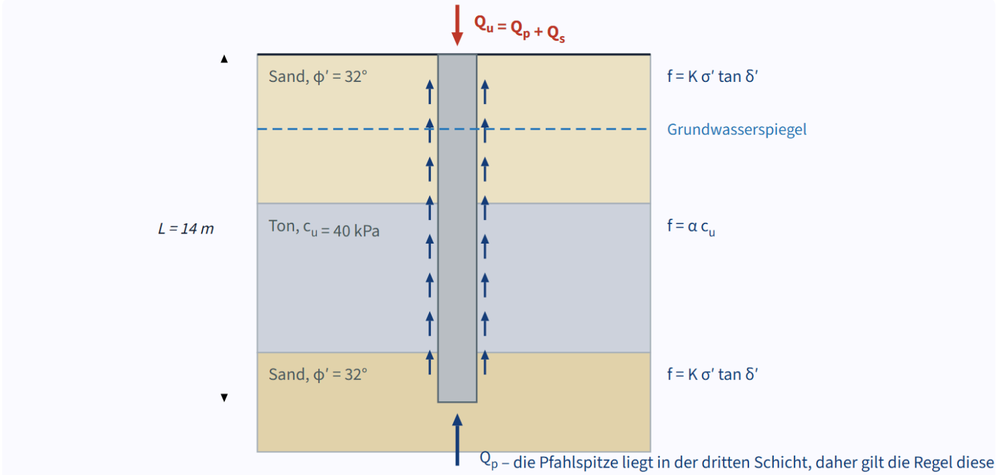
GeoTerva

Geotechnische Vorlesung · Pfähle

Pfahltragfähigkeit in geschichtetem Baugrund

Vorlesung: Tragfähigkeit eines Pfahls, der Sand- und Tonschichten durchquert. Welche Regel wo gilt, wie sich die wirksame Spannung über die Schichten aufbaut; zu jedem Thema ein Rechenbeispiel.

- Schichtweise Berechnung
- Spitze: Schicht an der Spitze
- Regeln für Sand + Ton
- Bohrpfahl
- Rechenbeispiele



Basiert auf der Theorieseite von GeoTerva · geoterva.com

Was lernen wir in dieser Vorlesung?

Die wirksame Spannung **Schicht für Schicht zu akkumulieren**; zu erkennen, wie eine Tonschicht allein durch ihr Gewicht den darunterliegenden Sand beeinflusst, auch wenn ihre eigene Festigkeit nicht in den Sand hineinreicht

Zu wissen, dass der **Spitzenwiderstand** nur von der Schicht abhängt, in der sich die Pfahlspitze befindet, und nach der Regel dieser Schicht berechnet wird

Die Anwendung der K–δ-Regel **in der Sandschicht** (die kritische Tiefe $L' = 15D$ gilt für den gesamten Pfahl) sowie der α-, λ- und β-Regel **in der Tonschicht**

Wie man den **Pfahlmantelwiderstand über die Schichten summiert**; wie die Sprünge der Mantelreibung an den Schichtgrenzen und der Einfluss der Pfahllänge zu deuten sind

Zu erfassen, dass **beim Bohrpfahl** das α*-Fenster und c_{ub} aus mehreren Schichten stammen können

VORLESUNGSABLAUF

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

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

2 · **Aufgabe**: Gegeben und Gesucht

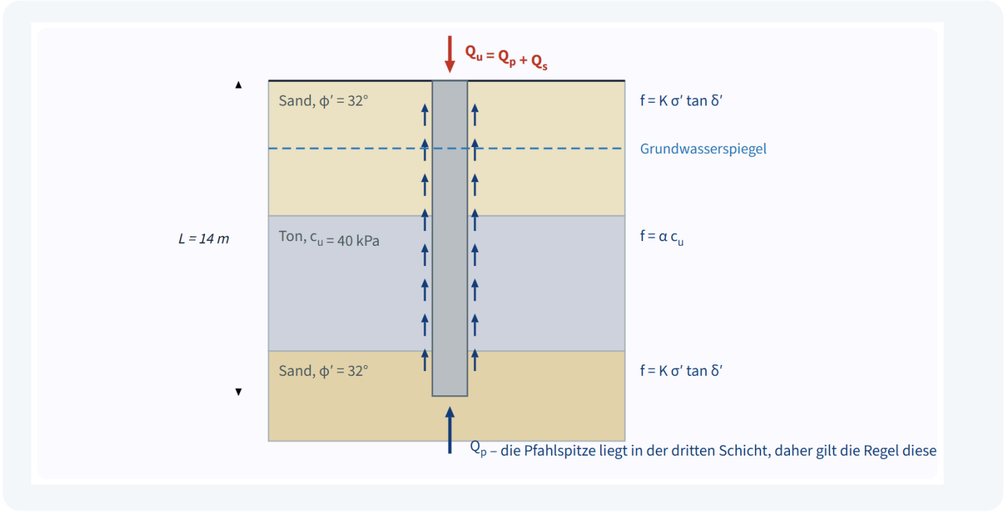
3 · **Lösung**: Schritt für Schritt, mit Zahlen

Die meisten Beispiele werden mit demselben Pfahl gerechnet: ein Pfahl mit 0.4 m Durchmesser, 14 m lang, durch ein Profil Sand–Ton–Sand.

Diese Vorlesung baut auf den Vorlesungen **Pfähle in Sand** und **Pfähle in Ton** auf: Die Regeln wurden dort behandelt; hier wird betrachtet, welche wo gilt.

Jede Schicht antwortet nach ihrer eigenen Regel

THEORIE



Ein Pfahl gelangt selten in einen einzigen Boden. Das Profil besteht aus **mehreren Schichten**; jede wird als Sand oder Ton definiert, und es wird **die Regel des jeweiligen Materials** angewendet. Die Tragfähigkeit besteht wieder aus zwei Anteilen, wird aber nicht mehr aus einer einzigen Formel abgelesen, sondern **Stück für Stück aufgebaut**:

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

Keine neue Theorie: Sandregeln gehören zum Sand-Modul, Tonregeln zum Ton-Modul.

Neu ist das **Berechnungsschema**: welche Regel in welchem Abschnitt des Pfahlschafts gilt und wie sich die wirksame Spannung aus den darüberliegenden Schichten aufbaut.

Der Spitzenwiderstand stammt aus **einer einzigen Schicht**, die Mantelreibung aus **der Summe aller Schichten**.

Spannung stetig, Mantelreibung stufenförmig

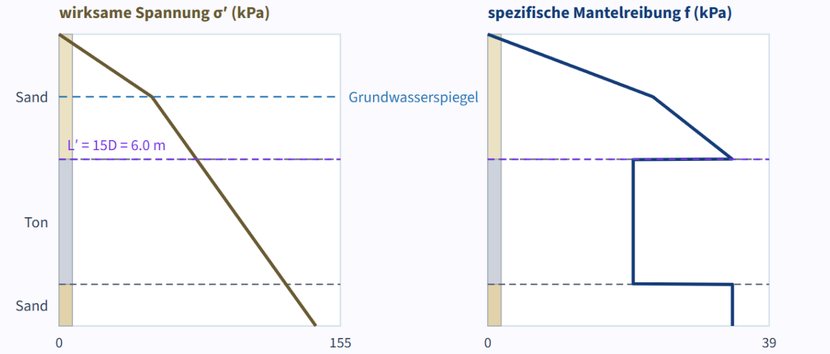
THEORIE

Die wirksame vertikale Spannung ist das Bindeglied zwischen den Schichten: **das Gewicht jeder darüberliegenden Schicht** summiert sich auf; oberhalb des Grundwasserspiegels wird die feuchte Wichte verwendet, darunter die Wichte unter Auftrieb.

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

Die Tonschicht liefert dem Sand keine eigene Festigkeit; aber sie verändert **durch ihr Gewicht** den Widerstand, den der darunterliegende Sand bietet.

Die Mantelreibung hingegen ist nicht stetig: an der Grenze Sand–Ton **ändert sich die Regel selbst**, und die Einheitsmantelreibung kann einen großen Sprung aufweisen. Dieser Sprung ist kein Fehler der Berechnung, sondern die **Signatur** des geschichteten Profils.



Die Spannung verläuft stetig über die Schichten; die Mantelreibung springt an jeder Grenze, weil dort die Regel wechselt.

Aufgabe

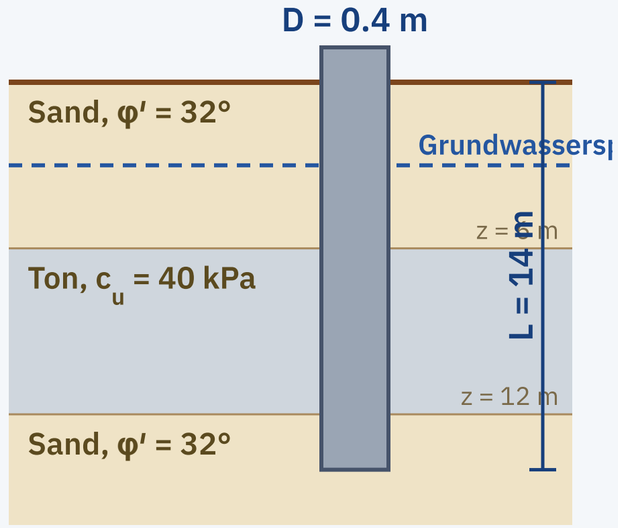
BEISPIEL

Gegeben

Sand 1 (0–6 m)	$\varphi' = 32^\circ$
Ton (6–12 m)	$c_u = 40\ \mathrm{kPa}$
Sand 2 (12–16 m)	$\varphi' = 32^\circ$
Wichte	$\gamma = 17,\ \gamma_{sat} = 18\ \mathrm{kN/m^3}$ **(drei Schichten)**
Grundwasser	**in 3.0 m Tiefe**
Pfahl	**Rammpfahl, D = 0.4 m, L = 14 m**
Wichte des Wassers	$\gamma_w = 9.81\ \mathrm{kN/m^3}$

GESUCHT

Die wirksame vertikale Spannung in den Tiefen **3, 6, 12 und 14 m** ermitteln (14 m = Pfahlspitze).



Lösung (1/2)

LÖSUNG

1 Bis zum Grundwasserspiegel (3 m): gesamte Schicht feucht, γ = 17

$$\sigma'(3) = 17(3) = \mathbf{51.0}\ \text{kPa}$$

2 6 m (Grenze Sand–Ton): unterhalb des Grundwasserspiegels $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w = 18 - 9.81$

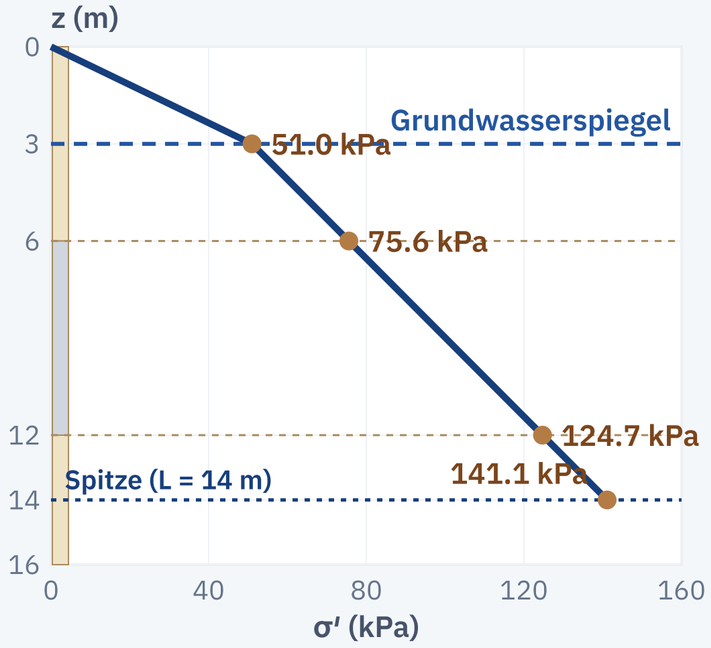
$$\sigma'(6) = 51.0 + (18 - 9.81)(3) = \mathbf{75.6}\ \text{kPa}$$

3 12 m (Ton–Sand-Grenze): die γ_{sat} des Tons ist ebenfalls 18

$$\sigma'(12) = 75.6 + (18 - 9.81)(6) = \mathbf{124.7}\ \text{kPa}$$

4 14 m (Pfahlspitze)

$$\sigma'(14) = 124.7 + (18 - 9.81)(2) = \mathbf{141.1}\ \text{kPa}$$



Lösung (2/2)

LÖSUNG

5 In jedem Abschnitt die Fläche des σ′-Diagramms (Trapez); diese ergeben im Pfahlschaft die mittlere Spannung

$$A_{0-6} = \tfrac{1}{2}(0 + 51.0)(3) + \tfrac{1}{2}(51.0 + 75.6)(3) = 266.4$$
$$A_{6-12} = \tfrac{1}{2}(75.6 + 124.7)(6) = 600.8$$
$$A_{12-14} = \tfrac{1}{2}(124.7 + 141.1)(2) = 265.8$$

σ′ ist **über die Schichten hinweg stetig**: an der Grenze Sand–Ton tritt kein Sprung auf; die Neigung ändert sich nur am Grundwasserspiegel und dort, wo sich γ′ ändert. Diese drei Bereiche werden in Beispiel 4 und 5 als mittlere σ̄′ verwendet.

Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Der Spitzenwiderstand wird nur aus der eigenen Schicht ermittelt

THEORIE

Der Spitzenwiderstand gehört **einer einzelnen Schicht** an: der Schicht, in der sich die Pfahlspitze befindet. Er wird nach dem Material dieser Schicht berechnet; die darüberliegenden Schichten wirken nur über σ′ (**bei einer Sandspitze**) und **haben bei einer Tonspitze keinen Einfluss**.

$$\text{Sand:}\quad Q_p = A_p\, q'\, N_q^* \le A_p\, q_l,\quad q_l = 0.5\, p_a N_q^* \tan\varphi'$$

$$\text{Ton:}\quad Q_p = A_p\, c_u\, N_c^*,\quad N_c^* = 9\ \text{(Meyerhof)}$$

Ein Pfahl, dessen Spitze auf eine **exakte Schichtgrenze** fällt, gilt als auf der **darunter** liegenden Schicht aufstehend.

Coyle–Castello ist eine **Sand**-Korrelation; an einer Tonpfahlspitze hat sie keine Bedeutung, und auch wenn sie gewählt wird, bleibt die Tonregel gültig.



An der Sandspitze sind σ′ und N^*_q maßgebend; an der Tonspitze allein der c_u-Wert dieser Schicht.

Aufgabe

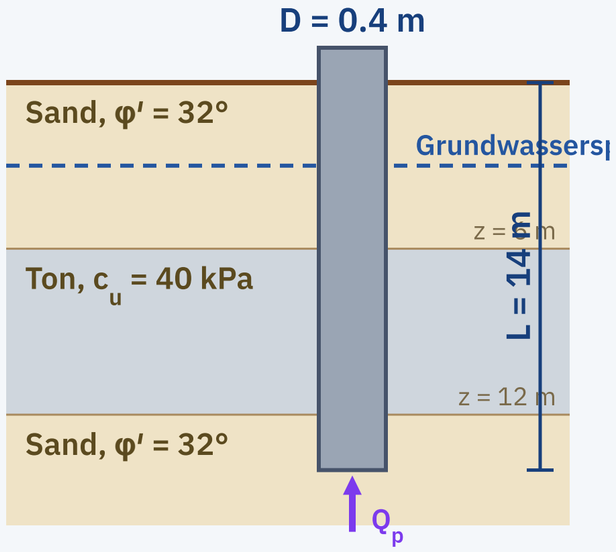
BEISPIEL

Gegeben

Sand 1 (0–6 m)	$\varphi' = 32°$
Ton (6–12 m)	$c_u = 40\ \mathrm{kPa}$
Sand 2 (12–16 m)	$\varphi' = 32°$
Wichte	$\gamma = 17,\ \gamma_{sat} = 18\ \mathrm{kN/m^3}$ **(drei Schichten)**
Grundwasser	**in 3.0 m Tiefe**
Pfahl	**gerammt, Kreisquerschnitt, D = 0.4 m, L = 14 m**
Spitzenwiderstandsverfahren	**Meyerhof**
Atmosphärendruck	$p_a = 100\ \mathrm{kPa}$
Wirksame Spannung an der Spitze	$q' = \sigma'(14) = 141.1\ \mathrm{kPa}$ **(Beispiel 1)**

GESUCHT

Es ist zu bestimmen, in welcher Schicht die Spitze liegt, und der **Spitzenwiderstand** Q_p zu ermitteln.



Lösung (1/2)

LÖSUNG

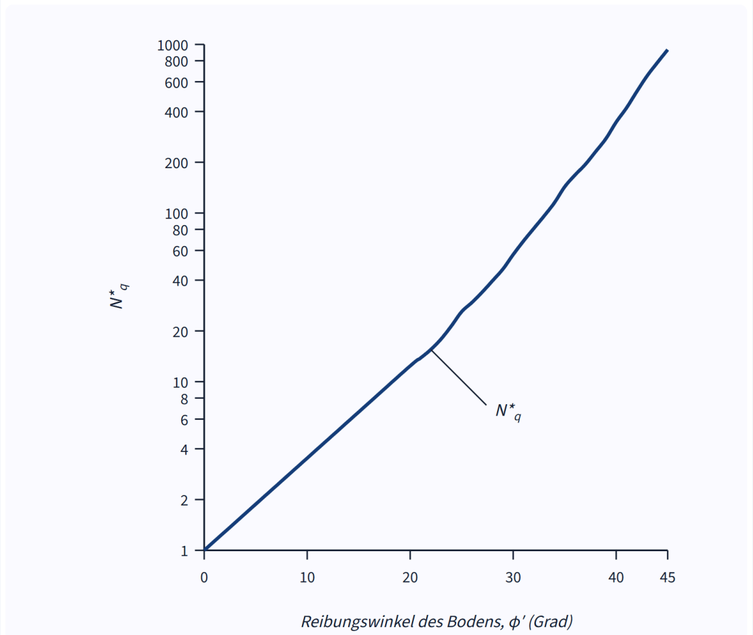
1 Schicht an der Spitze: L = 14 m, im Sand zwischen 12–16 m → Sandregel (der Ton darüber betrifft die Spitze nicht)

$$\varphi' = 32^\circ \qquad q' = \sigma'(14) = 141.1\ \text{kPa}$$

2 N^*_q aus dem Diagramm nach Meyerhof für φ′ = 32°; anschließend beide Werte nebeneinander

$$N_q^* = 81$$
$$q' N_q^* = 141.1(81) = 11{,}428\ \text{kPa}$$
$$q_l = 0.5(100)(81)\tan 32^\circ = 2{,}531\ \text{kPa}$$

Der Wert N^*_q aus der Tafel (seitlich) beträgt 81; $q'N^*_q$ = 11,428 kPa, weit größer als der Grenzwert q_l = 2,531 kPa: **der Grenzwert ist maßgebend**.



Lösung (2/2)

LÖSUNG

3 Einheitlicher Spitzenwiderstand: der kleinere der beiden Werte

$$q_p = \min(q' N_q^*;\ q_l) = \min(11{,}428;\ 2{,}531) = \mathbf{2{,}531}\ \mathrm{kPa}$$

4 Fläche des Pfahlfußes und Spitzenwiderstand

$$A_p = \frac{\pi (0.4)^2}{4} = 0.1257\ \mathrm{m}^2 \qquad Q_p = A_p\, q_p = 0.1257(2{,}531) = \mathbf{318.0}\ \mathrm{kN}$$

Spitzenwiderstand **318.0 kN**. Da die Pfahlspitze im Sand liegt, gilt die Sandregel; da der Grenzwert maßgebend ist, ändert der σ′-Wert das Ergebnis in diesem Beispiel nicht.

Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Aufgabe

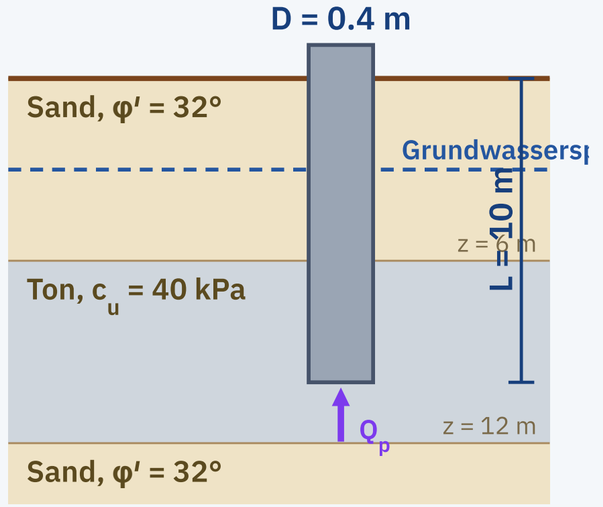
BEISPIEL

Gegeben

Sand 1 (0–6 m)	$\varphi' = 32°$
Ton (6–12 m)	$c_u = 40\ \mathrm{kPa}$
Sand 2 (12–16 m)	$\varphi' = 32°$
Wichte	$\gamma = 17,\ \gamma_{sat} = 18\ \mathrm{kN/m^3}$ **(drei Schichten)**
Grundwasser	**in 3.0 m Tiefe**
Pfahl	**derselbe Pfahl, aber L = 10 m**
Verfahren für die Spitzen	**Meyerhof und Vesic**
Atmosphärendruck	$p_a = 100\ \mathrm{kPa}$

GESUCHT

Wenn der Pfahl auf 10 m verkürzt wird, ist zu bestimmen, in welcher Schicht die Pfahlspitze verbleibt, und der **Spitzenwiderstand** ist mit zwei Verfahren zu ermitteln.



Lösung

LÖSUNG

1 Schicht an der Spitze: L = 10 m, im Ton zwischen 6–12 m → Tonregel (Sand und σ′ gehen nicht mehr in die Berechnung ein)

$$c_u = 40\ \text{kPa} \qquad A_p = 0.1257\ \text{m}^2$$

2 Meyerhof: $N^*_c = 9$

$$q_p = 9\,c_u = 9(40) = 360\ \text{kPa} \qquad Q_p = 0.1257(360) = \mathbf{45.2}\ \text{kN}$$

3 Vesic: $I_{rr} = I_r = 347(c_u/p_a) - 33$

$$I_{rr} = 347(0.4) - 33 = 105.8$$
$$N_c^* = \tfrac{4}{3}(\ln 105.8 + 1) + \tfrac{\pi}{2} + 1 = 10.12$$
$$q_p = 40(10.12) = 405\ \text{kPa} \ \Rightarrow\ Q_p = 0.1257(405) = \mathbf{50.9}\ \text{kN}$$

Bei einem Pfahl mit der Spitze im Sand betrug Q_p = **318 kN**; bei der Spitze im Ton **45 – 51 kN**: etwa ein Siebtel. Wird derselbe Pfahl um 2 m verlängert, sodass die Spitze in den Sand reicht, steigt der Spitzenwiderstand sprunghaft an.

Lösung in GeoTerva prüfen ↗

K–δ: die kritische Tiefe gilt für den gesamten Pfahl

THEORIE

In der Sandschicht widersteht der Pfahlschaft durch Reibung gegen die horizontale wirksame Spannung. Jede Sandschicht trägt **ihren eigenen** Wert K und δ′:

$$f = K_i\,\sigma'\tan\delta_i' \quad (z \le L') \qquad f = f_{z=L'} \quad (z > L'), \quad L' = 15D$$

L′ gilt für **den gesamten Pfahl**, nicht für eine Schicht: Unterhalb von L′ wird der σ′-Wert auf seinem Wert bei L′ gehalten.

Eine tief gelegene Sandschicht liefert eine über die Schicht **konstante** Einheitsmantelreibung, unabhängig davon, wo ihre Grenze liegt.

Option: **Coyle–Castello**. Das eigene K der Schicht (aus der Abak), δ′ = 0.8φ′ und der mittlere σ′-Wert der Schicht; es gibt keine kritische Tiefe, der Mittelwert übernimmt diese Aufgabe.

COYLE–CASTELLO (PRO SCHICHT)

$$f_i = K_i\,\bar{\sigma}_i'\tan(0.8\varphi_i')$$

$$Q_s = p\sum f_i\,\Delta L_i$$

Beim K–δ-Verfahren wird δ′ häufig im Bereich 0.75φ′ – 0.8φ′ angenommen; in dieser Vorlesung werden **δ′ = 0.8φ′ = 25.6°** und **K = 1.0** verwendet.

Aufgabe

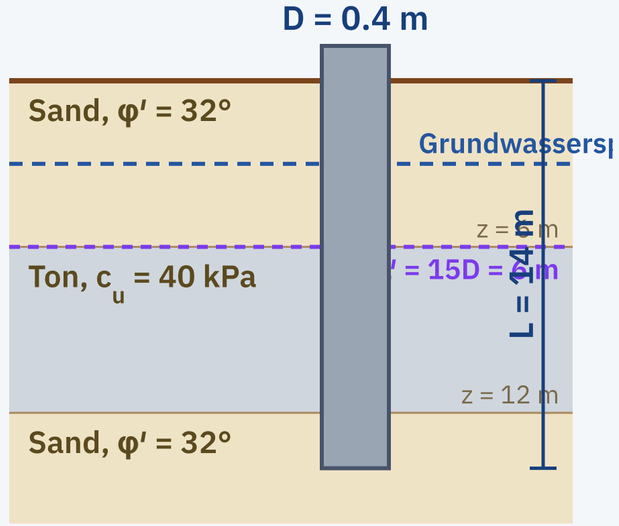
BEISPIEL

Gegeben

Sand 1 (0–6 m)	$\varphi' = 32°$
Ton (6–12 m)	$c_u = 40\ \mathrm{kPa}$
Sand 2 (12–16 m)	$\varphi' = 32°$
Wichte	$\gamma = 17,\ \gamma_{sat} = 18\ \mathrm{kN/m^3}$ **(drei Schichten)**
Grundwasser	**in 3.0 m Tiefe**
Pfahl	**Rammpfahl, D = 0.4 m, L = 14 m**
Umfang	$p = \pi D = 1.257\ \mathrm{m}$
In Sandschichten	$K = 1.0,\ \delta' = 0.8\varphi' = 25.6°$ **(diese Werte im Modul eingeben; das Modul öffnet mit K = 0.66 und δ′ = 24°)**

GESUCHT

Die Mantelreibung der Sandschichten (0–6 m und 12–14 m) ist nach dem K–δ-Verfahren zu ermitteln. Kritische Tiefe L′ = 15D.



Lösung (1/2)

LÖSUNG

1 Kritische Tiefe (für den gesamten Pfahl einheitlich)

$$L' = \min(15D;\ L) = \min(15(0.4);\ 14) = \mathbf{6}\ \mathrm{m} \qquad \sigma'(L') = 75.6\ \mathrm{kPa}\ (\text{Beispiel 1})$$

2 Sand 1 (0–6 m): die Schicht liegt vollständig innerhalb von L′; keine Kappe; mittlere σ′ = Fläche / Dicke

$$\bar{\sigma}'_1 = \frac{266.4}{6} = 44.4\ \mathrm{kPa}$$

3 Einheitsmantelreibung und Widerstand

$$f_1 = K \tan\delta'\, \bar{\sigma}'_1 = 1.0(0.4791)(44.4) = 21.3\ \mathrm{kPa}$$

$$Q_{s1} = p\, f_1 H = 1.2566(21.3)(6) = \mathbf{160.4}\ \mathrm{kN}$$

Lösung (2/2)

LÖSUNG

4 Sand 2 (12–14 m): vollständig unterhalb von L′ → der Wert σ′ wird auf seinem Wert bei L′ gehalten

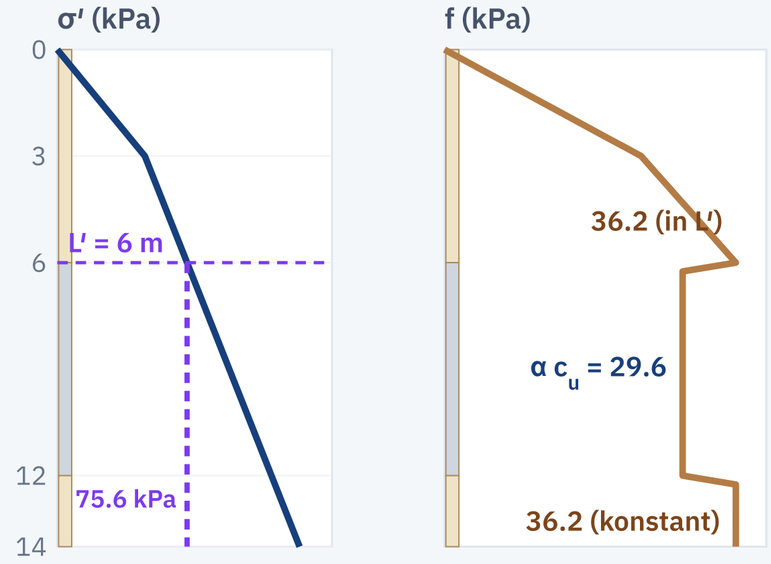
$$\sigma' = \sigma'(L') = 75.6\ \text{kPa}$$

$$f_3 = 1.0(0.4791)(75.6) = \mathbf{36.2}\ \text{kPa}$$

5 Widerstand (Mächtigkeit 14 – 12 = 2 m)

$$Q_{s3} = p\, f_3 H = 1.2566(36.2)(2) = \mathbf{91.0}\ \text{kN}$$

Ohne die kritische Tiefe ergäben sich in diesem Abschnitt σ̄′ = 132.9 kPa, f = 63.7 kPa und Q_{s3} = 160 kN. Die **Begrenzung von L′** verringert den tieferen Abschnitt des Sandes um **69 kN**.



Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Auch in Ton wählt jede Schicht ihr eigenes Verfahren

THEORIE

In der Tonschicht widersteht der Pfahlschaft durch **Adhäsion** oder durch **wirksame Spannung**; alle drei Wege des Tonmoduls können je Schicht verwendet werden:

$$\alpha: \; f = \alpha_i c_{u,i} \qquad \lambda: \; f_i = \lambda\,(\bar{\sigma}'_i + 2c_{u,i}),\; \lambda = \lambda(L)$$

$$\beta: \; \beta_i = (1 - \sin\varphi'_{R,i})\tan\varphi'_{R,i}\sqrt{OCR_i}, \quad f_i = \beta_i \bar{\sigma}'_i$$

α: **hängt nicht** von der Tiefe innerhalb der Schicht ab; die Mantelreibung ist über die Schicht konstant (gleichförmig).

λ und β stellen die wirksame Spannung wieder her; je nach den darüberliegenden Schichten entsteht ein **Sprung**.

EINE EHRLICHE ANMERKUNG

Vijayvergiya und Focht schrieben λ als **einen einzigen Mittelwert über die gesamte Einbindelänge**. Die getrennte Anwendung auf jede Tonschicht in einem geschichteten Profil (λ über die Länge L, mit den mittleren σ′- und c_u-Werten dieser Schicht) ist **eine Erweiterung des Verfahrens, die diesem Programm eigen ist**; das Modul weist überall darauf hin.

φ'_R und OCR werden **eingegeben**, nicht aus dem Boden über eine Korrelation abgelesen (öffnet mit 30° und 1).

Aufgabe

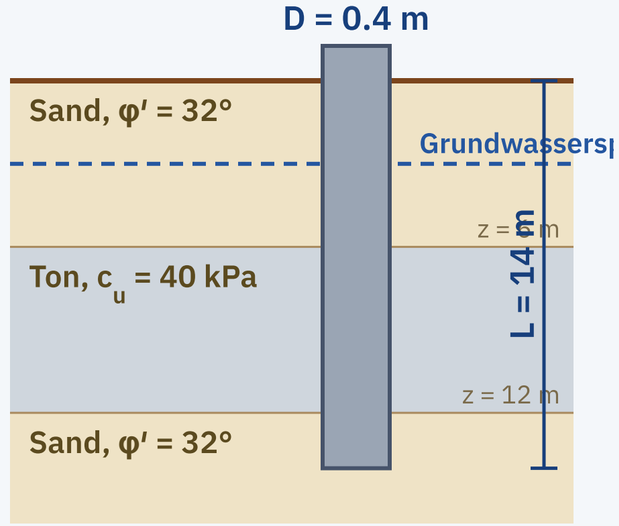
BEISPIEL

Gegeben

Sand 1 (0–6 m)	$\varphi' = 32°$
Ton (6–12 m)	$c_u = 40\ \mathrm{kPa}$
Sand 2 (12–16 m)	$\varphi' = 32°$
Wichte	$\gamma = 17,\ \gamma_{sat} = 18\ \mathrm{kN/m^3}$ **(drei Schichten)**
Grundwasser	**in 3.0 m Tiefe**
Pfahl	**gerammt, D = 0.4 m, L = 14 m, p = 1.257 m**
mittlere σ′ des Tons	$\bar{\sigma}'_2 = A_{6-12}/6 = 100.1\ \mathrm{kPa}$ **(Beispiel 1)**
für β	$\varphi'_R = 30°,\ OCR = 1$
für α	$p_a = 100\ \mathrm{kPa}$**, α aus der Tabelle**

GESUCHT

Ermitteln Sie den Pfahlmantelwiderstand der Tonschicht (6–12 m) mit den Verfahren nach **α, λ und β**.



Lösung (1/2)

LÖSUNG

1 α-Verfahren: α aus der Tabelle für $c_u/p_a = 0.4$

$$\alpha = 0.74 \quad f = \alpha c_u = 0.74(40) = 29.6\ \text{kPa} \quad Q_s = 1.2566(29.6)(6) = \mathbf{223.2}\ \text{kN}$$

2 λ-Verfahren: λ aus der Tabelle über die **Pfahllänge** (L = 14 m) ($\lambda_{10} = 0.245$; $\lambda_{15} = 0.200$)

$$\lambda = 0.209$$

$$f = \lambda(\bar{\sigma}_2' + 2c_u) = 0.209(100.1 + 2(40)) = 37.6\ \text{kPa}$$

$$Q_s = 1.2566(37.6)(6) = \mathbf{283.9}\ \text{kN}$$

Lösung (2/2)

LÖSUNG

3 β-Verfahren: $\varphi'_R = 30°$, OCR = 1

$$\beta = (1 - \sin 30^\circ)\tan 30^\circ = 0.289$$

$$f = \beta \bar{\sigma}'_2 = 0.289(100.1) = 28.9 \text{ kPa}$$

$$Q_s = 1.2566(28.9)(6) = \mathbf{218.0} \text{ kN}$$

Die drei Verfahren liefern für dieselbe Tonschicht **223**, **284** und **218 kN**: α und β liegen nahe beieinander, λ ist um etwa 27 % höher. Der Unterschied folgt aus den Annahmen, auf denen die Verfahren beruhen; die Anwendung von λ je Schicht ist zudem eine Erweiterung.



Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Ein einzelnes Integral: über die Pfahllänge

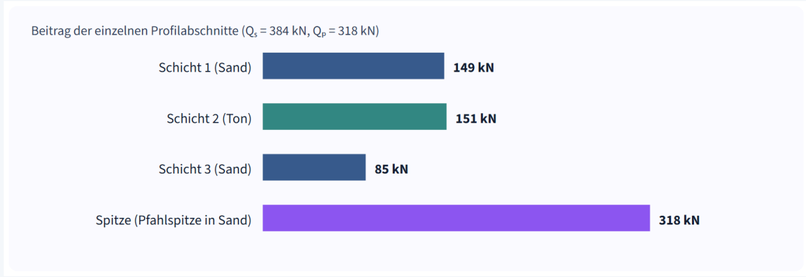
THEORIE

Der Mantelwiderstand ist das Integral der Reibung entlang des Pfahls multipliziert mit dem Umfang. Die Berechnung erfolgt numerisch; die Grenze kann **überall** liegen, und ein in der Mitte einer Schicht endender Pfahl erfordert keinen Sonderfall:

$$Q_s = p \int_0^L f(z)\,dz \;\approx\; p \sum f_i\,\Delta z_i$$

So betrachtet ist die Schichtung kein Problem mehr, sondern wird zu einer **Entwurfsfrage**: **Welcher Abschnitt** des Profils trägt den Pfahl?

Wie ändert sich die Tragfähigkeit, wenn der Pfahl über die nächste Schichtgrenze hinaus verlängert oder gekürzt wird?



Beitrag jedes Abschnitts des Beispielpfahls (Q_s = 475 kN, Q_p = 318 kN).

Aufgabe

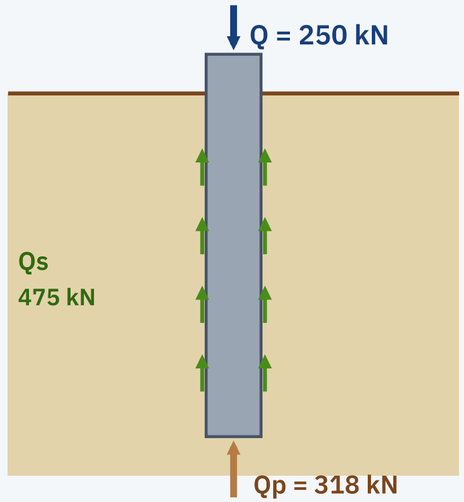
BEISPIEL

Gegeben

Spitzenwiderstand	Q_p = 318.0 kN (Beispiel 2)
Sand 1 (0–6 m)	Q_{s1} = 160.4 kN (Beispiel 4)
Ton (6–12 m)	Q_{s2} = 223.2 kN (α-Verfahren, Beispiel 5)
Sand 2 (12–14 m)	Q_{s3} = 91.0 kN (Beispiel 4)
Sicherheitsfaktor	FS = 3
Arbeitslast auf dem Pfahl	Q = 250 kN

GESUCHT

Ermitteln Sie die **Grundbruchlast** und die **zulässige** Tragfähigkeit des Pfahls; ist die Arbeitslast ausreichend?



Lösung

LÖSUNG

1 Mantelreibung: Summe der Abschnitte

$$Q_s = 160.4 + 223.2 + 91.0 \approx \mathbf{474.5}\ \text{kN}$$

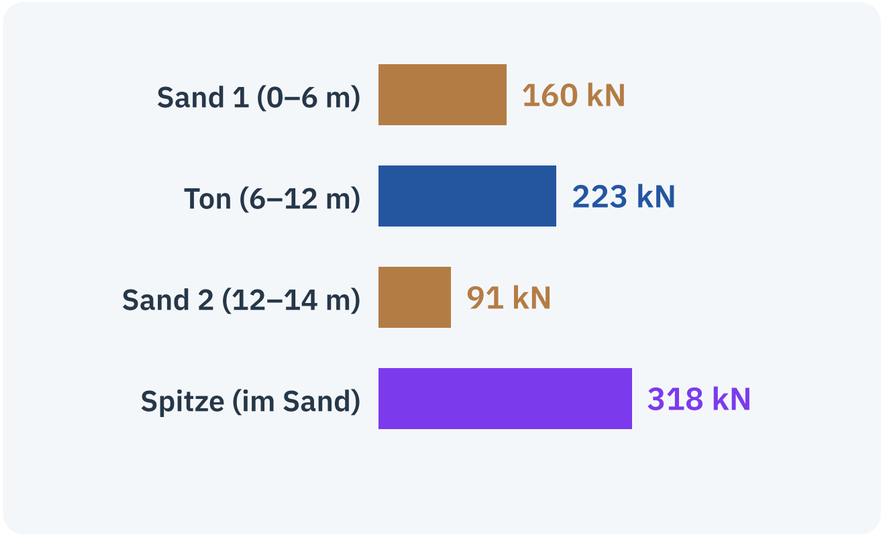
2 Grundbruchspannung

$$Q_u = Q_p + Q_s = 318.0 + 474.5 = \mathbf{792.6}\ \text{kN}$$

3 Zulässige Tragfähigkeit und Nachweis

$$Q_{all} = \frac{Q_u}{FS} = \frac{792.6}{3} = \mathbf{264.2}\ \text{kN}$$

$$Q = 250 \leq 264.2 \ \Rightarrow\ \text{ausreichend}$$



Der Ausnutzungsgrad beträgt 0.95. Die Tonschicht macht nur 43 % des Pfahlschafts aus, liefert aber 47 % der Tragfähigkeit: Nach der kritischen Tiefe stoppt der Sand den Zuwachs von σ′, während der Ton in jeder Tiefe denselben Wert α c_u liefert.

Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Aufgabe

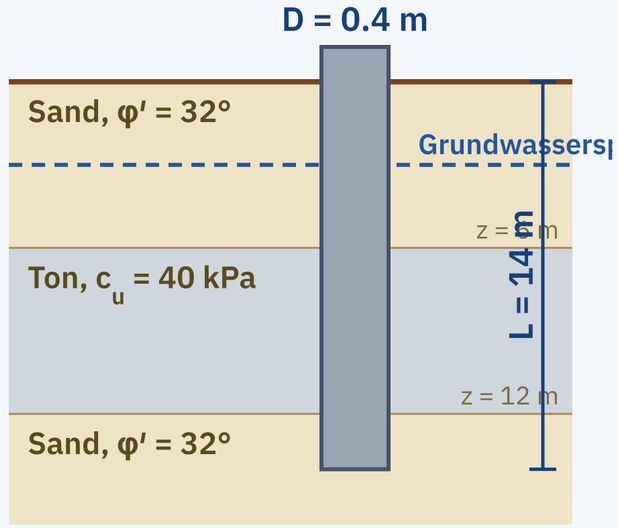
BEISPIEL

Gegeben

Sand 1 (0–6 m)	$\varphi' = 32^\circ$
Ton (6–12 m)	$c_u = 40\ \mathrm{kPa}$
Sand 2 (12–16 m)	$\varphi' = 32^\circ$
Wichte	$\gamma = 17,\ \gamma_{sat} = 18\ \mathrm{kN/m^3}$ **(drei Schichten)**
Grundwasser	**in 3.0 m Tiefe**
Verfahren	**Rammpfahl, D = 0.4 m; Meyerhof, α, K–δ**
Längen	**L = 10, 12, 14 und 16 m**
Bekannte	**Beispiel 2–6 für L = 14 m**

GESUCHT

Wie ändert sich Q_u, wenn die Pfahllänge **10, 12 und 16 m** beträgt? Erklären Sie die **Ursache** der Änderung.



Lösung (1/2)

LÖSUNG

1 L = 10 m: Spitze im Ton (Beispiel 3); Tonabschnitt nur 6–10 m

$$Q_p = 45.2\ ; \quad Q_s = 160.4 + 148.8 = 309.2\ ; \quad Q_u = \mathbf{354.4}\ \mathrm{kN}$$

2 L = 12 m: die Spitze liegt genau an der Schichtgrenze → **sie steht auf dem darunterliegenden Sand auf**; Sand 2 reicht noch nicht in den Pfahlschaft

$$Q_p = 318.0\ ; \quad Q_s = 160.4 + 223.2 = 383.5\ ; \quad Q_u = \mathbf{701.6}\ \mathrm{kN}$$

3 L = 16 m: Sand 2 wird mit vier Metern Mächtigkeit in den Pfahlschaft einbezogen (σ′ begrenzt: f konstant)

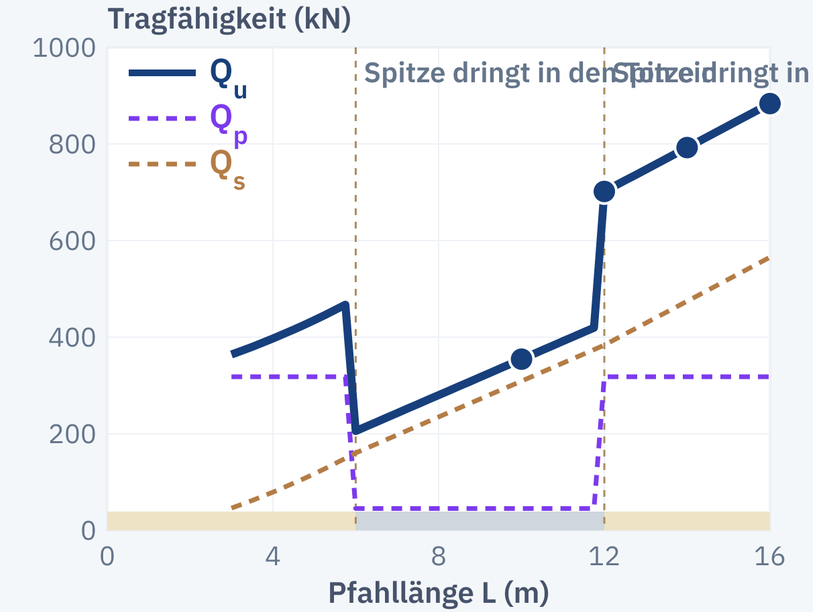
$$Q_p = 318.0\ ; \quad Q_s = 160.4 + 223.2 + 182.0 = 565.5\ ; \quad Q_u = \mathbf{883.6}\ \mathrm{kN}$$

Lösung (2/2)

LÖSUNG

L (m)	Spitzenlage	Q_p (kN)	Q_s (kN)	Q_u (kN)	Q_{all} (kN)
10	Ton	45	309	**354**	118
12	Sand	318	384	**702**	234
14	Sand	318	475	**793**	264
16	Sand	318	566	**884**	295

10 m → 12 m: die Tragfähigkeit nimmt um **347 kN** zu (98 %): davon entfallen 273 kN auf **das Eindringen der Spitze in den Sand**. Nach 12 m bringt jeder Meter nur noch ≈ 45 kN. In einem geschichteten Profil bestimmt **die Schicht, in der die Spitze endet**, die Pfahllänge.



Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Die Regeln des Bohrpfahls gelten auch bei einem geschichteten Profil

THEORIE

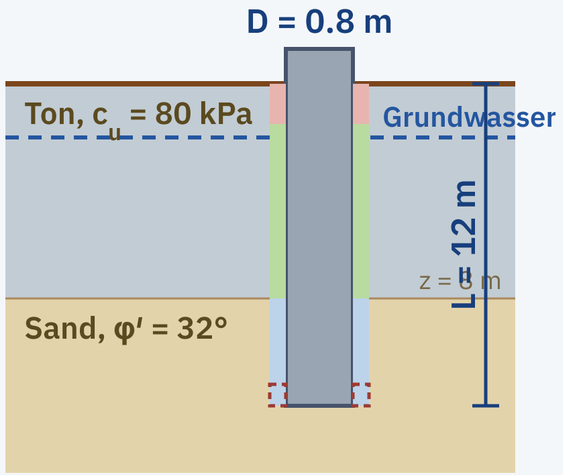
Es wird ein Loch gebohrt und Beton eingebracht: der Boden wird nicht verdrängt, der Ton erweicht an der Bohrlochwand, unter der Sohle können Bohrgut und Lockermaterial anfallen. Bei einem geschichteten Profil wird jede Hälfte des Verfahrens **an der ihr zugehörigen Stelle** angewendet:

Tonschichten (α): $\alpha^* = 0.55$ ($c_u/p_a \le 1.5$); **obere 1.5 m und untere 1D**: $\alpha^* = 0$. Das Fenster gehört **nur zu α** und wird nicht auf λ und β übertragen.

Sandschichten behalten ihre eigene K–δ- oder Coyle–Castello-Regel; K liegt im Bereich von **$K_0 = 1 - \sin\varphi'$**, da der Boden beim Bohren nicht verdrängt wird.

Liegt die **Sohle** im Ton, gilt nach Reese–O'Neill: $q_p = \min[6c_{ub}(1 + 0.2L/D_b), 9c_{ub}, 40p_a]$. c_{ub} ist der mittlere c_u über **$2D_b$** unterhalb der Sohle; reicht der Bereich über mehrere Schichten, wird er mit der Dicke gewichtet.

Dieser Bereich muss **vollständig aus Ton** bestehen: Reicht er bis in den Sand, bricht das Modul ab und verlangt, dass Meyerhof oder Vesic gewählt wird.



Rot: $\alpha^* = 0$ (obere 1.5 m). Grün: $\alpha^* = 0.55$. Blau: K–δ im Sand. Gestrichelt rot: untere 1D, kein Fenster im Sand.

Aufgabe

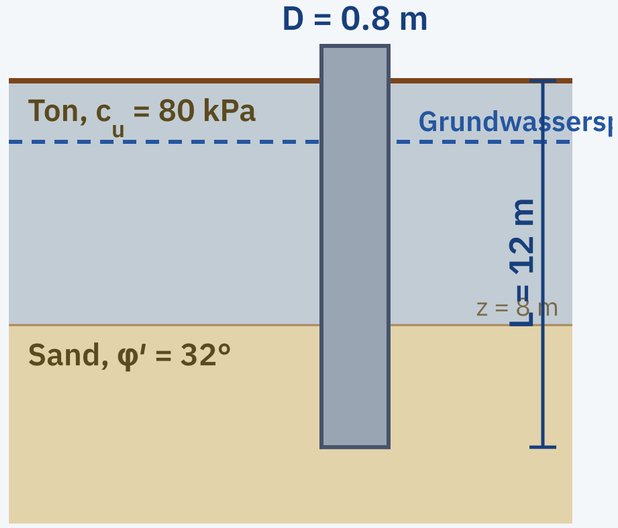
BEISPIEL

Gegeben

Pfahl	**Bohrpfahl, Kreisquerschnitt, D = 0.8 m, L = 12 m**
Ton (0–8 m)	$c_u = 80\ \mathrm{kPa},\ \gamma = \gamma_{sat} = 18\ \mathrm{kN/m^3}$
Sand (8–20 m)	$\varphi' = 32°,\ \gamma = 18,\ \gamma_{sat} = 19\ \mathrm{kN/m^3}$
Grundwasser	**in 2.0 m Tiefe**
Für Sand	$K = K_0 = 0.47,\ \delta' = 0.75\varphi' = 24°$
Spitze	**Meyerhof; FS = 3**

GESUCHT

Der **Spitzenwiderstand**, der **Schaftwiderstand** und die **zulässige Tragfähigkeit** des Bohrpfahls sind zu bestimmen.



Lösung (1/3)

LÖSUNG

1 Tonschicht: α* und Fenster (oberste 1.5 m und unterste 1D = 0.8 m werden verworfen: 1.5 → 12 − 0.8 = 11.2 m)

$$\alpha^* = 0.55 \ (c_u/p_a = 0.8 \leq 1.5) \qquad L_{eff} = 8 - 1.5 = \mathbf{6.5}\ \mathrm{m}$$

2 Einheitsmantelreibung und Widerstand

$$f = \alpha^* c_u = 0.55(80) = 44.0\ \mathrm{kPa} \qquad Q_{s1} = \pi(0.8)(44.0)(6.5) = \mathbf{718.8}\ \mathrm{kN}$$

Lösung (2/3)

LÖSUNG

3 Sandschicht (8–12 m): eigene K–δ-Regel; L′ = min(15D; L) = min(12; 12) = 12 m, d. h. keine Kappe innerhalb der Schicht

$$\sigma'(8) = 85.1\ ;\ \sigma'(12) = 121.9\ \text{kPa} \qquad \bar{\sigma}' = \frac{414.1}{4} = 103.5\ \text{kPa}$$

4 Einheitsmantelreibung und Widerstand

$$f = K \tan\delta'\, \bar{\sigma}' = 0.47 \tan 24^\circ (103.5) = 21.7\ \text{kPa}$$

$$Q_{s2} = \pi(0.8)(21.7)(4) = \mathbf{217.8}\ \text{kN}$$

Der **untere 1D**-Abschnitt des α-Fensters (11.2 – 12 m) fällt in die Sandschicht; da das Fenster zu α gehört, behält der Sand seine Mantelreibung über diese 0.8 m bei.

Lösung (3/3)

LÖSUNG

5 Spitze im Sand → Sandregel (Meyerhof); keine zusätzliche Abminderung für die Bohrung, das eingegebene φ′ wird verwendet

$$q' = \sigma'(12) = 121.9\ \text{kPa} \qquad N_q^* = 81$$

$$q' N_q^* = 9{,}874 > q_l = 2{,}531\ \text{kPa} \ \Rightarrow\ q_p = 2{,}531\ \text{kPa}$$

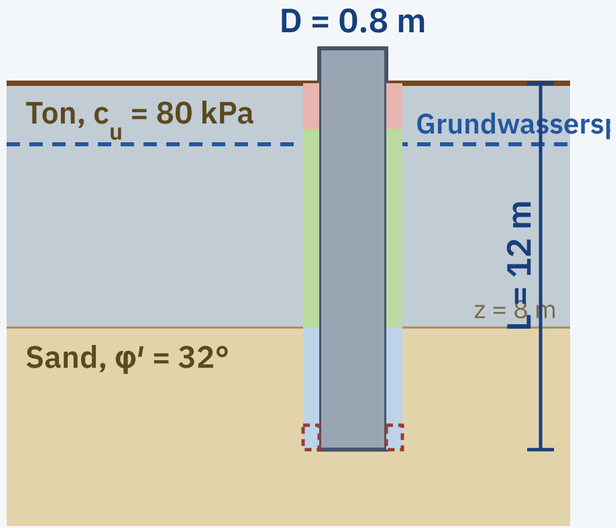
$$Q_p = A_p q_p = 0.5027(2{,}531) = \mathbf{1{,}272}\ \text{kN}$$

6 Gesamt- und zulässige Tragfähigkeit

$$Q_s = 718.8 + 217.8 = \mathbf{936.6}\ \text{kN}$$

$$Q_u = 1{,}272 + 937 = 2{,}209\ \text{kN}$$

$$Q_{all} = \frac{2{,}209}{3} = \mathbf{736}\ \text{kN}$$



Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Aufgabe

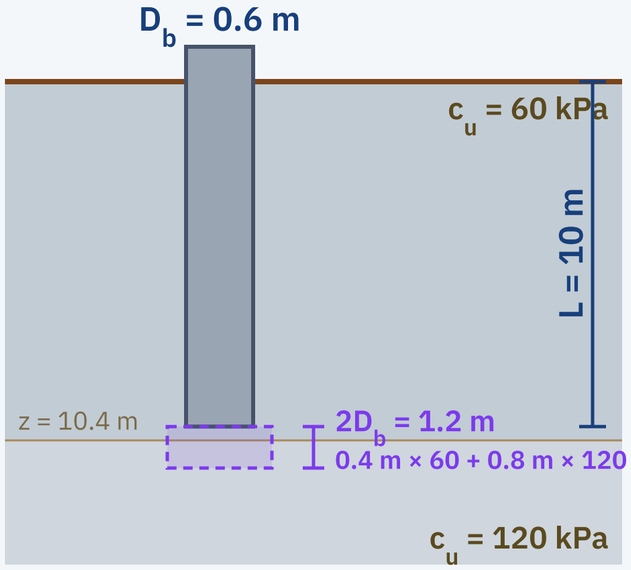
BEISPIEL

Gegeben

Pfahl	**Bohrpfahl, $D_b = D = 0.6$ m, $L = 10$ m**
Ton 1 (0–10.4 m)	$c_u = 60\ \mathrm{kPa}$
Ton 2 (10.4–20 m)	$c_u = 120\ \mathrm{kPa}$
Sohle	**Reese–O'Neill; $p_a = 100$ kPa**

GESUCHT

Ermitteln Sie **c_{ub}** in der Zone **$2D_b$** unterhalb der Sohle sowie die Werte **q_p** und **Q_p**.



Lösung

LÖSUNG

1 Zone 10 → 10 + 2D$_b$ = 11.2 m; an der Grenze bei 10.4 m: nach der Dicke gewichteter Mittelwert

$$c_{ub} = \frac{60(0.4) + 120(0.8)}{1.2} = \mathbf{100}\ \mathrm{kPa}$$

2 Der kleinste der drei Werte

$$6c_{ub}\left(1 + 0.2\frac{L}{D_b}\right) = 2{,}600\ ; \quad 9c_{ub} = 900\ ; \quad 40p_a = 4\,000 \ \Rightarrow\ q_p = \mathbf{900}\ \mathrm{kPa}$$

3 Grundfläche und Spitzenwiderstand

$$A_b = \frac{\pi(0.6)^2}{4} = 0.2827\ \mathrm{m}^2 \qquad Q_p = 0.2827(900) = \mathbf{254.5}\ \mathrm{kN}$$

Wäre nur der Spitzenwert c$_u$ = 60 kPa angesetzt worden, ergäbe sich Q$_p$ = 152.7 kN: Der darunterliegende steifere Ton liefert **67 %** mehr.

Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Ein einziger Sicherheitsfaktor, aber die Unsicherheit ist groß

THEORIE

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

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

Für einen Einzelpfahl üblich **FS = 2.5 – 4**.

Oberes Ende: wenn das Profil aus **wenigen Bohrungen** bekannt ist. Genau dieser Fall liegt bei einem geschichteten Profil vor: zwischen den Bohrungen sind **die Schichtgrenzen am unsichersten**, und das obige Beispiel hat gezeigt, wie stark ein einziger Meter der Schichtgrenze die Tragfähigkeit verschiebt.

DIE BEIDEN FRAGEN ERFORDERN GETRENNTE BERECHNUNGEN

Bei geschichtetem Profil, getrennt von der Tragfähigkeitsberechnung:

Eine weiche Schicht setzt sich und hängt sich als **negative Mantelreibung** an den Pfahl

Die **Setzung**, die von der zusammendrückbaren Schicht unter der Spitze maßgeblich bestimmt wird

Regeln nach Schicht und Herstellung

THEORIE

Schicht	Pfahlschaft (Q_s)	Spitze (Q_p): Schicht an der Pfahlspitze
Sand	K–δ (L′ = 15D, ein einziger Wert für den gesamten Pfahl) oder Coyle–Castello (K σ′ tan0.8φ′)	$q'N^*_q \le q_l$ (Meyerhof), Vesic, Coyle–Castello
Ton	α · λ (je Schicht: Verlängerung) · β	$9c_u$ (Meyerhof) · $N^*_c(I_{rr})$ (Vesic)
Bohrpfahl, Ton	α* = 0.55; obere 1.5 m und untere 1D = 0	Reese–O'Neill: Mittelwert von c_{ub} = $2D_b$
Bohrpfahl, Sand	$K \approx K_0 = 1 - \sin\varphi'$; das Fenster wird nicht angewendet	$q'N^*_q$ (eingegebenes φ′)

Jede Zeile ist eine separate Auswahl für die betreffende Schicht; **am selben Pfahl** werden sowohl die Sand- als auch die Tonregel verwendet.

Zusammenfassung

Die wichtigsten Punkte

Die wirksame Spannung **sammelt sich über die Schichten hinweg an** und ist stetig; die Einheitsmantelreibung hingegen **springt an den Schichtgrenzen**

Der Spitzenwiderstand wird ausschließlich nach der Regel der Schicht berechnet, in der sich die Spitze befindet; eine Spitze, die auf eine Schichtgrenze fällt, liegt in der **darunterliegenden** Schicht

Sand: $f = K\sigma' \tan\delta'$ und **$L' = 15D$ gilt für den gesamten Pfahl** · **Ton**: α, λ (eine Erweiterung je Schicht), β

Der Pfahlschaft ist die Summe der Schichten: $Q_s = p\Sigma f_i \Delta z_i$; die Länge bestimmt die Schicht, in der der Pfahlfuß endet

Bohrpfahl: Das α*-Fenster gilt nur für Ton/α; liegt die Sohle im Ton, gilt c_{ub} über $2D_b$ (es können mehrere Schichten sein)

$Q_{all} = (Q_p + Q_s)/FS$, FS = 2.5 – 4; bei großen Bauwerken eine **Pfahlprobebelastung**

Literatur

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.

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

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.

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

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

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.

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.

Das, B.M. (2016). Principles of Foundation Engineering, 8th ed. Cengage Learning; dort sind diese Verfahren in der Form zusammengeführt, der diese Seite folgt.

HINWEIS

Die Abbildungen in dieser Präsentation stammen von der Theorieseite von GeoTerva; alle Zahlenbeispiele wurden mit den moduleigenen Berechnungsregeln und der moduleigenen Bibliothek erzeugt, das Modul liefert dieselben Werte.

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