

Untersuchungsfall 6

**Pfahl-Plattengründung
des *Skyper* in Frankfurt**

Inhalt

Seite

6	Untersuchungsfall 5: Pfahl-Plattengründung des <i>Skyper</i> in Frankfurt.....	3
6.1	Allgemeines	3
6.2	Berechnungsverfahren der Kombinierten Pfahl-Plattengründung.....	5
6.3	FE-Net.....	6
6.4	Lastdaten	6
6.5	Pfahl- und Plattenmaterial.....	7
6.6	Baugrunddaten	7
6.7	Ergebnisse	10
6.8	Messungen und andere Ergebnisse	10
6.9	Bewertung	10
6.10	References.....	15

6 Untersuchungsfall 5: Pfahl-Plattengründung des *Skyper* in Frankfurt

6.1 Allgemeines

Skyper hat eine Höhe von 154 [m] und steht auf einer Pfahl-Plattengründung. Das Hochhaus liegt in der Stadt Frankfurt, Deutschland. Es wurde 2004 fertiggestellt, Bild 6-1. Das Hochhaus war bis 2004 eines der drei höchsten Hochhäuser in Frankfurt und auch in Deutschland.

Das Gebäude hat einen Keller mit drei Untergeschossen und 38 Stockwerken mit einem durchschnittlichen geschätzten angewandten Druck von 426 [kN/m²]. Das Gebäude wurde auf einer unregelmäßigen Fundamentplatte mit einer Fläche von 1900 [m²]. Es wurde auf einem typischen Frankfurter Ton in einer Tiefe von 13.4 [m] unter der Gelände gegründet. Die Platte hat eine konstante Dicke von 3.5 [m]. Gestützt wird sie durch 46 Bohrpfähle mit einem Durchmesser von je $D = 1.3$ [m]. Auf zwei Ringen unter der Kernstruktur des Überbaus sind die Pfähle angeordnet. Die Länge der 20 Außenpfähle beträgt 31 [m], während die Länge der 26 Innenpfähle 35 [m] beträgt.

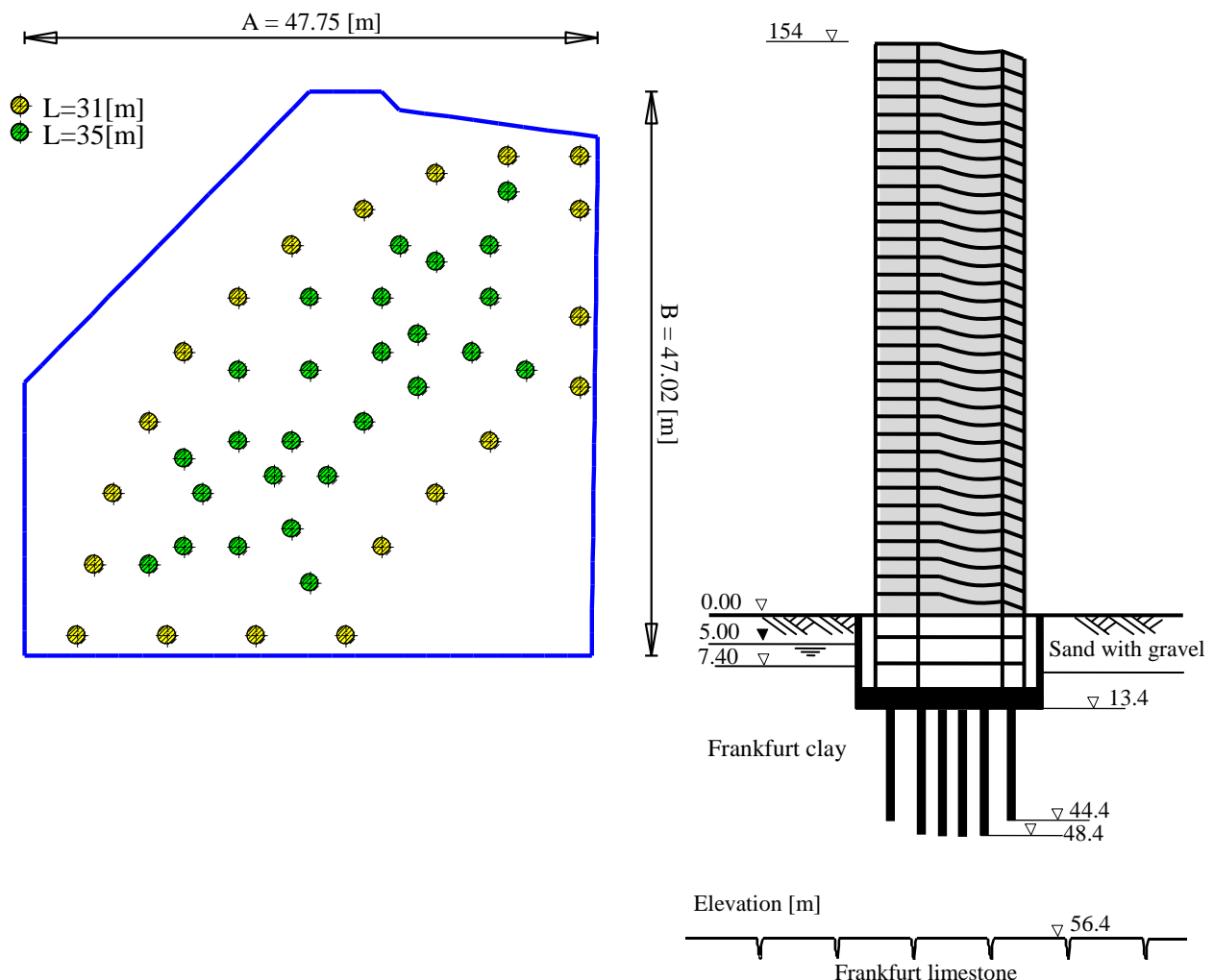
Seit der *Skyper* gebaut wurde, haben viele Autoren sein Verhalten untersucht. Umfangreiche Untersuchungen zu verschiedenen Berechnungsmethoden wurden von *Saglam* (2003), *El-Mossallamy et al.* (2009), *Sales et al.* (2010), *Richter and Lutz* (2010), *Vrettos, C.* (2012), *Bohn* (2015) durchgeführt.

Pfahl-Plattengründung des *Skyper*



Bild 6-1 *Skyper* nach <https://en.phorio.com/file/703520609/>

Bild 6-2 zeigt die Abbildung des *Skyper* mit der Pfahlplatte.

Bild 6-2 Abbildung des *Skyper* mit der Pfahlplatte

6.2 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.

6.3 FE-Net

Die Platte wird in dreieckige Elemente mit einer Maximallänge von 2.0 [m] unterteilt, wie im Bild 6-3 gezeigt. Ebenso werden die Pfähle in Elemente mit 2.0 [m] Maximallänge unterteilt.

6.4 Lastdaten

Die gesamte effektive vertikale Last (ausschließlich Eigengewicht von Platte und Pfählen) auf der Gründungsplatte beträgt $N=810$ [MN], wobei der Auftrieb auf der Platte $P_w=160$ [kN/m²] beträgt. Die Last wird als Flächenlast von 510 [kN/m²] auf der gesamten Platte angesetzt.

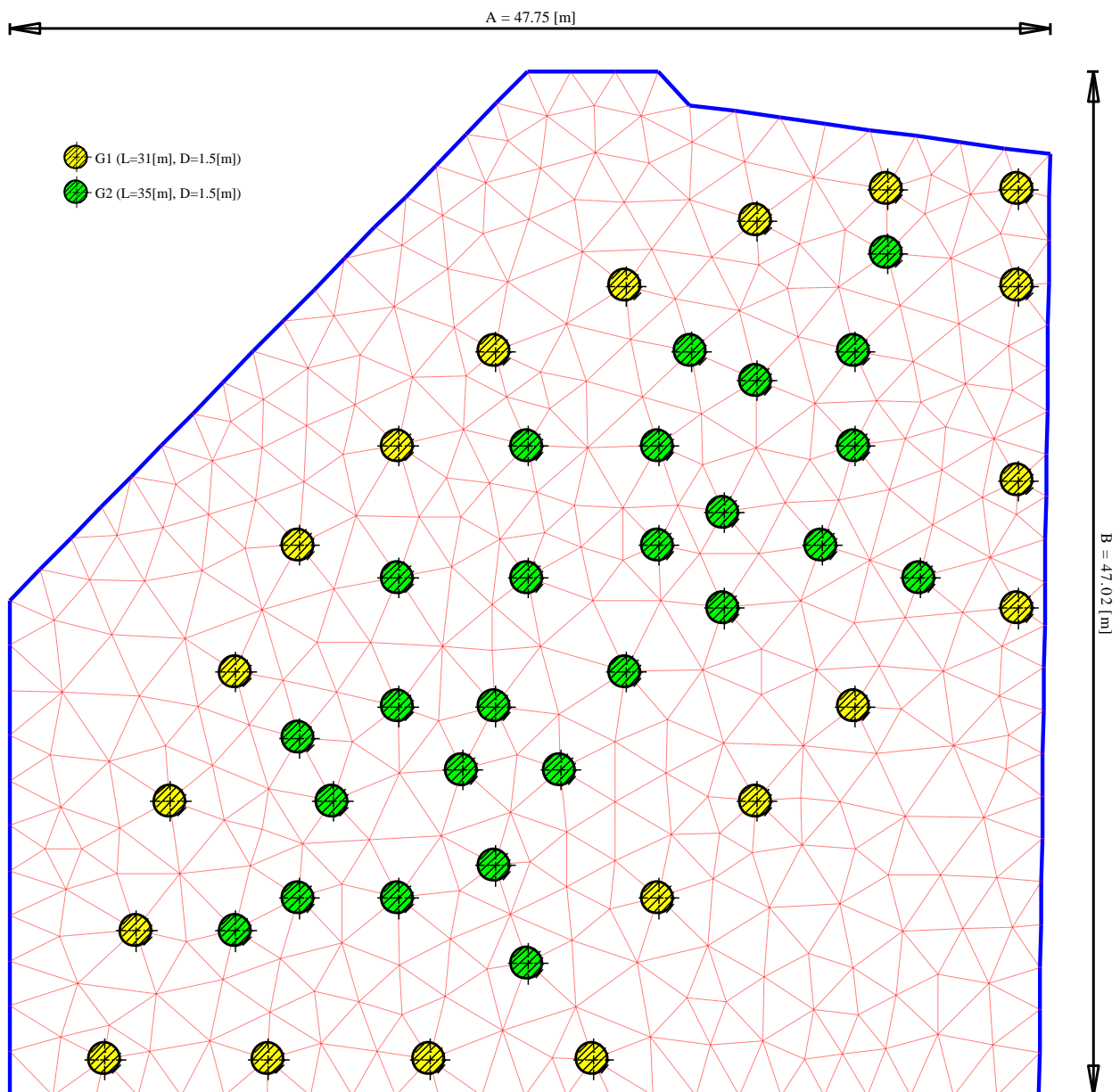


Bild 6-3 Netz der Pfahlplatte des *Skyper* mit Pfählen

6.5 Pfahl- und Plattenmaterial

Die Dicke der Platte wird mit 3.5 [m] angesetzt. Die Pfähle sind mit dem entsprechenden Durchmesser 1.5 [m] und den Längen 31 [m] und 35 [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 ²]
Poissonzahl	$\nu_p = 0.25$	[-]
Wichte	$\gamma_b = 0$	[kN/m ³]

Als Pfahlmaterial wurden folgende Werte angesetzt:

Für die Pfähle gilt:

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

6.6 Baugrunddaten

Die Platte wurde auf einem typischen Frankfurter Ton in einer Tiefe von 13.4 [m] unter der Gelände gegründet. Der Untergrund am Standort des Gebäudes besteht aus Kiesen und Sanden bis in 7.4 [m] unter Gelände. Darunter liegen Schichten des Frankfurter Tons bis eine Tiefe von 56.4 [m] unter Gelände erweitert. Nach dieser Tiefe steht Kalkstein an, der für die vorliegenden Verhältnisse als praktisch unzusammendrückbar und damit als Begrenzung der Setzungseinflusstiefe angesehen werden kann. 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/m²]. 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:

$$E_s = E_{so} (1 + 0.35 z) \quad (6.1)$$

während für die Wiederbelastung gilt:

$$W_s = 70 \text{ [MN/m}^2\text{]} \quad (6.2)$$

wobei:

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

Undrained Kohäsion

Nach *Sommer/ Katzenbach* (1990) steigt mit der Tiefe die undrained Kohäsion c_u des Frankfurter Tons von $c_u = 100$ [kN/m²] bis $c_u = 400$ [kN/m²] 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 undräßierte Kohäsion von $c_u = 200 \text{ [kN/m}^2\text{]}$ angenommen.

Poissonzahl

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

Grenzpfalllast

Russo (1998) schlug eine Grenzmantelreibung bei der Berechnung mit einer hyperbolischen Funktion nicht weniger als $\tau = 180 \text{ [kN/m}^2\text{]}$ vor, die einer undräßierten Kohäsion von $c_u = 200 \text{ [kN/m}^2\text{]}$ entspricht. Um die Berechnung mit einer hyperbolischen Funktion durchzuführen, wird eine Grenzmantelreibung von $\tau = 180 \text{ [kN/m}^2\text{]}$ berücksichtigt. Somit ergeben sich folgende Grenzpfalllasten:

für die Pfähle mit der Länge = 31 [m]

$$Q_{l1} = \tau * \pi * D * l = 180 * \pi * 1.5 * 31 = 26295 \text{ [kN]} = 26 \text{ [MN]} \quad (6.3)$$

für die Pfähle mit der Länge = 35 [m]

$$Q_{l2} = \tau * \pi * D * l = 180 * \pi * 1.5 * 35 = 29688 \text{ [kN]} = 30 \text{ [MN]} \quad (6.4)$$

wobei:

- Q_l Grenzpfalllast, [MN]
- τ 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 5 [m] unter Gelände.

Bodenkennwerte

Der Baugrund setzt sich entsprechend Bild 6-4 aus 12 Schichten zusammen, welche hauptsächlich aus Frankfurter Ton bestehen. Die gesamte Tiefe beträgt $H = 108 \text{ [m]}$ unter Gelände. Bild 6-4 zeigt die Bodenkennwerte für die 12 Schichten.

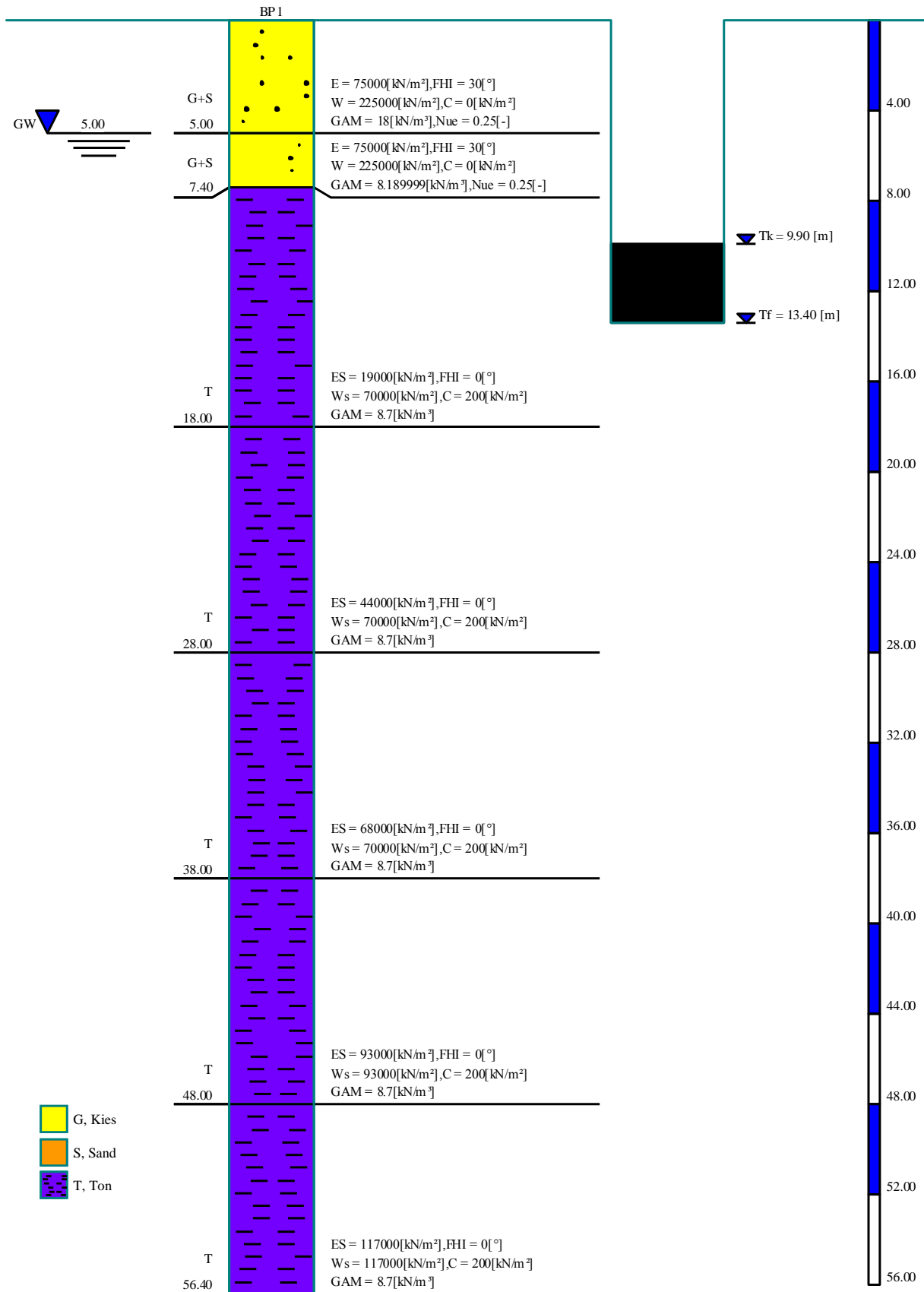


Bild 6-4 Darstellung des Bohrprofils

6.7 Ergebnisse

Als Beispiele für die Ergebnisse verschiedener Berechnungen bei *ELPLA*, zeigen Bild 6-5 und Bild 6-6 die Setzungen als Isolinien für die starre Pfahlplatte und auch für die elastische Pfahlplatte mit Verwendung der EA-Pfähle für Last-Setzungskurve des Pfahles (obere Tabellenwerte). Pfahllasten als Kreisdiagramme für die starre Pfahlplatte und auch für die elastische Pfahlplatte mit Verwendung der EA-Pfähle für Last-Setzungskurve des Pfahles (obere Tabellenwerte) sind im Bild 6-7 und Bild 6-8 abgebildet.

6.8 Messungen und andere Ergebnisse

Der Bau des *Skyper* begann im Jahr 2003 und wurde fertig im Jahr 2004. Nach *Richter and Lutz* (2010) liegen die berechneten mittleren Setzungen in einer Bandbreite von rd. 5 bis 7.5 [cm]. *El-Mossallamy et al.* (2009) wurde der Tragwirkungskoeffizient der Pfahl-Plattengründung überwiegend im Bereich $\alpha_{kpp} = 60\%$ bis 85% ermittelt. Nach *Lutz et.al.* (2006) liegt mit $\alpha_{kpp} \approx 0,6$ unterhalb dieser Bandbreite. Dementsprechend betragen die mittleren Pfahlkräfte rd. 12 bis 14 bzw. 10 bis 11 [MN].

Zum Vergleich zeigt Tabelle 6-1 die anderen Ergebnisse für die anderen Berechnungen, die von *Richter and Lutz* (2010) vorgestellten. Auf Basis Setzungsmessungen 4 Jahre nach Bauende sollen die maximalen Setzungen im Bereich des Hochhauses bei ca. 5 bis 5.5 [cm] liegen. Mit der dreidimensionalen Finiten Element-Methode wurde nach *Richter and Lutz* (2010) eine Setzung von 6.3 [cm] berechnet.

6.9 Bewertung

Die Ergebnisse der Setzungen, Tragwirkungskoeffizienten der Pfahl-Plattengründung α_{kp} und minimale und maximale Pfahllasten, die von *ELPLA* erhalten wurden, werden mit den erwarteten Ergebnissen im Bild 6-9 verglichen.

Aus Bild 6-9 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.

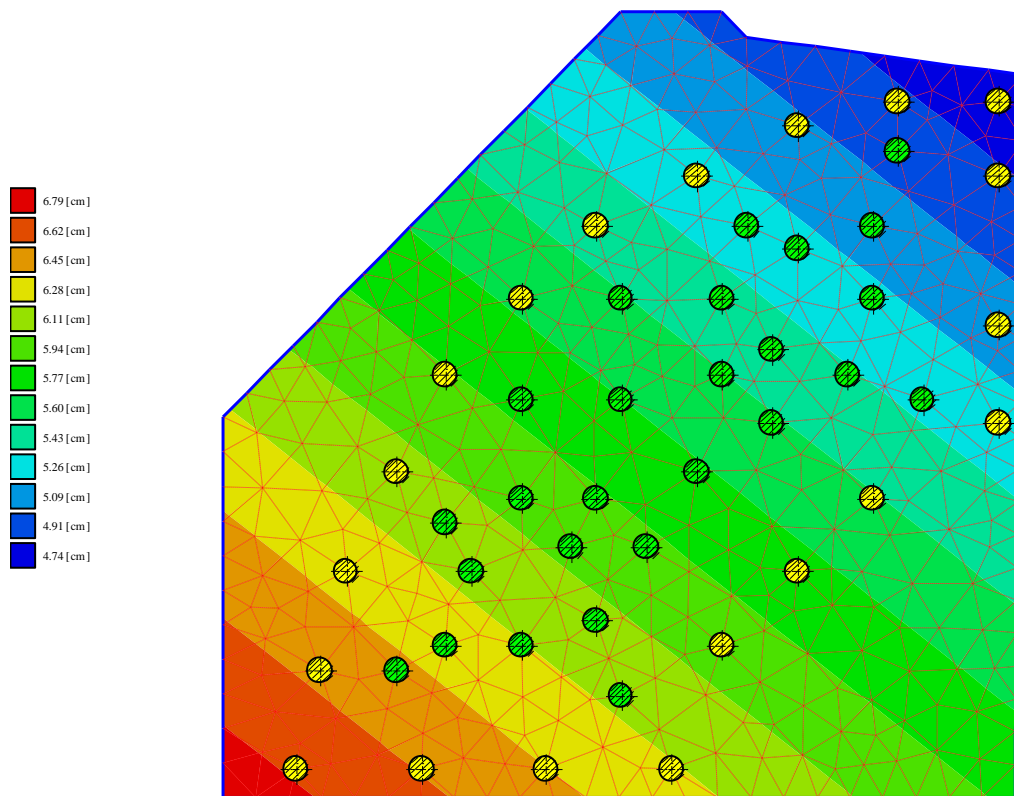


Bild 6-5 Settlement für die starre Pfahlplatte mit Verwendung der EA-Pfähle (obere Tabellenwerte) für Last-Setzungskurve des Pfahles

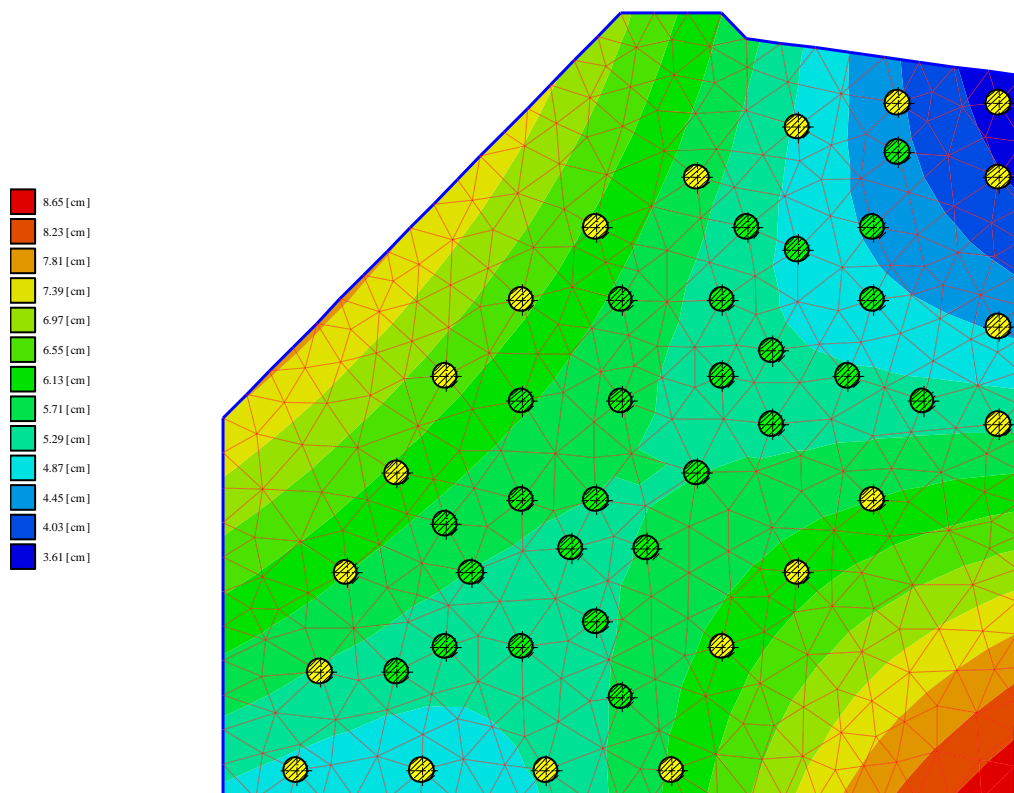


Bild 6-6 Settlement für die elastische Pfahlplatte mit Verwendung der EA-Pfähle (obere Tabellenwerte) für Last-Setzungskurve des Pfahles

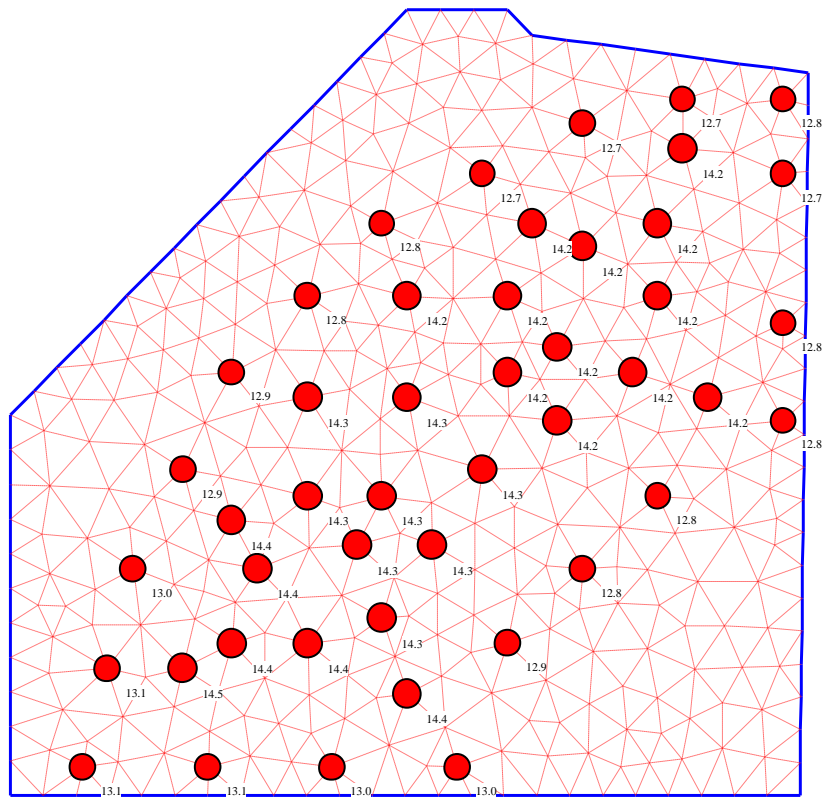


Bild 6-7 Pfahllasten [MN] für die starre Pfahlplatte mit Verwendung der EA-Pfähle (obere Tabellenwerte) für Last-Setzungskurve des Pfahles

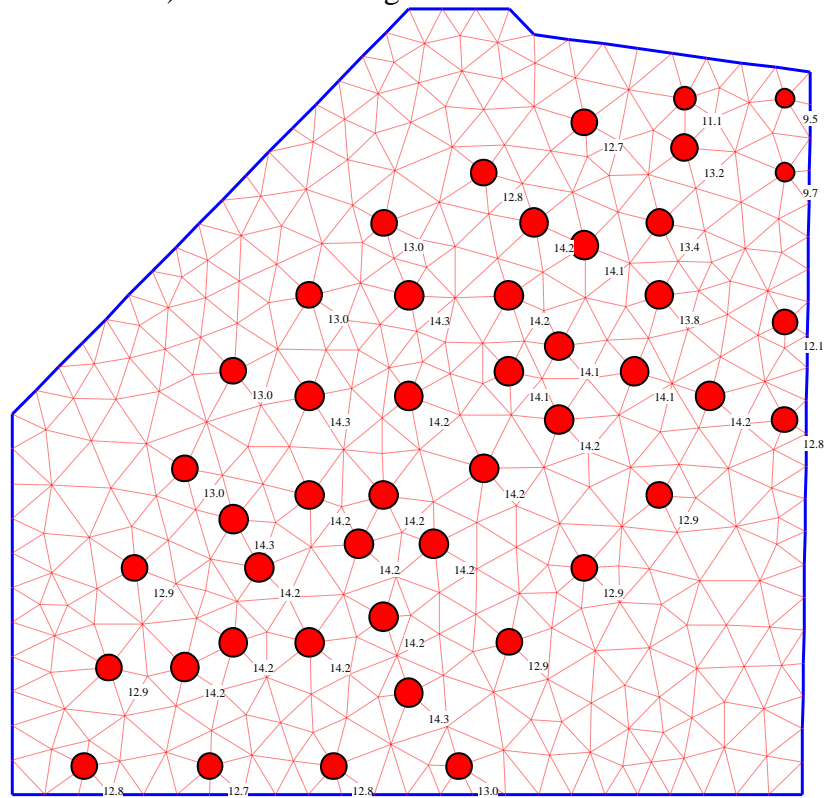


Bild 6-8 Pfahllasten [MN] für die elastische Pfahlplatte mit Verwendung der EA-Pfähle (obere Tabellenwerte) für Last-Setzungskurve des Pfahles

Tabelle 6-1 Übersicht der Berechnungsergebnisse aus Berechnungen mit Baugrundmodellen auf der Grundlage der Elastizitätstheorie nach *Richter* and *Lutz* (2010)

Verfahren		BEM	FEM	Elast.-Halb- raummodelle	Messung
Mittlere Setzung	S_{kpp} [cm]	4.8	6.3	5.0-7.3 (9.5)	
Maximale Setzung	S_{max} [cm]	6.0	7.5	-	5.5
Tragwirkungskoeffizienten	α_{kpp} [%]	71	82	59-79	
Bettungsmodul	k_s [MN/m ³]	rd. 2.0		1.6-2.8	
Mittlere Pfahlkraft	Q_p [MN]	12.5	14.3	10.3-13.9	
Minimale Pfahlkraft	$Q_{p,min}$ [MN]	9.9	11.6	8.5-10.1	
Maximale Pfahlkraft	$Q_{p,max}$ [MN]	16.1	17.6	13.8-20.5	
Mittlere Pfahlfedersteifigkeit	k_p [MN/m]	261	301	125-280	

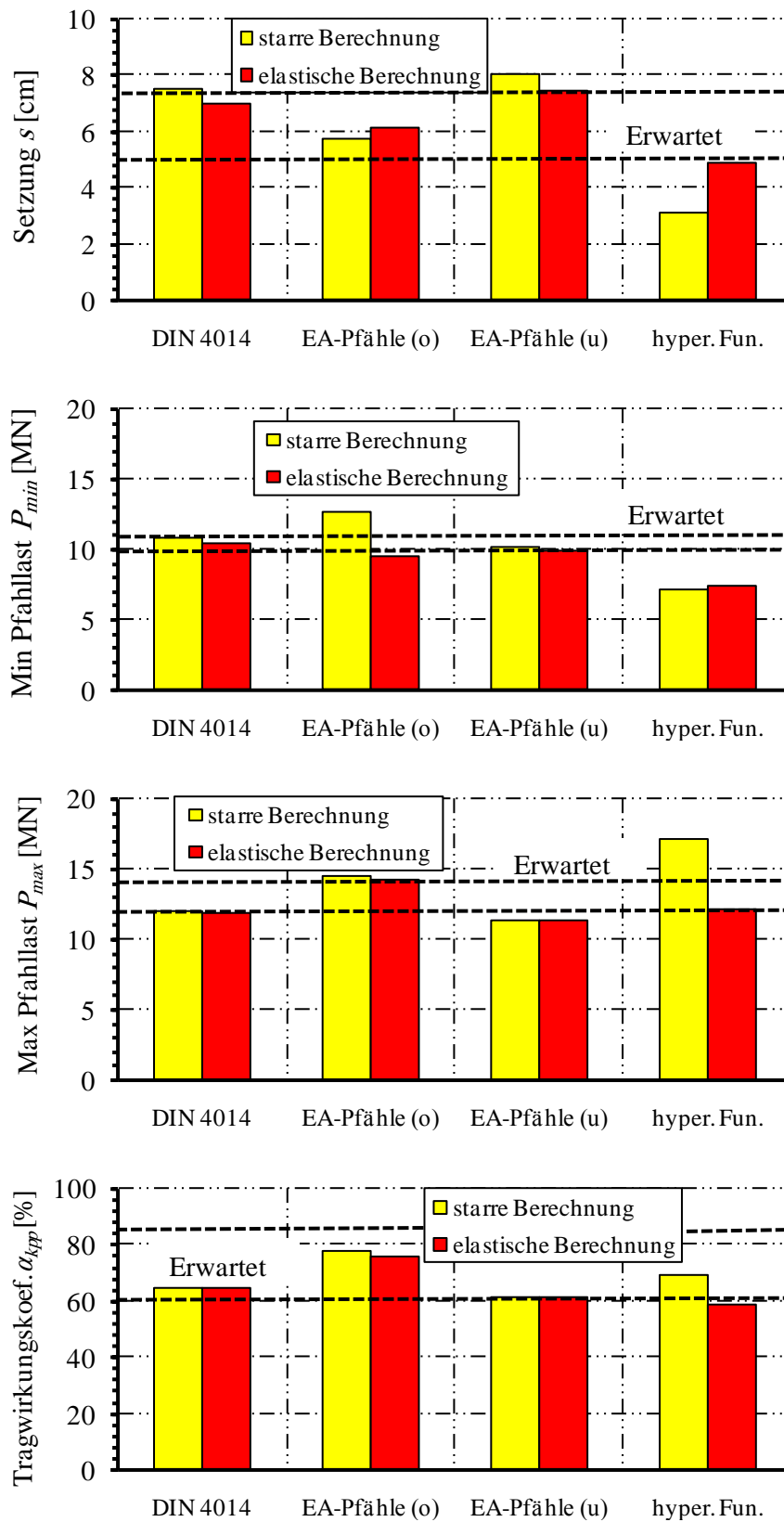


Bild 6-9 Ergebnisse aus Messungen und *ELPLA*

6.10 References

- [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] *Bohn, C.* (2015): Serviceability and safety in the design of rigid inclusions and combined pile-raft foundations. PhD thesis, Technical University Darmstadt.
- [3] DIN 4014: Bohrpfähle Herstellung, Bemessung und Tragverhalten
Ausgabe März 1990
- [4] *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.
- [5] *Lutz, B., El-Mossallamy, Y., Richter, Th.* (2006): Ein einfaches für die Handrechnung geeignetes Berechnungsverfahren zur Abschätzung des globalen Last-Setzungsverhaltens von Kombinierten Pfahl-Plattengründungen.
Bauingenieur 81 (2006), 61–66.
- [6] *El Gendy, M./ Hanisch, J./ Kany, M.* (2006): Empirische nichtlineare Berechnung von Kombinierten Pfahl-Plattengründungen
Bautechnik 9/06
- [7] *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
- [8] *El Gendy, M./ El Gendy, A.* (2018): Analysis of raft and piled raft by Program *ELPLA* GEOTEC Software Inc., Calgary AB, Canada.
- [9] *El-Mossallamy, Y., Lutz, B. and Duerrwang, R.* (2009): Special aspects related to the behavior of piled raft foundation. Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, M. Hamza et al. (Eds.).
- [10] *Richter, T and Lutz, B.* (2010): Berechnung einer Kombinierten Pfahl-Plattengründung am Beispiel des Hochhauses „Skyper“ in Frankfurt/Main.
Bautechnik 87 (2010), Heft 4.
- [11] *Russo, G.* (1998): Numerical analysis of piled raft
Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech., 22, 477-493
- [12] *Sales, M., Small, J. and Poulos, H.* (2010): Compensated piled rafts in clayey soils: behaviour, measurements, and predictions.
Can Geotech. J. 47: 327-345.
- [13] *Saglam, N.* (2003): Settlement of piled rafts: A critical review of the case histories and calculation methods.
M.Sc. thesis, The middle east technical university.
- [14] *Sommer, H./ Katzenbach, R.* (1990): Last-Verformungsverhalten des Messeturmes Frankfurt/ Main
Vorträge der Baugrundtagung 1990 in Karlsruhe, Seite 371-380
- [15] *Vrettos, C.* (2012): Simplified analysis of piled rafts with irregular geometry.
Int. Conf. Testing and Design Methods for Deep Foundations, Kanazawa.