

Zur Kalibrierung von Streuungsfaktoren für Pfahlwiderstände nach Eurocode EC 7-1

Prof. Dr.-Ing. Hans-Georg Kempfert & Dr.-Ing. Patrick Becker

Institut für Geotechnik und Geohydraulik, Universität Kassel

1 Einleitung

Bei der Ermittlung von Bemessungswerten für Pfahlwiderstände $R_{c,d}$ (Druck) bzw. $R_{t,d}$ (Zug) aus Ergebnissen von Pfahlprobelastungen nach DIN EN 1997-1:2009-09 (Eurocode EC 7-1) werden die Messwerte der Pfahltragfähigkeit $R_{c,m}$ bzw. $R_{t,m}$ über Streuungsfaktoren \mathbf{x} abgemindert und damit in charakteristische Pfahlwiderstände $R_{c,k}$ umgewandelt. Die entsprechenden Werte \mathbf{x} sind von der Art und Anzahl der Probelastungen abhängig und berücksichtigen Unsicherheiten wie etwa Streuungen der Versuchsergebnisse, die durch Änderungen im Baugrund oder im Pfahlverfahren entstehen.

Die in Eurocode EC 7-1 nunmehr gewählte Art der Ermittlung des Grenzwertes von Pfahlwiderständen unterscheidet sich deutlich von den bisherigen Regelungen DIN 1054:1976-11, die sich durch ihre langjährige Anwendung bei der Bemessung von Pfählen in der Praxis bewährt haben. Die DIN 1054:2005-01 ist zwar im Vorgriff auf den Eurocode EC 7-1 formal ähnlich vorgegangen, enthält aber vollkommen andere Zahlenwerte für die Sicherheitsbeiwerte \mathbf{g}_R und die Streuungsfaktoren \mathbf{x} .

In dem Beitrag werden die an der Universität Kassel durchgeführten Untersuchungen zur Ableitung der Streuungsfaktoren und Teilsicherheitsbeiwerte für Pfahlwiderstände aus Ergebnissen von Probelastungen und Erfahrungswerten für den Eurocode EC 7-1 vorgestellt, siehe auch (Kempfert et al. 2008) und (Kempfert 2009). Darin wurden die Ergebnisse an das bisherige nationale Sicherheitsniveau der DIN 1054:1976-11 und DIN 1054:2005-01 angepasst bzw. überprüft. Als Ergebnis der hier vorgestellten vergleichenden Untersuchungen wird für die verschiedenen Versuchsarten der nationale Vorschlag für die Streuungsfaktoren \mathbf{x} und die Teilsicherheitsbeiwerte \mathbf{g}_R mitgeteilt und bewertet.

2 Kalibrierung von Streuungsfaktoren in Verbindung mit Teilsicherheitsbeiwerten bei Pfahlgründungen

2.1 Allgemeines

Zur Kalibrierung von Streuungsfaktoren in Verbindung mit Teilsicherheitsbeiwerten bei Pfahlgründungen wurden in (Kempfert et al. 2008) umfangreiche Untersuchungen durchgeführt, die sich in drei Schwerpunkte gliedern lassen:

- Vergleichsberechnungen bezüglich der Standsicherheit mit vorgegebenen Streuungsfaktoren.
- Vergleichsberechnungen mit vorgegebenem Mittelwert und variabler Streuung an fiktiven Pfahlprobelastungsergebnissen.
- Vergleichsberechnungen für reale Pfahlprobelastungsergebnisse.

Die Untersuchungen wurden hinsichtlich der resultierenden maßgebenden Pfahlwiderstände nach DIN 1054:1976-11, DIN 1054:2005-01 und Eurocode EC 7-1 ausgewertet.

	Widerstand	Symbol	Werte R2
Pfahlwiderstände aus statischen und dynamischen Pfahlprobelastungen	Pfahlfußwiderstand	g_b	1,10
	Pfahlmantelwiderstand (Druck)	g_s	1,10
	Gesamtwiderstand (Druck)	g	1,10
	Pfahlmantelwiderstand (Zug)	$g_{s,t}$	1,15
Pfahlwiderstände auf Grundlage von Erfahrungswerten ¹⁾	Druckpfähle	g_b, g_s, g	1,40
	Zugpfähle (nur in Ausnahmefällen)	$g_{s,t}$	1,50

¹⁾ Die Teilsicherheitsbeiwerte für Erfahrungswerte enthalten Modellfaktoren

Tabelle 1 Teilsicherheitsbeiwerte g_R für Widerstände bei Pfahlgründungen nach Eurocode EC 7-1 (Zeile 2-5) und nationale Ergänzungsvorschläge (Zeile 6-7)

Die Vergleichsberechnungen wurden für das realistische Verhältnis ständiger und veränderlicher Lasten mit der Einwirkungskombination nach Gl. (1) mit $g_{G,Q} = 1,40$ durchgeführt, welches auch zur Anpassung anderer geotechnischer Nachweise auf die Werte des globalen Sicherheitskonzeptes (z. B. in DIN 1054:2005-01) verwendet wurde.

$$g_{G,Q} = \frac{2}{3} \cdot g_G + \frac{1}{3} \cdot g_Q = 1,40 \quad (1)$$

In Tabelle 1 sind bereits modifizierte Teilsicherheitsbeiwerte für Pfahlwiderstände auf der Grundlage von Erfahrungswerten (z. B aus EA-Pfähle 2007) aufgenommen, die von den Teilsicherheitsbeiwerten bei Pfahlprobelastungen abweichen.

2.2 Streuungsfaktoren bei statischen Pfahlprobelastungen

Der Grenzwert des Widerstandes aus statischen Probelastungen $R_{c,k}$ bzw. $R_{t,k}$ ergibt sich aus dem Minimum der Messwerte dividiert durch die Streuungsfaktoren nach Gleichung (2), wobei im Folgenden exemplarisch nur die Ansätze für die Druckpfahlwiderstände R_c wiedergegeben sind. Der Streuungsfaktor α_1 ist dabei auf den Mittelwert $(R_{c,m})_{mitt}$ und α_2 auf den Kleinstwert $(R_{c,m})_{min}$ durchgeführter Pfahlprobelastungen zu beziehen.

$$R_{c,k} = MIN \left\{ \frac{(R_{c,m})_{mitt}}{\alpha_1}, \frac{(R_{c,m})_{min}}{\alpha_2} \right\} \quad (2)$$

Alle Streuungsfaktoren α zur Ableitung charakteristischer Werte aus statischen Pfahlprobelastungsergebnissen wurden im Vergleich zu den ursprünglich in Eurocode EC 7-1 empfohlenen Werten für die nationale Anwendung im Mittel um 0,05 reduziert (Tabelle 2). Diese beziehen sich auf weiche Systeme. Für starre Systeme dürfen die Zahlenwerte von α_1 und α_2 durch 1,1 dividiert werden, vorausgesetzt dass α_1 niemals kleiner als 1,0 ist. Damit ergeben sich sowohl für das weiche System als auch für das starre System größere zulässige Einwirkungen $zul. F_k$ nach Gl. (3) als für die ursprünglichen Vorgaben des Eurocodes EC 7-1. Aufgrund der Definition, dass α_i bei Division durch 1,1 nicht kleiner 1,0 werden darf, können sich für $n = 4$ bzw. 5 Probelastungen die selben Ergebnisse mit den ursprünglichen und den angepassten Streuungsfaktoren α ergeben. Darüber hinaus zeigt sich für beide Tragsysteme, eine kontinuierliche Zunahme der zulässigen Einwirkungen $zul. F_k$ mit der Anzahl n der durchgeführten Probelastungen.

$$zul. F_k = \frac{R_{c,k}}{\alpha_R \cdot \alpha_{G,Q}} \quad (3)$$

α für $n =$	1	2	3	4	≥ 5
α_1	1,35 (1,40)	1,25 (1,30)	1,15 (1,20)	1,05 (1,10)	1,00
α_2	1,35 (1,40)	1,15 (1,20)	1,00 (1,05)	1,00	1,00

Tabelle 2 Streuungsfaktoren α zur Ableitung charakteristischer Werte aus statischen Pfahlprobelastungen: empfohlene Zahlenwerte des Eurocodes EC 7-1 (in Klammer) und nationaler Vorschlag, der Eingang in das Normenhandbuch zu DIN EN 1997-1 gefunden hat

Die maximale Anzahl der in DIN 1054:2005-01 berücksichtigten Probelastungen ist mit $n = 2$ kleiner als $n = 5$ bei Eurocode EC 7-1. Für $n = 2$ ergeben sich nach Eurocode EC 7-1, nationaler Vorschlag, leicht geringfügigere zulässige Tragfähigkeiten als nach DIN 1054:2005-01. Für $n = 5$ ergeben sich nach Eurocode EC 7-1, nationaler Vorschlag im Vergleich zur DIN 1054:2005-01, höhere Tragfähigkeiten, was so auch gewünscht ist.

2.3 Streuungsfaktoren bei dynamischen Pfahlprobelastungen

Der Grenzwert des Druckwiderstandes aus dynamischen Probelastungen $R_{c,k}$ ergibt sich aus dem Minimum nach Gleichung (4).

$$R_{c,k} = \text{MIN} \left\{ \frac{(R_{c,m})_{\text{mitt}}}{x_5}, \frac{(R_{c,m})_{\text{min}}}{x_6} \right\} \quad (4)$$

Für die Auswertung von Probelastungsergebnissen, die an statischen Probelastungen 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 Probelastungen etwas niedrigere zulässige Einwirkungen $zul. F_k$ berechnet, als dies bei der Auswertung nach DIN 1054:2005-01 der Fall ist. Bei größerer Anzahl durchgeführter Probelastungen 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 geringen Variationskoeffizienten zulässige Einwirkungen $zul. F_k$ die in der Größenordnung liegen, wie sie sich für vergleichbare statische Probelastungen und $n = 2$ ergeben. Bei den bezüglich ihrer Ergebnisse mit größerer Unsicherheit behafteten direkten Verfahren ist die Differenz zu vergleichbaren statischen Ergebnissen größer.

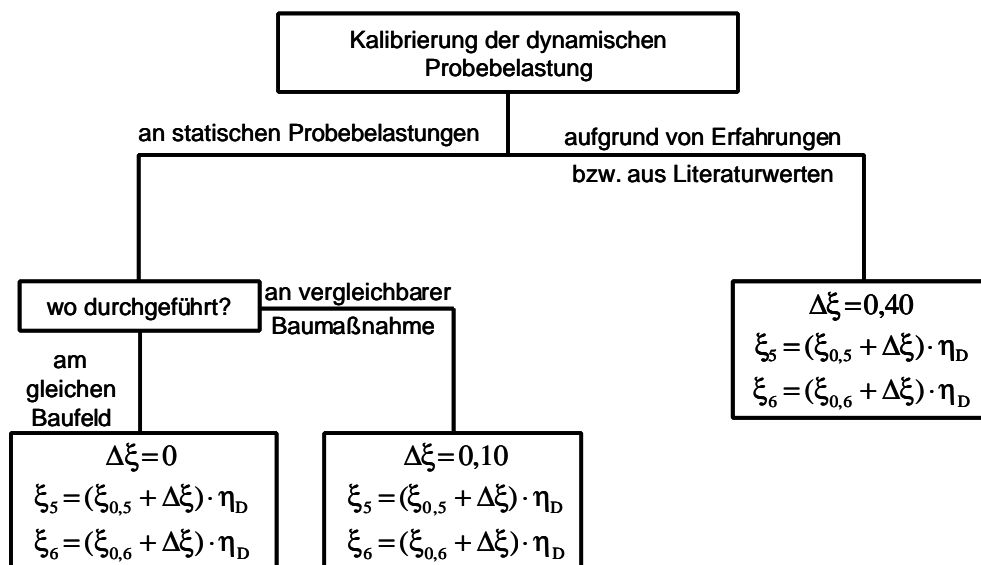


Bild 1 Diagramm zum Vorgehen bei der Ableitung der Streuungsfaktoren x nach Tabelle 3

Da Eurocode EC 7-1 die in der nationalen Praxis weit verbreitete Vorgehensweise der Kalibrierung von dynamischen Probelastungen an statischen Probelastungen 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 (Bild 1 und Tabelle 3).

$x_{0,i}$ für $n =$	≥ 2	≥ 5	≥ 10	≥ 15	≥ 20
$x_{0,5}$	1,60	1,50	1,45	1,42	1,40
$x_{0,6}$	1,50	1,35	1,30	1,25	1,25

$n =$ Anzahl der probelasteten Pfähle

a) Zur Berechnung der Streuungsfaktoren x_i gilt: $x_i = (x_{0,i} + \Delta x) \cdot h_D$, s. a. Bild 1

b) Für den Erhöhungswert Dx gilt:

- $Dx = 0$: für die Kalibrierung dynamischer Auswertverfahren an statischen Pfahlprobelastungsergebnissen auf dem gleichen Baufeld,
- $Dx = 0,10$: für die Kalibrierung dynamischer Auswertverfahren an statischen Pfahlprobelastungsergebnissen an einer vergleichbaren Baumaßnahme,
- $Dx = 0,40$: für die Kalibrierung dynamischer Auswertverfahren aufgrund belegbarer oder allgemeiner Erfahrungswerte für Pfahlwiderstände z. B. aus (EA-Pfähle). Die Anwendung des direkten Verfahrens, wie z. B. Case- oder TNO-Verfahren ist nicht zulässig.

c) Für den Modellfaktor h_D zur Berücksichtigung des Auswertverfahrens gilt:

- $h_D = 1,00$: bei direkten Auswertverfahren,
- $h_D = 0,85$: bei erweiterten Verfahren mit vollständiger Modellbildung.

d) Wenn Tragwerke eine ausreichende Steifigkeit und Festigkeit haben, um Lasten von „weichen“ zu „steifen“ Pfählen umzulagern, dürfen die Zahlenwerte von x_5 und x_6 durch 1,1 dividiert werden.

e) Für den Modellfaktor h_D zur Berücksichtigung von Rammformeln gilt:

- $h_D = 1,05$: bei Anwendung der Wellengleichungsformel,
- $h_D = 1,10$: bei Anwendung einer Rammformel mit Messung der quasi-elastischen Pfahlkopfbewegung beim Rammschlag,
- $h_D = 1,20$: bei Anwendung einer Rammformel ohne Messung der quasi-elastischen Pfahlkopfbewegung beim Rammschlag.

f) Wenn unterschiedliche Pfähle in der Gründung vorhanden sind, sollten bei der Wahl der Anzahl n von Versuchspfählen Gruppen gleichartiger Pfähle getrennt berücksichtigt werden. Dies gilt auch für Bereiche gleichartiger Baugrundverhältnisse innerhalb eines Baufeldes.

Tabelle 3 Grundwerte x_0 mit zugehörigen Erhöhungswerten und Modellfaktoren für Streuungsfaktoren x_5 und x_6 zur Ableitung charakteristischer Werte aus Stoßversuchen bzw. dynamischen Probelastungen mit nationalen Ergänzungen

Für die Auswertung von Probelastungsergebnissen, die an statischen Probelastungen von vergleichbaren Baumaßnahmen kalibriert wurden, werden im Vergleich zu den ursprünglich empfohlenen Streuungsfaktoren um $D_x = 0,10$ erhöhte Streuungsfaktoren zur Anwendung empfohlen. Damit ergeben sich für eine geringe Anzahl von Probelastungen etwas niedrigere zulässige Einwirkungen $zul. F_k$, als dies bei der Auswertung nach DIN 1054:2005-01 der Fall ist. Bei höherer Anzahl durchgeführter Probelastungen 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, wobei die zulässigen Einwirkungen $zul. F_k$ aufgrund der größeren Unsicherheiten bei der Kalibrierung an vergleichbaren Baumaßnahmen generell niedriger ausfallen als bei Kalibrierungen am gleichen Bauwerk.

Für die Auswertung von Probelastungsergebnissen, die lediglich aufgrund von Erfahrungswerten kalibriert wurden, werden im Vergleich zu den ursprünglich empfohlenen Streuungsfaktoren um $D_x = 0,40$ erhöhte Streuungsfaktoren zur Anwendung empfohlen. Mit diesem Streuungsfaktor ergeben sich die selben Ergebnisse, wie bei der Auswertung dynamischer Probelastungen mit dem direkten Verfahren, die an statischen Probelastungen von vergleichbaren Baumaßnahmen kalibriert wurden.

2.4 Überprüfung der nationalen Vorschläge an realen Probelastungen

2.4.1 Allgemeines

Die einzelnen Vorgehensweisen aus den unterschiedlichen Normen wurden anhand von zahlreichen realen Probelastungen aus Projekten, für die an der Universität Kassel Datenbanken vorliegen, überprüft. Danach konnte die Brauchbarkeit der nationalen Vorschläge zum Eurocode EC 7-1 im Hinblick auf Sicherheit und Wirtschaftlichkeit bestätigt werden.

Als Beispiele sind im Folgenden reale Pfahlversuche an verschiedenen Pfahlssystemen nach den Verfahren des Eurocode EC 7-1 ausgewertet und den Ergebnissen der DIN 1054:1976-11 und DIN 1054:2005-01 gegenübergestellt. Die Probelastungen wurden dabei nach den Gesichtspunkten der Vergleichbarkeit des Pfahltyps und der Baugrundverhältnisse ausgewählt. Datengrundlage sind im Wesentlichen Pfahlprobelastungsergebnisse aus dem norddeutschen Raum. Darüber hinaus wurden nur Probelastungsergebnisse von Pfählen mit näherungsweise gleichen Abmessungen verwendet. Weitere Ergebnisse an verschiedenen Pfahlssystemen finden sich in (Kempfert et al. 2008) und (Kempfert 2009).

2.4.2 Vergleichsuntersuchungen für statische Probelastungen

In Bild 2 ist auszugsweise der Ergebnisvergleich der unterschiedlichen Normenregelungen exemplarisch für „weiche“ Fertigrammpfähle aus Stahlbeton wiedergegeben. Zum direkten Vergleich sind die Pfahltragfähigkeiten im Grenzzustand der Tragfähigkeit $R_{c,k}$ mit durchgezogenen Linien und die zulässigen Belastungen $zul. F_k$ mit ausgefüllten Balken für die untersuchten Baufelder dargestellt. Die Abszisse des Balkendiagramms enthält Angaben zur Anzahl der untersuchten Probelastungsergebnisse n , dem Variationskoeffizienten $s_N / \bar{R}_{c,m}$ und der Abweichung vom Mittelwert ΔR . Die Nummer unter der Abszisse kennzeichnet unterschiedliche Baufelder, die in (Kempfert et al. 2008) näher beschrieben sind.

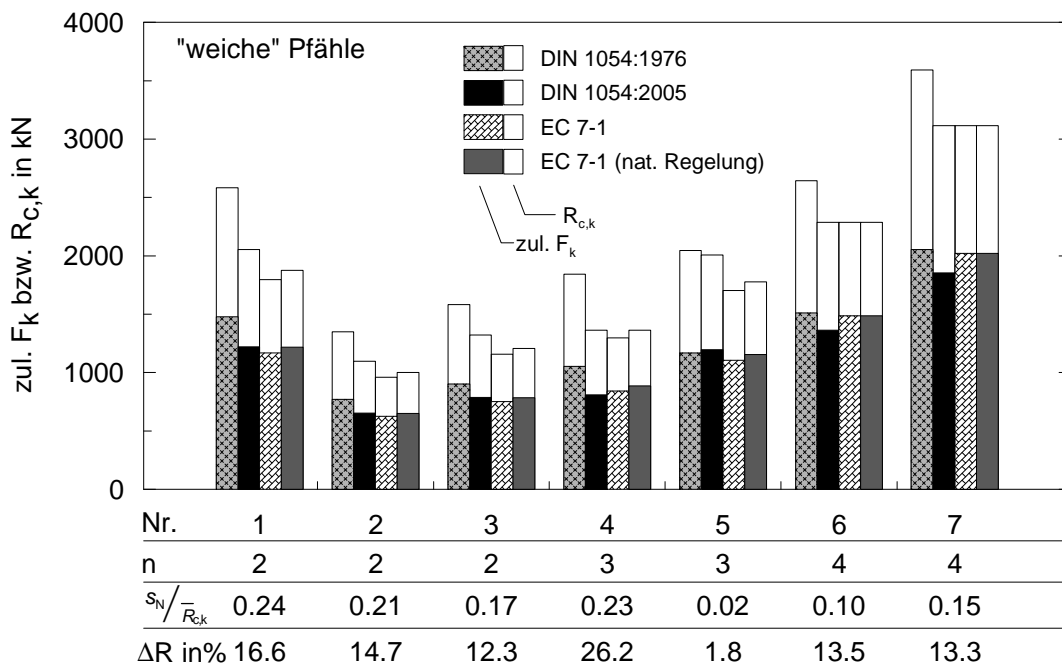


Bild 2 Vergleichende Pfahlwiderstände und zulässige Belastungen von Fertigrammpfählen (Stahlbeton) bei „weichen“ Pfählen und $g_{G,Q} = 1,40$ aus verschiedenen statischen Probelastungen

2.4.3 Vergleichsuntersuchungen für dynamische Probelastung

Die Untersuchungen der Pfahlwiderstände auf der Grundlage von dynamischen Pfahlversuchen erfolgte ebenfalls für DIN 1054:1976-11, DIN 1054:2005-01 und Eurocode EC 7-1 (nationaler Vorschlag) für „weiche“ und „starre“ Systeme. Weiterhin sei darauf hingewiesen, dass DIN 1054:1976-11 keine dynamischen Probelastungen berücksichtigt, hier also eine Auswertung wie bei statischen Probelastungen erfolgt ist.

Die untersuchten dynamischen Probelastungen wurden nach dem CAPWAP-Verfahren, einem erweiterten Verfahren mit vollständiger Modellbildung, ausgewertet. Beispielhaft wurde eine Kalibrierung an vergleichbaren Probelastungen und Baugrundverhältnissen angenommen. Hierdurch wurde für das Verfahren nach DIN 1054:2005-01 eine Erhöhung der Streuungsfaktoren α um $\Delta\alpha = 0,05$ und für das Verfahren nach Eurocode EC 7-1 (nationaler Vorschlag) eine Erhöhung um $\Delta\alpha = 0,10$ erforderlich, siehe Tabelle 3 und Bild 1. Nach Eurocode EC 7-1 sind sämtliche, erhöhte Streuungsfaktoren α aufgrund des gewählten Verfahrens zur Auswertung nach Tabelle 3 mit dem Modellfaktor $h_M = 0,85$ zu multiplizieren.

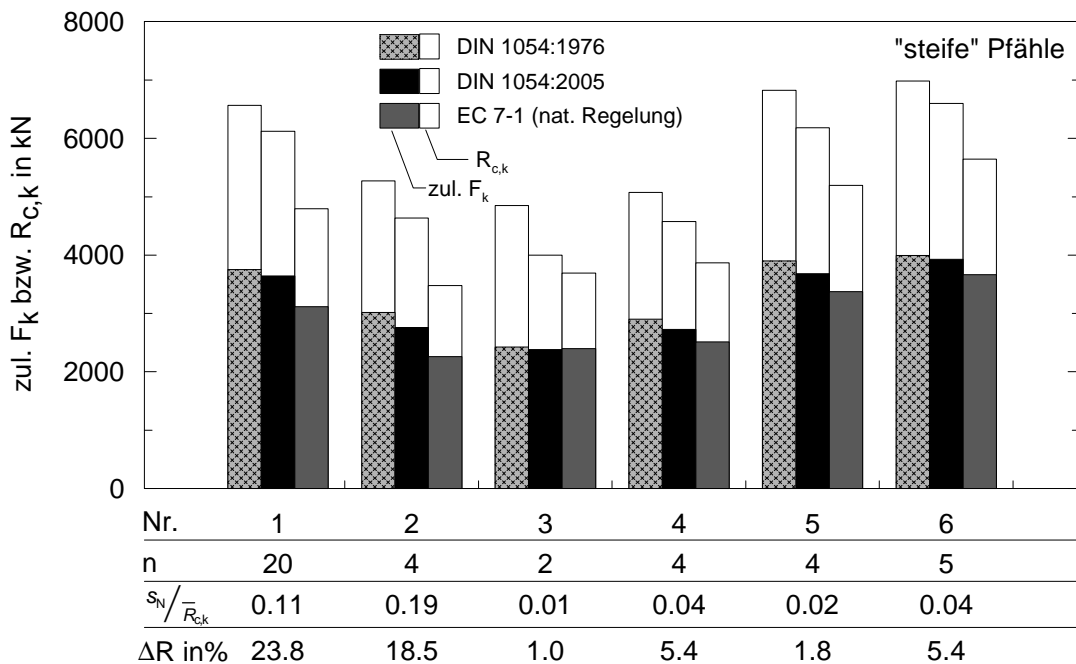


Bild 3 Vergleichende Pfahlwiderstände und zulässige Belastungen von Stahlrohrpfählen bei „steifen“ Pfählen und $g_{G,Q} = 1,40$ aus verschiedenen dynamischen Probelastungsergebnissen

2.4.4 Bewertung der Vergleichsuntersuchungen

Die national modifizierte Streuungsfaktoren von Tabelle 2 (Werte ohne Klammern) und die Präzisionen aus Tabelle 3 führen insgesamt bei den nationalen Regelungen im Normenhandbuch zu DIN EN 1997-1 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 ergeben sich bei dieser Herangehensweise keine technisch unplausiblen Sprünge bei den berechneten zulässigen Einwirkungen $zul. F_k$, wie dies in den bisherigen Regelungen der DIN 1054:2005-01 und der DIN 1054:1976-11 der Fall war.

3 Vorgehensweise zur endgültigen Festlegung von charakteristischen Pfahlwiderständen aus dynamischen Probelastungsergebnissen

Bei der Ableitung von charakteristischen Pfahlwiderständen aus dynamischen Pfahlprobelastungen sollten nach (EA-Pfähle 2007) in der Regel die in Bild 5 dargestellten Schritte eingehalten werden, da bei den Verfahren gegenüber statischen Pfahlprobelastungen erhöhte Unsicherheiten vorliegen.

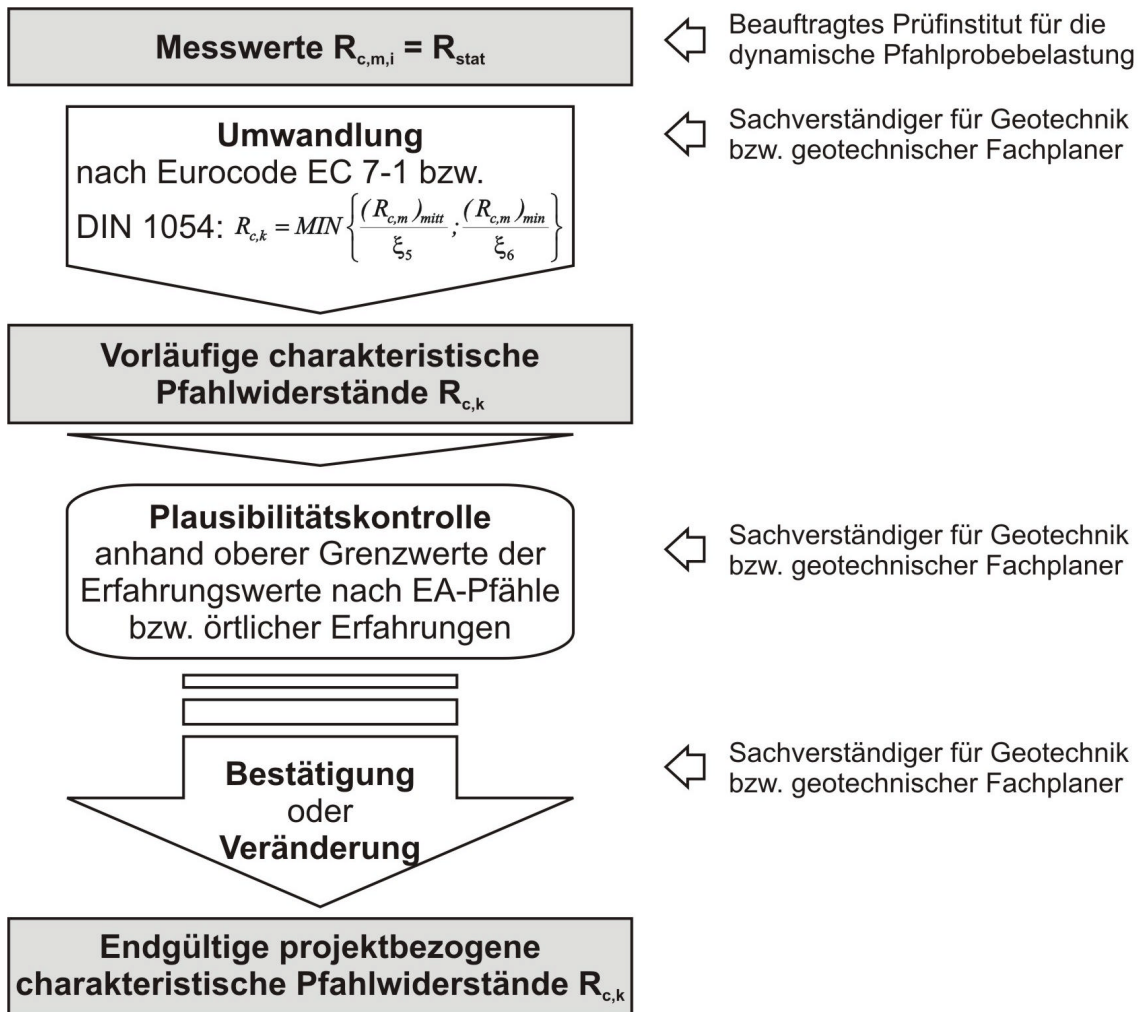


Bild 5 Bearbeitungsschritte nach EA-Pfähle und Ermittlung von charakteristischen Pfahlwiderständen aus den Messwerten bei dynamischen Pfahlprobelastungen

Das mit der dynamischen Pfahlprobelastung beauftragte Prüfinstitut liefert in einem Prüfbericht die Messwerte $R_{c,m,i} = R_{stat}$ als Ergebnis der dynamischen Pfahlprobelastung. Diese werden von dem Sachverständigen für Geotechnik bzw. geotechnischen Fachplaner projektbezogen als Grundlage für die Standsicherheitsnachweise unter Berücksichtigung der Vorgaben nach Eurocode EC 7-1 bzw. DIN 1054 in charakteristische Pfahlwiderstände $R_{c,k}$ nach Gl. (4), Tabelle 3 und Bild 1 umgewandelt. Die sich aus den dynamischen Pfahlprobelastungen zunächst ergebenden vorläufigen charakteristischen

Pfahlwiderstände $R_{c,k}$ sind dann durch den Sachverständigen für Geotechnik bzw. geotechnischen Fachplaner mit den oberen Grenzwerten der Erfahrungswerte nach (EA-Pfähle 2007) bzw. örtlichen Erfahrungen im Hinblick auf Plausibilität der Ergebnisse zu überprüfen. Gegebenfalls sind Modifikationen vorzunehmen. Danach sind die endgültig festgelegten charakteristischen Pfahlwiderstände $R_{c,k}$ vom Sachverständigen für Geotechnik bzw. geotechnischen Fachplaner für den vorgesehenen Anwendungsfall zu bestätigen.

Werden auf einem Baufeld sowohl statische als auch dynamische Pfahlprobelastungen ausgeführt, sind zwei Fälle zu unterscheiden. Sind nach Anwendung der Streuungsfaktoren die charakteristischen Pfahlwiderstände allein aus der Auswertung der statischen Pfahlprobelastungen größer als diejenigen aus der Auswertung der dynamischen Pfahlprobelastungen, dürfen die Ergebnisse allein der statischen Pfahlprobelastungen verwendet werden. Ergibt hingegen die Auswertung allein der dynamischen Belastungsversuche nach Anwendung der Streuungsfaktoren größere Tragfähigkeiten, so dürfen bei der Festlegung der charakteristischen Pfahlwiderstände Erhöhungen gegenüber den Ergebnissen der statischen Pfahlprobelastungen nur dann vorgenommen werden, wenn dies nachvollziehbar begründet wird. Dafür sind Sachkunde und Erfahrung auf dem Gebiet der Geotechnik erforderlich.

Literatur

Kempfert, H.-G., Hörtkorn, F., Becker, P. (2008)

Ableitung von Streuungsfaktoren und Teilsicherheitsbeiwerten für Pfahlwiderstände aus Ergebnissen von Probelastungen und Erfahrungswerten für den Eurocode EC 7-1 – Kalibrierung am bisherigen deutschen Sicherheitsstandard –. Forschungsbericht Universität Kassel für das DIBt, IRB Verlag, Stuttgart.

Kempfert, H.-G. (2009)

Pfahlgründungen. Abschnitt 3.2 in Grundbautaschenbuch, Teil 3, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, S. 73 - 277.

EA-Pfähle: Empfehlungen des Arbeitskreises „Pfähle“ (2007)

Verlag Ernst & Sohn, Berlin.

Normenhandbuch zu DIN EN 1997-1

Geotechnische Bemessung – Allgemeine Regeln, und DIN 1054: Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-1 (derzeit Entwurf).