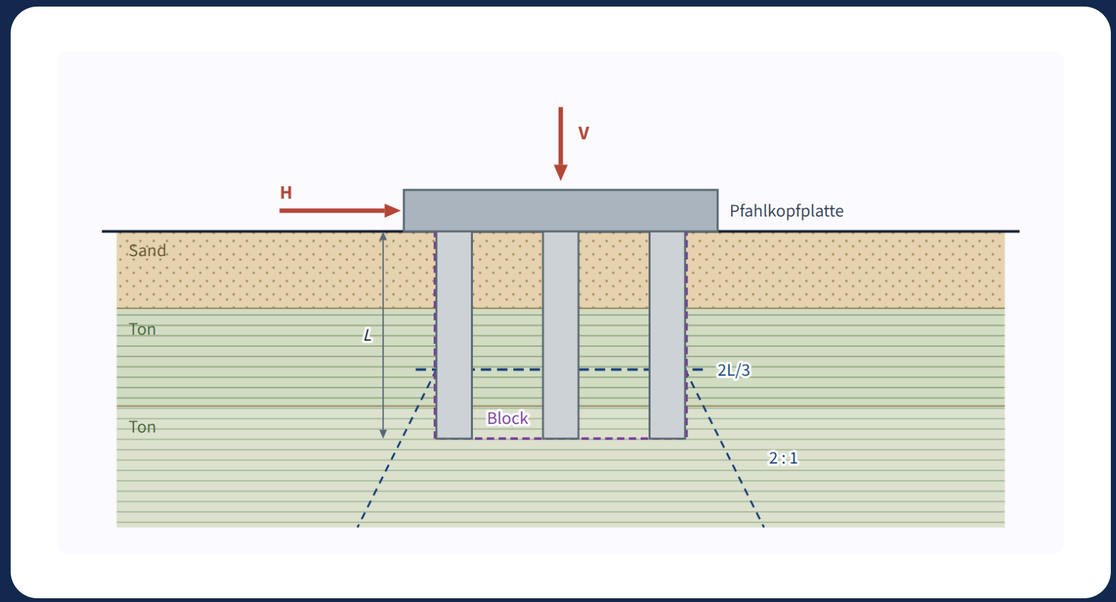
Geotechnische Vorlesung · Pfähle

Pfahlgruppenanalyse

Vorlesung: die Last auf jedem Pfahl einer Pfahlgruppe unter einer Pfahlkopfplatte, seine Tragfähigkeit, seine Setzung und sein Verhalten unter Horizontallast; zu jedem Thema ein Rechenbeispiel.



Steife Pfahlkopfplatte

Gruppenwirkungsgrad · Block

Setzung

Horizontallast: p-Multiplikatoren

Rechenbeispiele

Was lernen wir in dieser Vorlesung?

- **Die Last auf jeden Pfahl** unter einer starren Pfahlkopfplatte zu ermitteln und den auf Zug beanspruchten Pfahl zu erkennen
- Die Tragfähigkeit des **Einzelpfahls** Schicht für Schicht als Grundlage der Tragfähigkeit der Pfahlgruppe aufzubauen
- Schichtweise Anwendung des **Gruppenwirkungsgrads** (Converse–Labarre, Los Angeles, Seiler–Keeney; Regeln für Ramm- und Bohrpfähle in Sand)
- Die Gruppe auf **Blockbruch** zu prüfen und **den kleineren** Wert zu wählen
- Die elastische (Vesic) und die **Konsolidationssetzung** (2:1-Spannungsausbreitung) zu berechnen
- **Horizontallast** die p-Multiplikatoren und die ungleichen Anteile der Pfahlreihen zu interpretieren

VORLESUNGSABLAUF

Jedes Thema wird in **drei Schritten** behandelt:

1 · **Theorie**: Wie lautet die Regel, warum ist sie so?

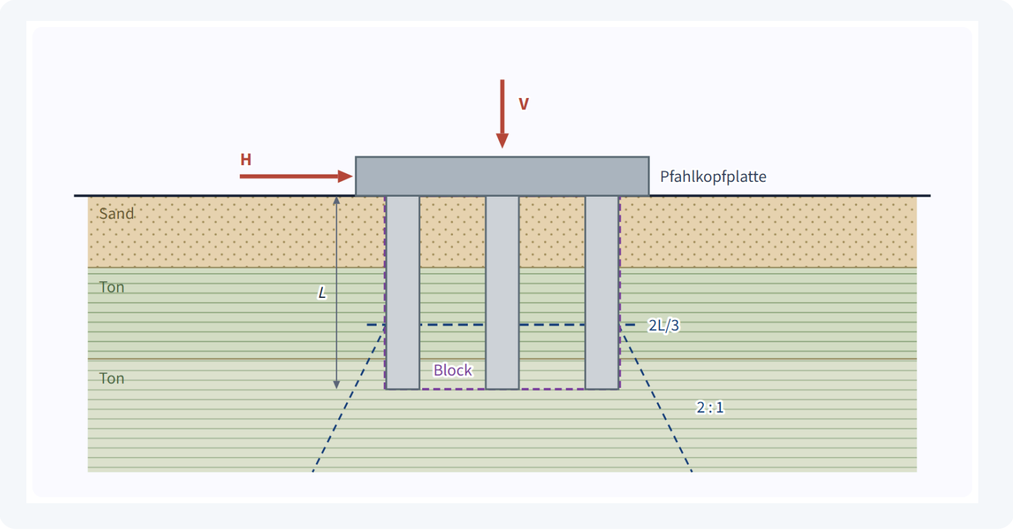
2 · **Aufgabe**: Gegeben und Gesucht

3 · **Lösung**: Schritt für Schritt, mit Zahlen

Diese Präsentation baut auf der Präsentation **Pfahl in geschichtetem Baugrund** auf: Die schichtweise Berechnung des Einzelpfahls wurde dort behandelt, hier wird seine Rolle innerhalb der Gruppe betrachtet.

Was ändert sich, wenn die Pfähle gemeinsam wirken?

THEORIE



Die Pfähle werden unter einer **Pfahlkopfplatte** in Reihen angeordnet; stehen sie eng beieinander, muss der Boden zwischen und um sie allen gemeinsam dienen. Drei Dinge ändern sich, und das Modul behandelt jedes davon als eigenen Nachweis:

Tragfähigkeit: Der Boden zwischen den Pfählen wird über den Pfahlschaft mitgezogen; jeder Pfahl trägt weniger, als er allein tragen würde (Gruppenwirkungsgrad $\eta < 1$). Ist der Boden schwach und stehen die Pfähle dicht, kann die Pfahlgruppe samt dem Boden zwischen den Pfählen auch als ein einziger **Block** versagen.

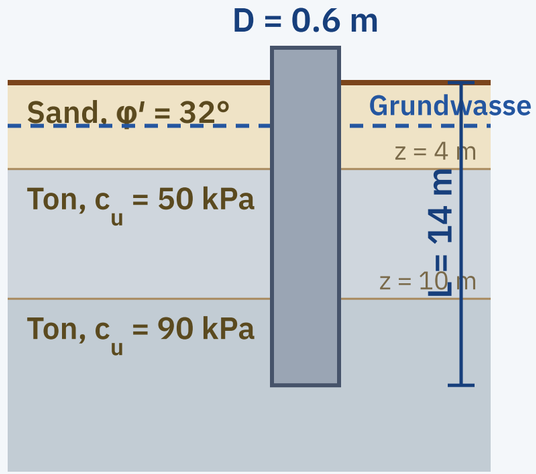
Setzung: Die Last der Gruppe breitet sich über **die gesamte Gruppenfläche** aus, nicht über die eines Einzelpfahls, und erreicht die Tonschichten weit unter den Pfahlspitzen; die Gruppe setzt sich weit stärker als ein Einzelpfahl.

Horizontallast: Die hinteren Reihen arbeiten im Boden, der von den vorausgehenden Pfählen verdrängt und beansprucht wird; die vordere Reihe nimmt mehr Last auf, die übrigen weniger.

Die Gruppe, die wir in der Vorlesung verwenden

Beispielgruppe (vom Modul geöffnetes Modell)

Pfähle	**9 Bohrpfähle (Durchmesser D = 0.60 m, Länge L = 14 m), 3 Reihen × 3 Pfähle, Pfahlkopfplattenunterseite im Baugrund**
Abstand	$s_x = s_y = 1.80\ \mathrm{m}\ (3.0\,D)$
Baugrund	**Sand 0–4 m (φ′ = 32°), Ton 4–10 m (c_u = 50), Ton 10–18 m (c_u = 90 kPa); γ = 18, γ_{sat} = 19 kN/m³**
Grundwasser	**in 2.0 m Tiefe**
Lasten	$V = 1\,600\ \mathrm{kN},\ H = 900\ \mathrm{kN},\ M_y = 900\ \mathrm{kN\cdot m}$
Material, Sicherheit	$E_p = 30\,000\ \mathrm{MPa},\ E_s = 30\ \mathrm{MPa},\ \nu_s = 0.30;\ FS = 3$



Die meisten Beispiele werden mit dieser Gruppe durchgeführt; die Ergebnisse stimmen mit den Zahlen auf der Registerkarte **Modell** des Moduls überein.

Starre Pfahlkopfplatte: die Pfähle sind identische Federn

THEORIE

Die Pfahlkopfplatte wird als starr und die Pfähle als identische vertikale Federn angenommen. Eine starre Pfahlkopfplatte bewegt sich wie eine **Ebene**: Ihre Setzung und ihre Verdrehungen sind die einzigen Unbekannten. Daher ist die Last auf jedem Pfahl eine **lineare** Funktion seiner Lage (Schraubengruppenregel):

$$P_i = \frac{V}{n} + B\,x_i + C\,y_i$$

$$B = \frac{M_y}{\sum x^2} \qquad C = \frac{M_x}{\sum y^2} \qquad \left(\sum xy = 0\right)$$

$$\sum x^2 = n_y s_x^2\,\frac{n_x\left(n_x^2 - 1\right)}{12}$$

Ist M_y positiv, so fügt es auf der **+x**-Seite Druck hinzu (der Seite, die von der Horizontallast gedrückt wird, der vorderen Seite). Die Momente werden **an der Pfahlkopfplattenunterseite** angesetzt: Eine Last H in der Höhe h über der Unterseite ergibt M_y = H h.

Sind die Pfähle versetzt (dreieckförmig) angeordnet, ist Σxy nicht null; das Modul bildet die Summen aus den Pfahlpositionen und löst die beiden Gleichungen gemeinsam.

Die größte Last entfällt auf die vorderen Pfähle, die kleinste auf die hinteren; **bei großem Moment** kann der hintere Pfahl auf Zug beansprucht werden.

Aufgabe

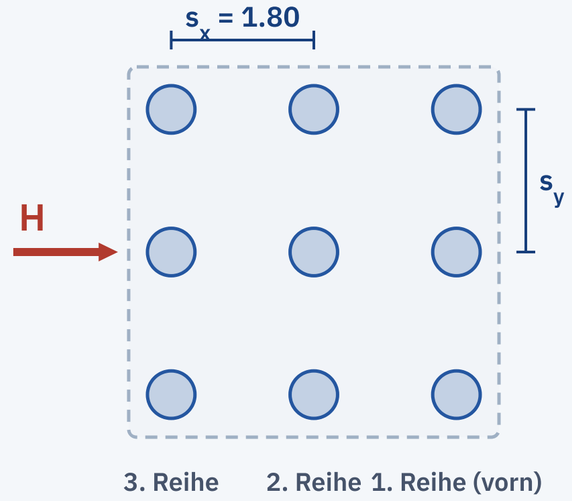
BEISPIEL

Gegeben

Gruppe	**9 Bohrpfähle, 3 Reihen × 3 Pfähle, D = 0.60 m, L = 14 m, s = 1.80 m**
Baugrund	**Sand 0–4 m (φ′ = 32°) · Ton 4–10 m (c_u = 50) · Ton 10–18 m (c_u = 90 kPa)**
Lasten	$V = 1\,600\ \mathrm{kN},\ M_y = 900\ \mathrm{kN\cdot m}$ **(am Fuß der Überschrift)**
Titel	**starr; Pfähle identisch**

GESUCHT

Für jeden Pfahl ist die Last zu ermitteln. Die Reihen werden **von vorn** nummeriert (vorn = die Seite, in die die Horizontallast drückt, +x).



Lösung (1/2)

LÖSUNG

1 Gleicher Abstand

$$\frac{V}{n} = \frac{1\,600}{9} = \mathbf{177.8}\ \mathrm{kN}$$

2 Σx² (symmetrische Gruppe, geschlossene Form)

$$\sum x^2 = n_y s_x^2 \, \frac{n_x(n_x^2-1)}{12} = 3(1.8)^2 \, \frac{3(9-1)}{12} = \mathbf{19.44}\ \mathrm{m}^2$$

3 Momentenbeiwert (C = 0, da $M_x = 0$)

$$B = \frac{M_y}{\sum x^2} = \frac{900}{19.44} = \mathbf{46.30}\ \mathrm{kN/m}$$

Lösung (2/2)

LÖSUNG

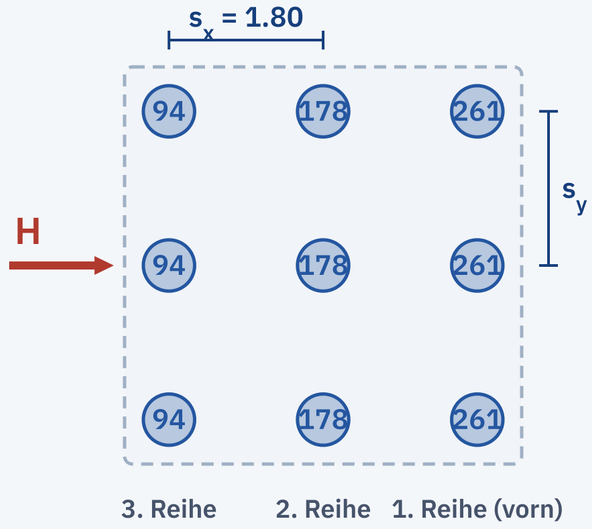
4 Zeilenlasten: P = V/n + B x (x = +1.8; 0; −1.8 m)

$$P_1 = 177.8 + 46.30(1.8) = \mathbf{261.1}\ \text{kN (vorne)}$$

$$P_2 = \mathbf{177.8}\ \text{kN}$$

$$P_3 = 177.8 - 46.30(1.8) = \mathbf{94.4}\ \text{kN (hinten)}$$

Summe: 3(261.1 + 177.8 + 94.4) = **1,600 kN** = V. Die größte Last liegt auf den vorderen Pfählen (261.1 kN), die kleinste auf den hinteren (94.4 kN); **kein Pfahl ist auf Zug**.



Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Bei großem Moment werden die hinteren Pfähle auf Zug beansprucht

THEORIE

Ist das Moment im Verhältnis zur vertikalen Last groß, werden die Pfähle auf der dem Moment abgewandten Seite **entlastet** und können auf Zug beansprucht werden. Den Zug widersteht der Pfahl **nur über seinen Schaft**: die Tonschicht mit ihrem vollen Wert, die Sandschicht mit **drei Vierteln** ihres Druckwiderstands; die Pfahlspitze trägt nichts bei.

$$T_u = \sum_i \chi_i \, Q_{s,i} \qquad \chi = 1 \ (\text{Ton}),\ \chi = 0.75 \ (\text{Sand})$$

$$T_g = \min(T_{ind},\, T_{block}) \quad T_{ind} = n_T \sum_i \eta_i \chi_i Q_{s,i}$$

Einzelpfahl unter Zug: $T_{max} \le T_u/FS$. Pfähle unter Zug **gemeinsam**: $\Sigma T \le T_g/FS$; der Block wird durch sein Eigengewicht und die Schubkraft an seinen Seitenflächen gehalten.

NACHWEIS AUF DRUCK

$$P_{max} \le \frac{Q_u}{FS}$$

Die größte Pfahllast wird mit der zulässigen Last des **Einzelpfahls** verglichen; Gruppeneffekte werden hier nicht berücksichtigt. Unter einem Moment erhält der am stärksten belastete Pfahl mehr als V/n und kann seinen Anteil überschreiten, **selbst wenn die Gruppe als Ganzes innerhalb ihrer Tragfähigkeit liegt**.

Aufgabe

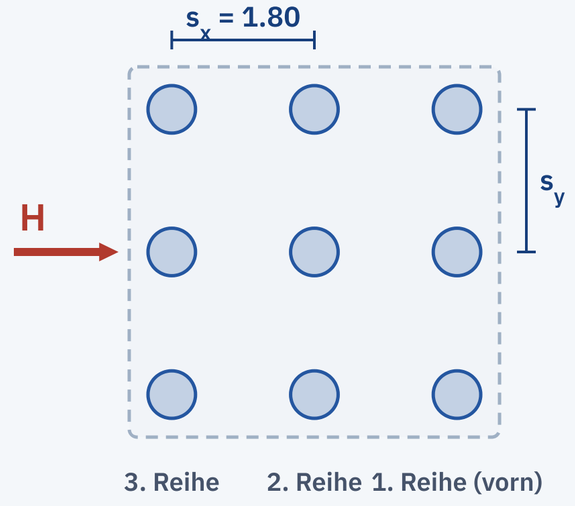
BEISPIEL

Gegeben

Gruppe	**9 Bohrpfähle, 3 Reihen × 3 Pfähle, D = 0.60 m, L = 14 m, s = 1.80 m**
Baugrund	**Sand 0–4 m (φ′ = 32°) · Ton 4–10 m (c_u = 50) · Ton 10–18 m (c_u = 90 kPa)**
Last	$V = 1\,600\ \mathrm{kN}$, **Moment erhöht:** $M_y = 2\,400\ \mathrm{kN \cdot m}$
Einzelpfahl	**Q_s-Anteile (Beispiel 3): Sand 49.8, Ton 311.0, Ton 317.2 kN**
Wirkungsgrad	**Sand 0.767, Ton 0.727 (Beispiel 5–6)**

GESUCHT

Die Lasten sind zu ermitteln; die Tragfähigkeit des Pfahls auf Zug und der Pfähle auf Zug **gemeinsam** ist mit FS = 3 nachzuweisen.



Lösung (1/2)

LÖSUNG

1 Lasten ($B = M_y/\Sigma x^2$)

$$B = \frac{2\,400}{19.44} = 123.46\ \text{kN/m}$$

$$P_{front} = 177.8 + 123.46(1.8) = \mathbf{400.0}\ \text{kN}$$

$$P_{rear} = 177.8 - 123.46(1.8) = \mathbf{-44.4}\ \text{kN (Zug)}$$

2 Tragfähigkeit eines Einzelpfahls auf Zug (Sand × 0.75, Ton × 1)

$$T_u = 0.75(49.8) + 311.0 + 317.2 = \mathbf{665.6}\ \text{kN} \quad \Rightarrow \quad \frac{T_u}{FS} = 221.9\ \text{kN}$$

Pfahl auf Zug: T_{max} = **44.4 kN** ≤ T_u/FS = 221.9 kN → **ausreichend**. Anzahl der Pfähle auf Zug 3 (hintere Reihe), Gesamtzugkraft ΣT = 133.3 kN; der Gruppenachweis folgt im nächsten Schritt.

Lösung (2/2)

LÖSUNG

3 Gesamttragfähigkeit der 3 Pfähle auf Zug: Summe der wirksamen Pfahlschäfte × 3

$$T_{ind} = 3\left[\eta_s \chi_s Q_{s1} + \eta_c Q_{s2} + \eta_c Q_{s3}\right] = \mathbf{1{,}456}\ \text{kN}$$

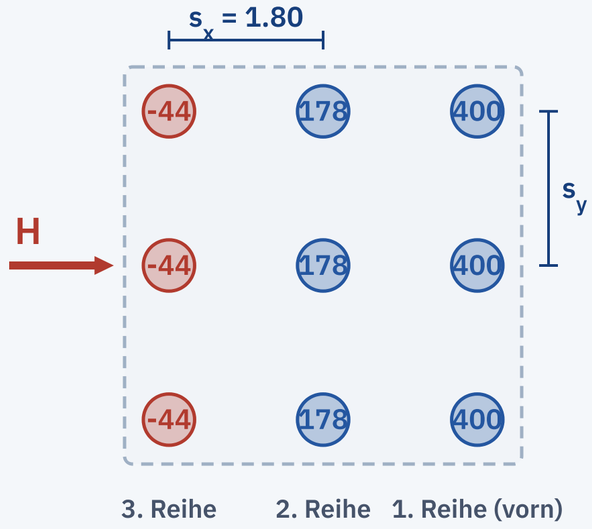
4 Zugblock (3 Pfähle, L_t = D = 0.6 m, B_t = 4.2 m): Mantelreibung + Blockgewicht

$$T_{block} = \sum \tau_i P_t \Delta L_i + W = 6{,}692 + 369 = \mathbf{7{,}061}\ \text{kN}$$

5 Nachweis: Kleinstwert und FS

$$T_g = \min(1{,}456;\ 7{,}061) = 1{,}456\ \text{kN}$$

$$\sum T = 133.3 \le \frac{T_g}{3} = 485\ \text{kN} \ \Rightarrow\ \text{ausreichend}$$



Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Die Gruppenkapazität wird auf der des Einzelpfahls aufgebaut

THEORIE

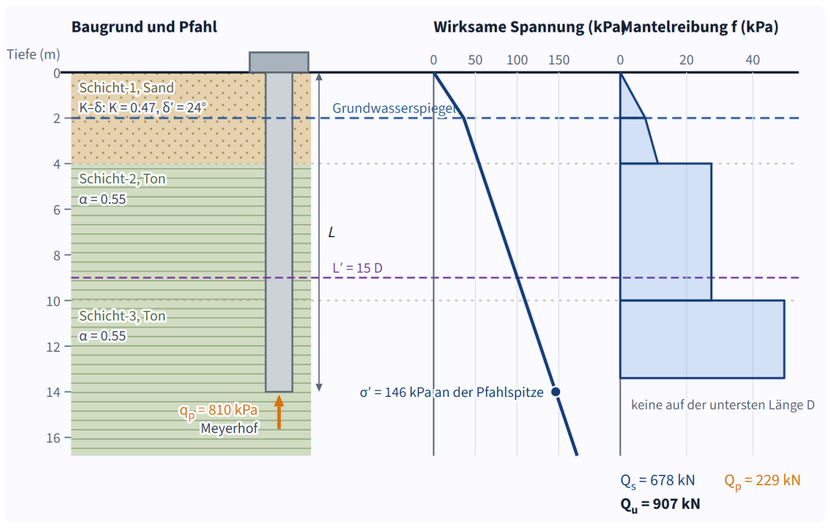
Zunächst wird der **Einzel**widerstand eines Pfahls der Gruppe berechnet: jede Schicht nach der Regel ihres eigenen Materials, **ohne eingegebenen Widerstand**. Die Regeln sind wie in der Präsentation *Pfahl in geschichtetem Boden*:

$$Q_u = Q_s + Q_p \qquad Q_s = p \sum_i f_i \, \Delta L_i \qquad Q_p = A_b \, q_p$$

Sand: f = Kσ′tanδ′ (kritische Tiefe L′ = 15D). Beim Bohrpfahl **K = K₀ = 1 − sinφ′**, δ′ = 0.75φ′; beim Rammpfahl K = 1.4K₀.

Ton: α, λ oder β. Beim Bohrpfahl gilt **α* = 0.55** ($c_u/p_a \le 1.5$) und α* = 0 entlang der **oberen 1.5 m und der unteren 1D**.

Spitze: die Regel der Schicht, in der die Spitze liegt: $q'N^*_q \le q_l$ in Sand, $9c_u$ in Ton (bei Bohrpfählen kann Reese–O'Neill gewählt werden).



Aufgabe

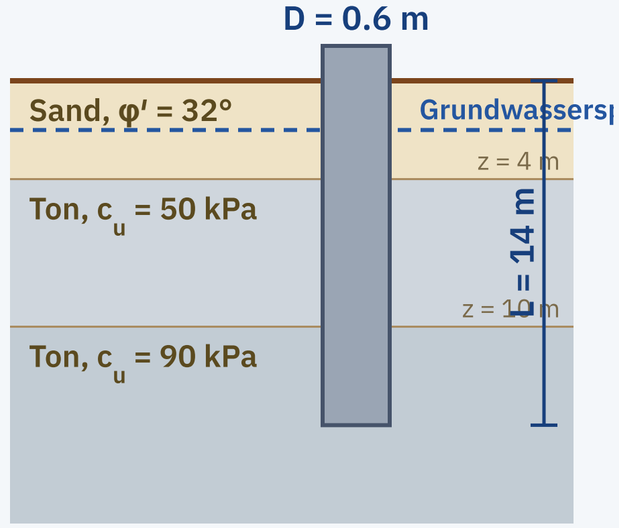
BEISPIEL

Gegeben

Gruppe	**9 Bohrpfähle, 3 Reihen × 3 Pfähle, D = 0.60 m, L = 14 m, s = 1.80 m**
Baugrund	**Sand 0–4 m (φ′ = 32°) · Ton 4–10 m (c_u = 50) · Ton 10–18 m (c_u = 90 kPa)**
Gründung	**Bohrpfahl: K = K_0 = 0.47, δ′ = 0.75φ′ = 24°, α* = 0.55; Spitze: Meyerhof**
Grundwasser	**2.0 m**
Wichte	$\gamma = 18,\ \gamma_{sat} = 19\ \mathrm{kN/m^3}$

GESUCHT

Bestimmen Sie den **Mantelwiderstand** eines Einzelpfahls schichtweise, den **Spitzenwiderstand** und den Wert **Q_u**; führen Sie den Nachweis $P_{max} \le Q_u/FS$.



Lösung (1/3)

LÖSUNG

1 Sand (0–4 m): L′ = 15D = 9 m > 4 m, keine Kappe; σ′(2) = 18(2) = 36.0 und σ′(4) = 36.0 + (19 − 9.81)(2) = 54.4 kPa

$$\bar{\sigma}' = \frac{126.4}{4} = 31.6\ \text{kPa}$$

$$f = K \tan\delta'\, \bar{\sigma}' = 0.47(0.4452)(31.6) = 6.61\ \text{kPa}$$

$$Q_{s1} = p\, f\, H = 1.885(6.61)(4) = \mathbf{49.8}\ \text{kN}$$

Lösung (2/3)

LÖSUNG

2 Ton (4–10 m): α* = 0.55 (c_u/p_a = 0.5 ≤ 1.5); das Fenster von 1.5 → L − D = 13.4 m erfasst die Schicht vollständig

$$f = 0.55(50) = 27.5\ \text{kPa} \qquad Q_{s2} = 1.885(27.5)(6) = \mathbf{311.0}\ \text{kN}$$

3 Ton (10–14 m): das Fenster endet bei 13.4 m → unteres 1D = 0.6 m wird verworfen, wirksame Länge 13.4 − 10 = 3.4 m

$$f = 0.55(90) = 49.5\ \text{kPa} \qquad Q_{s3} = 1.885(49.5)(3.4) = \mathbf{317.2}\ \text{kN}$$

Lösung (3/3)

LÖSUNG

4 Summe der Mantelreibung und Spitze (Schicht an der Spitze: Ton, c_u = 90 kPa, Meyerhof N^*_c = 9)

$$Q_s = 49.8 + 311.0 + 317.2 \approx \mathbf{678.1}\ \text{kN}$$

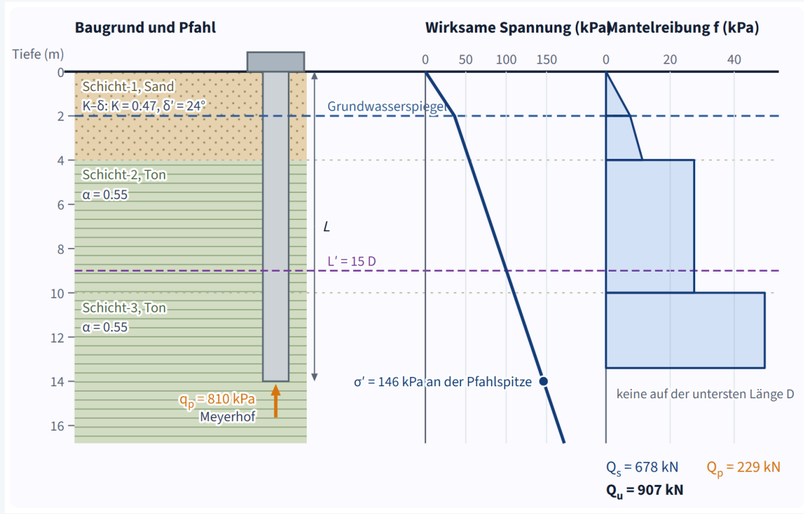
$$q_p = 9(90) = 810\ \text{kPa}$$

$$Q_p = A_b q_p = 0.2827(810) = \mathbf{229.0}\ \text{kN}$$

5 Tragfähigkeit eines Einzelpfahls und Nachweis

$$Q_u = 678.1 + 229.0 = \mathbf{907.1}\ \text{kN}$$

$$\frac{Q_u}{FS} = 302.4\ \text{kN} \geq P_{max} = 261.1\ \text{kN} \ \Rightarrow\ \text{ausreichend}$$



Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Dicht stehende Pfähle tragen weniger, als sie einzeln tragen würden

THEORIE

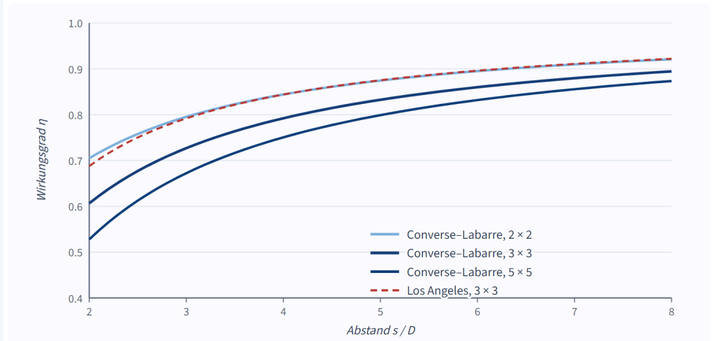
Je näher die Pfähle zusammenrücken, desto mehr überlappen sich die von jedem Pfahl durchdrungenen und verformten Bodenbereiche. Der **Gruppenwirkungsgrad** ist das Verhältnis der Tragfähigkeit der Gruppe zur Summe der Einzeltragfähigkeiten der Pfähle. Die Quelle gibt für eine Gruppe aus $n_1 \times n_2$ Pfählen mit Durchmesser D und Abstand d drei empirische Gleichungen an:

$$\eta = \frac{Q_{g(u)}}{\sum Q_u}$$

$$\eta_{CL} = 1 - \frac{\theta}{90}\,\frac{(n_1-1)n_2 + (n_2-1)n_1}{n_1 n_2},\quad \theta = \tan^{-1}\frac{D}{d}\ (\text{Grad})$$

Converse–Labarre zählt **benachbarte Pfahlpaare**: $(n_1 - 1)n_2$ Paare in einer Reihe und $(n_2 - 1)n_1$ Paare nebeneinander, jedes mit dem Winkel $\theta = \tan^{-1}(D/d)$ seines eigenen Abstands.

Das Modul verwendet diese Gleichung für Ton; damit werden der Pfahlschaft in Tonschichten und der Fuß eines Pfahls, dessen Spitze im Ton liegt, abgemindert.



Mit wachsendem Abstand nähert sich der Wirkungsgrad 1; bei einer 3 × 3-Gruppe etwa 0.7 – 0.8 bei 3D.

Die beiden anderen Gleichungen und Grenzen

THEORIE

Die anderen beiden Gleichungen der Quelle gelten ebenfalls für eine rechteckige Gruppe. Die Gleichung nach **Los Angeles** und die Gleichung nach **Seiler–Keeney** (mit d in **ft**):

$$\eta_{LA} = 1 - \frac{D}{\pi d\, n_1 n_2}\left[n_1(n_2-1) + n_2(n_1-1) + \sqrt{2}(n_1-1)(n_2-1)\right]$$

$$\eta_{SK} = \left[1 - \frac{11d}{7(d^2-1)}\,\frac{n_1+n_2-2}{n_1+n_2-1}\right] + \frac{0.3}{n_1+n_2}$$

Seiler–Keeney besitzt einen Pol bei 1 ft und ist unterhalb von 2 ft bedeutungslos; das Modul gibt ihn ab **2 ft** an.

Ein Abstand kleiner als 2.5D wird **markiert**: Dies ist der kleinste Abstand, den die Quelle für Reibungspfähle angibt, und die Gleichungen wurden für größere Abstände aufgestellt.

Bei dreieckiger Anordnung wird Converse–Labarre durch Abzählen benachbarter Paare angesetzt; dies ist eine **Erweiterung des Moduls** und ergibt einen geringeren Wirkungsgrad als das Netz bei gleichem Abstand.

Aufgabe

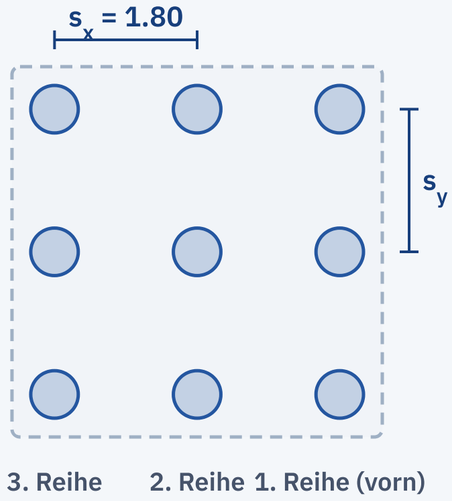
BEISPIEL

GESUCHT

Den Gruppenwirkungsgrad mit den Gleichungen von **Converse–Labarre**, **Los Angeles** und **Seiler–Keeney** bestimmen.

Gegeben

Gruppe	**3 × 3 Pfähle, D = 0.60 m, Achsabstand d = 1.80 m (in beiden Richtungen)**
Seiler–Keeney	**d in Fuß: 1.80 m = 5.906 ft**



Lösung

LÖSUNG

1 Converse–Labarre: θ = tan⁻¹(D/d); benachbarte Paare: (2)(3) + (2)(3) = 12

$$\theta = \tan^{-1}\frac{0.6}{1.8} = 18.43^\circ \;;\quad \eta_{CL} = 1 - \frac{18.43}{90}\cdot\frac{12}{9} = \mathbf{0.727}$$

2 Los Angeles

$$\eta_{LA} = 1 - \frac{0.6}{\pi(1.8)(9)}\left[3(2) + 3(2) + \sqrt{2}(2)(2)\right] = \mathbf{0.792}$$

3 Seiler–Keeney (d = 5.906 ft)

$$\eta_{SK} = \left[1 - \frac{11(5.906)}{7(5.906^2 - 1)}\cdot\frac{4}{5}\right] + \frac{0.3}{6} = \mathbf{0.831}$$

Drei Gleichungen im Bereich 0.727 – 0.831. Im Ton verwendet das Modul **Converse–Labarre** (0.727).

Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Wirkungsgrad in Sand: eine Regel, keine Gleichung

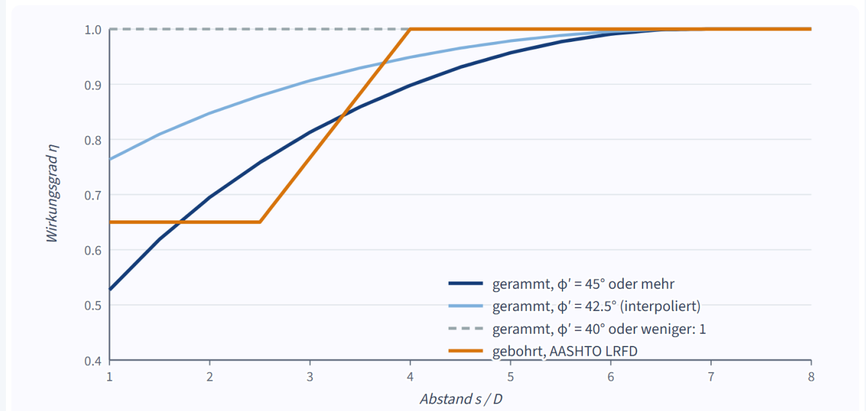
THEORIE

Ein Rammpfahl **verdichtet** lockeren oder mitteldichten Sand; in diesem Sand trägt die Gruppe so viel wie die Summe der Pfähle (in Versuchen sogar mehr). Nur in dichtem Sand (φ′ > etwa 40°) verringert ein enger Abstand die Tragfähigkeit. Für einen Rammpfahl übernimmt das Modul die untere Grenze der Quelle und erhöht den Gruppenwirkungsgrad **niemals über 1**:

- φ′ ≤ 40°: **η = 1**
- 40° < φ′ < 45°: **lineare Interpolation** zwischen 1 und der 45°-Kurve
- φ′ ≥ 45°: die 45°-Kurve (1.0 bei s/D = 7; 0.53 bei s/D = 1)

Bohrpfähle verdichten den Boden nicht, sie können ihn sogar auflockern. AASHTO LRFD multipliziert den Widerstand jedes Bohrpfahls in der Gruppe bei s/D = 2.5 mit **0.65** und bei 4 mit **1.0**:

$$\eta = 0.65 + 0.35\,\frac{s/D - 2.5}{1.5} \qquad 2.5 \le s/D \le 4$$



Die Tragfähigkeit der Sandschicht wird auf den Pfahlschaft in dieser Schicht und auf den Spitzenwiderstand des Pfahls, dessen Fuß im Sand liegt, angesetzt. Abstand: **der kleinste Abstand zwischen zwei Pfählen**.

Aufgabe

BEISPIEL

Gegeben

Abstand	**s = 1.80 m, D = 0.60 m: s/D = 3.0**
Bohrpfahl	**AASHTO-Regel im Sand**
Rammpfahl	**Sand, $\varphi' = 42°$ (45°-Kurve bei s/D = 3: $\eta_{45} = 0.813$)**

GESUCHT

Bestimmen Sie den Wirkungsgrad der Sandschicht für einen **Bohrpfahl** und für einen **Rammpfahl** in Sand mit φ′ = 42°; was ergibt sich für φ′ = 35°?

Lösung

LÖSUNG

1 Bohrpfahl (AASHTO): s/D = 3.0

$$\eta = 0.65 + 0.35\,\frac{3.0 - 2.5}{1.5} = \mathbf{0.767}$$

2 Rammpfahl, φ′ = 42°: Gewichtung w = (φ′ – 40)/5 und die 45°-Kurve

$$w = \frac{42 - 40}{5} = 0.4 \qquad \eta = 1 - w(1 - \eta_{45}) = 1 - 0.4(1 - 0.813) = \mathbf{0.925}$$

3 Rammpfahl, φ′ = 35°

$$\varphi' \leq 40^\circ \;\Rightarrow\; \eta = \mathbf{1.000}$$

Im selben Bereich nimmt ein **Bohrpfahl** im Sand den Wert 0.767 an, ein **Rammpfahl** dagegen (in lockerem bis mitteldichtem Sand) den Wert 1.00: Rammen verdichtet, Bohren nicht.

Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Der Steifemodul jeder Schicht ist der Steifemodul dieses Bodens

THEORIE

Der Pfahlschaft wird an den Schichtgrenzen unterteilt, und jedes Segment wird mit seinem eigenen Verfahren berechnet. Ein auf den Baugrund bezogener Gruppeneffekt ist ebenfalls **Segment für Segment** anzusetzen: Die Tragfähigkeit einer Schicht entspricht der Tragfähigkeit dieses Bodens, während der **Pfahlfuß** die Tragfähigkeit des Bodens erhält, auf dem er lagert:

$$Q_{ind} = n \left(\sum_i \eta_i \, Q_{s,i} + \eta_b \, Q_p \right)$$

$$\eta_{group} = \frac{Q_{ind}}{\sum Q_u}$$

Tonschichten und die Sohle eines Pfahls mit der Spitze im Ton: Converse–Labarre.

Sandschicht: Diagramm für Rammpfähle, AASHTO-Regel für Bohrpfähle.

Der Gruppenwirkungsgrad ist **kein Eingabewert**, sondern ein **gewichtetes Mittel** der Beiträge der Schichten: Ein Pfahl, der den größten Teil seiner Last aus dem Sand aufnimmt, zeigt den Gruppeneffekt dieses Sandes, ein im Ton hängender Pfahl den Gruppeneffekt des Tons.

Aufgabe

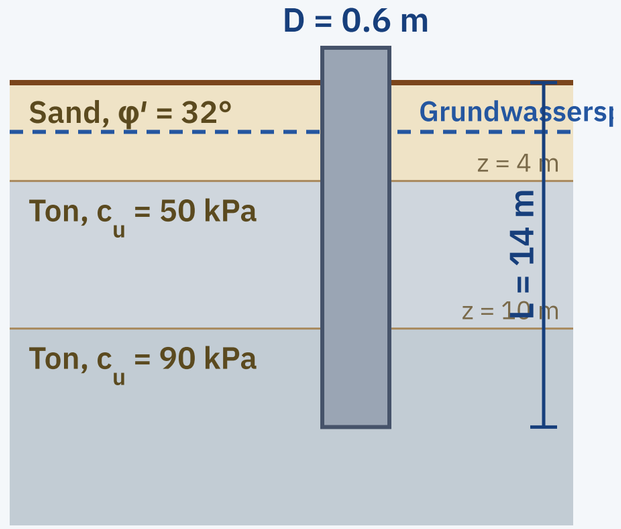
BEISPIEL

Gegeben

Einzelpfahl (Beispiel 3)	**Q_{s1} = 49.8 (Sand), Q_{s2} = 311.0, Q_{s3} = 317.2 (Ton), Q_p = 229.0 kN**
Wirkungsgrade	**Sand (Bohrpfahl, s/D = 3): 0.767; Ton: 0.727; Sohle (Ton): 0.727**
Gruppe	**9 Pfähle**

GESUCHT

Wie groß sind Q_{ind} und der **Gruppenwirkungsgrad** $\eta = Q_{ind}/\Sigma Q_u$?



Lösung

LÖSUNG

1 Wirksamer Beitrag jedes Abschnitts (η Q): Mantel im Sand, Mantel im Ton 1, Mantel im Ton 2, Pfahlfuß

$$0.767(49.8) = 38.2\ ; \quad 0.727(311.0) = 226.1$$
$$0.727(317.2) = 230.6\ ; \quad 0.727(229.0) = 166.5$$

2 Tragfähigkeit eines Einzelpfahls und Pfahlgruppe

$$\sum \eta Q = 38.2 + 226.1 + 230.6 + 166.5 = \mathbf{661.4}\ \mathrm{kN}$$
$$Q_{ind} = 9(661.4) \approx \mathbf{5{,}952}\ \mathrm{kN}$$

3 Gruppenwirkungsgrad

$$\eta = \frac{Q_{ind}}{n\,Q_u} = \frac{5{,}952}{9(907.1)} = \mathbf{0.729}$$

Die Pfahlgruppe trägt **73 %** der Summe der Einzelpfähle (Sand η = 0.767, Ton η = 0.727).

Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Die Gruppe kann wie eine Tiefgründung versagen

THEORIE

Liegen die Pfähle eng beieinander, können die Gruppe und der Boden zwischen ihnen **gemeinsam** absinken: ein Tiefgründungskörper der Größe $L_g \times B_g$ und der Tiefe L. Seine Tragfähigkeit ist die **Scherfestigkeit** an den vier Seiten plus der **Grundbruch** unter der Sohle:

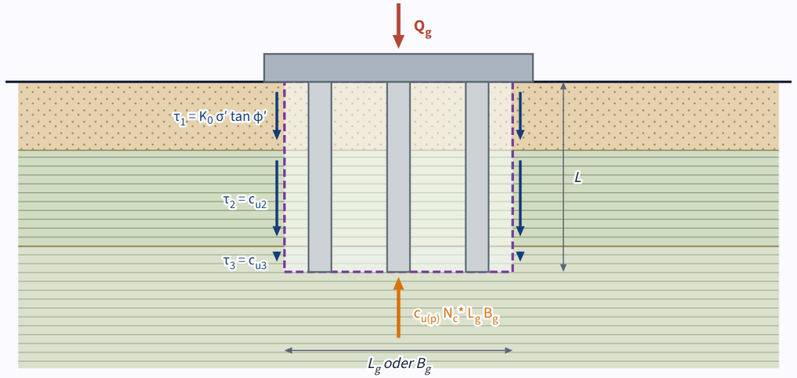
$$Q_{block} = \sum_i \tau_i \, P_b \, \Delta L_i + q_b \, L_g B_g \qquad P_b = 2(L_g + B_g)$$

Tonmantelfläche: $\tau = c_u$ (Boden gleitet auf Boden, keine Abminderung durch α).

Seitenfläche aus Sand (Erweiterung des Moduls aus der Quelle): $\tau = K_0 \bar{\sigma}' \tan\varphi'$, $K_0 = 1 - \sin\varphi'$.

Tonuntergrund: $q_b = c_u N^*_c$; N^*_c aus dem Nomogramm, nach L/B_g und L_g/B_g. **Sanduntergrund**: nQ_p.

$$Q_{g(u)} = \min(Q_{ind},\, Q_{block}) \qquad Q_{all} = \frac{Q_{g(u)}}{FS}$$



Aufgabe

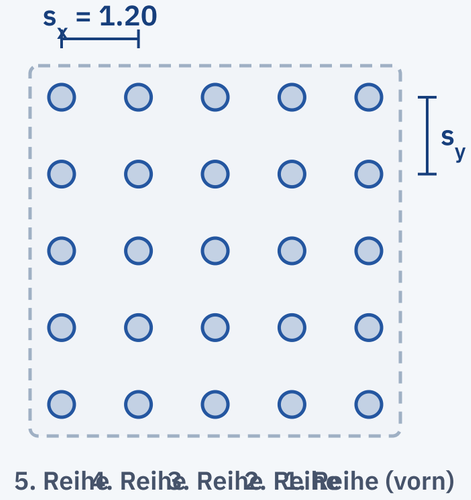
BEISPIEL

Gegeben

Gruppe	**9 Bohrpfähle, 3 Reihen × 3 Pfähle, D = 0.60 m, L = 14 m, s = 1.80 m**
Baugrund	**Sand 0–4 m ($\varphi' = 32°$) · Ton 4–10 m (c_u = 50) · Ton 10–18 m (c_u = 90 kPa)**
Block	**$L_g = B_g = (3 - 1)(1.8) + 0.6$**
Seitenflächen	**Sand: $\tau = K_0 \bar{\sigma} \tan\varphi'$ ($\bar{\sigma}$ = 31.6 kPa); Ton: $\tau = c_u$**
Sohle	**Ton, c_u = 90 kPa; N^*_c aus dem Nomogramm ($L_g/B_g = 1$)**
Einzeln	**Q_{ind} = 5,952 kN (Beispiel 6); V = 1 600 kN, FS = 3**

GESUCHT

Es sind der Wert Q_{blok}, die Kapazität der Gruppe und ihre zulässige Last zu ermitteln.



Lösung (1/2)

LÖSUNG

1 Blockabmessungen und Umfang

$$L_g = B_g = 4.2\ \text{m} \qquad P_b = 2(L_g + B_g) = \mathbf{16.8}\ \text{m}$$

2 Abscheren an den Seitenflächen (τ P_b ΔL)

$$\text{Sand}: \tau = K_0 \bar{\sigma}' \tan\varphi' = 0.470(31.6)(0.6249) = 9.28 \ \Rightarrow\ 624\ \text{kN}$$

$$\text{Ton 1}: \tau = 50 \ \Rightarrow\ 50(16.8)(6) = 5{,}040\ \text{kN}$$

$$\text{Ton 2}: \tau = 90 \ \Rightarrow\ 90(16.8)(4) = 6{,}048\ \text{kN}$$

Lösung (2/2)

LÖSUNG

3 Sohle: N^*_c aus dem Nomogramm für $L/B_g = 14/4.2 = 3.33$ und $L_g/B_g = 1$

$$q_b L_g B_g = c_u N_c^* \, L_g B_g = 90(8.90)(17.64) = \mathbf{14{,}126}\ \text{kN}$$

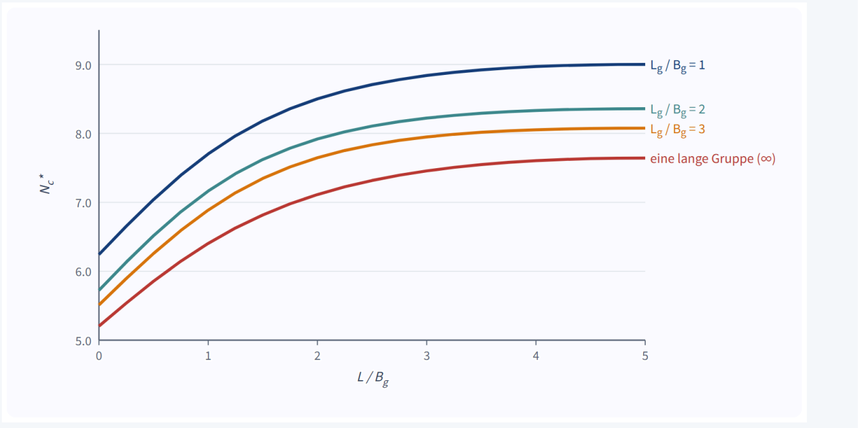
4 Blocktragfähigkeit, Tragfähigkeit der Pfahlgruppe und zulässige Last

$$Q_{block} = 11{,}712 + 14{,}126 = 25{,}838\ \text{kN}$$

$$Q_{g(u)} = \min(5{,}952;\ 25{,}838) = \mathbf{5{,}952}\ \text{kN}$$

$$Q_{all} = \frac{5{,}952}{3} = 1{,}984\ \text{kN} \geq V = 1\,600\ \text{kN}$$

Die Blocktragfähigkeit ist **mehr als das 4-Fache** der Summe der Einzelpfähle: In dieser Gruppe sind **die Einzelpfähle maßgebend** (Einzelpfahl). Der Block kommt bei eng stehenden Gruppen mit vielen Pfählen zur Wirkung; siehe das Diagramm seitlich.



Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Aufgabe

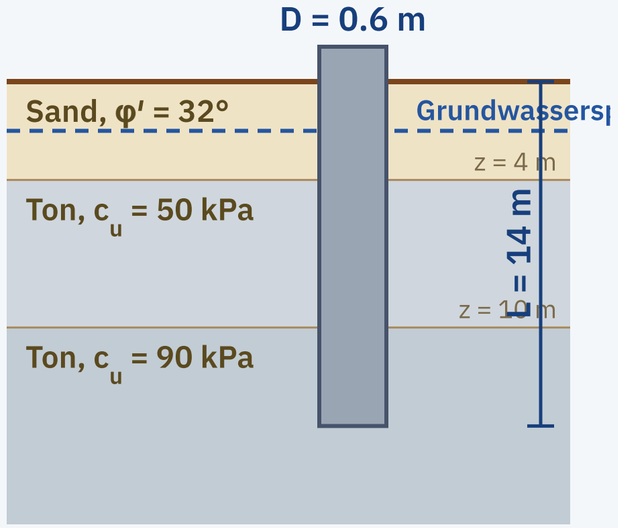
BEISPIEL

Gegeben

Gruppe	**5 × 5 Rammpfähle, D = 0.40 m, s = 1.20 m (3D), L = 12 m**
Baugrund	**reiner Sand, φ′ = 32°, γ = 18, γ_{sat} = 19 kN/m³, Grundwasser bei 3 m**
Einzelpfahl	**Q_s = 285.7, Q_p = 318.0 kN (Rammpfahl, K–δ und Meyerhof)**
Wirkungsgrad	**Rammpfahl, in Sand mit φ′ < 40°: η = 1**

GESUCHT

Die Werte Q_{ind} und Q_{blok} zu vergleichen und die Tragfähigkeit der Gruppe zu ermitteln.



Lösung (1/2)

LÖSUNG

1 Einzelpfähle (η = 1)

$$Q_{ind} = n\,Q_u = 25(603.7) = \mathbf{15{,}094}\ \text{kN}$$

2 Block: $L_g = B_g = 4(1.2) + 0.4 = 5.2$ m; $\sigma'(3) = 54.0$, $\sigma'(12) = 136.7$ kPa

$$P_b = 2(5.2 + 5.2) = 20.8\ \text{m} \qquad \bar{\sigma}' = \frac{939.2}{12} = 78.3\ \text{kPa}$$

$$\tau = K_0 \bar{\sigma}' \tan\varphi' = 0.470(78.3)(0.6249) = 22.99\ \text{kPa}$$

$$\text{seitliches Gleiten} = 22.99(20.8)(12) = \mathbf{5{,}738}\ \text{kN}$$

Lösung (2/2)

LÖSUNG

3 Blockbasis im Sand: die Basis ist die Summe der Spitzenwiderstände der Pfähle

$$\text{Basis} = nQ_p = 25(318.0) = \mathbf{7{,}950}\ \text{kN} \qquad Q_{block} = 5{,}738 + 7{,}950 = \mathbf{13{,}689}\ \text{kN}$$

4 Tragfähigkeit und Wirkungsgrad der Pfahlgruppe

$$Q_{block} = 13{,}689 \ < \ Q_{ind} = 15{,}094$$

$$Q_{g(u)} = \mathbf{13{,}689}\ \text{kN} \qquad \eta_{group} = \frac{13{,}689}{15{,}094} = \mathbf{0.907}$$

Hier ist der **Block maßgebend**: In einer großen Gruppe übersteigt die Summe der Pfahlschäfte die Gleitfähigkeit des äußeren Umfangs der Gruppe. Obwohl die Pfähle einzeln η = 1.00 zeigen, beträgt die Tragfähigkeit der Gruppe **91 %** der Einzelsumme.

Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Vesic: drei Anteile, dann die Pfahlgruppe

THEORIE

Ein Einzelpfahl setzt sich durch die Verkürzung seiner eigenen Länge, durch die Zusammendrückung des Bodens unterhalb des Pfahlfußes und durch die Zusammendrückung des entlang des Pfahlschafts belasteten Bodens. Vesic (1969) summiert diese drei Anteile für die Gebrauchslast Q_W (Q_{WS} ist der Anteil des Schafts, Q_{WP} der Anteil des Pfahlfußes):

$$s_e = s_{e1} + s_{e2} + s_{e3}$$

$$s_{e1} = \frac{(Q_{wp} + \xi Q_{ws})L}{A_p E_p} \qquad s_{e2} = \frac{q_{wp} D}{E_s}(1 - \mu_s^2) I_{wp}$$

$$s_{e3} = \frac{Q_{ws}}{pL}\frac{D}{E_s}(1 - \mu_s^2) I_{ws} \qquad I_{ws} = 2 + 0.35\sqrt{L/D}$$

$$S_{g(e)} = \sqrt{\frac{B_g}{D}}\, s_e$$

Arbeitslast $Q_W = V/n$; das Modul verteilt sie im Verhältnis **Q_s : Q_p** auf Pfahlschaft und Pfahlfuß.

Die Pfahlgruppe setzt sich unter derselben Pfahllast um das **$\sqrt{(B_g/D)}$**-Fache mehr als ein Einzelpfahl (empirische Beziehung von Vesic für Pfähle in Sand).

ξ: Verteilung des Mantelwiderstands, zwischen 0.5 (gleichmäßig) und 0.67 (mit der Tiefe zunehmend); $I_{wp} = 0.85$.

Aufgabe

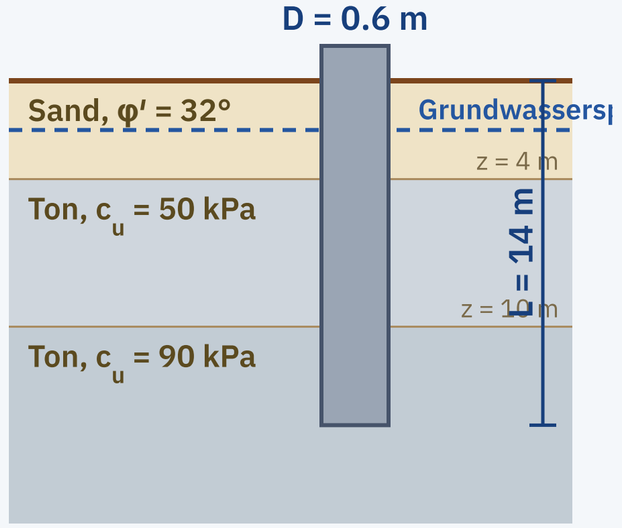
BEISPIEL

Gegeben

Gruppe	**9 Bohrpfähle, 3 Reihen × 3 Pfähle, D = 0.60 m, L = 14 m, s = 1.80 m**
Baugrund	**Sand 0–4 m (φ′ = 32°) · Ton 4–10 m (c_u = 50) · Ton 10–18 m (c_u = 90 kPa)**
Arbeitslast	**Q_w = V/n = 177.8 kN; Q_s : Q_p = 678.1 : 229.0 (Beispiel 3)**
Material	$E_p = 30\,000\ \mathrm{MPa},\ E_s = 30\ \mathrm{MPa},\ \nu_s = 0.30,\ \xi = 0.6,\ I_{wp} = 0.85$

GESUCHT

Die elastische Setzung des Einzelpfahls ist in drei Teilen zu ermitteln, die elastische Setzung der **Pfahlgruppe** ist zu berechnen.



Lösung (1/2)

LÖSUNG

1 Aufteilung der Arbeitslast

$$Q_{ws} = Q_w \frac{Q_s}{Q_u} = 177.8 \frac{678.1}{907.1} = 132.9\ \text{kN} \qquad Q_{wp} = 177.8 - 132.9 = 44.9\ \text{kN}$$

2 Verkürzung des Pfahls

$$s_{e1} = \frac{(44.9 + 0.6(132.9))(14)}{(0.2827)(30\,000\,000)} = 0.21\ \text{mm}$$

3 Sohle

$$q_{wp} = \frac{Q_{wp}}{A_b} = 158.7\ \text{kPa} \quad s_{e2} = \frac{158.7(0.6)}{30\,000}(1 - 0.3^2)(0.85) = 2.46\ \text{mm}$$

Lösung (2/2)

LÖSUNG

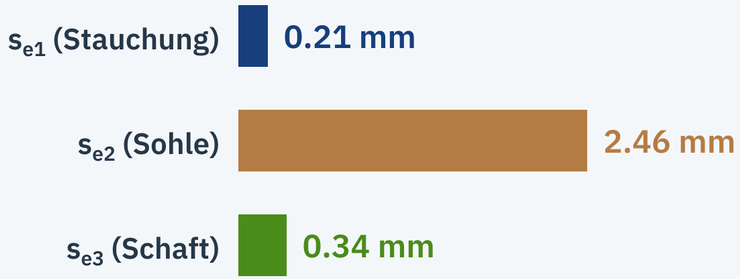
4 Schaft: $I_{ws} = 2 + 0.35\sqrt{(14/0.6)} = 3.69$

$$s_{e3} = \frac{132.9}{(1.885)(14)} \cdot \frac{0.6}{30\,000}(0.91)(3.69) = 0.34 \text{ mm}$$

5 Einzelpfahl und Pfahlgruppe

$$s_e = 0.21 + 2.46 + 0.34 \approx 3.00 \text{ mm}$$

$$S_{g(e)} = \sqrt{\frac{B_g}{D}}\, s_e = \sqrt{\frac{4.2}{0.6}}(3.00) = \mathbf{7.9} \text{ mm}$$



82 % der Setzung stammen aus dem Sohlanteil (s_{e2}); die gesamte elastische Setzung beträgt **7.9 mm**. Die eigentliche Setzung der Tonschichten folgt im nächsten Schritt: die Konsolidation.

Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Langsame und große Setzung der Tonschichten

THEORIE

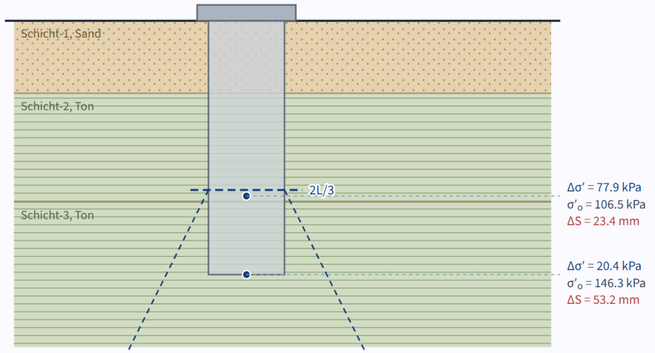
Die Tone unter der Pfahlkopfplatte setzen sich langsam und überwiegend durch **Konsolidation**. Die Quelle setzt die Gruppenlast von der Ebene der Pfahlkopfplatte auf ein äquivalentes Fundament **2L/3 darunter** an (die Pfähle haben einen Teil der Last auf den darüberliegenden Boden übertragen) und breitet sie darunter mit **2 vertikal : 1 horizontal** aus. In der Mitte einer Tonschicht, z unterhalb der Ebene 2L/3, beträgt die zusätzliche Spannung:

$$\Delta\sigma'_i = \frac{Q_g}{(B_g + z_i)(L_g + z_i)}$$

$$\Delta S_i = \frac{C_c H_i}{1 + e_0} \log \frac{\sigma'_o + \Delta\sigma'_i}{\sigma'_o} \quad \text{(NC)}$$

Bei überkonsolidiertem Ton wird C_s (falls nicht gegeben, $C_c/5$) bis zur Vorbelastungsspannung verwendet, darüber hinaus C_c.

Der Teil der Tonschicht **unterhalb** von 2L/3 wird in die Berechnung einbezogen; σ'_o wird in der Mitte dieses Teils, bezogen auf Schicht und Wasserstand, angesetzt. $S_c = \Sigma\Delta S_i$.



Aufgabe

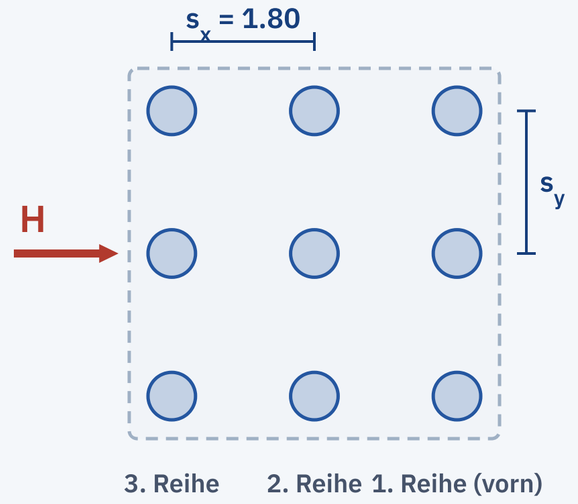
BEISPIEL

Gegeben

Gruppe	**9 Bohrpfähle, 3 Reihen × 3 Pfähle, D = 0.60 m, L = 14 m, s = 1.80 m**
Baugrund	**Sand 0–4 m (φ′ = 32°) · Ton 4–10 m (c_u = 50) · Ton 10–18 m (c_u = 90 kPa)**
Last	$Q_g = V = 1\,600$ kN; **Block** $L_g = B_g = 4.2$ m
Ton 1 (4–10 m)	$e_0 = 0.90,\ C_c = 0.28$ **(NC)**
Ton 2 (10–18 m)	$e_0 = 0.70,\ C_c = 0.20$ **(NC)**

GESUCHT

Die Ebene 2L/3 bestimmen und die Setzung **jeder Tonschicht** (des unterhalb von 2L/3 gelegenen Teils) sowie die gesamte Konsolidationssetzung berechnen.



Lösung (1/2)

LÖSUNG

1 Niveau 2L/3 (von der Pfahlkopfplattenunterseite)

$$z_0 = \frac{2L}{3} = \frac{2(14)}{3} = \mathbf{9.33}\ \text{m} \ \Rightarrow\ \text{Der Bereich 9.33–10 m des Tons 1 und der gesamte Ton 2 werden berücksichtigt}$$

2 Ton 1 (4–10 m): 9.33–10 m, H = 0.67 m; Mittelpunkt 9.67 m, z = 0.33 m

$$\Delta\sigma' = \frac{1\,600}{(4.2+0.33)(4.2+0.33)} = 77.9\ \text{kPa} \qquad \sigma'_o = 106.5\ \text{kPa}$$

$$\Delta S = \frac{0.28(0.67)}{1+0.90}\log\frac{106.5+77.9}{106.5} = \mathbf{23.4}\ \text{mm}$$

Lösung (2/2)

LÖSUNG

3 Ton 2 (10–18 m): 10.00–18 m, H = 8.00 m; Mittelpunkt 14.00 m, z = 4.67 m

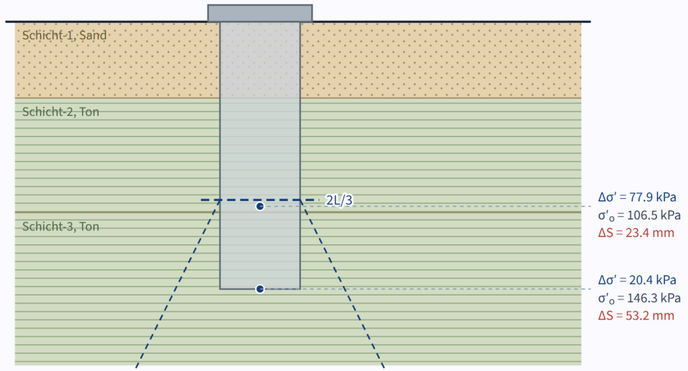
$$\Delta\sigma' = \frac{1\,600}{(4.2+4.67)(4.2+4.67)} = 20.4\ \text{kPa} \qquad \sigma'_o = 146.3\ \text{kPa}$$

$$\Delta S = \frac{0.20(8.00)}{1+0.70}\log\frac{146.3+20.4}{146.3} = \mathbf{53.2}\ \text{mm}$$

4 Gesamte Konsolidationssetzung und ihre Kombination mit dem elastischen Anteil

$$S_c = 23.4 + 53.2 = \mathbf{76.7}\ \text{mm}$$

$$S = S_{g(e)} + S_c = 7.9 + 76.7 = \mathbf{84.6}\ \text{mm}$$



91 % der Setzung stammen aus der Konsolidation, und davon 69 % aus den Tonen zwischen 10 und 18 m: Die Gruppensetzung wird durch den mächtigen Ton **weit unterhalb** der Pfahlspitzen bestimmt; die Setzung eines Einzelpfahls zeigt dies nicht.

Lösung in GeoTerva prüfen ↗

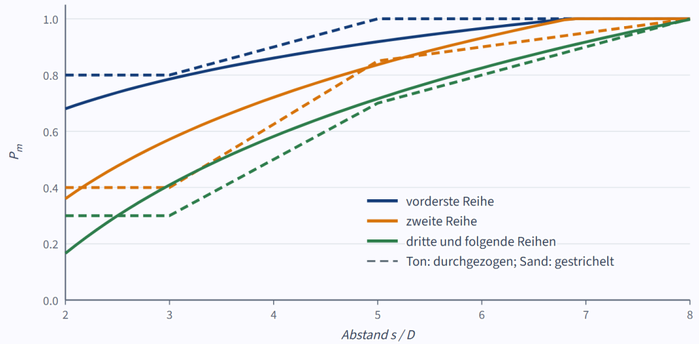
Die hinteren Reihen liegen im Schatten der vorderen

THEORIE

Unter Horizontallast drückt ein Pfahl den Boden, und der Boden reagiert über die Pfahllänge (die p–y-Kurve im Bettungsmodul). Stehen die Pfähle in Lastrichtung **hintereinander**, so arbeitet jeder in einem Boden, der vom vor ihm stehenden Pfahl beansprucht und verdrängt wird. Versuche (Brown et al. 1988; McVay et al. 1995; Rollins et al. 2006) zeigen, dass die p–y-Kurve der Gruppe ihre Form behält, aber mit einem **p-Multiplikator P_m** abgemindert wird; der Multiplikator hängt von der Reihe und vom Abstand ab:

$$p_{group}(y) = P_m \; p_{single}(y)$$

$$\text{Ton (Rollins):} \quad \begin{aligned} P_{m1} &= 0.26 \ln \tfrac{s}{D} + 0.5 \\ P_{m2} &= 0.52 \ln \tfrac{s}{D} \\ P_{m3} &= 0.60 \ln \tfrac{s}{D} - 0.25 \end{aligned}$$



Sand: AASHTO-LRFD-Beiwertet (bei 3D und 5D: 0.8·0.4·0.3 und 1.0·0.85·0.7; dazwischen linear).

In geschichtetem Boden wird die p–y-Kurve **jeder Schicht** mit dem Beiwert der Bodenart dieser Schicht skaliert. **Kehrt sich die Last um**, nimmt jede Reihe den Mittelwert der Reihenbeiwerte der Gruppe an.

Aufgabe

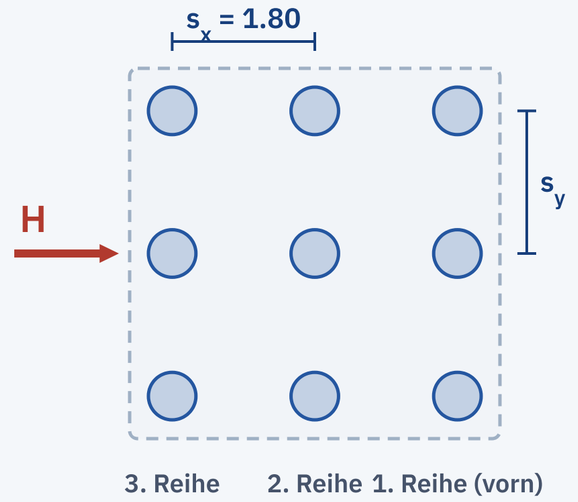
BEISPIEL

Gegeben

Abstand (in Lastrichtung)	**s_x = 1.80 m, D = 0.60 m: s/D = 3**
Ton	**Gleichungen von Rollins et al. (2006)**
Sand	**AASHTO LRFD: in 3D $P_m = 0.8 \cdot 0.4 \cdot 0.3$**

GESUCHT

Für die Tonschicht sind die **p-Multiplikatoren** der drei Pfahlreihen zu ermitteln; bei **Lastumkehr** – wie groß ist der mittlere Multiplikator der Pfahlreihen für Ton und Sand?



Lösung

LÖSUNG

1 Ton: ln(s/D) = ln 3 = 1.099

$$P_{m1} = 0.26(1.099) + 0.5 = \mathbf{0.786}$$

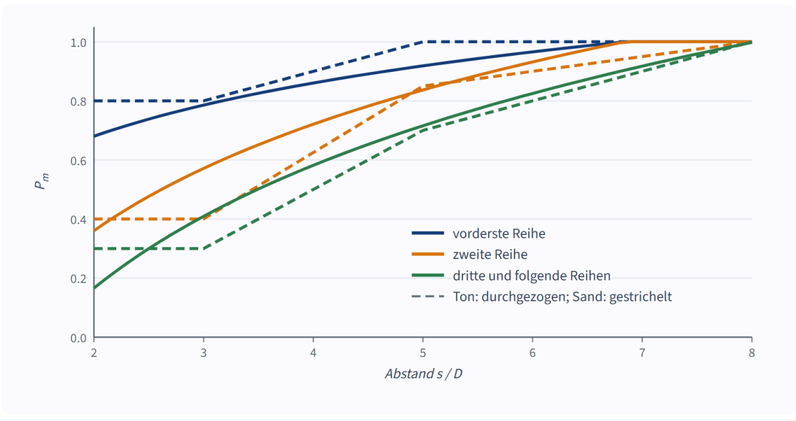
$$P_{m2} = 0.52(1.099) = \mathbf{0.571}$$

$$P_{m3} = 0.60(1.099) - 0.25 = \mathbf{0.409}$$

2 Wechselnde Last: Mittelwert der Reihen

$$\bar{P}_{m,clay} = \frac{0.786 + 0.571 + 0.409}{3} = \mathbf{0.589}$$

$$\bar{P}_{m,sand} = \frac{0.8 + 0.4 + 0.3}{3} = \mathbf{0.500}$$



Die vordere Reihe mobilisiert etwa 79 % der Kurve, die dritte und die folgenden Reihen nur 41 % (bei Ton); bei Sand 80 % und 30 %. Mit zunehmendem Abstand nähern sich die Beiwerte dem Wert 1 (bei 5D, Sand 1.0 · 0.85 · 0.7).

Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Die Pfahlkopfplatte erfährt eine einzige Verschiebung

THEORIE

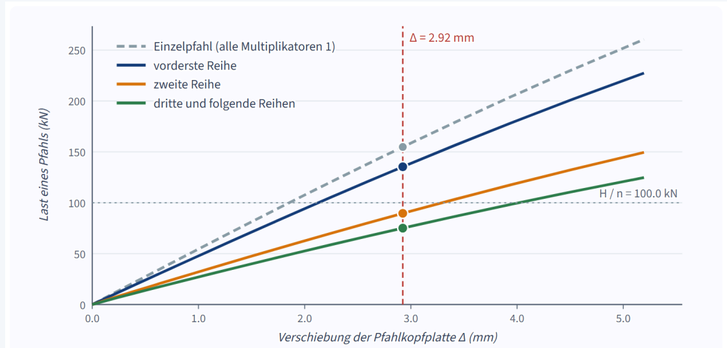
Die Pfahlkopfplatte ist starr und ihre Verdrehung ist behindert: **jeder Pfahlkopf verschiebt sich um dasselbe Δ**; da die p–y-Kurven jedoch unterschiedlich skaliert sind, tragen die Reihen unterschiedliche Lasten. Das Modul ermittelt das Δ, bei dem die Summe der Reihenlasten gleich der Last auf der Pfahlkopfplatte ist:

$$\sum_{k=1}^{n_x} n_y \, H_k(\Delta) = H$$

Der Pfahl in der k. Reihe ist der Einzelpfahl des **Moduls für seitlich belastete Pfähle** (finite Elemente + Newton); die Kurven werden mit den Multiplikatoren dieser Reihe skaliert.

Die Verschiebung wird **gesteuert**: Der Pfahlkopf wird bei Δ gehalten und die Reaktion abgelesen; so lässt sich auch der Höchstpunkt der entfestigenden Kurve (zyklischer Ton) verfolgen.

Die größte Last, die die Gruppe tragen kann, ist der **erste Scheitelwert** der Zeilensumme; ist die geforderte Last größer, meldet das Modul dies.



Aufgabe

BEISPIEL

Gegeben

Lösung (Modul)	**Δ = 2.92 mm; Last je Pfahl: 1. Reihe 135.3, 2. Reihe 89.6, 3. Reihe 75.1 kN**
Einzelpfahl	**Trägt 154.8 kN bei Δ; verschiebt sich um 1.85 mm unter 100 kN**
Last	**H = 900 kN, n = 9: gleicher Anteil H/n = 100 kN**

GESUCHT

Prüfen Sie das Gleichgewicht; ermitteln Sie das Verhältnis der Verschiebung der Pfahlkopfplatte zu der eines Einzelpfahls und den **Gruppenwirkungsgrad unter Horizontallast**.

Lösung

LÖSUNG

1 Gleichgewicht: $\Sigma n_\gamma H_k = H$

$$3(135.3 + 89.6 + 75.1) = \mathbf{900}\ \mathrm{kN} = H\ \checkmark$$

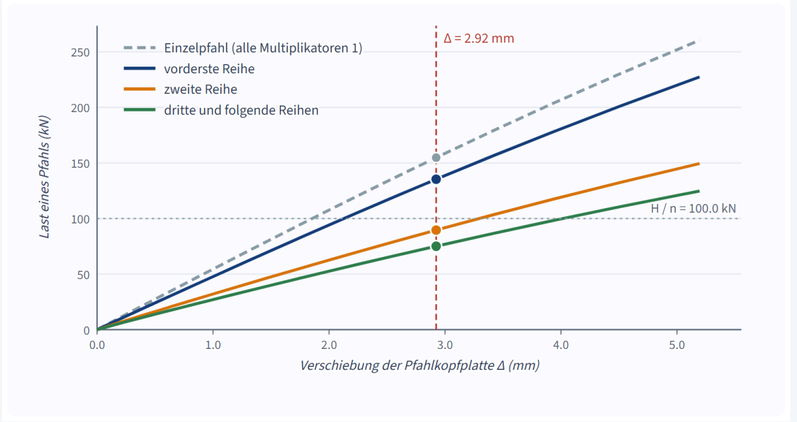
2 Verhältnis der Verschiebung der Pfahlkopfplatte zu der eines Einzelpfahls

$$\frac{\Delta}{y_{single}} = \frac{2.92}{1.85} = \mathbf{1.58}$$

3 Gruppenwirkungsgrad unter Horizontallast: mittlere Pfahllast / Last des Einzelpfahls bei gleichem Δ

$$\eta_{lateral} = \frac{H/n}{H_{single}(\Delta)} = \frac{100.0}{154.8} = \mathbf{0.65}$$

Die vordere Reihe trägt das **1.35-Fache** des gleichen Anteils, die dritte Reihe das 0.75-Fache; die Pfahlkopfplatte verschiebt sich **1.58-mal** mehr als bei einem Einzelpfahl. Das größte Biegemoment tritt am Pfahlkopf auf: 207 kN·m.



Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Welcher Wert gehört zu welchem Nachweis?

THEORIE

Pfahllasten: $P_{max} \leq Q_u/FS$ (Einzelpfahl, ohne Gruppenwirkung); der auf Zug beanspruchte Pfahl $T_{max} \leq T_u/FS$, die auf Zug beanspruchten Pfähle zusammen $\Sigma T \leq T_g/FS$

Gruppentragfähigkeit: $V \leq Q_{all} = Q_{g(u)}/FS$; welcher Nachweis (Einzelpfahl oder Block) maßgebend ist

Setzung: elastisch + Konsolidation, wird mit dem eingegebenen zulässigen Wert verglichen

Lateral: Verschiebung der Pfahlkopfplatte, Last der vorderen Pfahlreihe, maximales Biegemoment und laterale Effizienz; Vergleich mit der zulässigen Verschiebung

Die Last je Pfahl und das Biegemoment sind die Lasten für die **strukturelle Bemessung** des Pfahlquerschnitts

BEISPIELGRUPPE: NACHWEISE

Nachweis	Ergebnis
$P_{max} \leq Q_u/FS$	261 ≤ 302 kN ✓
$V \leq Q_{all}$	1 600 ≤ 1,984 kN ✓
Setzung	84.6 mm
Δ (seitlich)	2.92 mm

Aufgabe

BEISPIEL

Gegeben

Gruppe	**9 Bohrpfähle, 3 Reihen × 3 Pfähle, D = 0.60 m, L = 14 m, s = 1.80 m**
Baugrund	**Sand 0–4 m (φ′ = 32°) · Ton 4–10 m (c_u = 50) · Ton 10–18 m (c_u = 90 kPa)**
Veränderlich	**Pfahlabstand s = 2.5D · 3D · 4D · 5D · 6D (in beiden Richtungen)**
Lasten	**V = 1 600, H = 900 kN, M_y = 900 kN·m**

GESUCHT

Wie ändern sich die Tragfähigkeit der Pfahlgruppe, der Gruppenwirkungsgrad und die Verschiebung der Pfahlkopfplatte mit zunehmendem Pfahlabstand?

Lösung (1/2)

LÖSUNG

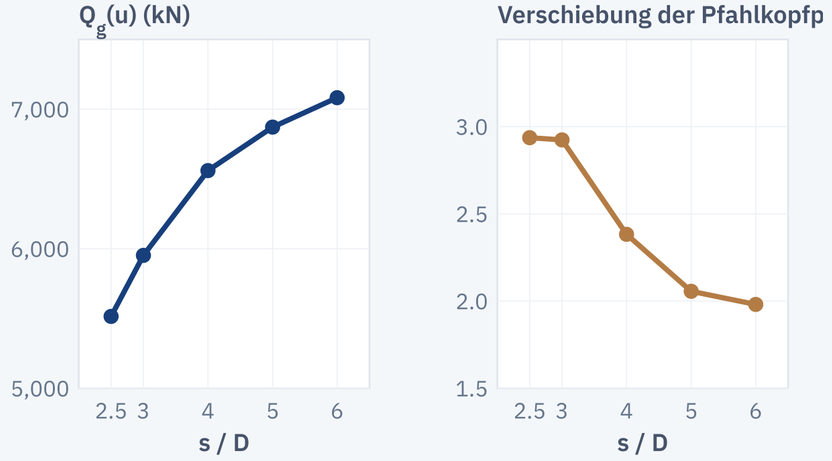
s / D	s (m)	η Sand	η Ton	$Q_{g(u)}$ (kN)	η-Gruppe	Δ (mm)
2.5	1.50	0.65	0.677	5,515	**0.676**	2.94
3.0	1.80	0.77	0.727	5,952	**0.729**	2.92
4.0	2.40	1.00	0.792	6,560	**0.803**	2.38
5.0	3.00	1.00	0.832	6,871	**0.842**	2.06
6.0	3.60	1.00	0.860	7,083	**0.868**	1.98

s = 2.5D → 6D: Tragfähigkeit **5,515 → 7,083 kN**, Gruppenwirkungsgrad 0.68 → 0.87, Verschiebung der Pfahlkopfplatte **2.94 → 1.98 mm**. Mit größer werdendem Achsabstand nähern sich sowohl der Wirkungsgrad als auch die p-Beiverte 1 an; 2.5D ist der kleinste in der Quelle angegebene Achsabstand.

Lösung (2/2)

LÖSUNG

Anmerkung. Eine Vergrößerung des Abstands von 2.5D auf 6D erhöht die Tragfähigkeit um 28% und verringert die Verschiebung der Pfahlkopfplatte um 33%; jedoch wächst die Pfahlkopfplatte und die Pfähle verteilen sich weiter. In der Praxis ist ein Kompromiss zwischen 3D – 3.5D und 5D sinnvoll. In der Abbildung links $Q_{g(u)}$, rechts Δ.



Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Die Annahmen hinter den Zahlen

THEORIE

Gruppe: vertikale Pfähle im Rechteckraster oder Dreiecksverband, mit einheitlichem Querschnitt und einheitlicher Länge, unter einer starren Pfahlkopfplatte. Die Platte überträgt die Last, fügt aber keinen Widerstand hinzu (passiver Erddruck, die Reibung unter ihr und die Tragfähigkeit werden auf der sicheren Seite belassen).

Einzelpfahl: Regeln für geschichteten Boden, es wird kein Widerstand eingegeben.

Wirkungsgrad: empirische Gleichungen für Rammpfähle in Ton; in Sand ein einziger Abstand (der Mindestabstand). Bei Dreiecksanordnung ist Converse–Labarre eine **Erweiterung**.

Block: die Gründung der Quelle im Ton; die Gleitfläche im Sand und die Sandbasis sind eine **Erweiterung des Moduls**.

Lasten: V enthält das Gewicht des Pfahlkopfs; Horizontallast und Momente wirken an der Pfahlkopfplatte. Bei Zugbeanspruchung wird nur der Pfahlschaft betrachtet, Sand ¾.

Setzung: optional; der elastische Anteil mit einem einzigen E_s und v_s, die Konsolidation mit 2:1-Spannungsausbreitung, in der Mitte jeder Schicht.

Seitlich: Die p-Multiplikatoren stammen aus Versuchen an bestimmten Böden und Abständen; die 3D-Werte sind gekennzeichnet.

Zusammenfassung

Die wichtigsten Punkte

Steifer Pfahlkopf: **P = V/n + Bx + Cy**; die größte Last wirkt auf den vorderen Pfahl, die kleinste auf den hinteren Pfahl; bei großem Moment wird der hintere Pfahl auf **Zug** beansprucht

Der **Einzelpfahl** wird Schicht für Schicht berechnet; die Gruppenkapazität baut darauf auf

Der Gruppenwirkungsgrad wird schichtweise angesetzt: Converse–Labarre im Ton, das Diagramm für die Rammung im Sand ($\eta \leq 1$) und die AASHTO-Regel für Bohrpfähle

Tragfähigkeit = **min(Einzelpfahl, Block)**; der Block ist bei eng stehenden Gruppen mit vielen Pfählen maßgebend

Setzung: elastisch (nach Vesic, mit $\sqrt{(B_g/D)}$) + Konsolidation (2:1-Spannungsausbreitung ab 2L/3); die Setzung der Gruppe wird durch den mächtigen Ton bestimmt

Lateral: Die p-Multiplikatoren nehmen von der vorderen Reihe zur hinteren ab; die Pfahlkopfplatte erfährt ein einziges Δ, die Reihen tragen ungleiche Lasten

Literatur

Das, B.M. (2016). Principles of Foundation Engineering, 8th ed. Cengage Learning, Boston.

Meyerhof, G.G. (1976). Bearing capacity and settlement of pile foundations. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 102(GT3), 197–228.

Vesic, A.S. (1977). Design of Pile Foundations. NCHRP Synthesis of Highway Practice 42, Transportation Research Board, Washington.

Coyle, H.M. and Castello, R.R. (1981). New design correlations for piles in sand. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 107(GT7), 965–986.

Mansur, C.I. and Hunter, A.H. (1970). Pile tests, Arkansas River project. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 96(SM5), 1545–1582.

Terzaghi, K., Peck, R.B. and Mesri, G. (1996). Soil Mechanics in Engineering Practice, 3rd ed. John Wiley & Sons, New York.

Vijayvergiya, V.N. and Focht, J.A. (1972). A new way to predict capacity of piles in clay. Proceedings of the 4th Offshore Technology Conference, Houston, Paper OTC 1718.

Burland, J.B. (1973). Shaft friction of piles in clay — a simple fundamental approach. Ground Engineering, 6(3), 30–42.

O’Neill, M.W. and Reese, L.C. (1999). Drilled Shafts: Construction Procedures and Design Methods. FHWA-IF-99-025, Federal Highway Administration, Washington.

Reese, L.C. and O’Neill, M.W. (1989). Drilled Shafts: Construction Procedures and Design Methods. FHWA-HI-88-042, Federal Highway Administration, Washington; der Fuß eines Bohrpfahls in Ton.

Terzaghi, K. and Peck, R.B. (1967). Soil Mechanics in Engineering Practice, 2nd ed. John Wiley & Sons, New York.

Kishida, H. and Meyerhof, G.G. (1965). Bearing capacity of pile groups under eccentric loads in sand. Proceedings of the 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Montreal, 2, 270–274.

Vesic, A.S. (1969). Experiments with instrumented pile groups in sand. Performance of Deep Foundations, ASTM STP 444, 177–222.

Jaky, J. (1944). The coefficient of earth pressure at rest. Journal of the Society of Hungarian Architects and Engineers, 7, 355–358.

American Association of State Highway and Transportation Officials (2012). AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 6th ed.: die p-Multiplikatoren von Pfahlgruppen und der Widerstand von Gruppen aus Bohrpfählen in nichtbindigem Boden.

Washington State Department of Transportation (2010). Bridge Design Memorandum No. 07-2010, Bearing resistance of shaft groups.

Brown, D.A., Morrison, C. and Reese, L.C. (1988). Lateral load behavior of pile group in sand. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 114(11), 1261–1276.

McVay, M., Casper, R. and Shang, T.-I. (1995). Lateral response of three-row groups in loose to dense sands at 3D and 5D pile spacing. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 121(5), 436–441.

Rollins, K.M., Olsen, R.J., Egbert, J.J., Jensen, D.H., Olsen, K.G. and Garrett, B.H. (2006). Pile spacing effects on lateral pile group behavior: analysis. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 132(10), 1272–1283.

Matlock, H. (1970). Correlations for design of laterally loaded piles in soft clay. Proceedings of the 2nd Offshore Technology Conference, Houston, Paper OTC 1204, 577–594.

Reese, L.C., Cox, W.R. and Koop, F.D. (1974). Analysis of laterally loaded piles in sand. Proceedings of the 6th Offshore Technology Conference, Houston, Paper OTC 2080, 473–485.

American Petroleum Institute (2000). Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms — Working Stress Design, API RP 2A-WSD, 21st ed.

GeoTerva

Geotechnische Berechnungen online

Von der Theorie zur Praxis

Die Beispielgruppe aus dieser Vorlesung in GeoTerva Schritt für Schritt berechnen: Die Zahlen sind dieselben.

Modul öffnen →

Theorieseite →

Auf dem Smartphone öffnen

Die Beispielmodule erfordern keine Registrierung.

Falls Sie sie in Ihren Vorlesungen verwenden möchten: info@geoterva.com