



Eurocode 7

**Entwurf, Berechnung und
Bemessung in der Geotechnik**

Beispiele

Eitner, Glimm, Goldscheider, Horn, Kempfert, Klobe, Riemer, Schulz, Smolczyk,
Stocker, Weißbach, Wolfersdorff

1. Auflage 1997

Herausgeber:

DIN Deutsches Institut für Normung e. V.

Beuth Verlag GmbH · Berlin · Wien · Zürich

Pfahlgründungen

Prof. Dr.-Ing. H.-G. Kempfert

Universität – Gh Kassel – FB 14
Fachgebiet Geotechnik
34109 Kassel
Telefon (05 61) 8 04-26 30

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	98
1 Einleitung	100
2 Grundsätze der Sicherheitsnachweise.....	100
2.1 Grenzzustände und Grenzzustandsgleichungen	100
2.2 Einwirkungen bei Pfahlgründungen.....	101
2.3 Widerstände bei Pfahlgründungen.....	102
3 Axiale Pfahlwiderstände	103
3.1 Grundsätzliche Vorgehensweise.....	103
3.2 Ermittlung nach ENV 1997-1 (EC 7).....	104
3.2.1 Nachweis der Tragfähigkeit	104
3.2.2 Druckpfahlwiderstände aus Pfahlprobelastungen.....	104
3.2.3 Druckpfahlwiderstände aus Erfahrungswerten.....	105
3.2.4 Nachweis der Gebrauchstauglichkeit und Nachweis des Grenzzustandes der Tragfähigkeit in aufgehenden Bauteilen	106
3.2.5 Anwendung von Erfahrungswerten für die Pfahltragfähigkeit.....	106
3.3 Ermittlung nach DIN V 1054-100.....	106
3.3.1 Nachweis der Tragfähigkeit	106
3.3.2 Axiale Pfahlwiderstände aus Pfahlprobelastungsergebnissen	107
3.3.3 Axiale Pfahlwiderstände aus Erfahrungswerten	108
3.3.4 Nachweis der Gebrauchstauglichkeit und Nachweis des Grenzzustandes der Tragfähigkeit in aufgehenden Bauteilen	112
4 Pfahlwiderstände quer zur Pfahlachse.....	113
5 Vergleichende Berechnung einer Bohrpfahlgründung auf der Grundlage von Erfahrungswerten für Pfahlspitzendruck und Mantelreibung.....	114
5.1 Aufgabenstellung.....	114
5.2 Axiale Bohrpfahltragfähigkeit und Pfahlanzahl nach der herkömmlichen Methode (DIN 4014 alt)	116
5.2.1 Tragfähigkeit des Einzelpfahls	116
5.2.2 Pfahlanzahl.....	118

5.3 Axiale Bohrpfahltragfähigkeit und Pfahlanzahl nach ENV 1997-1 (EC7).....	118
5.3.1 Grenzzustand der Tragfähigkeit des Einzelfahls nach Fall 1C	118
5.3.2 Nachweis des Grenzzustandes der Tragfähigkeit in der aufgehenden Konstruktion nach Fall 1B	118
5.3.3 Nachweis des Grenzzustandes der Gebrauchstauglichkeit nach Fall 2	119
5.3.4 Pfahlanzahl	121
5.4 Axiale Bohrpfahltragfähigkeit und Pfahlanzahl nach DIN V 1054-100.....	121
5.4.1 Grenzzustand der Tragfähigkeit des Einzelfahls nach GZ 1B	121
5.4.2 Nachweis des Grenzzustandes der Tragfähigkeit in der aufgehenden Konstruktion nach GZ 1B	121
5.4.3 Nachweis des Grenzzustandes der Gebrauchstauglichkeit nach GZ 2	121
5.4.4 Pfahlanzahl.....	122
5.5 Zusammenstellung der erforderlichen Pfahlanzahl für die Widerlagergründung.....	122
5.6 Einwirkungen und Baugrundwiderstände als Grundlage für die Bauteilbemessung der Pfähle.....	122
5.7 Ermittlung des Bemessungsmomentes für den Einzelfahl infolge der Horizontalbelastung als Grundlage für die Bauteilbemessung.....	124
6 Vergleichende Berechnung einer Bohrpfahlgründung auf der Grundlage von Pfahlprobe- belastungen.....	126
6.1 Aufgabenstellung und Probelastungsergebnisse	126
6.2 Axiale Bohrpfahltragfähigkeit und Pfahlanzahl nach der herkömmlichen Methode (DIN 4014/1054 alt).....	127
6.2.1 Tragfähigkeit des Einzelfahls	127
6.2.2 Pfahlanzahl.....	128
6.3 Axiale Bohrpfahltragfähigkeit und Pfahlanzahl nach ENV 1997-1 (EC7).....	128
6.3.1 Grenzzustand der Tragfähigkeit des Einzelfahls nach Fall 1C	128
6.3.2 Nachweis des Grenzzustandes der Tragfähigkeit in der aufgehenden Konstruktion nach Fall 1B	128
6.3.3 Nachweis des Grenzzustandes der Gebrauchstauglichkeit nach Fall 2	129
6.3.4 Pfahlanzahl.....	129
6.4 Axiale Bohrpfahltragfähigkeit und Pfahlanzahl nach DIN V 1054-100.....	130
6.4.1 Grenzzustand der Tragfähigkeit des Einzelfahls nach GZ 1B	130
6.4.2 Nachweis des Grenzzustandes der Tragfähigkeit in der aufgehenden Konstruktion nach GZ 1B	130
6.4.3 Nachweis des Grenzzustandes der Gebrauchstauglichkeit nach GZ 2	130
6.4.4 Pfahlanzahl.....	131
6.5 Zusammenstellung der erforderlichen Pfahlanzahl für die Widerlagergründung.....	131
7 Schlußfolgerungen und Ausblick	132
8 Literatur.....	133

1 Einleitung

Mit der Verabschiedung der europäischen geotechnischen Entwurfsnorm ENV 1997-1 (EC 7) sind auch im nationalen Bereich Veränderungen in der Entwurfs- und Bemessungspraxis für Pfahlgründungen verbunden. Die ENV 1997-1 wird in der Geotechnik durch das nationale Anwendungsdokument (NAD) in Deutschland anwendbar gemacht. Zusätzlich sind die neuen nationalen Vornormen DIN 1054-100, DIN 4017-100, DIN 4019-100, DIN 4084-100, DIN 4085-100 und DIN 4126-100 als Anhang zum NAD vorhanden. Im NAD finden sich einerseits konkrete, auf die nationale Vorgehensweise ausgerichtete Ergänzungen zu ENV 1997-1, andererseits dürfen auch während der Erprobungsphase der ENV 1997-1 alternativ (wahlweise) die neuen nationalen Normen Teile 100 in der Geotechnik angewendet werden. Insgesamt soll bei der probeweisen Anwendung so verfahren werden, daß gegenüber der bisher üblichen nationalen Vorgehensweise keine wesentlich unwirtschaftlicheren Abmessungen der Bauteile erzielt werden, aber auch das bisher übliche Sicherheitsniveau nicht unterschritten wird. Damit sollen bestimmte nationale Auffassungen bzw. Schutzziele in der Anwendung gesichert sein. Die grundlegenden Einwirkungen und die dabei zu verwendenden Teilsicherheitsbeiwerte finden sich in ENV 1991-1 (EC 1) und wurden zwischenzeitlich auch in die ENV 1997-1 (EC 7) aufgenommen.

Die geotechnische Bemessung von Pfahlgründungen kann national unmittelbar nach dem EC 7 oder alternativ nach DIN V 1054-100 vorgenommen werden. Die bisherigen Regelungen zu den Pfahltragfähigkeiten aus DIN 1054, DIN 4014, DIN 4026 und DIN 4128 wurden in die DIN 1054-100 eingearbeitet. Da im EC 7 keine konkreten Angaben z.B. über Pfahlspitzendruck und Pfahlmantelreibung aus Erfahrungswerten enthalten sind, wurde über das NAD die in DIN V 1054-100 eingegangenen bisherigen nationalen Erfahrungen auch für die Anwendung des EC 7 vorgeschrieben..

2 Grundsätze der Sicherheitsnachweise

2.1 Grenzzustände und Grenzzustandsgleichungen

Im Standsicherheitsnachweis ist nachzuweisen, daß eine ausreichende Sicherheit gegen Versagen des Bauteils/Bauwerks gegeben ist, wenn die Bedingung

$$S_d \leq R_d \quad (1)$$

erfüllt ist. Gleichung (1) wird als Grenzzustandsgleichung bezeichnet und enthält die Größen

S_d Bemessungswert (design value: Index d) der Einwirkungen

R_d Bemessungswert (Index d) der Widerstände

für die jeweiligen Grenzzustände der Tragfähigkeit (GZ 1) und der Gebrauchstauglichkeit (GZ 2).

Der Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZ 1) unterscheidet drei Arten der Versagenszustände, um eine gewisse Übereinstimmung zwischen dem konstruktiven Ingenieurbau und dem Grundbau zu erreichen, die mit 1A, 1B und 1C bezeichnet werden. Die unterschiedlichen Auffassungen nach ENV 1997-1 und DIN V 1054-100 zeigt Bild 1.

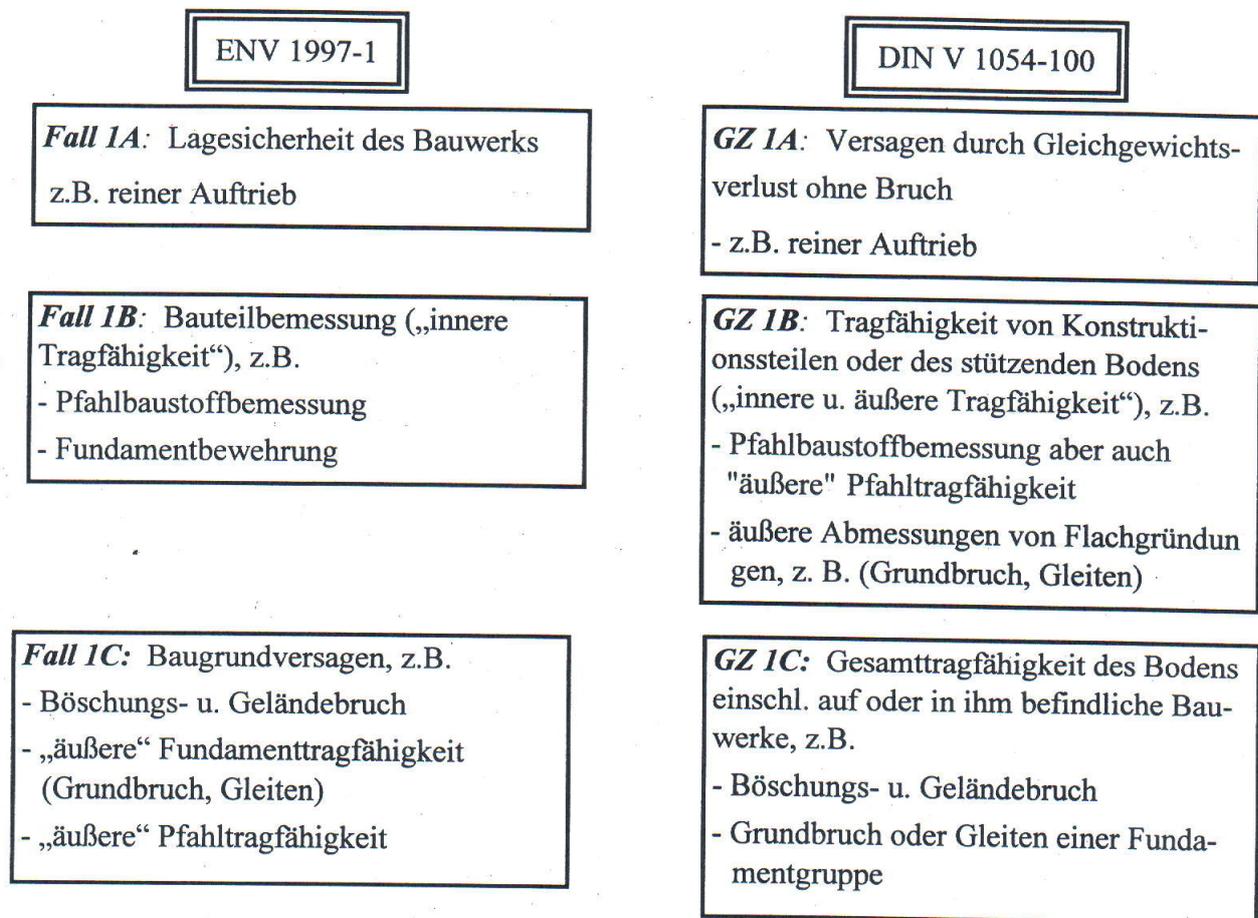


Bild 1: Unterschiedliche Definitionen nach ENV 1997-1 und DIN V 1054-100 zu den Nachweisfällen der Grenzzustände der Tragfähigkeit (GZ 1)

2.2 Einwirkungen bei Pfahlgründungen

Die charakteristischen Werte der Einwirkungen S_k werden zu Bemessungswerten S_d durch Multiplikation mit Teilsicherheitsbeiwerten γ_i . Die für die Ermittlung von Pfahltragfähigkeiten maßgeblichen Teilsicherheitsbeiwerte der Einwirkungen enthält Tabelle 1.

Einwirkungen S setzen sich aus den Einwirkungen des Bauwerks (Gründungslasten) und den Einwirkungen des Baugrundes (z.B. negative Mantelreibung, Seitendruck, usw.) zusammen.

Tabelle 1: Teilsicherheitsbeiwerte der Einwirkungen für den Grenzzustand der Tragfähigkeit GZ 1, die für Pfahlgründungen von Bedeutung sind

Fall bzw. GZ	ENV 1997-1		DIN V 1054-100			
	Symbol	D/V ¹⁾	Symbol	LF1	LF2	LF3
IB						
ständige Einwirkungen						
- ungünstig	γ_{Gsup}	1,35	γ_{Gsup}	1,35	1,20	1,00
- günstig	γ_{Ginf}	1,00	γ_{Ginf}	1,00	1,00	1,00
Flüssigkeitsdruck			γ_F	1,35	1,20	1,00
veränderliche Einwirkungen						
- ungünstig	γ_Q	1,50	γ_{Qsup}	1,50	1,30	1,00
- günstig			γ_{Qinf}	0	0	0
Seitendruck, ständig			γ_H	1,35	1,20	1,00
Mantelreibung, ständig			γ_M	1,35	1,20	1,00
Erddruck, ständig			γ_{Eg}	1,35	1,20	1,00
Erddruck, veränderlich			γ_{Eq}	1,50	1,30	1,00
IC						
ständige Einwirkungen						
- ungünstig	γ_G	1,00	γ_G	1,00	1,00	1,00
- günstig	γ_G	1,00				
Flüssigkeitsdruck			γ_F	1,00	1,00	1,00
veränderliche Einwirkungen						
- ungünstig	γ_Q	1,30	γ_{Qsup}	1,30	1,20	1,00
- günstig			γ_{Qinf}	0	0	0
Seitendruck, ständig			γ_H	1,0	1,00	1,00
Mantelreibung, ständig			γ_M	1,0	1,00	1,00

¹⁾ D = dauernd, V = vorübergehend

Für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit GZ 2 ist für alle Einwirkungsarten ein Teilsicherheitsbeiwert von 1,0 anzusetzen.

2.3 Widerstände bei Pfahlgründungen

Da in ENV 1997-1 (EC 7) und DIN V 1054-100 unterschiedliche Konzepte der Pfahltragfähigkeitsermittlung gewählt wurden, lassen sich die Widerstände bei Pfahlgründungen nicht ohne weiteres generell gegenüberstellen, sondern werden in Abschnitt 3 und 4 einschließlich der anzusetzenden Teilsicherheitsbeiwerte beispielhaft aufgeführt.

3 Axiale Pfahlwiderstände

3.1 Grundsätzliche Vorgehensweise

ENV 1997-1 (EC 7) gibt für die Ermittlung der axialen Pfahlwiderstände (Einzelpfähle) folgende drei Möglichkeiten an:

- a) Aufgrund von statischen Pfahlprobebelastungen,
- b) mit empirischen oder analytischen Berechnungsverfahren deren Zuverlässigkeit durch statische Probebelastungen unter vergleichbaren Umständen nachgewiesen ist,
- c) durch dynamische Probebelastungen, die wie b) durch Prüfung mit statischen Versuchen abgesichert sind.

DIN V 1054-100 geht analog zu den o.g. Punkten a) bis c) wie nach ENV 1997-1 vor, gibt aber für Standardfälle nach b) detaillierte Angaben zum Pfahlfußwiderstand R_b (base resistance) und Pfahlmantelwiderstand R_s (shaft resistance) auf der Grundlage der bisherigen Angaben in DIN 4014 (Bohrpfähle) und DIN 4128 (Verpreßpfähle). Für Verdrängungspfähle wurden die Tragfähigkeitstabellen der DIN 4026 (Ramppfähle) sowie die durch ein Forschungsvorhaben von Franke (1991) weitgehend abgesicherten Tabellenwerte von Schenck (1966) verwendet. Ein rein analytisches Berechnungsverfahren wird in DIN V 1054-100 nicht zugelassen.

Nachfolgend sind nur axiale *Pfahldruckkräfte* für den *Einzelpfahl* behandelt, wobei die Bezeichnungen nach Bild 2 berücksichtigt sind.

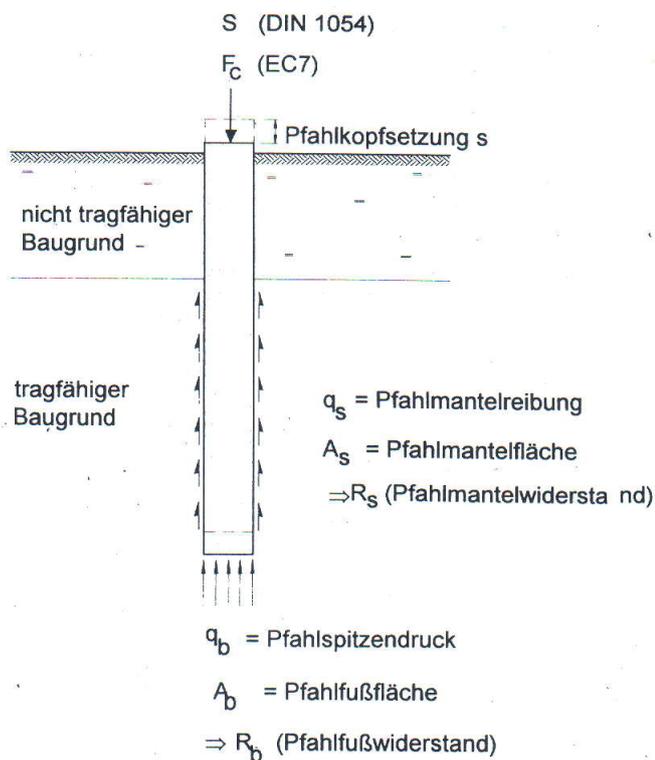


Bild 2:

Bezeichnungen für die Tragfähigkeiten beim Einzelpfahl

3.2 Ermittlung nach ENV 1997-1 (EC 7)

3.2.1 Nachweis der Tragfähigkeit

Gleichung (1) lautet im Pfahlteil von ENV 1997-1

$$F_{cd} \leq R_{cd} \quad (2)$$

mit

F_{cd} = Bemessungswert des Grenzzustandes der axialen Pfahldruckkraft (Einwirkung)

R_{cd} = Summe aller Komponenten der Bemessungswiderstände im Grenzzustand der Pfahlgründung gegen axiale Lasten.

Dabei ist nochmals darauf hinzuweisen, daß die „äußere Pfahltragfähigkeit“ in ENV 1997-1 nach Fall 1C zu bestimmen ist. Im einzelnen ist gemäß Abschnitt 3.2.2 oder 3.2.3 vorzugehen.

3.2.2 Druckpfahlwiderstände aus Pfahlprobelastungen

Der charakteristische Druckpfahlwiderstand R_{ck} ermittelt sich nach Tabelle 2 und Gleichung (3).

Tabelle 2: Faktor ξ zur Ermittlung von R_{ck} abhängig von der Anzahl der Probelastungen

Anzahl der Probelastungen	1	2	> 2
a) ξ bezogen auf den Mittelwert von R_{cm}	1,5	1,35	1,3
b) ξ bezogen auf den Kleinstwert von R_{cm}	1,5	1,25	1,1

$$R_{ck} = \frac{R_{cm}}{\xi} \quad (3)$$

Für die Ableitung des Grenzzustandes des Bemessungswiderstandes der Tragfähigkeit sollte R_{ck} möglichst nach Gleichung (4) in Fußwiderstand R_{bk} und Mantelwiderstand R_{sk}

$$R_{ck} = R_{bk} + R_{sk} \quad (4)$$

unterschieden werden, wobei die Teilsicherheitsbeiwerte nach Tabelle 3 anzuwenden sind.

Tabelle 3: Teilsicherheitsbeiwerte γ_b (Fußwiderstand), γ_s (Mantelwiderstand) und γ_t (Gesamtwiderstand)

Teilsicherheitsbeiwerte	γ_b	γ_s	γ_t
Ramm-/Verdrängungspfähle	1,3	1,3	1,3
Bohrpfähle	1,6	1,3	1,5
mit durchgehender Schnecke gebohrte Pfähle	1,45	1,3	1,4

Der Bemessungswert der Tragfähigkeit R_{cd} ermittelt sich nach Gleichung (5) zu

$$R_{cd} = \frac{R_{bk}}{\gamma_b} + \frac{R_{sk}}{\gamma_s} \quad (5)$$

Sofern Fuß- und Mantelwiderstand bei der Pfahlprobelastung nicht getrennt gemessen worden sind

$$R_{cd} = \frac{R_{ck}}{\gamma_t} \quad (6)$$

3.2.3 Druckpfahlwiderstände aus Erfahrungswerten

Es gilt Gleichung (5), wobei

$$R_{bk} = q_{bk} \cdot A_b \quad (7a)$$

$$R_{sk} = \sum q_{ski} \cdot A_{si} \quad (7b)$$

mit

q_{bk} charakteristischer Wert des Pfahlspitzendrucks

A_b Nennwert der Pfahlfußfläche

q_{ski} charakteristischer Wert der Pfahlmantelreibung in der Schicht i

A_{si} Nennwert der Pfahlmantelfläche in der Schicht i

Angaben zu q_{bk} und q_{sk} werden in ENV 1997-1 nicht gemacht, nur daß sie aus Korrelationen mit Pfahlprobelastungen abzuleiten sind. Dabei ist sinngemäß vor Anwendung von Gleichung (5) ein Faktor 1,5 als Divisor auf q_{bk} und q_{sk} analog zu Tabelle 2 anzuwenden bzw. gleich um den Faktor 1,5 niedrigere charakteristische Werte zu wählen.

3.2.4 Nachweis der Gebrauchstauglichkeit und Nachweis des Grenzzustandes der Tragfähigkeit in aufgehenden Bauteilen

Beziehen sich die Abschnitte 3.2.1 bis 3.2.3 auf den Nachweis des Grenzzustandes der Tragfähigkeit (definitionsgemäß nach Abschnitt 2 bei ENV 1997-1 auf den Fall 1C für die äußere Pfahltragfähigkeit), so sind für den Gebrauchstauglichkeitsnachweis nach Grenzzustand GZ 2 in ENV 1997-1 nur Hinweise enthalten um die Pfahlsetzungen abzuschätzen.

In den Fällen, in denen der Grenzzustand der Tragfähigkeit in aufgehenden Bauteilen (GZ 1B) eintreten kann, ehe der Grenzzustand der Tragfähigkeit GZ 1C der Pfähle („äußere Tragfähigkeit im Bruchzustand“) voll mobilisiert ist, sind die in Abschnitt 3.2.2 und 3.2.3 genannten Verfahren zur Bestimmung der charakteristischen und der Bemessungswerte auf die gesamte Widerstandslinie (WSL) anzuwenden. Das heißt, wie auch im NAD NA 7.6.4 ausgeführt, daß die WSL des Einzelpfahls mit dem Faktor ξ nach Tabelle 2 bzw. mit einem Faktor 1,5 gemäß Abschnitt 3.2.3 als Divisor in eine charakteristische bzw. mit dem Teilsicherheitsbeiwert γ_b , γ_s oder γ_t in eine Bemessungs-WSL und mit einer so nach „links“ verschobenen WSL der Nachweis des Grenzzustandes der Tragfähigkeit im aufgehenden Bauteil (GZ 1B) zu führen ist. Für diesen Fall wird also die gemessene WSL mit dem Divisor $\xi \cdot \gamma$ in eine Bemessungs-WSL verschoben.

3.2.5 Anwendung von Erfahrungswerten für die Pfahltragfähigkeit

Nach NAD, Abschnitt NA.7.6.3.3 dürfen Erfahrungswerte für Pfahlspitzendruck und Mantelreibung nach den Tabellen D.1 bis D.5, E.4 und F.1 der DIN V 1054-100 verwendet werden. Im Sinne der ENV 1997-1 sind diese Werte „Meßwerte“ und müssen durch Anwendung eines Divisors von 1,5 in charakteristische Werte umgewandelt werden.

Bei Anwendung der DIN V 1054-100 sind diese Werte unmittelbar charakteristische Werte.

3.3 Ermittlung nach DIN V 1054-100

3.3.1 Nachweis der Tragfähigkeit

Für den GZ 1B (Bruch im Boden in der Pfahlumgebung) muß die Bedingung

$$R_{1d} - S_{1d} \geq 0 \quad (8)$$

erfüllt sein, wobei für die Widerstände des Einzelpfahls die Teilsicherheitsbeiwerte nach Tabelle 4 anzusetzen sind

Tabelle 4: Teilsicherheitsbeiwerte für den Bodenwiderstand eines Einzelpfahls

GZ	Widerstand	Formelzeichen	LF 1	LF 2	LF 3
1B	Einzelpfähle (Druck u. Zug, axial)	γ_P	1,40	1,40	1,30

Der Bemessungswert des Widerstands des Einzelpfahls im GZ 1B („äußere Tragfähigkeit“) ist

$$R_{1d} = \frac{\eta \cdot R_{1k}}{\gamma_P} \quad (9)$$

mit

$$R_{1k} = R_{bk}(s_l) + R_{sk}(s_l) \quad (10)$$

R_{bk} (Pfahlfußwiderstand), R_{sk} (Pfahlmantelwiderstand) und s_l (Pfahlkopfverschiebung im GZ 1B) sowie dem Anpassungsfaktor zur Berücksichtigung von Widerstandseinflüssen

$$\eta = \eta_N (\text{Anzahl Probebelast.}) \cdot \eta_Z (\text{zyklische Einwirkung}) \quad (11)$$

3.3.2 Axiale Pfahlwiderstände aus Pfahlprobebelastungsergebnissen

Axiale Pfahlwiderstände sind durch eine Widerstands-Setzungs-Linie (WSL) zu beschreiben, die möglichst aus Pfahlprobebelastungen abzuleiten ist. Die in der Pfahlprobebelastung ermittelte WSL ist i.d.R. als charakteristische WSL mit $R_k(s)$ ohne Zu- oder Abschläge anzusetzen. Aus dem charakteristischen Pfahlwiderstand R_k ist der Bemessungswiderstand R_d nach Gleichung (9) zu bestimmen. Dabei sind Anpassungsfaktoren η zu verwenden.

Tabelle 5: Anpassungsfaktor η_N zur Berücksichtigung der Anzahl der durchgeführten Pfahlprobebelastungen an Bohr- oder Verdrängungspfählen

N Probebelastungen	η_N	
	Druck	Zug
N = 1	1,00	1,00
N = 2		
R_{mittel}	1,10	1,00
R_{min}	1,20	1,00
N ≥ 3		
R_{mittel}	1,15	1,10
R_{min}	1,35	1,20

Tabelle 6: Anpassungsfaktoren η_Z für Wechsel- bzw. Zugschwellbelastung auf Verpreßpfähle für Zugschwelllastanteile > 25 % von S_d

Lastwechselzahl n	Anpassungsfaktor η_Z
1	1,0
bis 100	0,8
bis 10000	0,7
≥ 1 Mio.	0,4

Der Anpassungsfaktor η_N für Verpreßpfähle beträgt unabhängig von der Anzahl der Probelastungen $\eta_N=1$ bezogen auf R_{\min} .

Für den Fall, daß bei Probelastungen von Druckpfählen der Grenzzustand GZ 1B aus der WSL nicht erkennbar ist oder erst bei Setzungen eintritt, die größer als

$$s_l = 0,1 \cdot D_F \quad (12)$$

sind, ist

$$R_{lk} = R(0,1 \cdot D_F) \quad (13)$$

anzusetzen. D_F ist der Pfahlfußdurchmesser.

3.3.3 Axiale Pfahlwiderstände aus Erfahrungswerten

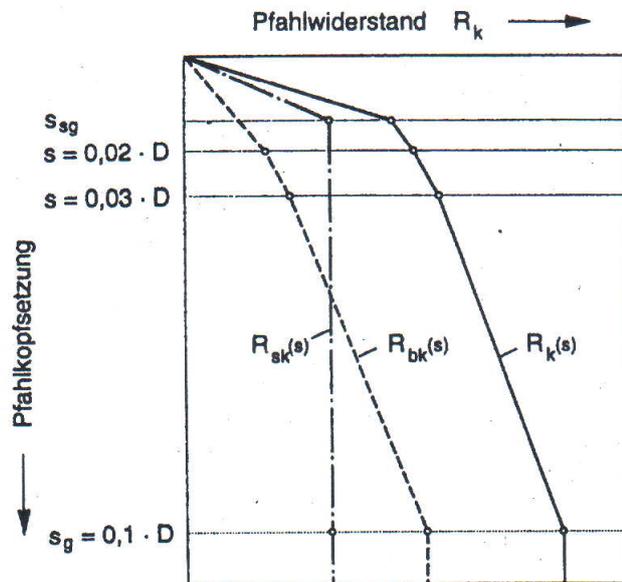
Hier geht die DIN V 1054-100 deutlich über die ENV 1997-1 hinaus und gibt in den Anhängen D bis F konkrete Angaben auf der Grundlage der bisherigen Erfahrungswerten aus DIN 4014, DIN 4026 und DIN 4128, die nachfolgend auszugsweise mit den neuen Bezeichnungen wiedergegeben sind.

a) Bohrpfähle

In Bild 3 sind die Elemente der charakteristischen WSL bis zu einer Setzung von $s_l = s_g$ (Grenz-/Bruchsetzung) dargestellt. Es ist zu unterscheiden zwischen dem setzungsabhängigen Pfahlfußwiderstand $R_b(s)$ und dem Mantelwiderstand $R_s(s)$.

Bild 3:

Elemente der charakteristischen Widerstandssetzungslinie



Für $R_{bk}(s_l = s_g)$ gilt eine Grenzsetzung:

$$s_g = 0,1 \cdot D \text{ bzw. } s_g = 0,1 \cdot D_F \quad (14)$$

mit D Pfahlschaftdurchmesser und D_F Pfahlfußdurchmesser. Für R_{sk} eingesetzt in MN im Bruchzustand gilt eine Grenzsetzung

$$s_{sg} = 0,5 \cdot R_{sk}(s_{sg}) + 0,5 \leq 3 \text{ cm} \quad (15)$$

Der charakteristische axiale Pfahlwiderstand ist

$$R_k(s) = R_{bk}(s) + R_{sk}(s) = q_{bk} \cdot A_b + \sum q_{ski} \cdot A_{si} \quad (16)$$

Bezeichnungen siehe unter Gleichung (7).

Bei der Ermittlung der charakteristischen axialen Widerstandshebungslinie ist

$$s_{sg,zug} = 1,3 \cdot s_{sg} \quad (17)$$

mit s_{sg} nach Gleichung (15) ansetzen.

Die charakteristischen Pfahlfußwiderstandsspannungen (Pfahlspitzendruck) und Pfahlmantelreibungsspannungen (Pfahlmantelreibung) für Bohrpfähle von $D = 0,3$ bis 3 m, die mindestens $2,5$ m in eine tragfähige Schicht einbinden sind in den Tabellen 7 α und β dargestellt.

Tabelle 7: q_{bk} und q_{sk} aus Erfahrungswerten für Bohrpfähle

α) Pfahlspitzendruck und Pfahlmantelreibung für nichtbindige Böden

bezogene Pfahlkopfsetzung s/D bzw. s/D_F	Pfahlspitzendruck q_{bk} in MN/m^2 *)			
	bei einem mittleren Sondierspitzenwiderstand q_{ck} in MN/m^2			
	10	15	20	25
0,02	0,7	1,05	1,4	1,75
0,03	0,9	1,35	1,8	2,25
0,10($\hat{=}$ s_g)	2,0	3,0	3,5	4,0

*) Zwischenwerte dürfen geradlinig interpoliert werden. Bei Bohrpfählen mit Fußverbreiterung sind die Werte auf 75% abzumindern.

Festigkeit des nichtbindigen Bodens bei einem mittleren Sondierspitzenwiderstand q_{ck} in MN/m^2	Bruchwert q_{sk} der Mantelreibung in MN/m^2 *)
0	0
5	0,04
10	0,08
≥ 15	0,12

*) Zwischenwerte dürfen geradlinig interpoliert werden.

β) Pfahlspitzendruck und Pfahlmantelreibung für bindige Böden

bezogene Pfahlkopfsetzung s/D bzw. s/D_F	Pfahlspitzendruck q_{bk} in MN/m^2 *)	
	bei einer Scherfestigkeit im undrännierten Zustand c_{uk} in MN/m^2	
	0,1	0,2
0,02	0,35	0,9
0,03	0,45	1,1
0,10($\hat{=}$ s_g)	0,8	1,5

*) Zwischenwerte dürfen geradlinig interpoliert werden. Bei Bohrpfählen mit Fußverbreiterung sind die Werte auf 75% abzumindern.

Festigkeit des bindigen Bodens bei einer Scherfestigkeit im undrännierten Zustand c_{uk} in MN/m^2	Bruchwert q_{sk} der Mantelreibung in MN/m^2 *)
0,025	0,025
0,1	0,04
$\geq 0,2$	0,06

*) Zwischenwerte dürfen geradlinig interpoliert werden.

Die Anforderungen an den Untergrund sind in DIN V 1054-100 definiert. Für Fels sind ebenfalls Angaben zur Tragfähigkeit aus Erfahrungswerten vorhanden.

b) Verdrängungspfähle

Die beiden nachfolgend dargestellten Verfahren der Ermittlung von Pfahlwiderständen aus Erfahrungswerten beziehen sich für das Verfahren nach den Tabellen E.1 bis E.3 aus dem Anhang der DIN V 1054-100 (hier beispielhaft für Stahlbetonfertigungspfähle in Tabelle 8 wiedergegeben) auf den Nachweis im Grenzzustand GZ 2, wobei der Nachweis für den Grenzzustand GZ 1B nicht erforderlich bzw. gleichzeitig mit abgedeckt ist. Das zweite Verfahren nach Tabelle 9 unter sinngemäßer Anwendung von Gleichung (16) bezieht sich auf den Nachweis in Grenzzustand GZ 1B, wobei hier auf den Nachweis für den GZ 2 verzichtet werden darf. Die beiden Verfahren sollten innerhalb einer Berechnung nicht miteinander vermischt werden. Für beide Verfahren kann davon ausgegangen werden, daß im Grenzzustand GZ 2 (Gebrauchstauglichkeit) Setzungen von 1 bis 2 cm eintreten können.

Tabelle 8: Charakteristische Pfahlwiderstände R_{2k} (GZ 2) von gerammten Verdrängungspfählen mit quadratischem Querschnitt aus Stahlbeton

Einbindetiefe in den tragfähigen Boden m	R_{2k} in kN				
	Seitenlänge a_s ¹⁾ in cm				
	20	25	30	35	40
3	200	250	350	450	550
4	250	350	450	600	700
5	-	400	550	700	850
6	-	-	650	800	1000

¹⁾ Gilt auch für annähernd quadratische Querschnitte, wobei für a_s die mittlere Seitenlänge einzusetzen ist.

Der tragfähige Boden für die Anwendung von Tabelle 8 ist in DIN V 1054-100 definiert.

Die Anforderungen an den nichtbindigen Untergrund für die Anwendung der nachfolgend dargestellten Tabelle 9 sind Drucksondiererergebnisse $q_{ck} \approx 7,5 \text{ MN/m}^2$ für die unteren Tabellenwerte und $q_{ck} \approx 15 \text{ MN/m}^2$ für die oberen Tabellenwerte. Der bindige Untergrund ist nach Tabelle 9 über die Konsistenzbeschreibung I_c nachzuweisen.

Tabelle 9: Charakteristische Werte für Pfahlspitzendruck q_{blk} und Pfahlmantelreibung q_{slk} für den Grenzzustand GZ 1B

Bodenart	Bereich unter OF der tragfähigen Schicht ⁴⁾ in m	mittlere Mantelreibungsspannungen (für abgewickelten Umfang) q_{slk} in kN/m ²				Pfahlspitzendruckspannungen (umrissener Umfang des Pfahlfußes) q_{blk} in MN/m ²			
		Holzpfähle	Stahlbetonpfähle	Stahlrohrpfähle Kastenpfähle offen	Stahlträgerprofile	Holzpfähle	Stahlbetonpfähle	Stahlrohrpfähle ³⁾ Kastenpfähle offen ¹⁾	Stahlträgerprofile ²⁾
		nichtbindige Böden	bis 5 5-10 > 10	20-45 40-65	20-45 40-65 60	20-35 35-55 50-75	20-30 30-50 40-75	2-3,5 3-7,5	2-5 3,5-6,5 4-8
bindige Böden ⁵⁾ $I_C = 0,5 - 0,75$ ⁵⁾ $I_C = 0,75 - 1$		5-20 20-45				0-2			
Geschiebemergel halbfest bis fest ⁴⁾	bis 5 5-10 > 10		50-80 80-100	40-70 60-90 80-100	30-50 40-70 50-80		2-6 5-9 8-10	1,5-5 4-9 8-10	1,5-4 3-7,5 6-9

1) Für Kastenweiten oder Rohrdurchmesser ≤ 500 mm
2) Für Profilweiten ≤ 350 mm; bei höheren Profilen Stege einschweißen
3) Für Stahlkastenpfähle mit geschlossenem Fuß siehe Stahlbetonpfähle
4) Für q_{slk} ist das die Pfahllänge, für q_{blk} die Einbindetiefe in die tragfähige Schicht
5) I_C nach DIN 18122
Sofern für Geschiebemergel die Konsistenzzahl I_C wegen zu hohem Überkornanteils nicht mehr nach DIN 18122 und DIN 4022-T1 bestimmt werden kann, ist sie auf der Grundlage örtlicher Erfahrungen einzuschätzen.

c) Verpreßpfähle

Für Verpreßpfähle enthält DIN V 1054-100 für den Ausnahmefall, daß keine Pfahlprobelastungen ausgeführt werden, charakteristische Werte der Pfahlmantelreibung q_{ski}

3.3.4 Nachweis der Gebrauchstauglichkeit und Nachweis des Grenzzustandes der Tragfähigkeit in aufgehenden Bauteilen

Eine ausreichende Sicherheit gegen Verlust der Gebrauchstauglichkeit (GZ 2) wird eingehalten, wenn die Bedingung

$$R_{2d} - S_{2d} \geq 0 \quad (18)$$

mit

$$R_{2d} = R_{2k} \quad (19)$$

erfüllt ist. Zum Bemessungswert der Einwirkungen S_d siehe Abschn. 2.2.

Der Nachweis im GZ 2 ist nur zu führen, wenn die Verformungen der Pfahlgründung für das Gesamttragwerk von Bedeutung sind.

Der Bemessungswert der Widerstände R_{2k} ergibt sich entsprechend Gleichung (19) unmittelbar aus dem charakteristischen Wert der Widerstände R_{2k} . Der charakteristische Wert R_{2k} des axial belasteten Einzelpfahles ist unter Berücksichtigung bzw. Vorgabe einer charakteristischen Setzung s_{2k} oder unter Vorgabe eines charakteristischen Widerstandes R_{2k} mit einer zugehörigen Streuung s_{2k} der Setzungen aus der charakteristischen WSL aus Probelastungen oder mit Erfahrungswerten zu bestimmen.

Analog ist vorzugehen beim Nachweis des Grenzzustandes der Tragfähigkeit in aufgehenden Bauteilen (GZ 1B).

4 Pfahlwiderstände quer zur Pfahlachse

Für diese Beanspruchungsform wird in ENV 1997-1 ebenfalls unterschieden zwischen Tragfähigkeitsnachweisen auf der Grundlage von Probelastungen und Ergebnissen von „Baugrunderkundungen und Pfahlfestigkeitsparametern“. Wie im einzelnen zu verfahren ist, darüber sind im ENV 1997-1 nur sehr allgemeine Hinweise zu finden.

DIN V 1054-100 gibt zur Widerstandsermittlung quer zur Pfahlachse im wesentlichen die bisherigen nationalen Erkenntnisse zur Bettungsmodulermittlung an. Dies gilt auch für die Bettungsmodulverteilung in der Pfahlgruppe (bisher in DIN 4014), die in den Anhang zur DIN V 1054-100 mit aufgenommen wurde. Ein besonderes Problem wird noch gesehen in dem Nachweis GZ 1B (Bauteilversagen); wobei die Pfahlschnittgrößen einerseits mit den γ -fachen Einwirkungen und andererseits mit Bettungsmoduln als Bodenwiderstände berechnet werden müssen. Dafür wird vorerst

$$k_{sd} = k_{sk} \quad (20)$$

festgelegt. Endgültige Regelungen soll ein Ausschuß *Interaktion Baugrund-Tragwerk* erarbeiten.

Es ist zu beachten, daß der Bemessungswert der Einwirkungen auf den Boden aus der Normalspannung zwischen Pfahl und Boden näherungsweise den Bemessungswert der ebenen Erdwiderstandsspannung nicht überschreiten sollte.

$$e_{phd} = e_{phk} \quad (21)$$

5 Vergleichende Berechnung einer Bohrpfahlgründung auf der Grundlage von Erfahrungswerten für Pfahlspitzendruck und Mantelreibung

5.1 Aufgabenstellung

Ein Brückenwiderlager soll auf Bohrpfählen gegründet werden. Folgende charakteristische Lasten (Einwirkungen) liegen vor:

- a) Vertikale Lasten des gesamten Widerlagers einschließlich Pfahlkopfplatte $V = S_k = 48 \text{ MN}$. Die Aufteilung in ständige und veränderliche Einwirkungen wird vom Tragwerksplaner zu $G_k = 30 \text{ MN}$ und $Q_k = 18 \text{ MN}$ angegeben.
- b) Horizontale Lasten auf die Pfahlkopfplatte (Momente vernachlässigt) $H = S_{hk} = 10 \text{ MN}$ näherungsweise als ständige Einwirkungen.

Anmerkung: näherungsweise wird für die Vorbemessung angenommen, daß alle Pfähle unter der Pfahlkopfplatte die gleichen Belastungsanteile erhalten. Gruppenwirkung soll zunächst bei der vertikalen und horizontalen Pfahltragfähigkeit vernachlässigt werden.

Vom Baugrundgutachter bzw. Tragwerksplaner werden folgende Vorgaben festgelegt:

- c) Baugrundmodell nach Bild 4
- d) Bohrpfähle ohne Fuß, $D = 1,5 \text{ m}$
- e) UK Pfahlkopfplatte auf $-1,6 \text{ m}$; Pfahlfußebene auf $-18,0 \text{ m}$
- f) Die maximale Widerlagersetzung soll für den GZ 2 $s_2 = 3,0 \text{ cm}$ (ohne Gruppenwirkung) betragen. Damit soll der Nachweis der Gebrauchstauglichkeit GZ 2 der Pfähle unter Axialbelastung geführt werden.
- g) Der Nachweis des Grenzzustandes der Tragfähigkeit in der aufgehenden Konstruktion (GZ 1B) ist zu führen unter der Annahme, daß der zwängungswirksame Setzungsanteil $\Delta s \sim 0,33 \cdot s_2$ (für Bohrpfähle üblich) und damit hier $\Delta s \sim 3 \text{ cm}/3 = 1 \text{ cm}$ als angenommene Bemessungssituation beträgt.
- h) Die Bettungsmoduln auf den Einzelpfahl sind der nachfolgenden Tabelle 10 zu entnehmen. Gruppenwirkung vernachlässigt. Bettungsmodulverteilung näherungsweise rechteckförmig (gleichmäßig) über die Schichtdicke. Es gilt $k_{sd} = k_{sk}$.

Tabelle 10: Bettungsmodulangaben

Kote	Bettungsmodul $k_{sd} = k_{sk} \text{ [MN/m}^3\text{]}$
-1,6 m -7,0 m	3,0
-7,0 m -10,0 m	6,0
-10,0 m -18,0 m	20,0

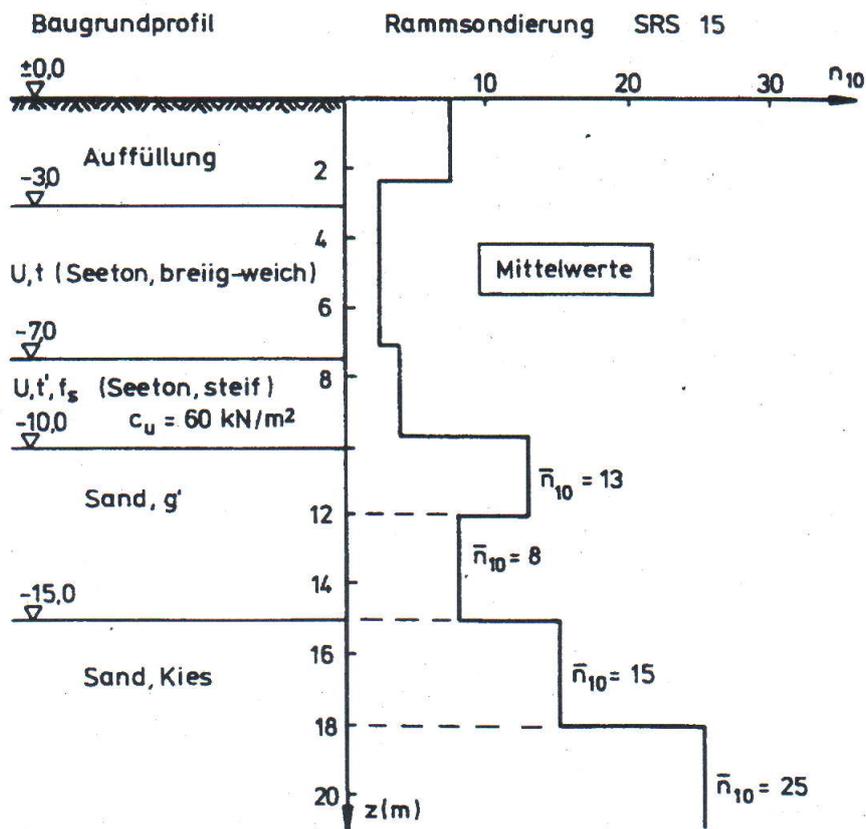


Bild 4: Baugrundmodell für die Pfahlberechnung

Der Erdwiderstand vor den Pfählen darf in der Auffüllung und im breiig-weichen Seeton mit einem Ersatzreibungswinkel $\varphi'_{sk} = 22,5^\circ$ und $\gamma_k = 18 \text{ kN/m}^3$ berechnet werden.

Es ist zu ermitteln:

- 1) Anzahl der Pfähle nach der herkömmlichen Methode (DIN 4014 alt) mit Erfahrungswerten für Spitzendruck und Mantelreibung

- 2) Wie 1) aber nach ENV 1997-1 (EC7)
- 3) Wie 1) aber nach DIN V 1054-100
- 4) Vertikal- und Horizontalbelastung (Einwirkungen) sowie Widerstände auf die Pfähle und das Biegemoment für die Bauteilbemessung (GZ 1B).

5.2 Axiale Bohrpfahltragfähigkeit und Pfahlanzahl nach der herkömmlichen Methode (DIN 4014 alt)

5.2.1 Tragfähigkeit des Einzelpfahls

5.2.1.1 Pfahlmantelwiderstand

Schicht	A_{mi} [m ²]	τ_{mgi} [MN/m ²]	Q_{mgi} [MN]
7,0 - 10,0	14,13	0,032	0,4522
10,0 - 12,0	9,42	0,104	0,9797
12,0 - 15,0	14,13	0,064	0,9043
15,0 - 18,0	14,13	0,120	1,6956
$U = 4,71 \text{ m}$			$Q_{mg} = 4,0318$

$$s_{sg} = 0,5 \cdot 4,0318 + 0,5 = 2,52 \text{ cm}$$

5.2.1.2 Pfahlspitzenwiderstand

s/D [-]	s [cm]	σ_s [MN/m ²]	Q_s [MN]
0,02	3,0	1,75	3,0975
0,03	4,5	2,25	3,9825
0,10	15,0	4,00	7,0800

$$A_s = 1,77 \text{ m}^2$$

5.2.1.3 Charakteristische Widerstands-Setzungs-Linie (WSL)

s [cm]	Q_s [MN]	Q_m [MN]	Q [MN]
2,52	2,6019	4,0318	6,6337
3,0	3,0975	4,0318	7,1293
4,5	3,9825	4,0318	8,0143
15,0	7,0800	4,0318	11,1118

Die Ergebnisse sind in Bild 5 dargestellt.

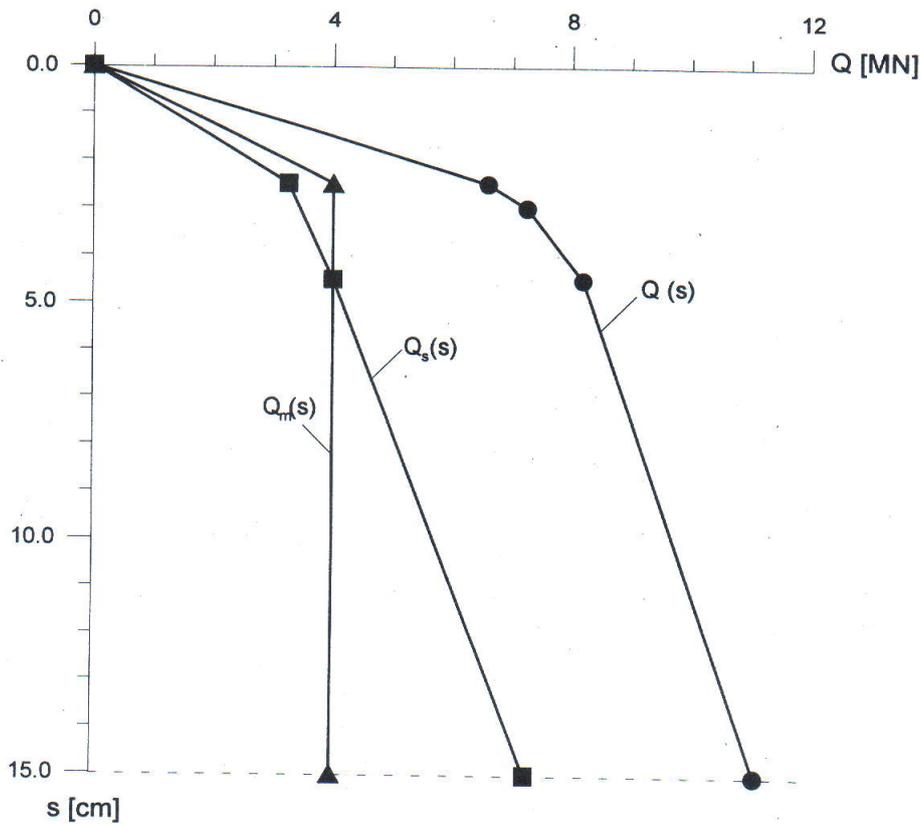


Bild 5: Berechnungsergebnisse zur Einzelpfahltragfähigkeit nach der herkömmlichen Methode (DIN 4014 alt)

5.2.1.4 Nachweise zur Trag- und Gebrauchsfähigkeit

- Bruchzustand: zul $Q = Q_g/\eta = 11,1118/2,0 = \underline{5,556 \text{ MN}}$
- Gebrauchszustand: $s = 3 \text{ cm} \Rightarrow \text{zul } Q = 7,129 \text{ MN}$
 \Rightarrow a) maßgeblich

5.2.2 Pfahlanzahl

$$n = V/\text{zul } Q = 48/5,556 = 8,6 \text{ Pfähle}$$

gewählt: 9 Pfähle

5.3 Axiale Bohrpfahltragfähigkeit und Pfahlanzahl nach ENV 1997-1 (EC7)

5.3.1 Grenzzustand der Tragfähigkeit des Einzelfahls nach Fall 1C

Nach NAD, NA 7.6.3.3, dürfen die Erfahrungswerte für Pfahlspitzendruck und Mantelreibung nach DIN V 1054-100, Anhänge Tabellen D.1 - D.5, verwendet werden, wobei diese Werte im Sinne der Regelungen in ENV 1997-1 durch 1,5 vorab zu dividieren sind.

$$R_{cd} = \frac{R_{bk}}{\gamma_b} + \frac{R_{sk}}{\gamma_s} = \frac{q_{bk} \cdot A_b}{\gamma_b} + \frac{\sum q_{ski} \cdot A_{si}}{\gamma_s}$$

Im vorliegenden Fall ist $R_{sk} = Q_{mg}$ aus Abschnitt 5.2.1.1 und $R_{bk} = Q_{sg}$ aus Abschnitt 5.2.1.2, allerdings ohne den o.g. Divisor 1,5. Daraus ergibt sich der Bemessungswiderstand zu

$$R_{cd} = \frac{7,0800}{1,6 \cdot 1,5} + \frac{4,0318}{1,3 \cdot 1,5} = 2,9500 + 2,0676 = \underline{5,018 \text{ MN}}$$

5.3.2 Nachweis des Grenzzustandes der Tragfähigkeit in der aufgehenden Konstruktion nach Fall 1B

Für diesen Nachweis ist die gesamte WSL mit dem Divisor $\xi \cdot \gamma$ nach links zu verschieben, siehe NAD, Abschnitt NA.7.6.4 und Abschnitt 3.2.4. Bei Ansatz von $\xi \cdot \gamma$ ergeben sich die nachfolgenden Zahlenwerte für die WSL:

s [cm]	DIN 4014 alt		ENV 1997-1		
	Q_s [MN]	Q_m [MN]	R_{bd} [MN]	R_{sd} [MN]	R_{cd} [MN]
2,52	2,6019	4,0318	1,0841	2,0676	3,1517
3,0	3,0975	4,0318	1,2906	2,0676	3,3582
4,5	3,9825	4,0318	1,6594	2,0676	3,7270
15,0	7,0800	4,0318	2,9500	2,0676	5,0176

Die Ergebnisse sind in Bild 6 dargestellt.

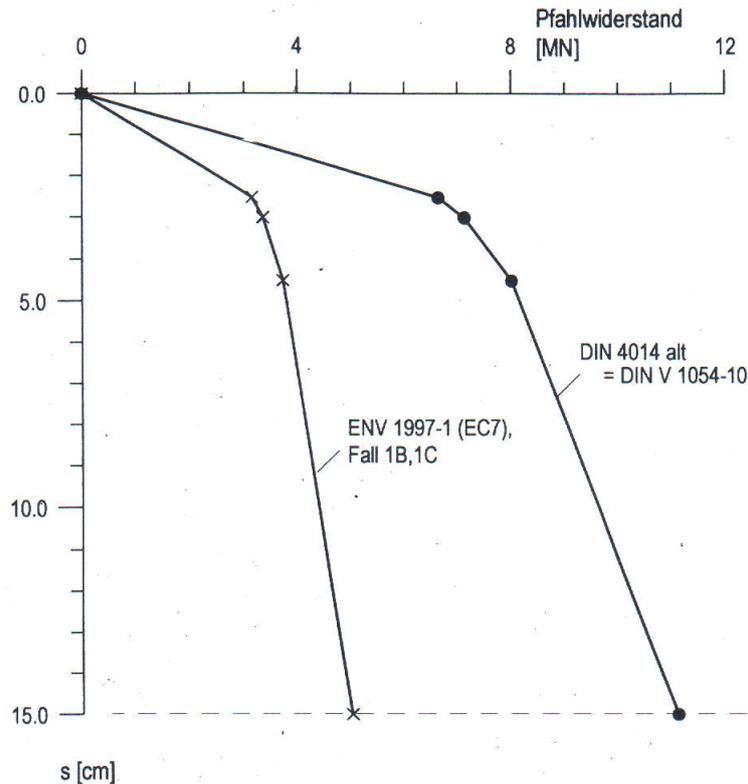


Bild 6: Berechnungsergebnisse zur Einzeltragfähigkeit nach DIN 4014 alt, DIN V 1054-100 und ENV 1997-1 (EC7) mit ξ - γ -fachen Werten (Fall 1B und 1C)

Wird nun für den Nachweis der Tragfähigkeit im aufgehenden Bauteil gemäß Abschnitt 5.1g) angenommen, daß dieser Bemessungsfall bei den vorgegebenen Setzungsdifferenzen von $\Delta s = 1$ cm und dieses idealisiert ($\Delta s \sim 0,33 s_2$) bei Setzungen $s_2 = 3$ cm eintritt, so ist für den Pfählwiderstand des Einzelpfahls anzusetzen:

$$R_{cd}(s = 3 \text{ cm}, \Delta s = 1 \text{ cm}) = \underline{3,358 \text{ MN}}$$

5.3.3 Nachweis des Grenzzustandes der Gebrauchstauglichkeit nach Fall 2

Wie bereits ausgeführt sind die Regelungen in ENV 1997-1 für diesen Fall sehr unklar. Wendet man auf die WSL für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit den Faktor ξ (hier gleich 1,5) ohne Teilsicherheitsbeiwerte γ_s bzw. γ_b auf die gesamte WSL an, so erhält man die charakteristische WSL und es ergibt sich:

s [cm]	DIN 4014 alt		ENV 1997-1		
	Q_s [MN]	Q_m [MN]	R_{td} [MN]	R_{sd} [MN]	R_{cd} [MN]
2,52	2,6019	4,0318	1,7346	2,6879	4,4225
3,0	3,0975	4,0318	2,0650	2,6879	4,7529
4,5	3,9825	4,0318	2,6550	2,6879	5,3429
15,0	7,0800	4,0318	4,7200	2,6879	7,4079

Die grafische Darstellung enthält Bild 7.

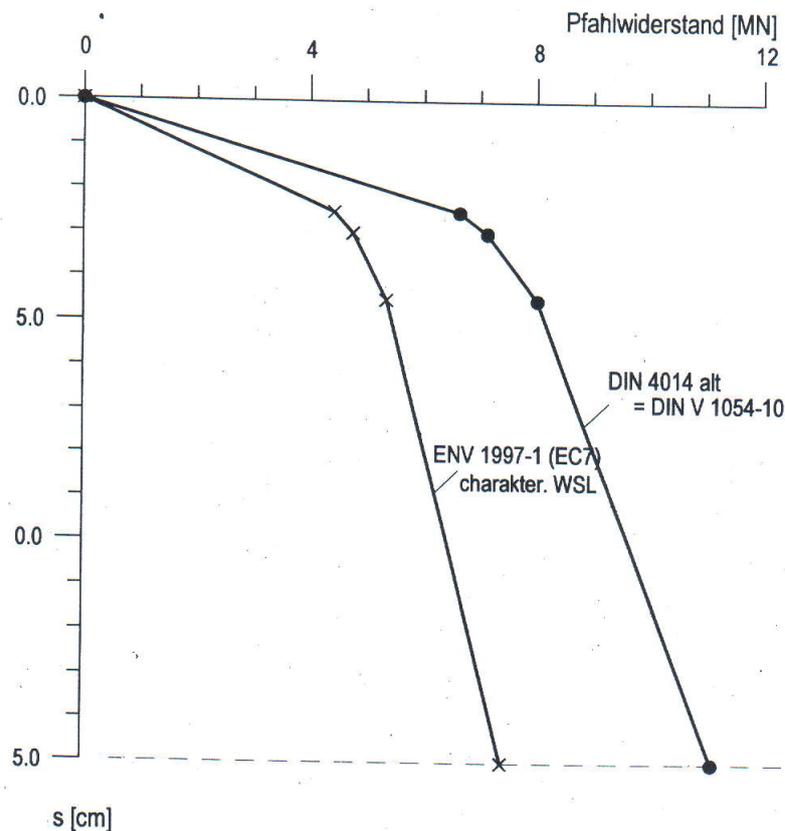


Bild 7: Berechnungsergebnisse zur Einzeltragfähigkeit nach DIN 4014 alt, DIN V 1054-100 und ENV 1997-1 (EC7) mit ξ -fachen Werten (Fall 2)

Wird nun für die Gebrauchstauglichkeit der Pfahlgründung wie in Abschnitt 5.1f) angenommen, daß dieser Bemessungsfall bei den vorgegebenen Setzungen von $s = 3$ cm eintritt, so ist für den Pfahlwiderstand des Einzelpfahls anzusetzen:

$$R_{cd}(s = 3 \text{ cm}) = \underline{4,7529 \text{ MN}}$$

5.3.4 Pfahlanzahl

- a) Grenzzustand der Tragfähigkeit (Fall 1C):

$$\Sigma F_{cd} = G_k \cdot \gamma_k + Q_k \cdot \gamma_Q = 30 \cdot 1,0 + 18 \cdot 1,3 = 53,4 \text{ MN}$$

$$\text{Pfahlanzahl } n = 53,4/5,018 = 10,6 = 11 \text{ Pfähle}$$

- b) Grenzzustand der Tragfähigkeit in der aufgehenden Konstruktion (Fall 1B):

$$\Sigma F_{cd} = G_k \cdot 1,35 + Q_k \cdot 1,5 = 67,5 \text{ MN}$$

$$\text{Pfahlanzahl } n = 67,5/3,358 = 20,11 = 21 \text{ Pfähle}$$

- c) Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (Fall 2):

$$\Sigma F_{cd} = G_k \cdot 1,0 + Q_k \cdot 1,0 = 48 \text{ MN}$$

$$\text{Pfahlanzahl } n = 48/4,7529 = 10,1 = 11 \text{ Pfähle}$$

5.4 Axiale Bohrpfahltragfähigkeit und Pfahlanzahl nach DIN V 1054-100

5.4.1 Grenzzustand der Tragfähigkeit des Einzelpfahls nach GZ 1B

Grundlage sind wiederum die Erfahrungswerte für Pfahlspitzendruck und Mantelreibung nach DIN V 1054-100, Anhänge Tabellen D.1 - D.5.

R_{1k} für $s_g = 15 \text{ cm}$ siehe WSL in Bild 6 aus Abschnitt 5.3.2:

$$R_{1d} = \frac{\eta \cdot R_{1k}}{\gamma_p} = \frac{1,0 \cdot 11,1118}{1,4} = 7,937 \text{ MN}$$

5.4.2 Nachweis des Grenzzustandes der Tragfähigkeit in der aufgehenden Konstruktion nach GZ 1B

Gemäß Abschnitt 5.1g) wird angenommen, daß dieser Bemessungsfall für $\Delta s = 1 \text{ cm}$ bei $s = 3 \text{ cm}$ eintritt. Nach der WSL in Bild 6 aus Abschnitt 5.3.2, für $s_2 = 3 \text{ cm}$ ergibt sich $s_{1B} = 3 \text{ cm}$, $\Delta s = 1 \text{ cm}$

$$R_{1B,d} = 7,129 \text{ MN.}$$

5.4.3 Nachweis des Grenzzustandes der Gebrauchstauglichkeit nach GZ 2

Für $s_2 = 3 \text{ cm}$ ergibt sich aus Bild 6 oder 7: $R_{2d} = 7,129 \text{ MN}$

5.4.4 Pfahlanzahl

- a) Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZ 1B):

$$S_{1d} = G_k \cdot \gamma_{Gsup} + Q_k \cdot \gamma_{Qsup} = 30 \cdot 1,35 + 18 \cdot 1,5 = 67,5 \text{ MN}$$

$$\text{Pfahlanzahl } n = 67,5 / 7,937 = 8,5 = 9 \text{ Pfähle}$$

- b) Grenzzustand der Tragfähigkeit in der aufgehenden Konstruktion (GZ 1B):

$$S_{1B,d} = G_k \cdot 1,35 + Q_k \cdot 1,5 = 67,5 \text{ MN}$$

$$\text{Pfahlanzahl } n = 67,5 / 7,129 = 9,5 = 10 \text{ Pfähle}$$

- c) Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZ 2):

$$S_{2d} = G_k \cdot 1,0 + Q_k \cdot 1,0 = 48 \text{ MN}$$

$$\text{Pfahlanzahl } n = 48 / 7,129 = 6,7 = 7 \text{ Pfähle}$$

5.5 Zusammenstellung der erforderlichen Pfahlanzahl für die Widerlagergründung

Grundlage	Pfahltragfähigkeit Anzahl Pfähle	Tragfähigkeit aufg. Konstruktion Anzahl Pfähle	Gebrauchstauglichkeit Anzahl Pfähle
DIN 4014 alt	<u>9</u>	7	7
ENV 1997-1 (EC7)	11	<u>21</u>	11
DIN V 1054-100	<u>9</u>	<u>10</u>	7

5.6 Einwirkungen und Baugrundwiderstände als Grundlage für die Bauteilbemessung der Pfähle

Aus den vorstehenden Ausführungen werden als Grundlage für die Bauteilbemessung der Pfähle z.B. nach EC2 **beispielhaft** nur die Einwirkungen und Baugrundwiderstände für die Berechnung der erforderlichen Pfähle unter dem Widerlager nach DIN V 1054-100 zusammengestellt.

- a) *charakteristische Einwirkung im GZ 1B*

Nach Abschnitt 5.4.3 und 5.5 ergeben sich 9 bzw. 10 Pfähle unter dem Widerlager. Die Belastung je Einzelpfahl ergibt sich bei Zugrundelegung hier der Pfahltragfähigkeit im GZ 1B (9

Pfähle) damit bei näherungsweise gleichmäßiger Verteilung der Gesamtbelastung auf die Einzelfähle zu

ständige Einwirkung: $G_{1k} = 30/9 = 3,333 \text{ MN}$

veränderliche Einwirkungen: $Q_{1k} = 18/9 = 2 \text{ MN}$

Horizontale ständige Einwirkungen: $H_{1k} = 10/9 = 1,111 \text{ MN}$

b) *Bettungsmoduln*

siehe Aufgabenstellung (Abschn. 5.1)

c) *Begrenzung der Normalspannungen zwischen Pfahl und Boden*

$$e_{phd} = e_{phk} = \gamma \cdot z \cdot \tan^2 \left(45 + \frac{\varphi_k}{2} \right)$$

Die sich daraus ergebenden Randbedingungen für die Pfahlbauteilbemessung z.B. nach EC2 zeigt Bild 8.

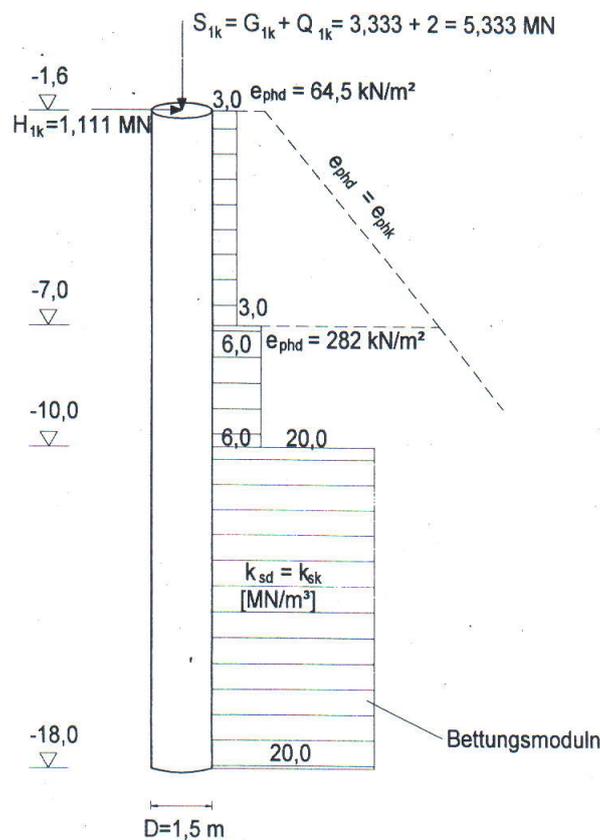
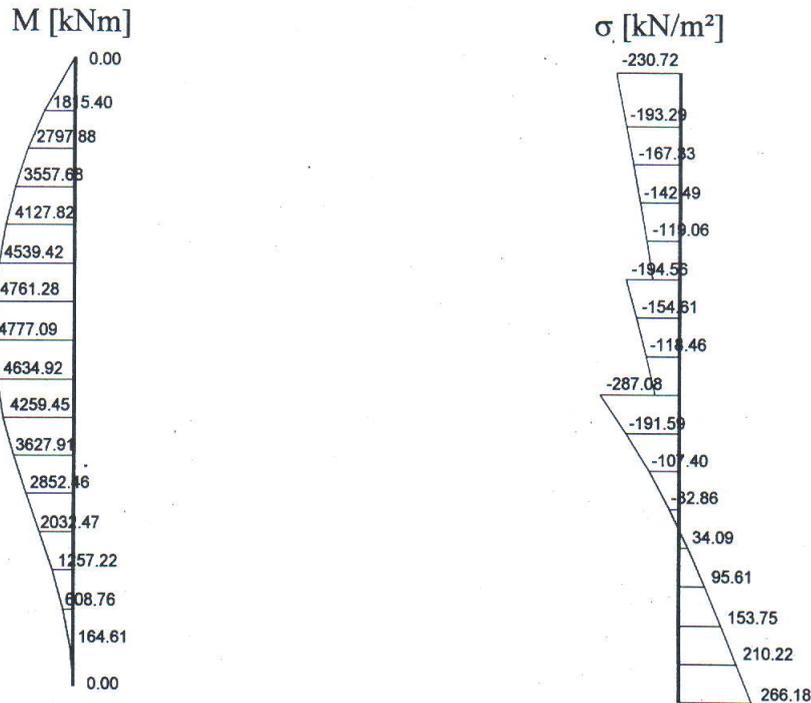


Bild 8: Zusammenstellung der Randbedingungen für die Pfahlbauteilbemessung

5.7 Ermittlung des Bemessungsmomentes für den Einzelpfahl infolge der Horizontalbelastung als Grundlage für die Bauteilbemessung

a) Berechnungsergebnisse für Bemessungseinwirkungen (GZ 1B mit $\gamma_{Gsup} = 1,35$ und $\gamma_Q = 1,50$)



b) Erdwiderstandsspannung und abgeminderter Bettungsmodul

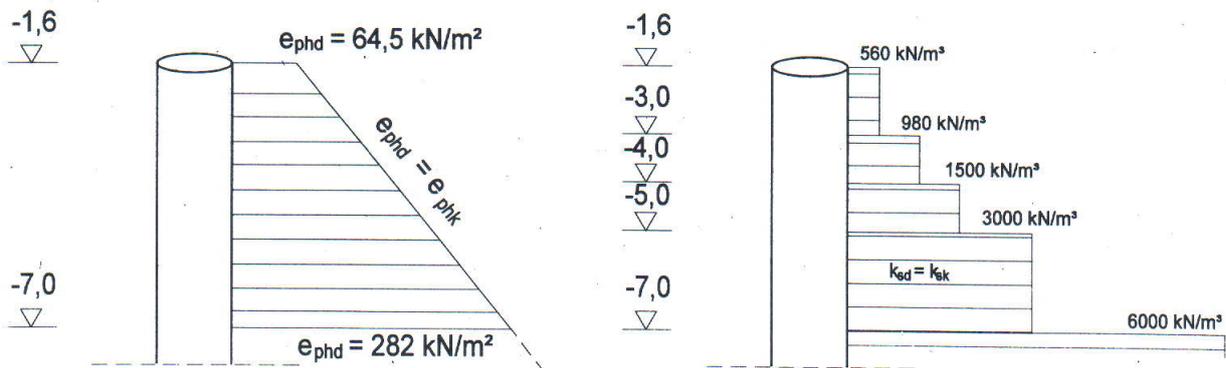
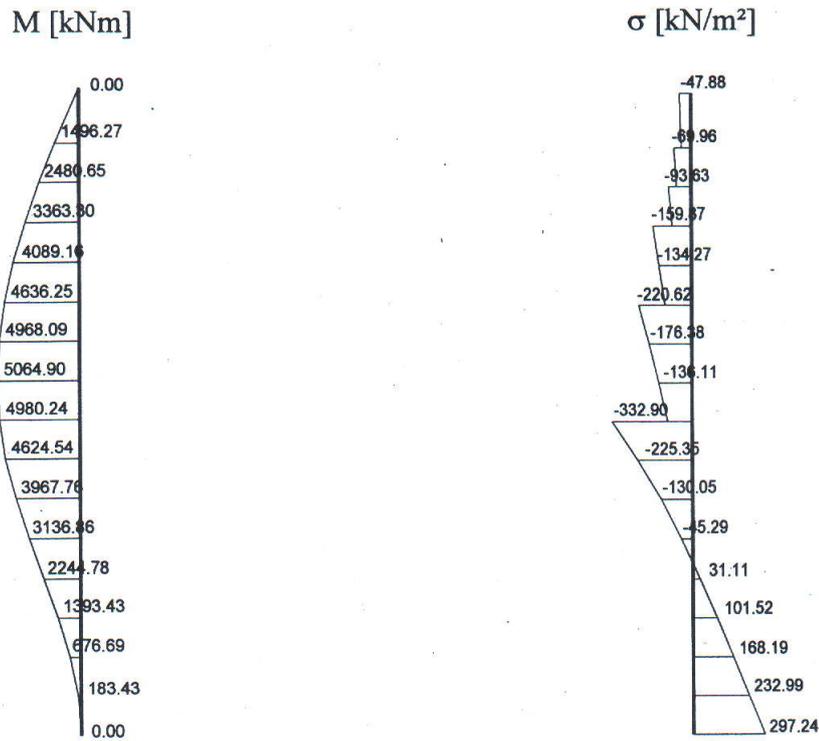


Bild 9: Berechnungsergebnisse nach Aufgabenstellung und modifizierte Randbedingungen

a) Berechnungsergebnisse für charakteristische Einwirkungen



b) Berechnungsergebnisse für Bemessungseinwirkungen (GZ 1B mit $\gamma_{Gsup} = 1,35$ und $\gamma_Q = 1,50$)

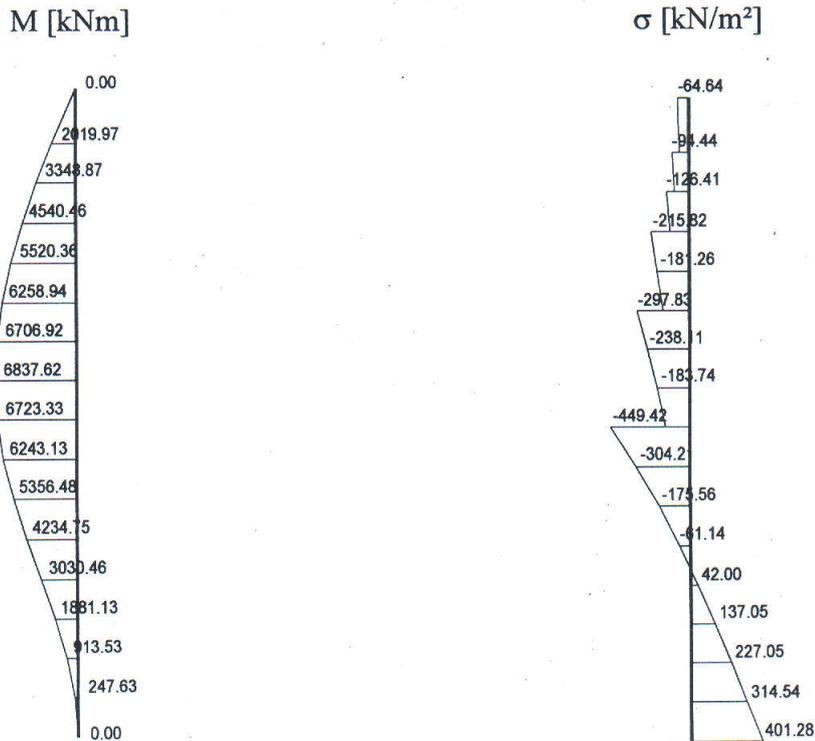


Bild 10: Berechnungsergebnisse mit abgemindertem Bettungsmodul

6 Vergleichende Berechnung einer Bohrpfahlgründung auf der Grundlage von Pfahlprobebelastungen

6.1 Aufgabenstellung und Probebelastungsergebnisse

Die Aufgabenstellung ist wiederum das Widerlager nach Abschnitt 5.1 mit den dort genannten Vorgaben. Die Einzelpfahlwiderstände sollen in diesem Abschnitt vergleichend aus zwei Pfahlprobebelastungen (Umbau Hbf Düsseldorf) ermittelt werden, die in *Kempfert (1982)* beschrieben sind. Dabei wurden hier vereinfachend gleiche Pfahllängen der beiden Versuchspfähle vorausgesetzt sowie die Pfahlprobebelastungsergebnisse nach dem Hyperbelverfahren auf eine Setzung von $s = 15$ cm extrapoliert.

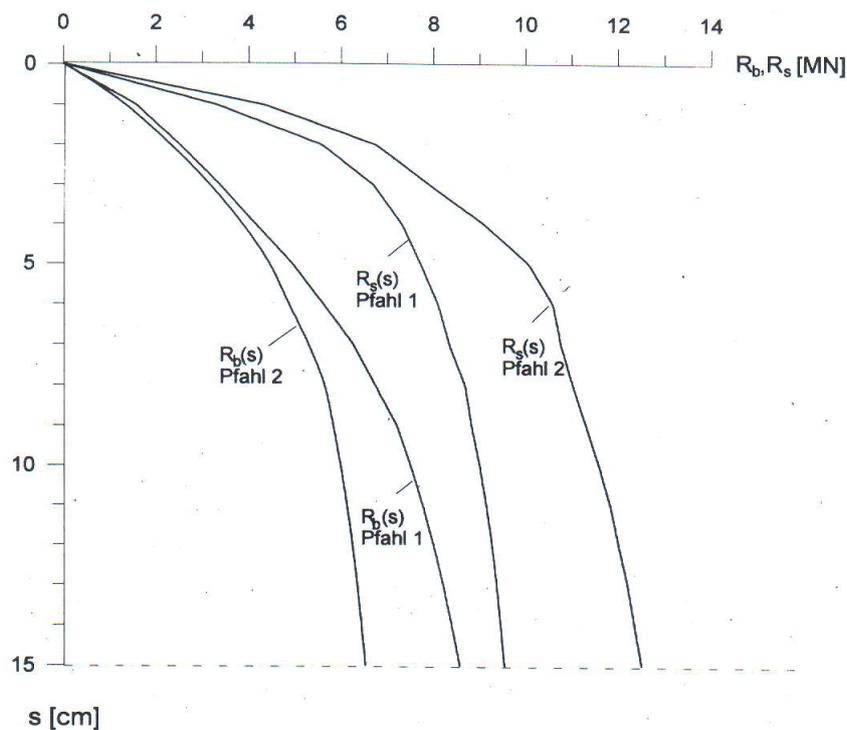


Bild 11: Pfahlprobebelastungsergebnisse der beiden Versuchspfähle getrennt in Pfahlfuß- und Pfahlmantelwiderstand

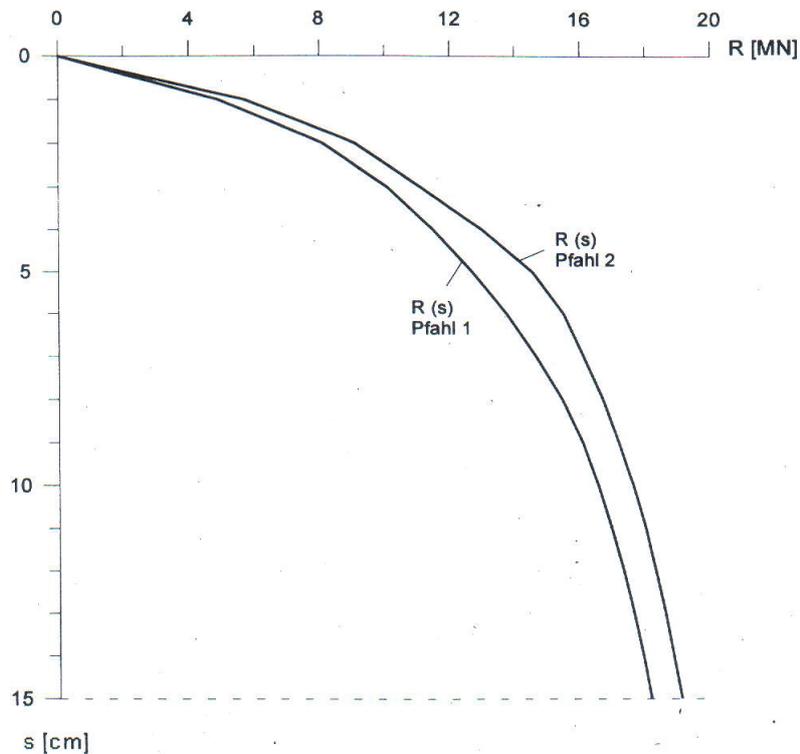


Bild 12: Widerstandssetzungslinie der beiden Versuchspfähle

6.2 Axiale Bohrpfahltragfähigkeit und Pfahlanzahl nach der herkömmlichen Methode (DIN 4014/1054 alt)

6.2.1 Tragfähigkeit des Einzelpfahls

a) Bruchzustand

Nach DIN 1054 darf für die Grenzlast der Mittelwert aus den Probelastungen genommen werden, sofern der kleinste und der größte Wert nicht mehr als 30 % vom Mittelwert abweichen. Als Sicherheit darf $\eta = 1,75$ angesetzt werden.

$$Q_g = (Q_{g1} + Q_{g2})/N = (18,1598 + 19,0800)/2 = 18,6199 \text{ MN}$$

$$\text{zul } Q = Q_g/\eta = 18,6199/1,75 = \underline{10,640 \text{ MN}}$$

b) Gebrauchszustand

Aus der WSL in Bild 12 aus Abschnitt 6.1 für $s_2 = 3 \text{ cm}$ ergibt sich (Mittelwert):

$$s = 3 \text{ cm} \Rightarrow \text{zul } Q = \underline{10,610 \text{ MN}}$$

\Rightarrow b) maßgebend

6.2.2 Pfahlanzahl

$$n = V/\text{zul } Q = 48/10,610 = 4,5$$

gewählt: 5 Pfähle

6.3 Axiale Bohrpfahltragfähigkeit und Pfahlanzahl nach ENV 1997-1 (EC7)

6.3.1 Grenzzustand der Tragfähigkeit des Einzelpfahls nach Fall 1C

a) bezogen auf den Mittelwert von R_{cm}

$$R_{bm} = (8,5940 + 6,5508)/2 = 7,5724 \text{ MN}$$

$$R_{sm} = (9,5658 + 12,5292)/2 = 11,0475 \text{ MN}$$

$$R_{ck} = R_{cm}/\xi = R_{bm}/\xi + R_{sm}/\xi = 7,5724/1,35 + 11,0475/1,35 = 13,7925 \text{ MN}$$

$$R_{ck} = R_{bk} + R_{sk} = 5,6092 \text{ MN} + 8,1833 \text{ MN}$$

$$R_{cd} = R_{bk}/\gamma_b + R_{sk}/\gamma_s = 5,6092/1,6 + 8,1833/1,3 = \underline{9,801 \text{ MN}}$$

b) bezogen auf den Kleinstwert von R_{cm} (Pfahl 1)

$$R_{ck} = R_{cm}/\xi = R_{bm}/\xi + R_{sm}/\xi = 8,5940/1,25 + 9,5658/1,25 = 14,5278 \text{ MN}$$

$$R_{ck} = R_{bk} + R_{sk} = 6,8752 \text{ MN} + 7,6526 \text{ MN}$$

$$R_{cd} = R_{bk}/\gamma_b + R_{sk}/\gamma_s = 6,8752/1,6 + 7,6526/1,3 = \underline{10,184 \text{ MN}}$$

⇒ a) maßgebend

6.3.2 Nachweis des Grenzzustandes der Tragfähigkeit in der aufgehenden Konstruktion nach Fall 1B

Grundlagen und Annahmen siehe Abschnitt 5.3.2.

a) bezogen auf den Mittelwert von R_{cm} ($\Delta s = 1 \text{ cm}$, $s = 3 \text{ cm}$)

$$R_{bm} = (3,3807 + 3,1683)/2 = 3,2745 \text{ MN}$$

$$R_{sm} = (6,7193 + 7,9517)/2 = 7,3355 \text{ MN}$$

$$R_{ck} = R_{cm}/\xi = R_{bm}/\xi + R_{sm}/\xi = 3,2745/1,35 + 7,3355/1,35 = 7,8593 \text{ MN}$$

$$R_{ck} = R_{bk} + R_{sk} = 2,4256 \text{ MN} + 5,4337 \text{ MN}$$

$$R_{cd} (s=3\text{cm}) = R_{bk}/\gamma_b + R_{sk}/\gamma_s = 2,4256/1,6 + 5,4337/1,3 = \underline{5,696 \text{ MN}}$$

b) bezogen auf Kleinstwert von R_{cm} ($\Delta s = 1 \text{ cm}$, $s = 3 \text{ cm}$)

$$R_{ck} = R_{cm}/\xi = R_{bm}/\xi + R_{sm}/\xi = 3,3807/1,25 + 6,7193/1,25 = 8,0800 \text{ MN}$$

$$R_{ck} = R_{bk} + R_{sk} = 2,7046 \text{ MN} + 5,3754 \text{ MN}$$

$$R_{cd} (s=3\text{cm}) = R_{bk}/\gamma_b + R_{sk}/\gamma_s = 2,7046/1,6 + 5,3754/1,3 = \underline{5,825 \text{ MN}}$$

⇒ a) maßgebend

6.3.3 Nachweis des Grenzzustandes der Gebrauchstauglichkeit nach Fall 2

Grundlagen und Annahmen siehe Abschnitt 5.3.3.

a) bezogen auf den Mittelwert von R_{cm} ($s = 3 \text{ cm}$)

$$R_{cd} (s=3\text{cm}) = \underline{7,8593 \text{ MN}}$$

b) bezogen auf Kleinstwert von R_{cm} ($s = 3 \text{ cm}$)

$$R_{cd} (s=3\text{cm}) = \underline{8,0800 \text{ MN}}$$

⇒ a) maßgebend

6.3.4 Pfahlanzahl

a) Grenzzustand der Tragfähigkeit (Fall 1C):

$$\Sigma F_{cd} = G_k \cdot \gamma_k + Q_k \cdot \gamma_Q = 30 \cdot 1,0 + 18 \cdot 1,3 = 53,4 \text{ MN}$$

$$\underline{\underline{\text{Pfahlanzahl } n = 53,4/9,801 = 5,5 = 6 \text{ Pfähle}}}$$

b) Grenzzustand der Tragfähigkeit in der aufgehenden Konstruktion (Fall 1B):

$$\Sigma F_{cd} = G_k \cdot 1,35 + Q_k \cdot 1,5 = 67,5 \text{ MN}$$

$$\underline{\text{Pfahlanzahl } n = 67,5/5,696 = 11,9 = 12 \text{ Pfähle}}$$

- c) Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (Fall 2)

$$\Sigma F_{cd} = G_k \cdot 1,0 + Q_k \cdot 1,0 = 48 \text{ MN}$$

$$\underline{\text{Pfahlanzahl } n = 48/7,8593 = 6,1 = 7 \text{ Pfähle}}$$

6.4 Axiale Bohrpfahltragfähigkeit und Pfahlanzahl nach DIN V 1054-100

6.4.1 Grenzzustand der Tragfähigkeit des Einzelpfahls nach GZ 1B

- a) bezogen auf den Mittelwert von R

$$R_{1k} = (18,1598 + 19,0800)/2 = 18,6199 \text{ MN}$$

$$R_{1d} = \eta \cdot R_{1k} / \gamma_P = 1,10 \cdot 18,6199 / 1,40 = \underline{14,6299 \text{ MN}}$$

- b) bezogen auf den Kleinstwert von R

$$R_{1d} = \eta \cdot R_{1k} / \gamma_P = 1,20 \cdot 18,1598 / 1,40 = \underline{15,5655 \text{ MN}}$$

⇒ a) maßgebend

6.4.2 Nachweis des Grenzzustandes der Tragfähigkeit in der aufgehenden Konstruktion nach GZ 1B

Grundlagen und Annahmen siehe Abschnitt 5.4.2.

Aus den WSL in Bild 12 aus Abschnitt 6.1 für $\Delta s = 1 \text{ cm}$, $s = 3 \text{ cm}$ ergibt sich (Mittelwert):

$$R_{1B,d} = \underline{10,610 \text{ MN}}$$

6.4.3 Nachweis des Grenzzustandes der Gebrauchstauglichkeit nach GZ 2

Für $s_2 = 3 \text{ cm}$ ergibt sich aus Bild 12 (Mittelwert):

$$R_{2d} = \underline{10,610 \text{ MN}}$$

6.4.4 Pfahlanzahl

- a) Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZ 1B):

$$S_{1d} = G_k \cdot \gamma_{Gsup} + Q_k \cdot \gamma_{Qsup} = 30 \cdot 1,35 + 18 \cdot 1,5 = 67,5 \text{ MN}$$

$$\underline{\text{Pfahlanzahl } n = 67,5/14,6299 = 4,6 = 5 \text{ Pfähle}}$$

- b) Grenzzustand der Tragfähigkeit in der aufgehenden Konstruktion (GZ 1B):

$$S_{1B,d} = G_k \cdot 1,35 + Q_k \cdot 1,5 = 67,5 \text{ MN}$$

$$\underline{\text{Pfahlanzahl } n = 67,5/10,610 = 6,4 = 7 \text{ Pfähle}}$$

- c) Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZ 2)

$$s_{2d} = G_k \cdot 1,0 + Q_k \cdot 1,0 = 48 \text{ MN}$$

$$\underline{\text{Pfahlanzahl } n = 48/10,6100 = 4,5 = 5 \text{ Pfähle}}$$

6.5 Zusammenstellung der erforderlichen Pfahlanzahl für die Widerlagergründung

Grundlage	Pfahltragfähigkeit Anzahl Pfähle	Tragfähigkeit aufg. Konstruktion Anzahl Pfähle	Gebrauchstauglichkeit Anzahl Pfähle
DIN 4014/1054 alt	<u>5</u>	5	<u>5</u>
ENV 1997-1,(EC7)	6	<u>12</u>	7
DIN V 1054-100	<u>5</u>	<u>7</u>	5

7 **Schlußfolgerungen und Ausblick**

Die vergleichenden Bemessungsbeispiele haben gezeigt, daß die neuen Regelungen, gemessen an der bisherigen Vorgehensweise, bei der Berechnung von Pfahlgründungen teilweise noch sehr inhomogene Ergebnisse liefern. Im einzelnen sind dies:

a) Berechnung nach ENV 1997-1:

- Durch das Verschieben der gemessenen Widerstands-Setzungslinie (WSL) mit den $\xi \cdot \gamma$ -fachen Werten als Divisor ergeben sich für den Nachweis der Pfahltragfähigkeit im Fall 1C und für den Nachweis der Tragfähigkeit in der aufgehenden Konstruktion im Fall 1B teilweise sehr ungünstige (unwirtschaftliche) Ergebnisse.
- Die Belegung der gemessenen WSL mit dem ξ -fachen Wert als Divisor zur Umwandlung in die charakteristische WSL führt auch beim Nachweis der Gebrauchstauglichkeit im Fall 2 gegenüber der bisher üblichen Vorgehensweise i. d. R. zu unwirtschaftlichen Ergebnissen.

b) Berechnung nach DIN V 1054-100:

Für die Nachweise der Pfahltragfähigkeit nach GZ 1B und GZ 2 ergeben sich gegenüber der bisherigen Vorgehensweise (z. B. nach DIN 4014) identische Ergebnisse. Lediglich der Nachweis der Tragfähigkeit in der aufgehenden Konstruktion nach GZ 1B liefert je nach Annahmen über die wirksame Zwängungsbeanspruchung aus Setzungsdifferenzen Δs inhomogene Ergebnisse gegenüber den bisher gewohnten.

Zusammenfassend ergibt sich daraus folgender Handlungsbedarf für die Überarbeitung der vorliegenden neuen Normen auf der Grundlage des Teilsicherheitskonzeptes für das Thema Pfahlgründungen:

- Der Nachweis der Tragfähigkeit in der aufgehenden Konstruktion nach 1B ist eine Boden-Bauwerk-Interaktion. Dafür müssen praktikable und standardisierte Berechnungsvorgaben für die Bemessungspraxis erarbeitet werden. Dieser Nachweis war bei der bisherigen Vorgehensweise nach den alten Normen i. d. R. durch den Nachweis einer zulässigen Setzung mit abgedeckt.
- Die Faktoren ξ nach Tabelle 7.1 und 7.3 der ENV 1997-1 zur Umwandlung von Meßwerten z. B. aus der Pfahlprobelastung in charakteristische Pfahlwiderstände, die die Veränderlichkeit des Baugrundes und Herstellungseinflüsse auf die Pfahlwiderstände abdecken sollen, sind deutlich zu hoch.
- Die Teilsicherheitsbeiwerte nach Tabelle 7.2 der ENV 1997-1 für Bohrpfähle sind gegenüber mit durchgehender Bohrschnecke gebohrten Pfählen zu schlecht bewertet.

- Es muß insbesondere für die Anwendung in ENV 1997-1 die Behandlung der nationalen Erfahrungswerte für Pfahlspitzendruck und Mantelreibung (Anhänge zur DIN V 1054-100) präzisiert werden. Müssen sie durch $\xi = 1,5$ dividiert werden? Des Weiteren sollte geregelt werden, wie dynamische Pfahlprobelastungsergebnisse sicherheitstechnisch bei der Bemessung umzusetzen sind.

8 Literatur

- ENV 1991-1 (EC1):* Basis of Design and Actions on Structures, Part 1: Basis of Design
- ENV 1997-1 (EC7):* Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik, Teil 1: Allgemeine Regeln, 1995
- Franke, E.:* Verbesserung der Genauigkeit der Tragfähigkeitsangaben für Ramm- bzw. Verdrängungspfähle im Zuge der Neubearbeitung der DIN 4026 unter Berücksichtigung von EC7. Forschungsber. im Auftrag des Instituts für Bautechnik. TH Darmstadt 1991
- Kempfert, H.-G.:* Vergleichende Auswertung von Probelastungen der DB an Großbohrpfählen in nichtbindigem Untergrund. Geotechnik 1982/1, S. 23-32
- Schenck, W.:* Abschnitt „Pfahlgründungen“ im Grundbautaschenbuch, 2. Aufl., Ernst & Sohn, Berlin 1966.