

Bemessung und Nachweis von Pfählen

Karl Josef Witt

1 Grundlagen

1.1 Regelwerke

Derzeit sind die Bemessung und die geotechnischen Nachweise für Pfähle und Pfahlgründungen in den Normen DIN 1054 (zul. Belastung, Sicherheit), DIN 4014 (Bohrpfähle), DIN 4026 (Ramppfähle) und in DIN 4128 (Verpreßpfähle mit kleinem Durchmesser) geregelt. Mit der Herstellung von Pfählen befassen sich in VOB Teil C DIN 18 301 (Bohrarbeiten) und DIN 18 304 (Rammarbeiten).

Mit der Einführung des Teilsicherheitskonzeptes wurden auch die Pfahlnormen überarbeitet. Sowohl ENV 1997-1 (EC7) als auch DIN V 1054-100 behandeln Pfähle gesondert. ENV 1997-1 regelt für Bohr- und Ramppfähle unter Zug-, Druck-, und Querbelastung das Nachweisverfahren, die Grenzzustände, die Teilsicherheitsbeiwerte und gibt Hinweise zur Überwachung und zur Bauausführung. In DIN V 1054-100 wird der Nachweis der axialen Tragfähigkeit wesentlich ausführlicher behandelt als bisher, Grenzzustände und Teilsicherheitsbeiwerte werden angegeben. In Anhang D sind die aus DIN 4014 bekannten Erfahrungswerte für die axialen charakteristischen Pfahlwiderstände (Mantelreibung und Spitzendruck), abgestimmt auf die Teilsicherheitsbeiwerte, angegeben. Neu sind die in Anhang E und F gegebenen Erfahrungswerte für Pfahlwiderstände bei Ramm- und Verpreßpfählen. Anhang E ersetzt dabei die teils unbefriedigenden Tabellenwerte in DIN 4026.

Zum Nachweis der inneren Tragfähigkeit von Stahlbeton wird DIN 1045 durch ENV 1992-1 (EC2) ersetzt. Für die Ausführung gilt die europäische Norm des Spezialtiefbaus DIN EN 1536 (Bohrpfähle), DIN EN 12699 (Verdrängungspfähle), außerdem DIN V 4026-500 (Verdrängungspfähle, Herstellung).

1.2 Grenzzustände und Teilsicherheitsbeiwerte

Beim Standsicherheitsnachweis werden die Bemessungswerte von Einwirkung und Widerstand verglichen :

$$R_d - S_d > 0 \quad (1)$$

R_d Bemessungswert der (Pfahl-)Widerstände, hier Mantelreibung und Spitzendruck

S_d Bemessungswert der Einwirkung, hier äußere Einwirkung aus Bauwerkslast, Seitendruck und negativer Mantelreibung

In den Grenzzuständen und in der Definition des Bemessungswertes der Widerstände bei axialer Pfahlbelastung unterscheiden sich ENV 1997-1 und DIN V 1054-100.

| ENV 1997-1 | | DIN V 1054-100 | |
|---|-----------------|---|----------------|
| innere Tragfähigkeit | ⇒ Fall B | innere und äußere Tragfähigkeit | ⇒ GZ 1B |
| äußere Tragfähigkeit (axiale Pfahltragfähigkeit) | ⇒ Fall C | + Betrachtung der Lastfälle | |
| | | Nachweis der Gebrauchstauglichkeit (Verträglichkeit der Verformungen | ⇒ GZ 2 |

Tabelle 1: Maßgebende Grenzzustände

Die für die Nachweise relevanten Teilsicherheitsbeiwerte sind in den Tabellen 2 bis 4 zusammengestellt.

| ENV 1997-1 (EC7) | Fußwiderstand | Mantelwiderstand | Gesamtwiderstand |
|--------------------------|---------------|------------------|------------------|
| | γ_b | γ_s | γ_t |
| Ramm-,Verdrängungspfähle | 1,30 | 1,30 | 1,30 |
| Bohrpfähle | 1,60 | 1,30 | 1,50 |
| Schneckenbohrpfähle | 1,45 | 1,30 | 1,40 |

Tabelle 2: Teilsicherheitsbeiwerte für axiale Pfahlwiderstände ENV 1997-1

| DIN V 1054-100 GZ 1B | Symbol | LF1 | LF2 | LF3 |
|----------------------------------|------------|------|-----|------|
| Einzelpfahl, Druck u. Zug, axial | γ_P | 1,40 | 1,2 | 1,10 |

Tabelle 3: Teilsicherheitsbeiwerte für axiale Pfahlwiderstände DIN V 1054-100

| Einwirkung bei Fall bzw.GZ | ENV 1997-1 | | | DIN V 1054-100 | | |
|----------------------------|-----------------|----------|-----------------|----------------|------|------|
| | Symbol | γ | Symbol | LF1 | LF2 | LF3 |
| 1B | | | | | | |
| 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 |
| Seitendruck, ständig | | | γ_H | 1,35 | 1,20 | 1,00 |
| Mantelreibung, ständig | | | γ_M | 1,35 | 1,20 | 1,00 |
| 1C | | | | | | |
| ständige Einwirkungen | | | | | | |
| -ungünstig | γ_G | 1,00 | γ_G | 1,00 | 1,20 | 1,00 |
| -günstig | γ_G | 1,00 | | | | |
| Flüssigkeitsdruck | | | γ_F | 1,35 | 1,20 | 1,00 |
| veränderliche Einwirkungen | | | | | | |
| -ungünstig | γ_Q | 1,30 | γ_{Qsup} | 1,30 | 1,20 | 1,00 |
| Seitendruck, ständig | | | γ_H | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| Mantelreibung, ständig | | | γ_M | 1,00 | 1,00 | 1,00 |

Tabelle 4: Relevante Teilsicherheitsbeiwerte der Einwirkung

2 Nachweis der äußeren Tragfähigkeit des Einzelfahls

2.1 Nachweisverfahren für Pfahlwiderstände

Die äußere Tragfähigkeit wird analog zu DIN 4014 nachgewiesen. Die axialen Pfahlwiderstände Mantelreibung und Spitzendruck erhält man aus

- statischen Probelastungen
- empirischen oder analytischen Berechnungsverfahren, deren Zuverlässigkeit nachgewiesen ist oder aus
- dynamischen Probelastungen, die durch Prüfung mit statischen Probelastungen abgesichert sind.

DIN V 1054-100 gibt in Anhang D (Bohrpfähle), Anhang E (gerammte Verdrängungspfähle) und in Anhang F (Verpreßpfähle) charakteristische Erfahrungswerte für Mantelreibung und Spitzendruck bzw. charakteristische Pfahlwiderstände an. Die Bezeichnungen sind beispielhaft für den Einzelfahl in Bild 1 veranschaulicht.

2.2.1 Nachweis der äußeren Tragfähigkeit nach ENV 1997-1 (EC7)

Der Nachweis der Tragfähigkeit ist für alle Lastfälle und Lastkombinationen erfüllt, wenn

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

F_{cd} Bemessungswert der axialen Pfahldruckkraft (Einwirkung, Fall C)

R_{cd} Bemessungswert der Summe aller Komponenten der axialen Pfahlwiderstände

Die Bemessungswerte werden mithilfe der Teilsicherheitsbeiwerte der Tab. 2 aus den charakteristischen Pfahlwiderständen gebildet, die aus einer Probelastung oder aus Berechnungsverfahren bzw. aus dynamischen Versuchen abgeleitet werden. Die Abminderungsfaktoren bei Probelastungen sind in ENV 1997-100 Abschnitt 7.6.3.2 , Tab.7.1 angegeben.

Der Bemessungswert der Tragfähigkeit ergibt sich dann zu

$$R_{ck} = R_{bk} + R_{sk} \quad (3)$$

R_{ck} charakteristischer Druckpfahlwiderstand

R_{bk} charakteristischer Pfahlfußwiderstand aus Spitzendruck

R_{sk} charakteristischer Pfahlmantelwiderstand aus Mantelreibung

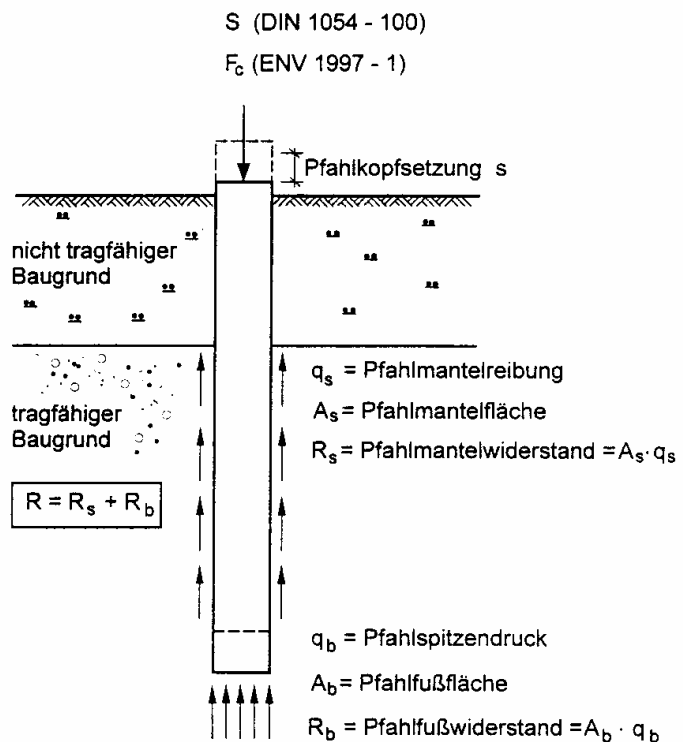


Bild1: Einwirkung und Pfahlwiderstände am Einzelfahl

Der Bemessungswiderstand (Bemessungswert der Tragfähigkeit) R_{cd} ergibt sich durch Division der charakteristischen Widerstände nach Tabelle 2 zu

$$R_{cd} = \frac{R_{bk}}{\gamma_b} + \frac{R_{sk}}{\gamma_s} \quad (4)$$

Sofern Fuß- und Mantelwiderstand als Gesamtwiderstand R_{ck} ermittelt werden zu

$$R_{cd} = \frac{R_{ck}}{\gamma_t} \quad (5)$$

2.2.2 Nachweis der äußeren Tragfähigkeit nach DIN V 1054-100

Beim Nachweis nach DIN V 1054-100 wird analog zu DIN 4084 (1976) verfahren, wobei lediglich die geänderte Schreibweise angewendet wird. Der Nachweis ist erfüllt, wenn gilt:

$$R_{1d} - S_{1d} \geq 0 \quad (6)$$

S_{1d} Bemessungswert der axialen Pfahldruckkraft (Einwirkung, GZ 1B)

R_{1d} Bemessungswert der Summe aller Komponenten der axialen Pfahlwiderstände

$$R_{1d} = \frac{\eta R_{1k}}{\gamma_P} \quad (7)$$

$$R_{1k} = R_{bk}(s_1) + R_{sk}(s_1) \quad (8)$$

$$\eta = \eta_N(\text{Anzahl der Probelastungen}) \cdot \eta_Z(\text{zyklische Einwirkung}) \quad (9)$$

R_{1k} charakteristischer axialer Pfahlwiderstand, bestehend aus

$R_{bk}(s_1)$ charakteristischer Pfahlfußwiderstand bei der Verschiebung s_1 (GZ 1B)

$R_{sk}(s_1)$ charakteristischer Pfahlmantelwiderstand

η_N, η_Z Anpassungsfaktoren nach Tab. 4 und Tab. F.2 (Anhang F) DIN V 1054-100 zur Berücksichtigung der Anzahl der Probelastungen und zyklischer Beanspruchung. $\eta_N = \eta_Z = 1$ bei Verwendung von Erfahrungswerten und statischer Beanspruchung.

γ_P Teilsicherheitsbeiwert für axiale Pfahlwiderstände nach Tabelle 3

Wird bei der Probelastung GZ 1B aus der tatsächlich gemessenen Widerstands-Setzungs-Linie (WSL) nicht erkennbar, gilt definitionsgemäß

$$s_1 = 0,1 D_F \quad (10)$$

und

$$R_{1k} = R(0,1 D_F) \quad (11)$$

Zur Festlegung der Pfahlwiderstände aus Erfahrungswerten bestehen zwei Möglichkeiten:

- Der Baugrundsachverständige gibt charakteristische Werte oder Bemessungswerte aus (abgesicherten) regionalen Erfahrungswerten an
- Erfahrungswerte aus den Tabellen DIN V 1054-100, Anhang D

Die zweite, zu DIN 4014 (86) analoge Vorgehensweise wird im folgenden erläutert. Dabei ist zwischen Bohr-, Verdrängungs-, und Verpreßpfähle zu unterscheiden.

BOHRPFÄHLE

In einem Widerstands-Setzungs-Diagramm wird abhängig von der Setzung des Pfahlkopfes die WSL für den Pfahl aufgetragen (Bild1). Dargestellt wird der setzungsabhängige charakteristische Pfahlfußwiderstand $R_{bk}(s)$, der Mantelwiderstand $R_{sk}(s)$ und als Summe hieraus der Gesamtpfahlwiderstand $R_k(s)$.

Für den Pfahlfußwiderstand $R_{bk}(s_1=s_g)$ ist die Grenzsetzung definiert als

$$s_g = 0,1D \quad \text{bzw.} \quad s_g = 0,1D_F \quad (12)$$

mit D = Pfahl- bzw. D_F =Pfahlfußdurchmesser.

Der Grenzzustand des Pfahlmantelwiderstandes $R_{sk}(s_{sg})$ wird bei der nach Gl (13) empirisch ermittelten Setzung erreicht

$$s_{sg} = 0,5 R_{sk}(s_{sg}) + 0,5 \leq 3cm \quad (13)$$

wobei $R_{sk}(s_{sg})$ in MN einzusetzen ist.

Der charakteristische axiale Pfahlwiderstand ergibt sich zu

$$R_k(s) = R_{bk}(s) + R_{sk}(s) \\ = q_{bk} A_b + \sum q_{sik} A_{si} \quad (14)$$

A_b Nennwert der Pfahlfußfläche

A_{si} Nennwert der Pfahlmantelfläche in der Schicht i

q_{bk} charakteristischer Wert des Pfahlspitzendrucks (Tabellen D1, D2, DIN V 1054-100)

q_{sik} charakteristischer Wert der Pfahlmantelreibung in der Schicht i (Tabellen D3, D4)

Für den Nachweis von Zugpfählen gilt als Grenzhebung anstelle (13) $s_{sg, Zug} = 1,3 s_{sg}$

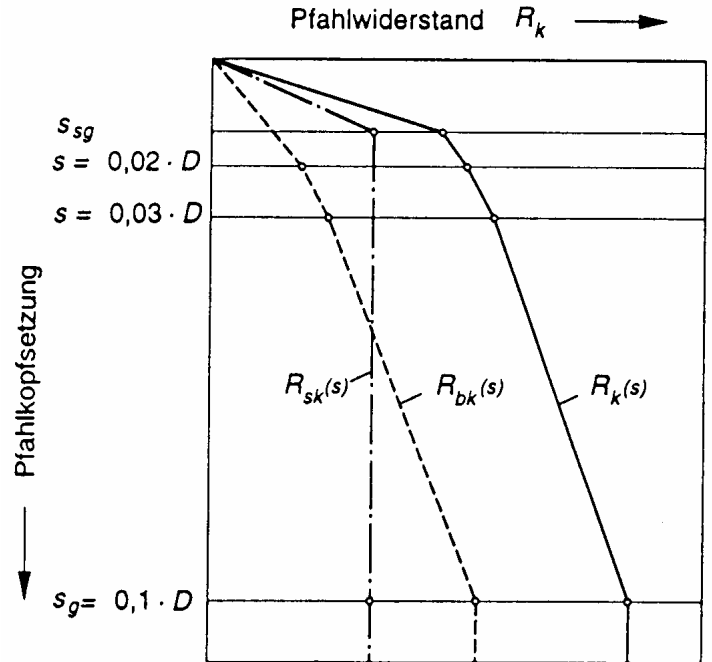


Bild2: Elemente der charakteristischen Widerstands-Setzungs-Linie (WSL)

Tabelle D.1: Pfahlspitzendruck q_{bk} für nichtbindige Böden

| bezogene Pfahlkopfssetzung 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($\cong s_g$) | 2,0 | 3,0 | 3,5 | 4,0 |

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

Tabelle D.2: Pfahlspitzendruck q_{bk} für bindige Böden

| bezogene Pfahlkopfssetzung 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($\cong s_g$) | 0,8 | 1,5 |

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

Tabelle D.3: Pfahlmantelreibung q_{sk} für nichtbindige Böden

| 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.

Tabelle D.4: Pfahlmantelreibung q_{sk} für bindige Böden

| Festigkeit des bindigen Bodens bei einer Scherfestigkeit im undränierten Zustand c_{uk} in MN/m ² | Bruchwert q_{sk} der Mantelreibung in MN/m ² * |
|--|---|
| 0,025 | 0,025 |
| 0,1 | 0,04 |
| ≥ 0,2 | 0,06 |

*) Zwischenwerte dürfen geradlinig interpoliert werden.

Tabellen D1-D5: Erfahrungswerte für den charakteristischen Pfahlspitzendruck (D1,D1, D5)) und die Pfahl-Mantelreibung (D3,D4) für **Bohrpfähle** nach DIN V 1054-100, Anhang D

Tabelle D.5: Bruchwerte (GZ 1B) für Pfahlspitzenruck q_{b1k} und Pfahlmantelreibung q_{s1k} in Fels

| q_{uk} MN/m ² | q_{b1k} MN/m ² | q_{s1k} MN/m ² |
|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 0,5 | 1,5 | 0,08 |
| 5,0 | 5,0 | 0,5 |
| 20 | 10 | 0,5 |

Zwischenwerte dürfen geradlinig interpoliert werden.

Die Werte können in Verbindung mit den Teilsicherheitsbeiwerten nach Tab.2 auch bei der Bemessung nach ENV 1997-1 angewendet werden.

VERDRÄNGUNGSPFÄHLE

In Anhang E der DIN V 1054-100 werden zwei Verfahren zum Nachweis von gerammten Verdrängungspfählen vorgestellt. Bei dem *Verfahren nach E.2* werden analog zur bisherigen Praxis DIN 4026 charakteristische Pfahlwiderstände R_{2k} für Holz- Stahlbeton- und Stahlpfähle in Tabellen angegeben. Der Nachweis betrifft GZ2, der Nachweis der Tragfähigkeit nach GZ 1B ist dabei abgedeckt.

Tab. E.1, E.2: Charakteristische Pfahlwiderstände R_{2k} von gerammten Verdrängungspfählen aus Holz
aus Stahl- und Spannbeton mit quadratischem Querschnitt

| Bohlen den niedrigsten Eintrittswerte in | m | R_{2k} in kN | | | |
|--|-----|----------------|-----|-----|-----|
| | | 12 | 30 | 32 | 30 |
| 2 | - | 300 | 400 | 200 | 600 |
| 4 | 120 | 300 | 300 | 400 | 200 |
| 3 | 100 | 120 | 300 | 300 | 400 |

| Bohlen den niedrigsten Eintrittswerte in | m | R_{2k} in kN | | | |
|--|-----|----------------|-----|-----|-----|
| | | 30 | 32 | 30 | 32 |
| 2 | - | 400 | 220 | 300 | 820 |
| 4 | 320 | 320 | 420 | 600 | 100 |
| 3 | 300 | 320 | 320 | 420 | 220 |

Tabelle E.3: Charakteristische Pfahlwiderstände R_{2k} von geramnten Verdrängungspfählen aus Stahl

| Einbindetiefe in den tragfähigen Boden m | R_{2k} in kN | | | | |
|--|--|-----|--|------------|------------|
| | Stahlträgerprofile ¹⁾ Breite oder Höhe in cm | | Stahlrohrpfähle ²⁾ Stahlkastenpfähle ²⁾ D bzw. a_s in cm ³⁾ | | |
| | 30 | 35 | 35 bzw. 30 | 40 bzw. 35 | 45 bzw. 40 |
| 3 | - | - | 350 | 450 | 550 |
| 4 | - | - | 450 | 600 | 700 |
| 5 | 450 | 550 | 550 | 700 | 850 |
| 6 | 550 | 650 | 650 | 800 | 1000 |
| 7 | 600 | 750 | 700 | 900 | 1100 |
| 8 | 700 | 850 | 800 | 1000 | 1200 |

¹⁾ Breite I-Träger mit Höhe : Breite \approx 1:1 z.B. HEB-Profile
²⁾ Die Tabellenwerte gelten für Pfähle mit geschlossener Spitze. Bei unten offenen Pfählen dürfen 90% der Tabellenwerte angesetzt werden, wenn sich mit Sicherheit innerhalb des Pfahles ein fester Bodenpropfen bildet.
³⁾ D äußerer Durchmesser eines Stahlrohrpfahles bzw. mittlerer Durchmesser eines zusammengesetzten, radialsymmetrischen Pfahles; a_s mittlere Seitenlänge von annähernd quadratischen oder flächeninhaltsgleichen rechteckigen Kastenpfählen

Voraussetzung für die Anwendung der Tabellen E.1 bis E.3:

- Ausreichend tragfähiger nichtbindiger Boden, $q_{ck} \geq 10 \text{ MN/m}^2$
- Annähernd halfeste bindige Böden $c_{uk} \geq 0,1 \text{ MN/m}^2$

Die Werte dürfen bei besonders tragfähigem nichtbindigen Böden ($q_{ck} \geq 15 \text{ MN/m}^2$) sowie bei festen bindigen Böden ($c_{uk} \geq 0,2 \text{ MN/m}^2$) bis zu 25% erhöht werden.

Bei dem Nachweisverfahren nach E.3 wird analog zur Bemessung von Bohrpfählen mit charakteristischen Werten für Pfahlmantelreibung q_{sk} und für Pfahlspitzendruck q_{bk} gearbeitet. Der Gesamtwiderstand wird mit Gl. (14) ermittelt. Es gilt GZ 1B Die charakteristischen Erfahrungswerte sind in Tab E4 angegeben.

Die Anwendung ist auf Pfähle mit Durchmesser, Seitenlängen oder Profilweiten $\leq 0,5 \text{ m}$ beschränkt. Bei nichtbindigem Untergrund gelten bei Drucksondiererergebnissen $q_{ck} \approx 7,5 \text{ MN/m}^2$ die unteren und bei $q_{ck} \approx 15 \text{ MN/m}^2$ die oberen Tabellenwerte

Tabelle E.4: Charakteristische Pfahlspitzendruckspannungen q_{b1k} und Pfahlmantelreibungsspannungen q_{s1k} für den GZ 1B

| Bodenart | Bereich unter Oberfläche tragfähiger Schicht ⁴⁾ in m | mittlere Mantelreibungsspannungen (für abgewinkelten Umfang) q_{s1k} in kN/m ² | | | | Pfhlspitzendruckspannungen (umrissener Umfang des Pfahlfußes) q_{b1k} in MN/m ² | | | |
|---|---|--|------------------|------------------------------------|--------------------|---|------------------|--|----------------------------------|
| | | Holzpfähle | Stahlbetonpfähle | Stahlrohrpfähle Kastenpfähle offen | Stahlträgerprofile | Holzpfähle | Stahlbetonpfähle | Stahlrohrpfähle ³⁾ Kastenpfähle offen ¹⁾ | Stahlträgerprofile ²⁾ |
| | | | | | | | | | |
| nichtbindige Böden | bis 5 | 20-45 | 20-45 | 20-35 | 20-30 | 2-3,5 | 2-5 | 1,5-4 | 1,5-3 |
| | 5-10 | 40-65 | 40-65 | 35-55 | 30-50 | | 3,5-6,5 | 3-6 | 2,5-5 |
| | > 10 | | 60 | 50-75 | 40-75 | 3-7,5 | 4-8 | 3,5-7,5 | 3-6 |
| bindige Böden | | | | | | | | | |
| ⁵⁾ $I_C = 0,5 - 0,75$ | | 5-20 | | | | - | | | |
| ⁵⁾ $I_C = 0,75 - 1$ | | 20-45 | | | | 0-2 | | | |
| Geschiebemergel halbfest bis fest ⁴⁾ | bis 5 | | 50-80 | 40-70 | 30-50 | | 2-6 | 1,5-5 | 1,5-4 |
| | 5-10 | | | 60-90 | 40-70 | | 5-9 | 4-9 | 3-7,5 |
| | > 10 | | 80-100 | 80-100 | 50-80 | | 8-10 | 8-10 | 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_{s1k} ist das die Pfahlänge, für q_{b1k} die Einbindetiefe in die tragfähige Schicht
⁵⁾ I_C nach DIN 18122-1
 Sofern für Geschiebemergel die Konsistenzzahl I_C wegen zu hohem Überkornanteils nicht mehr nach DIN 18122-1 und DIN 4022-11 bestimmt werden kann, ist sie auf der Grundlage örtlicher Erfahrungen einzuschätzen.

VERPRESSPFÄHLE

Falls bei Verpreßpfählen mit $D \leq 0,3$ m keine Probelastung durchgeführt wird, darf der charakteristische Pfahlwiderstand R_{1k} zum Nachweis im GZ 1B nach Gl. 15 mit den Werten der Tabelle F.1 für Druck- und Zugpfähle ermittelt werden.

$$R_{1k} = R_{s1k} = \sum q_{s1k} A_{si} \quad (15)$$

Tabelle F.1: Charakteristische Werte für die Pfahlmantelreibung q_{s1k} bei Verpreßpfählen im Ausnahmefall, daß keine Pfahlprobelastungen ausgeführt werden

| Bodenart | q_{s1k} in MN/m ² |
|------------------------------------|--------------------------------|
| Mittel- und Grobkies ¹⁾ | 0,20 |
| Sand und Kiessand ¹⁾ | 0,15 |
| bindiger Boden ²⁾ | 0,10 |

¹⁾ $D \geq 0,4$ bzw. $q_{ck} \geq 10$ MN/m²
²⁾ $I_C \approx 1,0$ bzw. $c_{uk} \geq 100$ kN/m²

3 Nachweis der Gebrauchstauglichkeit GZ2

Der Nachweis der Gebrauchstauglichkeit ist nach DIN V 1054-100 erfüllt, wenn

$$R_{2d} - S_{2d} \geq 0 \quad \text{mit} \quad R_{2d} = R_{2k} \quad (16)$$

Der Nachweis ist nur zu führen, wenn die Verformung für das Gesamttragwerk von Bedeutung ist. Die charakteristische Setzung s_{2k} wird dem charakteristischen Widerstand des axial belasteten Einzelpfahls R_{2k} über die Ergebnisse der Probelastung oder über die WSL zugeordnet. Regelungen zum Nachweis des GZ2 für Pfahlgruppen finden sich in Abschnitt 10.6.1 der DIN V 1054-100.

4 Pfahlwiderstände quer zur Pfahlachse

Für die Behandlung der Belastung quer zur Pfahlachse gibt ENV 1997-1 nur sehr allgemeine Hinweise. DIN V 1054-100 greift die bisherige Behandlung nach DIN 4014 auf. Die Verteilung längs der Pfahlachse ist in Anhang G erläutert. Während zum Nachweis GZ1B die Pfahlschnittgrößen mit dem (erhöhten) Bemessungswert ermittelt werden, gilt für den Bettungsmodul

$$k_{sd} = k_{sk} \quad (17)$$

Es ist darauf zu achten, daß der Bemessungswert der Einwirkung auf den Boden den Bemessungswert der Erdwiderstandsspannung nicht übersteigt.

5 Beispiel für den Nachweis der Tragfähigkeit, DIN V 1054-100

5.1 Aufgabe

Ein Stützenfundament soll auf 4 Bohrpfählen $\varnothing 60$ cm gegründet werden. Die Belastung und die Baugrundsituation sind in Bild 2 dargestellt.

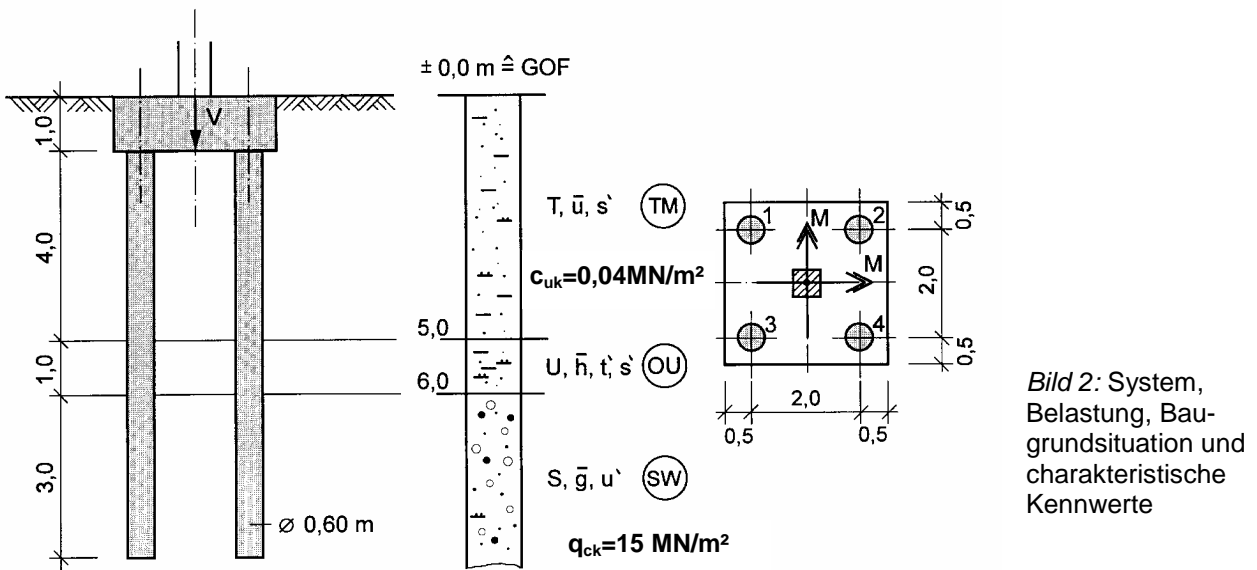


Bild 2: System, Belastung, Baugrundsituation und charakteristische Kennwerte

| Charakteristische Belastung | | Anteil ständig, g | Anteil veränderlich, p |
|---|-------|-------------------|------------------------|
| Vertikallast V | [MN] | 1,00 | 0,10 |
| Momente M _x , M _y | [MNm] | 0,20 | 0,10 |

5.2 Nachweis der Tragfähigkeit des Einzelpfahls

DIN V 1054-100, GZ 1B

Pfahl 4 erhält bei dieser Belastungssituation die größte axiale Einwirkung.

Charakteristische axiale Einwirkung V_k und Bemessungswert V_{1d} für Pfahl 4, GZ 1B:

$$V_k = \frac{V}{4} + \frac{M_x + M_y}{l \cdot 2} = \frac{1,1}{4} + 2 \frac{0,3}{2,0 \cdot 2} = 0,425 \text{ MN}$$

$$V_{1d} = \frac{1}{4} (V_{gk} \cdot \gamma_G \text{ sup} + V_{pk} \cdot \gamma_Q \text{ sup}) + \frac{2}{2l} (M_{gk} \cdot \gamma_G \text{ sup} + M_{pk} \cdot \gamma_Q \text{ sup})$$

$$V_{1d} = 0,25 \cdot (1,0 \cdot 1,35 + 0,1 \cdot 1,5) + 0,5 \cdot (0,2 \cdot 1,35 + 0,1 \cdot 1,5) = 0,38 + 0,21 = 0,585 \text{ MN}$$

Einwirkung aus negativer Mantelreibung (Zersetzung der Torfschicht)

$$P_{sk} = A_s \cdot c_{uk} = d \cdot \pi \cdot l_1 \cdot c_{uk} = 0,6 \cdot \pi \cdot 4 \cdot 0,04 = 0,302 \text{ MN}$$

$$P_{sd} = P_{sk} \cdot \gamma_M = 0,302 \cdot 1,35 = 0,407 \text{ MN}$$

Charakteristische Einwirkung, gesamt

$$S_k = V_k + P_{sk} = 0,425 + 0,302 = 0,727 \text{ MN}$$

Bemessungswert der Gesamteinwirkung

$$S_{1d} = V_{1d} + P_{sd} = 0,585 + 0,407 = 0,992 \text{ MN}$$

Ermittlung der **Pfahlwiderstände** aus Erfahrungswerten, Anhang D DIN V 1054-100

Mit $q_{ck} = 15 \text{ MN/m}^2$ aus Tabelle D.3 Anhang D (SW) $\Rightarrow q_{sk} = 0,12 \text{ MN/m}^2$

Charakteristischer Mantelwiderstand $R_{sk}(s)$

$$R_{sg}(s_{sg}) = U \cdot q_{sk} \cdot t = 0,6 \cdot \pi \cdot 0,12 \cdot 3 = 0,679 \text{ MN}$$

$$s_{sg} = 0,5 \cdot R_{sg}(s_{sg}) + 0,5 < 3 \text{ cm}$$

$$s_{sg} = 0,5 \cdot 0,679 + 0,5 = 0,84 \text{ cm} < 3 \text{ cm}$$

Charakteristischer Pfahlfußwiderstand $R_{bk}(s)$

| s/D | s [cm] | q_{bk}^* [MN/m ²] | $R_{bk}(s)^{**}$ [MN] |
|--------------|-----------|------------------------------------|--------------------------|
| 0,02 | 1,20 | 1,05 | 0,297 |
| 0,03 | 1,80 | 1,35 | 0,382 |
| 0,10 = s_g | 6,00 | 3,00 | 0,848 |

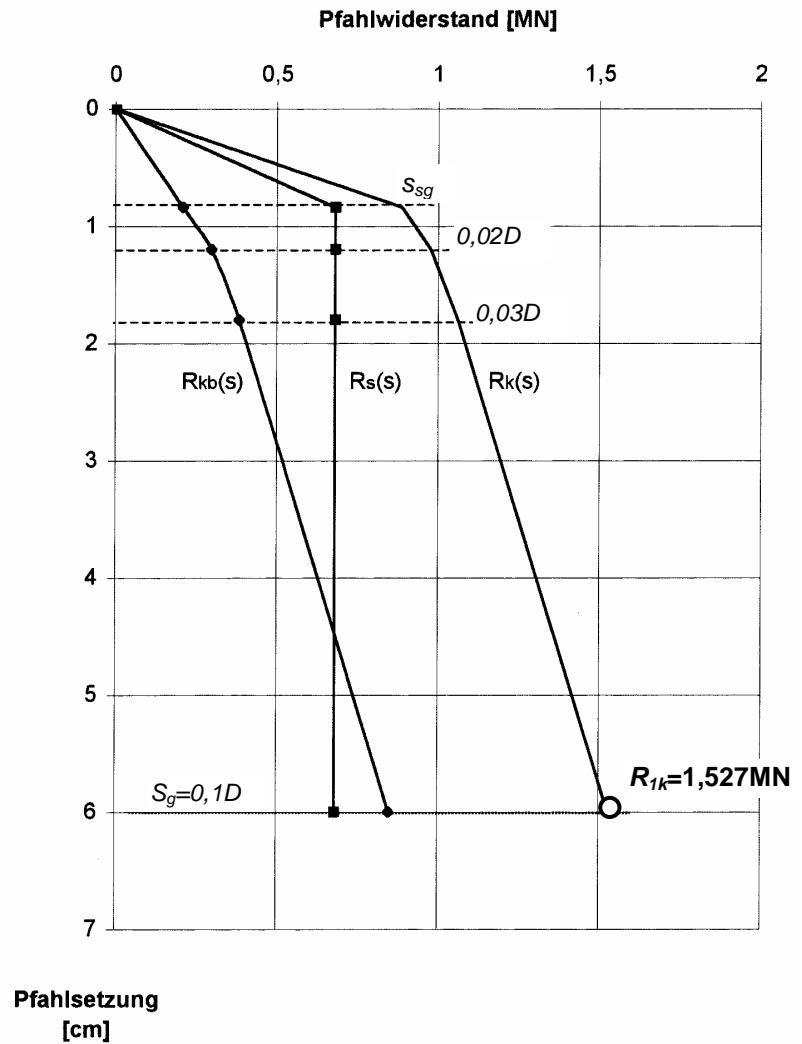
*nach Tab. D.1, DIN V 1054-100

** $A_b = 0,6^2 \pi / 4 = 0,283 \text{ m}^2$

Daten der WSL

| s [cm] | $R_{sk}(s)$ [MN] | $R_{bk}(s)$ [MN] | $R_k(s)$ [MN] |
|-----------|---------------------|---------------------|----------------------------------|
| 0,840 | 0,679 | 0,208 | 0,887 |
| 1,20 | 0,679 | 0,297 | 0,976 |
| 1,80 | 0,679 | 0,382 | 1,061 |
| 6,00 | 0,679 | 0,848 | 1,527=R_{1k} |

Bild 3: Charakteristische Widerstands-Setzungs-Linie



Bemessungswert des axialen Pfwahlwiderstandes

$$R_{1d} = \frac{\eta \cdot R_{1k}}{\gamma_P} = \frac{1,0 \cdot 1,527}{1,4} = 1,091 \text{ MN}$$

η : Berücksichtigung der Anzahl der Probelastungen und der zyklischen Einwirkung nach Gl.(9), hier $\eta=1$

γ_P : Teilsicherheitsbeiwert LF 1 nach Tab. 3

Nachweis der axialen Tragfähigkeit GZ 1B:

$$R_{1d} - S_{1d} = 1,091MN - 0,992MN = 0,099MN > 0$$

Ausnutzungsgrad GZ 1B:

$$\chi_{1d} = \frac{S_{1d}}{R_{1d}} = \frac{0,992}{1,091} = 0,91 \approx 91\%$$

5.3 Nachweis der Gebrauchstauglichkeit nach DIN V 1054-100, GZ 2

Vorgabe des Grenzwertes der Gebrauchstauglichkeit, z. B. $s_{2d} = 1,7 \text{ cm}$

$$R_{2d} = R(s_{2d})$$

$R(1,7\text{cm})$ aus Setzungsberechnung, Probelastung oder näherungsweise aus WSL (Bild3)

$$R_{2d} = R(1,7\text{cm}) \cong 1,047MN$$

$$S_{2d} = V_{2d} + P_{2d} = V_{1k} \cdot 1,0 + P_{1k} \cdot 1,0 = S_{1k} = 0,727MN \quad (\text{Teilsicherheitsbeiwert für GZ2} = 1,0)$$

$$R_{2d} - S_{2d} = 1,047MN - 0,727MN = 0,32MN > 0$$

Ausnutzungsgrad GZ 2:

$$\chi_{2d} = \frac{S_{2d}}{R_{2d}} = \frac{0,727}{1,047} = 0,69 \approx 69\%$$

Alternativ ist der Nachweis der Gebrauchstauglichkeit auch durch Vergleich der verträglichen Setzung s_{2d} mit der Setzung bei der Einwirkung $S_{2d} = S_{1k}$ zu führen.

Sonderdruck. Originalzitat und Quelle:

Witt, K.J., 1998: Bemessung und Nachweis von Pfählen nach dem Teilsicherheitskonzept. Schriftenreihe Geotechnik Heft 1: Geotechnische Nachweise nach dem neuen Sicherheitskonzept, Bauhaus-Universität Weimar

