

**Untersuchungsfall 5**

**Pfahl-Plattengründung  
des *Westend 1* in Frankfurt**

**Inhalt**

Seite

<b>5</b>	<b>Untersuchungsfall 5: Pfahl-Plattengründung des <i>Westend 1</i> in Frankfurt .....</b>	<b>3</b>
5.1	Allgemeines .....	3
5.2	Berechnungsverfahren der Kombinierten Pfahl-Plattengründung.....	5
5.3	FE-Net.....	6
5.4	Lastdaten .....	6
5.5	Pfahl- und Plattenmaterial.....	6
5.6	Baugrunddaten .....	7
5.7	Ergebnisse .....	12
5.8	Messungen und andere Ergebnisse .....	12
5.9	Bewertung .....	12
5.10	References.....	17

---

## 5 Untersuchungsfall 5: Pfahl-Plattengründung des *Westend 1* in Frankfurt

### 5.1 Allgemeines

*Westend 1* hat eine Höhe von 208 [m] und steht auf einer Pfahl-Plattengründung. Das Hochhaus liegt in der Stadt Frankfurt, Deutschland. Es wurde 1993 fertiggestellt. Das Hochhaus war bis 1993 der dritthöchste Hochhaus in Frankfurt und auch in Deutschland, Bild 5-1.

Mit Benutzung der installierten Instrumente im Fundament des *Westend 1* wurde ein umfangreiches Messprogramm etabliert, um das Verhalten des Gebäudes zu überwachen. Weil diese Instrumente die Setzungen von Platte, Sohlrücken 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 *Westend 1* gebaut wurde, haben viele Autoren sein Verhalten untersucht. *Poulos et al.* (1997), *Poulos* (2001), *Reul* und *Randolph* (2003) und *Chaudhary* (2010) haben umfangreiche Untersuchungen durchgeführt, um die Pfahl-Plattengründung nach Verfahren von *Poulos und Davis* (1980), *Poulos* (1991), *Poulos* (1994), *Ta and Small* (1996), *Sinha* (1996), *Franke et al.* (1994), *Randolph* (1983) und *Clancy and Randolph* (1993) zu berechnen. Die Ergebnisse wurden miteinander und mit denen der Messungen verglichen.

Das Gebäude hat einen Keller mit drei Untergeschossen und 51 Stockwerken mit einem durchschnittlichen geschätzten angewandten Druck von 412 [kN/m<sup>2</sup>]. Das Gebäude wurde auf einer Fundamentplatte mit einer Fläche von ca. 2900 [m<sup>2</sup>]. Es wurde auf Frankfurter Ton in einer Tiefe von 14.5 [m] unter der Gelände gegründet. Die Platte weist in der Mitte eine Dicke von 4.65 [m] auf, die sich zu den Rändern auf 3 [m] verjüngt. Gestützt wird sie durch 40 gleich großen Bohrpfähle mit einem Durchmesser von je  $D = 1.3$  [m] und Pfahllängen 30 [m]. Auf zwei Ringen unter den schweren Stützen des Überbaus sind die Pfähle angeordnet.

Pfahl-Plattengründung des *Westend 1*

---



Bild 5-1 *Westend 1* nach [https://en.wikipedia.org/wiki/Westendstrasse\\_1](https://en.wikipedia.org/wiki/Westendstrasse_1)

Bild 5-2 zeigt die Abbildung des *Westend 1* mit der Pfahlplatte nach *Reul and Randolph* (2003).

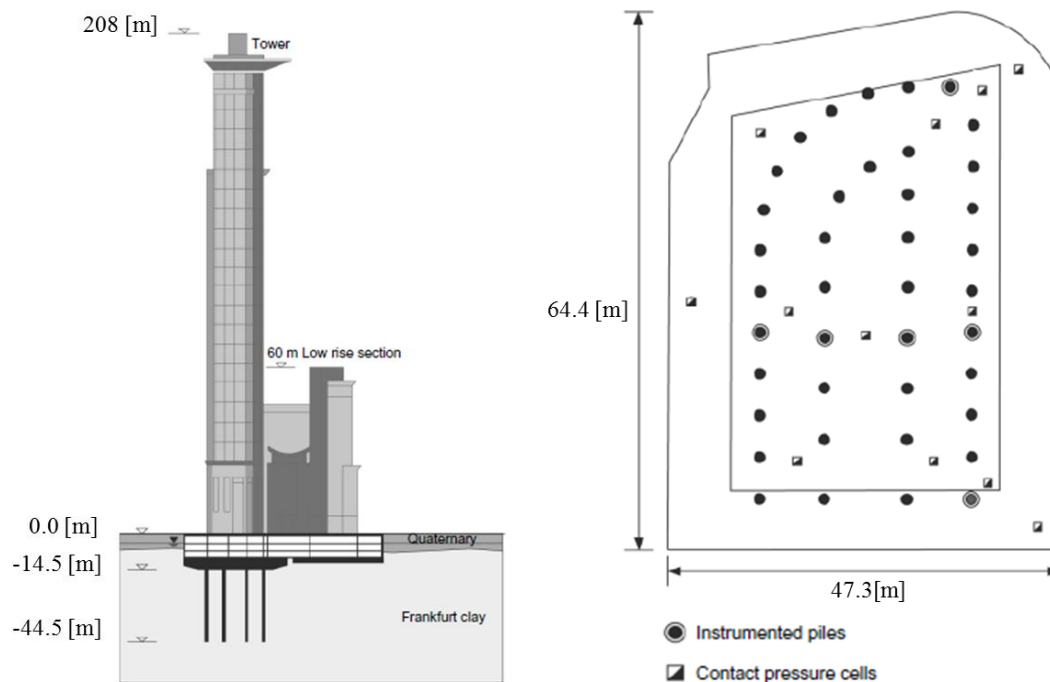


Bild 5-2 Abbildung des *Westend 1* mit der Pfahlplatte nach *Reul and Randolph* (2003)

## 5.2 Berechnungsverfahren der Kombinierten Pfahl-Plattengründung

Um die Berechnungsverfahren der Kombinierten Pfahl-Plattengründung hinsichtlich ihrer Qualität abzuschätzen, werden insgesamt 4 nichtlineare Berechnungen mit *ELPLA* durchgeführt wie folgt, *El Gendy et al.* (2006) and *El Gendy* (2007):

- Nichtlineare Berechnung mit Verwendung einer hyperbolischen Funktion für Last-Setzungskurve des Pfahles
- Nichtlineare Berechnung mit Verwendung der DIN 4014 für Last-Setzungskurve des Pfahles
- Nichtlineare Berechnung mit Verwendung der EA-Pfähle (untere Tabellenwerte) für Last-Setzungskurve des Pfahles
- Nichtlineare Berechnung mit Verwendung der EA-Pfähle (obere Tabellenwerte) für Last-Setzungskurve des Pfahles

Das Fundamentsystem wird als starre und elastische Pfahl-Plattengründungen berechnet. In diesem Fall wird die Platte als entweder starre oder elastische Platte betrachtet, die auf gleichen starren Pfählen abgestützt ist.

Eine Reihe von Vergleichen wird durchgeführt, um die nichtlinearen Berechnungen der Pfahl-Plattengründungen für Last-Setzungsbeziehungen von Pfählen zu bewerten. Darin werden die Ergebnisse anderer numerischer Methoden und Messungen mit denen von *ELPLA* verglichen.

### 5.3 FE-Net

Die Platte wird in dreieckige Elemente mit einer Maximallänge von 2.0 [m] unterteilt, wie im Bild 5-3 gezeigt. Ebenso werden die Pfähle in Elemente mit 2.0 [m] Maximallänge unterteilt.

### 5.4 Lastdaten

Die gesamte effektive vertikale Last (ausschließlich Eigengewicht von Platte und Pfählen) auf der Gründungsplatte beträgt  $N=950$  [MN], wobei der Auftrieb auf der Platte  $P_w=81$  [kN/m<sup>2</sup>] beträgt. Die Last wird als Flächenlast von 412 [kN/m<sup>2</sup>] auf der gesamten Platte angesetzt.

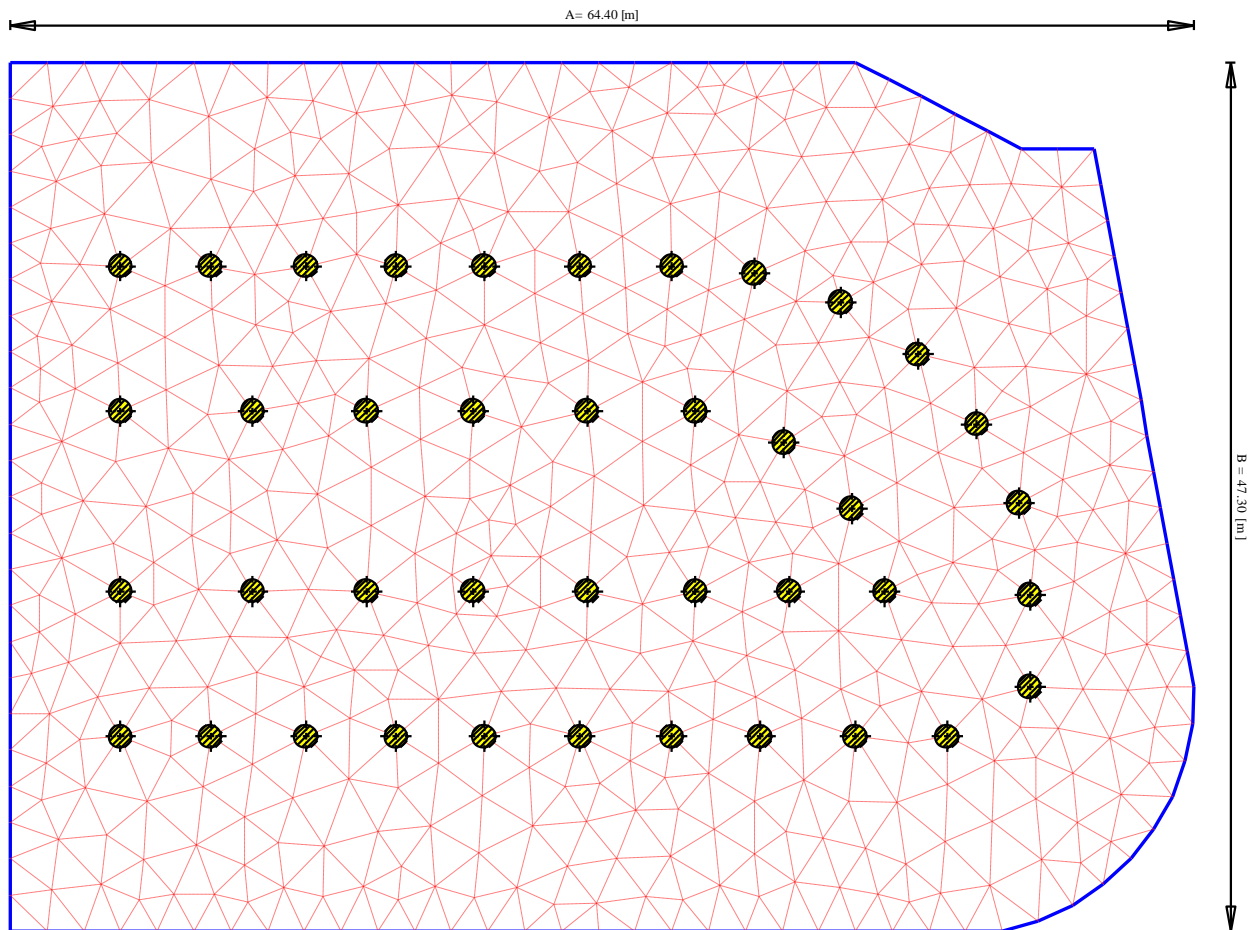


Bild 5-3 Netz der Pfahlplatte des *Westend 1* mit Pfählen

### 5.5 Pfahl- und Plattenmaterial

Die Dicke der Platte wird mit einem Mittelwert von 4.2 [m] angesetzt. Die Pfähle sind mit dem entsprechenden Durchmesser von 1.3 [m] und der Länge von 30 [m] in der Berechnung berücksichtigt. Als Pfahl- und Plattenmaterial wurden folgende Werte angesetzt:

Als Plattenmaterial wurden folgende Werte angesetzt:

Elastizitätsmodul	$E_b = 34\,000$	[MN/m <sup>2</sup> ]
Poissonzahl	$\nu_p = 0.25$	[-]
Wichte	$\gamma_b = 0$	[kN/m <sup>3</sup> ]

Als Pfahlmaterial wurden folgende Werte angesetzt:

Für die Pfähle gilt:

Elastizitätsmodul	$E_b = 22\,000$	$[\text{MN}/\text{m}^2]$
Wichte	$\gamma_b = 0$	$[\text{kN}/\text{m}^3]$

## 5.6 Baugrunddaten

Die Platte wurde auf einem typischen Frankfurter Ton in einer Tiefe von 14.5 [m] unter der Gelände gegründet. Die Gründungstiefe der Platte wird mit einem Mittelwert von 12.82 [m] angesetzt. 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 Eigenschaften des Bodens in der numerischen Berechnung können wie folgt beschrieben werden:

### Steifemodul

Der Elastizitätsmodul der Sand-/ Kiesschicht unter der Platte nach *Reul/ Randolph* (2003) ist  $E = 75000$  [kN/m<sup>2</sup>]. Der Elastizitätsmodul für Wiederbelastung wurde mit  $W = 3 E$  angesetzt. Laut *Amann et al.* (1975) auf Grundlage von früheren Berechnungen wird die Verteilung des Steifemoduls für die Erstbelastung des Frankfurter Tons mit der Tiefe durch folgende empirische Formel ermittelt:

$$E_s = E_{so} (1 + 0.35 z) \quad (5.1)$$

während für die Wiederbelastung gilt:

$$W_s = 70 [\text{MN}/\text{m}^2] \quad (5.2)$$

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> ]

### Undrained Kohäsion

Nach *Sommer/ Katzenbach* (1990) steigt mit der Tiefe die undrained Kohäsion  $c_u$  des Frankfurter Tons 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. Für die Berechnung mit Verwendung der DIN 4014 und der EA-Pfähle für Last-Setzungskurve des Pfahles wird die mittlere undrained Kohäsion von  $c_u = 200$  [kN/m<sup>2</sup>] angenommen.

### Poissonzahl

Die *Poissonzahl* des Kieses und des Sandes wird mit  $\nu_s = 0.25$  [-] angesetzt.

### Grenzpfalllast

*Russo* (1998) schlug eine Grenzmantelreibung bei der Berechnung mit einer hyperbolischen Funktion nicht weniger als  $\tau = 180$  [kN/m<sup>2</sup>] vor, die einer undrained Kohäsion von  $c_u = 200$  [kN/m<sup>2</sup>] entspricht. Um die Berechnung mit einer hyperbolischen Funktion durchzuführen, wird eine Grenzmantelreibung von  $\tau = 180$  [kN/m<sup>2</sup>] berücksichtigt. Somit ergibt sich eine Grenzpfalllast von  $Ql = 22$  [MN] wie folgt:

$$Q_l = \tau * \pi * D * l = 180 * \pi * 1.3 * 30 = 22054 \text{ [kN]} = 22 \text{ [MN]} \quad (5.3)$$

wobei:

- $Q_l$  Grenzpfalllast, [MN]
- $\tau$  Grenzmantelreibung,  $\tau = 180 \text{ [kN/m}^2\text{]}$
- $D$  Pfahldurchmesser, [m]
- $l$  Pfahl länge, [m]

Die Grenzpfalllast  $Q_l$  ist ein geometrischer Parameter der hyperbolischen Beziehung. In einigen Fällen ist der Wert von  $Q_l$  von der tatsächlichen Tragfähigkeitpfahllast unterschiedlich.  $Q_l=1.5$  bis  $2 Q_u$ , wobei  $Q_u$  die Tragfähigkeitpfahllast ist.

#### *Grundwasser*

Die Grundwassertiefe liegt bei 4.75 [m] unter Gelände.

#### *Bodenkennwerte*

Der Baugrund setzt sich entsprechend Bild 5-4 aus 12 Schichten zusammen, welche hauptsächlich aus Frankfurter Ton bestehen. Die gesamte Tiefe beträgt  $H = 108 \text{ [m]}$  unter Gelände. Bild 5-4 zeigt die Bodenkennwerte für die 12 Schichten.

Bild 5-5 bis Bild 5-8 zeigen die Last-Setzungsbeziehungen für die verschiedenen Berechnungen.



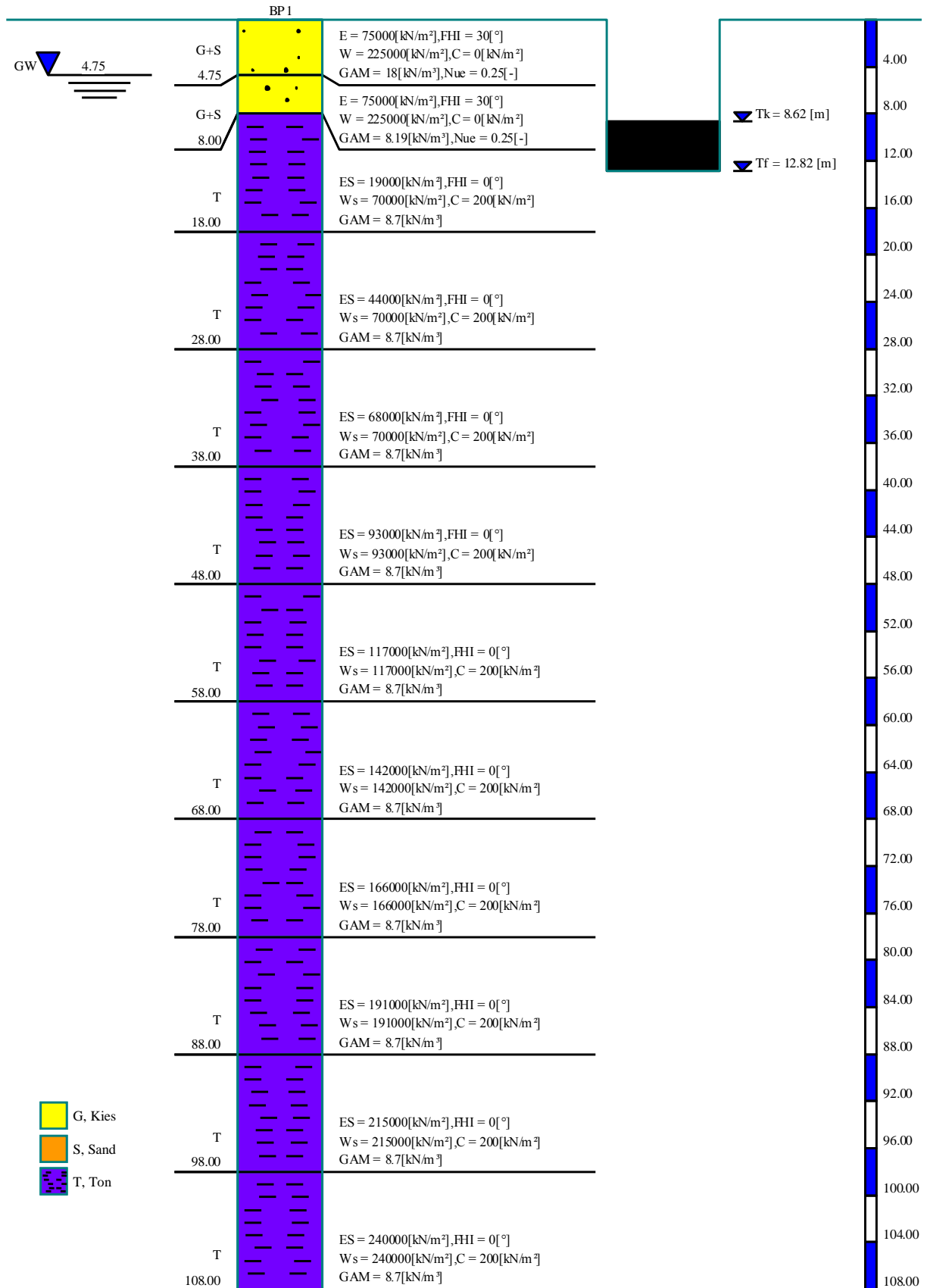


Bild 5-4 Darstellung des Bohrprofils

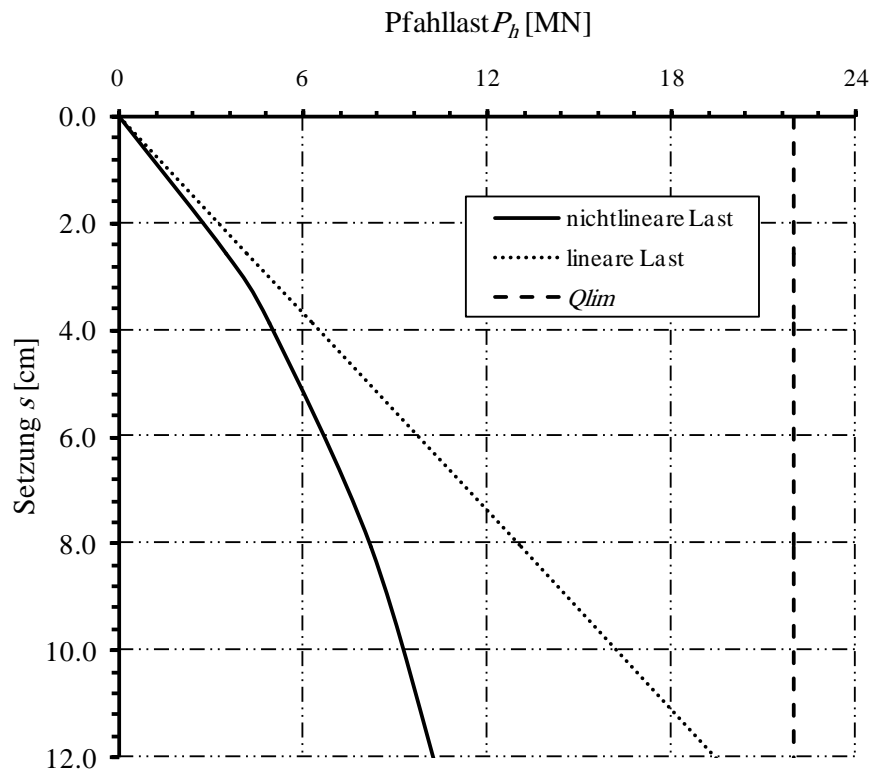


Bild 5-5 Last-Setzungsbeziehung (hyperbolische Funktion)

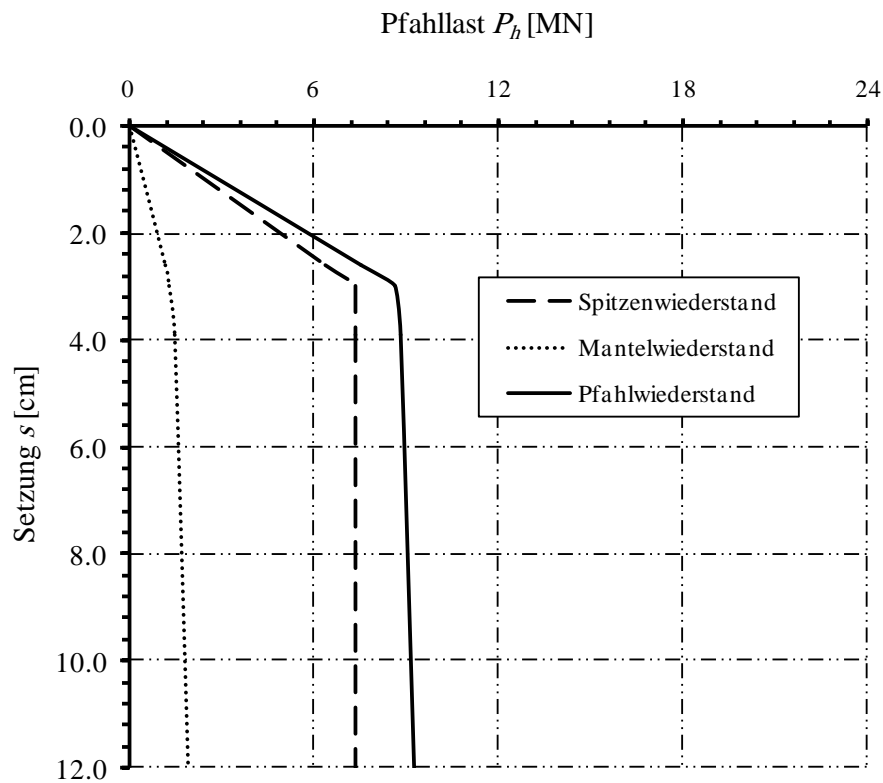


Bild 5-6 Lastsetzungslinie des Pfahles nach DIN 4014

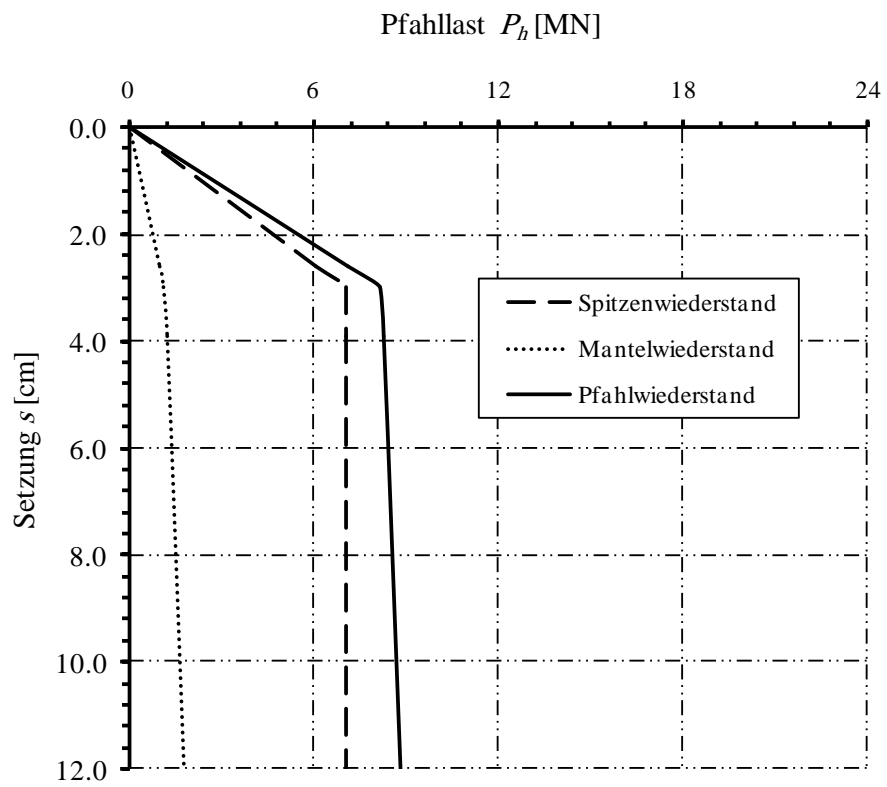


Bild 5-7 Lastsetzungslinie des Pfahles nach EA-Pfähle für untere Tabellenwerte

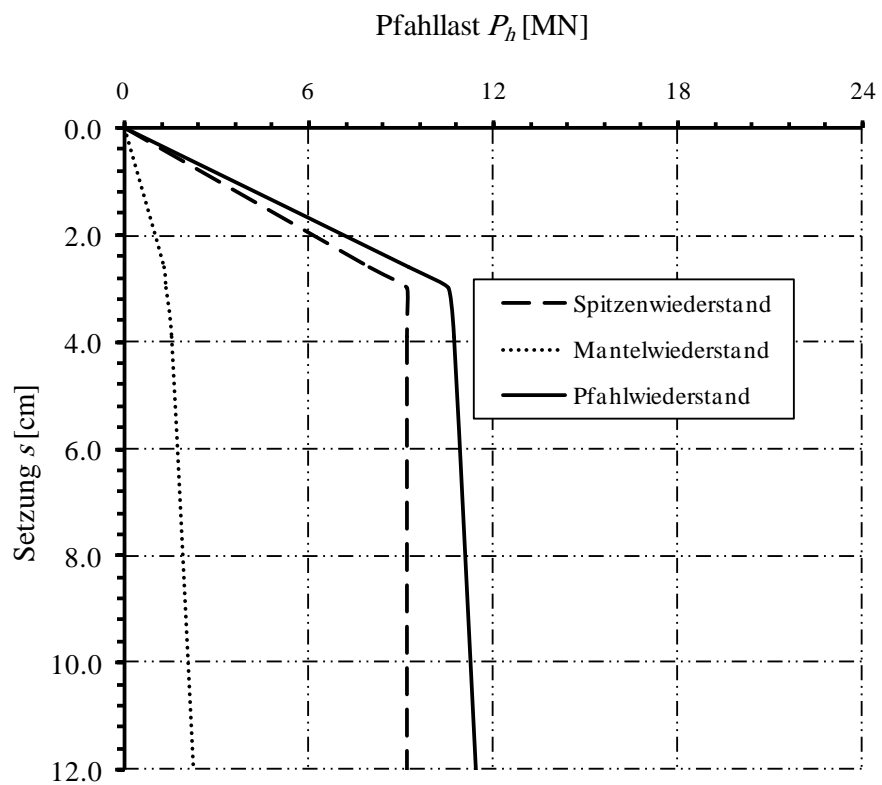


Bild 5-8 Lastsetzungslinie des Pfahles nach EA-Pfähle für obere Tabellenwerte

## 5.7 Ergebnisse

Als Beispiele für die Ergebnisse verschiedener Berechnungen bei *ELPLA*, zeigen Bild 5-9 und Bild 5-10 die Setzungen als Isolinien für die starre Pfahlplatte und auch für die elastische Pfahlplatte mit Verwendung der EA-Pfähle für Last-Setzungskurve des Pfahles (untere und obere Tabellenwerte). Pfahllasten als Kreisdiagramme für die starre Pfahlplatte und auch für die elastische Pfahlplatte mit Verwendung einer hyperbolischen Funktion für Last-Setzungskurve des Pfahles sind im Bild 5-11 und Bild 5-12 abgebildet.

## 5.8 Messungen und andere Ergebnisse

Der Bau des *Westend 1* begann im Jahr 1990 und wurde fertig im Jahr 1993. Die gemessene Setzung in der Mitte der Pfahlplatte 2.5 Jahre nach Fertigstellung der Rohbauwand nach *Lutz et al.* (1996) beträgt 12 [cm], während der Tragwirkungskoeffizient der Pfahl-Plattengründung aus den gemessenen Pfahllasten  $\alpha_{kpp}=0.49$  beträgt. Die gemessenen minimalen und maximalen Pfahllasten von 9.2 [MN] bzw. 14.9 [MN] wurden nach *Franke and Lutz* (1994) gemessen.

Zum Vergleich zeigt Bild 5-13 die anderen Ergebnisse für die anderen Berechnungen, die von *Reul and Randolph* (2003) vorgestellten. Mit der dreidimensionalen Finiten Element-Methode wurde nach *Reul/ Randolph* (2003) eine Setzung von 10.9 [cm] berechnet.

## 5.9 Bewertung

Die Ergebnisse der Setzungen, Tragwirkungskoeffizienten der Pfahl-Plattengründung  $\alpha_{kp}$  und minimale und maximale Pfahllasten, die von *ELPLA* erhalten wurden, werden mit den Messungen im Bild 5-14 verglichen.

Aus Bild 5-14 kann geschlossen werden, dass die Ergebnisse, die aus verschiedenen in *ELPLA* verfügbaren Berechnungen erhalten werden, eine schnelle und akzeptable Schätzung für die Setzung, den Tragwirkungskoeffizient der Pfahl-Plattengründung und Pfahllasten, liefern können.

Dieser Untersuchungsfall zeigt auch, dass die in *ELPLA* verfügbaren Berechnungsverfahren zur Berechnung großer Plattenprobleme geeignet sind. Weil sie im Vergleich zu anderen komplizierten Modellen der dreidimensionalen Finiten Element-Methode weniger Rechenzeit benötigen.

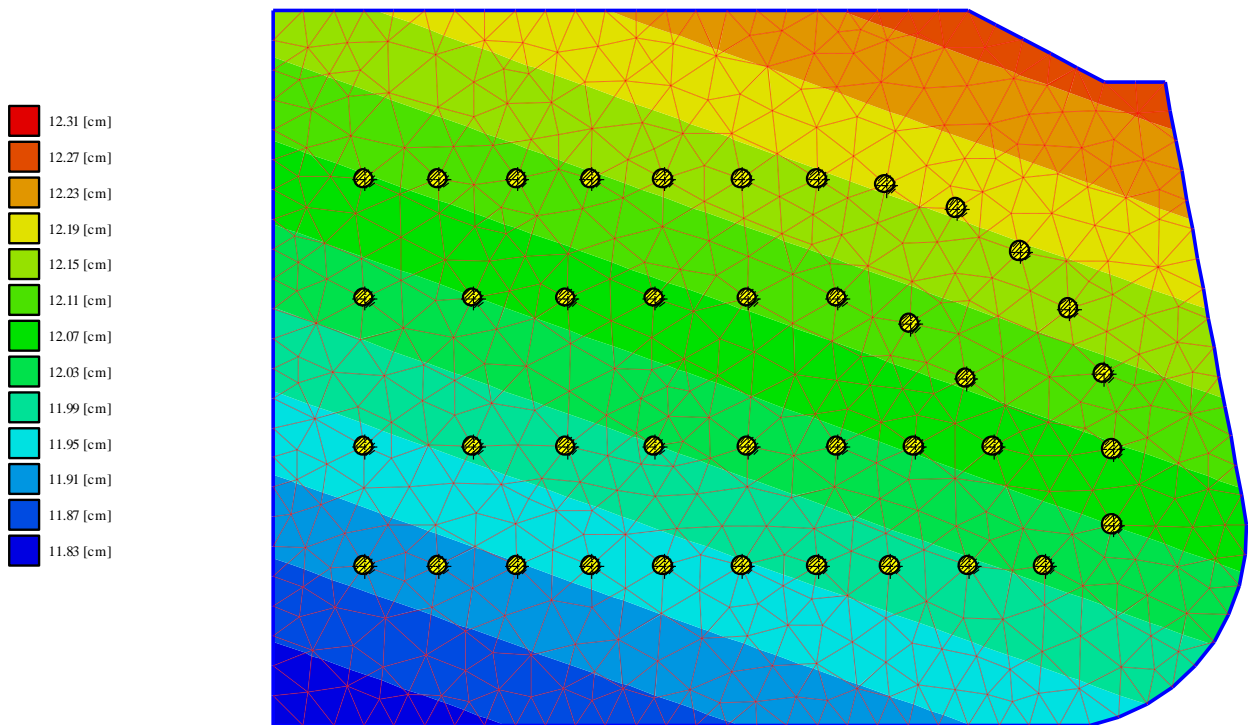


Bild 5-9 Settlement für die starre Pfahlplatte mit Verwendung der EA-Pfähle (untere Tabellenwerte) für Last-Setzungskurve des Pfahles

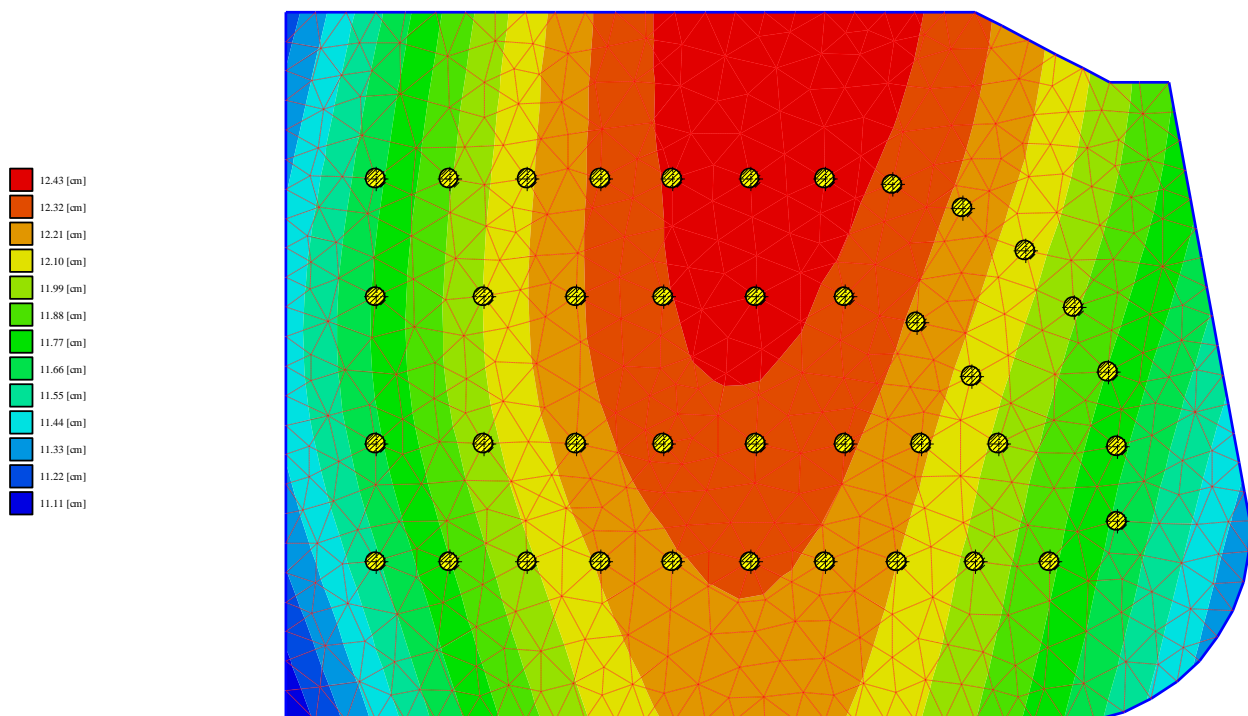


Bild 5-10 Settlement für die elastische Pfahlplatte mit Verwendung der EA-Pfähle (untere Tabellenwerte) für Last-Setzungskurve des Pfahles

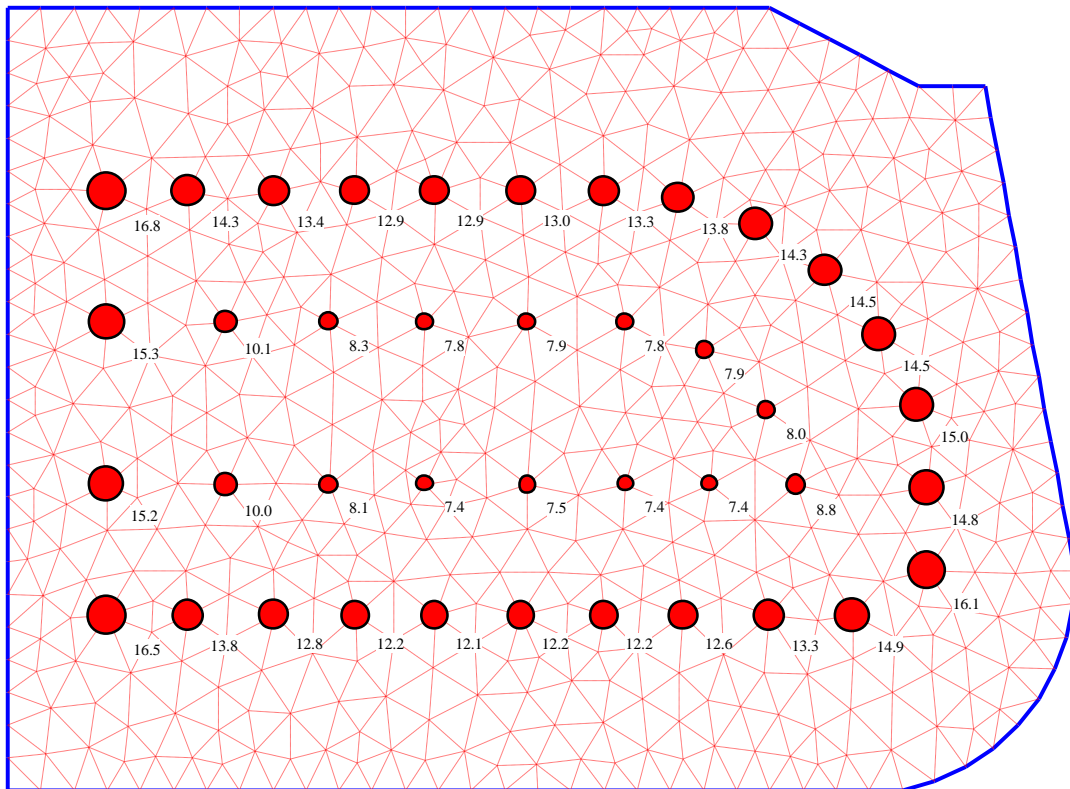


Bild 5-11 Pfahllasten [MN] für die starre Pfahlplatte mit Verwendung einer hyperbolischen Funktion für Last-Setzungskurve des Pfahles

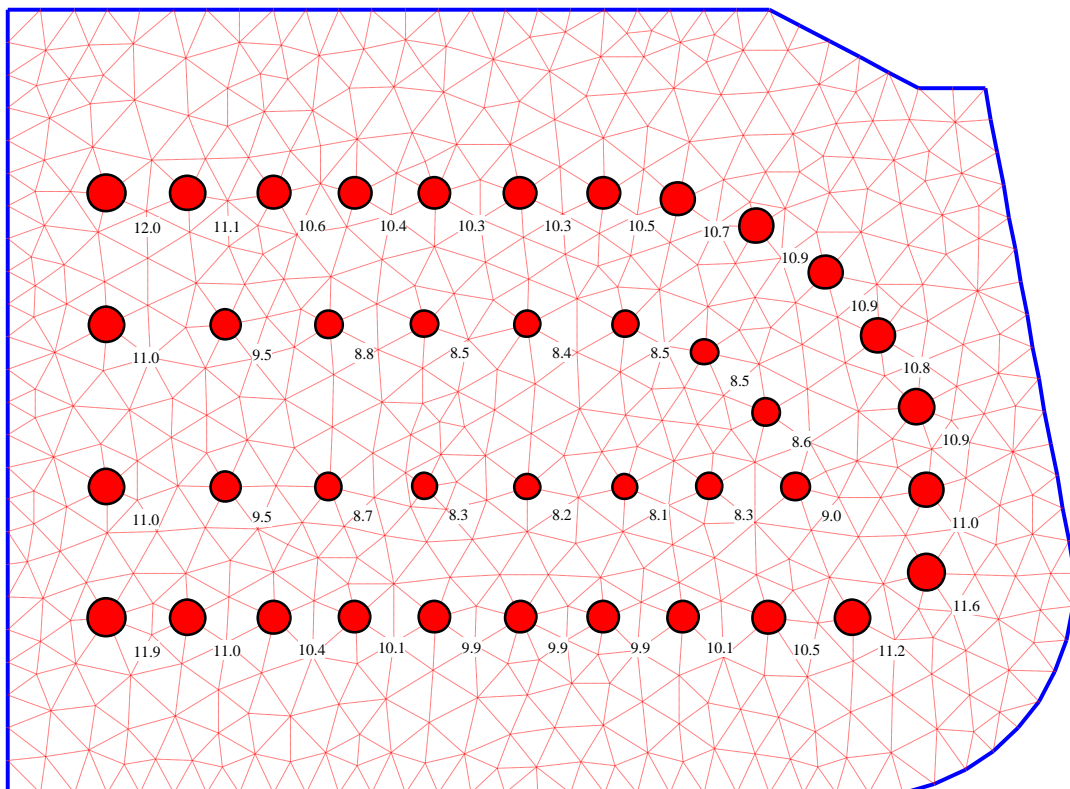


Bild 5-12 Pfahllasten [MN] für die elastische Pfahlplatte mit Verwendung einer hyperbolischen Funktion für Last-Setzungskurve des Pfahles

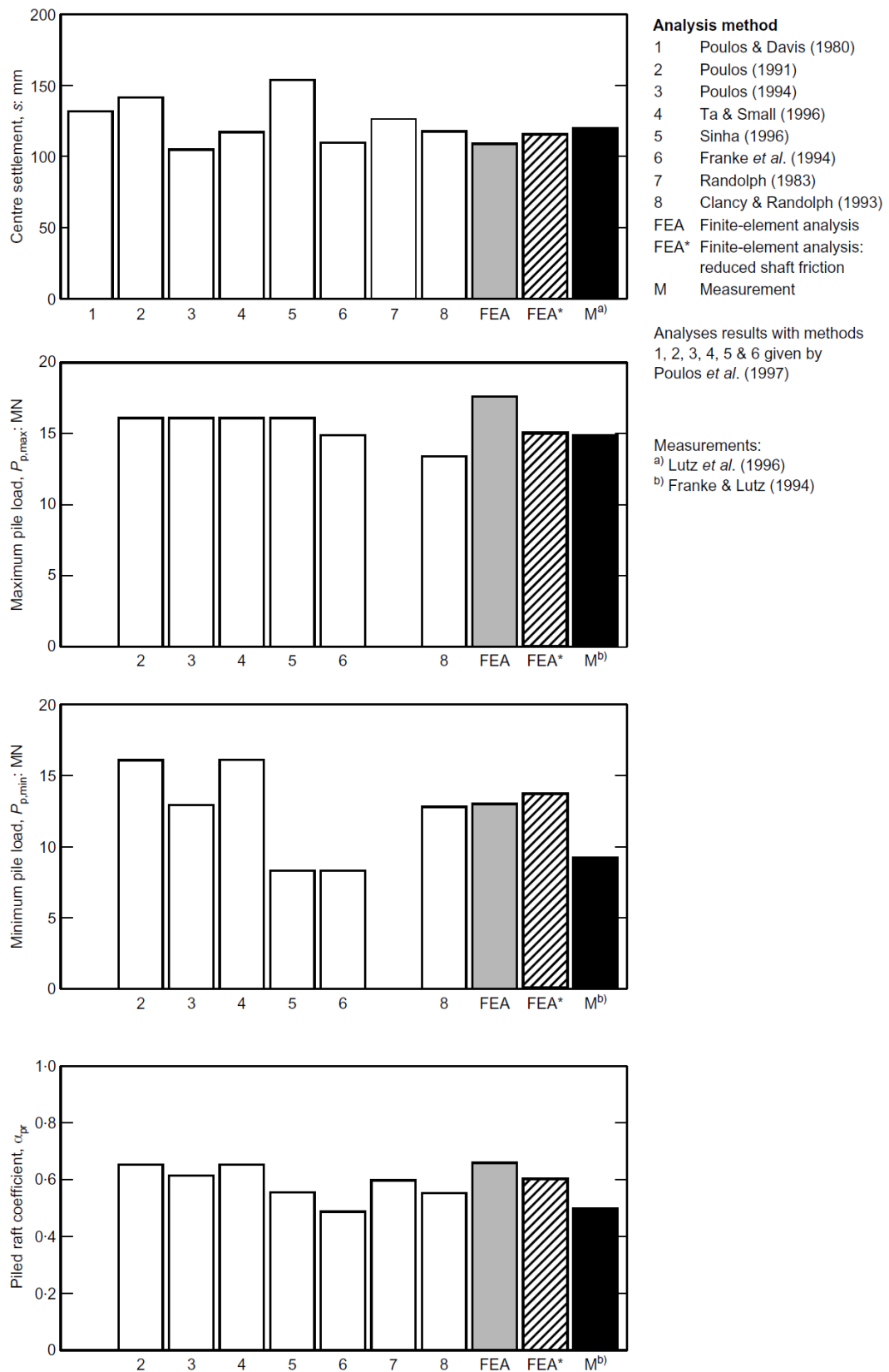


Bild 5-13 Vergleich verschiedener Methoden und Messungen ( Reul and Randolph (2003))

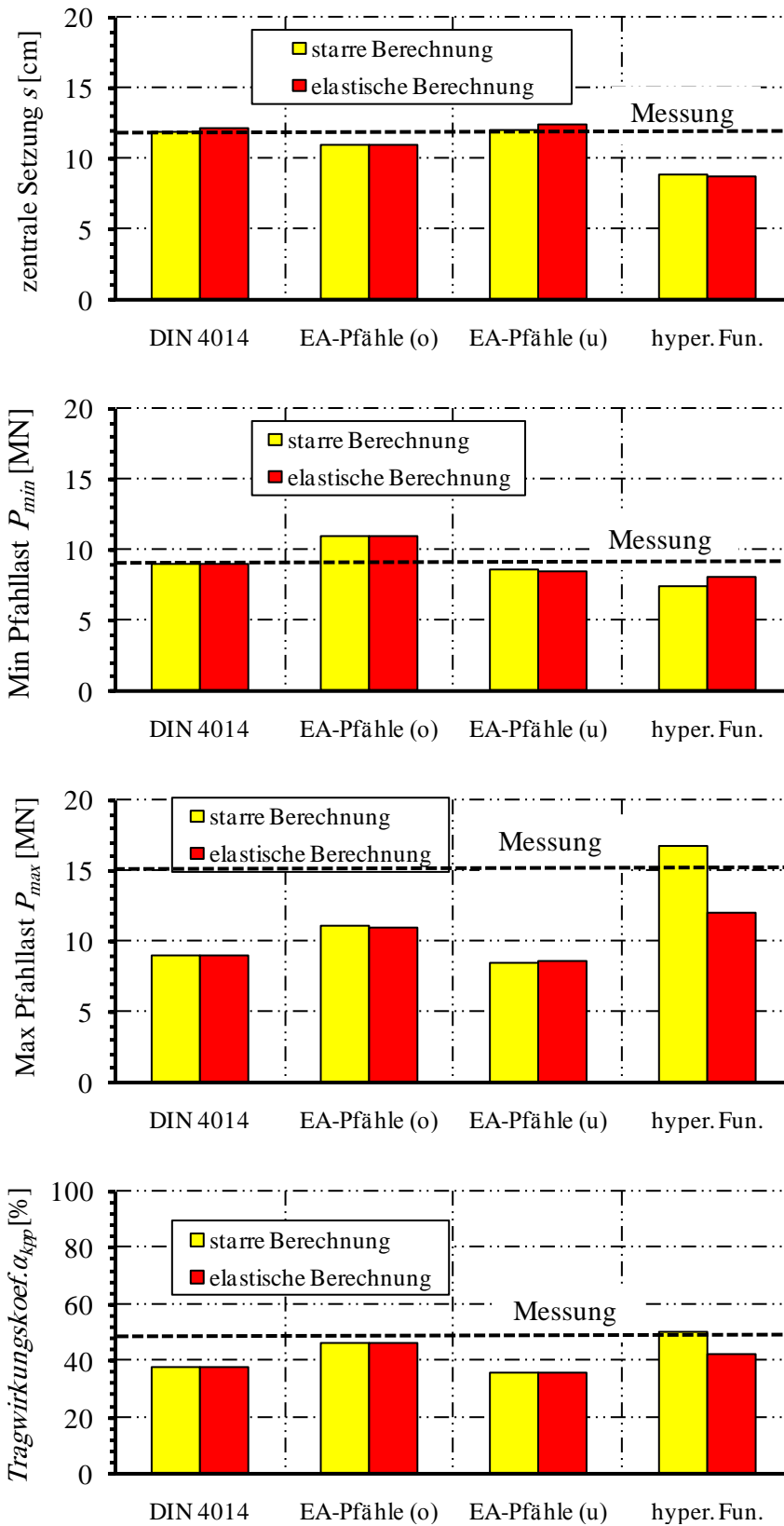


Bild 5-14 Ergebnisse aus Messungen und *ELPLA*



## 5.10 References

- [1] *Abate, S.* (2009): Analysis and Parametric Study of Piled Raft Foundation Using Finite Element Based Software.  
Msc thesis, Addis Ababa University.
- [2] *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.
- [3] *Cecilia, B.* (2015): Serviceability and safety in the design of rigid inclusions and combined pile-raft foundations.  
PhD thesis, Technical University Darmstadt.
- [4] *Clancy, P. & Randolph, M.* (1993): An approximate analysis procedure for piled raft foundations.  
Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech. 17, 849–869.
- [5] *Chaudhary, K.* (2010): Reconsiders for soil-structure interaction problems with significant material stiffness contrast.  
PhD thesis, National University of Singapore.
- [6] DIN 4014: Bohrpfähle Herstellung, Bemessung und Tragverhalten  
Ausgabe März 1990
- [7] *EA-Pfähle* (2007): Empfehlungen des Arbeitskreises "Pfähle" EA-Pfähle; Arbeitskreis Pfähle (AK 2,1) der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V., 1. Auflage, Ernst & Sohn, Berlin.
- [8] *Franke, E., Lutz, B. & El-Mossallamy, Y.* (1994): Measurements and numerical modelling of high rise building foundations on Frankfurt Clay. Proceedings of a conference on vertical and horizontal deformations of foundations and embankments.  
ASCE Geotechnical Special Publication No. 40, Vol. 2, pp. 1325–1336.
- [9] *Franke, E., Lutz, B.* (1994): Pfahl-Platten-Gründungs-Messungen..  
Report for the German Research Council (DFG) No. Fr60-1/11.
- [10] *El Gendy, M./ Hanisch, J./ Kany, M.* (2006): Empirische nichtlineare Berechnung von Kombinierten Pfahl-Plattengründungen  
Bautechnik 9/06
- [11] *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
- [12] *El Gendy, M./ El Gendy, A.* (2018): Analysis of raft and piled raft by Program *ELPLA* GEOTEC Software Inc., Calgary AB, Canada.
- [13] *Lutz, B. / Wittmann, P. / El Mossallamy, Y./ Katzenbach, R.* (1996): Die Anwendung von Pfahl-Plattengründungen: Entwurfspraxis, Dimensionierung und Erfahrungen mit Gründungen in überkonsolidierten Tonen auf der Grundlage von Messungen.  
Vorträge der Baugrundtagung 1996 in Berlin, pp. 153–164. Essen: DGGT.
- [14] *Poulos, H./ Davis, E.* (1980): Pile Foundation Analysis and Design  
John Wiley & Sons, Inc.
- [15] *Poulos, H.* (1991): Analysis of piled strip foundations.  
Proceedings of the conference on computer methods and advances in geomechanics. pp. 183–191, Rotterdam: Balkema.

- [16] *Poulos, H.* (1994): An approximate numerical analysis of pile–raft interaction. *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.* 18, 73–92.
- [17] *Poulos, H. G., Small, J. C., Ta, L. D., Sinha, J. & Chen, L.* (1997): Comparison of some methods for analysis of piled rafts.. *Proc. 14th Int. Conf. Soil Mech. Found. Engng, Hamburg 2*, 1119-1124.
- [18] *Poulos, H.* (2001): Piled raft foundations: design and applications. *Géotechnique* 51, No. 2, 95-113
- [19] *Randolph, M.* (1983): Design of piled raft foundations. *Proceedings of the international symposium on recent developments in laboratory and field tests and analysis of geotechnical problems, Bangkok*, pp. 525–537.
- [20] *Reul, O./ Randolph, M.* (2003): Piled rafts in overconsolidated clay: comparison of in situ measurements and numerical analyses *Géotechnique* 53, No. 3, 301-315
- [21] *Russo, G.* (1998): Numerical analysis of piled raft *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, 22, 477-493
- [22] *Small, J.* (2002): Soil-Structure interaction. *Australian Geomechanics Journal*.
- [23] *Sommer, H./ Katzenbach, R.* (1990): Last-Verformungsverhalten des Messeturmes Frankfurt/ Main *Vorträge der Baugrundtagung 1990 in Karlsruhe*, Seite 371-380
- [24] *Sinha, J.* (1996): Piled raft foundations subjected to swelling and shrinking soils. *PhD thesis, University of Sydney, Australia*.
- [25] *Ta, L./ Small, J.* (1996): Analysis of piled raft systems in layered soils. *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.* 20, 57–72.