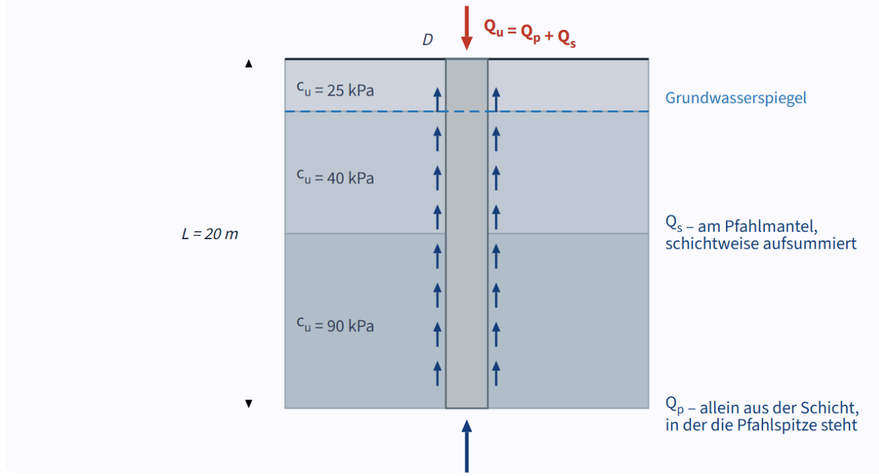
Geotechnische Vorlesung · Pfähle

Pfahltragfähigkeit in Ton

Vorlesung: undränierter Spitzenwiderstand, Mantelreibung nach dem α-, λ- und β-Verfahren, Bohrpfahl. Die Theorie jedes Verfahrens, anschließend ein Rechenbeispiel.

Meyerhof · Vesic | Verfahren α · λ · β | Bohrpfahl | Rechenbeispiele



Was lernen wir in dieser Vorlesung?

- Erklären können, warum Ton **undräniert** ($\varphi = 0$) behandelt wird und wo die wirksame Spannung dennoch ins Spiel kommt
- **Den Spitzenwiderstand** nach zwei Verfahren berechnen können: Meyerhof ($N^*_c = 9$) und Vesic (Steifigkeit)
- Die Mantelreibung mit **drei Ansätzen** berechnen können: α, λ und β
- Die besonderen Regeln des **Bohrpfahls** anwenden zu können: $\alpha^* = 0$ in beiden Längen, eigener Spitzenausdruck
- Die **zulässige Bodenpressung** erreichen und die Ergebnisse der Ansätze gemeinsam interpretieren können

VORLESUNGSABLAUF

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

1 · **Theorie**: Wie funktioniert das Verfahren, warum ist es so?

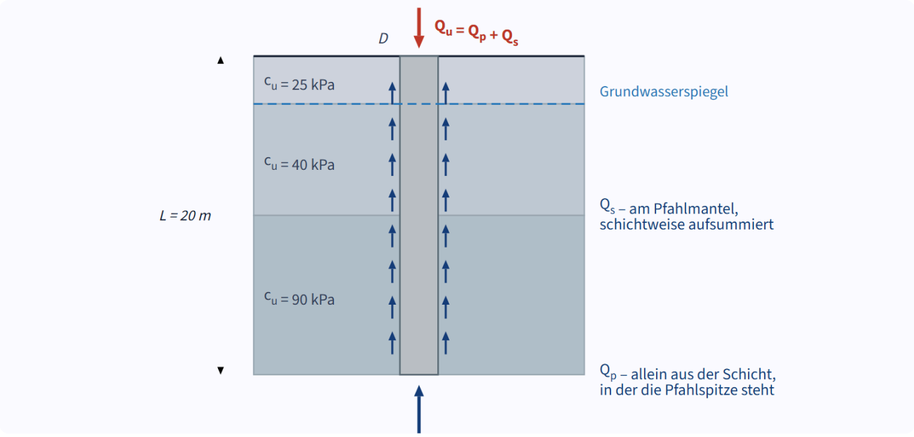
2 · **Aufgabe**: Gegeben und Gesucht

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

Die meisten Beispiele werden mit demselben Pfahl gerechnet: ein 20 m langer Rohrpfahl, der drei Tonschichten durchfährt.

Die Last wird auf zwei Wegen übertragen

THEORIE



Der Pfahl gibt seine Last **gleichzeitig über zwei Wege** an den Baugrund ab: Der Ton unter der Spitze widersteht wie ein tiefes Fundament mit **Spitzenwiderstand** (Q_p), der Ton entlang des Pfahlschafts widersteht mit **Adhäsion** (Q_s).

$$Q_u = Q_p + Q_s \qquad Q_{all} = \frac{Q_u}{FS}$$

Beim Pfahl wird der **Mantelwiderstand** schichtweise aufsummiert; der **Spitzenwiderstand** stammt nur aus der Schicht, in der sich die Pfahlspitze befindet.

In einem typischen Profil ist der Spitzenwiderstand nur ein sehr kleiner Anteil der Gesamtlast: beim Beispielpfahl etwa **ein Neuntel**; der Pfahlschaft dagegen etwa acht Neuntel. Die Unsicherheit liegt vor allem im Pfahlschaft.

In dieser Vorlesung: **Einzelpfahl**, Ton, gerammt oder gebohrt, mit konstantem Querschnitt.

Warum wird der Ton mit φ = 0 behandelt?

THEORIE

In gesättigtem Ton kommt die Belastung aus dem Bauwerk **sehr viel schneller** an, als das Wasser abdränieren kann; der Ton wird **ohne Volumenänderung** geschert. In diesem Fall ist die Festigkeit eine einzige Zahl: die **undränierte Scherfestigkeit** c_u, und der Reibungswinkel ist null.

$$\varphi = 0 \qquad \tau_f = c_u$$

Großer Unterschied zu Sand: Der Widerstand wächst nicht mehr proportional zur wirksamen Spannung. Ein Pfahl in Ton ist kein „Pfahl in Sand mit anderen Zahlen“.

Dennoch verwenden **zwei Verfahren** die wirksame Spannung: das λ-Verfahren (deren Mittelwert über die Länge) und das β-Verfahren (stützt sich vollständig darauf). Daher ist auch hier der **Grundwasserspiegel** von Bedeutung; er beeinflusst weder den Spitzenwiderstand noch das α-Verfahren.

WIRKSAME SPANNUNG (FÜR λ UND β)

$$\sigma' = \sum \gamma_i h_i \qquad \text{(über dem Grundwasserspi}$$
$$\sigma' = \sum (\gamma_{sat,i} - \gamma_w) h_i \qquad \text{(unter dem Grundwassersp}$$

γ_w = 9.81 kN/m³

Bei geschichtetem Baugrund ändert sich die Steigung von σ′ in jeder Schicht und am Grundwasserspiegel

Aufgabe

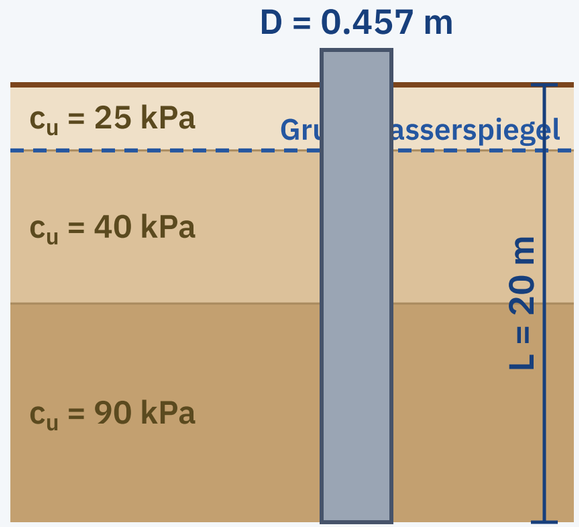
BEISPIEL

Gegeben

Ton 1 (0–3 m)	$c_u = 25\ \mathrm{kPa},\ \gamma = 16\ \mathrm{kN/m^3}$
Ton 2 (3–10 m)	$c_u = 40\ \mathrm{kPa},\ \gamma = 17\ \mathrm{kN/m^3}$
Ton 3 (10–20 m)	$c_u = 90\ \mathrm{kPa},\ \gamma = 18\ \mathrm{kN/m^3}$
Grundwasserspiegel (GWS)	**in 3.0 m Tiefe**
Pfahl	**Rohrpfahl, D = 0.457 m, L = 20 m**
Wichte des Wassers	$\gamma_w = 9.81\ \mathrm{kN/m^3}$

GESUCHT

An den Schichtgrenzen (3, 10 und 20 m) sind die **wirksame vertikale Spannung** und über die gesamte Länge die **mittlere wirksame Spannung** σ'_0 zu ermitteln.



Lösung (1/2)

LÖSUNG

1 3 m (Grundwasserspiegel) und Schichtgrenzen: unterhalb des Grundwasserspiegels $\gamma' = \gamma - \gamma_w$

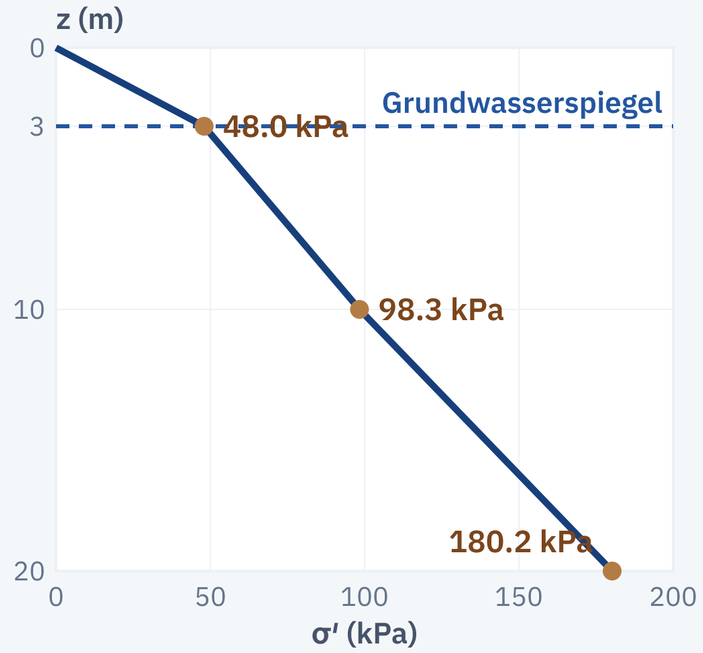
$$\sigma'(3) = 16(3) = \mathbf{48.0}\ \mathrm{kPa}$$

2 10 m Tiefe (Ende der zweiten Schicht)

$$\sigma'(10) = 48.0 + (17 - 9.81)(7) = \mathbf{98.3}\ \mathrm{kPa}$$

3 20 m Tiefe (Pfahlfuß)

$$\sigma'(20) = 98.3 + (18 - 9.81)(10) = \mathbf{180.2}\ \mathrm{kPa}$$



Lösung (2/2)

LÖSUNG

4 Fläche des σ′-Diagramms in jeder Schicht (Trapez)

$$A_1 = \tfrac{1}{2}(0 + 48.0)(3) = 72.0$$
$$A_2 = \tfrac{1}{2}(48.0 + 98.3)(7) = 512.2$$
$$A_3 = \tfrac{1}{2}(98.3 + 180.2)(10) = 1{,}392.8$$

5 Mittlere wirksame Spannung: Gesamtfläche / Länge

$$\bar{\sigma}'_o = \frac{A_1 + A_2 + A_3}{L} = \frac{1{,}977.0}{20} = \mathbf{98.85}\ \mathrm{kPa}$$

Der Mittelwert ist kleiner als die Hälfte des Wertes am Ende (98.8 < 90.1): Die Spannung wächst nicht linear mit der Tiefe, am Grundwasserspiegel ändert sich die Neigung. Dieser Wert σ̄′₀ wird im λ-Verfahren verwendet.

Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Spitzenwiderstand: Ton unterhalb der Pfahlspitze

THEORIE

In undräniertem wassergesättigtem Ton ist der Reibungswinkel null; der **netto Grenzspitzenwiderstand** des Pfahls ist das Produkt aus der undränierten Kohäsion des Tons unterhalb der Spitze und einem Beiwert:

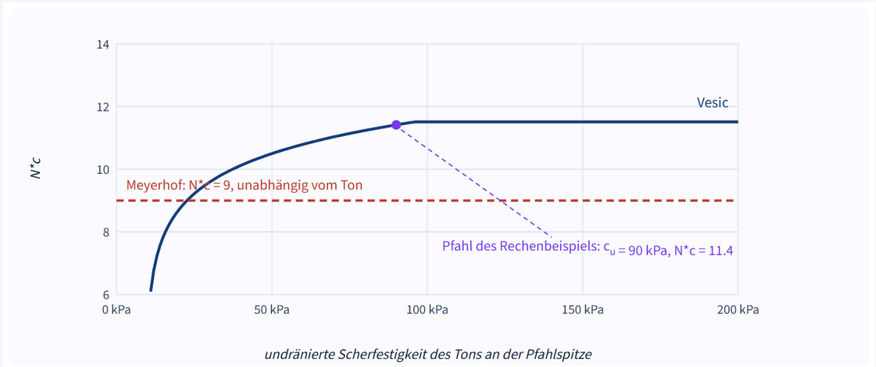
$$Q_p = A_p\, q_p = A_p\, c_u\, N_c^*$$

c_u : undränierte Scherfestigkeit des Tons **unterhalb der Spitze**

N^*_c : Tragfähigkeitsbeiwert (zwei Ansätze unten)

A_p : Fläche der Pfahlspitze

> Die Scherfestigkeit des Tons, den der Pfahl **durchquert**, wirkt nicht auf die Spitze: Diese Festigkeit gehört zum Pfahlschaft.



Zwei Ansätze: Meyerhof setzt den Beiwert mit **9** an; Vesic hingegen verknüpft den Beiwert mit der **Steifigkeit** des Tons.

Meyerhof: Konstante neun

THEORIE

Im gesättigten Ton ergibt sich unter undränierten Bedingungen die Netto-Grundbruchlast in der Form nach Meyerhof mit den **klassischen neun Beiwerten**:

$$Q_p \approx N_c^* \, c_u \, A_p = 9 \, c_u \, A_p$$

c_u : undränierte Kohäsion des Bodens unter der Pfahlspitze

Erfordert keine weiteren Eingaben; solange der Pfahl tief genug ist (einige Durchmesser genügen), ist das Ergebnis nicht von der Tiefe abhängig.

Einfachheit ist ihre Stärke; ihre Schwäche ist dieselbe: Sie berücksichtigt die Steifigkeit des Tons nicht.

Der Spitzenwiderstand ist im Verhältnis zum Pfahlschaft klein, daher beeinflusst er die Gesamttragfähigkeit nur sehr wenig; deshalb ist ein einfacher Wert oft ausreichend.

Aufgabe

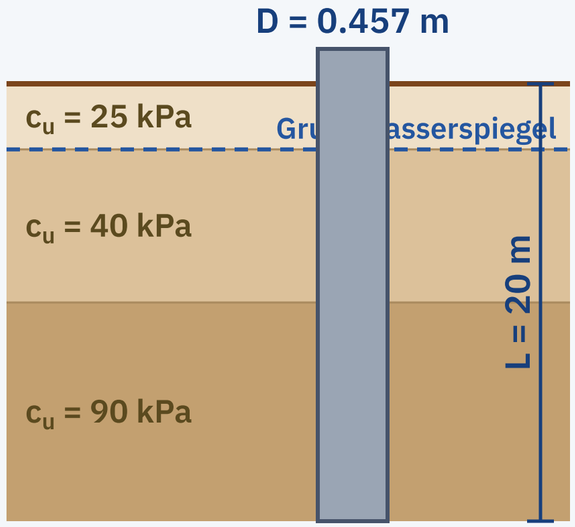
BEISPIEL

Gegeben

Pfahl	**Rohrpfahl, gerammt**
Durchmesser	**D = 0.457 m**
Länge	**L = 20 m**
Ton unter der Pfahlspitze	$c_u = 90\ \mathrm{kPa}$

GESUCHT

Den **Spitzenwiderstand** Q_p des Pfahls nach dem Verfahren von **Meyerhof** bestimmen.



Lösung

LÖSUNG

1 Fläche der Pfahlspitze

$$A_p = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi (0.457)^2}{4} = \mathbf{0.1640}\ \mathrm{m}^2$$

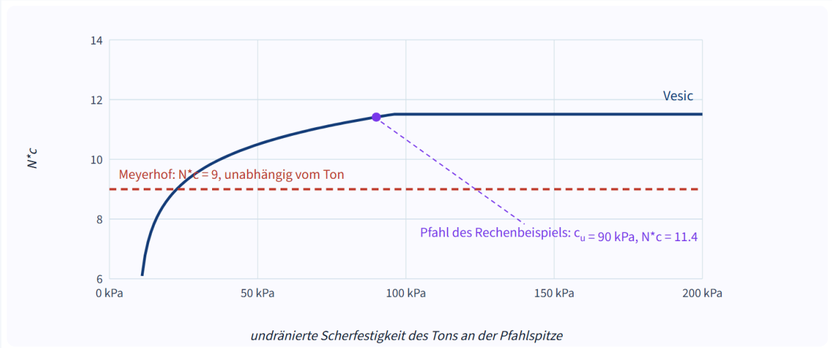
2 Einheitlicher Spitzenwiderstand (N*c = 9)

$$q_p = 9\, c_u = 9(90) = \mathbf{810}\ \mathrm{kPa}$$

3 Spitzenwiderstand

$$Q_p = A_p\, q_p = 0.1640(810) = \mathbf{132.9}\ \mathrm{kN}$$

Das Verfahren erforderte keine weiteren Eingaben: nur c_u unterhalb der Spitze. Q_p = **132.9 kN**.



Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Vesic: Die Steifigkeit geht in N*c ein

THEORIE

Vesic, aus der Theorie der **Hohlraumausweitung**: Der Beiwert für den Fall φ = 0 wird aus dem reduzierten Steifigkeitsindex des Tons abgeleitet. In gesättigtem Ton ist die Volumenänderung in der plastischen Zone null; die Reduktion entfällt und es gilt $\mathbf{I_{rr} = I_r}$:

$$N_c^* = \frac{4}{3}\left(\ln I_{rr} + 1\right) + \frac{\pi}{2} + 1 \qquad I_r = \frac{E_s}{3\,c_u}$$

EINZIGE EINGABE: c_u unterhalb der Spitze

O'Neill und Reese (1999): $I_r \approx 50$ ($c_u/p_a = 0.24$), 150 (0.48), 250 – 300 (≥ 0.96). Das Modul nähert dies wie folgt an:

$$I_r = 347\,\frac{c_u}{p_a} - 33 \;\le\; 300$$

ZUSAMMENHANG N^*_c — I_{rr}

I_{rr}	N^*_c
10	6.97
20	7.90
40	8.82
60	9.36
80	9.75
100	10.04
200	10.97
300	11.51

Mit wachsendem I_{rr} steigt der Beiwert langsam an: Logarithmus

Aufgabe

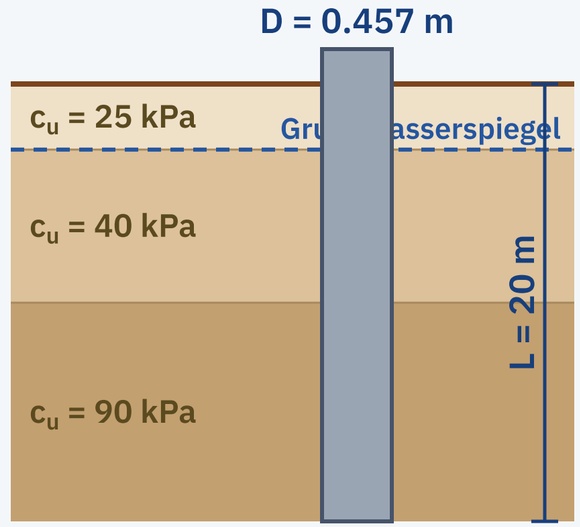
BEISPIEL

Gegeben

Pfahl	**Wie in Beispiel 2: D = 0.457 m, L = 20 m**
Ton unter der Pfahlspitze	$c_u = 90\ \mathrm{kPa}$
Atmosphärendruck	$p_a = 100\ \mathrm{kPa}$

GESUCHT

Nach dem Verfahren von **Vesic (1977)** den **Spitzenwiderstand** Q_p des Pfahls ermitteln und mit Meyerhof vergleichen.



Lösung (1/2)

LÖSUNG

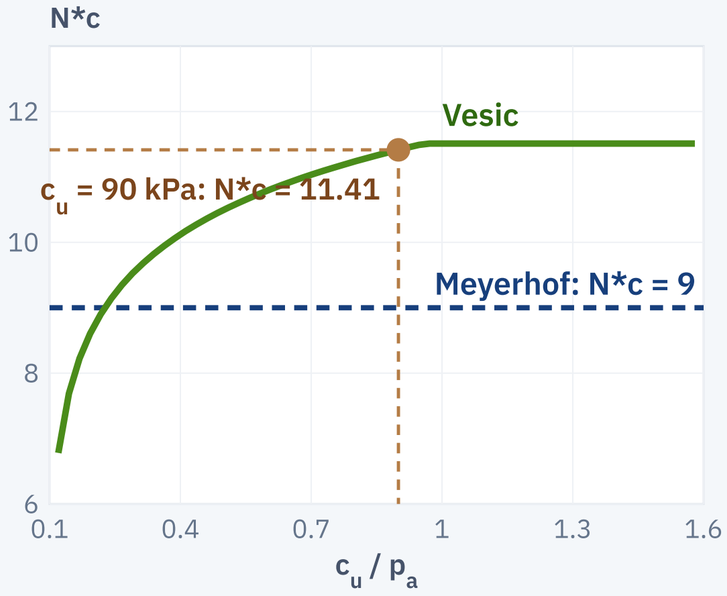
1 Steifigkeitsindex ($I_{rr} = I_r$, da im Ton keine Volumenänderung auftritt)

$$I_{rr} = I_r = 347\,\frac{90}{100} - 33 = \mathbf{279.3} \quad (\leq 300)$$

2 Beiwert N*c

$$N_c^* = \frac{4}{3}\,(\ln 279.3 + 1) + \frac{\pi}{2} + 1 = \mathbf{11.41}$$

Die grüne Kurve in der Abbildung ist der Beiwert nach Vesic: für c_u = 90 kPa **N^*_c = 11.41**, etwa 27 % mehr als 9 bei Meyerhof.



Lösung (2/2)

LÖSUNG

3 Einheitlicher Spitzenwiderstand

$$q_p = c_u\, N_c^* = 90(11.41) = \mathbf{1{,}027}\ \mathrm{kPa}$$

4 Spitzenwiderstand

$$Q_p = A_p\, q_p = 0.1640(1{,}027) = \mathbf{168.5}\ \mathrm{kN}$$

Meyerhof: 132.9 kN, **Vesic: 168.5 kN**; der Unterschied beträgt etwa 27 %. Da der Spitzenwiderstand nur einen kleinen Teil der Gesamtlast ausmacht, verändert dieser Unterschied die Gesamttragfähigkeit nur sehr wenig.

Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Mantelreibung: der maßgebende Anteil der Tragfähigkeit

THEORIE

Im Ton ist der Pfahlmantelwiderstand die Summe der Einheitsreibung über die Pfahlmantelfläche:

$$Q_s = \sum f\, p\, \Delta L$$

Viele der Größen, die die Einheitsmantelreibung bestimmen, lassen sich nicht ohne Weiteres messen; daher gibt es **drei Ansätze**:

α-Verfahren: Mantelreibung nur aus der **undränierten Scherfestigkeit** (totale Spannung, kurzzeitig)

λ-Verfahren: eine Kombination aus der **mittleren wirksamen Spannung** über die Länge und der mittleren Festigkeit; ein einziger Beiwert für den gesamten Pfahl

β-Verfahren: **wirksame Spannung** und konsolidierter Reibungswinkel (dräniert, langfristig)

Beim Beispielpfahl trägt der Pfahlschaft etwa **neun Zehntel** der Gesamtlast; auch hier liegt die Unsicherheit.

α: ein Bruchteil der Festigkeit

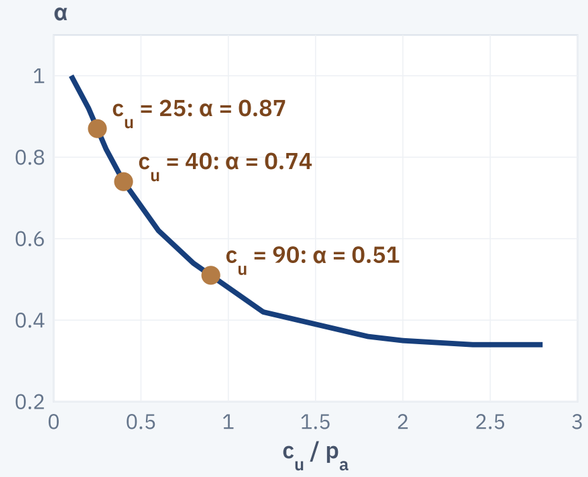
THEORIE

Die Mantelreibung je Flächeneinheit ergibt sich aus der undränierten Scherfestigkeit multipliziert mit einem **empirischen Adhäsionsfaktor α**:

$$f = \alpha\, c_u \qquad Q_s = \sum \alpha\, c_u\, p\, \Delta L$$

α : Adhäsionsfaktor; er **nimmt ab**, je fester der Ton wird (ein festerer Ton mobilisiert einen kleineren Anteil seiner Festigkeit) α ist tatsächlich neben c_u auch eine Funktion der **wirksamen Spannung** (Empfehlungen nach Sladen, Randolph–Murphy/API, NGI-99)

> Dieses Modul interpoliert die daneben dargestellte **Tabelle (c_u/p_a – α)**; der α-Wert der Schicht kann auch manuell eingegeben werden.



α-TABELLE (ZUSAMMENFASSUNG)

c_u / p_a	α

Aufgabe

BEISPIEL

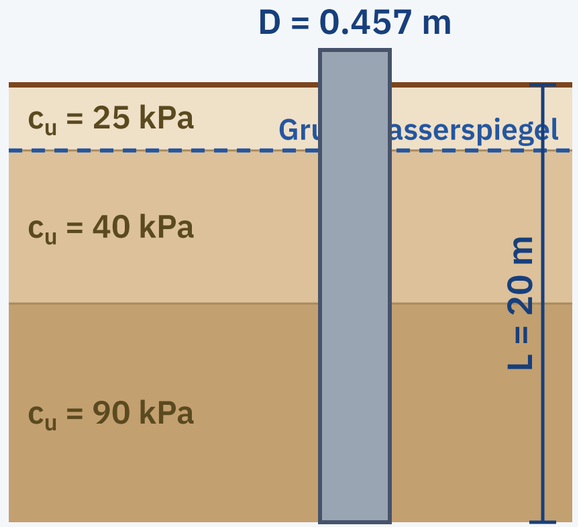
Gegeben

Ton 1 (0–3 m)	$c_u = 25\ \mathrm{kPa},\ \gamma = 16\ \mathrm{kN/m^3}$
Ton 2 (3–10 m)	$c_u = 40\ \mathrm{kPa},\ \gamma = 17\ \mathrm{kN/m^3}$
Ton 3 (10–20 m)	$c_u = 90\ \mathrm{kPa},\ \gamma = 18\ \mathrm{kN/m^3}$
Grundwasserspiegel (GWS)	**in 3.0 m Tiefe**
Pfahl	**Rohrpfahl, D = 0.457 m, L = 20 m**
Umfang	$p = \pi D = \pi(0.457) = 1.436\ \mathrm{m}$

GESUCHT

Nach dem **α-Verfahren** ist die **Mantelreibung** Q_s des Pfahls zu ermitteln.

(α durch lineare Interpolation aus der Tabelle; p_a = 100 kPa)



Lösung

LÖSUNG

1 α-Werte: für c_u/p_a = 0.25; 0.40; 0.90 aus der Tabelle

$$\alpha_1 = 0.87,\ \alpha_2 = 0.74,\ \alpha_3 = 0.51$$

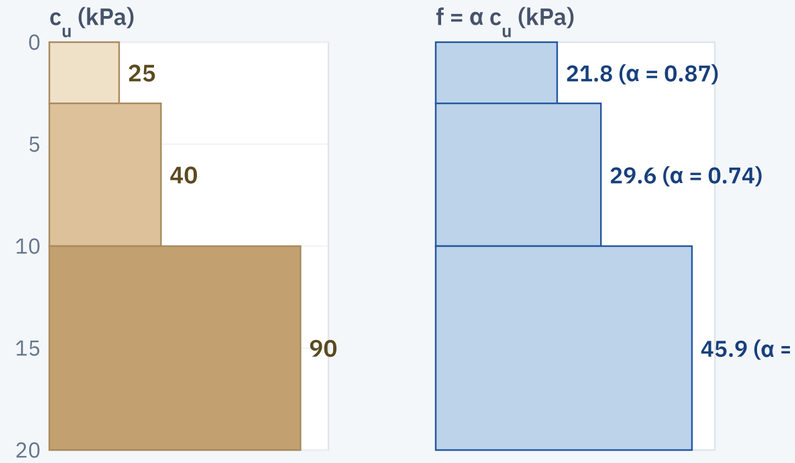
2 Einheitliche Mantelreibung in jeder Schicht f = α c_u

$$f_1 = 21.8\ ,\ f_2 = 29.6\ ,\ f_3 = 45.9\ \text{kPa}$$

3 Q_s = p Σ f H

$$Q_s = 1.436\,[21.8(3) + 29.6(7) + 45.9(10)] = \mathbf{1{,}050}\ \text{kN}$$

Beiträge: 94 + 297 + 659 = **1,050 kN**. Der stärkste Ton liefert das größte f, jedoch mit einem kleineren Anteil von c_u (α = 0.51).



Lösung in GeoTerva prüfen ↗

λ: ein einziger Mittelwert für die gesamte Länge

THEORIE

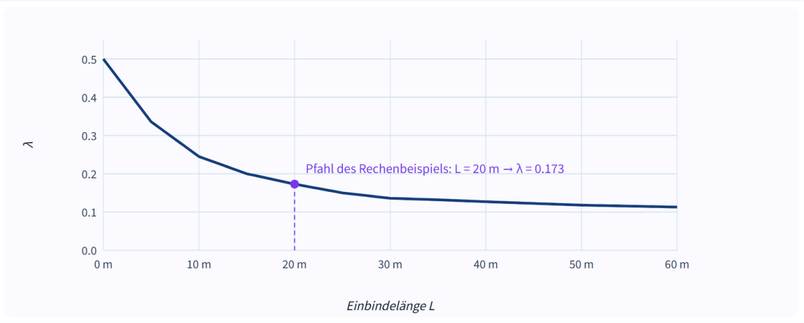
Vijayvergiya und Focht (1972): Der vom Pfahl **verdrängte Boden** erzeugt in jeder Tiefe einen passiven Erddruck, und die mittlere Einheitsmantelreibung folgt daraus:

$$f_{av} = \lambda \left(\bar{\sigma}'_o + 2\,\bar{c}_u \right) \qquad Q_s = p\,L\,f_{av}$$

$\bar{\sigma}'_o$: **mittlere wirksame vertikale Spannung** über die Einbindelänge (Fläche des σ′-Diagramms / L)

$\bar{c}_u$: mittlere undränierte Scherfestigkeit, **dickengewichtet**: $(c_{u1}L_1 + c_{u2}L_2 + \ldots)/L$

λ : Beiwert in Abhängigkeit von der Pfahl**länge** (seitlich)



λ — EINBINDELÄNGE

L (m)	λ
0	0.500
5	0.336
10	0.245
15	0.200
20	0.173
30	0.136
40	0.127

Aufgabe

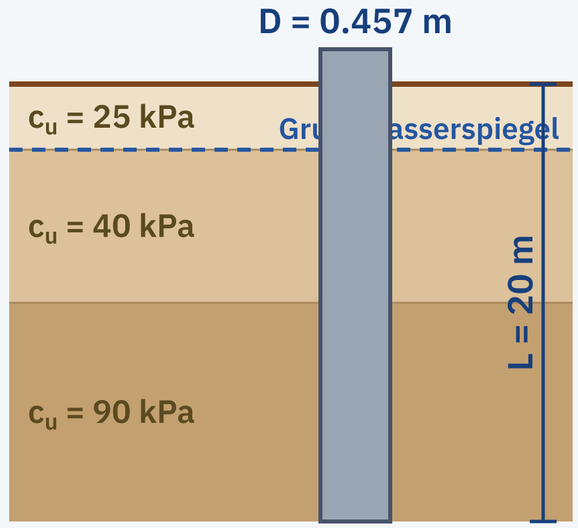
BEISPIEL

Gegeben

Ton 1 (0–3 m)	$c_u = 25\ \mathrm{kPa},\ \gamma = 16\ \mathrm{kN/m^3}$
Ton 2 (3–10 m)	$c_u = 40\ \mathrm{kPa},\ \gamma = 17\ \mathrm{kN/m^3}$
Ton 3 (10–20 m)	$c_u = 90\ \mathrm{kPa},\ \gamma = 18\ \mathrm{kN/m^3}$
Grundwasserspiegel (GWS)	**in 3.0 m Tiefe**
Pfahl	**Rohrpfahl, D = 0.457 m, L = 20 m**
Mittlere wirksame Spannung	$\bar{\sigma}'_o = 98.85\ \mathrm{kPa}$ **(Beispiel 1)**

GESUCHT

Mit der **λ-Methode** die **Mantelreibung** Q_S des Pfahls ermitteln.



Lösung

LÖSUNG

1 Mittlere Festigkeit (dicken gewichtet)

$$\bar{c}_u = \frac{25(3) + 40(7) + 90(10)}{20} = \mathbf{62.75}\ \text{kPa}$$

2 λ (L = 20 m, aus der Tabelle) und die mittlere Einheitsmantelreibung

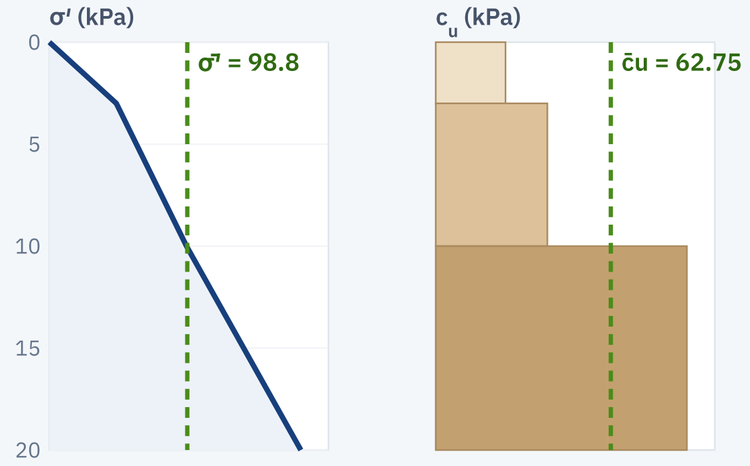
$$\lambda = 0.173$$

$$f_{av} = \lambda(\bar{\sigma}'_o + 2\bar{c}_u) = 0.173\,(98.85 + 2(62.75)) = \mathbf{38.81}\ \text{kPa}$$

3 Mantelreibung

$$Q_s = p\,L\,f_{av} = 1.436(20)(38.81) = \mathbf{1{,}114}\ \text{kN}$$

Das λ-Verfahren kombiniert die beiden Mittelwerte: **1,114 kN**. In der Abbildung ist die Fläche links σ̄′o und die Linie rechts c̄u.



Lösung in GeoTerva prüfen ↗

β: wirksame Spannung und aufgewühlte Kruste

THEORIE

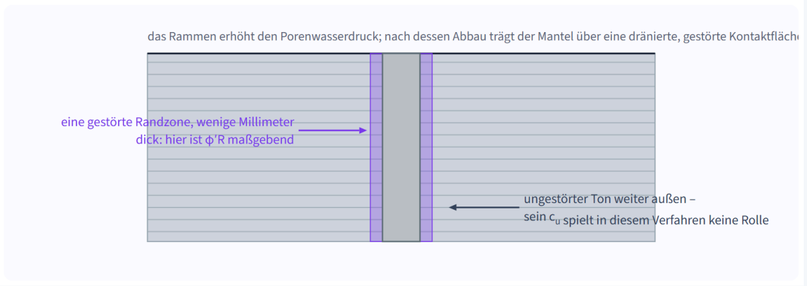
Effektivspannungsansatz nach Burland (mit der Überkonsolidierungskorrektur nach Meyerhof): Er betrachtet die undränierte Scherfestigkeit überhaupt nicht; er wird aus der **vertikalen wirksamen Spannung** und dem dränierten Reibungswinkel des **aufgewühlten** Tons (c′ = 0) abgeleitet:

$$f = \beta\,\sigma'(z) \qquad \beta = K\tan\delta,\quad \delta = \varphi'_R$$

$$\beta = (1-\sin\varphi'_R)\tan\varphi'_R\sqrt{OCR}$$

K : Beiwert des seitlichen Erddrucks; konservativ wird **Erdruhedruck** angesetzt, bei überkonsolidiertem Ton wächst er mit √OCR

Für OCR = 1 geht der Ausdruck von selbst in die normalkonsolidierte Form über



φ'_R und OCR werden **eingegeben** und nicht über eine Korrelation aus dem Baugrund abgelesen (im Modul wird mit φ'_R = 30°, OCR = 1 geöffnet).

f nimmt zusammen mit σ′(z) innerhalb der Schicht **mit der Tiefe zu**; an der Grenze, an der sich β ändert, tritt ein Sprung auf.

Aufgabe

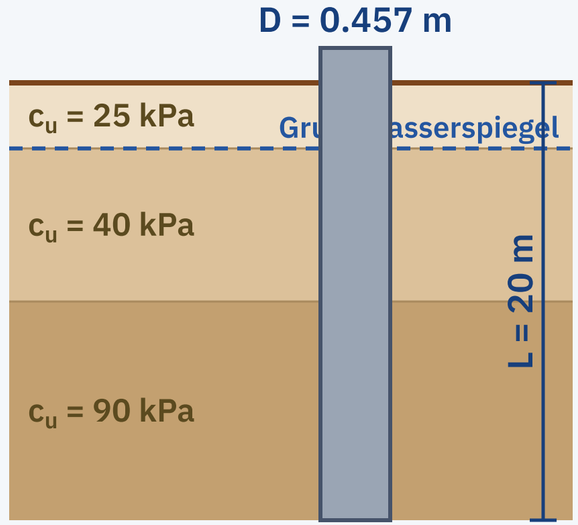
BEISPIEL

Gegeben

Ton 1 (0–3 m)	$c_u = 25\ \mathrm{kPa},\ \gamma = 16\ \mathrm{kN/m^3}$
Ton 2 (3–10 m)	$c_u = 40\ \mathrm{kPa},\ \gamma = 17\ \mathrm{kN/m^3}$
Ton 3 (10–20 m)	$c_u = 90\ \mathrm{kPa},\ \gamma = 18\ \mathrm{kN/m^3}$
Grundwasserspiegel (GWS)	**in 3.0 m Tiefe**
Reibungswinkel des umgelagerten Bodens	$\varphi'_R = 30°$ **(drei Schichten)**
Überkonsolidierungsverhältnis	$OCR = 1;\ 1;\ 2$ **(Schicht 3 überkonsolidiert)**
Pfahl	**D = 0.457 m, L = 20 m**

GESUCHT

Mit der **β-Methode** ist die **Mantelreibung** Q_S des Pfahls zu ermitteln. (Die mittleren σ′-Werte der Schichten stammen aus den Flächen von Beispiel 1.)



Lösung (1/2)

LÖSUNG

1 Beiwerte β

$$\beta_{1,2} = (1 - \sin 30^\circ)\tan 30^\circ = \mathbf{0.289} \qquad \beta_3 = 0.289\sqrt{2} = \mathbf{0.408}$$

2 Mittlere wirksame Spannungen der Schicht (Fläche / Dicke)

$$\bar{\sigma}'_1 = \frac{72}{3} = 24.0, \quad \bar{\sigma}'_2 = \frac{512.2}{7} = 73.2, \quad \bar{\sigma}'_3 = \frac{1{,}392.8}{10} = 139.3\ \text{kPa}$$

Lösung (2/2)

LÖSUNG

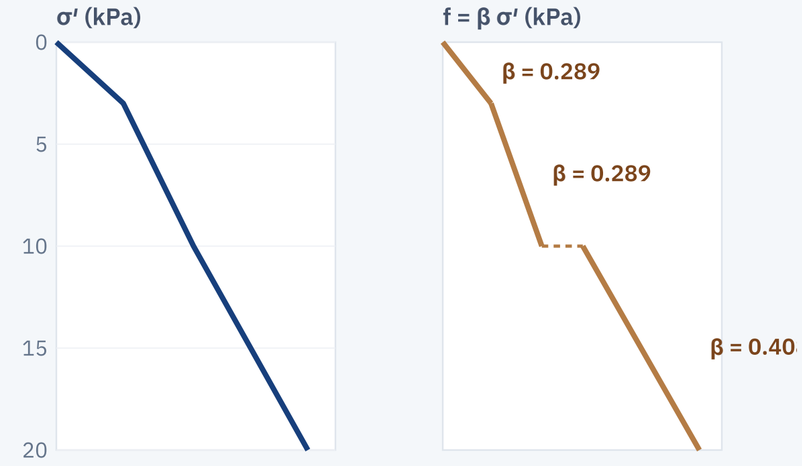
3 Mittlere Mantelreibung der Schicht $\bar{f} = \beta\,\bar{\sigma}'$

$$\bar{f}_1 = 6.93, \quad \bar{f}_2 = 21.12, \quad \bar{f}_3 = 56.86\ \text{kPa}$$

4 Mantelreibung $Q_s = p\,\Sigma\,\bar{f}\,H$

$$Q_s = 1.436\,[6.93(3) + 21.12(7) + 56.86(10)] = \mathbf{1{,}058}\ \text{kN}$$

Der Mittelwert ist das **echte Integral** der Spannung in der Schicht (nicht der Mittelwert der beiden Enden): Schneidet der Grundwasserspiegel die Schicht, können beide um mehr als 10 % voneinander abweichen. Das Ergebnis ist **1,058 kN**.



Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Drei Ansätze, derselbe Pfahl

THEORIE



In diesem Profil liegen die drei Werte **innerhalb weniger Prozent** beieinander. **Grundsätzlich** stimmen sie jedoch nicht überein; die Übereinstimmung ist eine Eigenschaft dieses Profils.

Bei einem sehr **langen** Pfahl nimmt λ aufgrund des Beiwerts ab

In **überkonsolidiertem** Ton steigt β mit √OCR

In **weichem** normalkonsolidiertem Ton steigt α gegen die volle Festigkeit des Bodens an

Eine ehrliche Einschätzung: Im Ton ist der Pfahlschaftwiderstand mit einer Unsicherheit von etwa **einem Fünftel** des berechneten Werts behaftet. Bei großen Projekten lohnt sich deshalb eine **Pfahlprobebelastung** trotz ihrer Kosten.

Bohrpfähle haben ihre eigenen Regeln

THEORIE

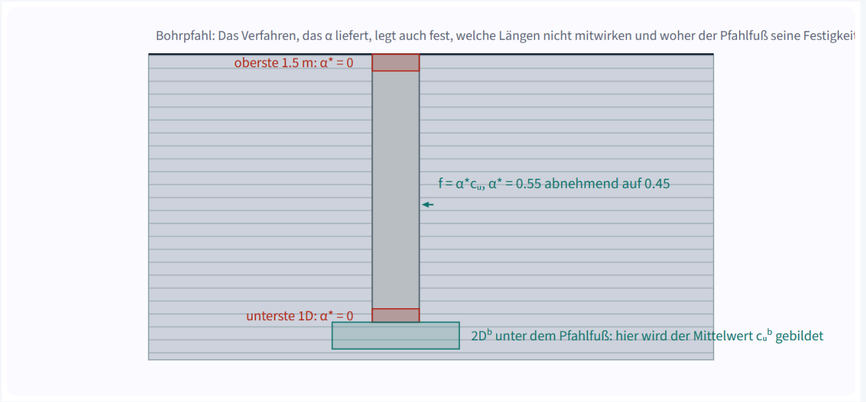
Das Loch wird gebohrt und Beton eingebracht: der Boden wird nicht verdrängt; der Ton an der Bohrlochwand zieht Wasser und **erweicht**, unter der Sohle sammelt sich Bohrklein, und zur Mobilisierung des Spitzenwiderstands ist eine **größere Setzung** erforderlich. Das Verfahren von O'Neill und Reese verändert beide Hälften.

$$\alpha^* = 0 \;\; (\text{oberer } 1.5\ \text{m und darunter } 1D) \qquad \alpha^* = 0.55 \;\; (\text{an anderer Stel}$$

α* = 0.55 ($c_u/p_a \le 1.5$), abnehmend auf 0.45 bei 2.5

Die oberen 1.5 m sind der am stärksten gestörte Boden, der am ehesten zum Schrumpfen vom Pfahlschaft weg neigt; die unteren einem Durchmesser entsprechen der Länge, über die der Pfahlfuß den Boden bereits in Bewegung setzt

Die Schichtdicken ändern sich nicht: Tiefe und σ′ bleiben wie im Profil, nur die mantelreibungstragende Länge ändert sich



$$q_p = \min\left[6c_{ub}\left(1 + 0.2\frac{L}{D_b}\right),\ 9c_{ub},\ 40p_a\right]$$

c_{ub}: mittleres c_u in der **$2D_b$**-Zone unter der Sohle. Ist $D_b > 1.91$ m, so wird q_p mit einem Faktor $F_r \le 1$ abgemindert.

Aufgabe

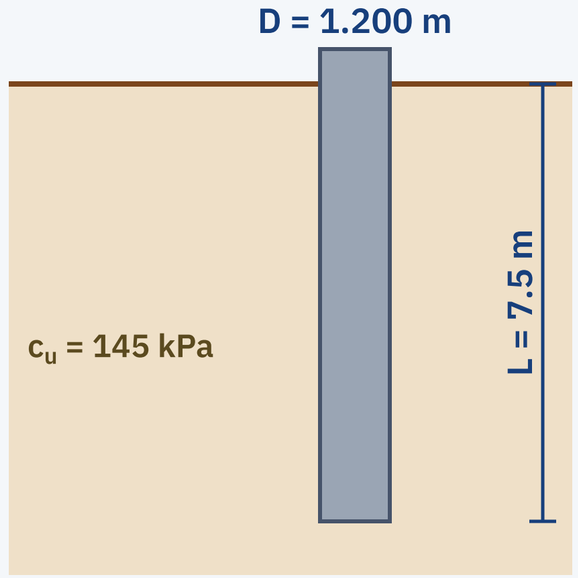
BEISPIEL

Gegeben

Pfahl	**Bohrpfahl, kreisförmiger Querschnitt**
Durchmesser und Länge	**$D = D_b = 1.2$ m, $L = 7.5$ m**
Ton (homogen)	$c_u = 145\ \mathrm{kPa}$, $\gamma = 18\ \mathrm{kN/m^3}$
Grundwasser	**keine**
Sicherheitsfaktor	**FS = 3**

GESUCHT

Ermitteln Sie den **Spitzenwiderstand**, die **Mantelreibung** und die **zulässige Tragfähigkeit** des Bohrpfahls.



Lösung (1/2)

LÖSUNG

1 Mittlere Festigkeit in der Zone $2D_b$ unterhalb der Sohle und der Sohlausdruck

$$c_{ub} = 145\ \text{kPa} \qquad 6c_{ub}\left(1 + 0.2\frac{7.5}{1.2}\right) = 1{,}957.5\ ; \quad 9c_{ub} = 1{,}305\ ; \quad 40p_a = 4\,000$$

2 q_p = der kleinste der drei Werte; da $D_b = 1.2\ \text{m} \le 1.91\ \text{m}$, ist $F_r = 1$

$$q_p = \min(1{,}957.5;\ 1{,}305;\ 4\,000) = \mathbf{1{,}305}\ \text{kPa}$$

3 Grundfläche und Spitzenwiderstand

$$A_b = \frac{\pi(1.2)^2}{4} = 1.131\ \text{m}^2 \qquad Q_p = A_b\, q_p = \mathbf{1{,}476}\ \text{kN}$$

$9c_{ub}$ maßgebend: Die Formel $6c_{ub}(1 + 0.2L/D_b)$ ergibt einen größeren Wert, jedoch greift die Obergrenze $9c_u$. Q_p = **1,476 kN**.

Lösung (2/2)

LÖSUNG

4 α* und die mantelreibungs-tragende Länge (oben werden 1.5 m und unten 1D vernachlässigt)

$$\alpha^* = 0.55 \quad (c_u/p_a = 1.45 \le 1.5)$$

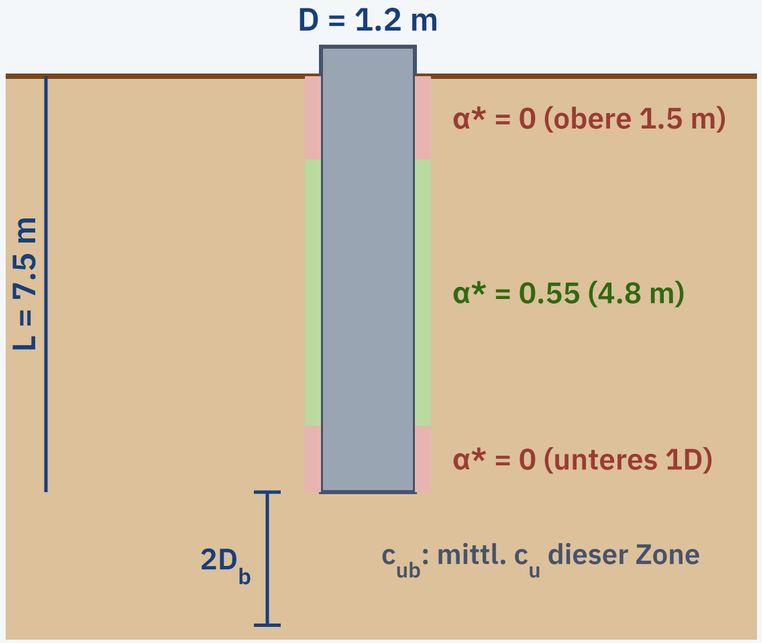
$$L_{eff} = 7.5 - 1.5 - 1.2 = \mathbf{4.8}\ \text{m}$$

5 Mantelreibung

$$Q_s = \pi D\, \alpha^* c_u\, L_{eff} = \pi(1.2)(0.55)(145)(4.8) = \mathbf{1{,}443}\ \text{kN}$$

6 Grundbruchspannung und zulässige Bodenpressung

$$Q_u = 1{,}476 + 1{,}443 = 2{,}919\ \text{kN} \qquad Q_{all} = \frac{Q_u}{3} = \mathbf{973}\ \text{kN}$$



Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Gesamt mit einem einzigen Sicherheitsfaktor

THEORIE

Die Grenztragfähigkeit ist die Summe der beiden Komponenten; die zulässige Tragfähigkeit ergibt sich durch Anwendung **eines einzigen Sicherheitsfaktors auf die gesamte Summe**:

$$Q_{all} = \frac{Q_p + Q_s}{FS}$$

Üblicher **FS = 2.5 – 4** für einen Einzelpfahl

Oberes Ende: wenn der Baugrund nur aus wenigen Bohrungen bekannt ist, wenn der Ton **steif und klüftig** ist oder wenn eine **Probebelastung** nicht geplant ist

Die Verfahren für Spitzenwiderstand und Mantelreibung können **unabhängig** voneinander gewählt werden; die Ergebnisse werden gemeinsam interpretiert

Aufgabe

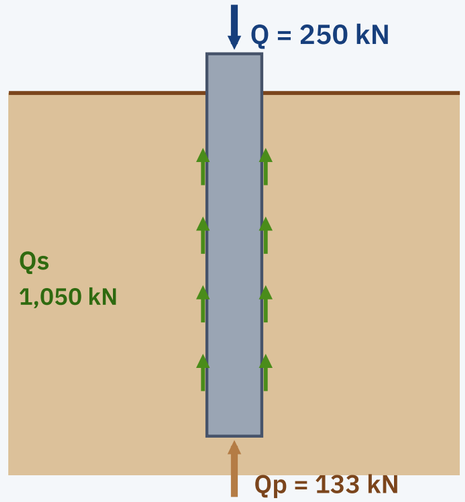
BEISPIEL

Gegeben

Spitzenwiderstand	**Q_p = 132.9 kN (Meyerhof, Beispiel 2)**
Mantelreibung	**Q_s = 1,050 kN (α-Verfahren, Beispiel 4)**
Sicherheitsfaktor	**FS = 4**
Arbeitslast auf dem Pfahl	**Q = 250 kN**

GESUCHT

Wie groß ist die **zulässige Tragfähigkeit** Q_{all} des Pfahls? Ist die Gebrauchslast **ausreichend**?



Lösung

LÖSUNG

1 Grundbruchspannung

$$Q_u = Q_p + Q_s = 132.9 + 1{,}050.1 = \mathbf{1{,}183}\ \text{kN}$$

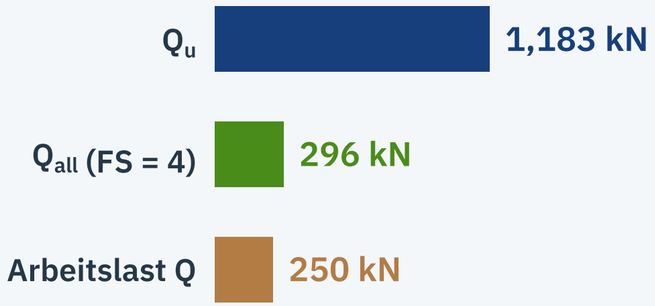
2 Zulässige Bodenpressung

$$Q_{all} = \frac{Q_u}{FS} = \frac{1{,}183}{4} = \mathbf{296}\ \text{kN}$$

3 Nachweis

$$Q = 250\ \text{kN} \ \leq \ Q_{all} = 296\ \text{kN} \ \Rightarrow \ \text{ausreichend}$$

Ausnutzungsgrad Q / Q_{all} = 250 / 296 = **0.85**. Der Pfahlschaft trägt etwa 89 % der Summe.



Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Derselbe Pfahl: Q_u und Q_{all} (FS = 4)

THEORIE

Q_u · Q_{all} (kN)

	Q_s: α 1,050 kN	Q_s: λ 1,114 kN	Q_s: β 1,058 kN
Q_p: Meyerhof 132.9 kN	1,183 · **296**	1,247 · **312**	1,191 · **298**
Q_p: Vesic 168.5 kN	1,219 · **305**	1,283 · **321**	1,227 · **307**

Über die sechs Kombinationen liegt Q_u nur zwischen **1,183 – 1,283 kN**: Da die Spitze klein ist, beeinflusst die Wahl die Summe nur wenig; der eigentliche Unterschied liegt in der Mantelreibung.

Die Bandbreite **interpretieren**, nicht auf eine Einzelzahl verlassen

Die Mantelreibung beträgt **etwa neun Zehntel** der Gesamtsumme

Bei großen Bauwerken mit einer **Pfahlprobebelastung** nachweisen

Zusammenfassung

Die wichtigsten Punkte

Ton ist **undräniert** ($\varphi = 0$, $\tau_f = c_u$); der Widerstand ist nicht proportional zur wirksamen Spannung

Spitze: Meyerhof $N^*_c = 9$; Vesic $N^*_c = f(I_{rr})$, $I_r \approx 347 c_u / p_a - 33$; der Spitzenwiderstand ist ein kleiner Teil der Gesamtlast

α: $f = \alpha c_u$ · **λ**: $f_{av} = \lambda(\bar{\sigma'} + 2\bar{c}_u)$ · **β**: $f = \beta\sigma'$, $\beta = (1 - \sin\varphi'_R)\tan\varphi'_R\sqrt{OCR}$

Bohrpfahl: $\alpha^* = 0$ (oben 1.5 m, unten 1D), $q_p = \min[6c_{ub}(1 + 0.2L/D_b), 9c_{ub}, 40p_a]$

$Q_{all} = (Q_p + Q_s)/FS$, $FS = 2.5 - 4$

Literatur

Das, B.M. (2016). Principles of Foundation Engineering, 8th ed. Cengage Learning; diese Seite folgt diesem Werk.

Terzaghi, K., Peck, R.B. and Mesri, G. (1996). Soil Mechanics in Engineering Practice, 3rd ed. Wiley — die α-Werte der Tabelle 2.

O'Neill, M.W. and Reese, L.C. (1999). Drilled Shafts: Construction Procedures and Design Methods. FHWA-IF-99-025 – α für Bohrpfähle und der Steifigkeitsindex eines Tons.

Reese, L.C. and O'Neill, M.W. (1989). Drilled Shafts: Construction Procedures and Design Methods. FHWA – der Ansatz für den Pfahlfuß eines Bohrpfahls in Ton.

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

Meyerhof, G.G. (1976). Bearing capacity and settlement of pile foundations. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 102(GT3), 197–228 – die √OCR-Anpassung des β-Verfahrens.

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

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

HINWEIS

Die Abbildungen in dieser Präsentation sind der Theorieseite von GeoTerva entnommen; alle Rechenbeispiele wurden mit der moduleigenen Berechnungsbibliothek erzeugt, das Modul liefert dieselben Werte.

GeoTerva

Geotechnische Berechnungen online

Von der Theorie zur Praxis

Den Beispielpfahl aus dieser Präsentation 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