

**Vorgaben des EC7 für Dynamische Pfahlprobelastungen
und
Regelungen im Deutschen Normenhandbuch
- Vorschlag zur Vereinfachung**

Oswald Klingmüller

veröffentlicht in:

Geotechnik, Jahrgang 36, Heft 1, 2013

Vorgaben des EC7 für Dynamische Pfahlprobelastungen und Regelungen im Deutschen Normenhandbuch - Vorschlag zur Vereinfachung

Oswald KLINGMÜLLER^{1*}

GSP mbH Mannheim

Zusammenfassung

- 1. Einführung –dynamische Pfahlprobelastungen**
- 2. Vorgaben des EC7**
- 3. Regelungen im Normenhandbuch**
- 4. Sicherheitskonzept – partielle und äquivalente globale Sicherheitsfaktoren**
- 5. Kalibrierung**
- 6. Stand der Technik bei dynamischen Pfahlprobelastungen und Probleme mit der Anwendung des EC7**
- 7. Vorschlag zur Vereinfachung**

Zusammenfassung

Der EC7 enthält in seinen Entwürfen seit 1994 die dynamische Pfahlprobelastung als zulässigen Nachweis für die Tragfähigkeit von Pfählen. Die Definitionen der verschiedenen dynamischen Pfahlprobelastungen und der verschiedenen Auswertungsverfahren in den Text-Abschnitten und auch die erforderlichen Nachweise zur Herstellung einer Vergleichbarkeit von statischen und dynamischen Pfahlprobelastungen erforderten eine Klarstellung, die in der Neufassung der DIN 1054 von 2005 vorgenommen wurde und dann in das Normenhandbuch, der deutschen 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.

Abstract

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 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 Pfahlprobelastungen

Bei Probelastungen wird ein Mehrfaches der Gebrauchslast als Prüfkraft aufgebracht.

Bei statischen Probelastungen wird diese Prüfkraft in mehreren Laststufen nach einer definierten Belastungsgeschichte durch hydraulische Pressen aufgebracht (siehe EAPfähle 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 Probelastung 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 potentielle 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 in 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:

$$R_{tot} = R_s + R_d$$

Der statische Anteil R_s ist dann der gesuchte und für die Bemessung maßgebliche Pfahl-Widerstand, also die Prüflast.

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, $R_d = j \cdot v$ mit j als Dämpfungskonstante

Zuerst wurde die Bestimmung des Widerstandes aus der dynamischen Lastverschiebungskurve am Unloading Point entwickelt. Der „Unloading Point“ ist der Punkt der maximalen Verschiebung. 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], z.B. CASE). Für die Bestimmung der Dämpfungskraft $R_d = j \cdot v$ werden bei diesem Verfahren empirische Dämpfungsfaktoren j eingesetzt. Die empirischen Dämpfungsfaktoren wurden durch statische Versuche bestimmt (siehe [1], Abschnitt 10.5.2).

Gegenüber der Verwendung von empirischen Dämpfungsfaktoren 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 vollständigen Modellbildung werden die gemessenen Dehnungen und Beschleunigungen mit der Berechnung an einem Computer-Modell des Pfahls im Boden verknüpft. Das ursprüngliche Feder-Masse-Modell [2] wurde hierfür weiterentwickelt ([6], z.B. CAPWAP).

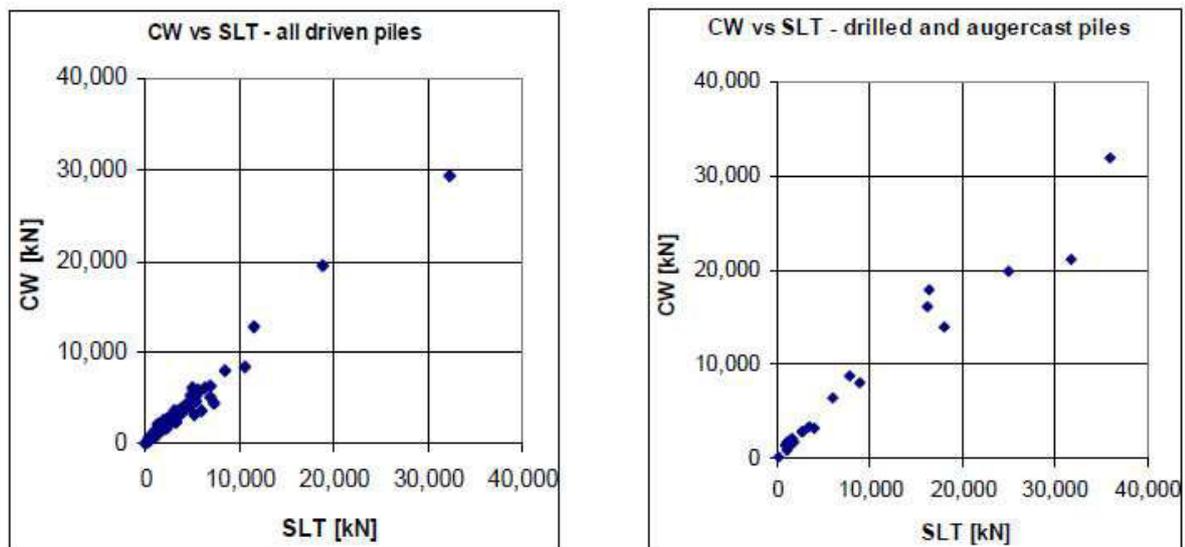


Bild 1: Korrelation der statischen Widerstände aus dynamischen Versuchen mit vollständiger Modellbildung (hier CAPWAP) und den Widerständen aus statischen Probelastungen (aus [10])

In vielen Vergleichen statischer und dynamischer Probelastungen 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 Probelastungen wurde seit den 80er Jahren zu einem wichtigen und weltweit eingesetzten Verfahren der Tragfähigkeitsbestimmung. Diese Praxis fand dann auch ihren Niederschlag in Regelungen und Empfehlungen (ASTM 4945 [16], DGE-empfehlungen 1986 [9], 1998 [14], EC7 1997 [7], EAPfähle 2007 und 2012 [1], Handbuch EC7 [8]).

Die Ausführung dynamischer Probelastungen wurde Standard bei Rammpfählen vor allem Offshore. Auch auf Ortbetonpfähle wird das Verfahren seit nunmehr über dreißig Jahren angewendet.

Bei Ortbetonpfählen werden Freifallgewichte eingesetzt, die in der Regel 1 - 2 % der Prüflast betragen. Z.B. kann mit einem 10 t Gewicht 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 Hybriddynamic, Statnamic, Statrapid) verwendet, ein eigenständiges Verfahren ist dieses Vorgehen aber nicht [12].

2. Vorgaben des EC7

Die Anwendung dynamischer Probelastungen für die Bestimmung der axialen statischen Tragfähigkeit 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 ist kleiner als 1 Sekunde.

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 Probelastung mit der Bestimmung einer Lastsetzungskurve ermöglicht.

Abschnitt 7.6.2.5 enthält Vorgaben für die Anwendung von Rammformeln. Insbesondere wird festgelegt, dass mindestens 5 Pfähle pro Pfahl-Boden-Profil zu prüfen sind.

In Abschnitt 7.6.2.7 wird die dynamische Pfahlprobelastung 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 mit der Eindringung pro Schlag bei Erreichen der Endtiefe durchgeführt werden kann aber auch das komplette Rammprotokoll nachgerechnet werden kann.

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

Modell Faktor $\eta_D = 1,2$

Rammformel mit Messung der elastischen Verformungen

Modell Faktor $\eta_D = 1,1$

Auswertung mit einer geschlossenen Formel auf der Grundlage der eindimensionalen Wellentheorie (z.B. CASE) und empirischen Dämpfungsfaktoren:

Modell Faktor $\eta_D = 1,0$

Auswertung mit vollständiger Modellbildung (signal matching, z.B. CAPWAP),

Modell Faktor $\eta_D = 0,85$

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 Probelastungen vor:

A ANMERKUNG zu (1)P Die Stoßversuche und dynamischen Pfahlprobelastungen sind wie folgt zu unterscheiden:

Stoßversuch:

Verfahren zur Bestimmung statischer axialer Widerstände aus einer dynamischen Stoßbelastung (fallendes Gewicht, Rammbar, o. ä.):

1) Auswertung durch einfache Rammformeln: Eingangswerte sind die gemessene Setzung je Schlag, Hammerenergie, Pfahleigenschaften (Masse und Steifigkeit), empirische Werte für u. a. Boden, Ramm- und Pfahlsystem.

Ergebnis: Axialer Pfahlwiderstand.

2) Auswertung durch verbesserte Rammformeln: Eingangswerte sind die gemessene Setzung je Schlag sowie gemessene maximale elastische Verformung am Pfahlkopf, Hammerenergie, Pfahleigenschaften (Masse und Steifigkeit), empirische Werte für u. a. Boden, Ramm- und Pfahlsystem.

Ergebnis: Axialer Pfahlwiderstand.

3) Auswertung durch Wellengleichungsverfahren: Eingangswerte sind die gemessene Setzung je Schlag, Daten des Rammgerätes, einschließlich Futter und Rammhaube, Pfahleigenschaften (Querschnitt, Länge), empirische Werte für die elastische Grenzdehnung und Dämpfung des Bodens.

Ergebnis: Axialer Pfahlwiderstand.

Dynamische Pfahlprobelastung:

Verfahren zur Messung der zeitabhängigen Kraft und Bewegung am Pfahlkopf während der Stoßdauer ($\ll 1$ s):

4) Dynamische Pfahlprobelastungen mit Auswertungen nach dem direkten Verfahren: Aus den Messkurven werden Einzelwerte der Kraft und der Geschwindigkeit abgelesen und mit einer Formel ausgewertet (z. B. CASE- oder TNO-Verfahren). Die Formel ist auf der Grundlage der Wellentheorie abgeleitet. Eingangsdaten sind außerdem Pfahlquerschnitt, Material und Länge.

Ergebnis: Axialer Pfahlwiderstand.

5) Dynamische Pfahlprobelastungen mit Auswertungen nach dem erweiterten Verfahren mit vollständiger Modellbildung: Mit Hilfe der gemessenen Kraft und Bewegungszeitverläufe am Pfahlkopf wird ein Modell des Pfahls im Boden iterativ bestimmt (z. B. CAPWAP- oder TNOWAVE-Verfahren). Eingangsdaten sind außerdem Pfahlquerschnitt, Material und Länge.

Ergebnis: Widerstands-Setzungs-Linie und Verteilung von Pfahlmantel- und Pfahlfußwiderstand.

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

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

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

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 durch

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

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 Pfahlprobelastungsergebnissen auf dem gleichen Baufeld;
- $\Delta\xi = 0,10$: für die Kalibrierung dynamischer Auswerteverfahren an statischen Pfahlprobelastungsergebnissen an einer vergleichbaren Baumaßnahme;

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

Gegenüber den Vorgaben des EC7 ermöglicht diese Regelung, dynamische Pfahlprobelastungen auch dann durchzuführen, wenn es keine direkten statischen Probelastungen 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 variable 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 $1,6 \cdot 0,85 = 1,36$.

Der kleinste Korrelationsfaktor ergibt sich für die Prüfung von 20 Pfählen und Auswertung mit vollständiger Modellbildung zu $1,25 \cdot 0,85 = 1,0625$.

Für Auswertung mit vollständiger Modellbildung liegt der äquivalente Sicherheitsfaktor zwischen $1,395 \cdot 1,1 \cdot 1,25 \cdot 0,85 = 1,63$ und 2,09.

Wenn aufgrund der Kalibrierung ein Zuschlag vorgenommen werden muss, ergibt sich ein maximaler Sicherheitsfaktor von 2,61.

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

4. Kalibrierung

Das Vorgehen bei der dynamischen Pfahlprüfung erfordert einerseits einen sehr viel geringeren Aufwand als die statische Probelastung 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 Probelastungen, dass die Vergleichbarkeit mit statischen Probelastungen 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.

Es ist wohl anzunehmen, dass bei der Formulierung des EC7 davon ausgegangen wurde, dass dynamische Probelastungen immer einen zu hohen Widerstand oder eine zu hohe Tragfähigkeit liefern und dass es durch die statische Probelastung möglich ist, einen Abminderungsfaktor zu bestimmen.

Wie G.Likins u.a. in ihren Beiträgen zu den Stress-Wave-Konferenzen 2004 [10] und 2008 [11] ausführlich dargestellt haben, sind beim Vergleich statischer und dynamischer Probelastungen immer auch Randbedingungen der statischen und der dynamischen Probelastungen zu beachten.

Das Erfordernis und die Problemstellung der Kalibrierung ist in den Lastsetzungskurven Bild 2 für Ortbetonpfähle in weichen Seeton und Bild 3 für Ortbetonpfähle im Mergel zu erkennen. Im Seeton zeigen sich bei statischer Belastung Kriechsetzungen bei den Laststufen über 600 MN. Im Mergel zeigt sich, dass die Lastsetzungskurve des statischen Versuchs schon oberhalb 1 MN ein weicherer Verhalten gegenüber den beiden dynamischen Probelastungen zeigt.

In beiden Fällen ist aber die „Kalibrierung“ nicht als Bestimmung eines Skalierungsfaktors direkt ausführbar:

- Im Seeton wurde die statische Prüfung an einem 15 m langen Pfahl durchgeführt, die dynamischen Prüfungen an einem 18 m und einem 19 m langen Pfahl.
- 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 Belastungsbereich 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 Probelastung die Last zu erhöhen.

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

Die Lastsetzungskurve Bild 5 zeigt, dass die dynamischen Probelastungen häufig weniger Tragfähigkeit nachweisen als die statischen. Während Pressenkräfte für die statischen Probelastungen auf die doppelte Gebrauchslast ausgelegt wurden, wurden die dynamischen Probelastungen im Tonstein mit einer verfügbaren Belastungseinrichtung durchgeführt. Der nachweisbare statische Anteil des Bodenwiderstandes ist 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.

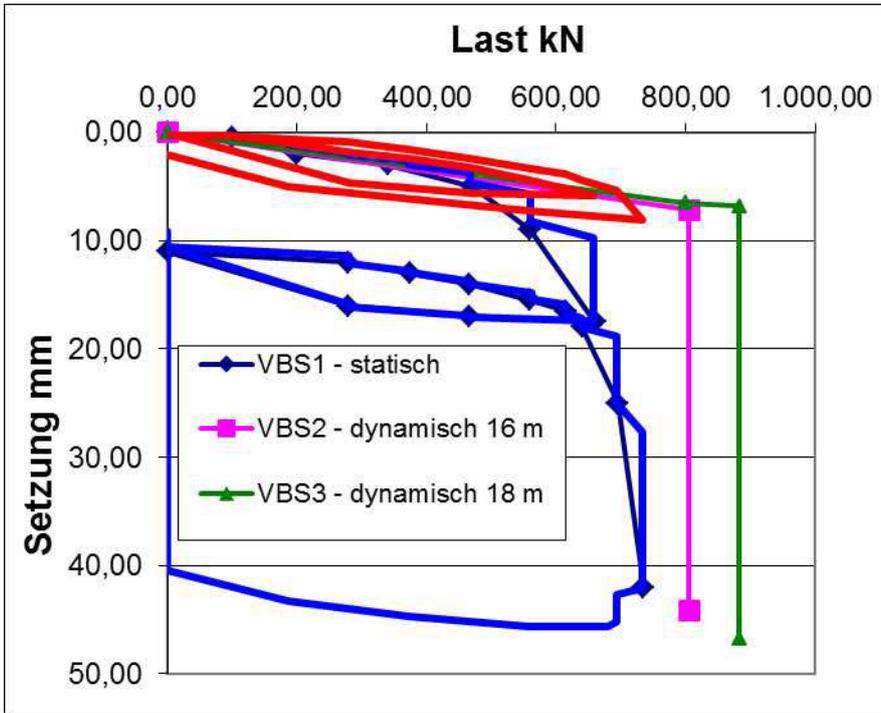


Bild 2: Ortbetonpfähle (Rüttelstopfsäulen) in bindigem Boden

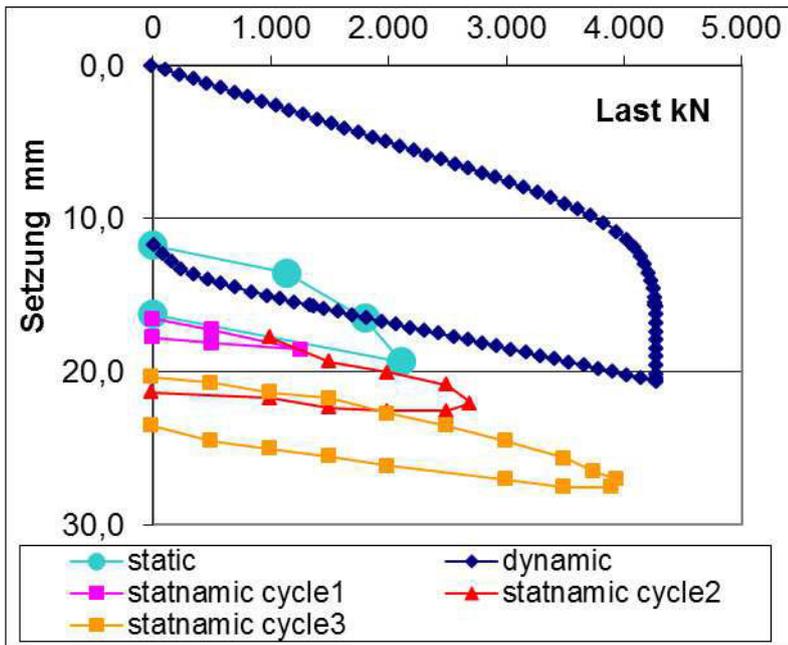


Bild 3: Ortbetonpfähle im Mergel

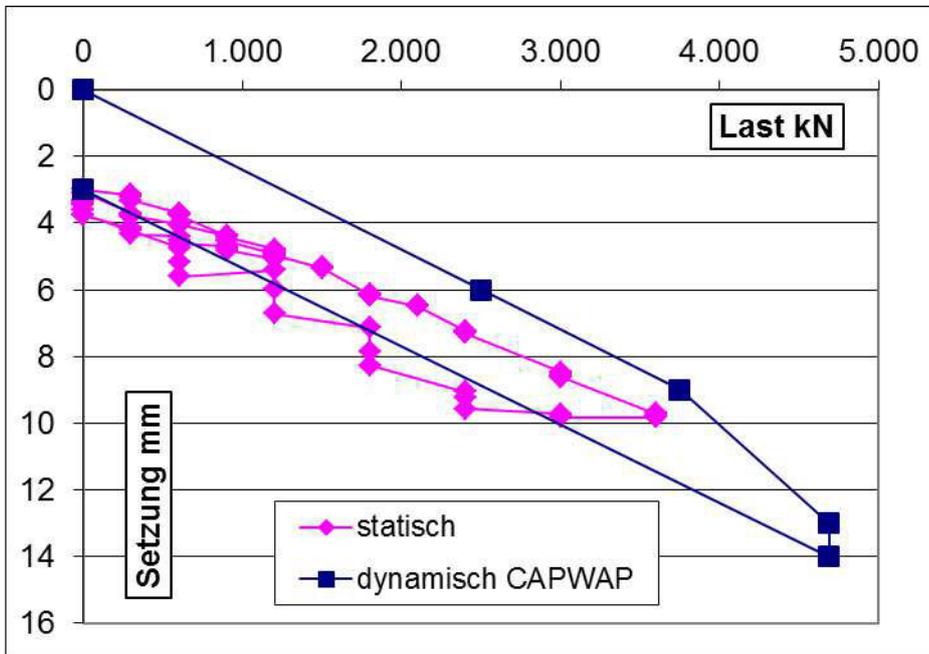


Bild 4: Fertigbetonpfähle im dichtgelagerten Sand

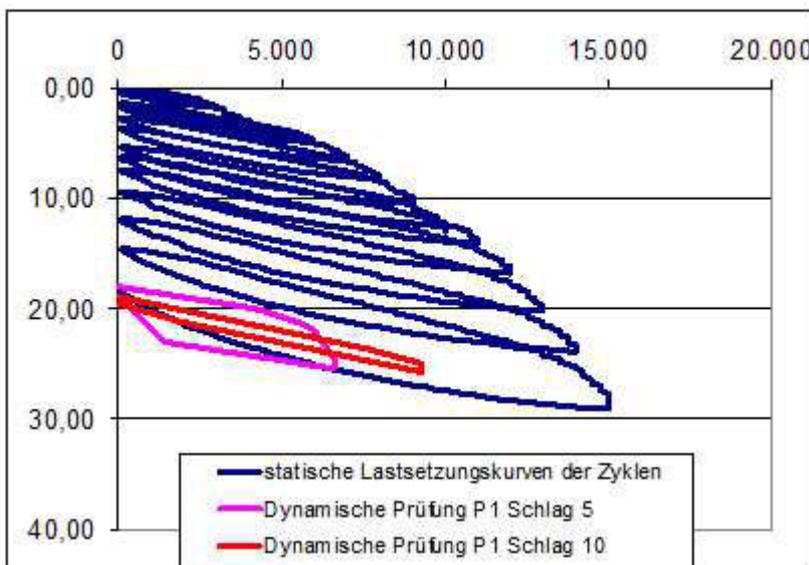


Bild 5: Ortbetonpfahl im Tonstein – Freifallgewicht 10 t

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

6. Stand der Technik bei dynamischen Pfahlprobelastungen und Probleme mit der Anwendung des EC7

6.1 Auswertungsverfahren

Während sich die Anwendung der dynamischen Probelastung 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.

Im 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 vollständigen 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 Probelastung 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 Probelastungen [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 Probelastungen durch eine Anzahl dynamischer Probelastungen 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 Probelastungen das Rammkriterium festzulegen. Da dann bei jedem Pfahl die Einhaltung des Rammkriteriums überprüft wird, ergibt sich eine zusätzliche Sicherheit, die im Konzept der getrennten Korrelations-Faktoren 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 Ortbetonpfählen weniger Ergebnisse vorliegen und diese auch noch bei der Vielzahl von Varianten (verrohrt, bentonitgestützt, Schneckenbohrpfähle ohne und mit Verdrängung, Ortbetonrammpfähle, 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 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 Pfahlprobelastungen 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 Pfahlprobelastung (Messung der zeitabhängigen Kraft und Geschwindigkeit am Pfahlkopf bei Stoßbelastung) bestimmt werden, wenn die Auswertung mit Vollständiger Modellbildung erfolgt und die Vergleichbarkeit zur Tragfähigkeiten aus einer statischen Probelastung 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 dem geeigneten Programm 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 Probelastungen oder Auswertungen mit der vollständigen Modellbildung abgesichert werden.

Bei Rammfahlgründungen 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 immer beachtet werden.

Hierbei ist der Unterschied zwischen bindigen und nichtbindigen besonders zu beachten.

Während es bei nichtbindigen Böden in der Regel eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den errechneten Setzungen gibt, kann das Kriechverhalten unter konstanter Belastung bei bindigen Böden bei der dynamischen Belastung nicht bestimmt werden.

Wie in Abschnitt 4 gezeigt wurde, ist die Bestimmung der Vergleichbarkeit 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 Pfahlprobelastungen (statisch oder dynamisch) also durchgeführt werden, um so kleiner könnte der 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, der statischen und dynamischen Probelastungen 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 Probelastungen durch dynamische ergänzt werden, sollte es möglich sein, ausgehend von den Korrelationsfaktoren für statische Prüfungen, eine Reduktion des Widerstandsfaktors zu bestimmen,
- wenn zusätzlich bei Rammfahlgründungen 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 könnte,
- wenn die Pfähle, wie es üblich ist, in sehr tragfähigem Boden (z.B. dichtgelagerten Sanden) abgesetzt werden, ist die Äquivalenz von statischen und dynamischen Probelastungen 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 (verroht hergestellte Pfähle, Schneckenbohrpfähle mit oder ohne Verdrängung, Ortbetonrammpfähle, Atlaspfähle usw.) und die Möglichkeit der Qualitätssicherung im Sicherheitskonzept berücksichtigt werden können, da dieses auch Einfluss auf die Zuverlässigkeit der Ergebnisse einer dynamischen Probelastung haben kann.

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] Empfehlungen des Arbeitskreises „Pfähle“ – EAPfähle, 2.Auflage, herausgegeben von der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik, Ernst&Sohn, Berlin 2012
- [2] Smith, E.A.L. : Pile driving analysis by the wave equation, J.Soil Mech. Fdns. Div., ASCE, 86, 1960
- [3] Goble, G.G., Rausche F. : Pile Load Test by Impact Driving, Highway research no. 333, Div. of Eng., National Research Council, Washington DC 1970
- [4] Rausche F., Dynamische Methoden zur Bestimmung der Tragfähigkeit von Rammpfählen, Baugrundtagung Frankfurt 1974
- [5] Goble, G.G., Likins, G., Rausche F, Bearing Capacity of Piles from Dynamic Measurements, Ohio Department of Transportation, 1975
- [6] Goble, G.G., Rausche F, Pile Driveability Predictions by CAPWAP, Institution of Civil Engineering, Numeric Methods in Offshore Piling, London 1979
- [7] Eurocode 7: Geotechnical design, zuerst veröffentlicht 1994
- [8] Handbuch Eurocode 7 – Geotechnische Bemessung, Band 1, Beuth Verlag Berlin 2011
- [9] Franke, E. und Seitz, J.M. : Empfehlungen des Arbeitskreises 5 der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau für Dynamische Pfahlprüfungen, Geotechnik 9, 1986
- [10] Likins, G. and Rausche, F. : “Correlation of CAPWAP with static load tests”. Proceedings of The Seventh International Conference on the Application of Stresswave Theory to Piles. Petaling Jaya, Selangor, Malaysia 2004
- [11] Likins, G. , Piscalko, G., Roppel, S. and Rausche, F.: PDA Testing 2008 – A state of the Art, Proceedings of The Eighth International Conference on the Application of Stresswave Theory to Piles. Lissabon 2008
- [12] Stahlmann, J., Middendorp, P., Fischer, J.: Rapid-Load-Tests und dynamische Pfahlprobelastungen – ein Vergleich, Deutsche Gesellschaft für Geotechnik, Baugrundtagung Mainz 2012
- [13] Klingmüller, O.: Dynamische Pfahlprüfung als Optimierungsproblem, Pfahlsymposium Braunschweig 1991
- [14] DGEG, Empfehlungen des AK 2.1 für statische und dynamische Pfahlprüfungen, Braunschweig 1998
- [15] Rollberg, D.: Zur Anwendung von Rammformeln, Bautechnik 10/1980
- [16] ASTM 4945 Standard Test Method for High Strain Dynamic Testing of Piles, 2000