

# Setzungen und Beanspruchungen bei Gründungen auf Pfahlgruppen

Pfahlgründungen sind eine in der Baupraxis häufig verwendete Form der Tiefengründung. Dabei ist es allgemein bekannt, daß in Gruppen angeordnete Pfähle sich in ihrem Widerstands-Setzungsverhalten gegenseitig beeinflussen. Derzeit fehlt es allerdings an vereinfachten praxisnahen Berechnungsverfahren, welche die Gruppenwirkung in einem ausreichenden Maß berücksichtigen.

Im vorliegenden Beitrag ist eine zur neuen DIN 1054:2005-01 konforme Nachweisführung von Pfahlgruppen nach dem Teilsicherheitskonzept unter Berücksichtigung der Gruppenwirkung aufgezeigt. Das hier vorgestellte Verfahren basiert auf Nomogrammen, die aus einer umfangreichen numerischen Parameterstudie abgeleitet wurden und mit Berechnungen nach einem erweiterten analytischen Verfahren ergänzt wurden. Mit dem vorgestellten Verfahren ergibt sich sowohl die mittlere Setzung der Pfahlgruppe als auch die Verteilung der Pfahlwiderstände unter der Pfahlkopfplatte unter Berücksichtigung der Gruppenwirkung.

**Settlements and pile resistance of foundations by pile groups.** *Pile foundations are a commonly used type of deep foundations. It is well known that piles arranged in a group can affect each other and influence their resistance-settlement behaviour. At present no satisfactory simplified approach that considers the group effect is available for pile groups. Therefore, the aim of this paper is to develop a simple design approach for pile groups which take into account the partial safety concept according to DIN 1054:2005-01. The design approach is presented in form of design charts, which are developed based on extensive numerical parameter studies complemented by the results of extended analytical methods. With this design approach, the average settlement of a pile group as well as the distribution of the different pile resistances within the pile group can be predicted with due consideration of the group effect.*

## 1 Einleitung

Bei Pfahlgründungen werden die hohen Gründungslasten von Bauwerken in der Regel auf mehrere Pfähle verteilt, die als Gruppe unter der Gründungsplatte angeordnet sind. Infolge der gegenseitigen Beeinflussung der Pfähle, die als Gruppenwirkung bezeichnet wird, weisen die Gruppenpfähle oftmals ein abweichendes Tragverhalten gegenüber vergleichbaren Einzelpfählen auf. So kann die Gesamttragfähigkeit einer Pfahlgruppe geringer oder auch größer als die Summe der Tragfähigkeit einer gleichen Anzahl an Einzelpfählen sein. Die Setzungen der Gruppe weichen dabei bei gleicher Last besonders bei Bohrpfählen von den Setzungen am Einzelpfahl ab. Sowohl die Setzungen

als auch die Pfahlwiderstände verteilen sich in einer Pfahlgruppe positionsabhängig [1].

Nach ihrer Position in der Gruppe lassen sich Pfähle im wesentlichen in drei Kategorien einteilen, siehe Bild 1:

- Eckpfähle
- Randpfähle
- Innen- bzw. Zentrumsfähle

In einer zentrisch belasteten Pfahlgruppe aus Bohrpfählen mit weitgehend starrer Kopfplatte entwickeln i. d. R. die Eckpfähle bis zum Erreichen der Grenzlast die größten, die Zentrumsfähle die geringsten Pfahlwiderstände.

Mit der Einführung der neuen DIN 1054:2005-01 nach dem Teilsicherheitskonzept muß für bestimmte Randbedingungen bei der Bemessung

von Pfahlgründungen die Gruppenwirkung stärker als bisher berücksichtigt werden. Dabei sind insbesondere Beanspruchungen der aufgehenden Konstruktion über Pfahlgruppen zu beachten, die sich ergeben können aus

- einer ungleichmäßigen Verteilung der Pfahlwiderstände infolge von Gruppenwirkung
- den sich einstellenden größeren Setzungen infolge von Gruppenwirkung
- den auftretenden Setzungsdifferenzen zwischen Pfählen oder Pfahlgruppen sowie
- der Berücksichtigung der Nichtlinearität des Widerstands-Setzungsverhaltens der Pfähle.

Derzeit fehlt es allerdings an vereinfachten praxisnahen Berechnungsverfahren, die diese Aspekte in einem ausreichenden Maß berücksichtigen. In diesem Beitrag wird ein vereinfachtes, auf Nomogrammen basierendes Berechnungsverfahren für Druckpfahlgruppen vorgestellt, welches nach Meinung der Verfasser die neuen An-

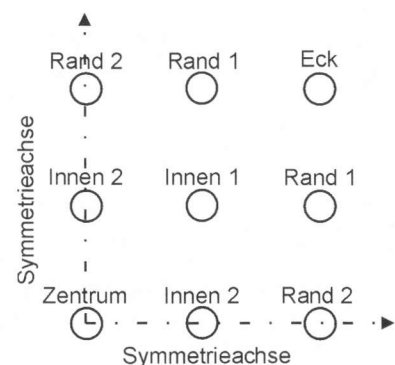


Bild 1. Bezeichnung der Pfähle in Abhängigkeit der Stellung in der Pfahlgruppe, Beispiel einer 5 × 5-Pfahlgruppe Fig. 1. Notation of the piles in order of the position in the group, example of a 5 × 5 pile group

forderungen nach DIN 1054 erfüllt. Grundlage für dieses Verfahren ist eine umfangreiche Parameterstudie, die sowohl auf der Anwendung der Finiten-Elemente-Methode als auch auf einem weiterentwickelten analytischen Berechnungsverfahren beruht. Letzteres ist hier nicht dargestellt und kann [5] entnommen werden.

Das vorgestellte Nomogrammverfahren setzt die Kenntnis der Widerstands-Setzungslinie eines zu den betrachteten Gruppenpfählen äquivalenten Einzelpfahls voraus, z. B. aus einer Pfahlprobelastung oder aus Erfahrungswerten. Aus den Nomogrammen kann ein Faktor abgeleitet werden, um den sich das Verhalten des Gruppenpfahls gegenüber dem Einzelpfahl unterscheidet. Damit können sowohl die Widerstände der Gruppenpfähle als auch die mittlere Gruppensetzung ermittelt werden.

Mit diesen Angaben können auch die charakteristischen Einwirkungen und Beanspruchungen im Schnitt Gründung – aufgehendes Tragwerk abgeleitet werden, die als Grundlage

für die Nachweisführung und Bemessung der aufgehenden Konstruktion und der Abschätzung der Gesamtsetzungen von Pfahlgruppen dienen.

## 2 Parameterstudie

### 2.1 Randbedingungen

Bei der Parameterstudie wurde zunächst von einer Bezugspfahlgruppe bestehend aus  $5 \times 5$  Bohrpfählen ( $D = 90$  cm) ausgegangen. Die Pfahlkopfplatte wurde als ideal starr ( $EI = \infty$ ) angenommen.

Die in der weiteren Parameterstudie durchgeführte Variation der veränderlichen Größen ist in Tabelle 1 aufgeführt.

Um ein repräsentatives Spektrum an häufig vorkommenden Untergrundverhältnissen zu erfassen, wurden Bodenkenngößen für unterschiedliche Böden zusammengestellt, wobei sich deren Steifigkeit als die maßgebliche Bodenkenngöße herausgestellt hat, siehe Tabelle 2. In allen Fällen wurde rechnerisch unterhalb der Pfahlkopfplatte eine wenig

tragfähige Weichschicht von 3,0 m Mächtigkeit angeordnet. Der Steifemodul  $E_S$  ist bekanntlich eine spannungsabhängige Bodenkenngöße und nimmt i. allg. mit der Tiefe zu, siehe z. B. [6]. Um in der Parameterstudie die Einflüsse aus Steifemodul und Pfahlänge getrennt erfassen zu können, wurde jedoch von einem mittleren Steifemodul ausgegangen, der über die gesamte Modelltiefe angesetzt wurde. Durch Vergleichsberechnungen konnte nachgewiesen werden, daß damit die berechneten Setzungen eine obere Schranke darstellen und auf der sicheren Seite liegen.

Der weitere rechnerische Einflußparameter, die Modelltiefe, wurde in der Parameterstudie nach dem Kriterium für Setzungsberechnungen aus DIN 4019 auf die Tiefe festgelegt, bei der die lotrechten Bodenspannungen infolge der Gründungslasten 20 % der Überlagerungsspannung betragen.

Für die Parameterstudie wurde davon ausgegangen, daß die Pfahlgründungen im Grundwasser stehen.

Die Berechnungen wurden jeweils bis zu einer Grenzsetzung von  $0,1 \cdot D$  bezogen auf den Einzelpfahl durchgeführt. Der maßgeblich betrachtete Bereich ist allerdings der Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit, der bei Bohrpfählen in der Größenordnung von  $0,02 \cdot D$  bis  $0,03 \cdot D$  angesetzt werden kann. Bei Verdrängungspfählen geht dieser nach [7] bis etwa  $0,035 \cdot D_{eq}$ .

Der vorliegende Beitrag behandelt schwerpunktmäßig Druckpfahlgruppen mit Bohrpfählen.

Tabelle 1. Bandbreite der variablen Größen für die Parameterstudie

Table 1. Bandwidth of the variables used in the parameter study

	Wert	Einheit
Pfahldurchmesser D	0,30 / 0,40 / 0,60 / 0,90 / 1,20 / 1,50	m
Pfahlänge L	9 / 12 / 18 / 24	m
Pfahlabstand a	$3 \cdot D / 6 \cdot D / 9 \cdot D$	-
Bodenart	siehe Tabelle 2	-
Pfahlkopfplattensteifigkeit EI	$\infty$ (biegesteif)	MNm <sup>2</sup>
Herstellungsart der Pfähle	Bohrpfähle	-
Gruppengröße	Einzelpfahl, Gruppen bis 81 Pfähle	-

Tabelle 2. Angesetzte Bodenkenngößen

Table 2. Used ground parameter

	Weichschicht	Angesetzte Bodenparameter								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Reibungswinkel $\phi'$ [°]	20	25	25	25	25	20	20	32,5	35	40
Kohäsion $c'$ [kN/m <sup>2</sup> ]	0	0	5	10	10	20	40	0	0	0
Wichte (erdfeucht) $\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	14	17,5	18,5	19,5	17,5	18,5	19,5	17	19	21
Wichte (unter Auftrieb) $\gamma'$ [kN/m <sup>3</sup> ]	4	7,5	8,5	9,5	7,5	8,5	9,5	9,5	11,5	12,5
Dilatanzwinkel $\psi$ [°]	0	0	0	0	0	0	0	2,5	5	10
Steifemodul $E_S$ [MN/m <sup>2</sup> ]	1,5	3	6	9	15	20	25	30	50	70
Elastizitätsmodul E [MN/m <sup>2</sup> ]	0,4	2,2	4,5	6,5	11	15	19	22	37	52
Querdehnzahl $\nu$ [-]	0,45	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Erdruchdruckbeiwert $K_0$ [-]	0,66	0,58	0,58	0,58	0,58	0,66	0,66	0,46	0,43	0,36

## 2.2 Numerisches Berechnungsmodell

### 2.2.1 Allgemeines

Die numerischen Untersuchungen zum Trag- und Verformungsverhalten von Pfahlgruppen wurden mit dem Finite-Elemente-Programm ABAQUS durchgeführt. Ausgehend von rotationsymmetrischen und dreidimensionalen Einzelpfahlberechnungen wurde ein räumliches Modell für die Berechnung von Pfahlgruppen entwickelt. Der Pfahlwiderstand setzt sich aus den Anteilen Pfahlfußwiderstand und Pfahlmantelreibung zusammen, die im Berechnungsmodell zutreffend abzubilden sind. Die mit dem aufgestellten Berechnungsmodell erzielte Realitätsnähe wurde anhand der Rückrechnung bekannter Pfahlprobebelastungsergebnisse belegt, siehe [5].

### 2.2.2 Pfahlmodellierung

In der durchgeführten Parameterstudie sollte vorwiegend der Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit bei geringen Setzungen und einem überwiegenden Anteil des Pfahlwiderstands aus Mantelreibung betrachtet werden. Daher wurden für die Untersuchungen im Querschnitt quadratische Pfähle abgebildet, die eine zum runden Pfahl äquivalente Mantelfläche aufweisen.

Der Verbund zwischen Pfahl und Boden wird mit Kontinuums-Elementen ohne zusätzliche Interface-Elemente oder Kontaktflächen modelliert, siehe Bild 2. Hierbei stellt sich ein Schervorgang unmittelbar an den Elementen am Pfahlmantel ein, der die vorhandene Mantelreibung gut beschreibt. Eigene Vorstudien und die

Untersuchungen in [2] haben die numerische Eignung dieses direkten Kontaktes zwischen Boden und Pfahl belegt.

Die Elementdicke am Pfahlschaft beeinflusst die Berechnungsergebnisse des Pfahlwiderstands. Je dicker die Elemente gewählt werden, um so steifer verhält sich der Pfahl. Dieses Verhalten wurde ebenfalls in [3] und [4] festgestellt. Vergleichsrechnungen, in denen der Verbund zwischen Pfahl und Boden über Kontaktflächen hergestellt wurde, haben gezeigt, daß eine Elementdicke von  $d_{el} = 0,3 \cdot r$  ( $r$  Pfahlradius) einen realistischen Verbund zwischen Pfahl und Boden abbildet. Für die in diesem Beitrag beschriebenen Studien wurde deswegen einheitlich diese Elementdicke gewählt.

Um die Anzahl der einfließenden Parameter bei der Beschreibung des Bodenverhaltens gering zu halten, wurde für die Parameterstudie das relativ einfache Stoffgesetz nach *Mohr-Coulomb* verwendet. Damit konnten alle betrachteten Böden rechnerisch erfaßt werden. Die Modellierung der Stahlbetonteile der Pfähle und der Pfahlkopfplatte erfolgt über einen linear-elastischen Ansatz.

### 2.2.3 Pfahlart

Die bisherige Beschreibung des Berechnungsmodells bezieht sich im wesentlichen auf die Abbildung von Bohrpfählen. Diese zeigen im Vergleich zu anderen Pfahlsystemen, wie z. B. Verdrängungspfählen oder Verpreßpfählen, nur eine geringe Beeinflussung des Bodens infolge der Pfahlherstellung. Deshalb ist dieses für Bohrpfähle zutreffende numeri-

sche Berechnungsmodell nicht direkt auf andere Pfahlarten übertragbar. Bei anderen Pfahlarten müssen zusätzliche Einflüsse infolge der Herstellung oder Einbringung der Pfähle berücksichtigt werden, so daß Änderungen des Spannungszustandes oder der Lagerungsdichte in der Pfahlumgebung erfaßt werden.

Die aufgeführte numerische Parameterstudie bezieht sich daher zunächst ausschließlich auf Bohrpfähle.

## 3 Näherungsverfahren zur Pfahlgruppenwirkung

### 3.1 Vorgehensweise

Das im folgenden beschriebene Näherungsverfahren zur Berechnung von Pfahlgruppen unter Berücksichtigung der Gruppenwirkung basiert auf Nomogrammen, welche die unterschiedlichen Einflußfaktoren nach Tabelle 1 auf das Trag- und Setzungsverhalten von Pfahlgruppen berücksichtigen.

Die Nomogramme wurden aus den umfangreichen numerischen Parameterstudien so aufgestellt, daß die Multiplikation aller relevanten Einflußfaktoren das Maß der Gesamtgruppenwirkung ergibt. Dabei bezieht sich der erste Einflußfaktor auf eine definierte Bezugspfahlgruppe, siehe Abschn. 2.1. Abweichungen gegenüber der Bezugspfahlgruppe werden über die weiteren Einflußfaktoren berücksichtigt.

Die Gruppenwirkung kann sowohl über den **Gruppenfaktor**  $G_{R,i}$  bezogen auf die Pfahlwiderstände als auch über den **Gruppenfaktor**  $G_s$  bezogen auf die Setzungen ermittelt werden, siehe Gln. (1) bzw. (2).

Der Gruppenfaktor  $G_{R,i}$  ist definiert als der Quotient des Pfahlwiderstands des Gruppenpfahls geteilt durch den Pfahlwiderstand  $R_E$  eines vergleichbaren Einzelpfahls bei gleicher Setzung. Den Wert des Gruppenfaktors erhält man durch Multiplikation der Einflußfaktoren  $\lambda_1$  bis  $\lambda_4$  aus den entwickelten Nomogrammen.

$$G_{R,i} = \frac{R_{G,i}}{R_E} = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \lambda_4 \quad (1)$$

mit:

$G_{R,i}$  Gruppenfaktor bezüglich der Widerstände für den  $i$ -ten Pfahl einer Gruppe

$R_{G,i}$  Gruppenpfahlwiderstand ( $i$ -ter Pfahl)

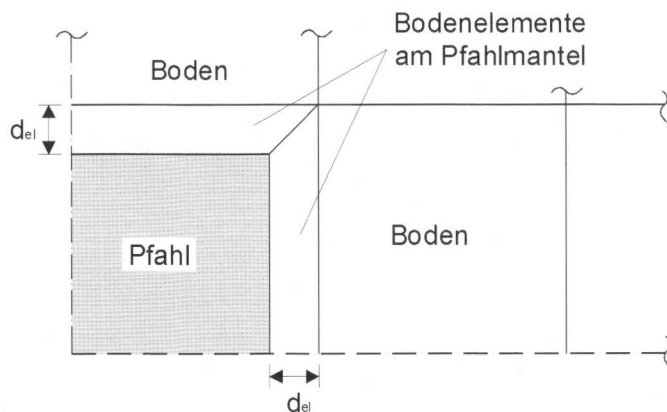


Bild 2. Ausschnitt aus dem FE-Netz mit der Definition der Elementbreite  $d_{el}$  des Bodenelementes am Pfahlmantel

Fig. 2. Detail of the FE-net including the definition of the wide  $d_{el}$  of the ground element touching the pile shaft

- $R_E$  Pfahlwiderstand eines vergleichbaren Einzelpfahls
- $\lambda_1$  Einflußfaktor Bodenart, Gruppegeometrie (Pfahllänge  $L$ , Einbindetiefe  $d$ , Pfahlabstand  $a$ ), betrachtete Setzung  $s$
- $\lambda_2$  Einflußfaktor Gruppengröße
- $\lambda_3$  Einflußfaktor Pfahlart
- $\lambda_4$  Einflußfaktor Steifigkeit der Pfahlkopfplatte  $EI$

Aufgrund des nichtlinearen Pfahltragverhaltens sind die Nomogramme für  $\lambda_1$  bis  $\lambda_4$  setzungsabhängig. Daher wurden diese Nomogramme für Setzungen von 2 %, 3 %, 5 % und 10 % des Einzelpfahldurchmessers entwickelt. Die ersten drei Setzungsgrößen sollen den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit und die letzte Setzung den Grenzzustand der Tragfähigkeit berücksichtigen.

In diesem Beitrag wird zunächst vereinfachend von einer als ideal biegesteif anzusehenden Pfahlkopfplatte ausgegangen. Somit beträgt der Einflußfaktor  $\lambda_4 = 1,0$ . Weitere eigene Untersuchungen haben gezeigt, daß diese Annahme für viele praktische Anwendungen als zutreffend angesehen werden kann, siehe [5].

Für den Gruppenfaktor  $G_s$  wurden gleichermaßen Nomogramme erstellt, so daß der Gruppenfaktor  $G_s$  einer Pfahlgruppe bezogen auf die Setzungen eines vergleichbaren Einzelpfahls bei gleichem Widerstand ermittelt werden kann zu:

$$G_s = \frac{S_G}{S_E} = S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \cdot S_4 \quad (2)$$

mit:

- $G_s$  setzungsbezogener Gruppenfaktor für die mittlere Setzung einer Pfahlgruppe
- $S_G$  mittlere Setzung einer Pfahlgruppe
- $S_E$  Setzung eines vergleichbaren Einzelpfahls
- $S_1$  Einflußfaktor Bodenart, Gruppegeometrie (Pfahllänge  $L$ , Einbindetiefe  $d$ , Pfahlabstand  $a$ )
- $S_2$  Einflußfaktor Gruppengröße
- $S_3$  Einflußfaktor Pfahlart
- $S_4$  Einflußfaktor Steifigkeit der Pfahlkopfplatte  $EI$

In den Abschnitten 3.2 und 3.3 sind Beispiele der entwickelten Nomogramme dargestellt. Die vollständigen Nomogramme finden sich in [5] und [8].

### 3.2 Verteilung der Pfahlwiderstände

Bei den Nomogrammen bezogen auf die Pfahlwiderstände sind Eck-, Rand- und Innenpfähle zu unterscheiden, siehe Bild 1.

Bild 3 zeigt Nomogramme für den Einflußfaktor  $\lambda_1$  aus Gl. (1) für die Bezugs-pfahlgruppe. Im folgenden werden die weiteren Einflußfaktoren der Gl. (1) erläutert.

Der Pfahldurchmesser wurde zwischen  $D = 0,4$  bis  $1,50$  m variiert. Bisher wurde üblicherweise der Pfahldurchmesser als einer der wesentlichen Bezugsparameter für die Gruppenwirkung bei Pfählen angesehen. Die eigenen Untersuchungen haben aber ergeben, daß mit der gewählten Darstellungsform nach Bild 3 die Gruppenwirkung unabhängig vom Pfahldurchmesser angegeben werden kann. Bild 4 zeigt beispielhaft Berechnungsergebnisse für unterschiedliche Pfahldurchmesser. Es ergaben sich nur unwesentliche Unterschiede der Ergebnisse in Abhängigkeit des Pfahldurchmessers. Somit kann der Einflußfaktor  $\lambda_1$  für alle untersuchten Pfahldurchmesser angesetzt werden. Die Bilder 5 und 6 enthalten weitere Nomogramme für unterschiedliche Baugrundsteifigkeiten.

Es sei nochmals darauf hingewiesen, daß der Pfahldurchmesser ohne wesentlichen Einfluß auf die Nomogramme für die Gruppenwirkung bei der gewählten Darstellungsform ist. Da der nach Gl. (1) ermittelte Gruppenfaktor auf den Pfahlwiderstand eines vergleichbaren Einzelpfahls bezogen wird, ergeben sich in absoluten Größen abweichende Gruppen-

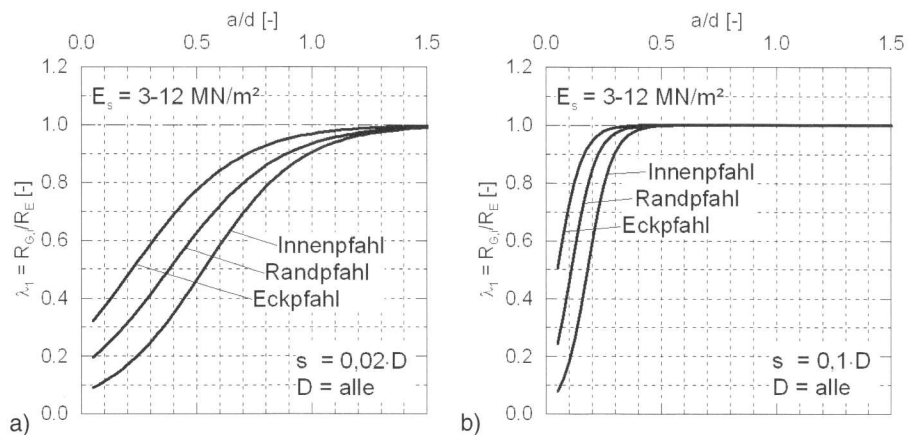


Bild 3. Nomogramme des Einflußfaktors  $\lambda_1$  (Bezugs-pfahlgruppe) bei einer bezogenen Setzung von a)  $0,02 \cdot D$ , b)  $0,1 \cdot D$   
 Fig. 3. Design chart for the factor  $\lambda_1$  (standard group) with a settlement of a)  $0,02 \cdot D$ , b)  $0,1 \cdot D$

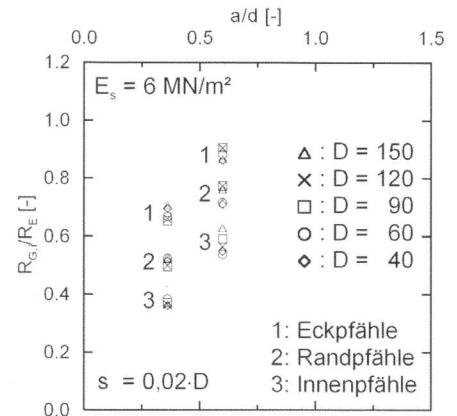


Bild 4. Variation des Pfahldurchmessers von  $D = 0,40$  bis  $1,50$  m bei  $a/d = 0,36$  bzw.  $0,6$  (FEM)  
 Fig. 4. Variation of the pile diameter of  $D = 0.40$  bis  $1.50$  m with  $a/d = 0.36$  and  $0.6$  respectively (FEM)

wirkungen in Abhängigkeit des Pfahldurchmessers.

Es wurde erwartet, daß die Gruppengröße einen erheblichen Einfluß auf die Gruppenwirkung hat. Die Berechnungsergebnisse haben aber gezeigt, daß die Eck- und Randpfähle nahezu unbeeinflusst von der Gruppengröße reagieren. Lediglich die Innenpfähle zeigten eine deutliche Abhängigkeit von der Gruppengröße. Pfahlgruppen mit einer kleineren Anzahl an Pfählen als die Bezugs-pfahlgruppe weisen einen geringeren Gruppeneffekt bei den Innenpfählen auf, d. h. die Pfahlwiderstände sind hier höher als bei der Bezugs-pfahlgruppe. Für größere Gruppen als die Bezugs-pfahlgruppe kann der Einflußfaktor  $\lambda_2 = 1,0$  gesetzt werden. Ein Beispiel zur Berücksichtigung der Gruppengröße über den Einflußfak-



tor  $\lambda_2$  wird in Bild 7 gegeben. Die Gruppenwirkung wird von noch weiteren Faktoren beeinflusst, z. B. die Pfahlart nach Gl. (1) über den Einflußfaktor  $\lambda_3$ . Weitere Einflußfaktoren werden in diesem Beitrag nicht behandelt und können [5] entnommen werden.

### 3.3 Setzungsverhalten

Die zuvor beschriebenen Nomogramme können nur bei Kenntnis der mittleren Gruppensetzung angewendet werden. Die Abschätzung der mittleren Gruppensetzung kann ebenfalls über Nomogramme erfolgen.

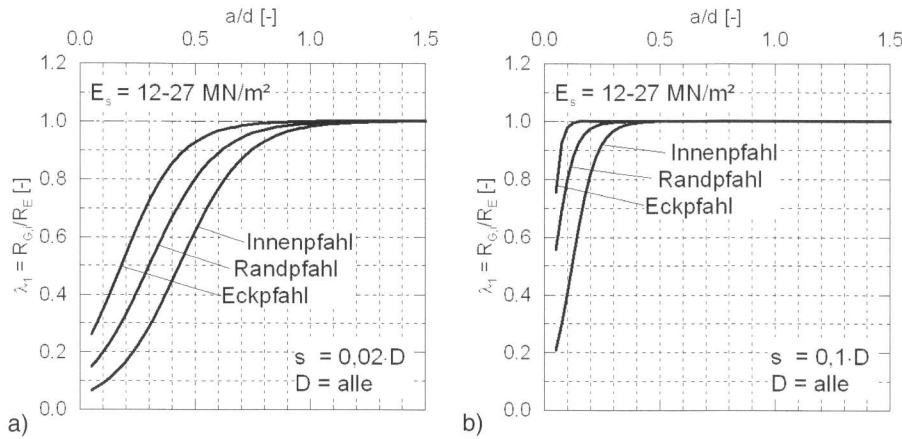


Bild 5. Nomogramme des Einflußfaktors  $\lambda_1$  (Bezugspfahlgruppe) bei einer bezogenen Setzung von a)  $0,02 \cdot D$ , b)  $0,1 \cdot D$

Fig. 5. Design chart for the factor  $\lambda_1$  (standard group) with a settlement of a)  $0,02 \cdot D$ , b)  $0,1 \cdot D$

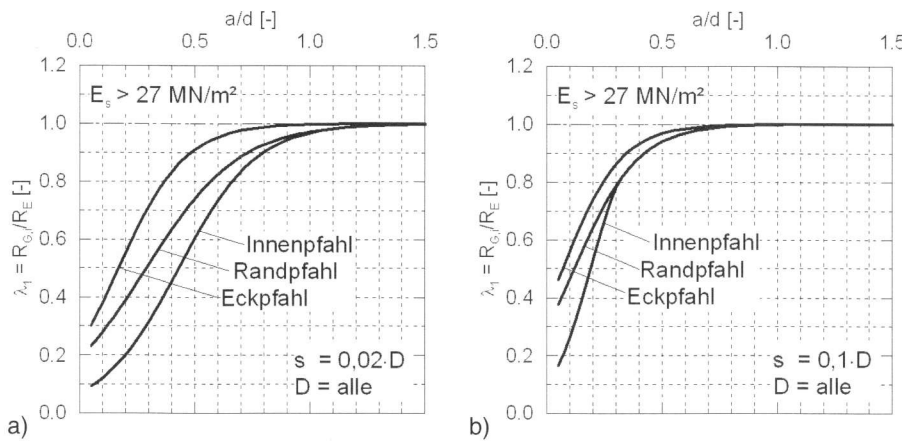


Bild 6. Nomogramme des Einflußfaktors  $\lambda_1$  (Bezugspfahlgruppe) bei einer bezogenen Setzung von a)  $0,02 \cdot D$ , b)  $0,1 \cdot D$

Fig. 6. Design chart for the factor  $\lambda_1$  (standard group) with a settlement of a)  $0,02 \cdot D$ , b)  $0,1 \cdot D$

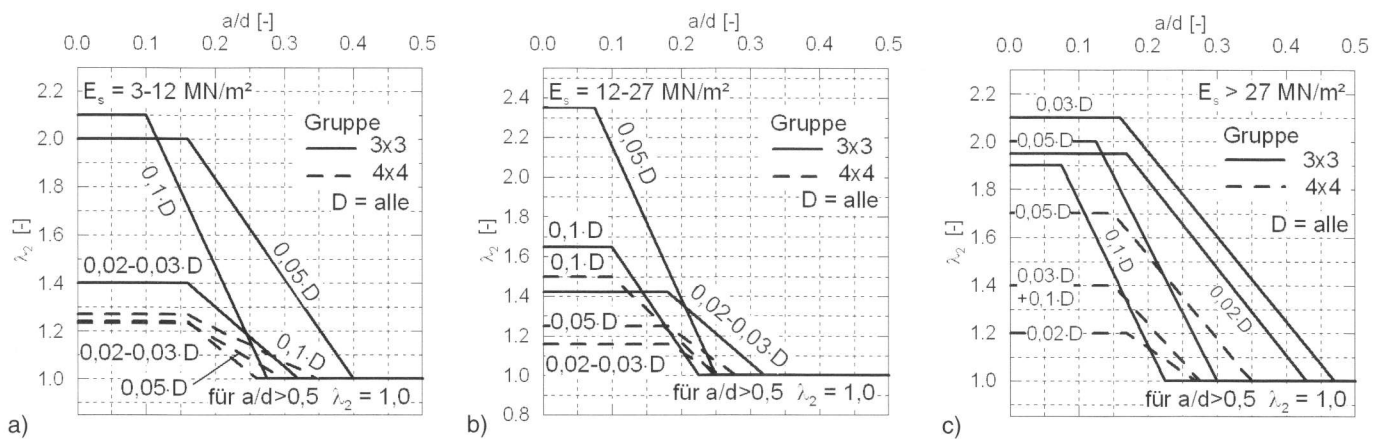


Bild 7. Nomogramm des Einflußfaktors  $\lambda_2$  zur Berücksichtigung der Gruppengröße

Fig. 7. Design chart for the factor  $\lambda_2$  considering the group dimension

In Bild 8a ist der Einflußfaktor  $S_1$  nach Gl. (2) dargestellt, der dem Gruppenfaktor für die Bezugspfahlgruppe entspricht. Auf der Abszisse ist der Pfahlwiderstand bezogen auf den Bruchwert eines vergleichbaren Einzelpfahls aufgetragen. Bild 8b zeigt den Einflußfaktor  $S_2$  über die Auswirkung der Gruppengröße auf die Setzung der Pfahlgruppe. Weitere denkbare Einflußfaktoren werden hier nicht erläutert, siehe dazu [5].

### 4 Beispiel Pfeilergründung

#### 4.1 Randbedingungen

Um die Anwendbarkeit des zuvor beschriebenen vereinfachten Nomogrammverfahrens zu belegen, wird im folgenden das Beispiel einer Pfeilergründung auf neun Großbohrpfählen vorgestellt. Der Pfahldurchmesser beträgt  $D = 1,30$  m, die Pfahllänge  $L = 16,5$  m. Die Geometrie und die Anordnung der Pfähle sind in Bild 9 dargestellt.

Aus dem Überbau ergibt sich eine charakteristische Belastung aus ständigen Einwirkungen von  $F_{G,k} = 8,0$  MN und aus veränderlichen Einwirkungen von  $F_{Q,k} = 4,0$  MN.

Als Baugrund liegt ein bindiger Boden mit den Bodenkenngößen nach Bild 9c vor. Dieser wird durch eine 4 m mächtige, nicht tragfähige Weichschicht überlagert.

Aus einer Pfahlprobebelastung liegt die charakteristische Widerstands-Setzungslinie eines vergleichbaren Einzelpfahls nach Bild 9d vor.

Die Tragwerksplanung hat eine zulässige Setzung von  $s_{zul} = 0,03 \cdot D = 3,9$  cm vorgegeben.

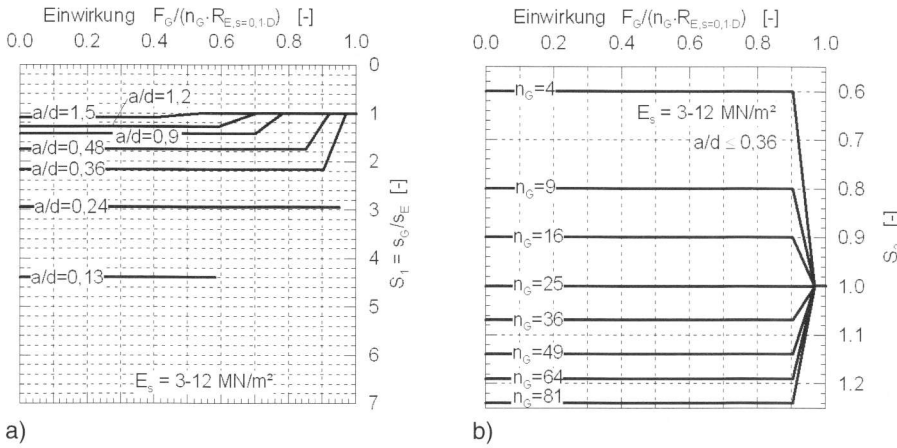


Bild 8. Nomogramme für die Ermittlung der mittleren Setzung einer Pfahlgruppe, a) Einflußfaktor  $S_1$  (Bezugspfahlgruppe), b) Einflußfaktor  $S_2$  zur Berücksichtigung der Gruppengröße  
 Fig. 8. Design charts for the prediction of the average settlement of the pile group, a) factor  $S_1$  (standard group), b) factor  $S_2$  considering the group dimension

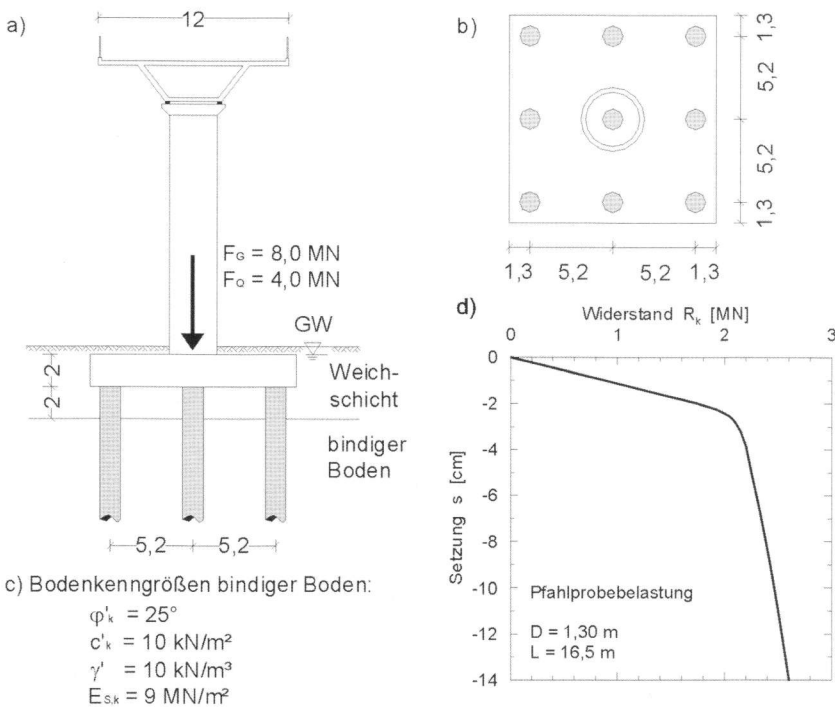


Bild 9. Pfeilergründung auf 9 Pfählen, a) Ansicht, b) Grundriß, c) Bodenkenngrößen, d) charakteristische Widerstands-Setzungslinie von einem vergleichbaren Einzelpfahl aus einer Pfahlprobebelastung  
 Fig. 9. Foundation of a pier with 9 piles, a) top view, b) ground view, c) ground parameter, d) characteristic resistance-settlement-curve of a comparable single pile by a pile test

**4.2 Mittlere Setzung und zugehörige Pfahlwiderstände im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZ 2)**

Zur Bestimmung der mittleren Setzung ergibt sich mit den Eingangsgrößen

$$a/d = 5,2/14,5 = 0,359 \quad (3)$$

$$F_{G,k}/(n_G \cdot R_{E,s=0,1D}) = 12/(9 \cdot 2,57) = 0,52 \quad (4)$$

nach Bild 8a der erste Einflußfaktor zu  $S_1 = 2,2$ . Der zweite Einflußfaktor zur Berücksichtigung der Gruppengröße wird aus Bild 8b mit  $n_G = 9$  entnommen. Er beträgt  $S_2 = 0,8$ .

Mit einer mittleren Einwirkung auf einen Gruppenpfahl von  $F_{G,k}/n_G = 12/9 = 1,33$  MN erhält man eine Setzung von  $s_E = 1,50$  cm für den vergleichbaren Einzelpfahl nach Bild 9d. Daraus kann die mittlere Setzung  $s_G$  der Pfahlgruppe bestimmt werden.

$$s_G = s_E \cdot S_1 \cdot S_2 = 1,5 \cdot 2,2 \cdot 0,8 = 2,6 \text{ cm} \quad (5)$$

Mit einer Setzung von  $s = 2,6 \text{ cm} = 0,02 \cdot D$  können die Einflußfaktoren  $\lambda_1$  für die Bestimmung der Pfahlwiderstände aus dem Nomogramm Bild 3a abgelesen werden. Der zweite Einflußfaktor  $\lambda_2$  beträgt nach Bild 7 für alle Pfähle Eins.

Aus der Multiplikation der Einflußfaktoren mit dem charakteristischen Pfahlwiderstand des Einzelpfahls von  $R_{E,k} = 2,05$  MN ergeben sich folgende charakteristische Pfahlwiderstände in der Gruppe:

$$R_{Eck,k}(s = 0,02 \cdot D) = 2,05 \cdot 0,64 = 1,31 \text{ MN} \quad (6)$$

$$R_{Rand,k}(s = 0,02 \cdot D) = 2,05 \cdot 0,46 = 0,94 \text{ MN} \quad (7)$$

$$R_{Innen,k}(s = 0,02 \cdot D) = 2,05 \cdot 0,30 \cdot 1,0 = 0,62 \text{ MN} \quad (8)$$

Damit beträgt der charakteristische Gesamtwiderstand der Gruppe:

$$R_{G,k}(s = 0,02 \cdot D) = 4 \cdot 1,31 + 4 \cdot 0,94 + 0,62 = 9,62 \text{ MN} \quad (9)$$

Gegenüber dem Ausgangswert der charakteristischen Einwirkung von  $F_k = 12,0$  MN wird so der charakteristische Gesamtwiderstand  $R_{G,k}$  um 20 % unterschätzt. Dies ist darauf zurückzuführen, daß die ermittelte Setzung von 2,6 cm zu gering ist. Die Pfahlwiderstände werden deshalb erneut mit einer korrigierten Setzung von  $s = 3,6 \text{ cm} = 0,028 \cdot D$  bestimmt.

Mit neuen Einflußfaktoren, die zwischen den Werten nach Bild 3a und Bild 10 interpoliert werden und dem entsprechenden Bezugswiderstand des Einzelpfahls von  $R_E(s = 0,028 \cdot D) = 2,18$  MN ergeben sich die Pfahlwiderstände in der Gruppe zu:

$$R_{Eck,k}(s = 0,028 \cdot D) = 2,18 \cdot 0,73 = 1,59 \text{ MN} \quad (10)$$

$$R_{Rand,k}(s = 0,028 \cdot D) = 2,18 \cdot 0,56 = 1,22 \text{ MN} \quad (11)$$

$$R_{Innen,k}(s = 0,028 \cdot D) = 2,18 \cdot 0,34 \cdot 1 = 0,74 \text{ MN} \quad (12)$$

Damit beträgt der charakteristische Gesamtwiderstand der Gruppe:

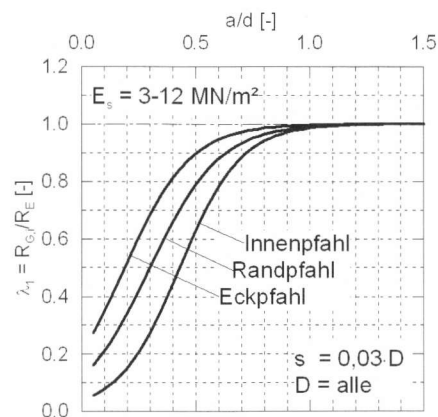


Bild 10. Nomogramme des Einflußfaktors  $\lambda_1$  (Bezugspfahlgruppe) bei einer bezogenen Setzung von  $0,03 \cdot D$   
 Fig. 10. Design charts for the factor  $\lambda_1$  (standard group) with a settlement of  $0,03 \cdot D$

$$R_{G,k}(s = 0,028 \cdot D) = 4 \cdot 1,59 + 4 \cdot 1,22 + 0,74 = 11,98 \text{ MN} \quad (13)$$

Mit der angepaßten mittleren Setzung der Gruppe von  $s = 3,6 \text{ cm}$  ergibt sich ein zu der charakteristischen Einwirkung übereinstimmender charakteristischer Gesamtwiderstand der Gruppe.

### 4.3 Pfahlwiderstände im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZ 1B)

Bei einer angenommenen Grenzsetzung von  $s = 0,1 \cdot D$  ergibt sich ein charakteristischer Bezugspfahlwiderstand des Einzelpfahls von  $R_{E,k} = 2,57 \text{ MN}$ . Multipliziert mit den Einflußfaktoren  $\lambda_1$  nach Bild 3b und  $\lambda_2$  nach Bild 7 ergeben sich die charakteristischen Widerstände der Gruppenpfähle zu:

$$R_{Eck,k}(s = 0,1 \cdot D) = 2,57 \cdot 1,0 = 2,57 \text{ MN} \quad (14)$$

$$R_{Rand,k}(s = 0,1 \cdot D) = 2,57 \cdot 0,99 = 2,54 \text{ MN} \quad (15)$$

$$R_{Innen,k}(s = 0,1 \cdot D) = 2,57 \cdot 0,97 \cdot 1,0 = 2,49 \text{ MN} \quad (16)$$

Damit ergibt sich der charakteristische Gesamtwiderstand der Gruppe zu:

$$R_G(s = 0,1 \cdot D) = 4 \cdot 2,57 + 4 \cdot 2,54 + 2,49 = 22,93 \quad (17)$$

### 4.4 Grenzzustandsnachweise

#### 4.4.1 Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZ 2)

Für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit wird hier der Nachweis indirekt über die zulässigen Setzun-

gen erbracht. Es ist eine zulässige Setzung von  $s_{zul} = 3,9 \text{ cm}$  vorgegeben, siehe Abschn. 4.1. Die Setzungsbe-rechnung nach Abschn. 4.2 ergibt eine geringere Setzung von  $s_2 = 3,6 \text{ cm}$ . Die zulässigen Setzungen sind somit eingehalten.

Der Nachweis könnte ebenfalls über die Grenzzustandsbedingung

$$E_{2,d} = E_{1,k} \cdot \gamma_F \leq R_{2,d} = R_{2,k} \cdot \gamma_R \quad (18)$$

erbracht werden, wobei alle Teilsicherheitsbeiwerte nach DIN 1054:2005-01 mit  $\gamma_F = \gamma_R = 1,0$  anzusetzen sind.

#### 4.4.2 Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZ 1B)

Im Grenzzustand der Tragfähigkeit müssen die Bemessungswerte der Widerstände größer als die Bemessungswerte der Beanspruchungen sein. Dazu werden die charakteristischen Werte der Beanspruchungen und Widerstände mit den entsprechenden Teilsicherheitsbeiwerten nach DIN 1054:2005-01 in Bemessungswerte umgewandelt. Die Grenzzustandsgleichung lautet damit:

$$E_{1,d} = E_{G,k} \cdot \gamma_G + E_{Q,k} \cdot \gamma_Q \leq R_{1,d} = R_{1,k} / \gamma_{Pc} \quad (19)$$

$$8 \cdot 1,35 + 4 \cdot 1,50 = 16,8 \text{ MN} \leq 22,93 / 1,20 = 19,11 \text{ MN}$$

Somit ist die Standsicherheit sowohl für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit als auch für den Grenzzustand der Tragfähigkeit erfüllt.

#### 4.5 Beanspruchung der Pfahlkopfplatte infolge Gruppenwirkung

Mit der zuvor bestimmten Setzung und den charakteristischen Pfahlwiderständen werden Ersatzfedersteifigkeiten bestimmt:

$$R_{Eck,k} / s = 1,59 / 0,036 = 44 \text{ MN/m} \quad (20)$$

$$R_{Rand,k} / s = 1,22 / 0,036 = 34 \text{ MN/m} \quad (21)$$

$$R_{Innen,k} / s = 0,74 / 0,036 = 21 \text{ MN/m} \quad (22)$$

Ohne Berücksichtigung der Gruppenwirkung werden alle Pfähle mit einer einheitlichen Steifigkeit abgebildet. Bei einem einheitlichen charakteristischen Pfahlwiderstand von  $R_{E,k} =$

$1,33 \text{ MN}$  ergibt sich für alle Pfähle eine Setzung von  $s_E = 1,5 \text{ cm}$ .

Die Ersatzfedersteifigkeit beträgt damit für jeden Pfahl:

$$R_{E,k} / s = 1,33 / 0,015 = 89 \text{ MN/m} \quad (23)$$

Die Pfähle werden mit den zuvor bestimmten Ersatzfedersteifigkeiten abgebildet und eine Berechnung der Beanspruchung der Pfahlkopfplatte vorgenommen. Die maximale charakteristische Querkraftbeanspruchung steigt unter Berücksichtigung der Gruppenwirkung von  $Q_{x,k} = 562 \text{ kN/m}$  auf  $Q_{x,k} = 587 \text{ kN/m}$  um 4 %, siehe Bilder 11 und 12.

Unter Berücksichtigung der Gruppenwirkung nehmen die maximalen charakteristischen Momentenbeanspruchungen von  $M_{x,k} = 1728 \text{ kNm/m}$  auf  $M_{x,k} = 1880 \text{ kNm/m}$  zu, siehe Bilder 13 und 14. Dieses ist ein Anstieg von 9 %.

In weiteren Berechnungsbeispielen aus [5] hat sich gezeigt, daß es unter Berücksichtigung der Gruppenwirkung zu erheblichen Änderungen der Beanspruchung der aufgehenden Konstruktion kommen kann. Allgemeingültige Aussagen, wann die Gruppenwirkung vernachlässigt werden kann, sind nicht möglich und hängen von den Randbedingungen des Einzelfalls ab.

### 6 Ausblick

Mit dem dargestellten vereinfachten Nomogrammverfahren können die Gruppenwirkung von Pfählen im Hinblick auf das setzungs- und pfahlpositionenabhängige Widerstandsverhalten abgeschätzt und die Forderungen der DIN 1054:2005-01 eingehalten werden. Unabhängig davon empfiehlt sich bei schwierigen Randbedingungen die Durchführung ergänzender numerischer Berechnungen zur Pfahlgruppenabbildung.

Es wäre wünschenswert, wenn die hier gezeigten Berechnungsansätze oder numerische Berechnungen durch Setzungsmessungen an Pfahlgruppen weiter abgesichert werden.

Weitere Hinweise für das Pfahlgruppenverhalten bei Verdrängungs- und Mikropfählen finden sich in [5] und [8].

### Literatur

[1] Franke, E., Lutz, B., El-Mossallamy, Y.: Pfahlgründungen und die Interak-

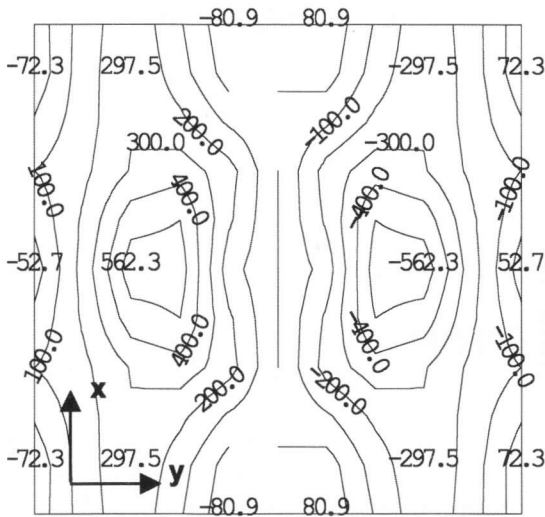


Bild 11. Charakteristische Querkräfte in der Pfahlkopfplatte  $Q_{x,k}$  [kN/m] ohne Berücksichtigung der Gruppenwirkung  
 Fig. 11. Characteristical shear force in the pile cap  $Q_{x,k}$  [kN/m] without consideration of group effect

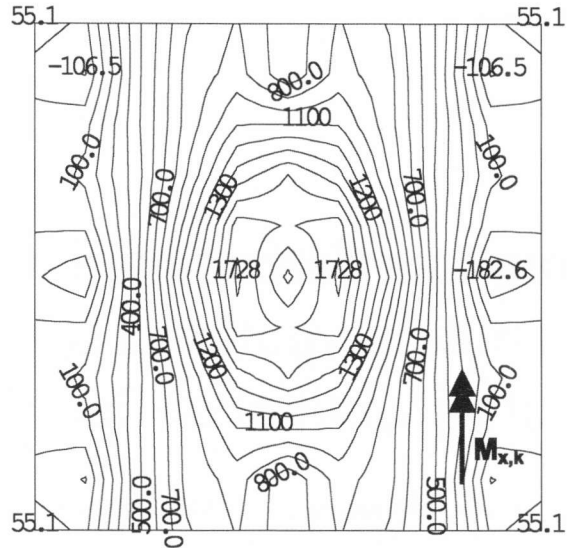


Bild 13. Charakteristische Biegemomente in der Pfahlkopfplatte  $M_{x,k}$  [kNm/m] ohne Berücksichtigung der Gruppenwirkung  
 Fig. 13. Characteristic bending moments in the pile cap  $M_{x,k}$  [kNm/m] without consideration of group effect

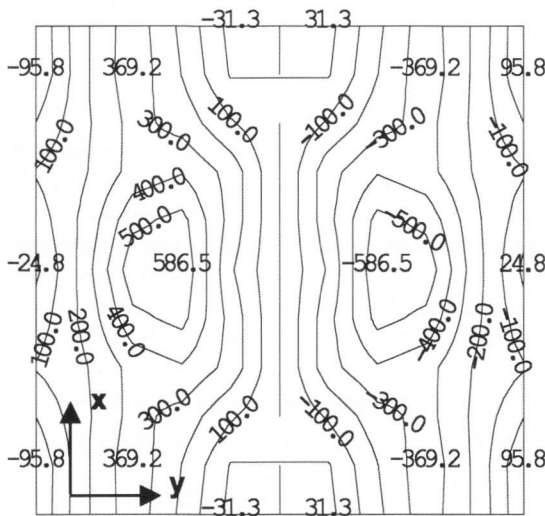


Bild 12. Charakteristische Querkräfte in der Pfahlkopfplatte  $Q_{x,k}$  [kN/m] mit Berücksichtigung der Gruppenwirkung  
 Fig. 12. Characteristical shear force in the pile cap  $Q_{x,k}$  [kN/m] considering group effect

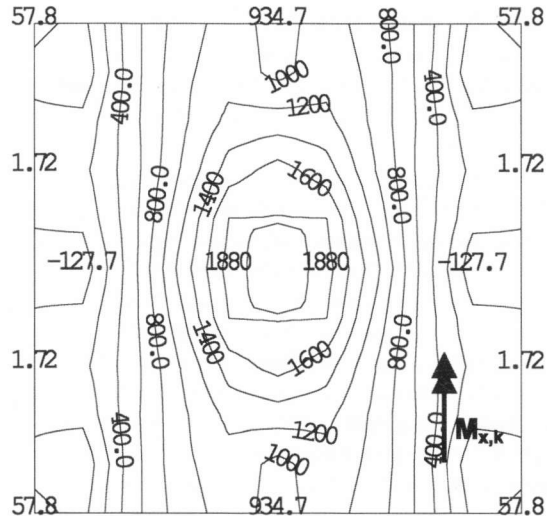


Bild 14. Charakteristische Biegemomente in der Pfahlkopfplatte  $M_{x,k}$  [kNm/m] mit Berücksichtigung der Gruppenwirkung  
 Fig. 14. Characteristic bending moments in the pile cap  $M_{x,k}$  [kNm/m] considering group effect

tion Bauwerk/Baugrund. Geotechnik 17 (1994), S. 157–172.

- [2] Holzhäuser, J.: Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Tragverhalten von Pfahlgründungen im Fels. Mitteilungen des Institutes und der Versuchsanstalt für Geotechnik der TU Darmstadt, Heft 42 (1988).
- [3] Meissner, H.: Tragverhalten axial und horizontal belasteter Bohrpfähle in körnigen Böden. Veröffentlichung des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik, Universität Fridericiana Karlsruhe, Heft 93 (1983).
- [4] Rackwitz, F.: Numerische Untersuchungen zum Tragverhalten von Zugpfählen und Zugpfahlgruppen in Sand

auf Grundlage von Probelastungen. Veröffentlichung des Grundbauinstitutes der TU Berlin, Heft 32 (2003).

- [5] Rudolf, M.: Beanspruchung und Verformung von Gründungskonstruktionen auf Pfahlrosten und Pfahlgruppen unter Berücksichtigung des Teilsicherheitskonzeptes. Schriftenreihe Geotechnik, Universität Kassel, Heft 17 (2005).
- [6] Soos, P. v.: Eigenschaften von Boden und Fels; ihre Ermittlung im Labor. In: Grundbautaschenbuch, Teil 1, 6. Auflage, Verlag Ernst & Sohn (2001).
- [7] Witzel, M.: Zur Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit von vorgefertigten Verdrängungspfählen in bindigen

und nichtbindigen Böden. Schriftenreihe Geotechnik, Universität Kassel, Heft 15 (2004).

- [8] EA-Pfähle: Empfehlungen des Arbeitskreises „Pfähle“ (in Vorbereitung, 2007).

**Autoren dieses Beitrages:**

Dr.-Ing. Michael Rudolf, Dipl.-Ing. Bernd Gebauer  
 Ingenieur GmbH, Nymphenburger Straße 136,  
 80636 München (vormals Universität Kassel)  
 Prof. Dr.-Ing. Hans-Georg Kempfert,  
 Institut für Geotechnik und Geohydraulik,  
 Universität Kassel, FG Geotechnik,  
 Mönchebergstraße 7,  
 34125 Kassel