sollte bei der Festlegung von Widerständen und insbesondere von Verschiebungsgrenzen immer beachtet werden. Hierbei ist der Unterschied zwischen bindigen und nichtbindigen Böden besonders zu beachten. Während es bei nichtbindigen Böden in der Regel eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den errechneten und den tatsächlichen Setzungen gibt, kann das Kriechverhalten unter konstanter Belastung bei bindigen Böden bei der dynamischen Belastung nicht zufriedenstellend bestimmt werden. Wie in Abschnitt 4 gezeigt wurde, ist die Bestimmung der Vergleichbarkeit in Bezug auf die Verschiebungen nur dann herzustellen, wenn ein Versuchsprogramm unter Einbeziehung statischer und dynamischer Prüfungen gemeinsam geplant wird.

*B*

Das Sicherheitskonzept sollte dem ingenieurmäßigen Grundsatz folgen, dass in situ-Prüfungen die Sicherheit erhöhen. Je mehr Pfahlprobebelastungen (statisch oder dynamisch) also durchgeführt werden, umso kleiner sollte der äquivalente globale Sicherheitsfaktor sein.

Ein Sicherheitskonzept, bei dem die Durchführung von in situ-Prüfungen durch eine Reduzierung der Sicherheitsfaktoren belohnt wird, wurde in einem Regelwerk der American Association of State Highway and Transport Organisations realisiert. Je nach der Anzahl der Bodenuntersuchungen sowie der statischen und dynamischen Probebelastungen verschiedener Auswertungsverfahren wird der Sicherheitsfaktor von 3,5 bis 1,9 vermindert. Das jetzige Sicherheitskonzept enthält getrennte Korrelationsfaktoren für statische und Korrelationsfaktoren für dynamische Prüfung.

In einem konsistenten Sicherheitskonzept sollten die verschiedenen Aspekte der Prüfung berücksichtigt werden können:

- wenn statische Probebelastungen durch dynamische ergänzt werden, sollte es möglich sein, ausgehend von den Korrelationsfaktoren für statische Prüfungen, eine Reduktion des Widerstandsfaktors zu bestimmen;
- wenn zusätzlich bei Rammpfahlgründungen eine durch die vollständige Modellbildung bestimmte Rammformel für die Überprüfung aller Pfähle eingesetzt wird, ist dies ein Sicherheitsgewinn, der zu einer Reduktion der Korrelationsfaktoren führen sollte;
- wenn die Pfähle, wie es üblich ist, in sehr tragfähigem nichtbindigen Boden (z. B. dichtgelagerten Sanden) abgesetzt werden, ist die Äquivalenz von statischen und dynamischen Probebelastungen durch so viele Vergleiche nachgewiesen, dass die Ergebnisse als statische Tragfähigkeiten verwendet werden können,
- bei Pfählen mit bindigen Böden im Pfahlfußbereich ist immer zu festzustellen, wie zeitabhängige Setzungen unter konstanter Belastung (Kriechen) das Tragverhalten beeinflussen;
- bei Ortbetonpfählen sollte auch die Zuverlässigkeit des Herstellungsverfahrens (verrohrt hergestellte Pfähle, Schneckenbohrpfähle mit oder ohne Verdrängung, Ortbetonrammpfähle, Atlaspfähle usw.) und die Möglichkeit der Qualitätssicherung im Sicherheitskonzept berücksichtigt werden können, da diese auch Einfluss auf die Zuverlässigkeit der Ergebnisse einer dynamischen Probebelastung haben können.

Da es nicht möglich sein wird, alle Punkte in einem Sicherheitskonzept abzudecken und auch nicht sinnvoll ist, den geotechnischen Sachverständigen vollständig von seiner Verantwortung zu entlasten, sollte durch eine Grundsatzformulierung das ingenieurmäßige Prinzip als Grundlage der Wahl von Sicherheitsfaktoren (Korrelationsfaktoren, Modellfaktoren, Widerstandsfaktoren) eingeführt werden.

Bei der Komplexität des Sicherheitskonzeptes ist auch weiterhin von einem Ineinandergreifen von Normung, Anmerkungen und Erläuterungen sowie Empfehlungen für Ausführung und Auswertung auszugehen.

**Literatur**


[1] Deutsche Gesellschaft für Geotechnik: Empfehlungen des Arbeitskreises „Pfähle" – EA-Pfähle. 2. Auflage, Berlin: Ernst & Sohn, 2012.

[2] *Smith, E. A. L.*: Pile driving analysis by the wave equation. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE 86 (1960), No. 4, pp. 35–64.

[3] *Goble, G. G., Rausche, F.*: Pile load test by impact driving. Highway Research Record No. 333, Highway Research Board, 1970.

[4] *Rausche, F.*: Dynamische Methoden zur Bestimmung der Tragfähigkeit von Rammpfählen. Baugrundtagung Frankfurt/Main-Höchst, S. 395–409, 1974.

[5] *Goble, G. G., Likins, G., Rausche, F.*: Bearing Capacity of Piles from Dynamic Measurements. Final Report. Ohio Department of Transportation, 1975.

[6] *Goble, G. G., Rausche, F.*: Pile driveability predictions by CAPWAP. Institution of Civil Engineers, Numerical Methods in Offshore Piling. London, pp. 29–36, 1979.

[7] Eurocode 7: Geotechnical design, 1994.

[8] Handbuch Eurocode 7 – Geotechnische Bemessung, Band 1. Berlin: Beuth Verlag, 2011.

[9] *Franke, E., Seitz, J. M.*: Empfehlungen des Arbeitskreises 5 der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau für Dynamische Pfahlprüfungen. geotechnik 9 (1986), S. 197–205.

[10] *Likins, G., Rausche, F.*: Correlation of CAPWAP with static load tests. Proceedings 7th International Conference on the Application of Stresswave Theory to Piles. Petaling Jaya, Selangor, Malaysia, pp. 153–165, 2004.

[11] *Likins, G., Piscalko, G., Roppel, S., Rausche, F.*: PDA Testing 2008 – A state of the Art. Proceedings 8th International Conference on the Application of Stresswave Theory to Piles. Lisbon, pp. 395–402, 2008.

[12] *Stahlmann, J., Middendorp, P., Fischer, J.*: Rapid-Load-Tests und dynamische Pfahlprobebelastungen – ein Vergleich. 32. Baugrundtagung Mainz, Deutsche Gesellschaft für Geotechnik, S. 67–74, 2012.

[13] *Klingmüller, O.*: Dynamische Pfahlprüfung als Optimierungsproblem. In: Pfahlsymposium, Mitteilungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, TU Braunschweig, H. 38, S. 149–176, 1991.

[14] Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau: Empfehlungen des AK 2.1 für statische und dynamische Pfahlprüfungen. Braunschweig, 1998.

[15] *Rollberg, D.*: Zur Anwendung von Rammformeln. Bautechnik 57 (1980), H. 10, S. 337–343.

[16] ASTM 4945 Standard Test Method for High Strain Dynamic Testing of Piles, 2000.



**Autor**

Dr.-Ing. Oswald Klingmüller
GSP Gesellschaft für Schwingungsuntersuchungen
und dynamische Prüfmethoden mbH
Steubenstraße 46
68163 Mannheim



Eingereicht zur Begutachtung: 30. November 2012
Überarbeitet: 30. Januar 2013
Angenommen zur Publikation: 30. Januar 2013