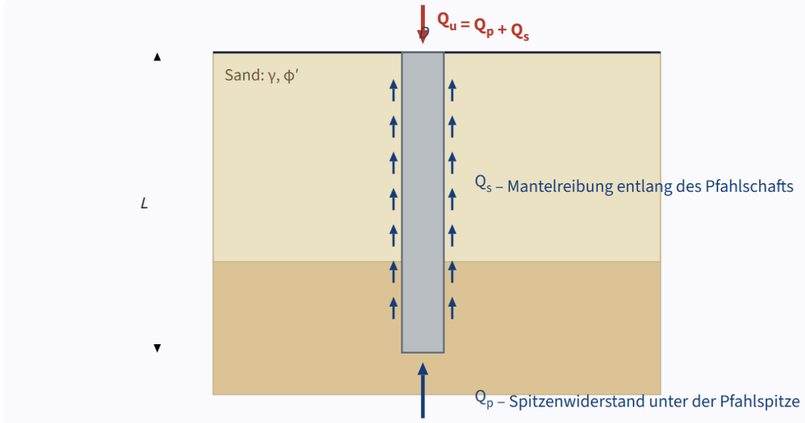
Geotechnische Vorlesung · Pfähle

Pfahltragfähigkeit in Sand

Vorlesung: Spitzenwiderstand, Mantelreibung und kritische Tiefe. Die Theorie jedes Verfahrens, anschließend ein Rechenbeispiel.

Meyerhof (1976) | Vesic (1977) | Coyle und Castello (1981) | Rechenbeispiele



Was lernen wir in dieser Vorlesung?

- Erklären zu können, wie ein Pfahl seine Last als **Spitzenwiderstand** und **Mantelreibung** abträgt
- Das **wirksame Spannungsprofil** im Sand einschließlich des Wasserstands aufstellen können
- Den Spitzenwiderstand mit drei Verfahren berechnen können: **Meyerhof**, **Vesic**, **Coyle und Castello**
- Die Mantelreibung und die Rolle der **kritischen Tiefe** (L') interpretieren können
- Die **zulässige Bodenpressung** zu erreichen und die Ergebnisse der Verfahren gemeinsam zu bewerten

VORLESUNGSABLAUF

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

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

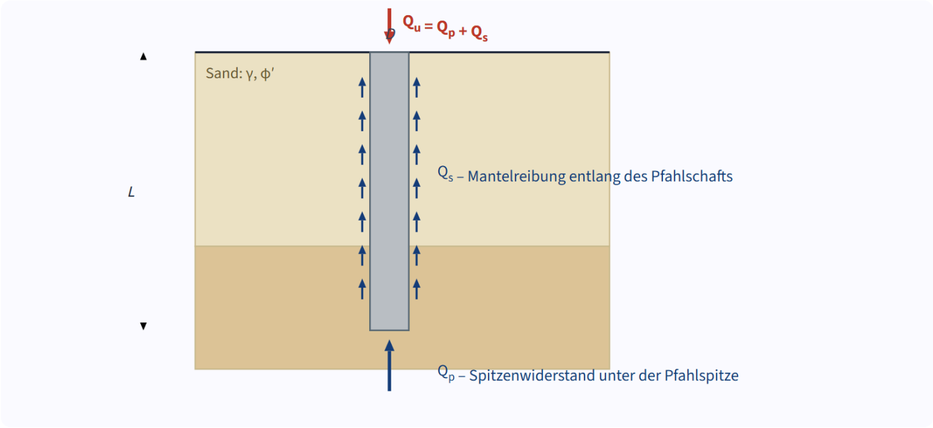
2 · **Aufgabe**: Gegeben und Gesucht

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

Alle Beispiele werden mit demselben Pfahl gerechnet: So lassen sich die Verfahren nebeneinander vergleichen.

Die Last wird auf zwei Wegen übertragen

THEORIE



Der Pfahl gibt seine Last **auf zwei Wegen gleichzeitig** an den Baugrund ab: Der Boden unter der Spitze widersteht mit dem **Spitzenwiderstand** (Q_p), der Sand entlang des Pfahlschafts mit der **Mantelreibung** (Q_s).

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

Die Mantelreibung erreicht ihren vollen Wert bei einer **kleinen** Verschiebung, der Spitzenwiderstand dagegen bei einer **sehr viel größeren** Verschiebung; die beiden Anteile erreichen ihren Höchstwert nicht gleichzeitig.

In dieser Vorlesung: **Einzelpfahl**, **Sand** ($c' = 0$), gerammt oder gebohrt, mit konstantem Querschnitt.

In Sand ist alles proportional zur wirksamen Spannung

THEORIE

In Sand sind sowohl der **Spitzenwiderstand** als auch die **Mantelreibung je Flächeneinheit** proportional zur wirksamen vertikalen Spannung. Die Berechnung beginnt mit der korrekten Ermittlung der σ'_v-Werte im Profil.

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

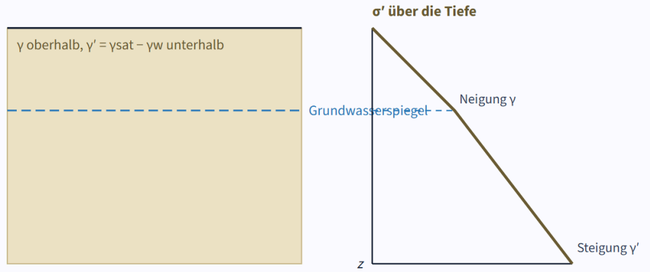
γ : Wichte des feuchten Bodens (über dem Grundwasserspiegel)

γ_{sat} : Wichte des wassergesättigten Bodens (unter dem Grundwasserspiegel)

$\gamma_w = 9.81$ kN/m³ : Wichte des Wassers

Grundwasserspiegel: Grundwasserspiegel

> Unterhalb des Grundwasserspiegels **verringert sich** der Spannungsgradient: $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$



Aufgabe

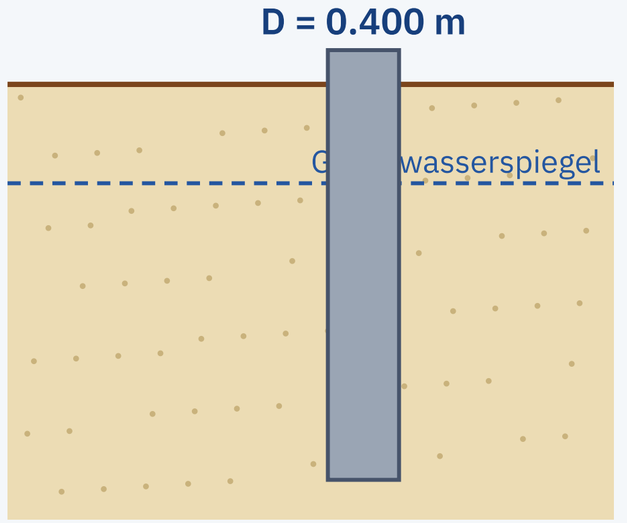
BEISPIEL

Gegeben

Sand, über dem Grundwasserspiegel	$\gamma = 17\ \mathrm{kN/m^3}$
Sand, unter dem Grundwasserspiegel	$\gamma_{sat} = 19.5\ \mathrm{kN/m^3}$
Tiefe des Grundwasserspiegels	**2.0 m**
Wichte des Wassers	$\gamma_w = 9.81\ \mathrm{kN/m^3}$

GESUCHT

In 8 m Tiefe sind die totale vertikale Spannung, der Porenwasserdruck und die **wirksame vertikale Spannung** zu ermitteln.



Lösung

LÖSUNG

1 Totale vertikale Spannung (Wichte des feuchten Bodens über dem Grundwasserspiegel, Wichte des wassergesättigten Bodens darunter)

$$\sigma_v = 17(2) + 19.5(6) = 34 + 117 = \mathbf{151.0}\ \text{kPa}$$

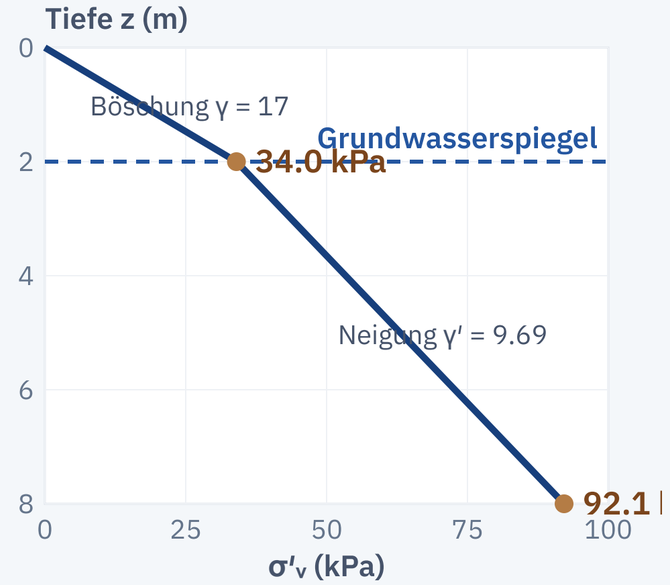
2 Porenwasserdruck (6 m Wassersäule unter dem Grundwasserspiegel)

$$u = \gamma_w\, h_w = 9.81\,(6) = \mathbf{58.9}\ \text{kPa}$$

3 Wirksame vertikale Spannung

$$\sigma'_v = \sigma_v - u = 151.0 - 58.9 = \mathbf{92.1}\ \text{kPa}$$

Gleiches Ergebnis: σ′$_V$ = 17(2) + (19.5 – 9.81)(6) = **92.1 kPa**. Unter dem Grundwasserspiegel beträgt die Wichte unter Auftrieb 9.69 kN/m³.



Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Spitzenwiderstand: allgemeiner Ausdruck

THEORIE

Der Sand unter der Spitze versagt durch **Grundbruch** wie unter einem Fundament; in der Tiefe der Spitze umschließt jedoch die **Überlagerungsspannung** den Sand fest.

Da in Sand c′ = 0 gilt, bleibt nur der Tiefen-(Überlagerungs-)Term übrig. Da der Pfahldurchmesser klein ist, wird der Breitenterm ($0.5\gamma' D N_\gamma$) vernachlässigt:

$$q_p = \sigma'_v \, N_q^* \qquad Q_p = A_p \, q_p$$

σ'_v : wirksame vertikale Spannung in der Tiefe der Pfahlspitze

N^*_q : Tragfähigkeitsbeiwert für das Pfahlproblem

A_p : Fläche der Pfahlspitze

WOHER KOMMT N^*_q? DREI ANSÄTZE

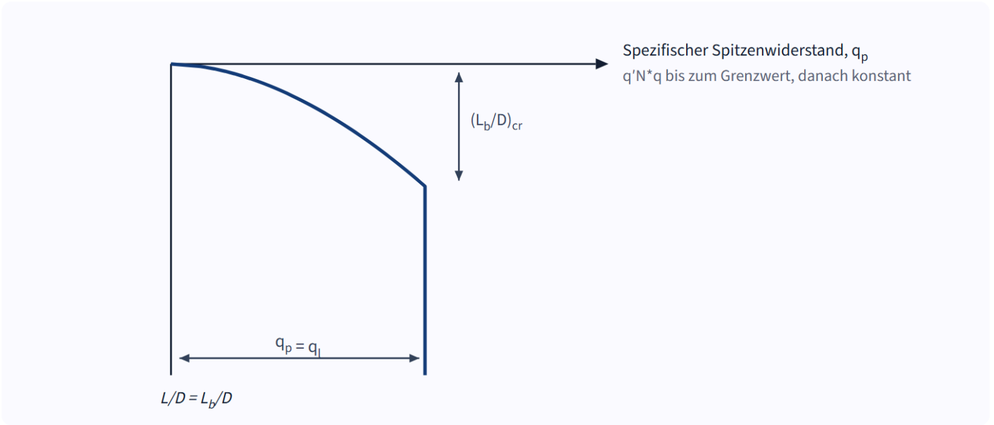
Meyerhof (1976): N^*_q hängt nur von φ′ ab; q_p wird durch einen **Grenzwert** begrenzt

Vesic (1977): Theorie der Hohlraumaufweitung; auch die **Steifigkeit** des Sandes wird berücksichtigt

Coyle und Castello (1981): an 24 großmaßstäbliche Probebelastungen angepasst; N^*_q hängt auch von L/D ab

Der Spitzenwiderstand steigt nicht unbegrenzt an

THEORIE



In homogenem Sand steigt der Einheiten-Spitzenwiderstand mit dem Einbindeverhältnis und erreicht bei $\mathbf{(L_b/D)_{cr}}$ sein **Maximum**; danach bleibt er konstant (q_l).

VESIC (1970) · PFHALBPROBEBELASTUNG AM OGEECHEE RIVER (D = 0.457 m)

L (m)	L/D	q_p (kN/m²)
3.02	6.61	3 304
6.12	13.39	9 365
8.87	19.40	11 472
12.00	26.26	11 587
15.00	32.82	13 971

Größtwert von q_p etwa **12 000 kN/m²**

$(L/D)_{cr}$ etwa **16 – 18**

Für einen mittleren $N_{60} \approx 30$ ergibt sich $4p_aN_{60} = 4(100)(30) = 12\,000$ kN/m²: **die Korrelation stimmt mit dem gemessenen Plateau überein**

Meyerhof: N*q aus φ′, mit einer Begrenzung

THEORIE

Meyerhof entnimmt N^*_q ausschließlich aus dem **Reibungswinkel** (eigene Tafel, unten). Das berechnete q_p kann einen **Grenzwert** nicht überschreiten:

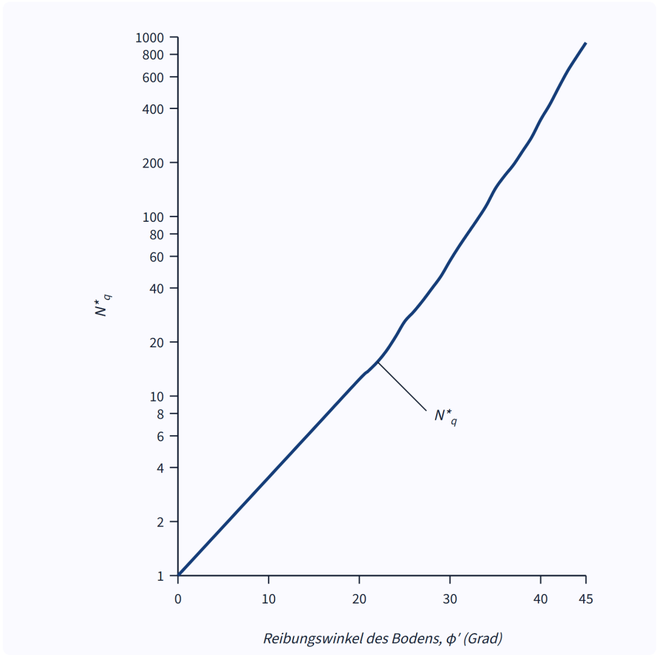
$$q_p = \sigma'_v N^*_q \;\leq\; q_l \qquad q_l = 0.5\, p_a\, N^*_q \tan\varphi'$$

p_a = 100 kN/m² : Atmosphärendruck

φ′ : effektiver Reibungswinkel des Sandes in Höhe der Pfahlspitze

N^*_q-WERTE (SCHAUBILD NACH MEYERHOF; DIE VOM MODUL GELESENE REIHE)

φ′ (°)	20	25	30	32	34	35	36	38	40	42	45
N^*_q	12.4	26.0	56.7	81.0	115.0	143.0	168.0	231.0	346.0	525.0	930.0



Für φ′ = 35° gilt N^*_q = 143.0 und q_l = 5,006 kPa; in Sand mit γ = 18 kN/m³ wird diese Grenze in einer Tiefe von etwa **1.9 m** erreicht

Meyerhof: Schritt für Schritt und die Bedeutung der Grenze

THEORIE

BERECHNUNGSSCHRITTE

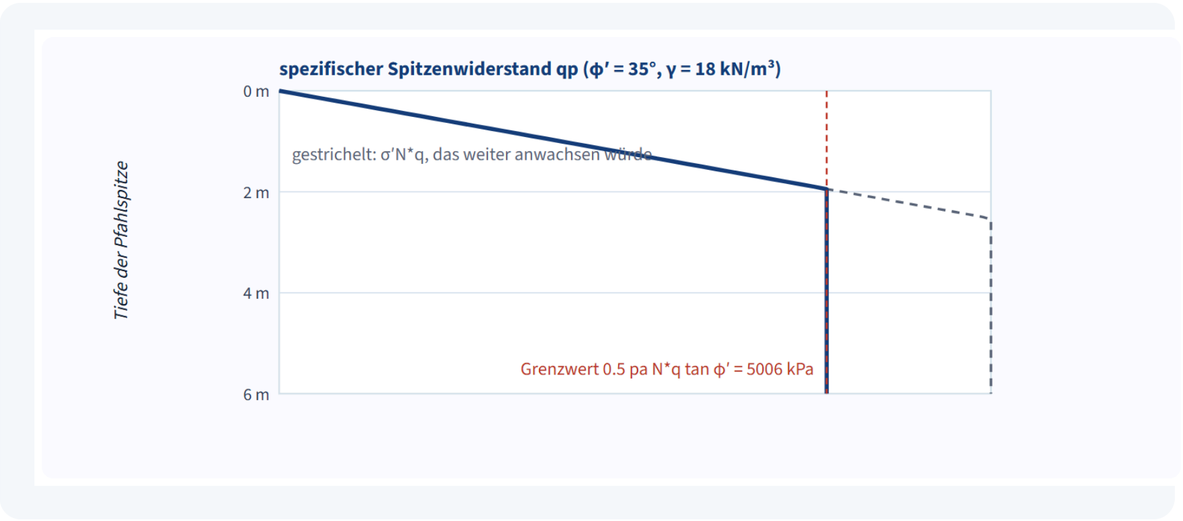
1. σ'_v in Höhe der Pfahlspitze berechnen

2. Den Wert N^*_q für φ' aus dem Diagramm/der Tabelle ablesen

3. $q_p = \sigma'_v N^*_q$

4. $q_l = 0.5\ p_a\ N^*_q\ \tan\varphi'$

5. $q_p = \min(\sigma'_v N^*_q, q_l)$ und $Q_p = A_p q_p$



Die Kurve folgt der Geraden $\sigma' N^*_q$, **bis der Grenzwert maßgebend wird**; danach bleibt sie horizontal. Ohne den Grenzwert würde q_p mit der Tiefe unbegrenzt wachsen, was Feldversuche nicht zeigen.

Aufgabe

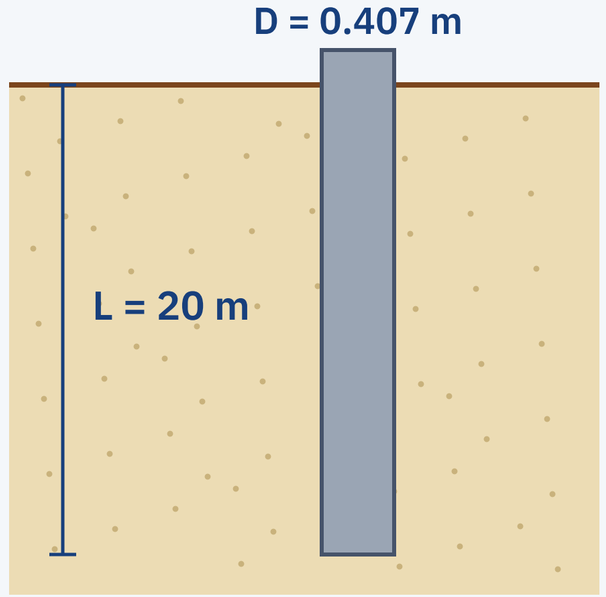
BEISPIEL

Gegeben

Pfahl	**Stahlbeton, Rammpfahl, quadratischer Querschnitt**
Querschnittsgröße	**D = 0.407 m**
Länge	**L = 20 m**
Sand (homogen)	$\gamma = 18\ \mathrm{kN/m^3}$, $\varphi' = 35°$
Grundwasser	**keine**

GESUCHT

Der **Spitzenwiderstand** Q_p des Pfahls ist nach dem Verfahren von **Meyerhof (1976)** zu ermitteln.



Lösung

LÖSUNG

1 Querschnittsfläche und wirksame Spannung an der Spitze

$$A_p = 0.407^2 = 0.1656\ \text{m}^2 \qquad \sigma'_v = \gamma L = 18(20) = 360\ \text{kPa}$$

2 Wert N*q (φ′ = 35°, Tafel nach Meyerhof) und σ′N*q

$$N_q^* = 143.0 \qquad \sigma'_v N_q^* = 360(143.0) = 51{,}480\ \text{kPa}$$

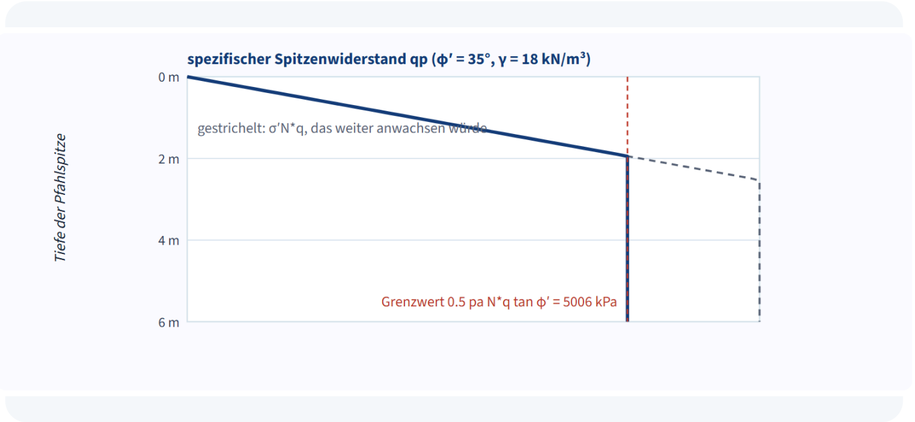
3 Grenzwert

$$q_l = 0.5\, p_a N_q^* \tan\varphi' = 0.5(100)(143.0)\tan 35^\circ = 5{,}006\ \text{kPa}$$

4 Einheitlicher Spitzenwiderstand: der kleinere der beiden; der Grenzwert ist maßgebend

$$q_p = \min(51{,}480;\ 5{,}006) = \mathbf{5{,}006}\ \text{kPa}$$

$Q_p = A_p\, q_p = 0.1656 \times 5{,}006 =$ **829 kN**. Ohne die Begrenzung hätte sich etwa 8,528 kN ergeben.



Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Vesic: Der Sand unter der Spitze erweitert sich wie ein Hohlraum

THEORIE

Vesic leitet den Spitzenwiderstand **aus der Theorie der Hohlraumaufweitung** ab: Die Spitze weitet einen Hohlraum im umgebenden Boden auf; daher gehen in die Lösung nicht nur die **Festigkeit**, sondern auch die **Steifigkeit** des Sandes ein.

$$Q_p = A_p \, \bar{\sigma}'_o \, N^*_\sigma$$

Dabei ist $\bar{\sigma}'_o$ nicht **vertikal**, sondern die **mittlere wirksame Normalspannung** in Höhe der Pfahlspitze:

$$\bar{\sigma}'_o = \frac{1 + 2K_o}{3} \, q' \qquad K_o = 1 - \sin\varphi'$$

K_o: Erdruhedruckbeiwert

q': wirksame vertikale Spannung in Höhe der Pfahlspitze ($= \sigma'_v$)

ZUSAMMENHANG MIT MEYERHOF

$$N^*_\sigma = \frac{3 \, N^*_q}{1 + 2K_o}$$

Die Form ist dieselbe wie bei Meyerhof; die beiden Verfahren unterscheiden sich darin, **woraus der Beiwert abgeleitet wird**, nicht in der Form der Gleichung.

Vesic: reduzierter Steifigkeitsindex

THEORIE

N^*_σ hängt vom **reduzierten Steifigkeitsindex** I_{rr} des Sandes und von φ' ab; I_{rr} berücksichtigt auch die Volumenänderung in der plastischen Zone:

$$I_{rr} = \frac{I_r}{1 + I_r\,\Delta} \qquad I_r = \frac{E_s}{2(1+\mu_s)\,q'\tan\varphi'} = \frac{G_s}{q'\tan\varphi'}$$

E_s : Elastizitätsmodul des Bodens, μ_s : Querdehnzahl, G_s : Schubmodul

Δ : mittlere volumetrische Verzerrung in der plastischen Zone unter der Spitze

PRAKTISCHE ANSÄTZE (CHEN UND KULHAWY, 1994; 25° ≤ φ′ ≤ 45°)

$$\frac{E_s}{p_a} = m \qquad \mu_s = 0.1 + 0.3\,\frac{\varphi' - 25}{20} \qquad \Delta = 0.005\left(1 - \frac{\varphi' - 25}{20}\right)$$

EINZIGE EINGABE: m = E_s / p_a

Sand	m
locker	100 – 200
mitteldicht	200 – 500
dicht	500 – 1000

Der Steifigkeitsindex liegt im Allgemeinen bei **75 – 150** (Sand mit bezogener Lagerungsdichte von 50 – 80 %)

Falls CPT vorliegt: $I_r = 300/F_r(\%)$ (mechanisch), $170/F_r(\%)$ (elektrischer Konus)

Vesic: Schritt für Schritt

THEORIE

BERECHNUNGSSCHRITTE

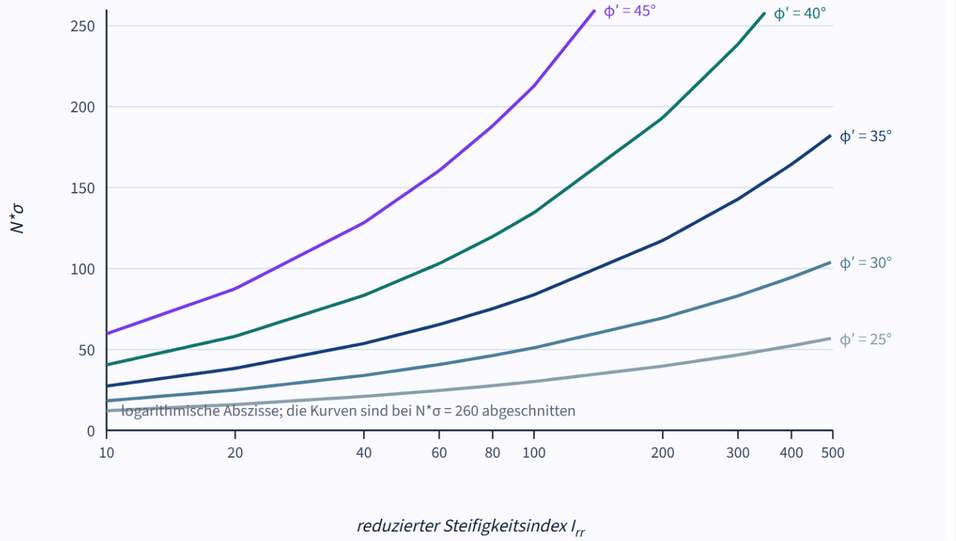
1. $K_o = 1 - \sin\varphi'$ und $\bar{\sigma}_o = (1 + 2K_o)q'/3$

2. $E_s = m \cdot p_a$, μ_s, I_r

3. Δ und $I_{rr} = I_r/(1 + I_r\Delta)$

4. N^*_σ aus φ' und I_{rr} (aus der Tabelle, logarithmische Interpolation)

5. $q_p = \bar{\sigma}_o N^*_\sigma$ und $Q_p = A_p q_p$



Eine Kurve für jedes φ': **N^*_σ nimmt mit steigender Steifigkeit zu**; dichter und steifer Sand liefert einen viel größeren Spitzenwiderstand als lockerer Sand.

Aufgabe

BEISPIEL

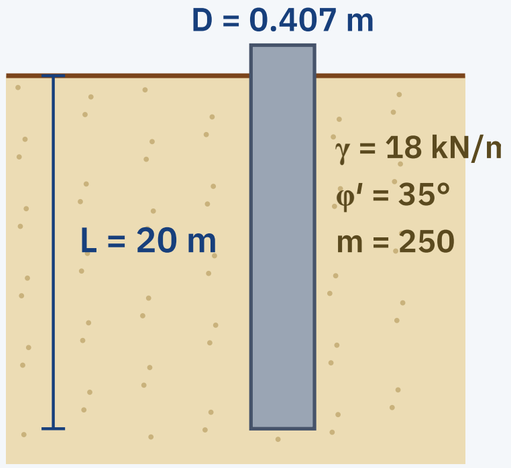
Gegeben

Pfahl	**Wie Beispiel 2: D = 0.407 m, L = 20 m**
Sand	$\gamma = 18\ \mathrm{kN/m^3}$, $\varphi' = 35°$
Grundwasser	**keine**
Verhältnis der Elastizitätsmoduln	$m = E_s/p_a = 250$ **(mitteldicht – dicht)**
Atmosphärendruck	$p_a = 100\ \mathrm{kPa}$

GESUCHT

Nach dem Verfahren von Vesic (1977) ist der **Spitzenwiderstand** Q_p des Pfahls zu ermitteln.

Wirksame Spannung an der Spitze: q′ = 18(20) = 360 kPa



Lösung (1/3)

LÖSUNG

1 Erdruhedruckbeiwert und mittlere wirksame Normalspannung

$$K_o = 1 - \sin 35^\circ = 0.426 \qquad \bar{\sigma}'_o = \frac{1 + 2(0.426)}{3}(360) = \mathbf{222.3}\ \text{kPa}$$

2 Bodeneigenschaften

$$E_s = m\, p_a = 250(100) = 25{,}000\ \text{kPa} \quad \mu_s = 0.1 + 0.3\frac{35 - 25}{20} = 0.25$$

3 Steifigkeitsindex und volumetrische Einheitsverformung

$$I_r = \frac{25{,}000}{2(1 + 0.25)(360)\tan 35^\circ} = \mathbf{39.7} \qquad \Delta = 0.005\left(1 - \frac{35 - 25}{20}\right)\frac{360}{100} = 0.0090$$

Lösung (2/3)

LÖSUNG

4 Reduzierter Steifigkeitsindex

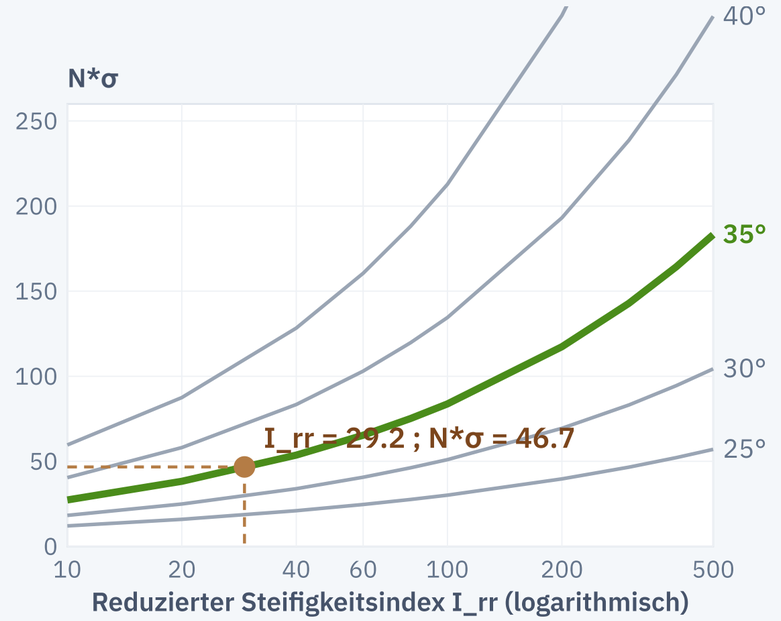
$$I_{rr} = \frac{I_r}{1 + I_r \Delta} = \frac{39.7}{1 + (39.7)(0.0090)} = \mathbf{29.2}$$

5 N*σ: in der Tabelle logarithmische Interpolation zwischen 20 und 40 für die Zeile φ′ = 35° und I_{rr} = 29.2

$$N_\sigma^* = 38.32 + \frac{\log 29.2 - \log 20}{\log 40 - \log 20}\,(53.67 - 38.32)$$

$$= \mathbf{46.7}$$

Im Diagramm schneidet die grüne Kurve φ′ = 35° die senkrechte Linie I_{rr} = 29.2 bei **$N^*_\sigma \approx 46.7$**.



Lösung (3/3)

LÖSUNG

6 Einheitlicher Spitzenwiderstand

$$q_p = \bar{\sigma}'_o N^*_\sigma = 222.3(46.7) = \mathbf{10{,}389}\ \mathrm{kPa}$$

7 Spitzenwiderstand

$$Q_p = A_p\, q_p = 0.1656(10{,}389) = \mathbf{1{,}721}\ \mathrm{kN}$$

Für denselben Pfahl **Meyerhof: 829 kN**, **Vesic: 1,721 kN**. Da Vesic die Steifigkeit des Sandes (m = 250) berücksichtigt, ergibt sich etwa das 2.1-fache des begrenzten Wertes nach Meyerhof.

Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Coyle und Castello: empirisches N*q

THEORIE

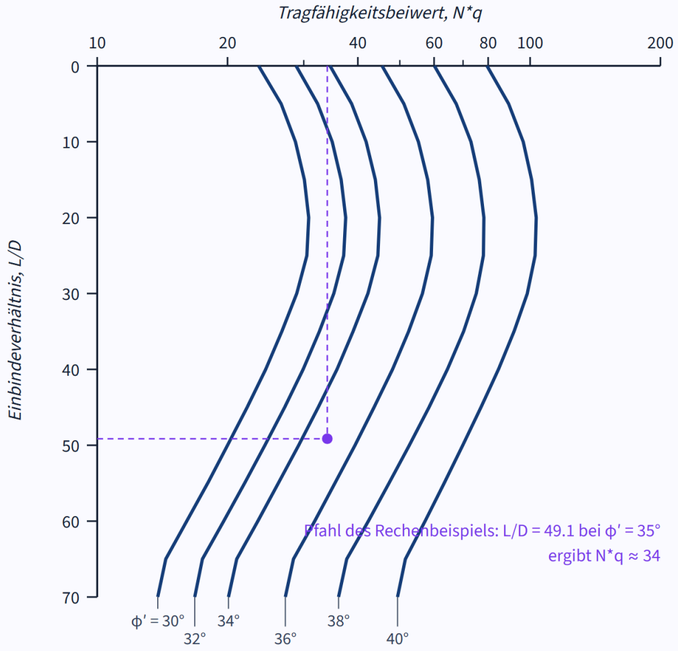
Coyle und Castello untersuchten **24 großmaßstäbliche Feldbelastungsversuche an Rammpfählen** und schlugen für Sand folgende Beziehung vor:

$$Q_p = q' \, N_q^* \, A_p$$

q′ ist die wirksame vertikale Spannung an der Spitze; N^*_q hängt neben φ′ auch vom **Einbindungsverhältnis L/D** ab (Nomogramm, seitlich).

Der Beiwert ist **viel kleiner** als der von Meyerhof: etwa **34** für φ′ = 35° und einen tiefen Pfahl gegenüber **143** bei Meyerhof. Denn er ist nicht an einen Bruchmechanismus, sondern an **gemessene Tragfähigkeiten** angepasst.

Sobald das Einbindeverhältnis etwa 20 überschreitet, **sinkt** der Beiwert: Ein längerer Pfahl gleichen Durchmessers erhält ein kleineres N^*_q.



Aufgabe

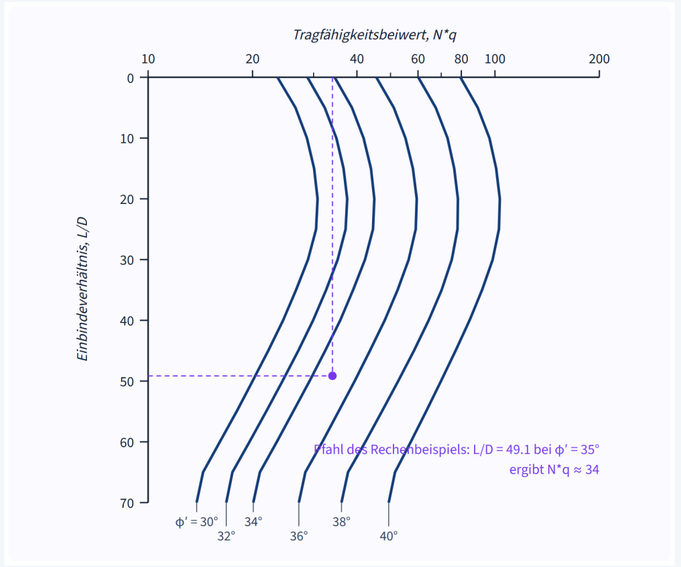
BEISPIEL

Gegeben

Pfahl und Sand	**Gleich wie Beispiel 2: L = 20 m, D = 0.407 m, φ′ = 35°, γ = 18 kN/m³**
Einbindeverhältnis	$L/D = 20/0.407 = 49.1$
Aus dem Nomogramm abgelesener Beiwert	$N_q^* \approx 34$ **(Bild 7; φ′ = 35°, L/D ≈ 49)**

GESUCHT

Nach dem Verfahren von **Coyle und Castello (1981)** den **Spitzenwiderstand** Q_p des Pfahls ermitteln.



Lösung

LÖSUNG

1 Wirksame Spannung an der Spitze und Beiwert (aus dem Nomogramm, näherungsweise abgelesen)

$$q' = \gamma L = 18(20) = 360\ \text{kPa} \qquad N_q^* \approx 34$$

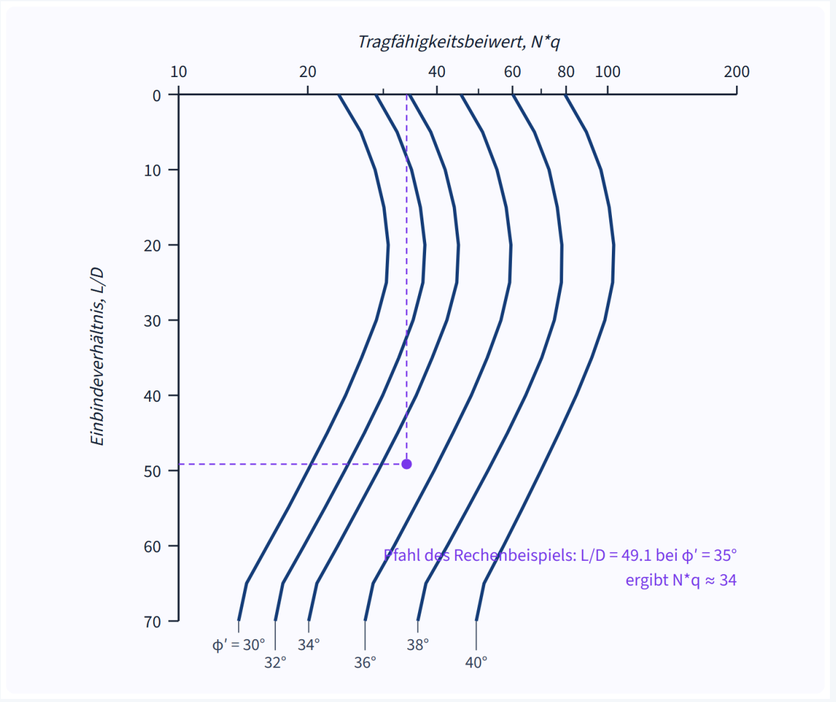
2 Einheitlicher Spitzenwiderstand

$$q_p = q' N_q^* = 360(34) = 12{,}240\ \text{kPa}$$

3 Spitzenwiderstand

$$Q_p = A_p q_p = 0.1656(12{,}240) = \mathbf{2{,}028}\ \text{kN}$$

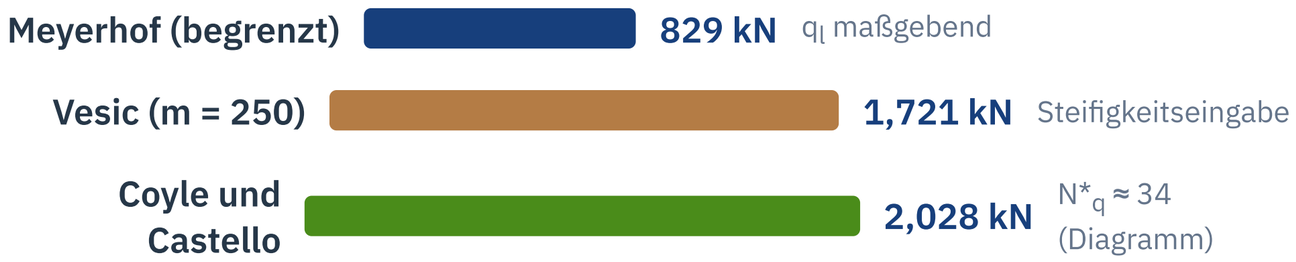
Der aus dem Nomogramm abgelesene N^*_q ist ein Näherungswert; er kann je nach φ′ und L/D um ±1 – 2 Einheiten schwanken. Das Ergebnis ist das größte der drei Verfahren: **2,028 kN**.



Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Drei Verfahren, derselbe Pfahl

THEORIE



Da die Verfahren auf **voneinander abweichenden Annahmen** beruhen, weichen auch die Ergebnisse voneinander ab. Die Spannweite ist ein ehrlicher Hinweis darauf, wie gut der Spitzenwiderstand bekannt sein kann.

Meyerhof: **konservativ** aufgrund des Grenzwerts

Vesic: führt die Lagerungsdichte des Sandes explizit über **m** ein

Coyle–Castello: basiert auf gemessenen Rammpfählen; das Ablesen der Tafel ist näherungsweise

In der Praxis: Es werden mindestens zwei Verfahren berechnet, die Bandbreite wird betrachtet, und ohne **Probebelastung** oder lokale Erfahrung wird ein Wert nahe dem vorsichtigen Ende gewählt.

Mantelreibung: f = K σ′ tanδ′

THEORIE

Die Mantelreibung ist die Summe der Einheitsreibung entlang der Pfahlschaftoberfläche:

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

Die Einheitsreibung f wird in Abhängigkeit von der Tiefe wie folgt angesetzt (L′: kritische Tiefe):

$$f = K \, \sigma'_o \tan \delta' \qquad (0 \le z \le L')$$
$$f = f_{z=L'} \qquad (L' \le z \le L)$$

p : Umfang des Pfahlquerschnitts, ΔL : Länge, über die p und f als konstant angenommen werden

K : Beiwert des effektiven seitlichen Erddrucks, σ'_o : wirksame vertikale Spannung in dieser Tiefe

δ′ : Boden–Pfahl-Reibungswinkel (üblicherweise 0.5φ′ – 0.8φ′)

K-WERTE (NACH PFAHLTYP)

Pfahlart	K
Gebohrt oder eingespült	≈ Ko = 1 – sin φ′
Gerammt, geringe Verdrängung	≈ Ko bis 1.4Ko = 1.4(1 – sin φ′)
Gerammt, große Verdrängung	≈ Ko bis 1.8Ko = 1.8(1 – sin φ′)

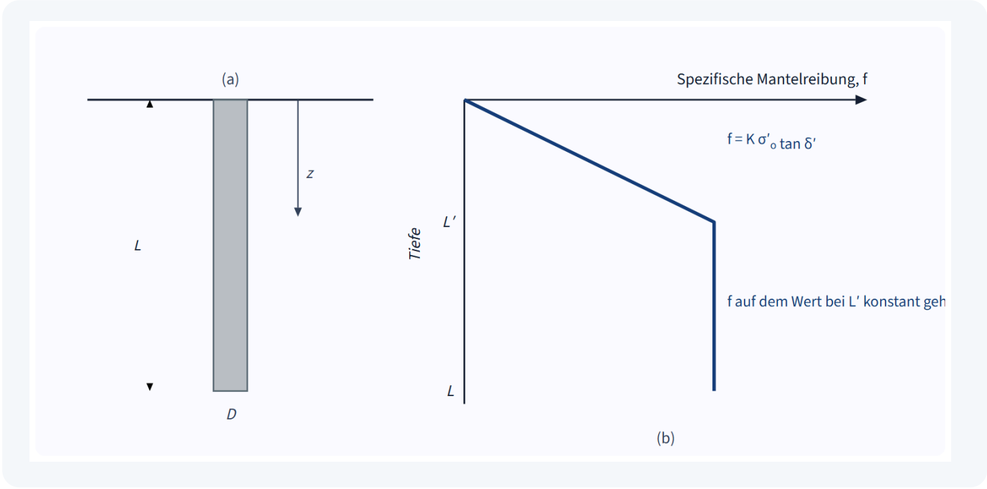
Rammen verdichtet den Sand um den Pfahl (bis etwa 2.5D)

Ein Pfahl mit hoher Verdrängung nimmt mehr Mantelreibung auf als ein Pfahl mit geringer Verdrängung

Bohr-/Jetpfähle ergeben eine geringere Mantelreibung als Rammpfähle

Kritische Tiefe: Warum nimmt die Mantelreibung nicht zu?

THEORIE



Die gemessene Mantelreibung wächst mit der Tiefe **nicht unbegrenzt** wie die wirksame Spannung; sie nimmt bis zu einer ungefähren **kritischen Tiefe** zu und bleibt danach konstant.

$$L' \approx 15\,D$$

Die übliche Erklärung ist die **Gewölbebildung**: Der Sand überträgt nicht die gesamte Überlagerungsspannung rund um den Pfahlschaft auf den Pfahl. Das Modul hält die wirksame Spannung unterhalb L′ **auf ihrem Wert in der Tiefe L′**; die Einheitsmantelreibung bleibt bis zur Spitze konstant.

> Für L′ gibt die Quelle 15D – 20D an; konservativer Wert **15D**

Aufgabe

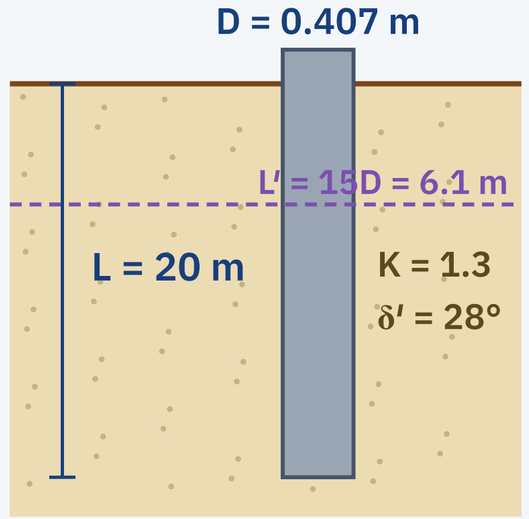
BEISPIEL

Gegeben

Pfahl und Sand	**Gleich wie Beispiel 2: L = 20 m, D = 0.407 m, γ = 18 kN/m³**
Umfang	$p = 4D = 4(0.407) = 1.628\ \text{m}$
Beiwerte	$K = 1.3$ **(Rammpfahl mit großer Verdrängung),** $\delta' = 28^\circ$ **(**$\approx 0.8\varphi'$**)**

GESUCHT

Unter Berücksichtigung der kritischen Tiefe (L′ = 15D) ist die **Mantelreibung** Q_s des Pfahls zu bestimmen.



Lösung

LÖSUNG

1 Kritische Tiefe und die Spannung in dieser Tiefe

$$L' = 15D = 15(0.407) = \mathbf{6.105}\ \text{m} \qquad \sigma'(L') = 18(6.105) = 109.9\ \text{kPa}$$

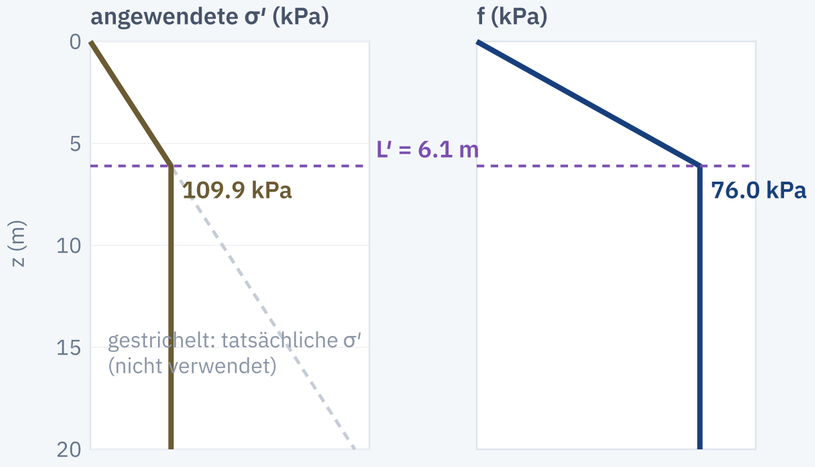
2 L′ und die Einheitsmantelreibung am Pfahlfuß (unterhalb L′ konstant)

$$f_{L'} = K\,\sigma'(L')\tan\delta' = 1.3(109.9)\tan 28^\circ = \mathbf{76.0}\ \text{kPa}$$

3 Q_s: Dreieck (0 – L′) + Rechteck (L′ – L) Fläche × Umfang

$$Q_s = p\left[\tfrac{1}{2} f_{L'} L' + f_{L'}(L - L')\right]$$
$$= 1.628\left[\tfrac{1}{2}(76.0)(6.10) + (76.0)(13.89)\right]$$

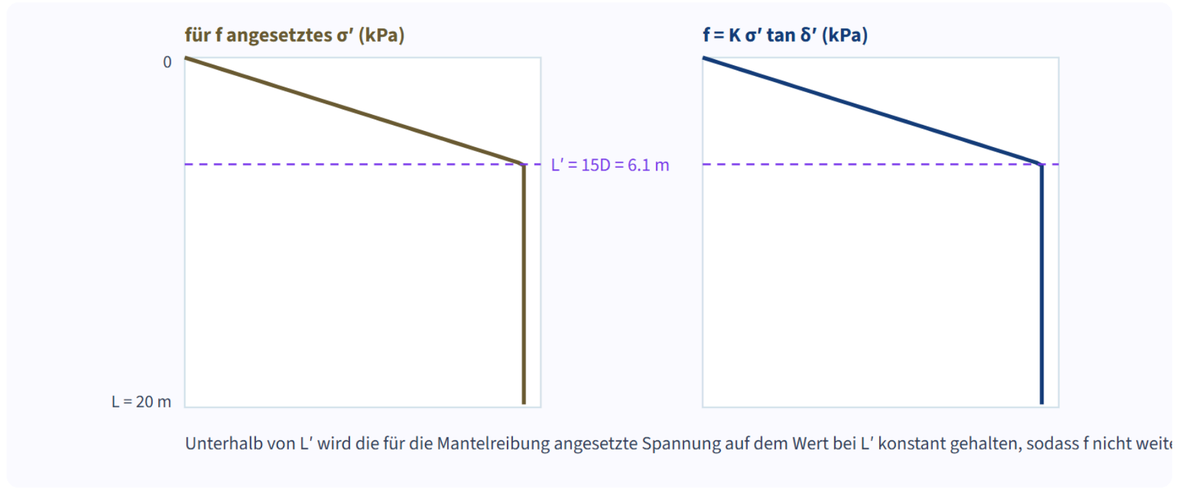
Q_S = 1,628 [231.9 + 1,055.4] = **2,096 kN**.



Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Was passiert, wenn man die kritische Tiefe vernachlässigt?

THEORIE



Berechnen wir denselben Pfahl **ohne Berücksichtigung von L′** unter der Annahme, dass die Spannung bis zur Spitze linear zunimmt:

$$f_L = 1.3(360)\tan 28^\circ = 248.8\ \text{kPa}$$
$$Q_s = p\,\tfrac{1}{2} f_L L = 4{,}051\ \text{kN}$$

2,096 kN statt **4,051 kN**: etwa **93% zu viel**. Die kritische Tiefe bei einem langen Pfahl zu übergehen, erzeugt einen großen Fehler auf der unsicheren Seite.

Coyle und Castello: mit einer mittleren Spannung

THEORIE

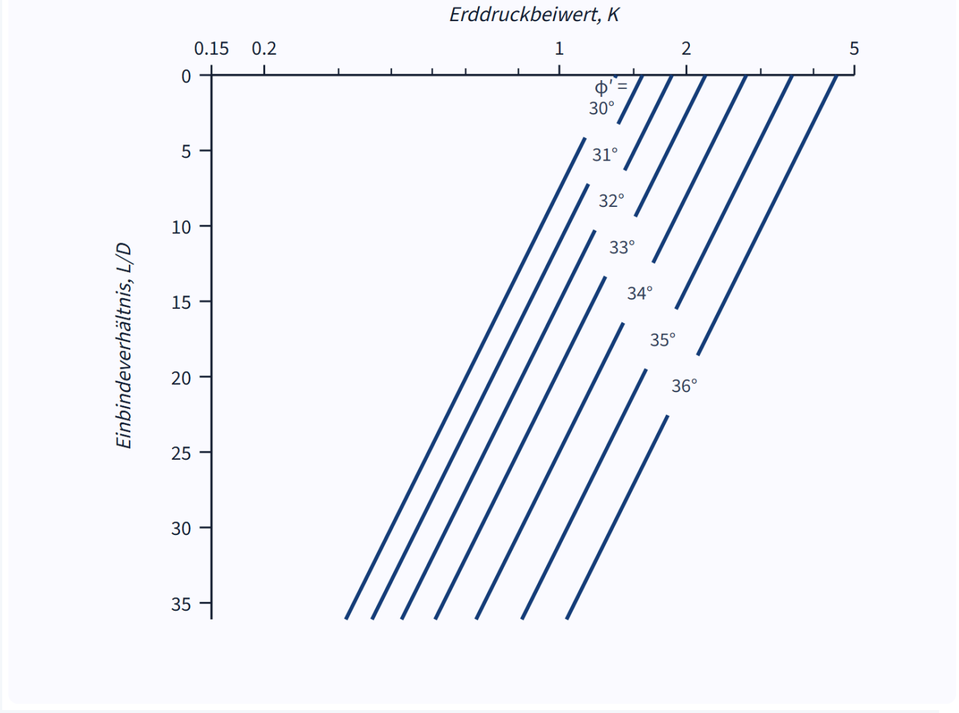
Coyle und Castello schlugen vor, die Mantelreibung **in einem einzigen Schritt mit der mittleren wirksamen Spannung über die gesamte Einbindelänge** zu berechnen:

$$Q_s = f_{av}\, p\, L = (K\, \bar{\sigma}'_o \tan\delta')\, p\, L$$
$$\delta' = 0.8\varphi'$$

K wird aus Versuchen bestimmt und nach **L/D** und φ′ aus dem Nomogramm (seitlich) abgelesen.

Es gibt keine gesonderte kritische Tiefe: die Mittelwertbildung übernimmt dies

Daher können die beiden Umfangsmethoden bei **langen Pfählen große Unterschiede** ergeben



Aufgabe

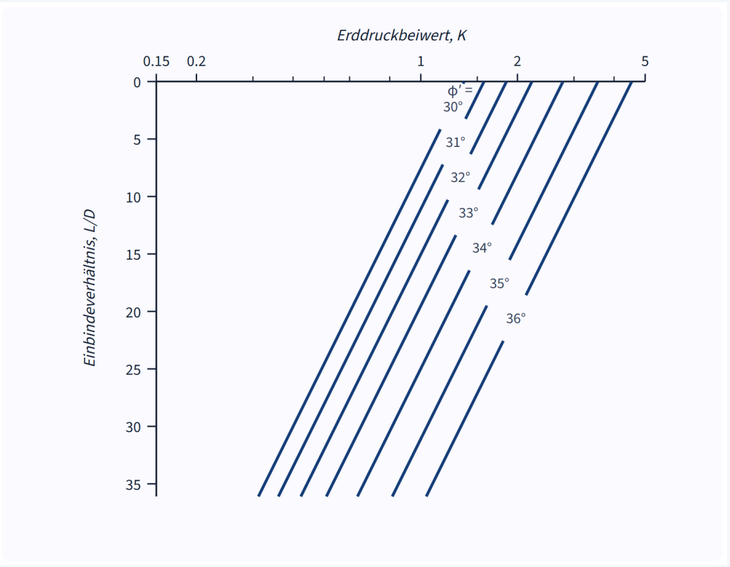
BEISPIEL

Gegeben

Pfahl und Sand	**Gleich wie Beispiel 2: L = 20 m, D = 0.407 m, φ′ = 35°, γ = 18 kN/m³**
Beiwert	$K \approx 0.41$ **(Bild 10; das Nomogramm ist bis L/D = 36 gezeichnet, für L/D ≈ 49 wird die Kurve durch Extrapolation abgelesen; diesen Wert in das Feld K des Moduls eingeben, das Modul trägt 0.48 aus seiner eigenen Nomogrammablesung ein)**
Reibungswinkel	$\delta' = 0.8\varphi' = 0.8(35°) = 28°$

GESUCHT

Nach dem Verfahren von **Coyle und Castello (1981)** ist die **Mantelreibung** Q_s des Pfahls zu ermitteln.



Lösung

LÖSUNG

1 Mittlere wirksame Spannung entlang des Pfahlschafts (homogener Sand, kein Grundwasserspiegel)

$$\bar{\sigma}'_o = \frac{\gamma L}{2} = \frac{18(20)}{2} = \mathbf{180}\ \text{kPa}$$

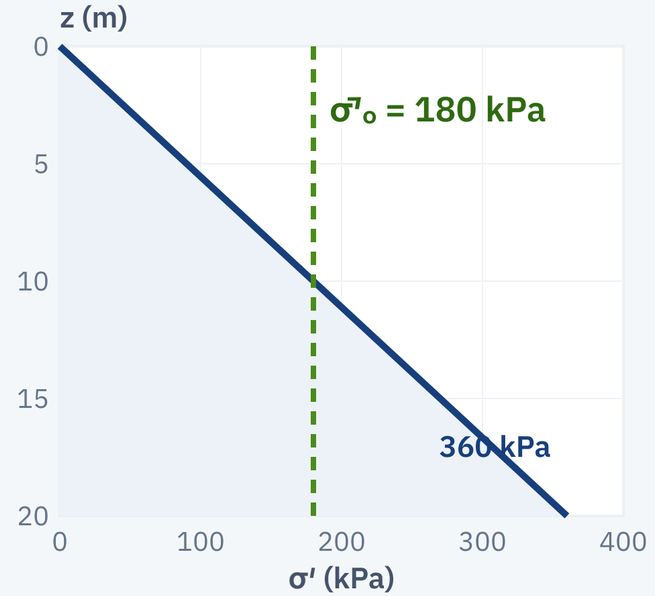
2 Mittlere Einheitsmantelreibung

$$f_{av} = K\,\bar{\sigma}'_o \tan\delta' = 0.41(180)\tan 28^\circ = \mathbf{39.2}\ \text{kPa}$$

3 Mantelreibung

$$Q_s = f_{av}\,p\,L = 39.2(1.628)(20) = \mathbf{1{,}278}\ \text{kN}$$

Das Verfahren nach K–δ′ (mit L′) ergibt **2,096 kN**, Coyle–Castello ergibt **1,278 kN**: Bei diesem langen Pfahl besteht zwischen beiden ein Unterschied von etwa 64 %.



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

Das obere Ende wird gewählt, wenn der Baugrund nur aus wenigen Bohrungen bekannt ist oder wenn die Tragfähigkeit überwiegend über den **Spitzenwiderstand** abgetragen wird

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

Aufgabe

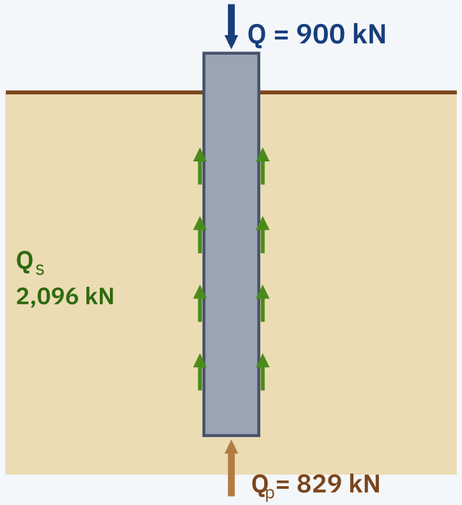
BEISPIEL

Gegeben

Spitzenwiderstand	**Q_p = 829 kN (Meyerhof, Beispiel 2)**
Mantelreibung	**Q_s = 2,096 kN (K–δ′, Beispiel 5)**
Sicherheitsfaktor	**FS = 3**
Arbeitslast auf dem Pfahl	**Q = 900 kN**

GESUCHT

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



Lösung

LÖSUNG

1 Grundbruchspannung

$$Q_u = Q_p + Q_s = 829 + 2{,}096 = \mathbf{2{,}925}\ \text{kN}$$

2 Zulässige Bodenpressung

$$Q_{all} = \frac{Q_u}{FS} = \frac{2{,}925}{3} = \mathbf{975}\ \text{kN}$$

3 Nachweis

$$Q = 900\ \text{kN} \ \leq\ Q_{all} = 975\ \text{kN} \quad \Rightarrow \quad \text{ausreichend}$$

Ausnutzungsgrad Q / Q_{all} = 900 / 975 = **0.92**.



Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Derselbe Pfahl: Q_u und Q_{all} (FS = 3)

THEORIE

Q_u · Q_{all} (kN)

	Q_s: K–δ′ (mit L′) 2,096 kN	Q_s: Coyle–Castello 1,278 kN
Q_p: Meyerhof 829 kN	2,925 · **975**	2,107 · **702**
Q_p: Vesic 1,721 kN	3,817 · **1,272**	2,999 · **1,000**
Q_p: Coyle–Castello 2,028 kN	4,123 · **1,374**	3,305 · **1,102**

Für einen zwanzig Meter langen Pfahl ergeben zwei Mantelreibungs- und drei Spitzenwiderstandsverfahren sechs verschiedene Q_u-Werte: **2,107 – 4,123 kN**. Welche Kombination gewählt wird, ist eine **ingenieurmäßige Entscheidung**.

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

Die Mantelreibung stellt den größten Teil der Gesamtlast dar: Die Entscheidung über die **kritische Tiefe** ist maßgebend

Wenn möglich mit einer **Pfahlprobebelastung** nachweisen

Zusammenfassung

Die wichtigsten Punkte

$Q_u = Q_p + Q_s$; im Sand hängen beide Anteile von der **wirksamen Spannung** ab

Meyerhof: N^*_q aus φ', q_p begrenzt ($q_l = 0.5 p_a N^*_q \tan\varphi'$)

Vesic: $\bar{\sigma}'_o N^*_\sigma$; die Steifigkeit des Sandes (m, I_{rr}) wird berücksichtigt

Coyle und Castello: $N^*_q(\varphi', L/D)$ und $K(\varphi', L/D)$, an gemessene Tragfähigkeiten angepasst

Mantelreibung: $f = K\sigma'\tan\delta'$, konstant unterhalb von **$L' \approx 15D$**

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

Literatur

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

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.

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.

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