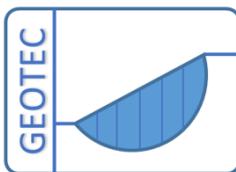


# Untersuchungsfall 4

## Pfahl-Plattengründung des Messeturmes 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](mailto:geotec@geotecsoftware.com)  
[www.geotecsoftware.com](http://www.geotecsoftware.com)

2021

**Inhalt**

Seite

<b>4</b>	<b>Untersuchungsfall 4: <i>Pfahl-Plattengründung des Messturmes in Frankfurt</i> .....</b>	<b>3</b>
4.1	Allgemeines .....	3
4.2	Berechnung der Pfahlplatte.....	5
4.3	Bodenkennwerte .....	8
4.4	Literatur.....	13

## 4 Untersuchungsfall 4: Pfahl-Plattengründung des Messeturmes in Frankfurt

### 4.1 Allgemeines

Der *Messturm* war bis 1997 das höchste Hochhaus in Europa, Bild 4-1. Das Gebäude steht in Frankfurt/ Main in Deutschland. Es ist 256 [m] hoch und steht auf einer Kombinierten Pfahl-Plattengründung.



Bild 4-1 Messturm<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> [http://de.wikipedia.org/wiki/Messturm\\_\(Frankfurt\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Messturm_(Frankfurt))

Mit Benutzung der installierten Instrumente in diesem Fundament wurde ein umfangreiches Messprogramm etabliert, um das Verhalten des Gebäudes zu überwachen. Weil diese Instrumente die Setzungen der Platte, Sohldrücke auf der Platte und Lasten auf den Pfahlköpfen und entlang der Pfahlmäntel notieren, war das Gebäude eine gute Chance für viele Autoren, um ihre Berechnungsverfahren zu überprüfen. Seit der *Messturm* gebaut wurde, haben viele Autoren sein Verhalten untersucht. Einige von ihnen sind *Sommer* (1989), *Sommer/ Katzenbach* (1990), *Thaher* (1991), *Sommer/ Tamaro/ DeBenedittis* (1991), *EL-Mossallamy* (1996), *Katzenbach/ Arslan/ Moormann* (2000), *Reul/ Randolph* (2003) und *Chow/ Small* (2005).

Bild 4-2 zeigt eine Abbildung des *Messturmes* mit der Pfahlplatte nach *Chow/ Small* (2005). Das Gebäude hat einen Keller mit zwei Untergeschossen und 60 Stockwerke mit einer geschätzten Gesamtlast von 1880 [MN]. Das Fundament ist eine quadratische Kombinierte Pfahl-Plattengründung (KPP) mit 58.8 [m] Kantenlänge, die auf Frankfurter Ton in einer Tiefe von 14 [m] unter Gelände gegründet ist. Die Plattendicke variiert von 6 [m] an der Mitte bis zu 3 [m] am Rand. Es sind insgesamt 64 Bohrpfähle mit gleichen Durchmessern von 1.3 [m] unter der Platte in 3 Ringen angeordnet. Die Pfahllängen variieren von 26.9 [m] bei den 28 Pfählen im äußeren Ring bis 30.9 [m] Länge bei den 20 Pfählen im mittleren Ring und bis 34.9 [m] Länge bei den 16 Pfählen im inneren Ring. Der Untergrund am Standort des Gebäudes besteht aus Kiesen und Sanden bis in 8 [m] unter Gelände. Darunter liegen Schichten des Frankfurter Tons, der sich über große Tiefe von mehr als 100 [m] unter Gelände erweitert. Die Grundwassertiefe liegt bei 4.75 [m] unter Gelände.

Der Bau des *Messturmes* begann im Jahr 1988 und wurde fertig im Jahr 1991. Im März 1990 betrug die gemessene Setzung in der Mitte der Platte 8.5 [cm]. Entsprechend *Katzenbach/ Arslan/ Moormann* (2000) war die zuletzt notierte Setzung im Dezember 1998 14.4 [cm] nach *Reul/ Randolph* (2003). Würde der *Messturm* nur auf einer Platte stehen, wäre die zu erwartende Setzung zwischen 35 [cm] und 40 [cm], basierend auf einer geotechnischen Untersuchung nach *Sommer* (1989). Deshalb wurde eine kombinierte Pfahl-Plattengründung geplant, um die Setzung zu reduzieren. Damit war die erwartete Endsetzung in diesem Fall zwischen 15 [cm] und 20 [cm] nach *Sommer/ Katzenbach* (1990). Mit Verwendung der verfügbaren Daten und Ergebnisse des *Messturmes*, die in Details in der vorliegenden Literatur diskutiert werden, wird die gegenwärtige Berechnung von Kombinierten Pfahl-Plattengründungen (KPP) untersucht und überprüft. Die starre Berechnung der Kombinierten Pfahl-Plattengründung (KPP) wird als eine einfache Methode betrachtet, um die Ergebnisse von komplizierten Modellen zu überprüfen. Damit behandelt man die Kombinierte Pfahl-Plattengründung (KPP) in dieser Untersuchung als ein starres Fundament.

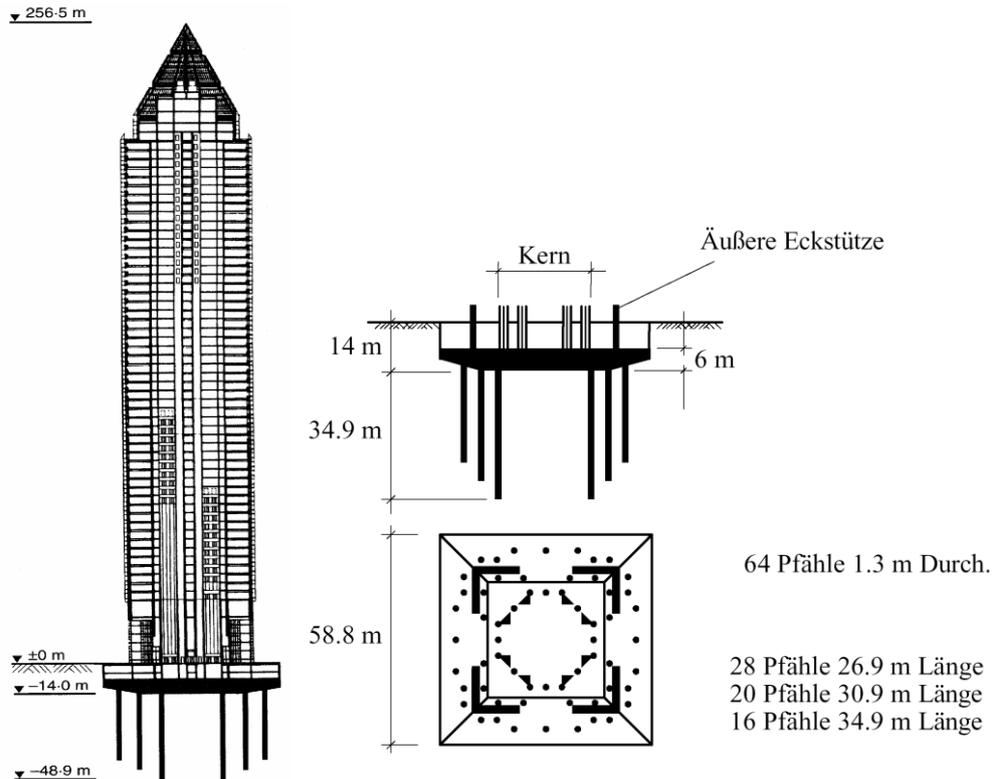


Bild 4-2 Abbildung des Messeturmes mit der Pfahlplatte nach Chow/ Small (2005)

## 4.2 Berechnung der Pfahlplatte

Eine Reihe von Vergleichen wird durchgeführt, um die nichtlineare Berechnung der Kombinierten Pfahl-Plattengründung (KPP) mit Hilfe der Last-Setzungs-Beziehung nach DIN 4014 [6] abzuschätzen. Dann werden die Ergebnisse der anderen analytischen Lösungen und Messungen verglichen mit denen der beiliegenden Berechnung. In den Vergleichen wird die gegenwärtige Berechnung als NPRD bezeichnet.

Wegen der Symmetrie um die  $x$ - und  $y$ -Achse in Form, Größe, Lasten und Baugrund genügt es, nur ein Viertel der Kombinierten Pfahl-Plattengründung (KPP) zu berechnen. Die Platte wird in Elemente unterteilt, wie im Bild 3-12 gezeigt. Elementgrößen in  $x$ - und  $y$ -Richtung der Viertel der Platte sind:

$$2 \times 2.2 + 2.69 + 2 \times 1.74 + 0.89 + 3 \times 2.35 + 2.06 + 2.65 + 1.76 + 2 \times 2.2 = 29.4 \text{ [m]}$$

Ebenso werden die Pfähle in Elemente mit 2.0 [m] Maximallänge unterteilt.

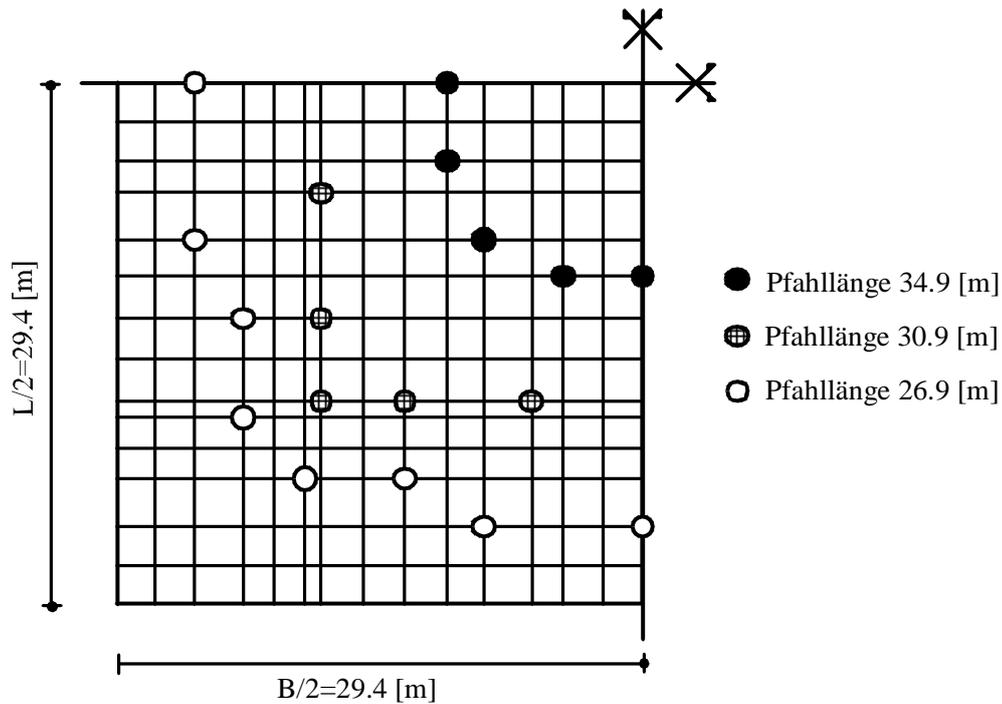


Bild 4-3 Netz der Pfahlplatte des *Messturmes* mit Pfählen (Max. Elementlänge = 2,0 [m])

#### a) Vergleich mit der *Randolphs*chen Berechnung

Um NPRD für die Kombinierte Pfahl-Plattengründung (KPP) des *Messturmes* zu überprüfen, werden die Ergebnisse mit den *Randolphs*chen Berechnungen verglichen, die von *EL-Mossallamy* (1996) durchgeführt wurden. Die Platte wird als starr angenommen, die auf starren Pfählen mit einer mittleren Länge von 30,15 [m] steht. Eine Bodenschicht von  $H = 90$  [m] Mächtigkeit mit konstantem elastischen Modul ist berücksichtigt. Zwei Fälle der Berechnungen werden mit zwei verschiedenen Bodenparametern durchgeführt, wie in der Tabelle 4-1 gezeigt. Für NPRD wird die Last-Setzungs-Beziehung mit der Benutzung einer mittleren undrained Kohäsion von  $c_u = 300$  [kN/m<sup>2</sup>] in beiden Fällen berechnet. Der Grundwasserdruck auf der Platte infolge des Grundwassers wird mit  $P_w = 275$  [kN/m<sup>2</sup>] angenommen. Damit wird die angewandte Gesamteffektivlast auf der Platte einschließlich Eigengewicht von Platte und Pfählen mit  $N = 1600$  [MN] festgelegt.

In Tabelle 4-2 sind die Ergebnisse der unmittelbaren Setzungen und Gesamtsetzungen für die *Randolphs*che Berechnung (1994) und NPRD zusammengefasst, während die Tabelle 4-3 die Ergebnisse der Tragwirkungskoeffizienten der Pfahl-Plattengründung für beide Berechnungen enthält. Obwohl die Prinzipien beider Berechnungen unterschiedlich sind, zeigen die Ergebnisse eine gute Übereinstimmung in der Setzung und ein Unterschied im Tragwirkungskoeffizient der Pfahl-Plattengründung liegt zwischen 3,4 [%] und 7,7 [%].

Tabelle 4-1 Verwendete Eigenschaften des Bodens (*Randolphs*che Berechnung und NRRD)

Fall Nr.	Undränerte Bedingungen		Dränerte Bedingungen	
	$E_s$ [MN/m <sup>2</sup> ]	$\nu_s$ [-]	$E'_s$ [MN/m <sup>2</sup> ]	$\nu'_s$ [-]
Fall 1	70.4	0.5	62.4	0.33
Fall 2	91.4	0.5	81.0	0.33

Tabelle 4-2 Setzungen  $s$  [cm] (*Randolphs*che Berechnung gegen NPRD)

Fall Nr.	Unmittelbare Setzung		Gesamte Setzung	
	<i>Randolphs</i> che Berechnung	NPRD	<i>Randolphs</i> che Berechnung	NPRD
Fall 1	13.0	12.9	17.1	18.1
Fall 2	10.0	10.1	13.7	14.0

Tabelle 4-3 Tragwirkungskoeffizienten der Pfahl-Plattengründung  $\alpha_{kpp}$  [%] (*Randolphs*che Berechnung gegen NPRD)

Fall Nr.	Unmittelbare Setzung		Gesamte Setzung	
	<i>Randolphs</i> che Berechnung	NPRD	<i>Randolphs</i> che Berechnung	NPRD
Fall 1	35.2	31.8	44	39
Fall 2	35.2	27.5	44	38

**b) Vergleich mit der *Thahers*chen Berechnung**

Um die Kombinierte Pfahl-Plattengründung (KPP) zu berechnen, hat *Tha*her (1991) ein analytisches Modell mit Hilfe eines äquivalenten Plattenverfahrens gezeigt, das von den Ergebnissen eines Zentrifugenmodells überprüft wurde. Er hat sein Modell zur Kombinierten Pfahl-Plattengründung (KPP) des *Messeturmes* angewendet, um die starre Setzung abzuschätzen.

### 4.3 Bodenkennwerte

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

#### *Steifemodul*

Auf Grundlage von früherer 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:

$$E_s = E_{so} (1 + 0.35 z) \quad (3.1)$$

während für die Wiederbelastung gilt:

$$W_s = 70 \text{ [MN/m}^2\text{]} \quad (3.2)$$

wobei:

- $E_s$  Steifemodul für Erstbelastung [MN/m<sup>2</sup>]
- $E_{so}$  Anfangssteifemodul,  $E_{so} = 7$  [MN/m<sup>2</sup>]
- $z$  Tiefe ab Oberkante Ton [m]
- $W_s$  Steifemodul für Wiederbelastung [MN/m<sup>2</sup>]

#### *Undrainede Kohäsion*

Die undrainede Kohäsion  $c_u$  des Frankfurter Tons steigt in der Tiefe von  $c_u = 100$  [kN/m<sup>2</sup>] bis  $c_u = 400$  [kN/m<sup>2</sup>] in 70 [m] Tiefe ab Oberkante Ton nach *Sommer/ Katzenbach* (1990). Um die NPRD durchzuführen, wird eine mittlere undrainede Kohäsion von  $c_u = 300$  [kN/m<sup>2</sup>] berücksichtigt.

#### *Poissonzahl*

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

Der Baugrund setzt sich entsprechend Bild 3-13 aus 10 Schichten zusammen, welche hauptsächlich aus Frankfurter Ton bestehen. Die gesamte Tiefe beträgt 102.83 [m] unter Gelände.

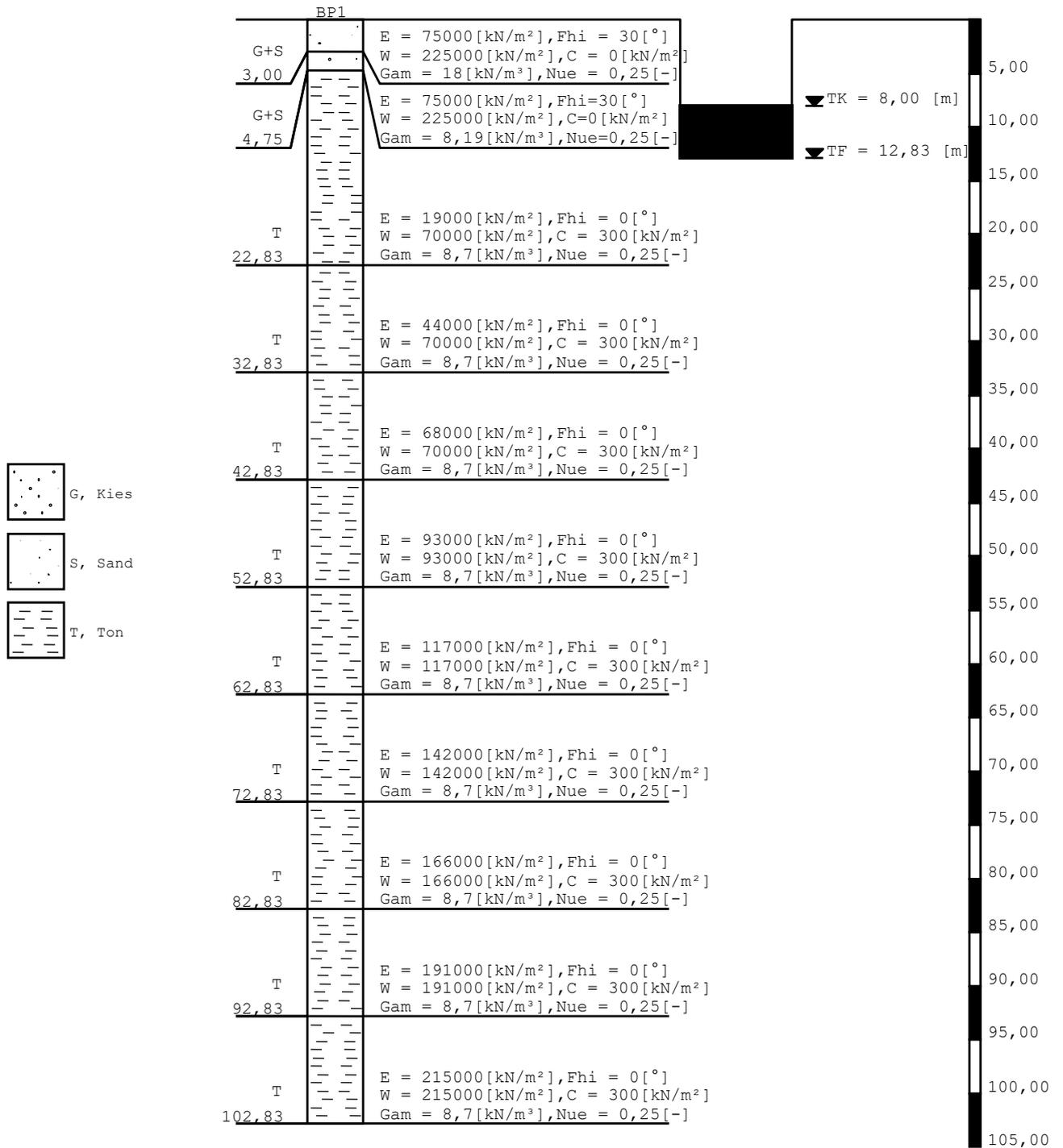


Bild 4-4 Darstellung des Bohrprofils

Tabelle 4-4 zeigt die Ergebnisse der Setzung, Tragwirkungskoeffizienten der Pfahl-Plattengründung und Spitzendruck nach *Thaher* (1991) und NPRD. Die Tabelle zeigt, dass die Setzung und Tragwirkungskoeffizienten der KPP für die beiden Berechnungen fast gleich sind. Es gibt nur eine Differenz von 0.6 [MN/m<sup>2</sup>] für den maximalen Spitzendruck.

In der Tabelle 4-5 werden die Lasten auf jedem Pfahl in den inneren, mittleren und äußeren Ringen gezeigt, die sowohl bei NPRD als auch bei dem Zentrifugenmodell von *Thaher* (1991) erhalten werden. Die Tabelle schließt auch die gemessenen Gesamtpfahllasten nach der Fertigstellung des strukturellen Rahmens ein, die nach *Sommer/ Tamaro/ De Benedittis* (1991) gezeigt werden. Die Tabelle zeigt, dass die Ergebnisse gut übereinstimmen.

Weiterhin zeigt Tabelle 4-5, dass die Pfähle die Lasten zum Boden hauptsächlich durch Mantelreibung übertragen, wie zu den Messungen von *Katzenbach/ Arslan/ Moormann* (2000) bemerkt wird. Die Messungen zeigen an, dass die Lastverteilung innerhalb der Pfahlgruppe ziemlich homogen ist. Dieses Verhalten wird auch in NPRD nicht nur für die Pfahllast, sondern auch für die Pfahlsetzung bemerkt.

Wie in der Tabelle 4-6 gezeigt, kann NPRD die einzelne Setzung im Pfahl infolge der Pfahllast selbst oder infolge Pfahl-Pfahl- und Pfahl-Platten-Interaktion bestimmt werden. Tabelle 4-6 zeigt, dass die meisten Setzungen aufgrund der Eigensetzung des Pfahles verglichen mit der Setzung infolge Pfahl-Pfahl- und Pfahl-Platten-Interaktion für Erstbelastung oder Wiederbelastung anders sind. Die Eigensetzung des Pfahles liegt zwischen 52 [%] und 55 [%] der Gesamtsetzung im Pfahl.

Tabelle 4-4 Vergleich zwischen den Ergebnissen der *Thaherschen* Berechnung und NPRD

Berechnung	Setzung $s_r$ [cm]	Tragwirkungs- koeffizienten $\alpha_{kpp}$ [%]	Min. Spitzendruck [MN/m <sup>2</sup> ]	Max. Spitzendruck [MN/m <sup>2</sup> ]
<i>Thahersche</i> Berechnung	19.00	40.00	1	1.5
NPRD	18.77	40.44	1	2.1

Tabelle 4-5 Pfahllast für NPRD, Zentrifugen-Modell and gemessene Ergebnisse

Pfahlring	NPRD			Gesamt- pfahllast aus Zentrifugen- Modell [MN]	gemessene Gesamt- pfahllast [MN]
	Spitzenkraft [MN]	Mantelkraft [MN]	Gesamt- Pfahllast [MN]		
innerer Ring	2.71	8.55	11.26	14	11
mittlerer Ring	2.74	7.57	10.31	13	13
äußerer Ring	2.72	6.59	9.31	10	10

Tabelle 4-6 Setzung in den Pfählen

Pfahlring	Eigensetzung $s_p$ [cm]	Setzung infolge der Pfahl-Pfahl- und Pfahl-Platten-Interaktion		Gesamt- setzung $s_r$ [cm]	Eigen/Gesamt $s_p/s_r$ [%]
		Erstbelastung $s_e$ [cm]	Wieder- belastung $s_w$ [cm]		
innerer Ring	9.75	4.97	4.05	18.77	52
mittlerer Ring	10.29	4.78	3.70	18.77	55
äußerer Ring	9.86	5.10	3.81	18.77	53

### Bemerkungen

Die Maximaldifferenz zwischen der Setzung im Schritt  $i$  und der Setzung im nächsten Schritt  $i + 1$  wird als eine Genauigkeitszahl betrachtet. In dieser Falluntersuchung wurde die Genauigkeitszahl mit 0.0001 [cm] gewählt.

Für eine einzelne Durchführung der Berechnung wurden die Ergebnisse in relativ kurzer Zeit erhalten. Die Rechenzeit mit einem Pentium 4 PC mit 512 MB RAM zur Berechnung  $a$  war 17 Sekunden, während die Berechnung  $b$  1.2 Minuten dauerte. Dies bezieht sich auf die folgenden Parameter:

- Flexibilitätskoeffizienten infolge der Pfahl-Pfahl-Interaktion werden nur für zwei Kräfte bestimmt: Mantel- und Spitzenkräfte
- Da die Setzung infolge der Last auf dem Pfahl selbst nach DIN 4014 [6] bestimmt wird, können die Flexibilitätskoeffizienten mit Hilfe geschlossener Formgleichungen ohne numerische Probleme berechnet werden statt Verwendung der Gleichungen, die bei numerischer Integration ausgewertet werden müssen
- Da die Flexibilitätsmatrix bei jedem Iterationsschritt erstellt wird, ist es nicht nötig, für den Boden eine globale Steifigkeitsmatrix zu bestimmen
- Statt die Flexibilitätskoeffizienten infolge der Pfahl-Pfahl-Interaktion aus Setzungsgleichungen zu bestimmen, werden die Koeffizienten aus der Last-Setzungs-Beziehung nach DIN 4014 [6] bestimmt

Diese Falluntersuchung zeigt, dass NPRD 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. Daneben gibt NPRD eine gute Übereinstimmung mit vorherigen theoretischen und empirischen nichtlinearen Berechnungen der Kombinierten Pfahl-Plattengründung und braucht weniger Rechenzeit, verglichen mit anderen komplizierten Modellen, die bei der dreidimensionalen finiten Element-Berechnung verwendet werden. Als weiteres vergleichendes Beispiel, um das zu beweisen, ergab eine Berechnung des *Messturmes* mit Verwendung der dreidimensionalen finiten Element-Berechnung nach *Randolph* (1994) und *Reul/Randolph* (2003) eine Setzung von 17.4 [cm] in der Mitte, während die Setzung mit NPRD 18.77 [cm] ergab.

#### 4.4 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] *Basile, F.* (2003): Analysis and design of pile groups  
Numerical Analysis and Modelling in Geomechanics  
Spon press (eds J. W. Bull), London, Chapter 10, pp 278-315
- [4] *Boussinesq, J.* (1885): Applications des Potentiels a l'Etude de l'Equilibre et du Mouvement des Solides Elastiques  
Gauthier Villars, Paris
- [5] *Chow, H./ Small J.* (2005): Behaviour of Piled Rafts with Piles of Different Lengths and Diameters under Vertical Loading  
GSP 132 Advanced in Deep Foundations, ASCE
- [6] DIN 4014: Bohrpfähle Herstellung, Bemessung und Tragverhalten  
Ausgabe März 1990
- [7] *Duncan, J./ Chang, C.* (1970): Non-linear analysis of stress and strain in soils  
Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 96, No. SM5, pp. 1121-1124
- [8] ECP 197: Egyptian Code for Soil Mechanics-Design and Construction of Foundations Part 4, Deep Foundations (in Arabic) 1995
- [9] *El Gendy, M./ Hanisch, J./ Kany, M.* (2006): Empirische nichtlineare Berechnung von Kombinierten Pfahl-Plattengründungen  
Bautechnik 9/06
- [10] *Kany, M./ El Gendy, M./ El Gendy, A.* (2006): Benutzerhandbuch für das Programm *ELPLA* (eingebunden in das Programmsystem *GEOTEC*), Zirndorf
- [11] *Katzenbach, R./ Arslan, U./ Moormann, C.* (2000): Piled raft foundation projects in Germany  
Chapter 13 in: Design application of raft foundations  
Edited by Hemsley, Thomas Telford
- [12] *Mandolini, A./ Viggiani, C.* (1997): Settlement of piled foundations  
Géotechnique, 47, No. 4, 791-816
- [13] *Mindlin, R.* (1936): Force at a point in the interior of a semi-infinite-solid  
Physics 7, 195-202
- [14] *EL-Mossallamy, Y.* (1996): Ein Berechnungsmodell zum Tragverhalten der Kombinierten Pfahl-Plattengründung  
Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt, Darmstadt, D17
- [15] *Poulos, H./ Davis, E.* (1980): Pile Foundation Analysis and Design  
John Wiley & Sons, Inc.
- [16] *Randolph, M. F.* (1994): Design methods for pile groups and pile rafts  
XXX ICSMFE New Dehli, India. Rotterdam Balkema Vol. 4, S. 61-82
- [17] *Reul, O./ Randolph, M.F.* (2003): Piled rafts in overconsolidated clay: comparison of in situ measurements and numerical analyses  
Géotechnique 53, No. 3, 301-315

- [18] *Russo, G.* (1998): Numerical analysis of piled raft  
Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech., 22, 477-493
- [19] *Sommer, H.* (1989): Entwicklung der Hochhausgründungen in Frankfurt/ Main  
Festkolloquium 1989, 20 Jahre Grundbauinstitut, Darmstadt
- [20] *Sommer, H./ Katzenbach, R.* (1990): Last-Verformungsverhalten des Meseturmes  
Frankfurt/ Main  
Vorträge der Baugrundtagung 1990 in Karlsruhe, Seite 371-380
- [21] *Sommer, H./ Tamaro, G./ DeBenedittis, C.* (1991): Messe Turm, foundation for the tallest  
building in Europe  
4th International Conference on Piling and Deep Foundations, Italy, 139-145
- [22] *Thaher, M.* (1991): Tragverhalten von Pfahl-Platten-Gründungen im bindigen Baugrund,  
Berechnungsmodelle und Zentrifugen-Modellversuche  
Dissertation, Institut für Grundbau der Ruhr-Universität, Bochum, Heft 15
- [23] *Viggiani, C.* (1998): Pile groups and pile raft behaviour  
Proc. of the 3<sup>rd</sup> int. Geot. Sem. on Deep Foundations on Bored and Auger Piles  
Ghent, Belgien 19.-21- Oct. 1998. Balkema Rotterdam, S. 77-91
- [24] *Witzel, M./ Kempfert, H. G.* (2005): A simple approach to predict the load settlement  
behavior of precast driven piles with due consideration of the driving process  
GSP 132 Advanced in Deep Foundations, Proceeding of Sessions of the Geo-Frontiers  
2005 Congress, Austin, Texas, ASCE
- [25] Richtlinie für den Entwurf, die Bemessung und den Bau  
von Kombinierten Pfahl-Plattengründungen (KPP) - (KPP-Richtlinie)  
Hrg. Arbeitskreis "Pfähle" der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V., Juli 2001
- Enthalten in: Kombinierte Pfahl-Plattengründungen  
Hrg. *Hanisch, J./ Katzenbach, R./ König, G.* (2002)  
Ernst & Sohn