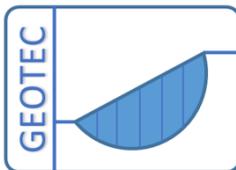


Untersuchungsfall 2

Pfahlgruppen des *Dashwood Hauses* in London mit dem Programm ELPLA



R. Herrmann¹/ M. El Gendy²/ F. Hattab³



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

2022

¹Prof. Geotechnical Institute, Siegen university, Germany. Email: richard.herrmann@uni-siegen.de

² Prof. Faculty of Engineering, Port Said University, Egypt. Email: melgendy@elpla.com

³ Dip. - Ing.

Inhalt	Seite
Untersuchungsfall 2: Pfahlgruppen des <i>Dashwood Houses</i> in London.....	4
2.1 Allgemeines	4
2.2 FE-Netz	5
2.3 Pfahl- und Plattenmaterial.....	5
2.4 Baugrunddaten	6
2.4.1 UndrÄnierte KohÄsion	6
2.4.2 Poissonzahl	6
2.4.3 Steifemodul	6
2.4.4 Grenzpfahllast	7
2.4.5 Grundwasser	7
2.4.6 Bodenkennwerte	7
2.5 Lastdaten	9
2.6 Berechnung der Pfahlgruppen.....	9
2.7 Ergebnisse	10
2.7.1 Setzungen	10
2.7.2 SohldrÄcke	15
2.7.3 Pfahllasten.....	21
2.7.4 Tabellarische Darstellung	29
2.8 Auswertung	30
2.8.1 Darstellung der Maximalen Setzungen	30
2.8.2 Darstellung der Tragwirkungskoeffizienten α_{kPP}	30
2.8.3 Darstellung von Pfahlwiderstand und Plattenwiderstand	31
2.8.4 Vorhandene Messungen und Berechnungen.....	32
2.8.5 Diskussion der Ergebnisse	32
2.8.6 Schlussfolgerungen	35
2.8.7 Empfohlene Berechnungsverfahren.....	35
2.9 Literatur.....	37

Vorwort

Als praktisches Beispiel für Pfahlplatten und Pfahlgruppen mit dem *ELPLA* wird ein Untersuchungsfall behandelt, um die Genauigkeit der verschiedenen Berechnungsverfahren von Pfahlplatten und Pfahlgruppen zu beurteilen. Der Untersuchungsfall ist ein Hochhaus in London (*Dashwood House*), das als Spezialfall einer Pfahlplatte untersucht wird, wenn keine Wechselwirkung zwischen Pfahl-Platte und Platte-Boden berücksichtigt wird.

Der Turm steht auf Pfahlgruppen. Mit Verwendung der vorhandenen Feldversuchsdaten des Baugrunds und der Feldergebnisse der Plattensetzungen und Pfahllasten bietet dieser Untersuchungsfall eine gute Gelegenheit, die verschiedenen Berechnungsverfahren, die in *ELPLA* verfügbar sind, zu bewerten.

Der Untersuchungsfall wurde von *Hattab* (2007) in einer Dissertation unter der Leitung von:

Prof. Dr.-Ing. *R Herrman*

Professor für Geotechnik und Grundbau an der Universität Siegen

und

Prof. Dr.-Ing. *M El Gendy*

Professor für Geotechnik und Grundbau an der Universität Port Said

Die Bearbeitung dieses Untersuchungsfalles erfolgt mit Hilfe von:

Ing. *Y. El Gendy*

GEOTEC Software Inc.

Untersuchungsfall 2: Pfahlgruppen des *Dashwood Houses* in London

2.1 Allgemeines

Hong et al. (1999) haben ein Verfahren für die Berechnung von großen vertikal belasteten Pfahlgruppen mit Hilfe von Lastübertragungskurven (*NPRLT*) entwickelt. Die Autoren haben das Verfahren *NPRLT* auf der Pfahlplatte des *Dashwood Houses* angewendet. Sie verglichen die berechnete Setzung mit der Feldmessung nach *Hooper* (1979). In diesem Untersuchungsfall werden die berechneten und gemessenen Setzungen der Pfahlplatte berücksichtigt, um die Genauigkeit der Berechnungsverfahren im Programm *ELPLA* zu überprüfen.

Dashwood House ist ein Hochhaus mit 15 Stockwerken und liegt in Nord-London in England. Das Hochhaus ist 61 [m] hoch. Als Gründungsplatte wurde eine rechteckige Platte mit den Abmessungen 33 [m] und 31.5 [m] und einer Dicke von 0.9 [m] angesetzt. Unter der Platte befinden sich insgesamt 462 Bohrpfähle. Die Pfähle haben eine Länge von $l = 15$ [m] und einen Durchmesser von $D = 0.485$ [m]. Sie liegen in einem quadratischen Raster von 1.5 [m], wie im Bild 2.1 dargestellt. Die gesamte Last des Gebäudes einschließlich der Platte ergibt 274 [MN], d.h. eine gleichmäßige Flächenlast von 264 [kN/m²].

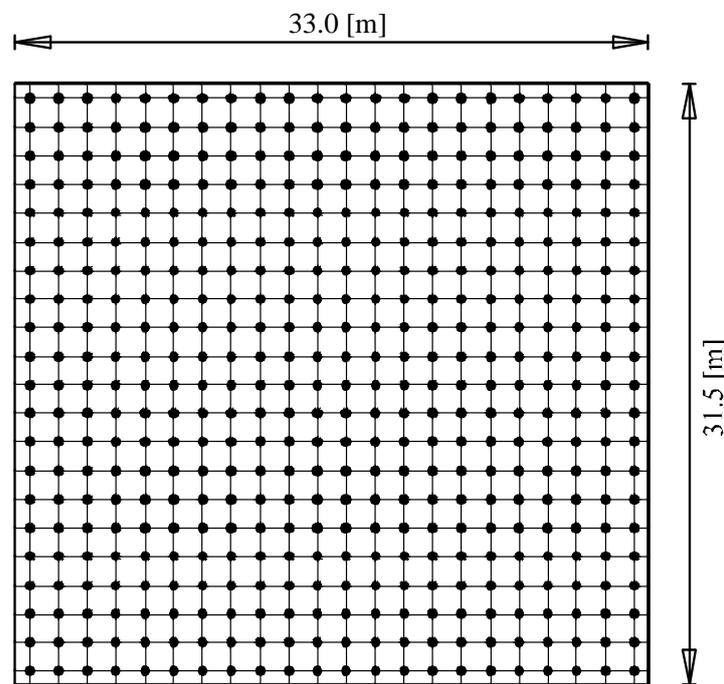


Bild 2.1 *Dashwood House*: Draufsicht der Platte mit Pfählen

2.2 FE-Netz

Die Platte mit den Pfählen mit den Abmessungen 33 [m] × 31.5 [m] ist zu berechnen. Die Platte wird in Elemente mit einer Maximallänge von 1.5 [m] in x - sowie in y -Richtung unterteilt, wie im Bild 2.2 dargestellt. Ebenso werden die Pfähle in Elemente mit 3.75 [m] Länge unterteilt.

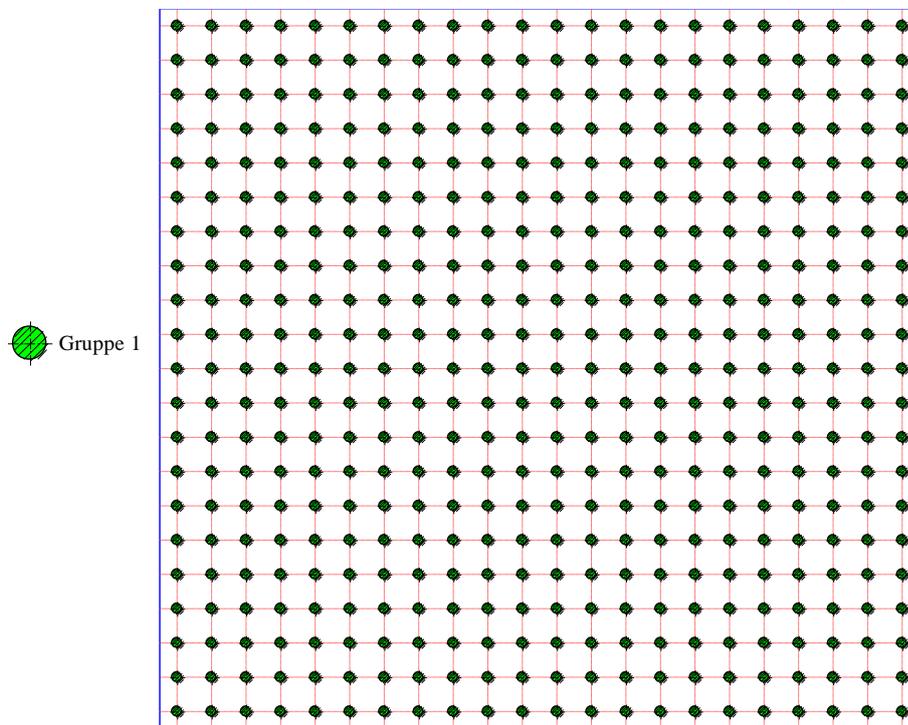


Bild 2.2 FE-Netz der Platte mit Pfählen

2.3 Pfahl- und Plattenmaterial

Die Dicke der Platte wurde in der Berechnung mit 0.9 [m] angesetzt. Die Pfähle sind mit dem entsprechenden Durchmesser von 0.485 [m] und der Länge von 15 [m] in der Berechnung berücksichtigt. Als Pfahl- und Plattenmaterial wurden folgende Werte angesetzt:

Für die Platte:

Elastizitätsmodul	E_p	=	20 000	[MN/m ²]
Poissonzahl	ν_p	=	0.25	[-]
Wichte	γ_b	=	25	[kN/m ³]

Für die Pfähle:

Elastizitätsmodul	E_p	=	30 000	[MN/m ²]
Wichte	γ_b	=	25	[kN/m ³]

2.4 Baugrunddaten

Die Eigenschaften des Londoner Tons können wie folgt beschrieben werden:

2.4.1 Undrained Kohäsion

Es handelt sich dabei um einen überkonsolidierten Ton. Die undrained Kohäsion nimmt mit der Tiefe zu und wird näherungsweise laut *Hong et al.* (1999) durch die folgende lineare Beziehung beschrieben:

$$c_u = 150 + 6.67z \quad (2.1)$$

wobei:

c_u Undrained Kohäsion des Londoner Tons [kN/m²]
 z Tiefe ab Oberkante Ton [m]

2.4.2 Poissonzahl

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

2.4.3 Steifemodul

Hong et al. (1999) benutzen ein Verhältnis von 200 zwischen dem Schubmodul G und der undrained Kohäsion C_u um einen variablen Submodul für Boden zu bestimmen.

$$G = 200c_u = 200(150 + 6.67z) \quad (2.2)$$

Die Beziehung zwischen dem Schubmodul G und Elastizitätsmodul E wird gegeben durch:

$$G = \frac{E}{0.5(1 + \nu_s)} \quad (2.3)$$

Setzt man Gl. (4.3) in Gl. (4.2) ein, und unter der Annahme einer *Poissonzahl* des Tons von $\nu_s = 0.25$ [-] erfolgt:

$$E = E_o(1 + 0.0445z) \quad (2.4)$$

wobei:

G Schubmodul, [kN/m²]
 E Elastizitätsmodul der Erstbelastung des Londoner Tons, [kN/m²]
 ν_s *Poissonzahl* des Bodens, [-]
 E_o Anfangssteifemodul, $E_{so} = 75000$ [kN/m²]

2.4.4 Grenzpfahllast

Die mittlere undrÄnierte KohÄsion c_u des Londoner Tons wird als $c_u = 200$ [kN/m²] angesetzt. *Russo* (1998) schlug eine Grenzmantelreibung bei der Berechnung mit einer hyperbolischen Funktion nicht weniger als $\tau = 180$ [kN/m²] vor, die einer undrÄnierten KohÄsion von $c_u = 200$ [kN/m²] entspricht. Die Grenzmantelreibung bei der Berechnung mit einer hyperbolischen Funktion ist $\tau = 180$ [kN/m²]. Somit ergibt sich folgende Grenzpfahllast fÄr die PfÄhle mit der LÄnge = 15 [m]:

$$Ql = \tau \times \pi \times D \times l = 180 \times \pi \times 0.485 \times 15 = 4114 \text{ [kN]} = 4.1 \text{ [MN]} \quad (4.5)$$

Die Grenzpfahllast Ql ist ein geometrischer Parameter der hyperbolischen Beziehung. In einigen FÄllen ist der Wert von Ql von der tatsÄchlichen TragfÄhigkeitpfahllast unterschiedlich. $Ql=1.5$ bis $2 Q_u$, wobei Q_u die TragfÄhigkeitpfahllast ist.

2.4.5 Grundwasser

Das Grundwasser im typischen Ton Londons liegt innerhalb von 1.0 [m] von der BodenoberflÄche nach *Rickard et al.* (1985). Das Grundwasser wird direkt unter der Platte in einer Tiefe von 1.0 [m] angenommen.

2.4.6 Bodenkennwerte

Eine Bodenschicht von $H = 100$ [m] MÄchtigkeit ist berÄcksichtigt. FÄr die Berechnung wurde die gesamte Schicht des Baugrunds, wie im Bohrprofil in Bild 2.3 gezeigt, mit 10 Schichten angenommen.

Pfahlgruppen des *Dashwood Houses*



Bild 2.3 Darstellung des Bohrprofils

2.5 Lastdaten

Die gesamte vertikale Last einschließlich Eigengewicht der Platte beträgt 274 [MN]. Die Last wird als Flächenlast von 264 [kN/m²] angesetzt.

2.6 Berechnung der Pfahlgruppen

Um den Unterschied zwischen den Ergebnissen der Pfahlgruppe des *Dashwood Houses* bei verschiedenen Berechnungen zu zeigen, werden insgesamt 13 Berechnungen mit *ELPLA* durchgeführt wie folgt:

Tabelle 2.1 Berechnungsverfahren der Platte mit den Pfählen

Nr.	Verfahren	Linearität der Berechnung	Bezeichnung
1	Spannungstrapezverfahren	-	-
2	Bettungsmodulverfahren	Lineare Berechnung	<i>LPR</i>
3		Nichtlineare Berechnung mit Verwendung einer hyperbolischen Funktion	<i>NPRH</i>
4		Nichtlineare Berechnung mit Verwendung der DIN 4014/ jetzt DIN 1054	<i>NPRD</i>
5	Steifemodulverfahren für die elastische Platte	Lineare Berechnung	<i>LPR</i>
6		Nichtlineare Berechnung mit Verwendung einer hyperbolischen Funktion	<i>NPRH</i>
7		Nichtlineare Berechnung mit Verwendung der DIN 4014/ jetzt DIN 1054	<i>NPRD</i>
8	Steifemodulverfahren für die starre Platte	Lineare Berechnung	<i>LPR</i>
9		Nichtlineare Berechnung mit Verwendung einer hyperbolischen Funktion	<i>NPRH</i>
10		Nichtlineare Berechnung mit Verwendung der DIN 4014/ jetzt DIN 1054	<i>NPRD</i>
11	Steifemodulverfahren für starre Pfahlgruppen	Lineare Berechnung	<i>LPR</i>
12		Nichtlineare Berechnung mit Verwendung einer hyperbolischen Funktion	<i>NPRH</i>
13		Nichtlineare Berechnung mit Verwendung der DIN 4014/ jetzt DIN 1054	<i>NPRD</i>

Bedeutung der Bezeichnungen *LPR*, *NPRH* und *NPRD* in der Tabelle 2.1:

- Nichtlineare Berechnung mit Verwendung der DIN 4014 (*NPRD*)
- Nichtlineare Berechnung mit Verwendung einer hyperbolischen Funktion (*NPRH*)
- Lineare Berechnung (*LPR*)

Das Verfahren *NPRD* wurde von *El Gendy et al.* (2006) entwickelt, während die Verfahren *NPRH* und *LPR* von *El Gendy* (2007a) entwickelt wurden.

2.7 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Setzungen für die verschiedenen Berechnungen werden mit Isolinien als isometrische Darstellungen im Bild 2.4 bis Bild 2.15 gezeigt. Die Sohldrücke werden als Kreisdiagramme im Bild 2.16 bis Bild 2.24 dargestellt. Pfahllasten werden als Kreisdiagramme im Bild 2.25 bis Bild 2.37 abgebildet.

2.7.1 Setzungen

2.7.1.1 Setzungen der Pfahlplatten nach dem Bettungsmodulverfahren

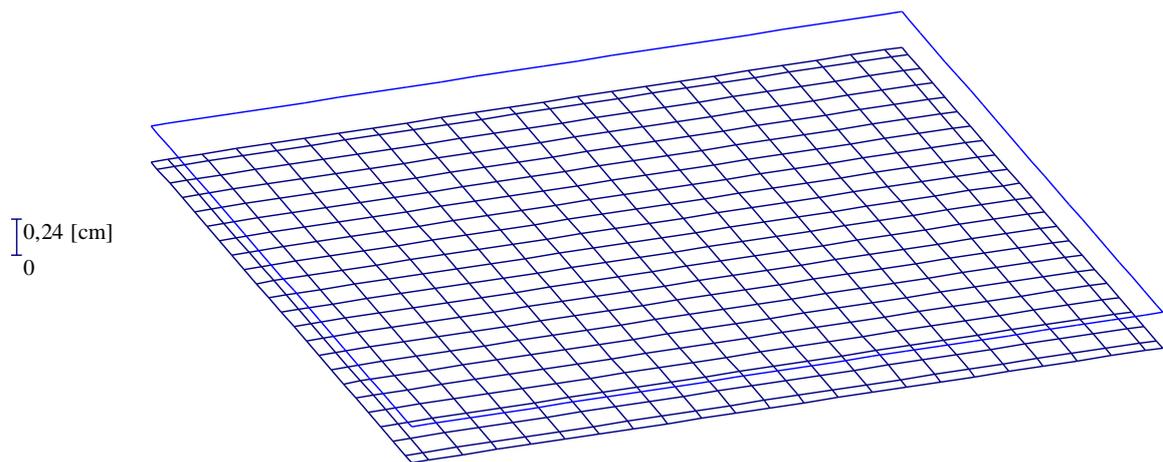


Bild 2.4 Setzungen [cm] - *LPR* - Max. $s = 0.24$ [cm], Min. $s = 0.23$ [cm]

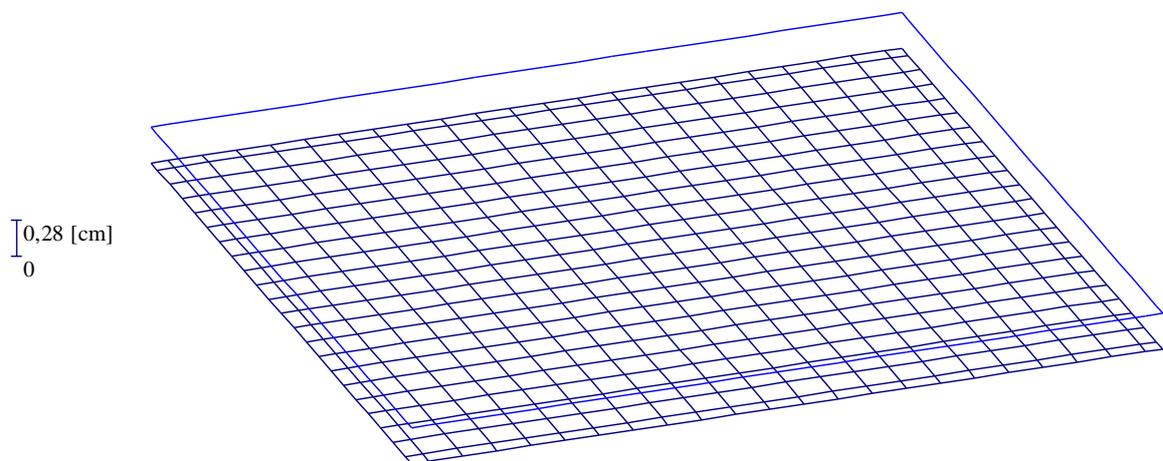


Bild 2.5 Setzungen [cm] - *NPRH* - Max. $s = 0.28$ [cm], Min. $s = 0.27$ [cm]

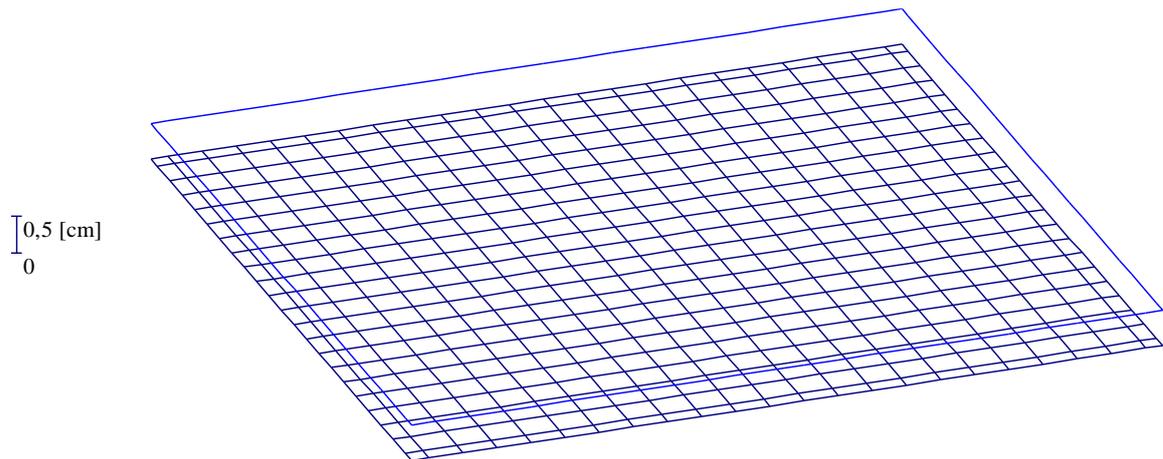


Bild 2.6 Setzungen [cm] - *NPRD* - Max. $s = 0.50$ [cm], Min. $s = 0.49$ [cm]

2.7.1.2 Setzungen der Pfahlplatten nach dem Steifemodulverfahren für die elastische Platte

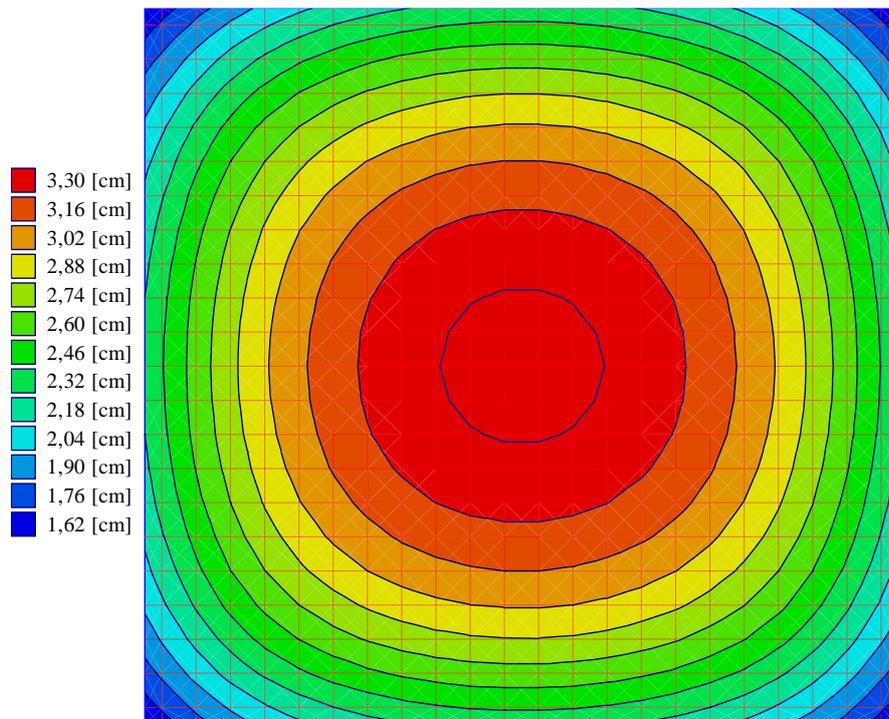


Bild 2.7 Setzungen [cm] - *LPR* - Max. $s = 3.41$ [cm], Min. $s = 1.55$ [cm]

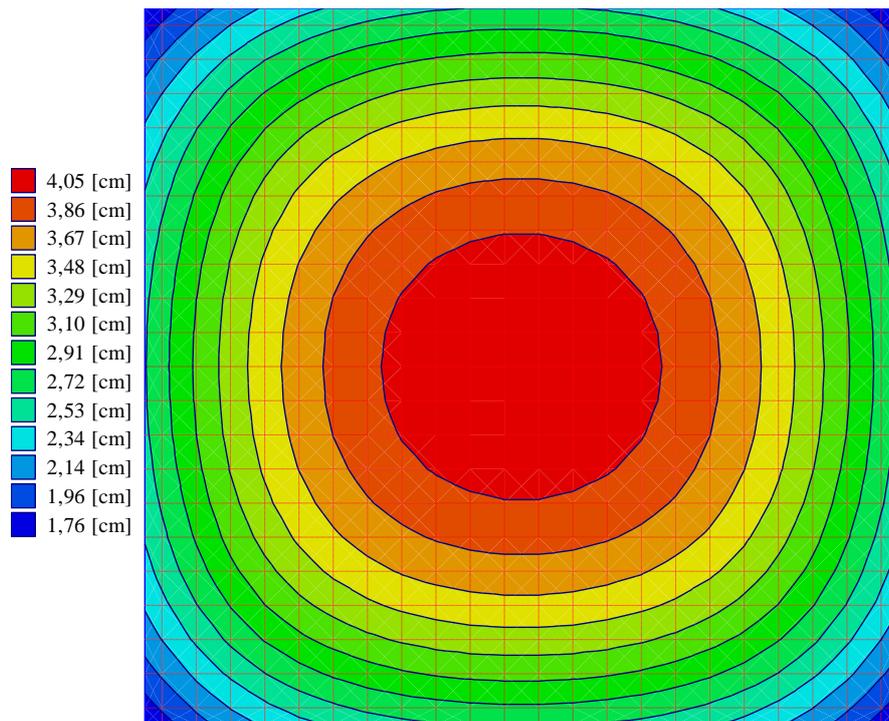


Bild 2.8 Setzungen [cm] - *NPRH* - Max. $s = 4.12$ [cm], Min. $s = 1.67$ [cm]

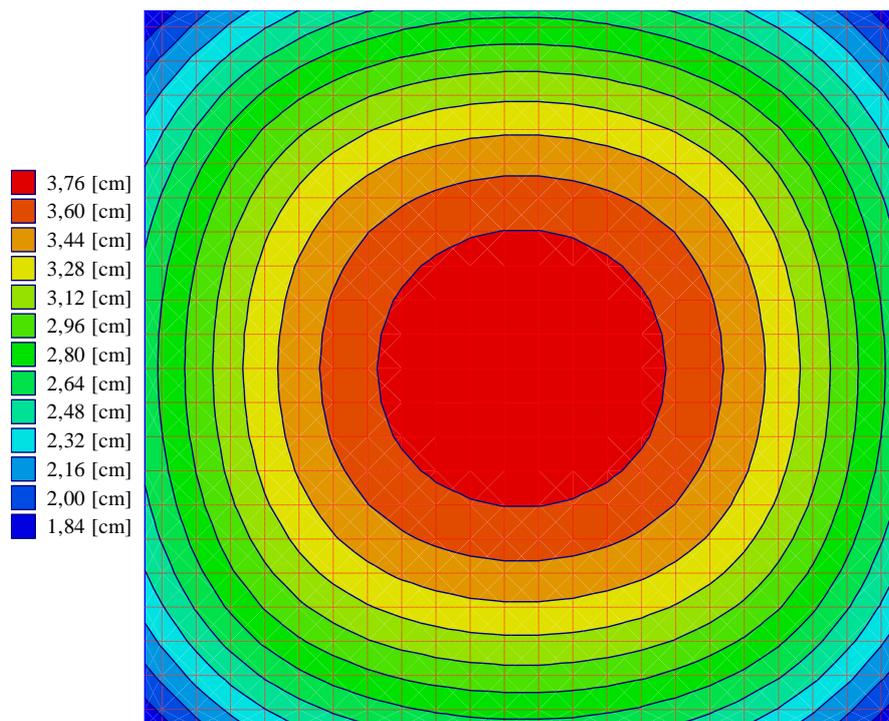


Bild 2.9 Setzungen [cm] - *NPRD* - Max. $s = 3.84$ [cm], Min. $s = 1.76$ [cm]

2.7.1.3 Setzungen der Pfahlplatten nach dem Steifemodulverfahren für die starre Platte

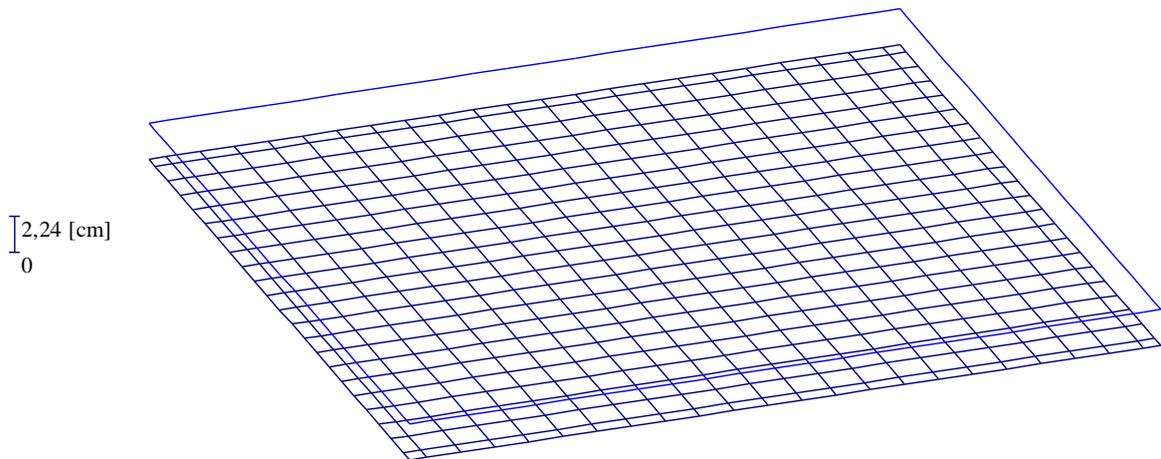


Bild 2.10 Setzungen [cm] - *LPR* - $s = 2.24$ [cm]

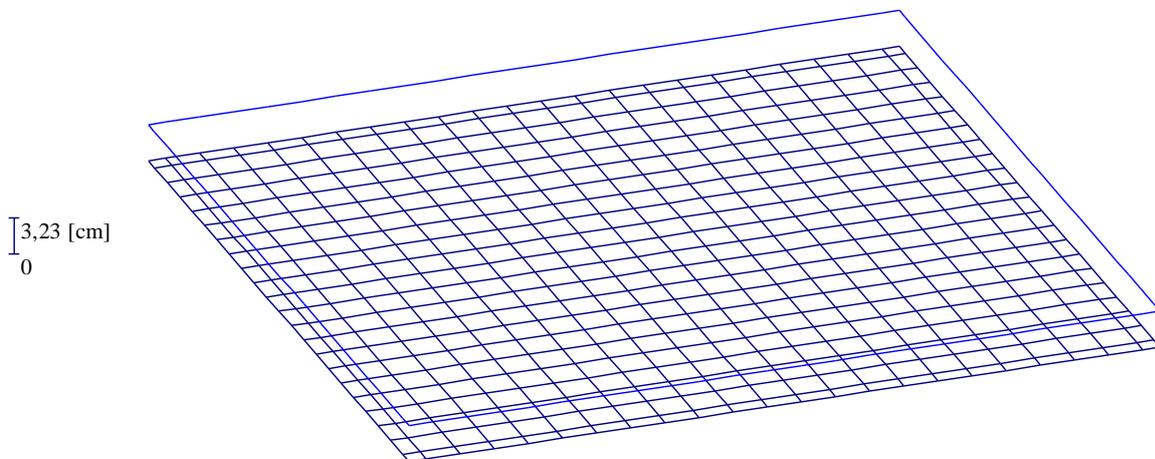


Bild 2.11 Setzungen [cm] - *NPRH* - $s = 3.23$ [cm]

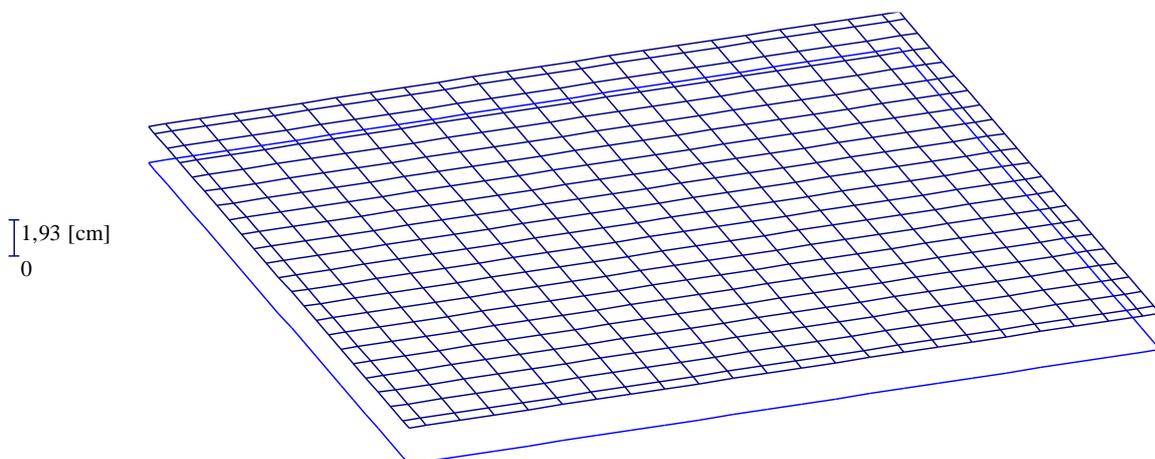


Bild 2.12 Setzungen [cm] - *NPRD* - $s = -1.93$ [cm]

2.7.1.4 Setzungen der Pfahlplatten nach dem Steifemodulverfahren für die starre Pfahlgruppe

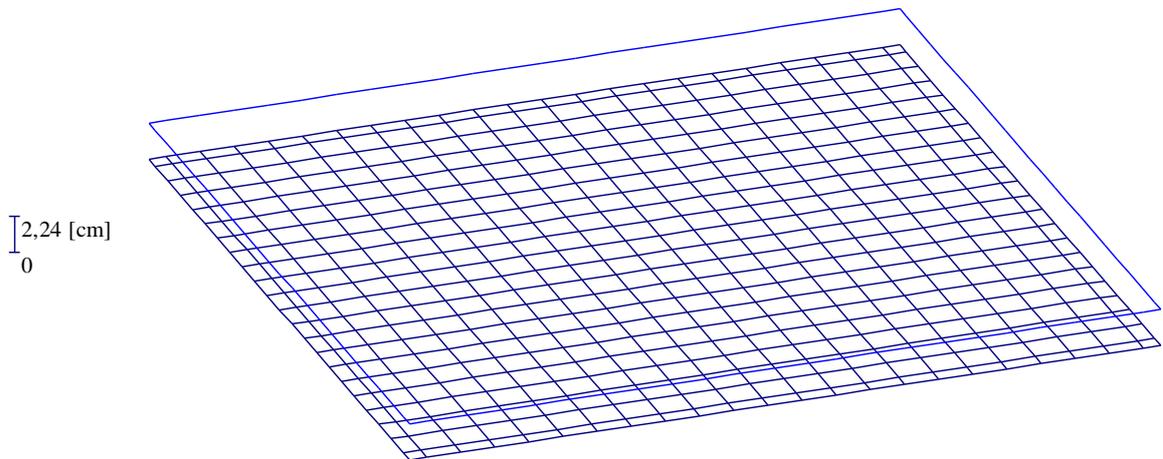


Bild 2.13 Setzungen [cm] - *LPR* - $s = 2.24$ [cm]

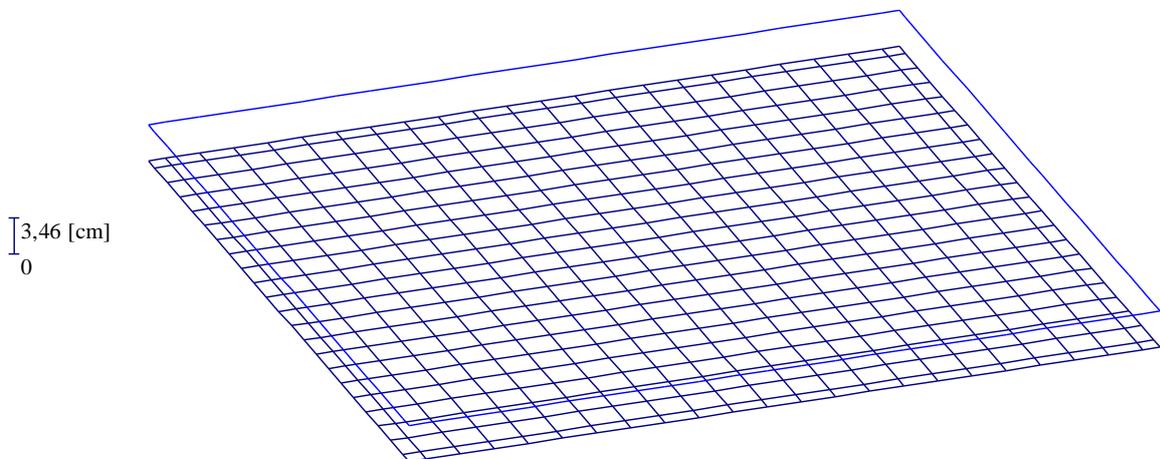


Bild 2.14 Setzungen [cm] - *NPRH* - $s = 3.46$ [cm]

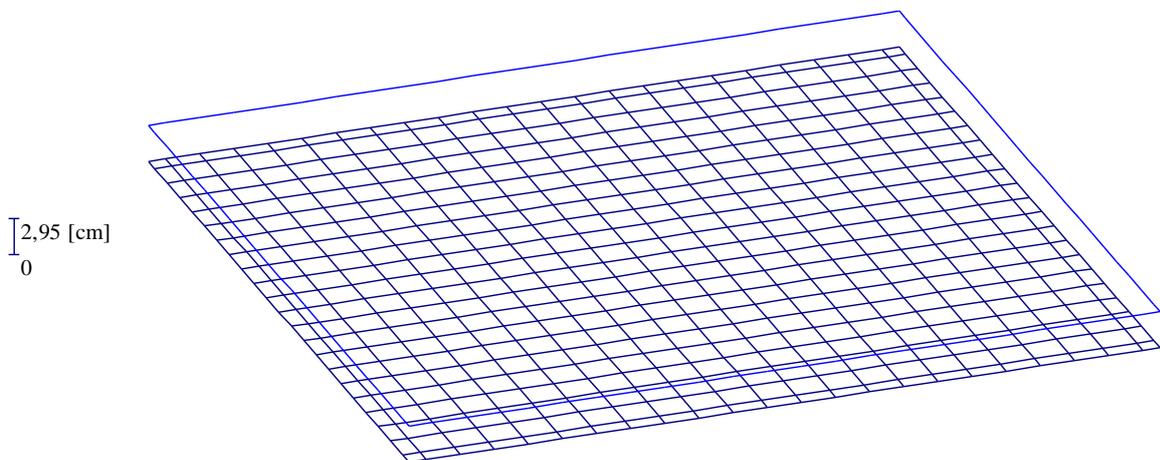


Bild 2.15 Setzungen [cm] - *NPRD* - $s = 2.95$ [cm]

Pfahlgruppen des *Dashwood Houses*

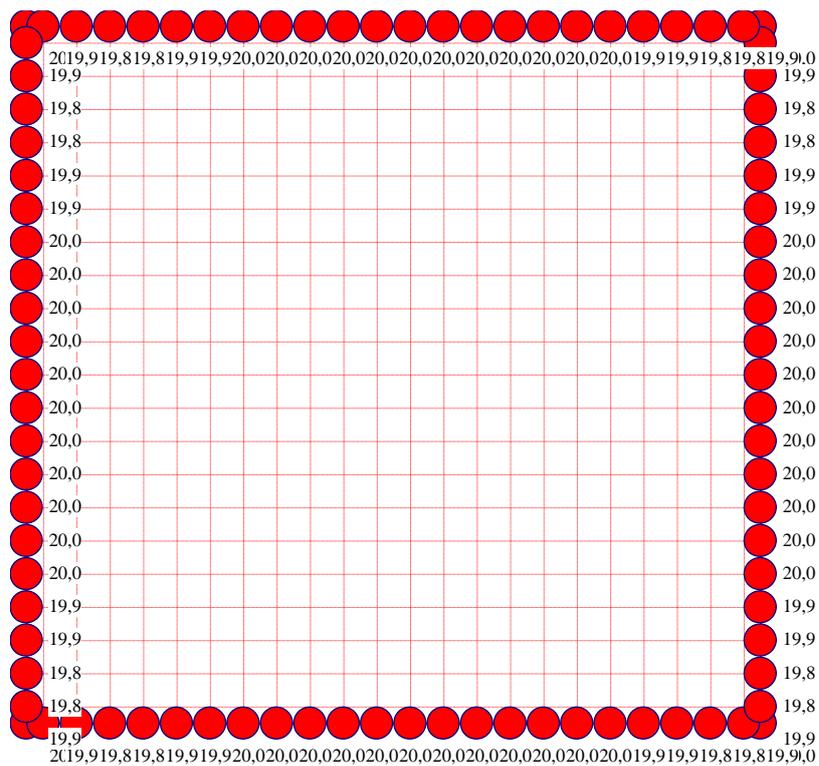


Bild 2.17 Sohl drücke [MN/m^2] - *NPRH* - Max. $q = 20 \text{ kN/m}^2$ am Rand

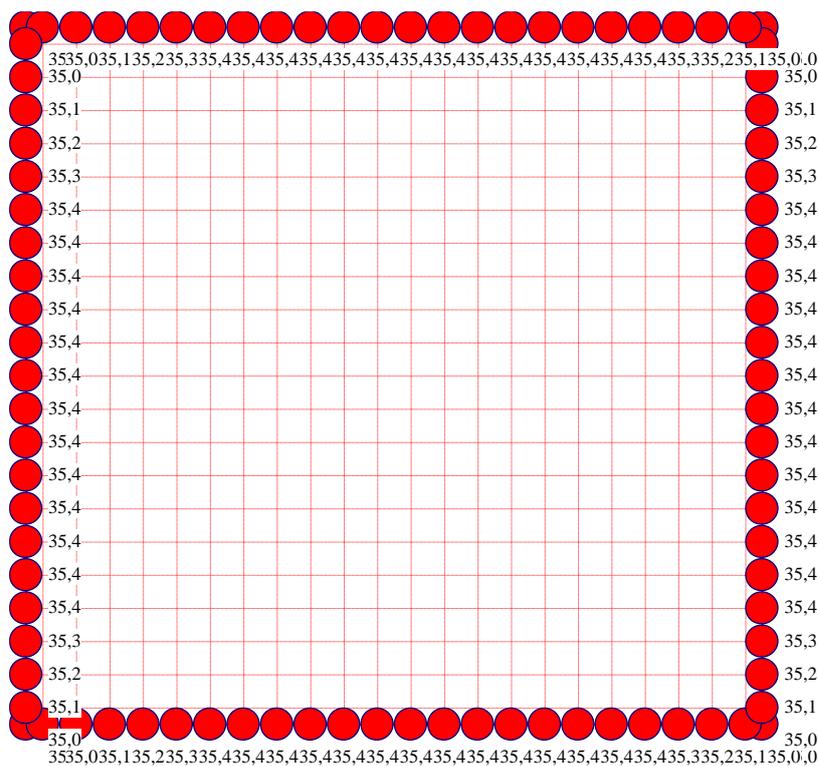


Bild 2.18 Sohl drücke [MN/m^2] - *NPRD* - Max. $q = 35.4 \text{ kN/m}^2$ am Rand

2.7.2.2 Sohl drücke nach dem Steifemodulverfahren für die elastische Platte

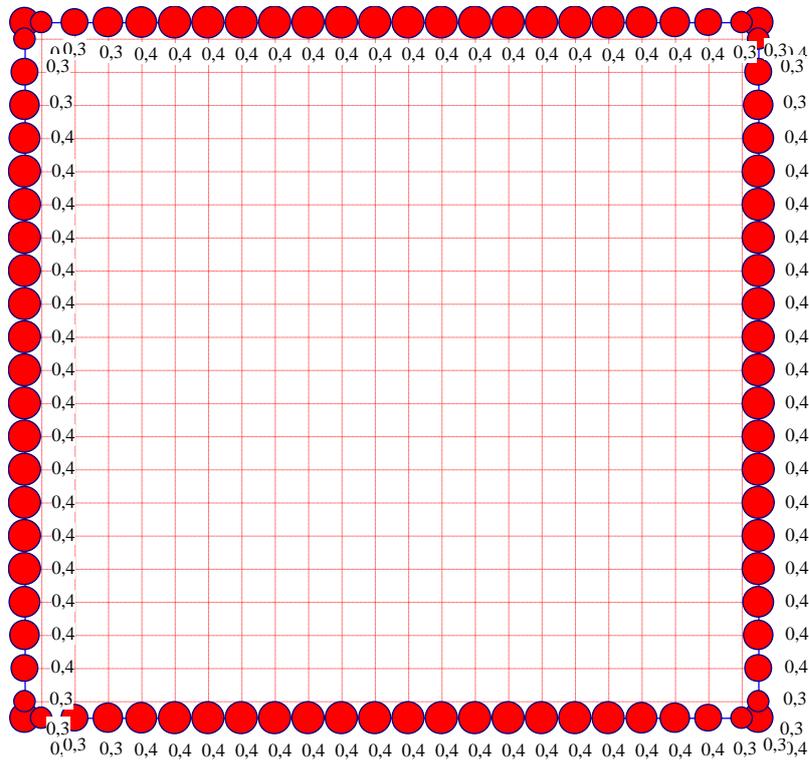


Bild 2.19 Sohl drücke [MN/m²] - LPR - Max. $q = 0.4$ [MN/m²] am Rand

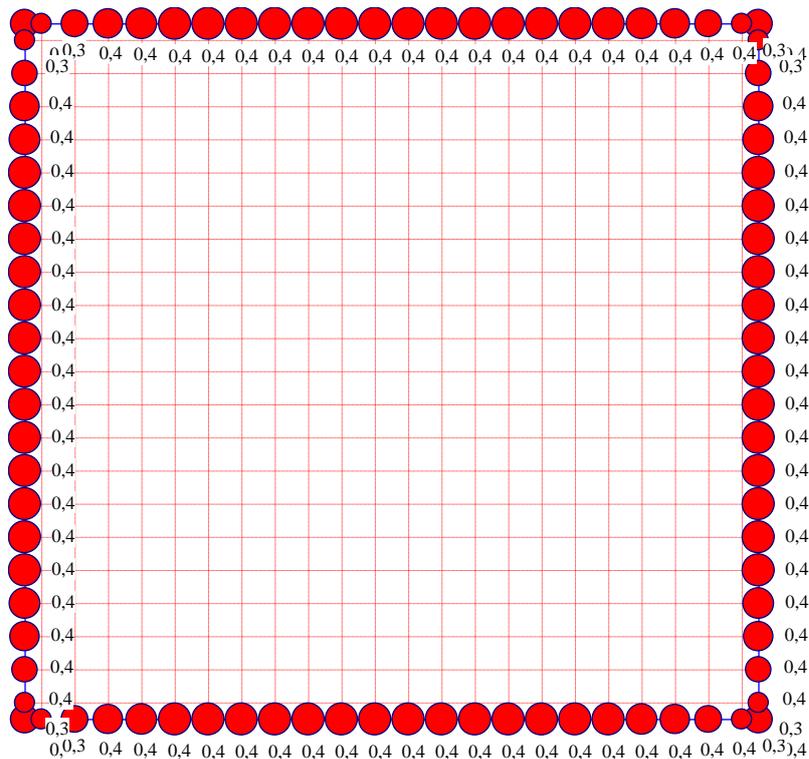


Bild 2.20 Sohl drücke [MN/m²] - NPRH - Max. $q = 0.4$ [MN/m²] am Rand

Pfahlgruppen des *Dashwood Houses*

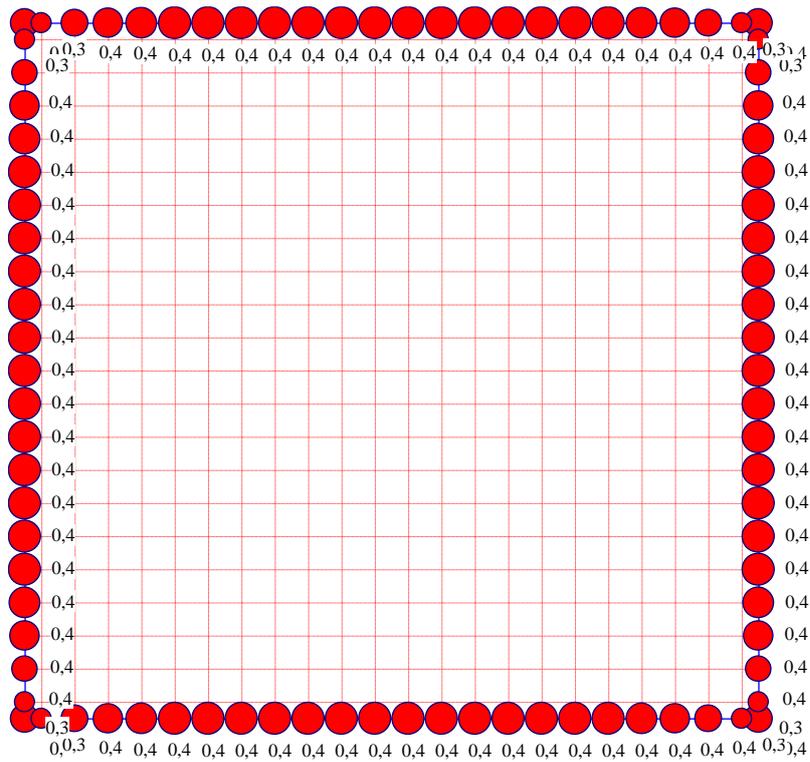


Bild 2.21 Sohldrücke [MN/m^2] – *NPRD* - Max. $q = 0.4$ [MN/m^2] am Rand

2.7.2.3 Sohl drücke nach dem Steifemodulverfahren für die starre Platte

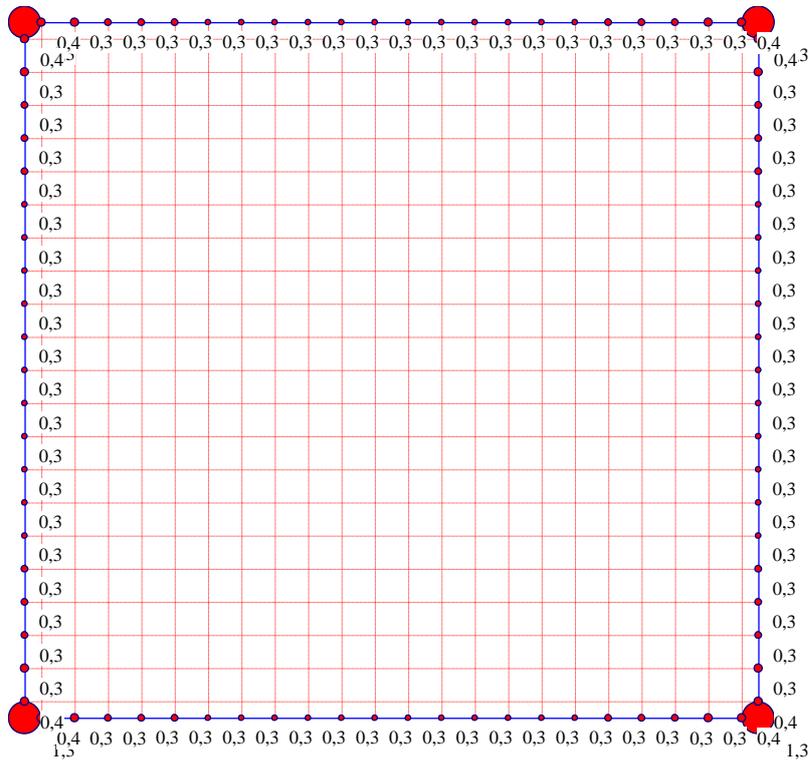


Bild 2.22 Sohl drücke [MN/m²] - LPR - Max. $q = 10.3$ [MN/m²]

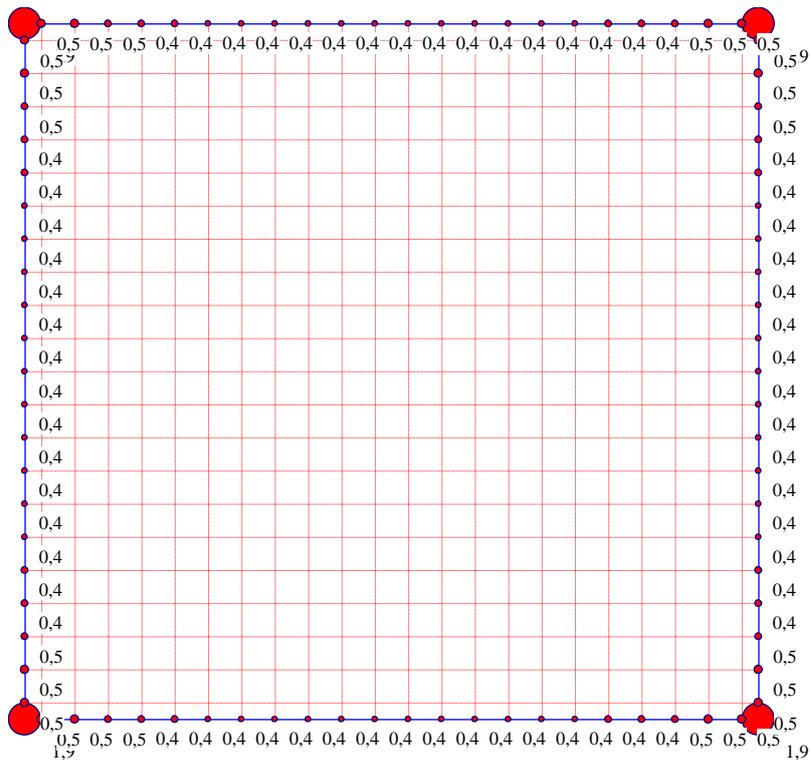


Bild 2.23 Sohl drücke [MN/m²] - NPRH - Max. $q = 1.9$ [MN/m²] am Rand

Pfahlgruppen des *Dashwood Houses*

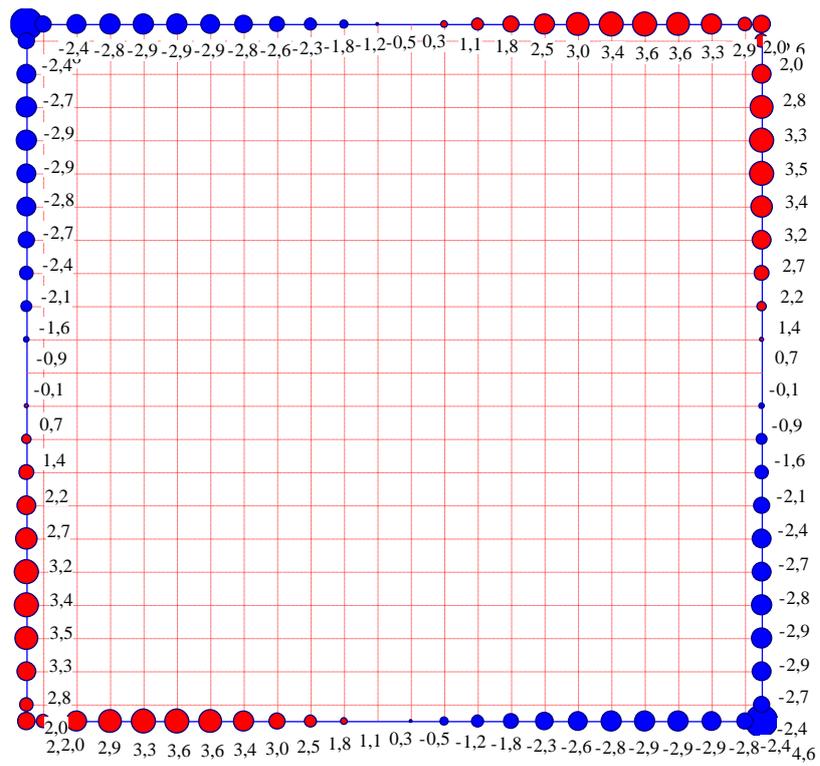


Bild 2.24 Sohldrücke [MN/m²] – *NPRD* - Max. $q = 3.6$ [MN/m²] am Rand

2.7.3 Pfahllasten

2.7.3.1 Pfahllasten nach dem Spannungstrapezverfahren

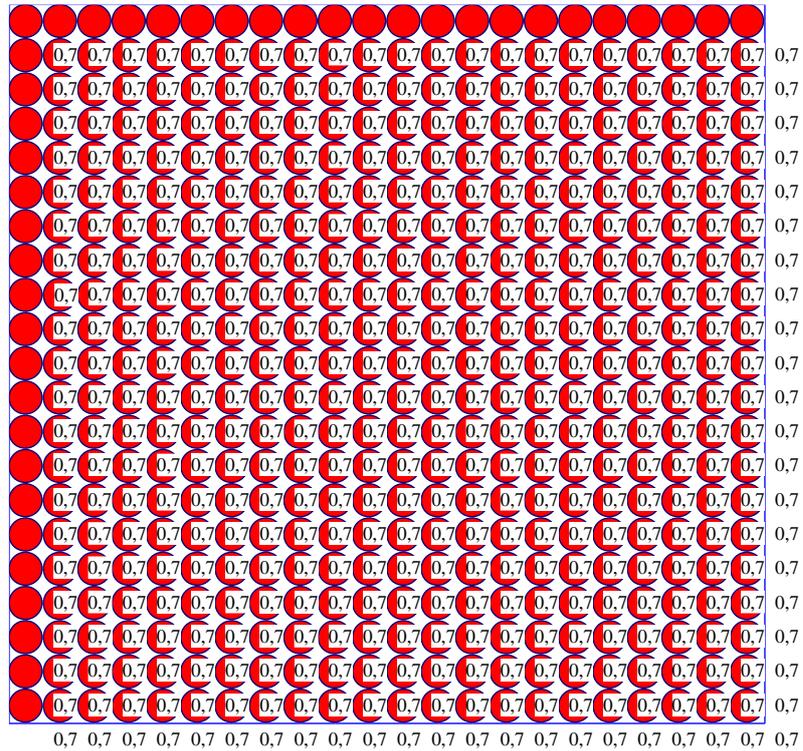


Bild 2.25 Pfahllasten P_h [MN]

2.7.3.2 Pfahllasten nach dem Bettungsmodulverfahren

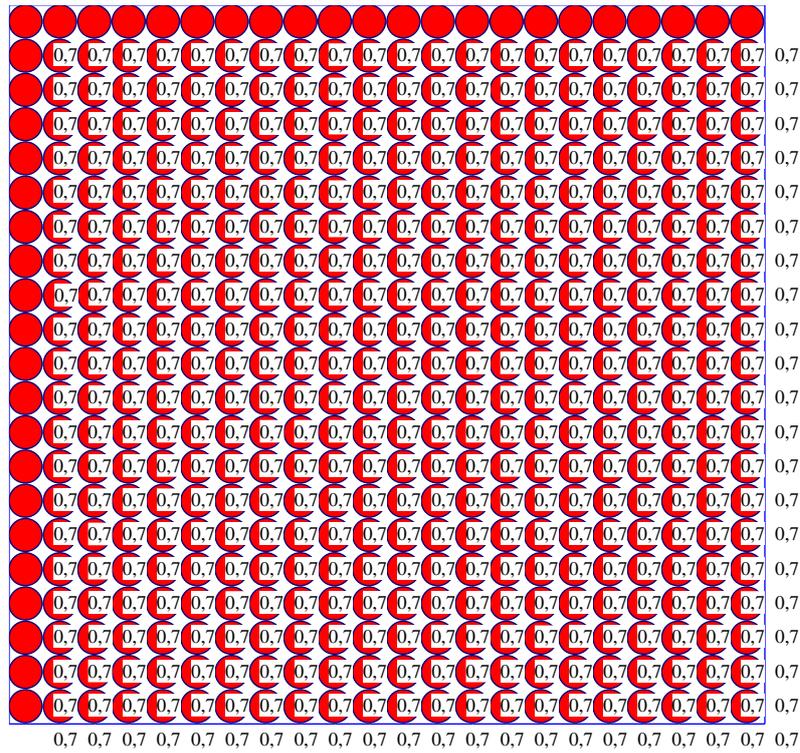


Bild 2.26 Pfahllasten Ph [MN] – LPR

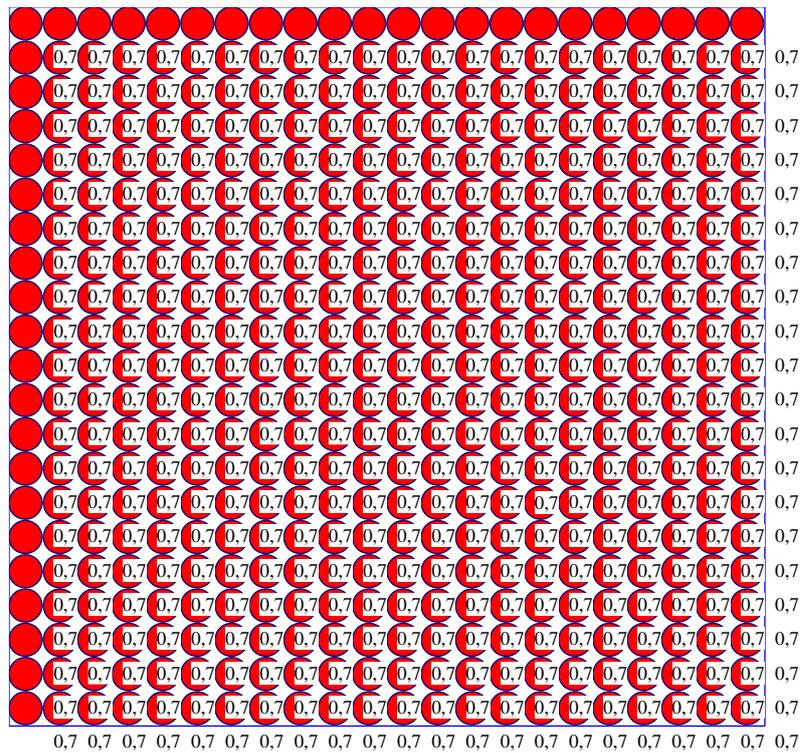


Bild 2.27 Pfahllasten Ph [MN] - NPRH

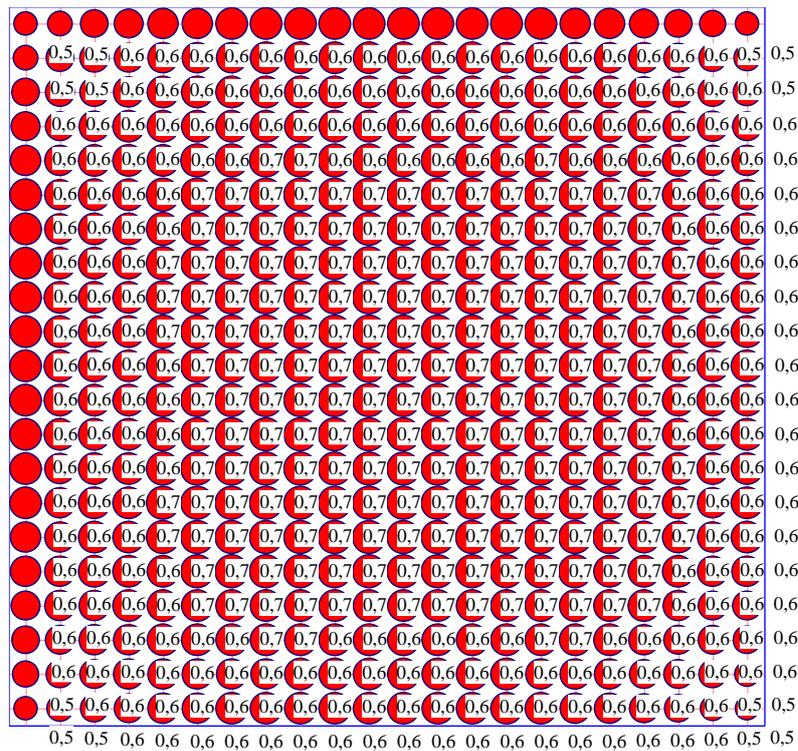


Bild 2.31 Pfahllasten Ph [MN] - NPRD

2.7.3.4 Pfahllasten nach dem Steifemodulverfahren für die starre Platte

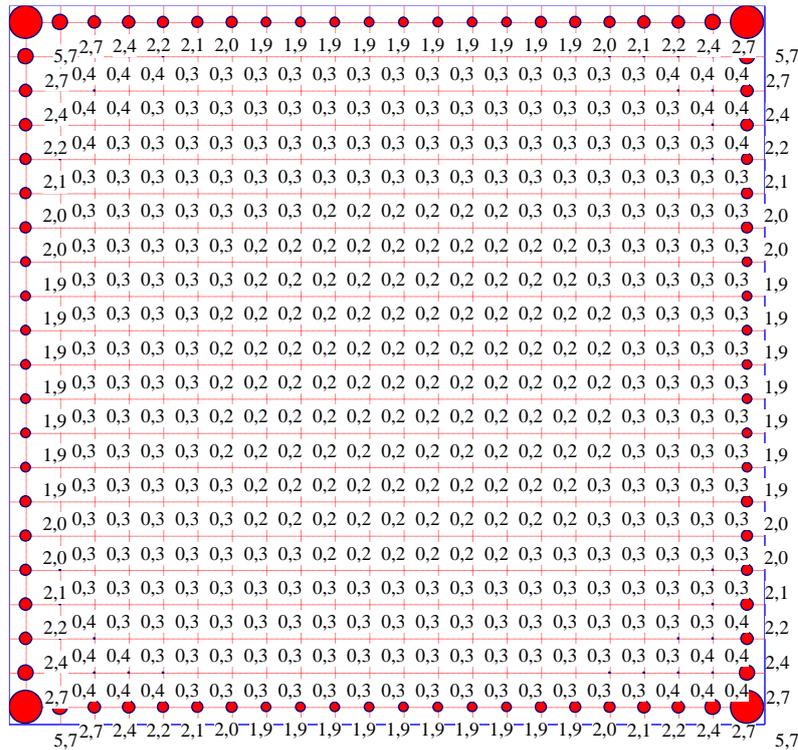


Bild 2.32 Pfahllasten Ph [MN] – LPR

Pfahlgruppen des *Dashwood Houses*

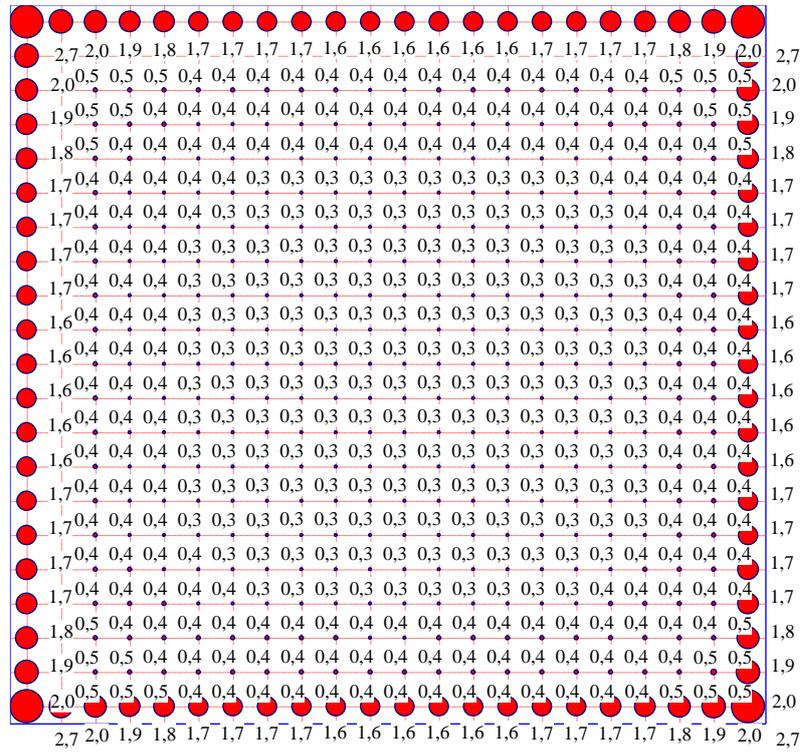


Bild 2.33 Pfahllasten Ph [MN] - *NPRH*

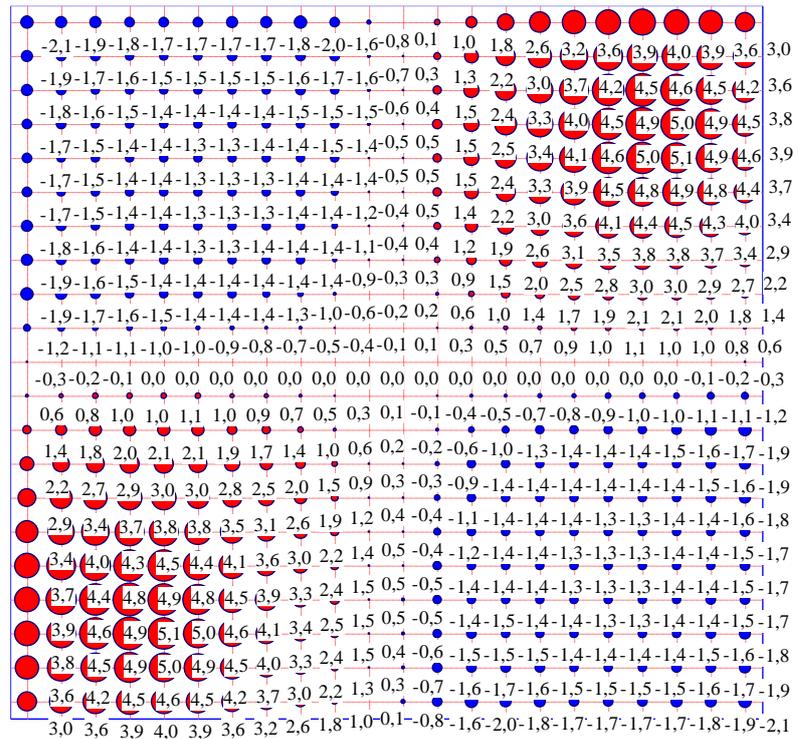


Bild 2.34 Pfahllasten Ph [MN] - *NPRD*

2.7.3.5 Pfahllasten nach dem Steifemodulverfahren für die starre Pfahlgruppe

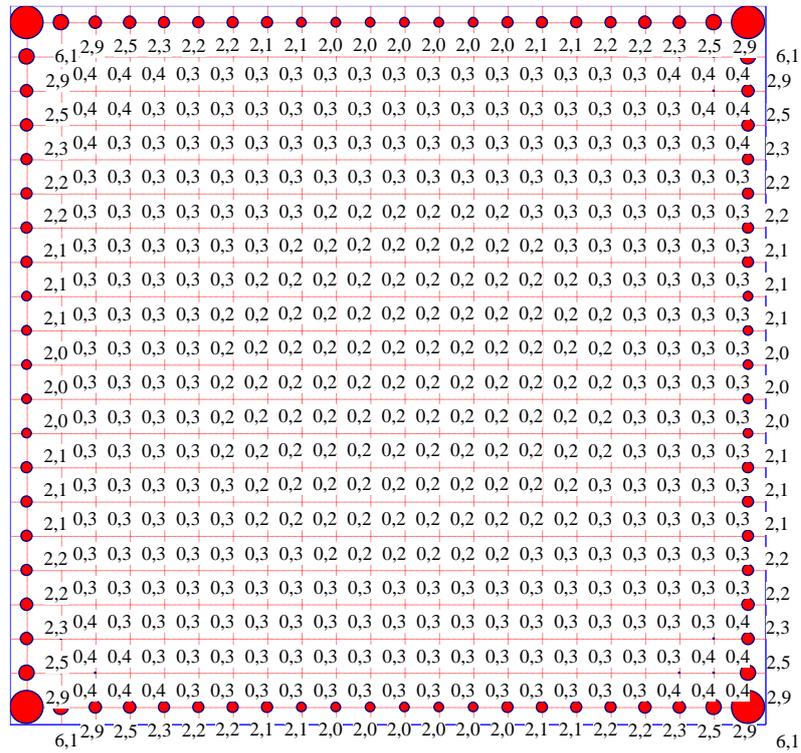


Bild 2.35 Pfahllasten Ph [MN] - LPR

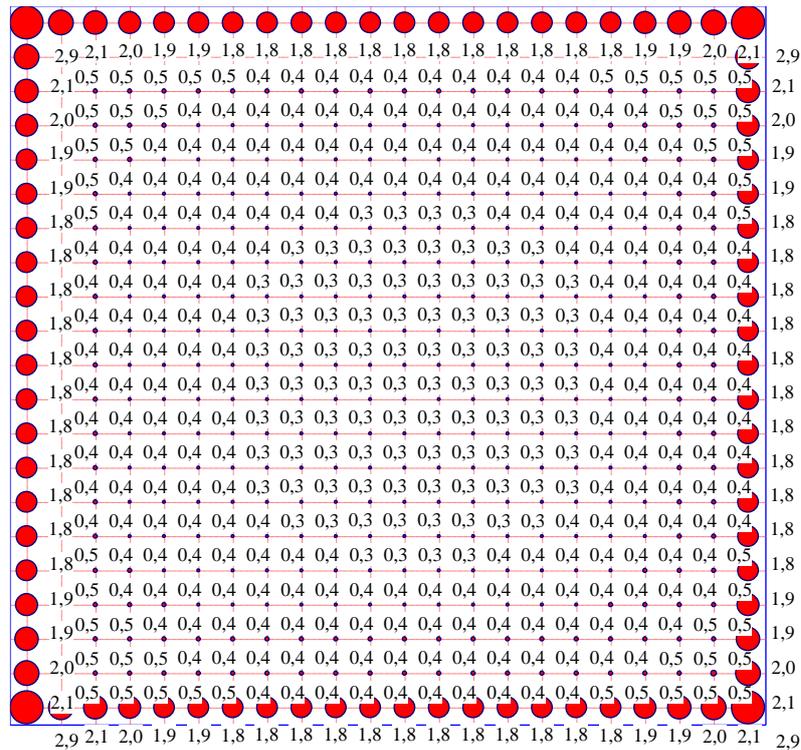


Bild 2.36 Pfahllasten Ph [MN] - NPRH

Pfahlgruppen des *Dashwood Houses*

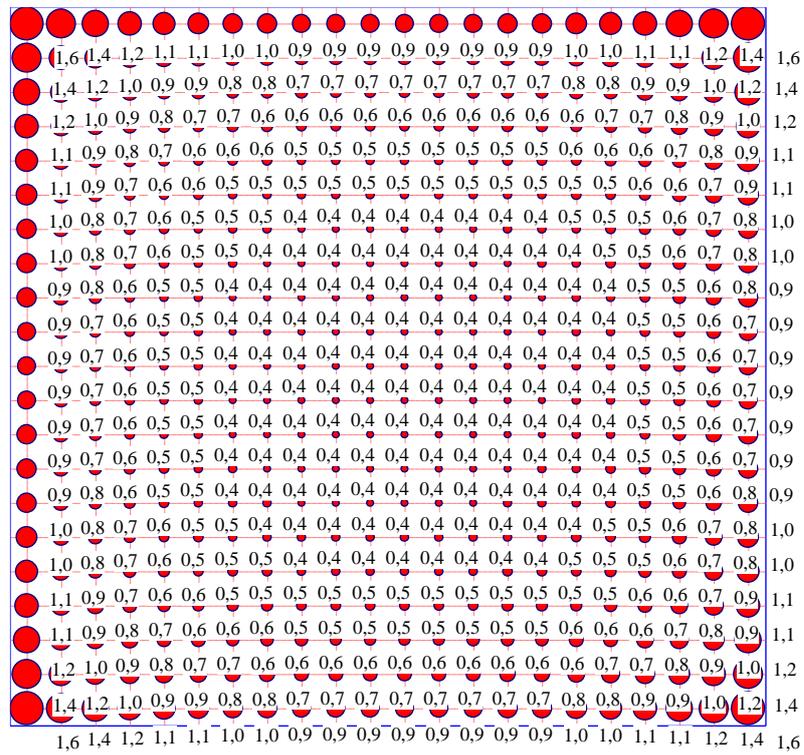


Bild 2.37 Pfahllasten Ph [MN] - *NPRD*

2.7.4 Tabellarische Darstellung

Tabelle 2.2 vergleicht zwischen den Setzungen und Tragwirkungskoeffizienten der Pfahlgruppen des *Dashwood Houses* für die verschiedenen Berechnungen. Die Tabelle vergleicht auch die berechneten Setzungen mit der gemessenen Setzung.

Tabelle 2.2 Vergleich zwischen den Ergebnissen der verschiedenen Berechnungen

Verfahren	Berechnung	Setzungen [cm]		gemessene Setzung [cm]	Tragwirkungskoeffizienten α_{kpp} [%]
		Max.	Min.		
Spannungstrapez	-	-	-	3.3	100
Bettungsmodul	<i>LPR</i>	0.24	0.23		99.7
	<i>NPRH</i>	0.28	0.27		99.7
	<i>NPRD</i>	0.50	0.49		99.5
Steifemodul für die elastische Platte	<i>LPR</i>	3.41	1.55		94.0
	<i>NPRH</i>	4.12	1.67		93.6
	<i>NPRD</i>	3.84	1.76		96.3
Steifemodul für die starre Platte	<i>LPR</i>	2.24			95.2
	<i>NPRH</i>	3.23			93.1
	<i>NPRD</i>	Keine Konvergenz			
Steifemodul für starre Pfahlgruppen	<i>LPR</i>	2.24		3.3	100
	<i>NPRH</i>	3.46			100
	<i>NPRD</i>	2.95			100

LPR = Lineare Berechnung

NPRH = Nichtlineare Berechnung mit einer hyperbolischen Funktion

NPRD = Nichtlineare Berechnung nach DIN 4014

2.8 Auswertung

Bild 2.38 bis Bild 2.41 zeigen die Diagramme der maximalen Setzungen, die Pfahllasten, Tragwirkungskoeffizienten, Pfahlwiderstand und Plattenwiderstand für Pfahlgruppen des *Dashwood Houses* bei verschiedenen Berechnungen.

2.8.1 Darstellung der Maximalen Setzungen

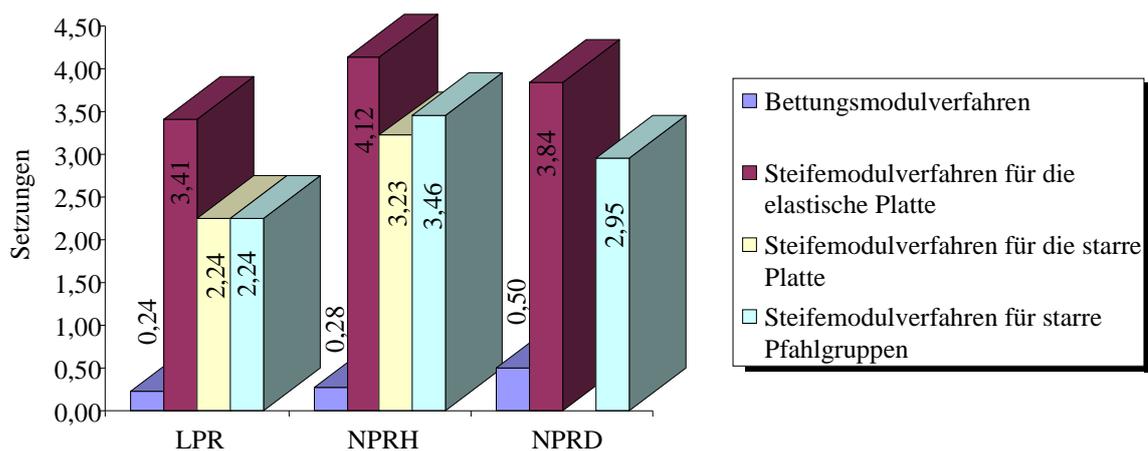


Bild 2.38 Maximale Setzungen [cm]

2.8.2 Darstellung der Tragwirkungskoeffizienten α_{kPP}

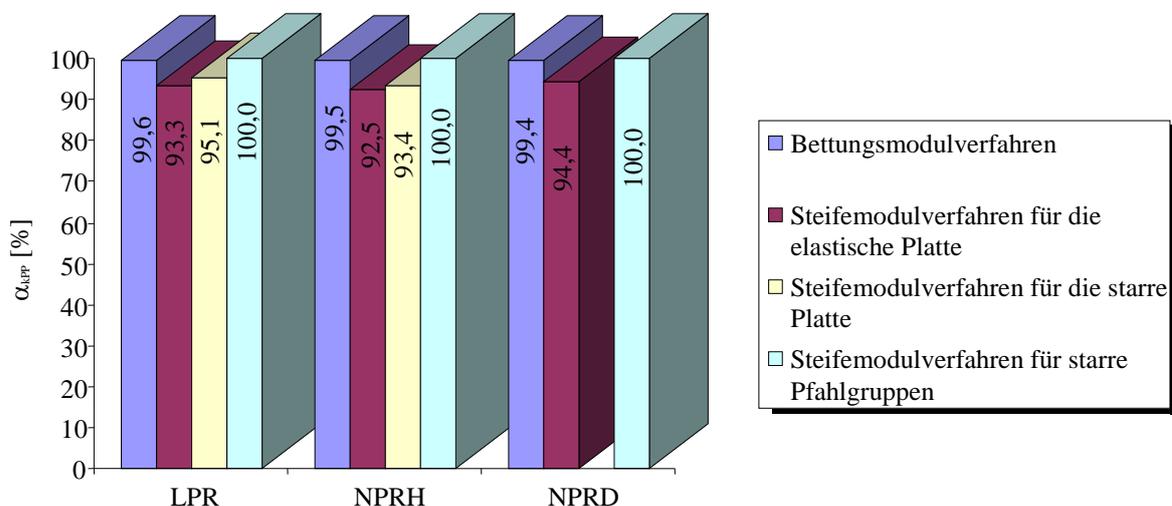


Bild 2.39 Tragwirkungskoeffizienten α_{kPP} [%]

2.8.3 Darstellung von Pfahlwiderstand und Plattenwiderstand

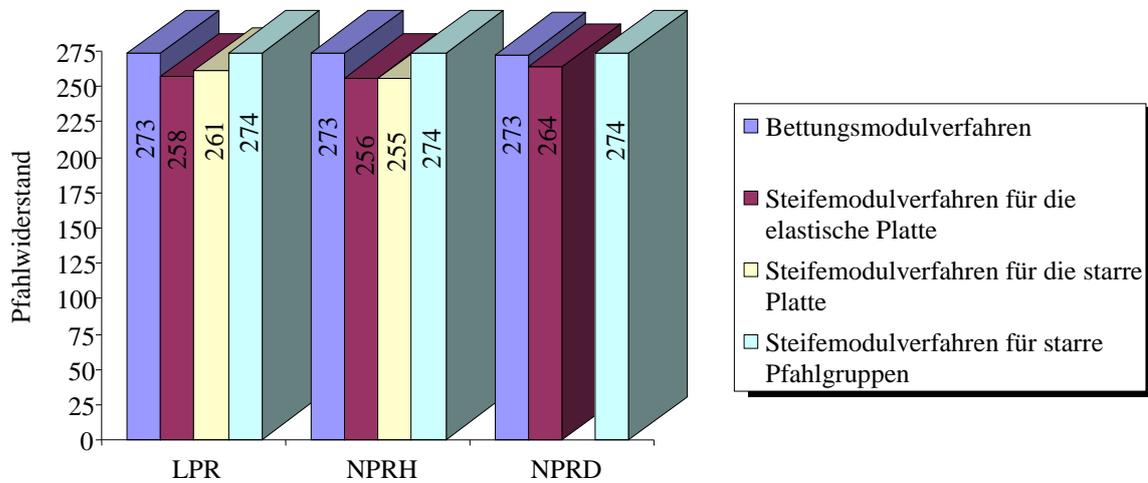


Bild 2.40 Pfahlwiderstand [MN]

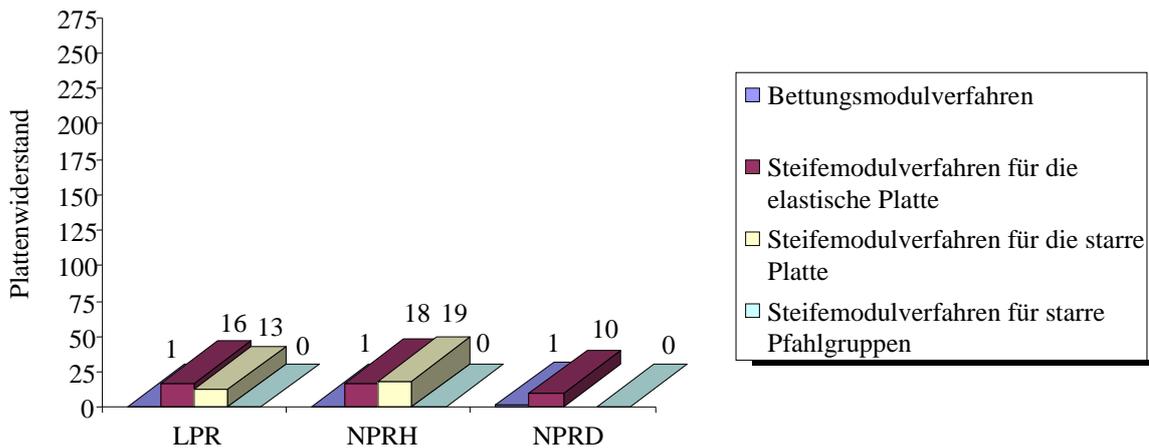


Bild 2.41 Plattenwiderstand [MN]

2.8.4 Vorhandene Messungen und Berechnungen

Hong et al. (1999) haben ein Verfahren für die Berechnung von großen vertikal belasteten Pfahlgruppen mit Hilfe von Lastübertragungskurven (*NPRLT*) entwickelt. Die Autoren haben das Verfahren *NPRLT* auf der Pfahlplatte des *Dashwood Houses* angewendet. Sie verglichen die berechnete Setzung mit der Feldmessung nach *Hooper* (1979). Die berechnete Setzung des *Dashwood Houses* nach *Hong et al.* (1999) mit *NPRLT* war 4.0 [cm], während die gemessene Setzung nach *Hooper* (1979) 3.3 [cm] ergab.

El Gendy (2007b) betrachtete das Fundament des *Dashwood Houses* als eine starre Pfahlgruppe, die auf einer sehr tiefen Tonschicht gegründet ist. Mit seinem Verfahren zur Berechnung von Pfählen hat er mit dem Kompressionsbeiwert C_c und der Anfangsporenzahl e_o eine Setzung von 2.9 [cm] berechnet.

2.8.5 Diskussion der Ergebnisse

In den meisten Berechnungen ist das Verhalten der Pfahlgruppe des *Dashwood Houses* ähnlich der Pfahlgruppe des *Stonebridge Towers*. Beide haben fast gleiche Pfahlanordnung, Lasten und Bodenbedingungen. Aus den Ergebnissen der verschiedenen Berechnungsverfahren lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

2.8.5.1 Spannungstrapezverfahren

- Wegen der Symmetrie des Systems liefert das Spannungstrapezverfahren an jedem Pfahl die gleiche Pfahllast.
- Der Tragwirkungskoeffizient ist 100%. Bei allen Berechnungsverfahren liegt der Tragwirkungskoeffizient zwischen 93% und 100%.
- Die Pfahllasten nach dem Spannungstrapezverfahren eines solchen Systems ähneln den Pfahllasten nach dem Bettungsmodulverfahren (Bild 2.25 bis Bild 2.28). Deshalb ähneln sich auch die Momente beim Spannungstrapezverfahren und Bettungsmodulverfahren.
- Beim Spannungstrapezverfahren gibt es keine Interaktion zwischen dem Boden und der Platte oder den Pfählen. Deshalb können die Setzungen nicht mit dem Verfahren abgeschätzt werden.

2.8.5.2 Bettungsmodulverfahren

- Das Bettungsmodulverfahren liefert die kleinsten Setzungen (Bild 2.4 bis Bild 2.6 und Tabelle 2.2). Die Differenz zwischen den Setzungen und der gemessenen Setzung ist groß. Vergleicht man die berechnete Setzung mit der gemessenen Setzung, so ergibt sich eine Differenz von 85% bis 93%. Dies bedeutet, dass die Ergebnisse der Setzungen nach dem Bettungsmodulverfahren falsch sind. Allerdings sind die Setzungen nach dem Bettungsmodulverfahren beim *Messeturm* plausibel.
- Die nichtlineare Berechnung (*NPRH*, *NPRD*) liefert größere Setzungen unter allen Knoten der Platte als die lineare Berechnung (*LPR*), wie es im Bild 2.4 bis Bild 2.6 dargestellt ist.
- Das Bettungsmodulverfahren hat die kleinsten Sohldrücke im Vergleich zum Steifemodulverfahren. Der Sohldruck befindet sich am Rand der Platte und liefert den maximalen Wert (Bild 2.16 bis Bild 2.18).
- Die Pfahllasten sind bei allen Pfählen konstant und haben den gleichen Wert sowohl nach dem linearen Verfahren (*LPR*) als auch nach den nichtlinearen Verfahren (*NPRH*, *NPRD*), Bild 2.26 bis Bild 2.28.
- Die Tragwirkungskoeffizienten aus der nichtlinearen Berechnung (*NPRH*, *NPRD*) sind kleiner als aus der linearen Berechnung (*LPR*), Tabelle 2.2.
- Die Differenz zwischen dem Tragwirkungskoeffizienten nach der linearen Berechnung und der nichtlinearen Berechnung für *NPRH* und für *NPRD* ist gering. Sie beträgt bei der nichtlinearen Berechnung 0% für *NPRH* und 0.2% für *NPRD* (Tabelle 2.2).

2.8.5.3 Steifemodulverfahren

- Das Steifemodulverfahren für die elastische Platte liefert die Setzungen als Isolinien in ovaler Form (Ellipse). Die Setzungen nehmen von außen nach innen hin zu und erreichen somit die maximale Setzung in der Mitte (Bild 2.7 bis Bild 2.9).
- Das Steifemodulverfahren für die starre Platte liefert eine gleichmäßige Setzung über die Platte (Bild 2.10 bis Bild 2.12). Das Bild 2.12 zeigt eine negative Setzung bei der nichtlinearen Berechnung (*NPRD*). Bei diesem Verfahren gibt es keine Konvergenz in der Genauigkeit der Berechnung.
- Die Setzungen der nichtlinearen Berechnung (*NPRH*, *NPRD*) sind größer als die Setzungen der linearen Berechnung (*LPR*), Tabelle 2.2.
- Beim Steifemodulverfahren für die elastische Platte befinden sich die Sohldrücke am Rand der Platte und nehmen jeweils von den Ecken bis zur Mitte der Kanten zu (Bild 2.19 bis Bild 2.21). Die drei Verfahren (*LPR*, *NPRH*, *NPRD*) liefern den gleichen maximalen Sohldruck.
- Beim Steifemodulverfahren für die starre Platte sind die Sohldrücke an den Kanten der Platte. Die Sohldrücke nehmen bei den Verfahren *LPR* und *NPRH* von der Mitte der Kanten bis zu den Ecken zu und bilden somit den maximalen Sohldruck an den Ecken. Die Sohldrücke an den Ecken weisen größere Werte auf (bis fast das 5-fache) im Vergleich zu den Sohldrücken an den Kanten.
- Das Verfahren *NPRD* liefert die maximalen Sohldrücke in der Mitte der längsten Kante der Platte. Es findet an derselben Kante ein Vorzeichenwechsel statt. Daher ergeben sich an den restlichen Kanten einschließlich Ecken negative Sohldrücke (Bild 2.22 bis Bild 2.24).
- Beim Steifemodulverfahren für starre Pfahlgruppen sind die Sohldrücke gleich Null aufgrund der fehlenden Kontaktfläche zwischen Platte und Boden.
- Beim Steifemodulverfahren für die elastische Platte sind die größten Pfahllasten im mittleren Bereich der Platte (Bild 2.25 und Bild 2.29 bis Bild 2.31)
- Beim Steifemodulverfahren für die starre Platte befinden sich die größten Pfahllasten bei den Verfahren *LPR*, *NPRH* an den Kanten und Ecken. Beim Verfahren *NPRD* gibt es einen Vorzeichenwechsel bei den Pfahllasten (Bild 2.32 bis Bild 2.34).
- Beim Steifemodulverfahren für starre Pfahlgruppen nehmen die Pfahllasten von der Mitte der Platte bis zu den Kanten und Ecken zu. Die maximalen Pfahllasten sind an den Kanten und Ecken der Platte. Der maximale Sohldruck ist an den Ecken (Bild 2.35 bis Bild 2.37)
- Die Tragwirkungskoeffizienten aus der nichtlinearen Berechnung (*NPRH*, *NPRD*) sind generell kleiner als aus der linearen Berechnung (*LPR*), Tabelle 2.2.

Allgemein kann man aus den Ergebnissen der verschiedenen Berechnungsverfahren Folgendes erkennen:

- Die Setzungen sind bei den nichtlinearen Berechnungen (*NPRH*, *NPRD*) unter allen Knoten der Platte größer als bei linearer Berechnung (*LPR*), Tabelle 2.2.
- Die Tragwirkungskoeffizienten liegen zwischen 93% und 100% (Tabelle 2.2).
- Der Pfahlwiderstand liegt fast bei 100%. Bei einer KPP wirken beide Elemente (Pfahl, Platte) zusammen.
- Das System für die starre Pfahlgruppe ist daher maßgebend.
- Unter verschiedenen Berechnungen ist das Verhalten der Pfahlgruppe des *Dashwood Houses* ähnlich der Pfahlgruppe des *Stonebridge Towers*. Vielleicht ist dies damit verbunden, dass die zwei Bauwerke fast die gleiche Geometrie des Fundaments, d.h. Gründung mit Pfahlanordnung, Lasten und Baugrundbedingung aufweisen.

2.8.6 Schlussfolgerungen

Aufgrund des geringeren Abstands der einzelnen Pfähle untereinander wird das System ohne Kontaktfläche und somit ohne die Interaktion zwischen Platte-Boden und Platte-Pfähle betrachtet. Folglich sind die Ergebnisse der Pfahl-Plattengründung denen von Pfahlgruppen ähnlich. Deshalb ist die Berechnung des Systems als Pfahlgruppe geeignet. Die Ergebnisse der Setzungen nach dem Steifemodulverfahren für die elastische Platte, die starre Platte und die starre Pfahlgruppe sind plausibel. Das Steifemodulverfahren für die starre Pfahlgruppe ist maßgebend. Gemessen wurde eine Setzung von 3.3 [cm]. Nach dem Steifemodulverfahren für starre Pfahlgruppen mit Verwendung der DIN 4014 (*NPRD*) erhält man 2.95 [cm] und mit Verwendung der hyperbolischen Funktion (*NPRH*) erhält man 3.46 [cm]. Das Bettungsmodulverfahren liefert unrealistische Werte.

2.8.7 Empfohlene Berechnungsverfahren

Tabelle 2.3 zeigt die empfohlenen Berechnungsmethoden für Pfahlgruppen des *Dashwood Houses* und ähnlichen Gründungssystemen. Als Ergebnis des Untersuchungsfalles der Vergleichsberechnungen wird empfohlen, sicherheitshalber den Typ des Berechnungsverfahrens für die Pfahl-Plattengründung entsprechend der Aufstellung in der Tabelle 2.3 zu wählen. Man kann diese Verfahren für ähnliche Pfahl-Plattengründungen oder Pfahlgruppen verwenden, die auf Tonschichten liegen wie in Frankfurt und London. In der Tabelle wird das Berechnungsverfahren als plausibel betrachtet, wenn der Unterschied zwischen der gemessenen Setzung und der berechneten Setzung weniger als ca. 20% ist.

Tabelle 2.3 Untersuchungsfall 2: Pfahlgruppen des *Dashwood Houses* in London

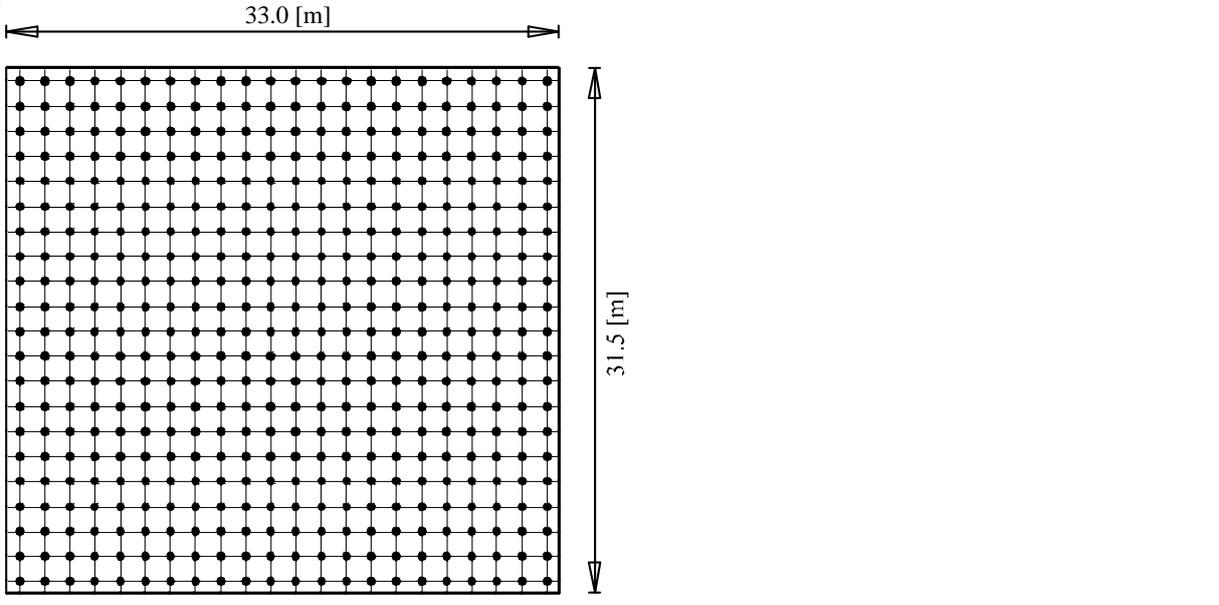


Diagram showing a grid of piles. The width is 33.0 [m] and the height is 31.5 [m]. The grid consists of 33 columns and 14 rows of piles, totaling 462 piles.

Beschreibung des Falles:

Höhe = 61
 Anzahl der Stockwerke = 14
 Fundamentfläche = 33 [m] × 31.5 [m]
 Plattendicke = 0.9 [m]
 Last = 264 [kN/m²]
 Anzahl der Pfähle = 462
 Pfahllänge = 15 [m]
 Pfahldurchmesser = 0.489 [m]
 Pfahlabstände = 1.5 [m]

Empfohlene Berechnungsverfahren	berechnete Setzung [cm]	gemessene Setzung [cm]	Differenz [%]
Steifemodul für die elastische Platte - <i>LPR</i>	3.41	3.3	3
Steifemodul für die elastische Platte - <i>NPRD</i>	3.84		16
Steifemodul für die starre Platte - <i>NPRH</i>	3.23		2
Steifemodul für starre Pfahlgruppen - <i>NPRH</i>	3.46		5
Steifemodul für starre Pfahlgruppen - <i>NPRD</i>	2.95		11

2.9 Literatur

- [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.
- [26] *Hattab, F* (2007):Vergleichende Untersuchungen numerischer Modelle für die Berechnung von Pfahlplattengründungen. *Diplomarbeit, Institut für Geotechnik, UNIVERSITÄT SIEGEN*.