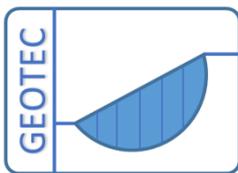


Untersuchungsfall 3

Pfahl-Plattengründung des *Torhauses* in Frankfurt mit dem Programm *ELPLA*



M. El Gendy
A. El Gendy



Copyright ©
GEOTEC Software Inc.
PO Box 14001 Richmond Road PO, Calgary AB, Canada T3E 7Y7
Tele.: +1(587) 332-3323
geotec@geotecsoftware.com
www.geotecsoftware.com

Inhalt

Seite

3	Untersuchungsfall 3: <i>Pfahl-Plattengründung des Torhauses in Frankfurt</i>	3
3.1	Allgemeines	3
3.2	Bodenkennwerte	4
3.3	Pfahl- und Plattenmaterial.....	6
3.4	Berechnung der Pfahlplatte.....	6
3.5	Vergleich mit der 3D finiten Element-Berechnung und Feldmessungen	8
3.6	Vergleich mit verschiedenen Berechnungen	9
3.7	Literatur.....	13

3 Untersuchungsfall 3: Pfahl-Plattengründung des Torhauses in Frankfurt

3.1 Allgemeines

Das *Torhaus* befindet sich in Frankfurt/ Main in Deutschland und teilt das Messegelände in einen östlichen und einen westlichen Geländeteil, Bild 3-1. Das Haus wurde zwischen 1983 und 1986 gebaut und stellt das erste Gebäude in Deutschland dar, das mit einer Pfahl-Plattengründung ausgestattet ist. Das Gebäude hat eine Höhe von 130 [m]. Mit Benutzung der installierten Instrumente in diesem Fundament wurde ein Messprogramm etabliert, um das Verhalten des Gebäudes zu überwachen. Weil diese Instrumente die Setzungen der Platte, Sohldrücke auf der Platte und Lasten auf den Pfählen notieren, war das Gebäude eine gute Chance für viele Autoren, um ihre Berechnungsverfahren zu überprüfen. Seitdem das *Torhaus* gebaut wurde, haben viele Autoren sein Verhalten untersucht. Einige von ihnen sind *Sommer et al.* (1985), *Sommer* (1989) und *Reul/ Randolph* (2003).



Bild 3-1 *Torhaus* nach http://www.fussballportal.de/images/wm/fra_torhaus.jpg

Bild 3-3 zeigt eine Abbildung des *Torhauses* mit der Pfahlplatte. Das Gebäude hat keine Untergeschosse. Die Gründung besteht aus zwei getrennten rechteckigen Pfahl-Plattengründungen, jeweils mit den Abmessungen 17.5 [m] und 24.5 [m]. Der Abstand zwischen den beiden Platten beträgt 10 [m]. Die Gründungstiefe beträgt 3 [m] unter Geländeoberfläche. Die Gesamtlast je Platte beträgt 200 [MN]. Die Dicke der Platten beträgt 2.5 [m]. Insgesamt wurden unter jeder Platte 42 Bohrpfähle mit einer Länge von $l = 20$ [m] und einem Durchmesser von $D = 0.9$ [m] verwendet. Der Abstand zwischen den einzelnen Pfählen variiert zwischen $3.5 D$ und $3.0 D$ ($D =$ Durchmesser des Pfahles). Der Baugrund besteht aus Kies und Sand bis zu einer Tiefe von 5.5 [m] unter der Oberfläche, darunter befindet sich der Frankfurter Ton bis in große Tiefe. Das Grundwasser steht bei einer Tiefe von 3 [m].

Das Haus wurde in der Zeit von 1983 bis 1986 gebaut. Im Jahr 1988 betrug die gemessene max. Setzung in der Mitte der Platte 12 [cm] nach *Sommer* (1989). Wenn das *Torhaus* nur auf einer Platte stehen würde, wäre die zu erwartende Setzung 26 [cm], basierend auf einer geotechnischen Untersuchung nach *Sommer et al.* (1985). Deshalb wurde eine Kombinierte Pfahl-Plattengründung geplant, um die Setzung zu reduzieren. Mit Verwendung der verfügbaren Daten und Ergebnisse des *Torhauses*, die in Details in der vorliegenden Literatur diskutiert werden, wird die gegenwärtige Berechnung von Kombinierten Pfahl-Plattengründungen untersucht und überprüft.

3.2 Bodenkennwerte

Die verwendeten Eigenschaften des Tons bei der Berechnung des *Torhauses* können wie folgt beschrieben werden:

Steifemodul

Der Elastizitätsmodul der Sand-/ Kiesschicht unter der Platte nach *Reul/ Randolph* (2003) ist $E = 75000$ [kN/m²]. Der Elastizitätsmodul für Wiederbelastung wurde mit $W = 3 E$ angesetzt. Auf Grundlage der früheren Berechnung nach *Amann et al.* (1975) wurde gezeigt, dass die Verteilung des Steifemoduls für Erstbelastung des Frankfurter Tons in der Tiefe durch die folgende empirische Formel definiert wird:

$$E_s = E_{so}(1 + 0.35 z) \quad (2.1)$$

während für die Wiederbelastung gilt:

$$W_s = 70 [\text{MN}/\text{m}^2] \quad (2.2)$$

wobei:

- E_s Steifemodul für Erstbelastung [MN/m²]
- E_{so} Anfangs-Steifemodul, $E_{so} = 7$ [MN/m²]
- z Tiefe ab Oberkante Ton [m]
- W_s Steifemodul für Wiederbelastung [MN/m²]

Undrained Kohäsion und Grenzpfahllast

Die undrained Kohäsion c_u des Frankfurter Tons steigt in der Tiefe von $c_u = 100$ [kN/m²] bis $c_u = 400$ [kN/m²] in 70 [m] Tiefe ab Oberkante Ton nach *Sommer/ Katzenbach* (1990). *Russo* (1998) schlug eine Grenzmantelreibung bei der Berechnung mit einer hyperbolischen Funktion nicht weniger als $\tau = 180$ [kN/m²] vor, die einer undrained Kohäsion von $c_u = 200$ [kN/m²] entspricht. Um die Berechnung durchzuführen, wird eine Grenzmantelreibung von $\tau = 180$ [kN/m²] berücksichtigt. Somit ergibt sich eine Grenzpfahllast von $Ql = 10$ [MN], wie folgt:

$$Ql = \tau \times \pi \times D \times l = 180 \times \pi \times 0.9 \times 20 = 10179 \text{ [kN]} = 10 \text{ [MN]} \quad (2.3)$$

wobei:

- Ql Grenzpfahllast, [MN]
- τ Grenzmantelreibung, $\tau = 180$ [kN/m²]
- D Pfahldurchmesser, [m]
- l Pfahllänge, [m]

Poissonzahl

Die Poissonzahl des Frankfurter Tons wird mit $\nu_s = 0.25$ [-] angesetzt.

Für die Berechnung wurde der Baugrund, wie im Bohrprofil in Bild 3-2 gezeigt, mit 13 Schichten angenommen. Die gesamte Tiefe beträgt 113 [m] unter Gelände.

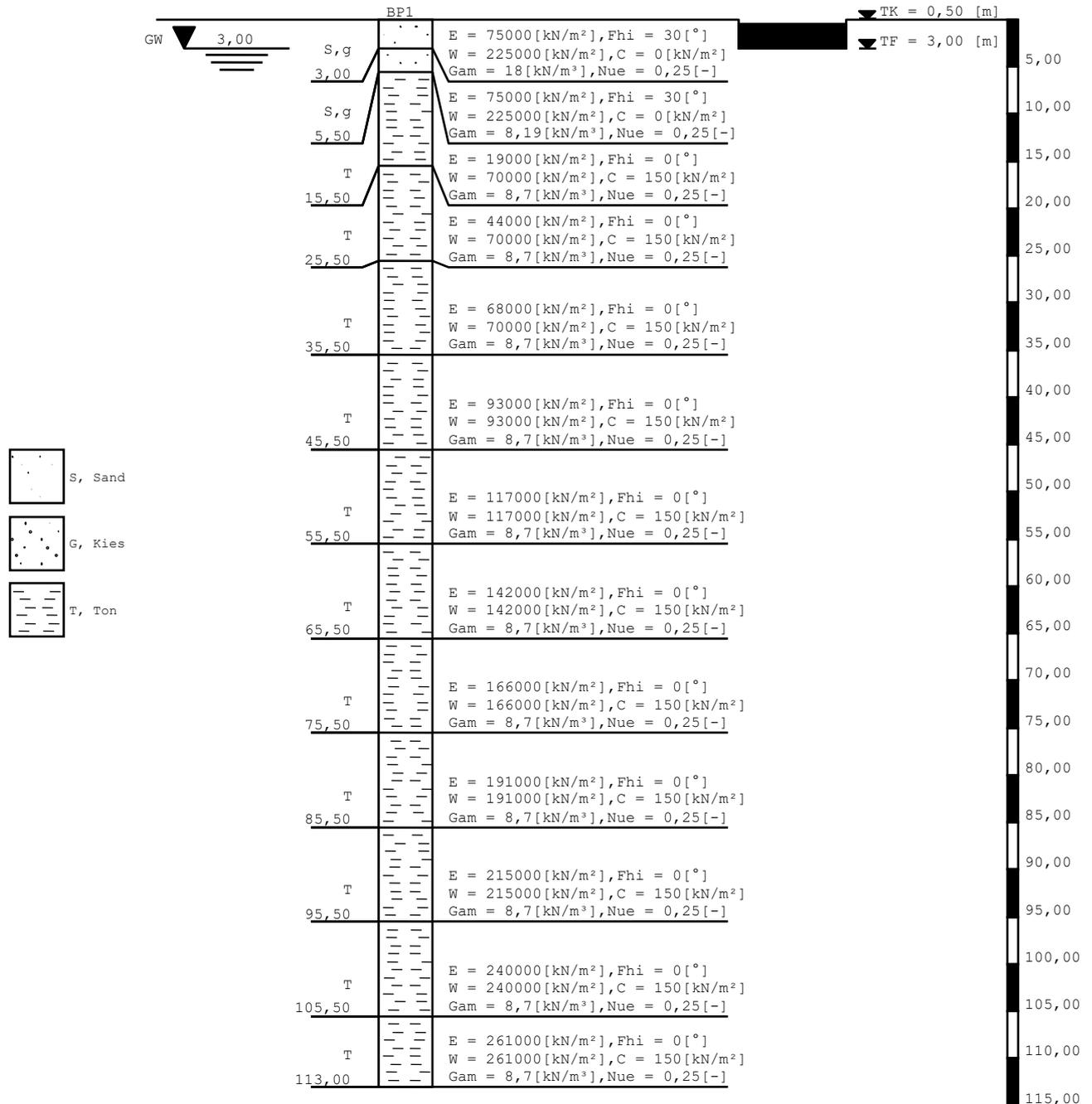


Bild 3-2 Darstellung des Bohrprofils

3.3 Pfahl- und Plattenmaterial

Als Pfahl- und Plattenmaterial werden folgende Werte angesetzt:

Für die Platte:

Elastizitätsmodul	$E_b = 3.4 \times 10^7$	[kN/m ²]
Poissonzahl	$\nu_p = 0.2$	[-]
Wichte	$\gamma_b = 25$	[kN/m ³]

Für die Pfähle:

Elastizitätsmodul	$E_b = 2.35 \times 10^7$	[kN/m ²]
Wichte	$\gamma_b = 25$	[kN/m ³]

3.4 Berechnung der Pfahlplatte

Eine Reihe von Vergleichen wird durchgeführt, um die beiliegende nichtlineare Berechnung der Kombinierten Pfahl-Plattengründung mit Hilfe der zusammengesetzten Koeffiziententechnik abzuschätzen. In den Vergleichen wird die gegenwärtige Berechnung (Nichtlineare Berechnung mit einer hyperbolischen Funktion) als NPRH bezeichnet.

Um NPRH für die Kombinierte Pfahl-Plattengründung der elastischen Platte des *Torhauses* zu überprüfen, werden die Ergebnisse mit denen aus der dreidimensionalen finiten Element-Berechnung und mit Feldmessungen verglichen. Die Platte wird in rechteckige Elemente unterteilt, wie im Bild 3-4 gezeigt. Elementgrößen in *x*-Richtung für die Einzelplatte sind $1.75 + 10 \times 1.4 + 1.75 = 17.5$ [m], während die Elementgrößen in *y*-Richtung $14 \times 1.75 = 24.5$ [m] sind. Die Pfähle werden in Linienelemente mit 2.0 [m] unterteilt. Das Fundament wird als elastische Platte angenommen, die auf starren Pfählen steht. Eine Bodenschicht von $H = 110$ [m] Mächtigkeit wie bei der dreidimensionalen finiten Element-Berechnung ist berücksichtigt.

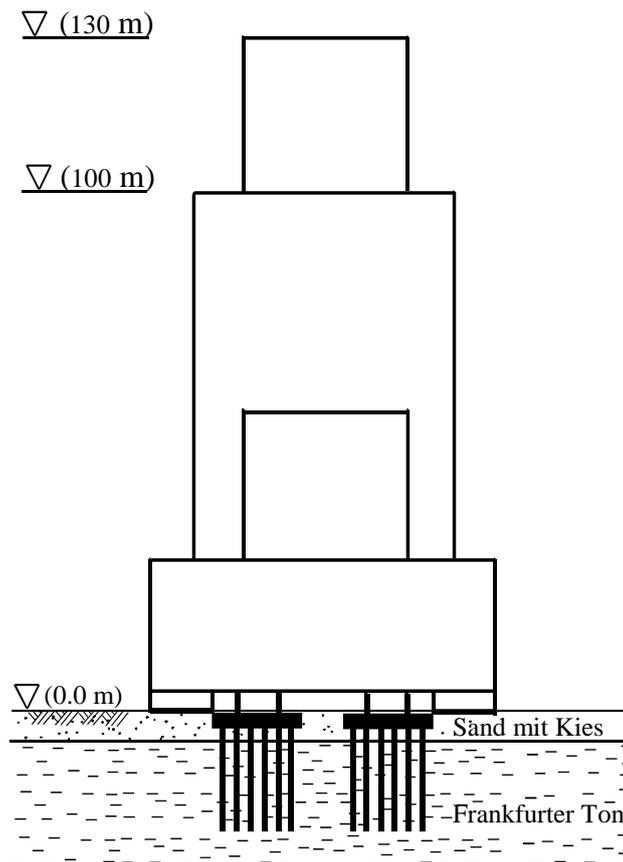


Bild 3-3 Abbildung des *Torhauses* mit der Pfahlplatte

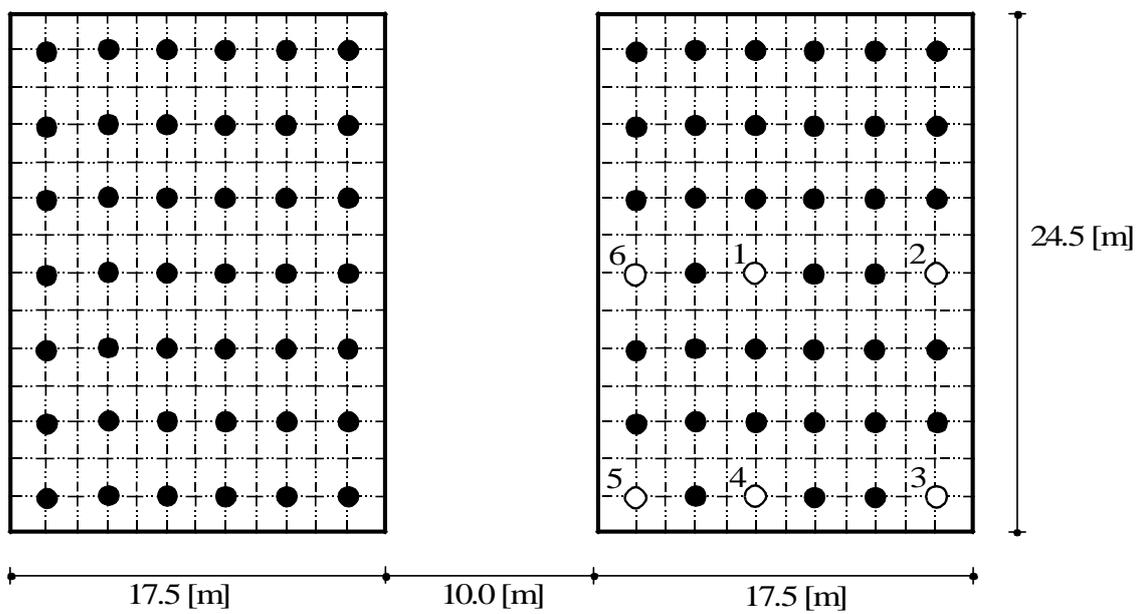


Bild 3-4 Netz der Pfahlplatte des *Torhauses* mit Pfählen

3.5 Vergleich mit der 3D finiten Element-Berechnung und Feldmessungen

Reul/ Randolph (2003) haben die Pfahl-Plattengründung des *Torhauses* mit der dreidimensionalen FE-Methode berechnet und haben ihre Ergebnisse mit denen von Feldmessungen nach *Sommer* (1989) verglichen. Wegen der Symmetrie um die x - und y -Achse in Form, Größe, Lasten und Baugrund genügt es, ein Viertel der Kombinierten Pfahl-Plattengründung zu berechnen. In NPRH werden die zwei Pfahl-Plattengründungen zusammen berechnet, um die Interaktion zwischen allen Elementen der zwei Pfahl-Plattengründungen zu berücksichtigen. Eine lineare Berechnung wird zuerst ausgeführt, um den Anfangstangentenmodul zu erhalten. In dieser Primärberechnung wird die Wirkung der Wiederbelastung betrachtet. Für die nichtlineare Berechnung wurde die Genauigkeit mit $\varepsilon = 0.0002$ [m] gewählt. Sieben Iterationsschritte in wenigen Minuten werden benötigt, um die nichtlineare Berechnung der Pfahl-Plattengründungen zusammen zu erhalten. Dies bezieht sich darauf, dass die Verwendung der zusammengesetzten Koeffiziententechnik in der Berechnung die Größe der Bodensteifigkeitsmatrix von $[1314 \times 1314]$ auf $[390 \times 390]$ reduzierte. Dementsprechend wurde die Gesamtanzahl von Gleichungen auf 1170 reduziert, wobei $n_{pr} = 1314$, $n_r = 390$ und Anzahl der Unbekannten pro Knoten 3 ($3 n_r = 1170$) ist.

Table 3-1 listet die Ergebnisse der zentralen Setzung und Tragwirkungskoeffizienten der Pfahl-Plattengründung, die von NPRH erhaltenen werden, mit denen von *Reul/ Randolph* (2003) nach der dreidimensionalen FE-Berechnung. Die Tabelle enthält auch die gemessenen Ergebnisse nach *Sommer* (1989). Bild 3-5 und Bild 3-6 vergleichen Lasten auf den Pfählen 1 bis 6 (Bild 3-4), die von NPRH erhalten werden, mit denen von *Reul/ Randolph* (2003) nach der dreidimensionalen FE-Berechnung und mit den gemessenen Pfahllasten von *Sommer* (1989).

Table 3-1 Vergleich zwischen den Ergebnissen der dreidimensionalen FE-Berechnung, Feldmessungen und NPRH

Berechnung	Feldmessungen	3D FE-Berechnung	NPRH
zentrale Setzung s_{center} [cm]	12.4	9.6	11.2
Tragwirkungskoeffizienten α_{kpp} [%]	67	76	64

Table 3-1 zeigt, dass die Setzung und Tragwirkungskoeffizienten der Pfahl-Plattengründung für NPRH in guter Übereinstimmung mit Feldmessungen sind. Die Ergebnisse der Pfahllasten im Bild 3-5 und im Bild 3-6 sind in guter Übereinstimmung mit denen sowohl der dreidimensionalen FE-Berechnung als auch der Feldmessungen. Die dreidimensionale FE-Berechnung hat einen relativ großen Unterschied bei den Tragwirkungskoeffizienten verglichen mit denen der Feldmessungen und NPRH.

Diese Falluntersuchung zeigt, dass NPRH nicht nur ein akzeptables Verfahren ist, um die Kombinierte Pfahl-Plattengründung zu berechnen, sondern auch ein praktisches Verfahren für die Berechnung eines großen Kombinierten Pfahl-Plattengründungproblems darstellt. Daneben gibt NPRH eine gute Übereinstimmung mit Feldmessungen und braucht weniger Rechenzeit, verglichen mit anderen komplizierten Modellen, die bei der dreidimensionalen finiten Element-Berechnung verwendet werden.

3.6 Vergleich mit verschiedenen Berechnungen

Um den Unterschied zwischen den Ergebnissen der Pfahl-Plattengründung des *Torhauses* bei linearer und nichtlinearer Berechnung für elastische oder starre Platten zu zeigen, wird die Pfahl-Plattengründung des *Torhauses* viermal wie folgt berechnet:

- Lineare Pfahl-Plattengründung für die starre Platte
- Nichtlineare Pfahl-Plattengründung für die starre Platte
- Lineare Pfahl-Plattengründung für die elastische Platte
- Nichtlineare Pfahl-Plattengründung für die elastische Platte

Table 3-2 zeigt die zentralen Setzungen und Tragwirkungskoeffizienten der Pfahl-Plattengründung für die vier Berechnungen, während Bild 3-7 und Bild 3-8 die Lasten auf die Pfähle 1 bis 6 zeigen. Allgemein kann man aus der Table 3-2 und diesen Bildern folgende Schlussfolgerungen ziehen:

Setzung

- Die Setzungen der nichtlinearen Berechnungen der Pfahl-Plattengründung für die starre oder die elastische Platte sind größer als die Setzungen der linearen Berechnung
- Die nichtlineare Setzung überschreitet die lineare Setzung bei 48 [%] für die Pfahl-Plattengründung der starren Platte und bei 29 [%] für die Pfahl-Plattengründung der elastischen Platte
- Für eine einzelne Berechnung für die Pfahl-Plattengründung einer starren oder elastischen Platte (linear oder nichtlinear) ist der Unterschied in der Setzung klein. Dies bedeutet, dass jede Berechnung zum Schätzen der Setzung verwendet werden kann

Tragwirkungskoeffizient der Pfahl-Plattengründung

- Die Tragwirkungskoeffizienten der Pfahl-Plattengründung aus der nichtlinearen Berechnung sind kleiner als aus der linearen Berechnung
- Die Tragwirkungskoeffizienten der Pfahl-Plattengründung aus der nichtlinearen Berechnung sind vermindert bei 13 [%] für die starre Platte und bei 15 [%] für die elastische Platte

Lasten auf dem Pfahlkopf

- Durch die Umverteilung der Pfahllasten sind bei der nichtlinearen Berechnung die Pfahllasten auf den inneren Pfählen (Pfähle 1 und 6) größer geworden, während die Pfahllasten auf den äußeren Pfählen kleiner (Pfähle 2, 3, 4 und 5) geworden sind
- Gesamtpfahllasten auf die Pfahl-Plattengründung für die starre Platte sind größer als bei der Pfahl-Plattengründung für die elastische Platte
- Die Pfahllasten der äußeren Pfähle nach der Berechnung von Pfahl-Plattengründungen für die starre Platte sind größer als bei Pfahl-Plattengründung für die elastische Platte. Umgekehrtes gilt für die Pfahllasten der inneren Pfähle

Table 3-2 Vergleich der verschiedenen Berechnungen

Berechnungen	Starre Platte		Elastische Platte	
	Linear	Nichtlinear	Linear	Nichtlinear
zentrale Setzung s_{center} [cm]	7.0	13.4	8.0	11.2
Tragwirkungskoeffizienten α_{kpp} [%]	88	77	75	64

Die Anwendung verschiedener Berechnungen bei der Pfahl-Plattengründung des *Torhauses* zeigt, dass die nichtlineare Berechnung der Pfahl-Plattengründung für die elastische Platte eine akzeptable Berechnung ist, wobei die Ergebnisse mit gemessenen Werten übereinstimmen.

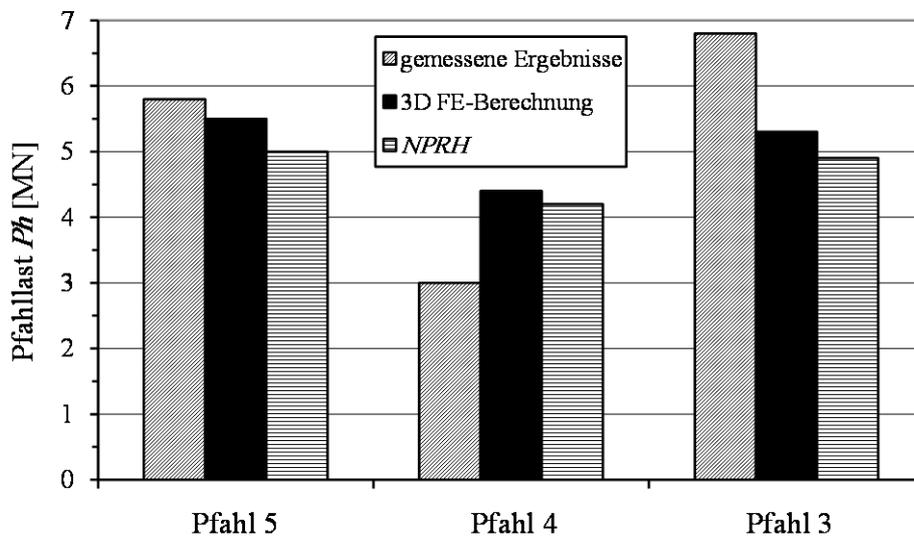


Bild 3-5 Vergleich zwischen Pfahllasten bei der 3D FE-Methode und Feldmessungen mit denen von NPRH (Pfahl 3, 4 und 5)

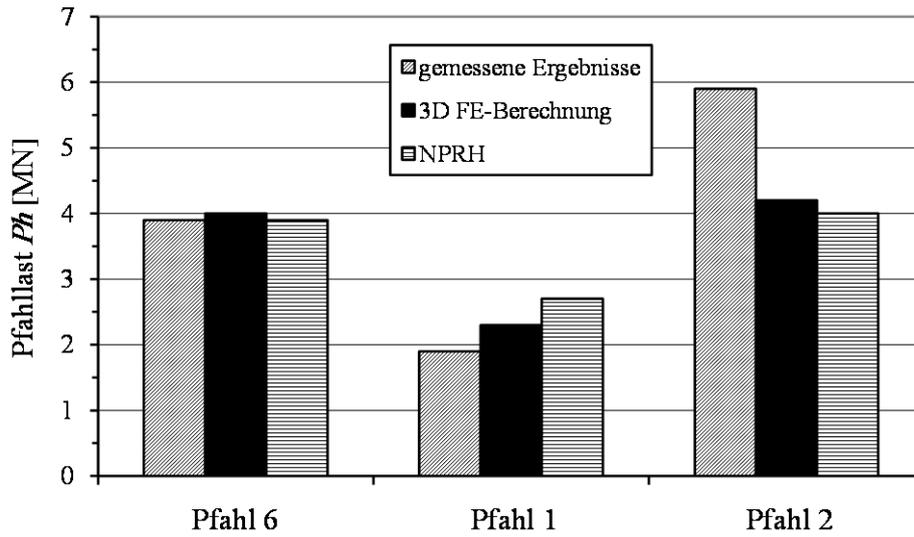


Bild 3-6 Vergleich zwischen Pfahllasten bei der 3D FE-Methode und Feldmessungen mit denen von NPRH (Pfahl 1, 2 und 6)

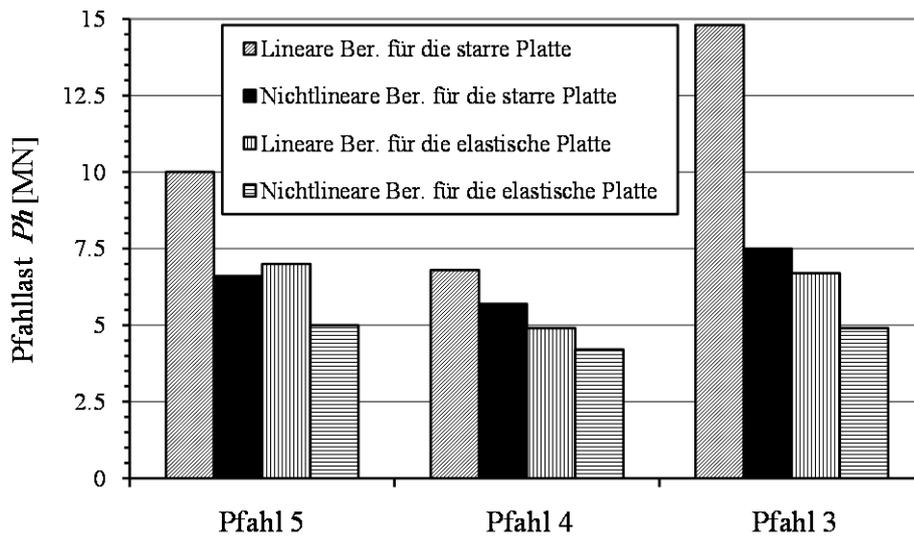


Bild 3-7 Vergleich der Pfahllasten nach verschiedenen Berechnungen (Pfahl 3, 4 und 5)

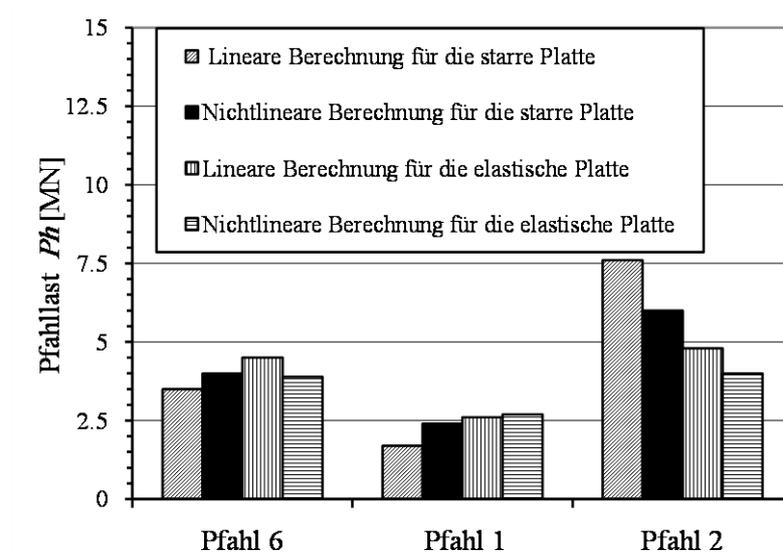


Bild 3-8 Vergleich der Pfahllasten nach verschiedenen Berechnungen (Pfahl 1, 2 und 6)

3.7 Literatur

- [1] *Amann, P./ Breth, H./ Stroh, D. (1975):* Verformungsverhalten des Baugrundes beim Baugrubenaushub und anschließendem Hochhausbau am Beispiel des Frankfurter Ton
Mitteilungen der Versuchsanstalt für Bodenmechanik und Grundbau der Technischen Hochschule Darmstadt, Heft 15
- [2] *Basile, F. (1999):* Non-linear analysis of pile groups
Proc. Instn Civ. Engrs Geotech. Engng. 137, 105-115
- [3] *Baz, O. (1987):* Plates on nonlinear subgrade
Master Thesis, Mansoura University, Egypt
- [4] *Butterfield, R./ Banerjee, K. (1971):* The elastic analysis of compressible piles and pile group
Géotechnique, 21, No. 1, 43-60
- [5] *Clancy, P./ Randolph, M. (1993):* An approximate analysis procedure for piled raft foundation
Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech., 17 (12), 849-869
- [6] *Clancy, P./ Randolph, M. (1994):* Simple design tools for piled raft foundation
Géotechnique, Vol. 46, No. 2, pp. 313-328
- [7] *Fleming, W. (1992):* A new method for single pile settlement predication and analysis
Géotechnique, Vol. 42, No. 3, 411-425
- [8] *El Gendy, M. (1999):* An iterative procedure for foundation-superstructure interaction problem
Port-Said Engineering Research journal, Vol. 3, No. I, pp. 1-19, Egypt
- [9] *El Gendy, M. (2007):* Formulation of a composed coefficient technique for analyzing large piled raft
Scientific Bulletin, Faculty of Engineering, Ain Shams University, Cairo, Egypt. Vol. 42, No. 1, March 2007, pp. 29-56
- [10] *Hasnien, M. (1993):* Finite element analysis of mat resting on nonlinear elastic medium
M. Sc. Thesis, Ain Shams University, Faculty of Engineering, Egypt
- [11] *Jeong, S./ Won, J./ Lee, J. (2003):* Simplified 3D analysis of laterally loaded Pile Groups
TRB Annual Meeting
- [12] *Kany, M./ El Gendy, M./ El Gendy, A. (2007):* Analysis and design of foundations by the Program ELPLA
GEOTEC Software, Zirndorf
- [13] *Kitiyodom, P./ Matsumoto, T. (2002):* A simplified analysis method for piled raft and pile group foundation with batter Piles
Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech., 26, 1349-1369
- [14] *Kitiyodom, P./ Matsumoto, T. (2003):* A simplified analysis method for piled raft foundations in non-homogeneous soils
Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech., 27, 85-109
- [15] *Lee, K./ Xiao, Z. (2001):* A simplified nonlinear approach for pile group settlement analysis in multilayered soils
Can. Geotech. J., 38, 1063-1080
- [16] *Liang, F./ Chen, L. (2004):* A modified variational approach for the analysis of piled raft foundation
Mechanics Research Communications 31, 593-604

- [17] *Lutz, B./ El-Mossallamy, Y./ Richter, Th.* (2006): Ein einfaches, für die Handberechnung geeignetes Berechnungsverfahren zur Abschätzung des globalen Last-Setzungsverhaltens von Kombinierten Pfahl-Plattengründungen
Bauingenieur, Band 81, 61-66
- [18] *Mandolini, A./ Viggiani, C.* (1997): Settlement of piled foundations
Géotechnique, Vol. 47, No. 4, 791-816
- [19] *Mendonça, A./ Paiva, J.* (2003): An elastostatic FEM/BEM analysis of vertically loaded raft and piled raft foundation
Engineering Analysis with Boundary Elements, 27, 919-933
- [20] *Mindlin, R. D.* (1936): Force at a Point in the interior of a semi-infinite solid
Physic 8, 195
- [21] *Poulos, H.* (1968): Analysis of the settlement of pile groups
Géotechnique, Vol. 18, 449-471
- [22] *Poulos, H.* (1999): Approximate computer analysis of pile groups subjected to loads and ground movements
Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech., 23, 1021-1041
- [23] *Poulos, H./ Davis, E.* (1968): The settlement behaviour of single axially loaded incompressible piles and piers
Géotechnique, Vol. 18, 351-371
- [24] *Reul, O./ Randolph, M.F.* (2003): Piled rafts in overconsolidated clay: comparison of in situ measurements and numerical analyses
Géotechnique Vol. 53, No. 3, 301-315
- [25] *Russo, G.* (1998): Numerical analysis of piled rafts
Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech., 22, 477-493
- [26] *Sommer, H.* (1989): Entwicklung der Hochhausgründungen in Frankfurt/ Main
Festkolloquium 20 Jahre Grundbauinstitut, 47-62, Darmstadt
- [27] *Sommer, H./ Katzenbach, R.* (1990): Last-Verformungsverhalten des Messeturmes Frankfurt/ Main
Vorträge der Baugrundtagung 1990 in Karlsruhe, Seite 371-380
- [28] *Sommer, H./ Wittmann, P./ Ripper, P.* (1985): Piled raft foundation of a tall building in Frankfurt clay
Proc. 11th Int. Conf. Soil Mech. Found. Engng, San Francisco 4, 2253-2257
- [29] *Ta, L./ Small, J.* (1997): An approximation for analysis of raft and piled raft foundation
Computer and Geotechnics, Vol. 20, No. 2, pp. 105-123
- [30] *Winkler, E.* (1867): Die Lehre von der Elastizität und Festigkeit
Dominicus, Prag
- [31] *Wong, S./ Poulos, H.* (2005): Approximate pile-to-pile interaction factors between two dissimilar piles
Computer and Geotechnics 32, 613-618