

„2D oder 3D? – Vergleichende Finite Elemente Berechnungen für komplexe Gründungssysteme

O. Bernecker
Bernecker Ingenieur GmbH

S. Ries
Universität Stuttgart, Institut für Geotechnik

Zusammenfassung

Im Spannungsfeld von Berechnungsaufwand und geforderter Ergebnisqualität steht die Reduktion einer dreidimensionalen Problemstellung auf ein zweidimensionales ebenes Problem bei der Untersuchung von Gründungssystemen. Diese Reduktion findet in der Praxis im Rahmen der Entwurfsplanung vielfältige Anwendung. Mit diesem Beitrag sollen die Vorteile dieser Vorgehensweise den damit verbundene Einschränkungen gegenüber gestellt werden. Es lassen sich zusammenfassend folgende Einflüsse definieren:

- Systembedingte Steifigkeitsunterschiede (keine wesentlichen Setzungs- oder Verformungsunterschiede)
- Systembedingte Unterschiede in der Spannungsausbreitung unterhalb des Gründungselements (Überschätzung der Setzungen in der 2D-Betrachtung)
- Systembedingte Überschätzung der Pfahlmantelreibung in der ebenen 2D Betrachtung (Überschätzung der aufnehmbaren Pfahlnormalkraft in der 2D-Betrachtung)

1. Einführung

Bei der numerischen Modellierung von geotechnischen Verbundkonstruktionen wird das reale System häufig geometrisch vereinfachend als zweidimensionales System (plain strain) abgebildet. Bei der Modellbildung für ausgedehnte Pfahlgründungen und Kombinierten-Pfahl-Plattengründungen müssen die einzelnen Pfähle bzw. Pfahlreihen im 2D-Modell als „Schlitzwandelemente“ abgebildet werden.

Im vorliegenden Beitrag werden vergleichende zwei- und dreidimensionale Berechnungen gegenübergestellt und untersucht, welche Modellierungsansätze eine möglichst realitätsnahe Abbildung erlauben und mit welchen Einschränkungen bei der zweidimensionalen Modellierung von Tiefgründungen zu rechnen bzw. in welchen Fällen eine dreidimensionale Modellierung zwingend ist.

Zur Vorbemessung der Bodenplatte werden in der Praxis häufig, in enger Zusammenarbeit zwischen Tragwerksplaner und dem geotechnischen Sachverständigen, iterativ die Bettungsverhältnisse mit Hilfe einer 2D-FE-Berechnung ermittelt. Die Wahl, die Baugrund- und Gründungsverhältnisse vereinfachend als zweidimensionales ebenes Modell darzustellen, ist zum einem dem Planungsstand (Entwurfsplanung) und zum anderen dem zugehörigen Modellierungs- und Rechenaufwand geschuldet. Im Rahmen dieses Beitrags wer-

den die wesentlichen theoretischen Unterschiede herausgearbeitet und deren Auswirkungen an einem Beispiel aufgezeigt und qualitativ bewertet.

2. Problemstellung

Viele bodenmechanische Probleme lassen sich vereinfacht mit dem ebenen Spannungszustand beschreiben. Ein klassisches Beispiel ist die Bemessung einer Verbauwand. Hier ist der Spannungszustand mit dem größten Einfluss auf die Wand in der Ebene, die den betrachteten Erdkörper lotrecht und rechtwinklig zu seiner größten Ausdehnung schneidet. Man geht davon aus, dass alle zu dieser Schnittebene parallelen Ebenen den gleichen Spannungszustand aufweisen. Der in Wirklichkeit im Erdkörper vorhandene räumliche Spannungszustand wird so zu einem zweidimensionalen Modell vereinfacht.

Der Einfluss der dreidimensionalen Effekte ist für Linienbauwerke ($a/b = \infty$) gering und gewinnt zunehmend an Bedeutung, je kleiner das Längen-Breiten-Verhältnis ($a/b \rightarrow 1$) wird. Folglich ist grundsätzlich davon auszugehen, dass der räumliche Effekt bei Pfahlgründungen mit kreisrundem bzw. quadratischem Pfahlquerschnitt bei geotechnischen Berechnungen zu berücksichtigen ist und somit 3D Berechnungen die wirklichkeitsnäheren Resultate liefern.

In der nachfolgenden Betrachtung wird auf die folgenden Einflussfaktoren eingegangen:

- Systemsteifigkeit
- Spannungsausbreitung
- Scherfestigkeit entlang des Pfahlschafts

Die hieraus resultierenden Auswirkungen auf die Berechnungsergebnisse werden diskutiert. Es werden ingenieurmäßige Ansätze aufgezeigt, mit denen wirklichkeitsnähere Berechnungsergebnisse auch bei vereinfachtem 2D-Ansatz gewonnen werden können.

Auf die Wahl des maßgebenden Berechnungsschnittes und die Reduktion der dreidimensionalen Lastsituation auf den gewählten Laststreifen wird nicht weiter eingegangen. Es versteht sich, dass hierbei eine enge Abstimmung zwischen Tragwerksplaner und Geotechniker erforderlich ist und Sonderbereiche, wie z.B. hochbelastete Zonen innerhalb einer Bodenplatte, wie beispielsweise Treppentürme, gesondert betrachtet werden müssen.

2.1 Systemsteifigkeit

Die Vereinfachung des in Wirklichkeit im Bodenkontinuum vorhandenen räumlichen Spannungszustandes zu einem zweidimensionalen Problem bedeutet für die Berechnung einer klassischen Pfahlgründung, dass die im Abstand „a“ zueinander angeordneter Pfähle in einem ebenen Schnitt zu einer durchgängigen „Scheibe“ vereinfacht werden (vgl. Abbildung 1).

Mit der gewählten Vereinfachung ist systembedingt eine Überschätzung der Pfahl- bzw. Scheibendehn- und biegesteifigkeit verbunden. In der Ingenieurpraxis wird daher wie in [1] beschrieben, die Dehn- und Biegesteifigkeit der Scheiben abgemindert. Hierzu wird die in der Wirklichkeit punktuell im Baugrund vorhandene Pfahldehn- und biegesteifigkeit im 2D-Modell über die Scheibenlänge „verschmiert“ abgebildet. Das Maß der Abminderung ist $1/a$, wobei „a“ der Pfahlachsabstand senkrecht zur betrachteten Ebene ist.

Sofern von Interesse, kann die äquivalente Scheibenbreite sowie die Scheibensteifigkeit - Biege- und Dehnsteifigkeit - wie folgt ermittelt werden:

I. Biegesteifigkeit (3D = 2D):

$$\frac{E_{Pfahl} \cdot I_{Pfahl}}{a} = E_{Ersatz} \cdot I_{Ersatz}$$

II. Dehnsteifigkeit (3D = 2D):

$$\frac{E_{Pfahl} \cdot A_{Pfahl}}{a} = E_{Ersatz} \cdot A_{Ersatz}$$

Die Lösung des Gleichungssystems mit den Unbekannten E_{Ersatz} und Plattendicke d ist:

$$E_{Ersatz} = \frac{E_{Pfahl}}{a} \cdot \sqrt{\frac{A_{Pfahl}^3}{12 \cdot I_{Pfahl}}}$$

$$d = \frac{A_{Pfahl}}{\sqrt{\frac{A_{Pfahl}^3}{12 \cdot I_{Pfahl}}}}$$

- Mit:
- E_i = Elastizitätsmodul
 - I_{Pfahl} = Flächenträgheitsmoment des Pfahls ($\pi \cdot r^4 / 4$)
 - I_{Ersatz} = Flächenträgheitsmoment der Scheibe ($1,0 \text{ m} \cdot d^3 / 12$)
 - A_{Pfahl} = Pfahlquerschnittsfläche ($\pi \cdot r^2$)
 - A_{Ersatz} = Scheibenquerschnittsfläche ($1,0 \text{ m} \cdot d$)
 - a = Pfahlachsabstand
 - r = Pfahlradius
 - d = Scheibendicke

Angewendet auf das in Abbildung 1 und Abbildung 2 dargestellte Beispiel, welches in Abschnitt 3 detailliert beschrieben wird, ergibt sich:

- Schnitt 2-2: $E_{Ersatz} = 2,72 \cdot 10^6 \text{ kN/m}^2$
 $d = 0,779 \text{ m}$
- Schnitt 2-2: $E_{Ersatz} = 5,4 \cdot 10^6 \text{ kN/m}^2$
 $d = 0,779 \text{ m}$

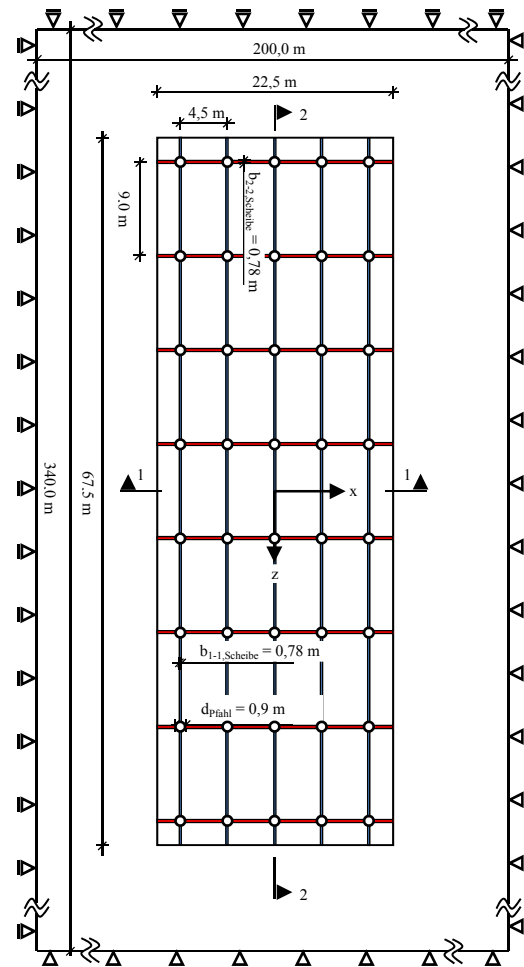


Abbildung 1: Grundriss Pfahlgründung mit Vereinfachungsschema für ebene Betrachtung

Dieses Vorgehen wurde für den Fall verifiziert, dass die in Abbildung 2 und Abbildung 3 dargestellten Pfähle am Pfahlfuß unverschieblich gelagert und entlang des Pfahlschafts nicht gebettet sind. Im 3D Modell wurden die Pfähle als Volumenelemente, im 2D Modell als sogenannte 'Plate'-Elemente modelliert.

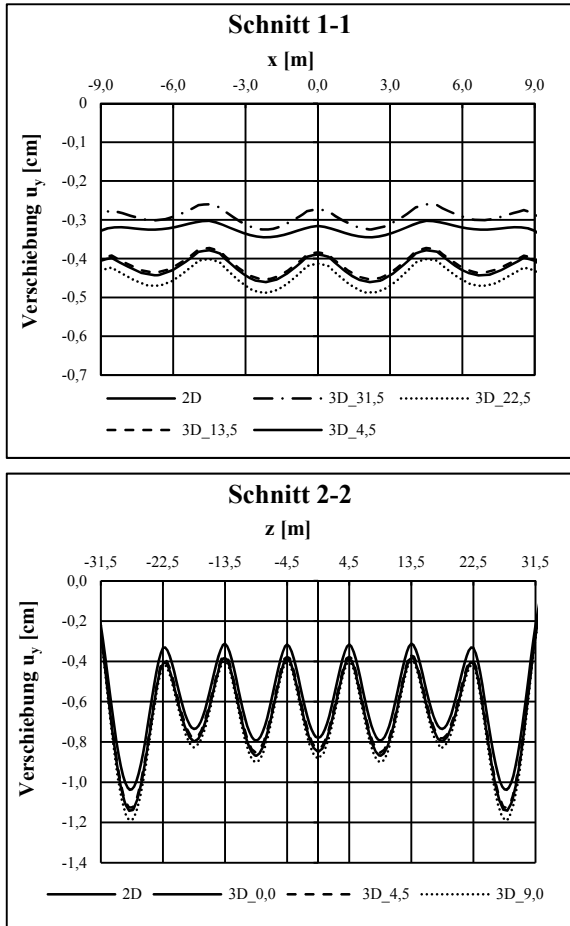


Abbildung 3: Vergleich der Systemsteifigkeiten

In Schnitt 1-1 wurden aus der 3D Berechnung die Randpfahlreihe (3D_31,5), die Pfahlreihen bei $z = 22,5$ und $3D_{13,5}$ sowie die Mittelpfahlreihe (3D_4,5) ausgewertet.

Wie die in Abbildung 3 dargestellten Berechnungsergebnisse zeigen, führt die beschriebene Anpassung der Steifigkeiten zu vergleichbaren Ergebnissen der 2D und 3D-Berechnung.

2.2 Spannungsausbreitung

Der grundsätzliche Unterschied zwischen der Spannungsausbreitung im Boden und den damit verbundenen Setzungen kann beispielhaft und vereinfachend an den analytischen Lösungen [2] für ein Streifenfundament (Scheibe) und ein Einzelfundament (Pfahl) veranschaulicht werden.

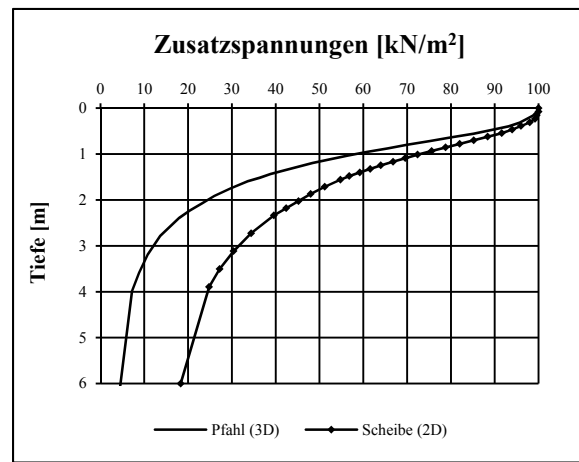
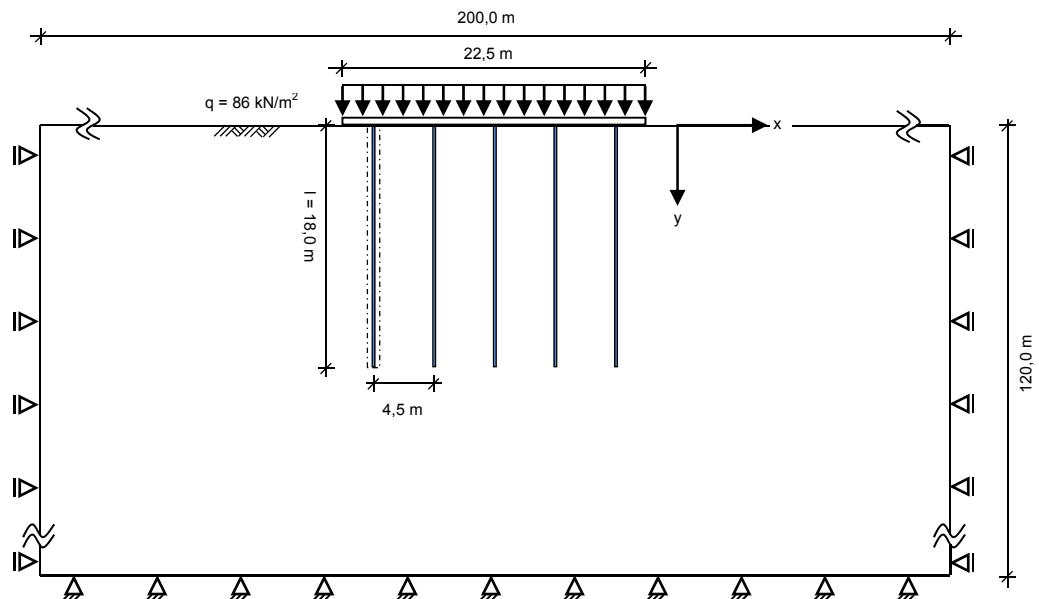


Abbildung 4: Vergleich der Spannungsausbreitung im Mittelpunkt einer schlaffen Last unter einem Einzel- und Streifenfundament

Abbildung 2: Grundriss Pfahlgründung mit Vereinfachungsschema für ebene Betrachtung



Gemäß Abbildung 4 sind die Einflussbeiwerte für das betrachtete Streifenfundament („Scheibe“) größer als die für das betrachtete Einzelfundament (Pfahl). Für das Streifenfundament ist folglich erwartungsgemäß eine Überschätzung (verglichen mit den Setzungen des Einzelfundaments) der sich aus dem Integral ergebenden Setzungen verbunden.

Für das behandelte Beispiel mit Pfählen des Durchmessers $\varnothing 0,9$ m und der sich aus der Systemsteifigkeit abgeleiteten Breite des Streifenfundaments mit $d = 0,779$ m werden für den Fall, dass die Spannungen bis in eine Tiefe von 6,0 m (20 % Kriterium für das betrachtete Streifenfundament) intergiert werden, quantitativ die Zusatzspannungen und die Setzungen (sofern von einem spannungsunabhängigen Steifemodul ausgegangen werden kann) um rund 60 % überschätzt.

2.3 Scherfestigkeit entlang des Pfahlschafts

Entlang des Pfahlschaftes wird verschiebungsabhängig die Pfahlmantelreibung aktiviert. Hierbei handelt es sich um die in der Grenzfläche zwischen Pfahl- und Bodenmaterial wirkende Schubspannung. Es kann vereinfachend die Gültigkeit des Bruchkriteriums nach Mohr-Coulomb mit $\tau = \sigma_n \cdot \tan \varphi_i + c_i$ angenommen werden.

Die Schubspannung wirkt an der erdberührten Fläche der Gründungselemente. Systembedingt ist die erdberührte Fläche der im 2D-Modell abgebildeten Gründungsscheiben größer als die tatsächlich im 3D-Modell vorhandene Pfahlmantelfläche, was folglich zu einer Überschätzung des Mantelwiderstandes in der ebenen Betrachtung führt.

Als Mittel zur Berücksichtigung dieses Effektes dient die Beschreibung der Scherfestigkeit in der Scherfuge mittels sogenannten Interface-Elementen. Im FE-Programm Plaxis sind die Materialeigenschaften der Interface-Elemente mit den Bodenparametern gekoppelt. Eine kleinere Scherfestigkeit als die des umgebenden Bodens kann in der Scherfuge zwischen Pfahl und Boden über den Faktor R_{inter} , wie nachfolgend dargestellt gesteuert werden.

$$\tau = \sigma_n \cdot R_{inter} \cdot \tan \varphi_{soil} + R_{inter} \cdot c_{soil}$$

Im Weiteren (vgl. Abschnitt 3.4.3) wird untersucht, ob sich durch die angepasste Beschreibung der Scherfestigkeit in der Scherfuge, z. B. durch Berücksichtigung des Mantelflächenverhältnisses mit:

$$R_{inter} = \frac{A_{Mantel,Pfahl}}{A_{Mantel,Scheibe}} = \frac{A_{Mantel,Pfahl}}{2 \cdot a}$$

eine im Vergleich mit der 3D-Betrachtung ähnliche Normalkraft- und Mantelreibungsverteilung ergibt. Weiter soll der Einfluss des Interface Elements auf die berechneten Setzungen bewertet werden.

Zusammenfassend werden folgende Bedingungen vergleichend untersucht:

- Systembedingte Steifigkeitsunterschiede (keine wesentlichen Setzungs- oder Verformungsunterschiede)
- Systembedingte Unterschiede in der Spannungsausbreitung unterhalb des Gründungselements (Überschätzung der Setzungen in der 2D Betrachtung)
- Systembedingte Überschätzung der Pfahlmantelreibung in der ebenen 2D Betrachtung (Überschätzung der aufnehmbaren Pfahlnormalkraft in der 2D Betrachtung)

3. Grundsatzuntersuchungen

Um die in Abschnitt 2 beschriebenen Bedingungen zu veranschaulichen und nach Möglichkeit zu quantifizieren, wurden an dem in Abbildung 1, 2 und 5 dargestellten Beispiel, vergleichende 2D- und 3D-Berechnungen durchgeführt. Bei dem gewählten Beispiel handelt es sich um eine 22,5 m x 67,5 m große Bodenplatte der Plattenstärke $d = 0,5$ m, die auf insgesamt $5 \times 8 = 40$ Pfählen gegründet ist. Die 18 m langen Pfähle sind in Plattenlängsrichtung mit einem Achsabstand von $a_2 = 9,0$ m und in Plattenquerrichtung mit einem Achsabstand von $a_1 = 4,5$ m angeordnet. Der Pfahldurchmesser beträgt $d = 0,9$ m. Das FE-Modell besitzt im Grundriss Abmessungen von 200 m x 340 m und 120 m tief. Das 3D-Modell besteht aus rund 200.000 Elementen, das 2D-Modell aus rund 7.000 Elementen.

Die Berechnungen wurden mit dem FE-Programm Plaxis (2D V9.02, 3D Foundation V2.2) durchgeführt, wobei 15-knotige Elemente verwendet wurden. Die verwendeten Bodenkennwerte sind in Abbildung 5 dargestellt, wobei das Stoffgesetz Hardening-Soil-Small (Benz 2006) angewandt wurde. Die dargestellten Bodenparameter gelten für die 2D- wie für die 3D-Berechnungen.

Für das gewählte Beispiel wurden zwei Berechnungsschnitte, wie in Abbildung 1 dargestellt, untersucht. Hierbei handelt es sich zum einen um einen Schnitt in Plattenquerrichtung (1-1) und um einen Schnitt in Plattenlängsrichtung (2-2). Da der Vergleich der 2D- und 3D-Berechnungsergebnisse in beiden Schnitten qualitativ dieselben Effekte aufzeigt, werden im Folgenden nur die Ergebnisse aus Schnitt 2-2 dargestellt. Ausgehend von dem in Abschnitt 2.3 beschriebenen Sachverhalt, dass bei der ebenen Modellbildung die Scherfestigkeit entlang der Scheibenmantelfläche systembedingt überschätzt wird, wurden zwei Lastabtragungssysteme untersucht.

- System I – „Spitzendruckpfahl“ besteht aus einer 15 m mächtigen Schluffschicht, die von einem dicht gelagerten Sand unterlagert wird. Die Pfähle binden planmäßig 3,0 m in den Sand ein. Das Pfahltragverhalten im System I wird maßgeblich durch den Lastabtrag über Spitzenwiderstand (80 %) geprägt.

- Im Vergleich dazu wurde ein weiteres System II – „Mantelreibungspfahl“ untersucht, worin der Lastabtrag der Pfähle maßgeblich über Mantelreibung (85 %) erfolgt. Der Baugrund in System II besteht aus einer Schicht. Diese Schicht weist die Eigenschaften eines steifen Tones auf. Beide Systeme sowie die verwendeten bodenmechanischen Rechenwerte sind in Abbildung 5 dargestellt.

Die Belastung auf die Bodenplatte haben wir zu $q = 86 \text{ kN/m}^2$ gewählt, was dem Pfahlwiderstand im Ton bei Erreichen der Grenzmantelreibung entspricht, vgl. Abbildung 6.

3.1 Validierung des Lastabtragungsverhaltens

Die Validierung des Lastabtragungsverhaltens der Systeme I und II wurde an einem Einzelpfahl durchgeführt. Die Berechnungsergebnisse sind in Abbildung 6 dargestellt. Zum Vergleich sind in Abbildung 7 die Widerstandssetzungslinien dargestellt, wie sich diese auf der Grundlage von den in DIN 1054:2005 dokumentierten Erfahrungswerten ergeben.

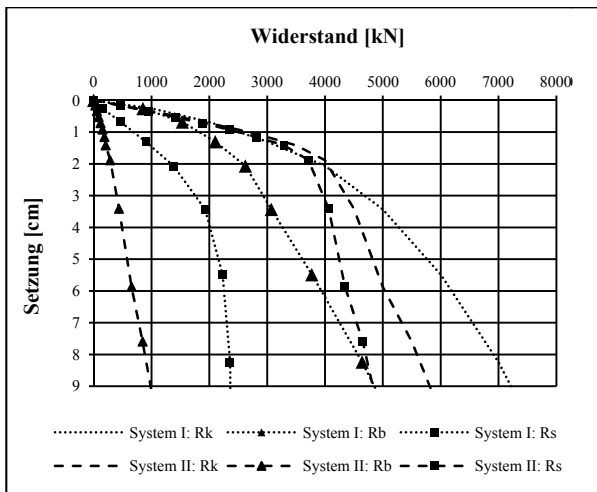


Abbildung 6: Vergleich der Setzungen Widerstands-Setzungs-Linien

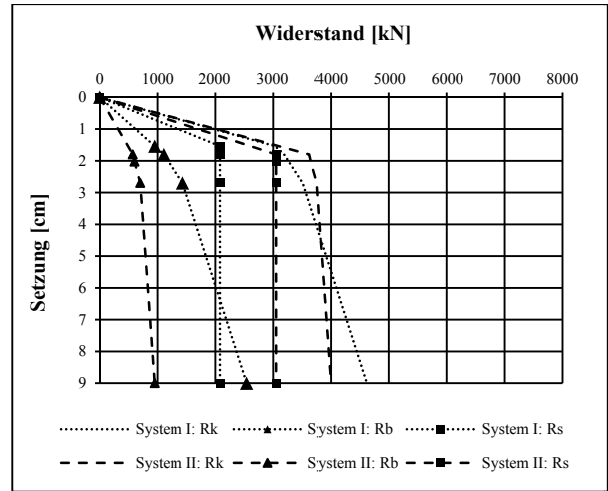


Abbildung 7: Widerstands-Setzungs-Linien nach DIN 1054:2005

Grundlage für die in Abbildung 7 konstruierte WSL sind folgende Parameter:

- System I – Spitzendruckpfahl
 - Sand: $q_c = 25 \text{ MN/m}^2$
 - Schluff: $c_{u,k} = 60 \text{ kN/m}^2$
- System II – Mantelreibungspfahl
 - Schluff: $c_{u,k} = 200 \text{ kN/m}^2$

Vergleicht man die berechnete Widerstandssetzungslinie (Abbildung 6) mit der nach DIN 1054:2005 konstruierten (Abbildung 7), so kann für den gebrauchstauglichkeitsrelevanten Bereich ($s < 2 \text{ cm}$) größenordnungsmäßig eine gute Übereinstimmung festgestellt werden.

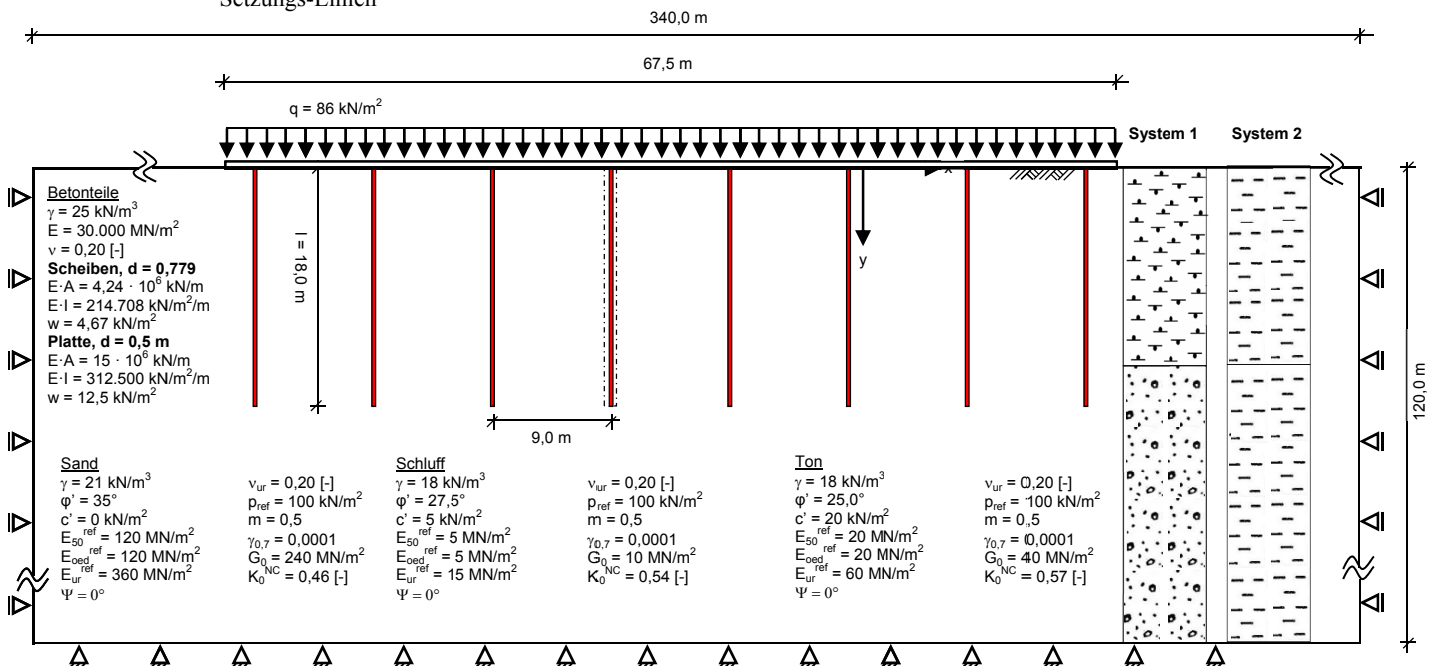


Abbildung 5: Schnitt 2-2, Bodenkennwerte und Systeme

3.2 Vergleich der Systemsteifigkeit

Die Dehn- und Biegesteifigkeit der in der 2D Berechnung verwendeten 'Plate'-Elemente wird wie nach dem in Abschnitt 2.1 beschriebenem Verfahren bestimmt. Wie bereits gezeigt, führte diese Anpassung auch in dem gewählten Beispiel zu einem qualitativ und quantitativ gleichwertigen Verformungsbild.

3.3 Vergleich der Spannungsausbreitung und deren Auswirkung auf die Setzungen

In Abschnitt 2.2 wurde der prinzipielle systembedingte Unterschied in der Lastausbreitung unter einem Einzel-fundament mit der Lastausbreitung unter einem Streifenfundament verglichen und für das gewählte Längen-Breitenverhältnis ein Setzungsunterschied von rund 60 % ermittelt.

Abbildung 8 zeigt den Vergleich der in System I - „Spitzendruckpfahl“ berechneten vertikalen Verschiebungen. Aufgetragen sind die Ergebnisse der 3D-Berechnungen, die Ergebnisse der 2D-Berechnungen sowie zum Vergleich die Setzung einer tiefliegenden Flachgründung. Station $x = 0,0$ entspricht der Mittelpfahlreihe, Station $x = 9,0$ entspricht der Randpfahlreihe.

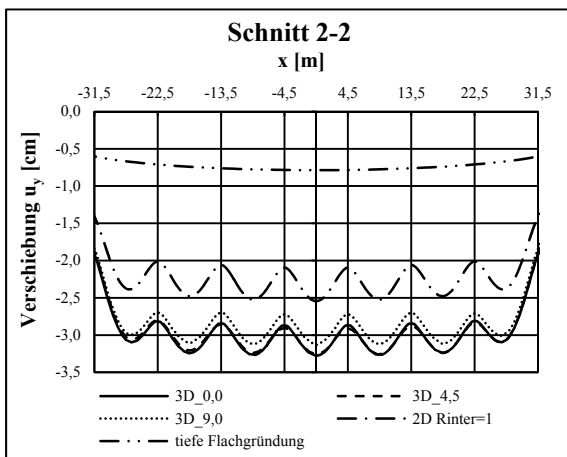


Abbildung 8: Vergleich der Setzungen, System I - Spitzendruckpfahl

Die Ergebnisse zeigen, dass in der 2D Betrachtung die Setzungen unterschätzt werden. Der Verlauf der Biegelinie zeigt insgesamt eine gute Übereinstimmung.

In der 2D-Berechnung betragen die maximalen Setzungen in Schnitt 2-2 2,2 cm, in der 3D-Berechnung ergeben sich maximal 3,3 cm, was somit einer Unterschätzung von rund 33 % entspricht. Die Berechnung einer gedanklich tiefliegenden Flachgründung liefert maximale Setzungen von 8 mm.

Die Berechnungsergebnisse für das System II - „Mantelreibungspfahl“ sind in Abbildung 9 dargestellt. Hierbei kann eine Überschätzung der Setzungen in der ebenen Betrachtung festgestellt werden. In der 2D-Betrachtung ergibt sich in Schnitt 2-2 eine maximale Setzung von 11 cm, was über den in der 3D Berech-

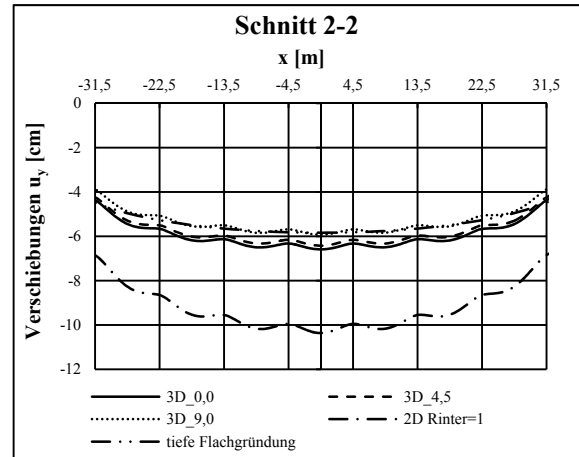


Abbildung 9: Vergleich der Setzungen, System II - Mantelreibungspfahl

nung bestimmten maximalen Setzungen von 6,5 cm liegt. Dies entspricht einer Überschätzung von rund 60 % und liegt damit in einer vergleichbaren Größenordnung, wie in Abschnitt 2.2 bereits erläutert. Eine erstaunlich gute Näherung der Setzungen in Plattenlängsrichtung liefert die Berechnung der tiefliegenden Flachgründung.

3.4 Vergleich der aus der Pfahlmantelreibung resultierenden Pfahlnormalkräfte und Ersatzfedersteifigkeiten

3.4.1 Pfahlnormalkräfte

Wie eingangs erwähnt, sind in der Praxis nicht nur die Setzungen bzw. die Setzungsdifferenzen anzugeben, sondern auch alle Ersatzfedersteifigkeiten, die für die Bemessung der Bodenplatte von entscheidender Bedeutung sind.

Aus diesem Grund werden im Weiteren die Pfahlkräfte der verschiedenen Berechnungen verglichen und in Abbildung 10 und Abbildung 11 dargestellt.

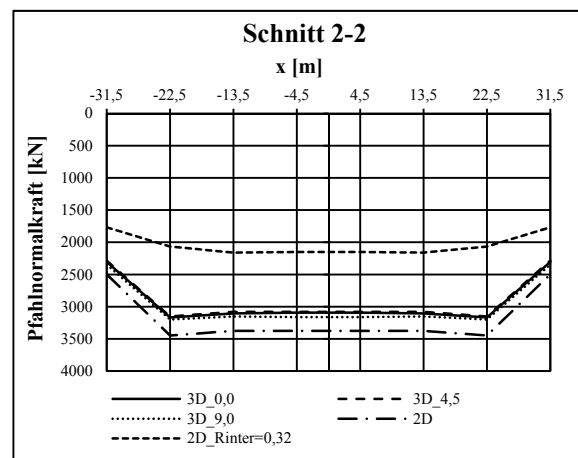


Abbildung 10: Vergleich Pfahlnormalkräfte, System I - Spitzendruckpfahl

Erwartungsgemäß zeigen die Ergebnisse, bedingt durch die in Abschnitt 2.3 erläuterten Überschätzung der

Mantelfläche, dass in der 2D-Berechnung die Pfahlnormalkraft überschätzt wird. Besonders deutlich ist dieser Effekt in System II – „Mantelreibungspfahl“ zu erkennen.

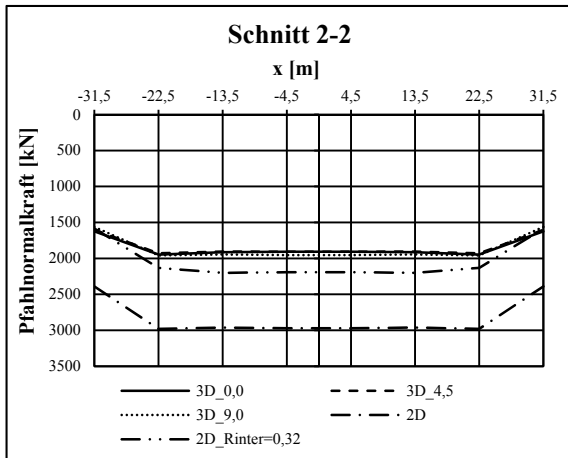


Abbildung 11: Vergleich Pfahlnormalkräfte, System II – Mantelreibungspfahl

Während sich in der 3D-Berechnung für die Mittelpfahlreihe Kräfte von rund 2.000 kN ergeben, wirken auf die Pfähle in der 2D-Berechnung Kräfte in der Größenordnung von 3.000 kN. Dies entspricht einer Überschätzung von 33 %. Für das System I – „Spitzendruckpfahl“ ergeben sich Pfahlnormalkräfte, die rund 10 % über denen der 3D-Berechnung liegen.

3.4.2 Ersatzfedersteifigkeiten

Für das System I – „Spitzendruckpfahl“ wurde die Ersatzfedersteifigkeit in der 2D-Berechnung um rund 50% überschätzt, wohingegen für das System II – „Mantelreibungspfahl“ eine sehr gute Übereinstimmung der 2D und 3D berechneten Federsteifigkeiten festgestellt werden kann (vgl. Abbildung 12, 13). Dies legt die Vermutung nahe, dass sich hier die Einflüsse aus einer Überschätzung der Normalkraft und die Überschätzung der Setzung auf Grund des ‘Streifenfundamentcharakters’ überlagern und das Verhältnis aus beiden konstant bleibt.

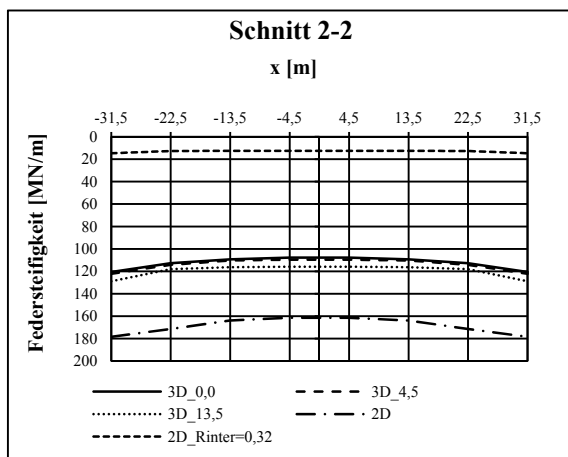


Abbildung 12: Vergleich Ersatzfedersteifigkeit, System I – Spitzendruckpfahl

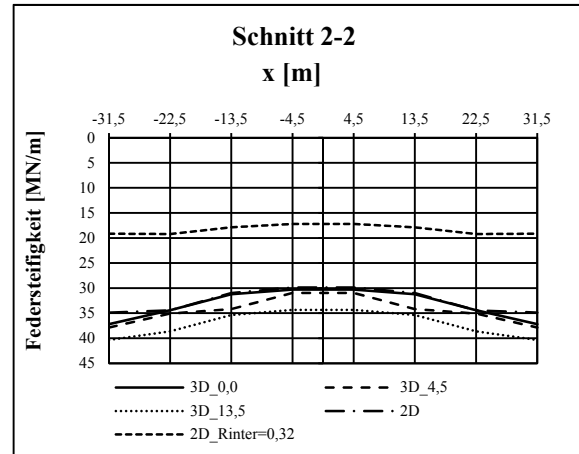


Abbildung 13: Vergleich Ersatzfedersteifigkeit, System II – Mantelreibungspfahl

3.4.3 Berücksichtigung des Mantelflächenverhältnisses durch den Faktor R_{inter}

Die in Abschnitt 3.4.1 dargestellten Ergebnisse haben gezeigt, dass die Pfahlnormalkräfte in der 2D-Berechnung überschätzt werden. Grund hierfür ist das systembedingte Mantelflächenmissverhältnis. Dies gilt vor allem für Pfähle, die vorwiegend über Mantelreibung die Lasten in den Baugrund ableiten.

Wie in Abschnitt 2.3 erläutert, kann die Scherfestigkeit in der Fuge zwischen Pfahl und Boden abgemindert werden, wobei sich in der Praxis der Flächenverhältniswert bewährt hat. Für das betrachtete Beispiel ergibt sich das Flächenverhältnis und somit der Faktor R_{inter} im Schnitt 2-2 zu $R_{inter} = 2 \cdot \pi \cdot 0,45 \text{ m} / 2 \cdot 4,5 \text{ m} = 0,32$.

Die unter Berücksichtigung der so abgeminderten Scherfestigkeit durchgeführten Berechnungen führen erwartungsgemäß für System II – „Mantelreibungspfahl“ in Hinblick auf den Vergleich der Pfahlnormalkräfte zu einer besseren Übereinstimmung (Abbildung 11).

Für System I – „Spitzendruckpfahl“ führt die Berücksichtigung des R_{inter} – Faktors jedoch eher zu einer Verfälschung der Ergebnisse, sprich, zu einer Unterschätzung der Pfahlnormalkräfte (Abbildung 10).

Darüber hinaus ist bei Berechnungen mit abgeminderter Scherfestigkeit ein signifikanter Anstieg der Setzungen zu verzeichnen (vgl. Abbildung 14, 15). Für System I – „Spitzendruckpfahl“ ergibt sich ein nahezu unrealistischer Anstieg der Setzungen um den Faktor 8. Auch in System II - Mantelreibungspfahl ist die Abminderung der Scherfestigkeit mit einer Vergrößerung der Setzungen verbunden, allerdings ist das Maß der Setzungszunahme mit Faktor 1,3 deutlich geringer.

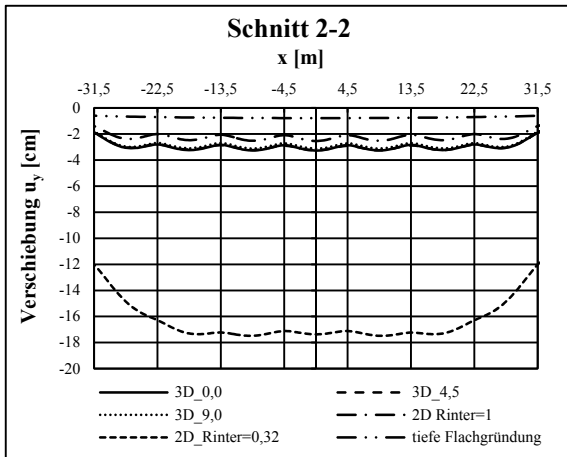


Abbildung 14: Vergleich der Setzungen, System I - Spitzendruckpfahl

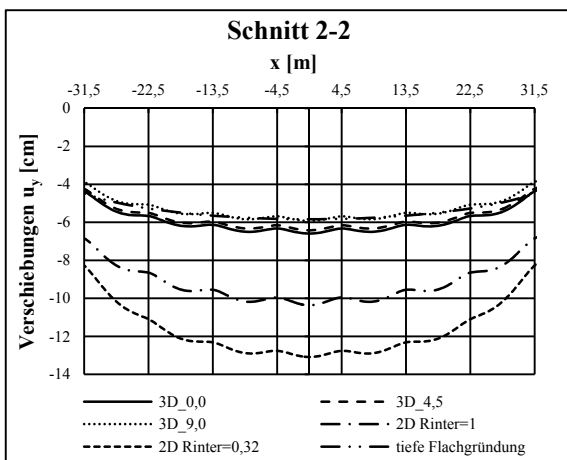


Abbildung 15: Vergleich der Setzungen, System II - Mantelreibungspfahl

Die vor Anpassung der Scherfestigkeit in der Scherfuge verhältnismäßig gute Übereinstimmung der berechneten Pfahlfedersteifigkeiten verschlechtert sich. Zusammenfassend kann anhand der Berechnungsergebnisse festgehalten werden, dass realitätsnähere Ergebnisse ohne eine Anpassung des Mantelreibungsverhältnisses gewonnen werden, trotz größerer Scheibenfläche im 2D-Modell.

3.5 Vergleich der Boden-Bauwerks-Interaktion

Wertet man die durchgeführten Berechnungen hinsichtlich der Lastabtragung summarisch über die Bodenplatte und über die abgebildeten Pfähle aus, vgl. Tabelle 1, zeigt sich, dass in der ebenen 2D Betrachtung der auf die Pfähle entfallende Lastanteil überschätzt wird.

Für System I – „Spitzendruckpfahl“ wurde eine vergleichbare Lastverteilung auf Pfähle und Platte errechnet, ohne die Scherfestigkeit in der Kontaktzone Pfahl – Boden zu reduzieren.

Für das System II – „Mantelreibungspfahl“ konnte durch die Definition des Faktors R_{inter} eine mit der 3D - Berechnung vergleichbare Lastaufteilung gefunden werden.

System	Pfahl-widerstand	Platten-widerstand
	[%]	[%]
I, $R_{inter} = 1,0$	75	25
I, $R_{inter} = 0,32$	48	52
I, 3D	69	31
II, $R_{inter} = 1,0$	67	33
II, $R_{inter} = 0,32$	48	52
II, 3D	44	56

Tabelle 1: Aufteilung der Widerstände

4 Fazit

Für die Durchführung dreidimensionaler FE-Berechnungen sind nach Meinung der Verfasser ein hoher Modellierungs- und Berechnungsaufwand sowie große Sorgfalt erforderlich, welche stets mit der vorhandenen Planungstiefe und der geforderten Prognosegenauigkeit in Verhältnis zu setzen ist.

Sofern es um die Bestimmung der Bettungsverhältnisse geht, stellen zweidimensionale, ebene Berechnungen für den Ingenieuralltag ein probates Mittel dar.

Für das System I – „Spitzendruckpfahl“ zeigen sich vergleichbare Ergebnisse für Setzungen und Pfahlnormalkraft.

Leider standen zum Zeitpunkt der Ausarbeitung dieses Beitrags keine Messdaten (Setzung und Pfahlnormalkraft) zur Verfügung, an denen das 3D-Berechnungsmodell hätte kalibriert werden können. Folglich können lediglich Aussagen über den Vergleich der 2D- und 3D-Berechnungsergebnisse getroffen und die systembedingten Unterschiede qualitativ bewertet werden. Über absolute Setzungsbeträge können keine Aussagen getroffen werden.

Das auch aus anderen Projekten bekannte und übliche Vorgehen, das systembedingte Missverhältnis der Mantelflächen über eine Abminderung der Scherfestigkeit zwischen Mantelfläche des Bauteils und dem umgebenden Boden zu steuern, hat gezeigt, dass:

- bei System I – „Spitzendruckpfahl“ die Ergebnisse bzw. die Vergleichbarkeit mit den aus der 3D-Berechnung gewonnenen Ergebnissen verschlechtert wird oder gar zu unrealistisch großen Setzungen führt.
- bei System II – „Mantelreibungspfahl“ in Hinblick auf die Bestimmung der Pfahlnormalkraft und der Lastaufteilung zwischen Bodenplatte und Pfählen verbessert wird.
- die sich aus der 2D-Berechnung ergebenden Ersatzfedersteifigkeiten größenordnungsmäßig gut mit den Ergebnissen der 3D-Berechnung übereinstimmen. In der 2D-Betrachtung überlagern sich hier

vermutlich setzungserhöhende Faktoren (Streifenfundamentcharakter) und die Normalkraft erhöhende Faktoren (Überschätzung des Mantelwiderstands).

Da in der Praxis in aller Regel Baugrundverhältnisse vorliegen, die einen Lastabtrag über Pfahlmantelreibung sowie Pfahlspitzenwiderstand erlauben ist eine Kalibrierung des Berechnungsmodells an einer Pfahlprobebelastung erforderlich. Sofern keine Ergebnisse aus einer statischen Pfahlprobebelastung vorliegen, sollte zumindest, wie auch im Rahmen dieses Beitrags geschehen, ein Abgleich auf Basis von Erfahrungswerten nach DIN 1054 erfolgen.

Die Schwachstellen einer zweidimensionalen Berechnung können wie folgt zusammengefasst werden:

- Für eine zuverlässige Verformungsprognose ist zu beachten, dass die Setzungen im 2D-Modell tendenziell überschätzt werden. Dies gilt vor allem für das untersuchte System II – „Mantelreibungspfahl“. Die Setzungen werden im Vergleich zu den im 3D-Modell berechneten in einer Größenordnung von rund 60 % überschätzt.
- Damit verbunden ist auch eine Überschätzung der Pfahlnormalkraft in vergleichbarer Größenordnung.

Für die Ingenieurpraxis dürfte eine Kombination beider Modellierungs- und Berechnungsansätze sinnvoll sein. So erlauben einfache zweidimensionale Berechnungen, mit verhältnismäßig geringem Aufwand bereits zu einem früheren Planungstand, unter Berücksichtigung der genannten Schwachstellen, erste Prognosen über das Lastsetzungsverhalten.

Für komplexere Baugrundmodelle, Belastungssituationen und erhöhte Genauigkeitsanforderungen in Abhängigkeit der Planungstiefe empfehlen sich 3D-Berechnungen.

5 Referenzen

- [1] PD Dr.-Ing. Peter-Andreas von Wolffersdorff, Pfahlgründungen, Kurs Finite Elemente in der Geotechnik – TAE 2010, unveröffentlicht
- [2] Steinbrenner, W., Tafeln zur Setzungsberechnung, Die Straße H.1, S121-124, 1934