

**Zusammenfassung für die praktische Anwendung
des
Projektes**

**Ableitung von Streuungsfaktoren und Teilsicherheitsbeiwerten
für Pfahlwiderstände aus Ergebnissen von Probelastungen
und Erfahrungswerten für den Eurocode EC 7-1
-Kalibrierung am bisherigen deutschen Sicherheitsstandard-**

(Geschäftszeichen: ZP 52-5- 11.72-1272/07)

**Auftraggeber:
Deutsches Institut für Bautechnik
Kolonnenstraße 31L
10829 Berlin**

**Kassel, den 15.11.2007
Proj. Nr.: DM – 150**

Allgemeines

Pfahlwiderstände im Grenzzustand der Tragfähigkeit können nach Eurocode EC 7-1 (DIN EN 1997-1) aus Ergebnissen von Probelastungen (EC 7-1, z.B. Gleichung 7.2) oder auf Grundlage von Erfahrungswerten (EC 7-1, z.B. Gleichung 7.9) abgeleitet werden. Nach Eurocode EC 7-1 werden dazu die Messergebnisse von Pfahlprobelastungen durch so genannte Streuungsfaktoren abgemindert. Konkrete Angaben zu Streuungsfaktoren finden sich in Eurocode EC 7-1, Tabelle A.9 bzw. A.11.

Vergleichende Berechnungen haben gezeigt, dass sich bei Anwendung der in EC 7-1, Tabelle A.9 bzw. A.11 empfohlenen Streuungsfaktoren bis auf wenige Sonderfälle ein deutlich höheres Sicherheitsniveau und damit unwirtschaftlichere Bauweisen ergeben, als dies bei den bisherigen nationalen Regelungen der Fall war. Die in den entsprechenden Tabellen vorgeschlagenen Werte können jedoch im Rahmen der Nationalen Anwendungsregeln an nationale Sicherheitsstandards angepasst werden.

Das Forschungsvorhaben hatte zum Ziel, die Teilsicherheitsbeiwerte und Streuungsfaktoren für den Eurocode EC 7-1, Kapitel 7 so zu kalibrieren, dass durch ihre Anwendung der bisherige nationale Sicherheitsstandard von DIN 1054:1976-11 bzw. DIN 1054:2005-01 und die Wirtschaftlichkeit weitgehend erhalten bleiben. Dazu wurden umfangreiche Vergleichsberechnungen mit Parametervariationen an fiktiven Probelastungsergebnissen durchgeführt. Die daraus resultierenden Teilsicherheitsbeiwerte und Streuungsfaktoren wurden dann an zahlreichen, an der Universität Kassel archivierten statischen und dynamischen Probelastungsergebnissen von verschiedenen Pfahlssystemen verifiziert.

Aufgrund der unterschiedlichen Vorgehensweise der jeweiligen Regelwerke sowie der Einführung des Teilsicherheitskonzeptes ist dies jedoch nur bereichsweise möglich und führt bei bestimmten Kombinationen zu abweichenden vergleichbaren Globalsicherheitsbeiwerten bzw. zul. charakteristischen Pfahltragfähigkeiten, was aber unvermeidlich ist.

Konkret werden die Zahlenwerte in Tabelle 1 und 2 einschließlich der Anwendungspräzisierungen der Tabelle 2 zur nationalen Anwendung empfohlen.

Tabelle 1: Streuungsfaktoren ξ zur Ableitung charakteristischer Werte aus statischen Pfahlprobelastungen; empfohlene Zahlenwerte des Eurocodes EC 7-1 (in Klammer) und nationaler Vorschlag

ξ für $n =$	1	2	3	4	≥ 5
ξ_1	1,35 (1,40)	1,25 (1,30)	1,15 (1,20)	1,05 (1,10)	1,00
ξ_2	1,35 (1,40)	1,15 (1,20)	1,00 (1,05)	1,00	1,00

Tabelle 2: Streuungsfaktoren ξ zur Ableitung charakteristischer Werte aus Stoßversuchen und dynamischen Pfahlprobelastungen; empfohlene Zahlenwerte des Eurocodes EC 7-1 und Anwendungspräzisionen als nationaler Vorschlag

ξ für n	≥ 2	≥ 5	≥ 10	≥ 15	≥ 20
ξ_5	1,60	1,50	1,45	1,42	1,40
ξ_6	1,50	1,35	1,30	1,25	1,25

- Die ξ -Werte gelten für dynamische Probelastungen mit Auswertung nach dem direkten Verfahren.
- Die ξ -Werte dürfen mit einem Modellfaktor $\eta_M = 0,85$ reduziert werden, wenn die erweiterte Auswertung mit vollständiger Modellbildung angewendet wird.
- Wenn unterschiedliche Pfähle in der Gründung vorhanden sind, sollten bei der Wahl der Anzahl n von Versuchspfählen Gruppen gleichartiger Pfähle getrennt berücksichtigt werden.

Als nationaler Vorschlag zur Anwendungspräzision wird die Aufnahme folgender Punkte empfohlen:

- Dies gilt auch für Bereiche gleicher Baugrundverhältnisse (Homogenbereiche) innerhalb eines Baufeldes.
- Die ξ -Werte in Tabelle.2 gelten sofern die dynamischen Probelastungen an statischen Probelastungen auf dem gleichen Baufeld kalibriert wurden.
- Werden dynamische Pfahlprobelastungen an Ergebnissen von statischen Pfahlprobelastungen an vergleichbaren Baumaßnahmen kalibriert, sind zur Ableitung charakteristischer Werte erhöhte Streuungsfaktoren $\xi_{5,6}^*$ zu verwenden. Dazu sind die Werte $\xi_{5,6}$ um $\Delta\xi = 0,10$ zu erhöhen.
- Erfolgt die Kalibrierung aufgrund belegbarer oder allgemeiner Erfahrungswerte für Pfahlwiderstände z.B. aus *EA-Pfähle (2007)*, sind die Werte um $\Delta\xi = 0,40$ zu erhöhen. In diesem Fall muss die Auswertung nach einem erweiterten Verfahren mit vollständiger Modellbildung erfolgen. Die Anwendung des direkten Verfahrens, wie z.B. Case oder TNO-Verfahren, ist nicht zulässig.
- Das entsprechende der Kalibrierung zugrunde liegende dynamische Auswerteverfahren wird über den Modellfaktor η_M berücksichtigt. Wird die Kalibrierung der dynamischen Probelastungsergebnisse mit einem erweiterten Verfahren und vollständiger Modellbildung durchgeführt, dürfen die maßgeblichen Streuungsfaktoren durch einen Modellfaktor $\eta_M = 0,85$ abgemindert werden. Bei der Kalibrierung mit dem direkten Verfahren ist $\eta_M = 1,00$.
- Wenn Tragwerke eine ausreichende Steifigkeit und Festigkeit haben, um Lasten von „weichen“ zu „starr“ Systemen umzulagern, dürfen die Zahlenwerte von ξ_5 und ξ_6 bzw. ξ_5^* und ξ_6^* durch 1,1 dividiert werden.

Kalibrierung der Streuungsfaktoren ξ zur Ableitung charakteristischer Werte aus statischen Pfahlprobekbelastungen

Die Streuungsfaktoren ξ zur Ableitung charakteristischer Werte aus statischen Pfahlprobekbelastungsergebnissen wurden im Vergleich zu den ursprünglich in Eurocode EC 7-1 empfohlenen Werten für die nationale Anwendung im Mittel um 0,05 reduziert (Tabelle 1).

Für weiche und starre Systeme zeigt sich eine kontinuierliche Zunahme der zulässigen Einwirkungen $zul. F_k$ mit der Zunahme der Anzahl n der durchgeführten Probekbelastungen. Die daraus resultierenden Sicherheiten entsprechen für maßgebliche Situationen dem bekannten Sicherheitsniveau der alten Normen.

Kalibrierung der Streuungsfaktoren ξ zur Ableitung charakteristischer Werte aus dynamischen Pfahlprobekbelastungen

Für die Auswertung von Probekbelastungsergebnissen, die an statischen Probekbelastungen am gleichen Baufeld kalibriert wurden, werden die gleichen, wie ursprünglich von Eurocode EC 7-1 angegebenen Streuungsfaktoren, national zur Anwendung empfohlen. Mit diesen Streuungsfaktoren werden für eine geringe Anzahl von Probekbelastungen etwas niedrigere zulässige Einwirkungen $zul. F_k$ berechnet, als dies bei der Auswertung nach DIN 1054:2005-01 der Fall ist. Bei höherer Anzahl durchgeführter Probekbelastungen ergeben sich jedoch höhere zulässige Einwirkungen $zul. F_k$. Für die Auswertung nach einem erweiterten Verfahren mit vollständiger Modellbildung ergeben sich für $n = 5$ und geringe Variationskoeffizienten zulässige Einwirkungen $zul. F_k$ die in der Größenordnung liegen, die sich für vergleichbare statische Probekbelastungen und $n = 2$ ergeben. Bei den bezüglich ihrer Ergebnisse mit größerer Unsicherheit behafteten direkten Verfahren ist die Differenz zu vergleichbaren statischen Ergebnissen größer.

Da Eurocode EC 7-1 die in der nationalen Praxis weit verbreitete Vorgehensweise der Kalibrierung von dynamischen Probekbelastungen an statischen Probekbelastungen von anderen, aber vergleichbaren Baufeldern sowie anhand von Erfahrungswerten aus der Literatur nicht behandelt, wurden dazu neue nationale Vorschläge in Anlehnung an die DIN 1054:2005-01 mit Modifikationen erarbeitet (siehe Tabelle 2).

Für die Auswertung von Probekbelastungsergebnissen, die an statischen Probekbelastungen von vergleichbaren Baumaßnahmen kalibriert wurden, werden um $\Delta\xi = 0,10$ erhöhte Streuungsfaktoren zur Anwendung empfohlen. Damit ergeben sich für eine geringe Anzahl von Probekbelastungen etwas niedrigere zulässige Einwirkungen $zul. F_k$, als dies bei der Auswertung nach DIN 1054:2005-01 der Fall ist. Bei höherer Anzahl durchgeführter Probekbelastungen ergeben sich ungefähr die

gleichen zulässigen Einwirkungen $zul. F_k$, die auch entsprechend der Auswertung nach DIN 1054:2005-01 zu erwarten sind. Hinsichtlich der Vergleichbarkeit zu entsprechenden statischen Probelastungen kann festgestellt werden, dass die erweiterten Verfahren näher an den Ergebnissen statischer Probelastungen liegen als direkte Verfahren. Zusätzlich fallen die zulässigen Einwirkungen $zul. F_k$ aufgrund der größeren Unsicherheiten bei der Kalibrierung an vergleichbaren Baumaßnahmen niedriger aus als bei Kalibrierungen am gleichen Baufeld.

Für die Auswertung von Probelastungsergebnissen, die lediglich aufgrund von Erfahrungswerten kalibriert wurden, werden um $\Delta\xi = 0,40$ erhöhte Streuungsfaktoren zur Anwendung empfohlen. Mit diesen Streuungsfaktoren ergeben sich die selben Ergebnisse, wie bei der Auswertung dynamischer Probelastungen nach dem direkten Verfahren, die an statischen Probelastungen von vergleichbaren Baumaßnahmen kalibriert wurden. Genau der gleiche Zusammenhang zwischen Kalibrierung an vergleichbaren Baugrundverhältnissen mit direkter Auswertung und Kalibrierung aufgrund von Erfahrungswerten mit einer Auswertung nach einem erweiterten Verfahren findet sich in DIN 1054:2005-01 wieder.

Die angepassten Streuungsfaktoren von Tabelle 1 und die Präzisierungen aus Tabelle 2 führen insgesamt zu etwa vergleichbaren Resultaten wie die bisherige DIN 1054:2005-01. Die Vorzüge des Verfahrens nach Eurocode EC 7-1 liegen in der konsequenten Verringerung der Streuungsfaktoren mit zunehmender Anzahl der Probelastungen, wodurch der Aufwand, mehrere Probelastungen durchzuführen „belohnt“ wird. Gleichzeitig ergibt sich bei dieser Herangehensweise ein technisch plausibler Verlauf der berechneten zulässigen Einwirkungen $zul. F_k$ bzw. der Sicherheiten η_1 bis η_3 . Dies war in den bisherigen Regelungen der DIN 1054:2005-01 und der DIN 1054:1976-11 nicht der Fall.

Überprüfung der nationalen Vorschläge an realen Probelastungen

Die einzelnen Vorgehensweisen aus den unterschiedlichen Normen wurden anhand von zahlreichen realen Probelastungen aus Projekten, für die an unserem Fachgebiet Datenbanken vorliegen, überprüft.

Danach konnte die Brauchbarkeit der nationalen Vorschläge zum Eurocode EC 7-1 im Hinblick auf Sicherheit und Wirtschaftlichkeit bestätigt werden.

Schlussbemerkung

Dieser Forschungsbericht wurde am 22.10.2007 dem Pfahlnomenausschuss NA 005-05-07 AA auf einer Sitzung in Hamburg vorgestellt und gemeinsam diskutiert. Hinweise und Anregungen wurden aufgenommen. Vom NA 005-05-07 AA wurden damit gegen die hier dokumentierten Ergebnisse und Vorschläge für die nationale Anwendung von Eurocode EC 7-1 keine Einwände erhoben.

Vergleichende Untersuchungen wurden auch für die Ableitung von charakteristischen Pfahlwiderständen aus Erfahrungswerten vorgenommen.

Bearbeitet im Auftrag des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt),
Fachgebiet Geotechnik, Universität Kassel,
Prof. Dr.-Ing. H.-G. Kempfert, Dipl.-Ing. F. Hörtkorn, Dipl.-Ing. P. Becker