



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

**Mitteilungen des Institutes und der Versuchsanstalt für Geotechnik
der Technischen Universität Darmstadt**

Herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Rolf Katzenbach

**Vorträge zum 12. Darmstädter Geotechnik-Kolloquium
am 17. März 2005**

Sonderdruck

Negative Mantelreibung bei Pfahlgründungen nach dem Teilsicherheitskonzept

Prof. Dr.-Ing. Hans-Georg Kempfert
Institut für Geotechnik und Geohydraulik, Universität Kassel

Heft 71 · Darmstadt · März 2005



Negative Mantelreibung bei Pfahlgründungen nach dem Teilsicherheitskonzept

Prof. Dr.-Ing. Hans-Georg Kempfert

Institut für Geotechnik und Geohydraulik, Universität Kassel

1 Einleitung

Die Beanspruchung von Pfahlgründungen aus negativer Mantelreibung resultiert bekanntlich aus einer Relativverschiebung zwischen Boden und Pfahl in axialer Richtung. Diese Relativverschiebung wird i.d.R. durch Setzungen einer Weichschicht hervorgerufen, die beispielsweise auf zusätzliche Auflasten, Konsolidationsvorgänge oder Grundwasserspiegelschwankungen zurückgeführt werden können. Dabei hängt sich das Eigengewicht der sich setzenden Bodenschicht sowie der darüber liegenden Schichten an dem Pfahl über Mantelreibung an. Diese Mantelreibung ist entgegengesetzt der Mantelreibung aus Pfahlsetzungen und wird deshalb als negativ bezeichnet. Umgekehrt kann es bei zugverankerten Sohlen auch zur negativen Mantelreibung infolge Hebung des Bodens in der Pfahlumgebung kommen.

Bei dem bisher üblichen globalen Sicherheitskonzept wurde negative Mantelreibung in unterschiedlicher Weise berücksichtigt (Fedders 1977). Übliche Vorgehensweisen waren

- die Abminderung des Pfahlwiderstandes um den erwarteten Betrag der negativen Mantelreibungskraft (reduzierte Pfahltragfähigkeit) oder
- die Erhöhung der Pfahlbelastung um die negative Mantelreibung.

Dies führte zu jeweils unterschiedlichen Globalsicherheitsbeiwerten für die Pfahlgründung.

Nach dem neuen Teilsicherheitskonzept ist die negative Mantelreibung bei Pfahlgründungen eindeutig als eine Einwirkung definiert, die zu einer zusätzlichen Beanspruchung

chungskomponente F_n auf die Pfähle führt. Für die praktischen Nachweise ist dabei zu unterscheiden zwischen den Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit und der Tragfähigkeit, die i. d. R. jeweils von unterschiedlichen Eingangsgrößen bei der negativen Mantelreibung auszugehen haben.

In dem Beitrag ist die Problematik der Nachweisführung nach der neuen DIN 1054:2005-01 bezogen auf das Teilsicherheitskonzept aufgezeigt und die Vorgehensweise für die Grenzzustände GZ 1 und GZ 2 anhand eines Beispiels erläutert. Weitere Hinweise und Beispiele finden sich z. B. in (Kempfert 2005).

2 Neutraler Punkt und Lastfälle

Die Einwirkungen aus negativer Mantelreibung stehen zusammen mit den Einwirkungen auf die Pfähle aus dem Bauwerk und den Pfahlwiderständen aus Pfahlspitzenwiderstand abhängig von den Setzungen im Gleichgewicht. Bild 1 zeigt diesen Zusammenhang für zwei Fälle:

- Bei geringen Beanspruchungen F_a aus den Bauwerkslasten und damit geringer Pfahlsetzung s_a und größerem Beanspruchungsanteil F_n aus negativer Mantelreibung reicht der Einfluss von τ_n tief.
- Umgekehrt führt ein großer Beanspruchungsanteil F_b zu größeren Pfahlsetzungen und damit infolge der Relativverschiebung zwischen Boden und Pfahl bald zur Aktivierung der positiven Mantelreibung q_s .

Die Grenze zwischen rechnerischer positiver und negativer Mantelreibung wird als neutraler Punkt bezeichnet.

In der neuen DIN 1054 wird die negative Mantelreibung als ständige Einwirkung bezeichnet, auch wenn möglicherweise der Einfluss nach Abklingen von Konsolidationssetzungen nicht mehr voll wirksam ist. Die Zuordnung wurde gewählt, um insgesamt für den Grenzzustand GZ 1B die negative Mantelreibung mit dem kleineren Teilsicherheitsbeiwert γ_G für ständige Einwirkungen zu belegen und damit diesen Einwirkungsanteil nicht über zu bewerten.

Unabhängig davon lässt die Norm aber weiteren Interpretationsspielraum offen im Hinblick auf die Einordnung der negativen Mantelreibung in die Lastfälle LF 1 oder LF 2. Eine entsprechende Bewertung sollte dem Sachverständigen für Geotechnik überlassen werden. Weitere Hinweise zu dieser Fragestellung siehe (Kempfert 2005) und Abschnitt 4.

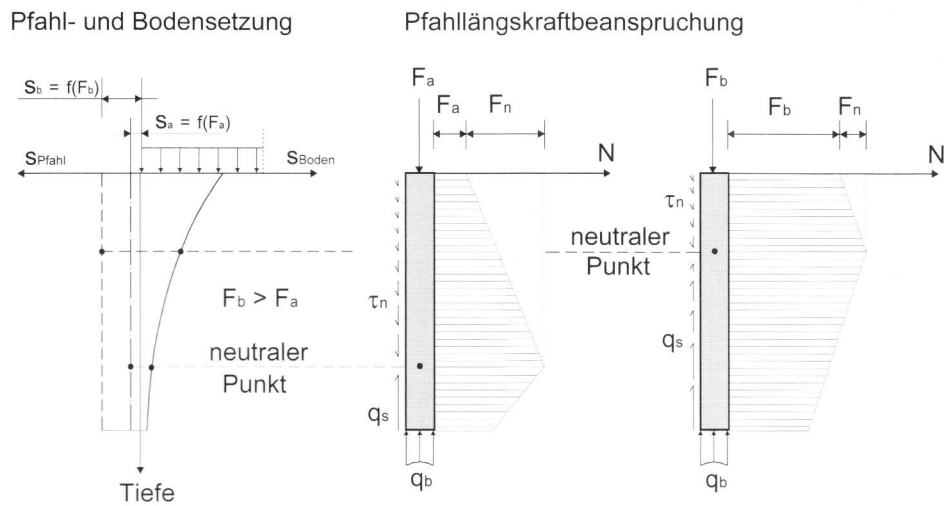


Bild 1 Qualitative Zusammenhänge zwischen Pfahlwiderständen und Beanspruchungen aus Bauwerkslasten und negativer Mantelreibung bei homogenem Baugrund und Definition des neutralen Punktes, aus (Kempfert 2001). Hinweis: dargestellt ist die Änderung der axialen Pfahlbeanspruchung.

3 Ermittlung der charakteristischen Einwirkung aus negativer Mantelreibung

Eine zutreffende Einschätzung der negativen Mantelreibung $\tau_{n,k}$ am Pfahl erfordert die Angabe von

- den Pfahlsetzungen über die Tiefe,
- den Setzungen der Bodenschichten über die Tiefe,
- den Relativverschiebungen und
- ggf. Mobilisierungsfunktionen von $\tau_{n,k}$ und $q_{s,k}$.

DIN 1054:2005-01 enthält Näherungsangaben für die Größe der charakteristischen Werte der negativen Mantelreibung $\tau_{n,k}$ für bindige und nichtbindige Böden.

In der Literatur zur negativen Mantelreibung sind im Wesentlichen zwei Ansätze zur Ableitung der charakteristischen negativen Mantelreibung $\tau_{n,k}$ vorhanden:

- Mit totalen Spannungen für bindige Böden

$$\tau_{n,k} = \alpha \cdot c_{u,k} \quad (1)$$

Dabei ist:

- α ein Faktor zur Festlegung der Größe der charakteristischen negativen Mantelreibung für bindige Böden,
- $c_{u,k}$ der charakteristische Wert der Scherfestigkeit des undränierten Bodens. Die Größenordnung des Faktors α liegt je nach Bodenart und Pfahltyp zwischen 0,15 und 1,60 wobei in Gleichung (24) der DIN 1054:2005-01 näherungsweise $\alpha = 1$ gesetzt wird und diese Beziehung generell für bindigen Boden empfohlen wird.

- Mit effektiven Spannungen für nichtbindige und bindige Böden:

$$\tau_{n,k} = K_0 \cdot \tan \varphi'_k \cdot \sigma'_v = \beta \cdot \sigma'_v \quad (2)$$

Dabei ist:

- σ'_v die effektive Vertikalspannung
- K_0 der Erdruchdruckbeiwert
- φ'_k der charakteristische Wert des Reibungswinkels der nichtbindigen Schicht
- β ein Faktor zur Festlegung der Größe der charakteristischen negativen Mantelreibung für nichtbindige und bindige Böden

Die Größenordnung des Faktors β liegt je nach Bodenart nach den Angaben in der Literatur zwischen 0,1 und 1,0. Häufig wird für nichtbindige Böden $\beta = 0,25$ bis $0,30$ verwendet.

Weitergehende und differenziertere Angaben zu den Werten α und β finden sich z. B. in (Kempfert 2001).

Eine nichtbindige Auffüllung über einer Weichschicht kann rechnerisch zu sehr großen Pfahlbeanspruchungen aus negativer Mantelreibung führen, daher ist die resultierende charakteristische Beanspruchung nicht größer als das Gewicht dieser Schicht anzusetzen. Diese Regelung ist aber nur sinnvoll für in einer Gruppe eng stehende Pfähle.

Der Einfluss der negativen Mantelreibung reicht bis zum neutralen Punkt. In Wirklichkeit tritt eine Übergangszone von negativer und positiver Mantelreibung auf, wobei der Wechsel als linear angenommen wird. Sie wird in (Fellenius 1972) als neutrale Ebene bezeichnet. Innerhalb dieser Übergangszone ist demnach die Mantelreibung nicht voll mobilisiert. Die Länge der Zone der „neutralen Ebene“ nach Bild 2 ist von der Relativverschiebung zwischen Pfahl und Boden abhängig. Je geringer der Winkel α zwischen den sich schneidenden Setzungskurven ist, desto größer ist die Übergangszone von negativer zu positiver Mantelreibung.

Der neutrale Punkt darf für praktische Berechnungsaufgaben näherungsweise ohne Übergangszone zwischen τ_n und q_s angenommen werden. Die größte Beanspruchung des Pfahles in axialer Richtung tritt jeweils in diesem Punkt auf, da die Gesamtlast durch die ebenfalls nach unten gerichteten Einwirkungen aus negativer Mantelreibung erhöht wird und bis zu diesem Punkt keine Lastabtragung in den Boden stattfindet, da hier kein Pfahlwiderstand mobilisiert wird. Weiterhin stimmen die Setzungen des Pfahls mit den Setzungen des umgebenden Bodens im neutralen Punkt überein.

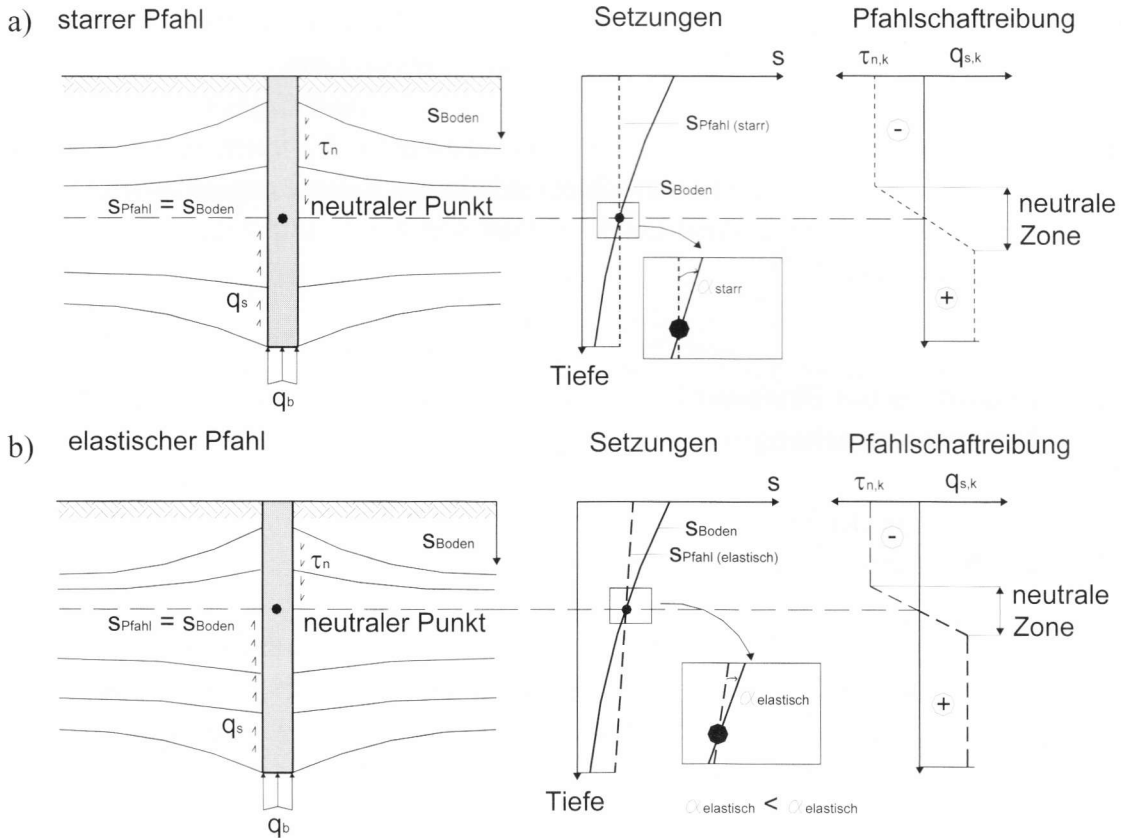


Bild 2 Modellvorstellung zur negativen Mantelreibung und Aktivierung der Pfahlschaftreibung in Abhängigkeit des Schnittwinkels α der Setzungskurven bei einem a) starren Pfahl bzw. b) elastischen Pfahl, nach (Fellenius 1972), aus (Kempfert 2004)

Der neutrale Punkt liegt bei Spitzenwiderstandspfählen in der Nähe des Pfahlfußes. Für einen langen Reibungspfahl liegt der neutrale Punkt dagegen häufig oberhalb der Pfahlmitte.

Für die Bestimmung der Tiefenlage des neutralen Punktes im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZ 2) und somit der Größe der charakteristischen Einwirkung $F_{n2,k}$ wird empfohlen, die Verformungen des den Pfahl umgebenden Bodens, i.d.R. für den Endzustand, also unter Berücksichtigung von Konsolidations- und

Kriechverformungen s_n , mit charakteristischen Größen zu bestimmen. Ein Verformungsvergleich von s_2 mit den Setzungen der umgebenden Weichschicht s_n ergibt die Lage des neutralen Punktes.

Im Grenzzustand der Tragfähigkeit GZ 1B wird zur Ermittlung des neutralen Punktes und somit der Größe der charakteristischen Einwirkung $F_{n1,k}$ empfohlen, die Festlegung der Setzung s_1 des Pfahles im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZ 1) je nach gewählter Pfahltragfähigkeitsermittlung vorzunehmen. Ein Verformungsvergleich von s_1 mit den Setzungen der umgebenden Weichschichten s_n ergibt die Lage des neutralen Punktes für den GZ 1, der in einer anderen Tiefenlage als im GZ 2 liegen kann.

Die abgeschätzten Setzungen der Pfähle im Grenzzustand GZ 1 treten in Wirklichkeit unter den tatsächlich wirkenden Lasten (charakteristischen Einwirkungen) nicht auf. Die Nachweisführung im Grenzzustand GZ 1B erfolgt somit auf Grundlage eines fiktiven Verformungszustandes.

4 Ermittlung der Bemessungsgrößen der Einwirkungen bzw. Beanspruchungen

Bei der Einordnung der Einwirkung aus negativer Mantelreibung in die Lastfälle wird empfohlen diese dem Lastfall LF 1 zuzuordnen wenn:

- die negative Mantelreibung während der gesamten Funktionszeit des Pfahles dauerhaft vorhanden ist, und auch nach Abklingen der Setzungen der Weichschicht in der Pfahlumgebung die verformte Weichschicht als ständige Einwirkung an den Pfählen angehängt bleibt.

Der Lastfall LF 2 wird maßgebend wenn:

- für die negative Mantelreibung als Einwirkungssituation die Definition der Norm zutrifft „... Regelkombination EK 1 (Ständige Einwirkungen) in Verbindung mit Zustand der Sicherheitsklasse SK 2 (... Bauzustände durch Baumaßnahmen neben dem Bauwerk).“ Z.B. könnte eine die negative Mantelreibung erzeugende temporäre Aufschüttung neben einer Pfahlgründung als eine solche Einwirkungssituation eingestuft werden.

Die Bemessungsgrößen ergeben sich zu

$$F_{n1,d} = F_{n1,k} \cdot \gamma_G \quad (3)$$

wobei, abweichend von DIN 1054:2005-01, für den Nachweis der äußeren Standsicherheit im Grenzzustand GZ 1 der Lastfall LF 2 mit $\gamma_G = 1,20$ (entgegen 1,35) empfohlen wird, da Einwirkungen aus negativer Mantelreibung i.d.R. keinen echten äußeren Grenzzustand der Tragfähigkeit hervorrufen können. Bei nichtduktilen Systemen, z.B. Pfählen auf Fels, kann ggf. der LF 1 maßgeblich werden.

Für den Materialnachweis des Pfahlbaustoffes ist wie für Bauwerksgründungen allgemein gefordert, immer mit dem Teilsicherheitsbeiwert γ_G im Lastfall 1 zu rechnen.

5 Berechnungsbeispiel

5.1 Aufgabenstellung

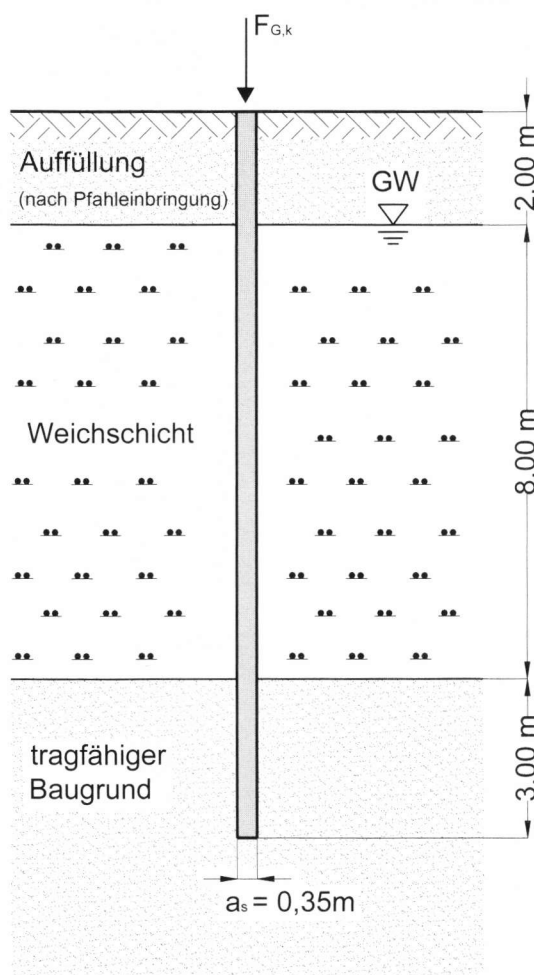


Bild 3 System und Randbedingungen

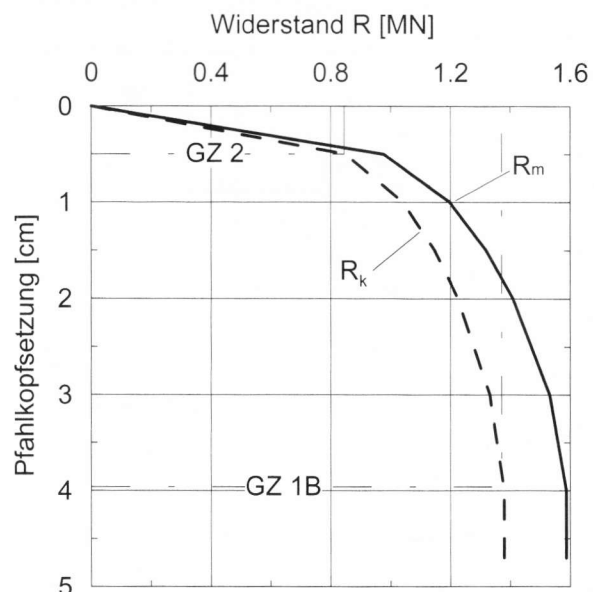


Bild 4 Ergebnisse einer Pfahlprobelastung und einer Drucksondierung sowie die abgeleitete charakteristische Widerstands-Setzungs-Linie

Schicht	Bodenkenngrößen
Aufschüttung (Sand)	$\varphi'_k = 30^\circ$ $\gamma = 16,0 \text{ kN/m}^3$
Weichschicht	$c_{u,k} = 35,0 \text{ kN/m}^2$

Tabelle 1 Charakteristische Bodenkenngrößen

Für einen quadratischen Fertigteilverdrängungspfahl aus Stahlbeton mit einer Kantenlänge $a_s = 0,35 \text{ m}$ und einer ständigen Einwirkung $F_{G,k} = 0,450 \text{ MN}$ ist der Nachweis der

Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit zu führen, siehe Bild 3. Die Ergebnisse einer statischen Pfahlprobelastung liegen entsprechend Bild 4 vor.

Aus einer Setzungsberechnung ist bekannt, dass sich die Weichschicht unter der als unendlich ausgedehnt angenommenen Aufschüttung um 5 cm setzen wird. Die Setzungen im tragfähigen Baugrund aus der Aufschüttung können vernachlässigt werden. Im Grenzzustand GZ 2 ist eine maximale Pfahlkopfsetzung von 0,5 cm zulässig. Weiterhin wird der Pfahl als starr angenommen.

5.2 Bestimmung der charakteristischen Widerstands-Setzungs-Linie

Die charakteristische Widerstands-Setzungs-Linie ist mit Gleichung (26) der DIN 1054:2005-01 in Tabelle 2 abgeleitet, siehe auch Bild 4.

s [cm]	R_m [MN]	ξ [-]	$R_{1,k} = \frac{R_m}{\xi}$ [MN]
0,0	0,000	1,15	0,000
0,5	0,978	1,15	0,850
1,0	1,198	1,15	1,042
1,5	1,320	1,15	1,148
2,0	1,410	1,15	1,226
3,0	1,532	1,15	1,332
4,0	1,587	1,15	1,380
4,7	1,587	1,15	1,380

Tabelle 2 Pfahlprobelastungsergebnis und Ableitung der charakteristischen Widerstands-Setzungs-Linie

Im Grenzzustand GZ 1B ist für die Pfahlkopfsetzung $s_1 = 0,10 \cdot D_b$ anzusetzen, sofern keine anderen Kriterien gewählt werden. Für den quadratischen Pfahl ergibt sich ein Ersatzdurchmesser von $D_{Ers} = 39,5 \text{ cm} = 0,395 \text{ m}$.

$$s_1 = 0,10 \cdot 39,5 = 3,95 \text{ cm} \approx 4 \text{ cm}$$

Der charakteristische Pfahlwiderstand im Grenzzustand der Tragfähigkeit beträgt damit nach Tabelle 2

$$R_{1,k} = 1380,0 \text{ kN.}$$

Im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit ergibt sich der charakteristische Pfahlwiderstand $R_{2,k}$ nach Bild 4 und Tabelle 2 zu

$$R_{2,k} = 850,0 \text{ kN.}$$

Anmerkung: Es wird näherungsweise vorausgesetzt, dass die Pfahlwiderstände aus der Pfahlprobelastung nur aus dem tragfähigen Baugrund resultieren und die darüber liegenden Schichten keinen Beitrag liefern.

5.3 Bestimmung der charakteristischen Einwirkungen $F_{n,k}$ aus negativer Mantelreibung

In Bild 5 sind die Setzungen des Pfahls unter der Einwirkung $F_{G,k}$ für den Grenzzustand der Tragfähigkeit GZ 1B und der Gebrauchstauglichkeit GZ 2 den Setzungen der Weichschicht gegenübergestellt.

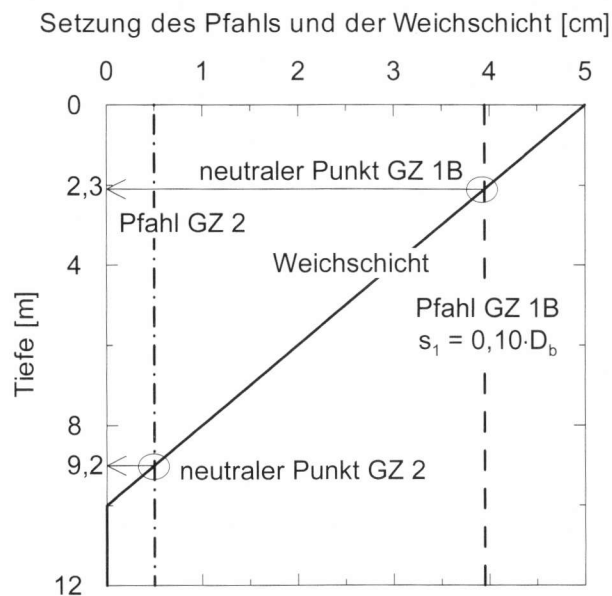


Bild 5 Ermittlung des neutralen Punktes aus den Setzungen des Pfahls und der Weichschicht für die Grenzzustände GZ 1B und GZ 2

Im Grenzzustand der Tragfähigkeit GZ 1B befindet sich der neutrale Punkt 2,3 m unter der Geländeoberfläche innerhalb der Weichschicht. Mit Gl. (1) für die Weichschicht bzw. Gl. (2) für die Aufschüttung werden die charakteristischen Einwirkungen aus negativer Mantelreibung in Tabelle 3 ermittelt.

Tiefe [m]	d_i [m]	$A_{s,i}$ [m ²]	$\tau_{n,k,i}$ [kN/m ²]	$F_{n,k,i}$ [kN]
0,00	2,00	2,80	0,0	12,9
2,00			9,2	
2,00	0,30	0,42	35,0	14,7
2,30				
				$F_{n1,k} = 27,6 \text{ kN}$

Tabelle 3 Einwirkungen aus negativer Mantelreibung im GZ 1B

Für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit liegt der neutrale Punkt in einer Tiefe von 9,20 m unter der Geländeoberfläche. Die charakteristischen Einwirkungen aus negativer Mantelreibung werden in Tabelle 4 für den Grenzzustand GZ 2 ermittelt.

Tiefe [m]	d_i [m]	$A_{s,i}$ [m ²]	$\tau_{n,k,i}$ [kN/m ²]	$F_{n,k,i}$ [kN]
0,00	2,00	2,80	0,0	12,9
2,00			9,2	
2,00	7,20	10,08	35,0	352,8
9,20				
				$F_{n2,k} = 365,7 \text{ kN}$

Tabelle 4 Einwirkungen aus negativer Mantelreibung im GZ 2

5.4 Nachweis der Tragfähigkeit

Für den Nachweis der Tragfähigkeit im Grenzzustand GZ 1B muss die Grenzzustandsbedingung

$$E_{1,d} \leq R_{1,d}$$

eingehalten sein.

Die negative Mantelreibung wird hier als ständige Einwirkung im Lastfall LF 2 angesetzt.

$$E_{1,d} = (F_{G,k} + F_{n1,k}) \cdot \gamma_G = 450,0 \cdot 1,35 + 27,6 \cdot 1,20 = 640,6 \text{ kN}$$

$$R_{1,d} = R_{1,k} / \gamma_{Pc} = 1380,0 / 1,20 = 1150,0 \text{ kN}$$

$$E_{1,d} = 640,6 \text{ kN} \leq R_{a,d} = 1150,0 \text{ kN}$$

5.5 Nachweis der Gebrauchstauglichkeit

Im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit GZ 2 muss die Grenzzustandsbedingung

$$E_{2,d} \leq R_{2,d}$$

eingehalten sein.

$$E_{2,d} = E_{2,k} = F_{G,k} + F_{n2,k} = 450,0 + 365,7 = 815,7 \text{ kN}$$

$$R_{2,d} = R_{2,k} = 850,0 \text{ kN}$$

$$E_{2,d} = 815,7 \text{ kN} \leq R_{2,d} = 850,0 \text{ kN}$$

Literatur

- Fedders, H. (1977)
Stand der Normung, Bemessung und Ausführung von Rammpfählen. Vortragsband Pfahlsymposium München (DGEG), 33-43
- Fellenius, B. H. (1972)
Down-Drag on piles in clay due to negative skin friction. Canadian Geotechnical Journal, 323-337
- Kempfert, H.-G. (2005)
Kommentar zum Abschnitt Pfahlgründungen. Kommentar zur DIN 1054:2005-01 (in Vorbereitung)
- Kempfert, H.-G. (2001)
Pfahlgründungen (Abschnitt 1-7). Grundbautaschenbuch 6. Auflage, Teil 3, Kapitel 3.2, Verlag Ernst & Sohn, 87-206