

4 Einwirkungen und Beanspruchungen

4.1 Allgemeines

(1) Bei Pfahlgründungen sind Einwirkungen zu unterscheiden in

- Gründungslasten, z. B. aus dem Bauwerk, siehe 4.2;
- grundbauspezifische Einwirkungen, hier besonders Einwirkungen aus dem Baugrund, z. B. negative Mantelreibung nach 4.4, Seitendruck nach 4.5 und Setzungsbiegung nach 4.6;
- nicht ruhende Einwirkungen aus dynamischen, zyklischen und stoßartigen Belastungen.

(2) Die Gründungslasten, z. B. aus dem aufgehenden Bauwerk, können zu folgenden Einwirkungen auf die Pfähle führen:

- $F_{G,k}$ als ständige Einwirkung in axialer Richtung,
- $F_{Q,k}$ als veränderliche Einwirkung in axialer Richtung,
- $H_{G,k}$ als ständige Einwirkung quer zur Pfahlachse,
- $H_{Q,k}$ als veränderliche Einwirkung quer zur Pfahlachse,
- $M_{G,k}$ als Moment infolge ständiger Einwirkungen,
- $M_{Q,k}$ als Moment infolge veränderlicher Einwirkungen.

(3) Alle charakteristischen Einwirkungen nach (1) bzw. (2) führen zu Beanspruchungen, die von den Pfählen über die „äußere“ und die „innere“ Pfahltragfähigkeit aufgenommen werden müssen, siehe Kapitel 6.

(4) Bei der Tragwerksberechnung, z. B. bei der Ermittlung der Beanspruchungen in der Pfahlkopfplatte oder auch in aufgehenden Rahmen- und Scheibenkonstruktionen, sind die Pfähle als verschiebungsabhängige Widerstände zu berücksichtigen. Dabei wird häufig dieser verschiebungsabhängige Widerstand durch den Ansatz von Ersatz-Wegfedern am Standort der Pfähle modelliert. Die (Ersatz-)Federsteifigkeit für den jeweiligen Pfahl kann für den maßgebenden Verschiebungs- bzw. Beanspruchungszustand aus der Widerstands-Setzungs-Linie ermittelt werden, siehe z. B. 6.3 (3). Die Ergebnisse der Tragwerksberechnung sind bezüglich des berechneten Verschiebungs- und Beanspruchungszustandes der Pfähle auf Übereinstimmung mit den getroffenen Annahmen für die Ersatzfedersteifigkeit zu überprüfen.

(5) Bei Pfahlgruppen kann eine Beeinflussung des Widerstands-Setzungs-Verhaltens durch die Pfahlgruppenwirkung eintreten. Dem entsprechend sollten pfahlstandortabhängige Ersatzfedersteifigkeiten in Abhängigkeit von der räumlichen Stellung der Pfähle in der Gruppe angesetzt werden (siehe Kapitel 8), wenn eine maßgebliche Beeinflussung zu erwarten ist. Auch bei inhomogenen Baugrundverhältnissen kann der Ansatz unterschiedlicher Federsteifigkeiten innerhalb einer Pfahlgruppe erforderlich werden.

(6) Es wird i. d. R. davon ausgegangen, dass die Pfahlsetzungen infolge der Pfahleigenlasten mit der Errichtung des Überbaus abgeklungen sind bzw.

vernachlässigt werden können. Für auf Zug beanspruchte Pfähle darf das Pfahleigengewicht nach DIN 1054 als eine günstige ständige Einwirkung bzw. als eine stabilisierende Beanspruchung berücksichtigt werden.

(7) Für Pfahlkonstruktionen zur Baugrubenherstellung (3.4) siehe auch [22].

4.2 Pfahlgründungslasten aus dem Bauwerk

Die Lasten bzw. Beanspruchungen der Pfahlgründungen sind entsprechend DIN 1054:2005-01 (6.1.2) zu ermitteln.

4.3 Herstellungsbedingte Beanspruchungen von Verdrängungspfählen

(1) Durch den Einbringevorgang sind bei Verdrängungspfählen herstellungsbedingte Beanspruchungen in unterschiedlicher Größenordnung zu erwarten. Bei Fertigrampfpfählen ergeben sich zusätzliche Beanspruchungen durch Transport und Lagerung.

(2) Hinweise zu herstellungsbedingten Beanspruchungen finden sich in DIN EN 1536 und DIN EN 12 699 sowie 11.2 und 11.3.

(3) Im Anwendungsfall ist zu prüfen, ob maßgebliche herstellungsbedingte Beanspruchungen vorliegen, die bei der Pfahlbemessung berücksichtigt werden müssen.

4.4 Negative Mantelreibung

4.4.1 Allgemeines

(1) Negative Mantelreibung bei Pfählen ist als eine ständige Einwirkung F_n zu verstehen, die aus der Relativverschiebung zwischen Boden und Pfahl in axialer Richtung stammt, bei der sich der Boden stärker setzt als der Pfahl. 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.

(2) Der Pfahl setzt sich so lange, bis die Einwirkungen aus negativer Mantelreibung zusammen mit den Einwirkungen auf die Pfähle aus dem Bauwerk und den Pfahlwiderständen aus Pfahlspitzenwiderstand und stützender Mantelreibung im Gleichgewicht stehen. Bild 4.1 zeigt diesen Zusammenhang für zwei Fälle:

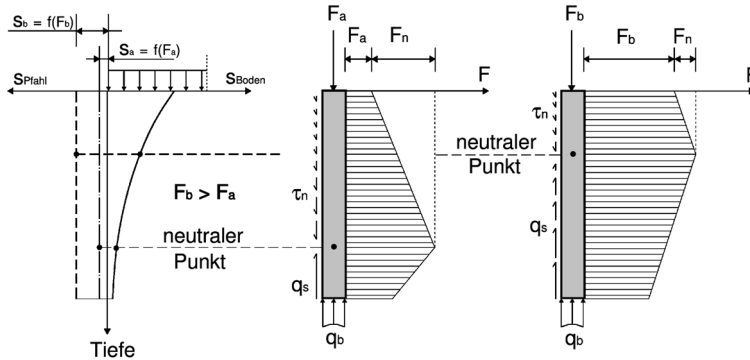


Bild 4.1 Qualitative Zusammenhänge zwischen Pfahlwiderständen und Beanspruchungen aus Bauwerkslasten und negativer Mantelreibung bei homogenem Baugrund und Definition des neutralen Punktes (aus [42]). Hinweis: dargestellt ist die Änderung der axialen Pfahlbeanspruchung

- Bei geringen Beanspruchungen F_a aus den Bauwerkslasten und damit geringer Pfahlsetzung s_a sowie 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 nachfolgenden Ausführungen sind im Wesentlichen [43] entnommen.

(3) Die Grenze zwischen rechnerischer positiver und negativer Mantelreibung wird als neutraler Punkt bezeichnet, siehe [28] sowie Bilder 4.1 und 4.2.

(4) Nach dem neuen Teilsicherheitskonzept ist die negative Mantelreibung bei Pfahlgründungen i. d. R. als eine ständige Einwirkung definiert, die zu einer zusätzlichen Beanspruchungskomponente auf die Pfähle führt.

4.4.2 Ermittlung der charakteristischen Einwirkung aus negativer Mantelreibung

(1) Eine zutreffende Abschätzung 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 daraus resultierenden Relativverschiebungen und
- ggf. den Mobilisierungsfunktionen von $\tau_{n,k}$ und $q_{s,k}$.

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

(3) In der Literatur zur negativen Mantelreibung sind im Wesentlichen zwei Ansätze zur Ableitung der charakteristischen negativen Mantelreibung $\tau_{n,k}$ zu finden:

- Mit totalen Spannungen für bindige Böden

$$\tau_{n,k} = \alpha \cdot c_{u,k} \quad (4.1)$$

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 undrnierten Bodens.

Die Größenordnung des Faktors α liegt je nach Bodenart und Pfahltyp zwischen 0,15 und 1,60, wobei in Gl. (24) der DIN 1054:2005-01 (hier Gl. 4.1) näherungsweise $\alpha = 1$ gesetzt wird und diese Beziehung generell für bindigen Boden empfohlen wird.

Detailliertere Angaben über den Wert des Faktors α können beispielsweise [13, 26, 27, 42, 61, 114] entnommen werden.

- Mit effektiven Spannungen für nichtbindige und bindige Böden:

$$\tau_{n,k} = K_0 \cdot \tan \varphi'_k \cdot \sigma'_v = \beta \cdot \sigma'_v \quad (4.2)$$

Dabei ist:

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

Nach den Angaben in der Literatur liegt die Größenordnung des Faktors β je nach Bodenart zwischen 0,1 und 1,0, siehe z. B. [12, 13, 15, 26, 27, 42, 61]. Häufig wird für nichtbindige Böden $\beta = 0,25$ bis 0,30 verwendet.

(4) Keine abgesicherten Angaben liegen darüber vor, ob sich $\tau_{n,k}$ je nach Konsolidierungszustand der Weichschicht in der Pfahlumgebung über die Zeit verändert.

(5) 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 im Einflussbereich der Pfähle anzusetzen. Diese Regelung ist aber nur sinnvoll für in einer Gruppe eng stehende Pfähle.

(6) In DIN 1054 wird der Hinweis gegeben, dass die negative Mantelreibung $\tau_{n,k}$ nicht größer zu erwarten ist als eine positive Mantelreibung $q_{s,k}$ in vergleichbaren Baugrundsichten. Im Geotechnischen Untersuchungs- bzw. Entwurfsbericht sollte diese Aussage der Norm durch den Sachverständigen für Geotechnik oder den geotechnischen Fachplaner ausdrücklich bestätigt oder projektbezogen modifiziert werden, da die positive Mantelreibung i. d. R. Kleinstwerte darstellt und damit auch $\tau_{n,k} > q_{s,k}$ möglich ist.

(7) Der Einfluss der negativen Mantelreibung reicht bis zum neutralen Punkt. In Wirklichkeit tritt eine Übergangszone von negativer zu positiver Mantelreibung auf, wobei der Übergang als linear angenommen wird. Sie wird in [28] als neutrale Ebene bezeichnet. Innerhalb dieser Übergangszone ist demnach die Mantelreibung nicht voll mobilisiert. Die Länge der Zone der „neutralen Ebene“ nach Bild 4.2 ist von der Relativverschiebung zwischen Pfahl und Boden abhängig. Je geringer der Winkel ψ zwischen den sich schneidenden Setzungskurven ist, desto größer ist die Übergangszone von negativer zu positiver Mantelreibung.

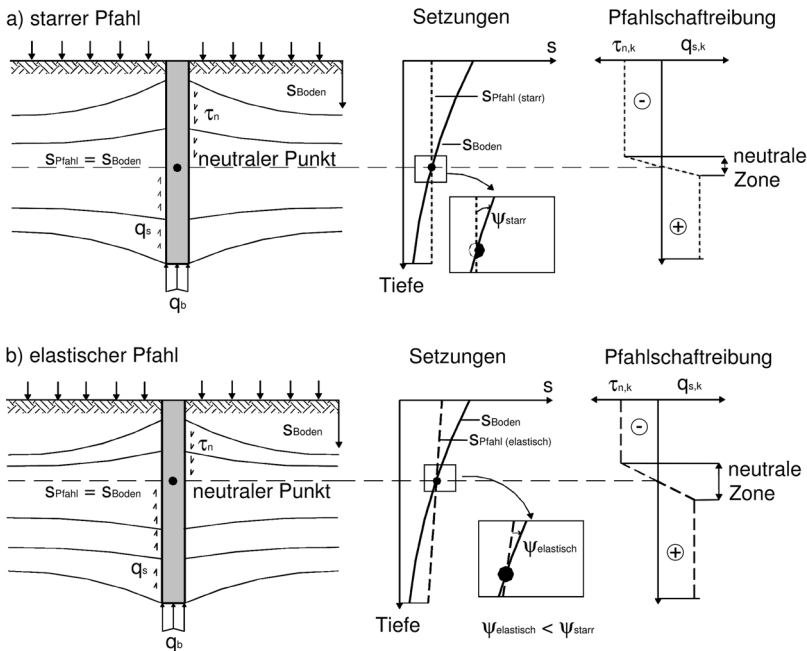


Bild 4.2 Modellvorstellung zur negativen Mantelreibung und Aktivierung der Pfahlschaftreibung in Abhängigkeit des Schnittwinkels ψ der Setzungskurven bei einem (a) starren Pfahl bzw. (b) elastischen Pfahl (nach [28], aus [43])

(8) 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 (siehe Bild 4.1). Weiterhin stimmen die Setzungen des Pfahls mit den Setzungen des umgebenden Bodens im neutralen Punkt überein.

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

(10) Die Einwirkungen auf den Pfahl aus negativer Mantelreibung können eine Reserve für den äußeren Pfahlwiderstand bilden; so kann eine zusätzlich auf den Pfahl aufgebrachte Einwirkung aus Bauwerkslasten zunächst die negative Mantelreibung reduzieren, statt die Ausnutzung des Pfahlwiderstands zu vergrößern. Umgekehrt bedeutet dies, dass die negative Mantelreibung aufgrund dieser Reduktion eine Tragreserve für den äußeren Pfahlwiderstand darstellen kann, ähnlich einer Vorspannung des Bodens.

(11) 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.

(12) Im Grenzzustand der Tragfähigkeit GZ 1B („äußere“ Pfahltragfähigkeit) 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 entsprechend Kapitel 5 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 Grenzzustand GZ 1, der in einer anderen Tiefenlage als im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit GZ 2 liegen kann.

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

4.4.4 Ermittlung der Bemessungsgrößen der Einwirkungen bzw. Beanspruchungen und Nachweisführung

(1) 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 DIN 1054 zutrifft: „... Regelkombination EK 1 (Ständige Einwirkungen) in Verbindung mit Zustand der Sicherheitsklasse SK 2 (... Bauzustände durch Baumaßnahmen neben dem Bauwerk).“ Zum Beispiel könnte eine die negative Mantelreibung erzeugende temporäre Aufschüttung neben einer Pfahlgründung als eine solche Einwirkungssituation eingestuft werden.

(2) Bei der Nachweisführung in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit sind im Zusammenhang mit der Pfahlbeanspruchung aus negativer Mantelreibung die nachfolgend unter (3) und (4) aufgeführten Fälle zu unterscheiden.

(3) „Äußere“ Pfahltragfähigkeit:

- a) Gebrauchstauglichkeit (GZ 2): Die charakteristische Einwirkung $F_{n2,k}$ und die Lage des neutralen Punktes ergeben sich aus dem Verformungsverhalten der Pfahlsetzung s_2 mit den Setzungen der Weichschicht s_n . Der Bemessungswert der Beanspruchung lautet:

$$E_{2,d} = E_{2,k} = F_{G,k} + F_{n2,k} + F_{Q,k} \quad (4.3)$$

- b) Tragfähigkeit (GZ 1): Die charakteristische Einwirkung $F_{n1,k}$ und die Lage des neutralen Punktes ergibt sich aus dem Verformungsvergleich der Pfahlsetzung s_1 mit den Setzungen der Weichschicht s_n . Die Lage des neutralen Punktes liegt dabei i. d. R. höher als beim GZ 2, da die fiktive Setzung s_1 größer ist als s_2 (außer z. B. bei Pfählen auf Fels). Der Bemessungswert der Beanspruchung lautet:

$$E_{1,d} = (F_{G,k} + F_{n1,k}) \cdot \gamma_G + F_{Q,k} \cdot \gamma_Q \quad (4.4)$$

(4) „Innere“ Pfahltragfähigkeit (Materialnachweis):

Der Nachweis wird i. d. R. im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZ 1) mit den Einwirkungen aus der negativen Mantelreibung im Gebrauchszustand $F_{n2,k}$ bei s_2 nach Absatz (3) a geführt.

(5) Anhang B8 enthält ein Beispiel zur Berücksichtigung von negativer Mantelreibung bei Pfählen und zur Nachweisführung.