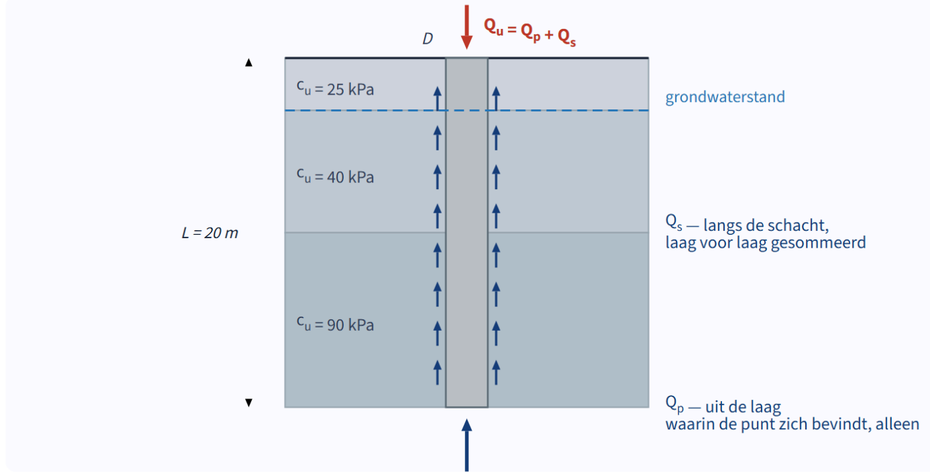
Geotechnisch college · Paalfunderingen

Draagvermogen van palen in klei

College: ongedraineerde puntweerstand, schachtwrijving met de α-, λ- en β-methode, boorpaal. De theorie van elke methode, gevolgd door een rekenvoorbeeld.

Meyerhof · Vesic | α · λ · β-methoden | Boorpaal | Rekenvoorbeelden



Wat leren we in dit college?

- Kunnen uitleggen waarom klei **ongedraineerd** ($\varphi = 0$) wordt beschouwd en waar de effectieve spanning toch nog een rol speelt
- De **puntweerstand** met twee methoden kunnen berekenen: Meyerhof ($N^*_c = 9$) en Vesic (stijfheid)
- De schachtwrijving met **drie benaderingen** kunnen berekenen: α, λ en β
- De bijzondere regels van de **boorpaal** kunnen toepassen: $\alpha^* = 0$ in beide lengten, een eigen uitdrukking voor de punt
- De **toelaatbare gronddruk** bereiken en de resultaten van de benaderingen samen interpreteren

COLLEGESTRUCTUUR

Elke methode wordt in **drie stappen** behandeld:

1 · **Theorie**: hoe werkt de methode, waarom zo?

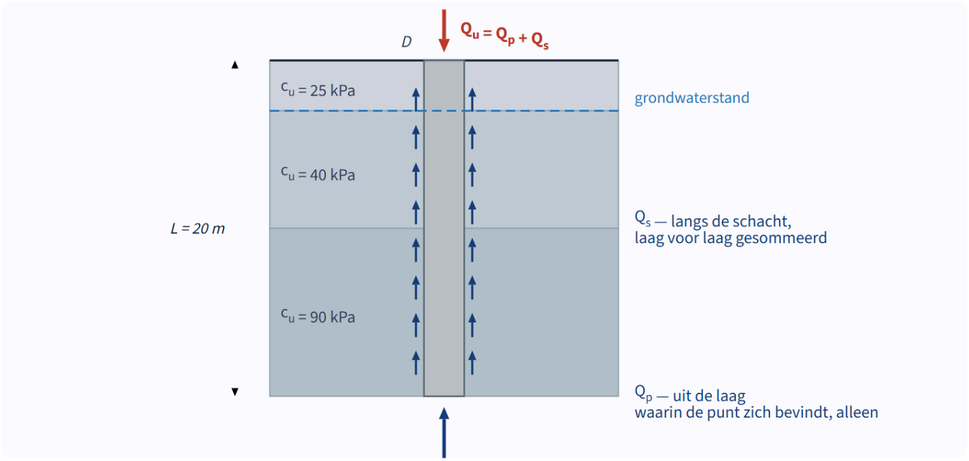
2 · **Opgave**: gegeven en gevraagd

3 · **Oplossing**: stap voor stap, met getallen

De meeste voorbeelden gebruiken dezelfde paal: een buispaal van 20 m lang die door drie kleilagen gaat.

De belasting wordt op twee manieren overgedragen

THEORIE



De paal brengt de belasting **langs twee wegen tegelijk** op de grond over: de klei onder de punt weerstaat als een diepe fundering met **puntweerstand** (Q_p), en de klei langs de schacht weerstaat met **adhesie** (Q_s).

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

In klei wordt de **schachtwrijving** laag voor laag gesommeerd; de **puntweerstand** komt alleen uit de laag waarin de punt zich bevindt.

In een typisch profiel is de punt een zeer klein deel van het totaal: bij de voorbeeldpaal ongeveer **eennegende**; de schacht ongeveer achtnegende. De onzekerheid zit vooral in de schacht.

In dit college: **één paal**, klei, heipaal of boorpaal, constante doorsnede.

Waarom wordt klei met φ = 0 behandeld?

THEORIE

In verzadigde klei komt de belasting van de constructie **veel sneller** dan het water kan afstromen; de klei wordt afgeschoven **zonder volumeverandering**. In dat geval is de sterkte één getal: de **ongedraineerde schuifsterkte** c_u, en de wrijvingshoek is nul.

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

Groot verschil met zand: de weerstand neemt niet langer evenredig met de effectieve spanning toe. Een paal in klei is niet "een paal in zand met andere getallen".

Toch gebruiken **twee methoden** de effectieve spanning: de λ-methode (het gemiddelde over de lengte) en de β-methode (steunt er volledig op). Daarom is de **grondwaterstand** ook hier van belang; deze beïnvloedt de puntweerstand en de α-methode niet.

EFFECTIEVE SPANNING (VOOR λ EN β)

$$\sigma' = \sum \gamma_i h_i \qquad \text{(boven de grondwaterstand}$$

$$\sigma' = \sum (\gamma_{sat,i} - \gamma_w) h_i \qquad \text{(onder de grondwaterstand}$$

γ_W = 9.81 kN/m³

In gelaagde grond verandert de helling van σ′ in elke laag en bij de grondwaterstand

Opgave

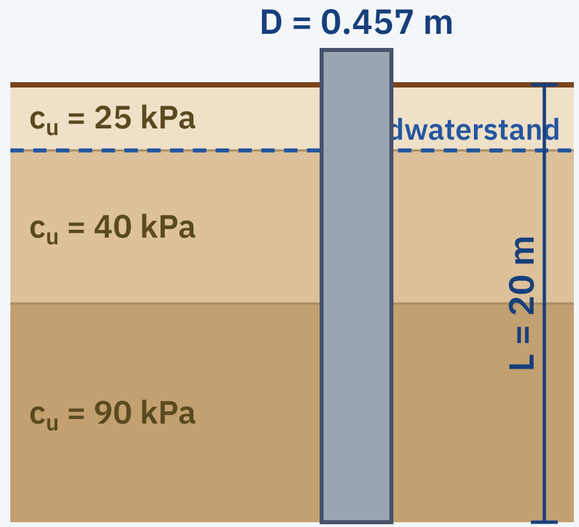
VOORBEELD

Gegeven

Klei 1 (0–3 m)	$c_u = 25\ \mathrm{kPa},\ \gamma = 16\ \mathrm{kN/m^3}$
Klei 2 (3–10 m)	$c_u = 40\ \mathrm{kPa},\ \gamma = 17\ \mathrm{kN/m^3}$
Klei 3 (10–20 m)	$c_u = 90\ \mathrm{kPa},\ \gamma = 18\ \mathrm{kN/m^3}$
Grondwaterstand (GWS)	**op 3.0 m diepte**
Paal	**buispaal, D = 0.457 m, L = 20 m**
Volumiek gewicht van water	$\gamma_w = 9.81\ \mathrm{kN/m^3}$

GEVRAAGD

Bepaal op de laaggrenzen (3, 10 en 20 m) de **effectieve verticale spanning** en langs de staaf de **gemiddelde effectieve spanning** $\bar{\sigma}'_o$.



Oplossing (1/2)

OPLOSSING

1 3 m (grondwaterstand) en laaggrenzen: onder de grondwaterstand γ′ = γ − γ_w

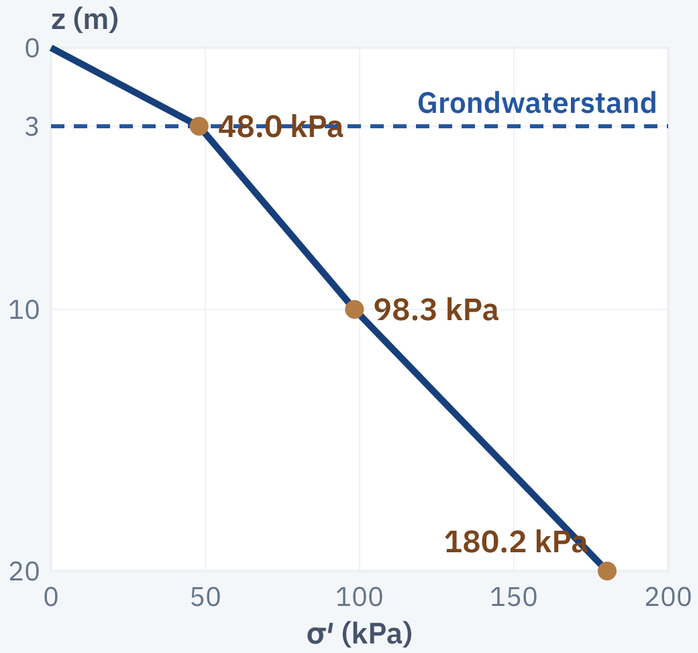
$$\sigma'(3) = 16(3) = \mathbf{48.0}\ \mathrm{kPa}$$

2 10 m diepte (einde van de tweede laag)

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

3 20 m diepte (paalpunt)

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



Oplossing (2/2)

OPLOSSING

4 Oppervlak van het σ′-diagram in elke laag (trapezium)

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

5 Gemiddelde effectieve spanning: totale oppervlakte / lengte

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

Het gemiddelde is kleiner dan de helft van de waarde aan het einde (98.8 < 90.1): de spanning neemt niet lineair met de diepte toe; bij de grondwaterstand verandert de helling. Deze waarde van $\bar{\sigma}'_o$ wordt in de λ-methode gebruikt.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Puntweerstand: klei onder de paalpunt

THEORIE

In ongedraineerde verzadigde klei is de wrijvingshoek nul; de **netto uiterste puntweerstand** van de paal is het product van de ongedraineerde cohesie van de klei onder de paalpunt en een coëfficiënt:

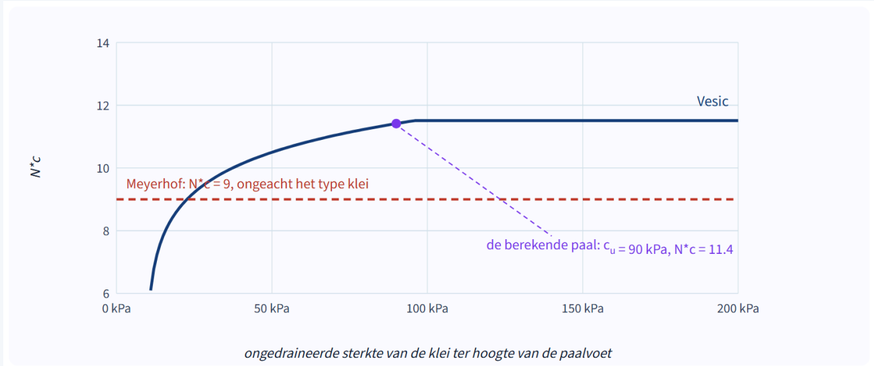
$$Q_p = A_p\, q_p = A_p\, c_u\, N_c^*$$

c_u : ongedraineerde schuifsterkte van de klei **onder de paalpunt**

N^*_c : draagvermogensfactor (twee benaderingen hieronder)

A_p : oppervlak van de paalpunt

> De sterkte van de klei die de paal **doorloopt** werkt niet op de punt: die sterkte hoort bij de schacht.



Twee benaderingen: Meyerhof neemt de coëfficiënt als **9**; Vesic koppelt de coëfficiënt aan de **stijfheid** van de klei.

Meyerhof: constante negen

THEORIE

In verzadigde klei wordt onder ongedraineerde omstandigheden de netto uiterste draagkracht in de vorm van Meyerhof gegeven door de **klassieke negen factoren**:

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

c_u : ongedraineerde cohesie van de grond onder de paalpunt

Vereist geen andere invoer; zolang de paal diep is (enkele diameters volstaan), is het resultaat onafhankelijk van de diepte.

Eenvoud is de kracht ervan; de zwakte is dezelfde: de stijfheid van de klei wordt niet verdisconteerd.

De puntweerstand is klein ten opzichte van de schacht en beïnvloedt de totale capaciteit daarom zeer weinig; een eenvoudige waarde is dus meestal voldoende.

Opgave

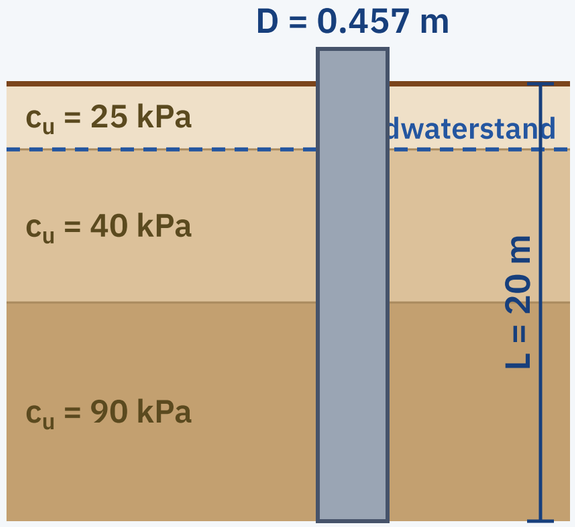
VOORBEELD

Gegeven

Paal	**buispaal, geheide paal**
Diameter	**D = 0.457 m**
Lengte	**L = 20 m**
Klei onder de paalpunt	$c_u = 90\ \mathrm{kPa}$

GEVRAAGD

Bepaal de **puntweerstand** Q_p van de paal volgens de methode van **Meyerhof**.



Oplossing

OPLOSSING

1 Oppervlak van de paalpunt

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

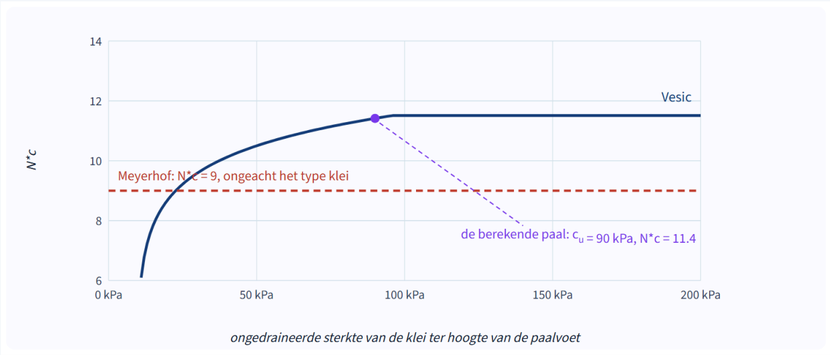
2 Eenheidspuntweerstand (N*c = 9)

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

3 Puntweerstand

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

De methode vereiste geen andere invoer: alleen c_u onder de paalpunt. Q_p = **132.9 kN**.



Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Vesic: stijfheid komt in N*c

THEORIE

Vesic, uit de theorie van **holtevorming**: de coëfficiënt voor het geval φ = 0 wordt afgeleid uit de gereduceerde stijfheidsindex van de klei. In verzadigde klei is de volumeverandering in de plastische zone nul; de reductie valt weg en $\mathbf{I_{rr} = I_r}$:

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

ÉÉN INVOER: c_u onder de paalpunt

O'Neill en Reese (1999): $I_r \approx 50$ ($c_u/p_a = 0.24$), 150 (0.48), 250 – 300 (≥ 0.96). De module benadert dit als volgt:

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

N^*_c — I_{rr} VERBAND

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

Naarmate I_{rr} toeneemt, stijgt de coëfficiënt langzaam: logaritme

Opgave

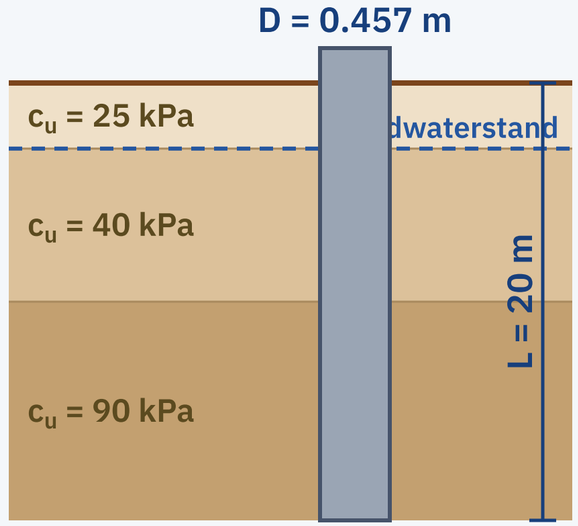
VOORBEELD

Gegeven

Paal	**Zelfde als Voorbeeld 2: D = 0.457 m, L = 20 m**
Klei onder de paalpunt	$c_u = 90\ \mathrm{kPa}$
atmosferische druk	$p_a = 100\ \mathrm{kPa}$

GEVRAAGD

Bereken met de methode van **Vesic (1977)** de **puntweerstand** Q_p van de paal en vergelijk deze met Meyerhof.



Oplossing (1/2)

OPLOSSING

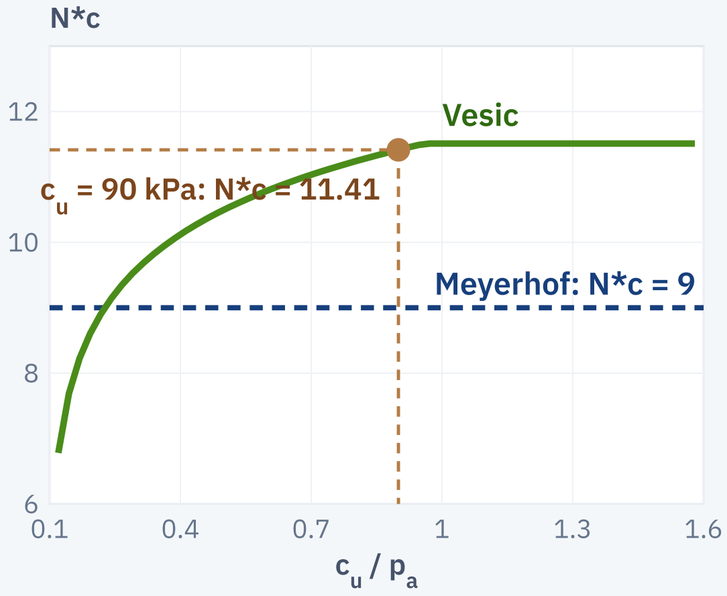
1 Stijfheidsindex ($I_{rr} = I_r$, omdat er in klei geen volumechange optreedt)

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

2 Coëfficiënt N*c

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

De groene curve in de figuur is de factor van Vesic: voor c_u = 90 kPa geldt **N^*_c = 11.41**, ongeveer 27% meer dan de 9 van Meyerhof.



Oplossing (2/2)

OPLOSSING

3 eenheidspuntweerstand

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

4 Puntweerstand

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

Meyerhof: 132.9 kN, **Vesic: 168.5 kN**; het verschil is ongeveer 27%. Omdat de punt een klein deel van het totaal vormt, beïnvloedt dit verschil het totale draagvermogen slechts weinig.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Schachtwrijving: waar het draagvermogen hoofdzakelijk wordt bepaald

THEORIE

In klei is de schachtweerstand de som van de eenheidswrijving over het schachtoppervlak:

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

Veel van de variabelen die de eenheidswrijving bepalen, zijn niet eenvoudig te meten; daarom zijn er **drie benaderingen**:

α-methode: wrijving uitsluitend uit de **ongedraineerde sterkte** (totale spanning, korte termijn)

λ-methode: een combinatie van de **gemiddelde effectieve spanning** over de lengte met de gemiddelde sterkte; één coëfficiënt voor de gehele paal

β-methode: **effectieve spanning** en geconsolideerde wrijvingshoek (gedraineerd, lange termijn)

Bij de voorbeeldpaal draagt de schacht ongeveer **negen tiende** van het totaal; ook hier ligt de onzekerheid.

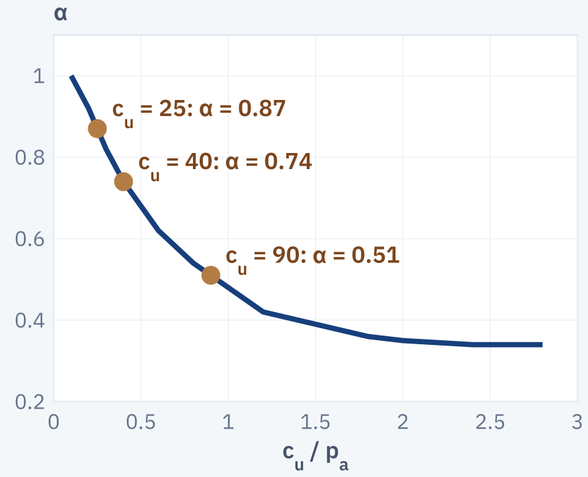
α: een fractie van de sterkte

THEORIE

De eenheidswrijving is de ongedraineerde sterkte vermenigvuldigd met een **empirische adhesiefactor α**:

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

α : adhesiefactor; deze **neemt af** naarmate de klei sterker wordt (een sterkere klei mobiliseert een kleiner deel van zijn sterkte)
α is in feite een functie van de **effectieve spanning** naast c_u
(aanbevelingen van Sladen, Randolph–Murphy/API, NGI-99)



Deze module interpoleert de **tabel (c_u/p_a – α)** die ernaast is weergegeven; de α van de laag kan ook handmatig worden ingevoerd.

α-TABEL (SAMENVATTING)

c_u / p_a	α

Opgave

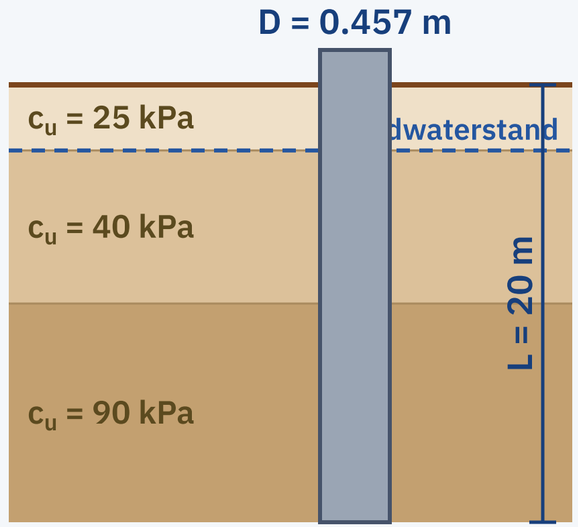
VOORBEELD

Gegeven

Klei 1 (0–3 m)	$c_u = 25\ \text{kPa},\ \gamma = 16\ \text{kN/m}^3$
Klei 2 (3–10 m)	$c_u = 40\ \text{kPa},\ \gamma = 17\ \text{kN/m}^3$
Klei 3 (10–20 m)	$c_u = 90\ \text{kPa},\ \gamma = 18\ \text{kN/m}^3$
Grondwaterstand (GWS)	**op 3.0 m diepte**
Paal	**buispaal, D = 0.457 m, L = 20 m**
Omtrek	$p = \pi D = \pi(0.457) = 1.436\ \text{m}$

GEVRAAGD

Bepaal volgens de **α-methode** de **schachtwrijving** Q_s van de paal. (α door lineaire interpolatie uit de tabel; p_a = 100 kPa)



Oplossing

OPLOSSING

1 α-waarden: voor c_u/p_a = 0.25; 0.40; 0.90 uit de tabel

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

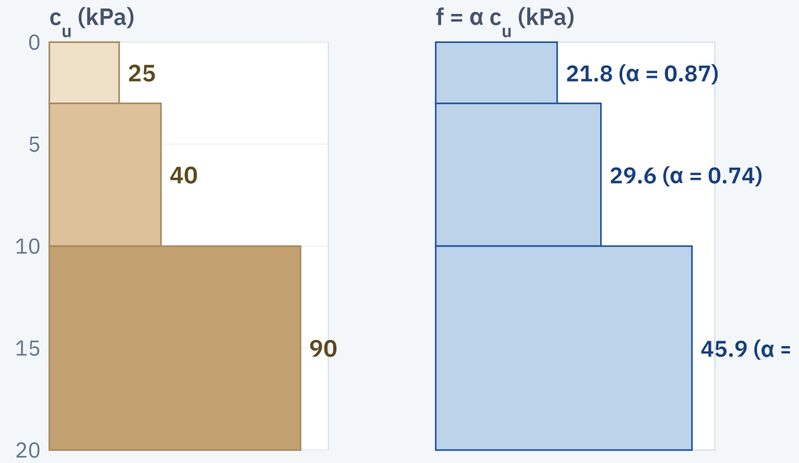
2 Eenheidswrijving per laag f = α c_u

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

3 Q_s = p Σ f H

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

Bijdragen: 94 + 297 + 659 = **1,050 kN**. De sterkste klei geeft de grootste f, maar met een kleinere verhouding van c_u (α = 0.51).



Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

λ: één gemiddelde voor de gehele lengte

THEORIE

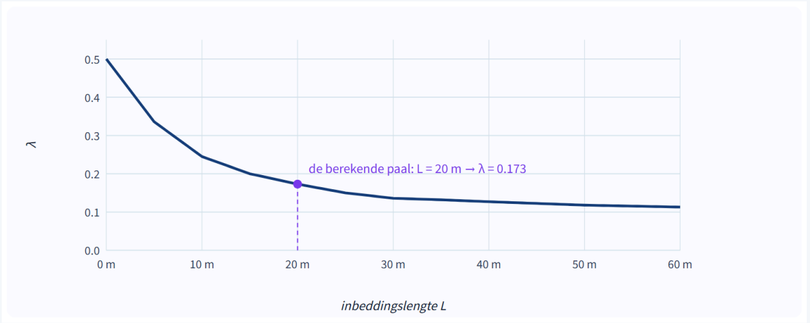
Vijayvergiya en Focht (1972): de **door de paal verdrongen grond** wekt op elke diepte een passieve horizontale druk op, en de gemiddelde eenheidswrijving volgt hieruit:

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

$\bar{\sigma}'_o$: **gemiddelde effectieve verticale spanning** over de ingeéésteé lengte (oppervlak van het σ′-diagram / L)

$\bar{c}_u$: gemiddelde ongedraineerde sterkte, **diktegewogen**: $(c_{u1}L_1 + c_{u2}L_2 + \ldots)/L$

λ : coëfficiënt afhankelijk van de paal**lengte** (aan de zijkant)



λ — INGRAAFDIEPTE

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

Opgave

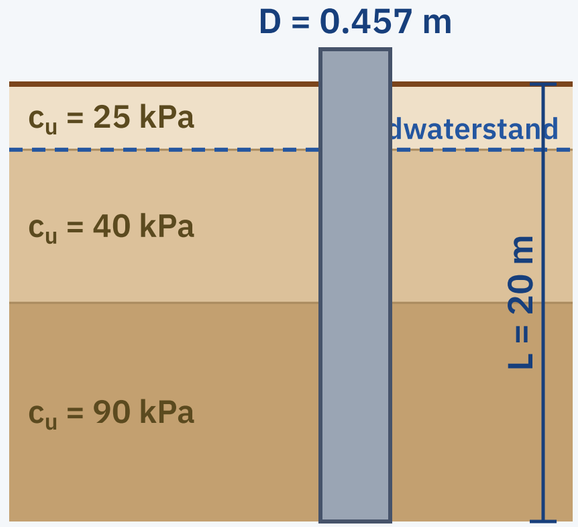
VOORBEELD

Gegeven

Klei 1 (0–3 m)	$c_u = 25\ \mathrm{kPa},\ \gamma = 16\ \mathrm{kN/m^3}$
Klei 2 (3–10 m)	$c_u = 40\ \mathrm{kPa},\ \gamma = 17\ \mathrm{kN/m^3}$
Klei 3 (10–20 m)	$c_u = 90\ \mathrm{kPa},\ \gamma = 18\ \mathrm{kN/m^3}$
Grondwaterstand (GWS)	**op 3.0 m diepte**
Paal	**buispaal, D = 0.457 m, L = 20 m**
Gemiddelde effectieve spanning	$\bar{\sigma}'_o = 98.85\ \mathrm{kPa}$ **(Voorbeeld 1)**

GEVRAAGD

Bepaal met de **λ-methode** de **schachtwrijving** Q_s van de paal.



Oplossing

OPLOSSING

1 Gemiddelde sterkte (met dikte gewogen)

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

2 λ (L = 20 m, uit de tabel) en de gemiddelde eenheidswrijving

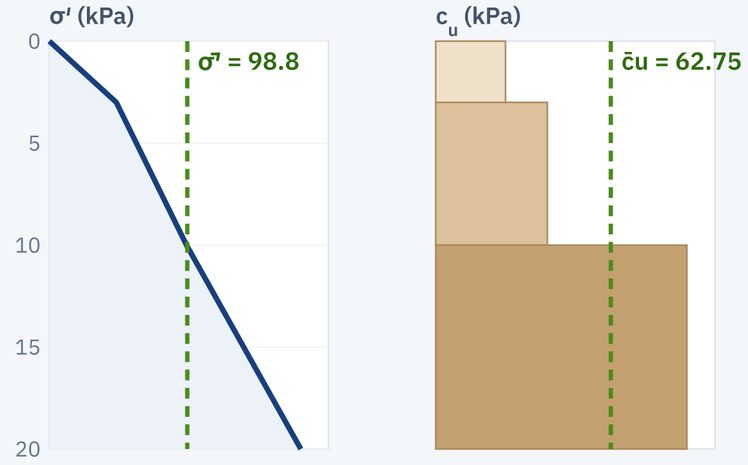
$$\lambda = 0.173$$

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

3 schachtwrijving

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

De λ-methode combineert de twee gemiddelden: **1,114 kN**. In de figuur is het gebied links σ̄′$_o$ en de lijn rechts c̄$_u$.



Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

β: effectieve spanning en geremodelleerde korst

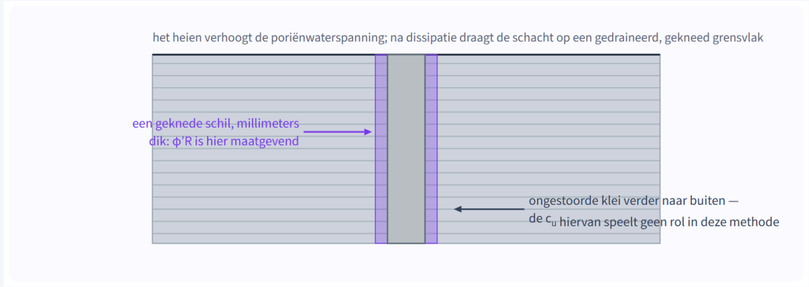
THEORIE

De effectieve-spanningsmethode van Burland (met de overconsolidatiecorrectie van Meyerhof): er wordt helemaal niet naar de ongedraineerde sterkte gekeken; de waarde volgt uit de **verticale effectieve spanning** en de gedraineerde wrijvingshoek van de **geroerde** klei (c′ = 0):

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

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

K : coëfficiënt van horizontale gronddruk; veiligheidshalve **in neutrale toestand** genomen, neemt toe met √OCR voor overgeconsolideerde klei
Voor OCR = 1 reduceert de uitdrukking vanzelf tot de normaal geconsolideerde vorm



φ′R en OCR worden **ingevoerd**, niet via een verband uit de grond afgelezen (in de module opent dit met φ′R = 30°, OCR = 1).

f neemt samen met σ′(z) **toe met de diepte** binnen de laag; ter plaatse van de grens waar β verandert, treedt een sprong op.

Opgave

VOORBEELD

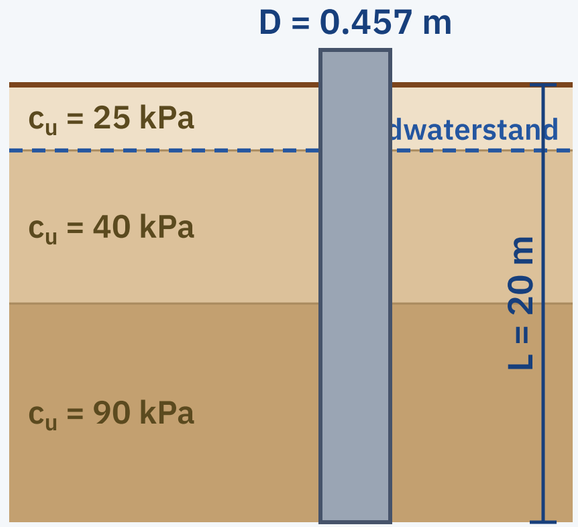
Gegeven

Klei 1 (0–3 m)	$c_u = 25\ \text{kPa},\ \gamma = 16\ \text{kN/m}^3$
Klei 2 (3–10 m)	$c_u = 40\ \text{kPa},\ \gamma = 17\ \text{kN/m}^3$
Klei 3 (10–20 m)	$c_u = 90\ \text{kPa},\ \gamma = 18\ \text{kN/m}^3$
Grondwaterstand (GWS)	**op 3.0 m diepte**
Geroerde wrijvingshoek	$\varphi'_R = 30^\circ$ **(drie lagen)**
Overconsolidatiegraad	$OCR = 1;\ 1;\ 2$ **(laag 3 overgeconsolideerd)**
Paal	**D = 0.457 m, L = 20 m**

GEVRAAGD

Bepaal met de **β-methode** de **schachtwrijving** Q_s van de paal.

(Gemiddelde σ′-waarden per laag uit de oppervlakken van Voorbeeld 1.)



Oplossing (1/2)

OPLOSSING

1 Coëfficiënten 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 Gemiddelde effectieve spanningen per laag (oppervlak / dikte)

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

Oplossing (2/2)

OPLOSSING

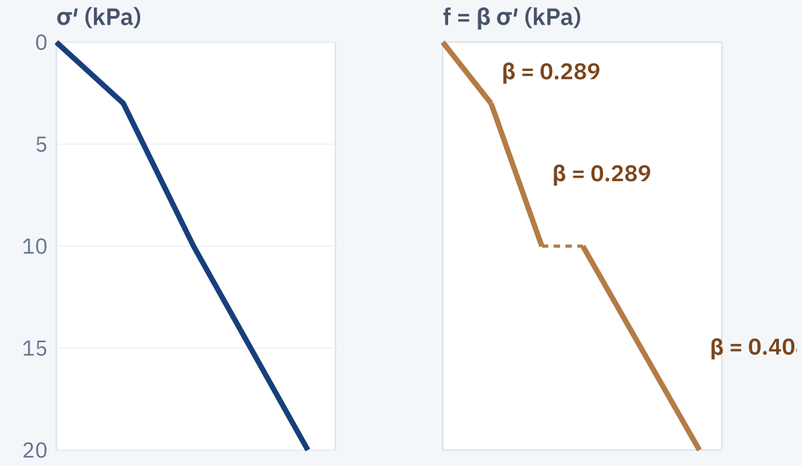
3 Gemiddelde eenheidsschachtwrijving van de laag $\bar{f} = \beta\,\bar{\sigma}'$

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

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

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

Het gemiddelde is de **werkelijke integraal** van de spanning in de laag (niet het gemiddelde van de twee uiteinden): als de grondwaterstand de laag doorsnijdt, kunnen beide meer dan 10% verschillen. Het resultaat is **1,058 kN**.



Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Drie benaderingen, dezelfde paal

THEORIE



In dit profiel liggen de drie binnen **enkele procenten** van elkaar. Maar **in principe** stemmen ze niet overeen; de overeenstemming is een eigenschap van dit profiel.

Bij een zeer **lange** paal daalt λ vanwege de coëfficiënt

In **overgeconsolideerde** klei neemt β toe met √OCR

In **zachte** normaal geconsolideerde klei neemt α toe naar de volledige sterkte van de grond

Een eerlijke lezing: in klei is de schachtweerstand bekend met een onzekerheid van ongeveer **een vijfde** van de berekende waarde. Bij grote projecten is een **paalbelastingproef** daarom de kosten waard.

Boorpalen hebben hun eigen regels

THEORIE

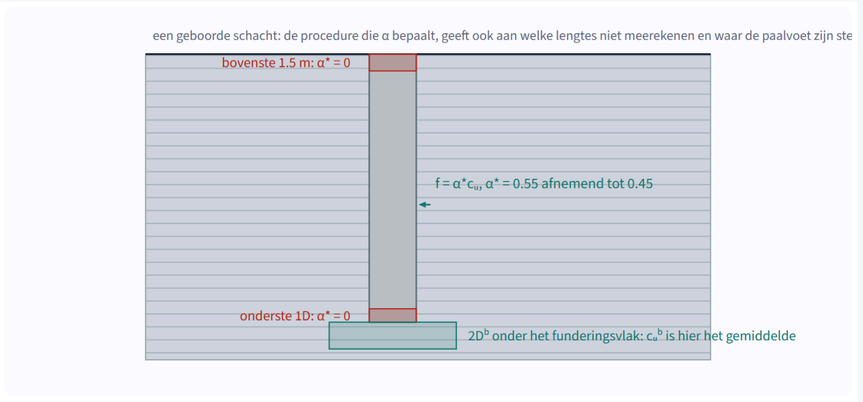
Er wordt een gat geboord en beton gestort: de grond wordt niet verdrongen; de klei op de boorgatwand trekt water aan en **verweekt**, onder de basis hoopt zich gruis op, en er is een **grotere zetting** nodig om de puntweerstand te mobiliseren. De procedure van O'Neill en Reese wijzigt beide helften.

$$\alpha^* = 0 \;\; (\text{boven } 1.5\text{ m en lager } 1D) \qquad \alpha^* = 0.55 \;\; (\text{elders})$$

α* = 0.55 ($c_u/p_a \le 1.5$), afnemend tot 0.45 bij 2.5

De bovenste 1.5 m is de meest verstoorde grond, het meest gevoelig voor krimp vanuit het lichaam; de onderste diameter is de lengte waarover de zool de grond al in beweging brengt

De laagdikten veranderen niet: de diepte en σ′ blijven zoals in het profiel, alleen de wrijvingsdragende lengte verandert



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

c_{ub}: gemiddelde c_u in de zone **$2D_b$** onder de voet. Als $D_b > 1.91$ m, wordt q_p gereduceerd met een factor $F_r \le 1$.

Opgave

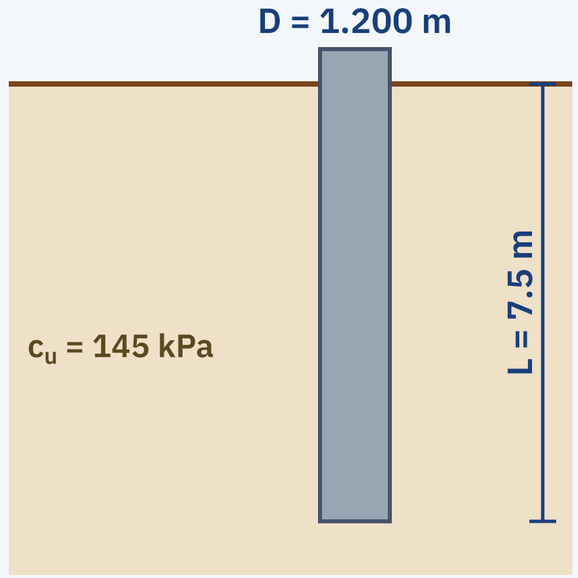
VOORBEELD

Gegeven

Paal	**boorpaal, cirkelvormige doorsnede**
Diameter en lengte	**$D = D_b = 1.2$ m, $L = 7.5$ m**
Klei (homogeen)	$c_u = 145\ \mathrm{kPa}$, $\gamma = 18\ \mathrm{kN/m^3}$
Grondwater	**geen**
Veiligheidsfactor	**FS = 3**

GEVRAAGD

Bepaal de **puntweerstand**, de **schachtwrijving** en het **toelaatbare draagvermogen** van de boorpaal.



Oplossing (1/2)

OPLOSSING

1 Gemiddelde sterkte in de zone $2D_b$ onder de zool en de uitdrukking voor de zool

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

2 q_p = de kleinste van de drie; aangezien $D_b = 1.2\ \text{m} \le 1.91\ \text{m}$ is $F_r = 1$

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

3 Oppervlakte van de voet en puntweerstand

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

$9c_{ub}$ is maatgevend: de formule $6c_{ub}(1 + 0.2L/D_b)$ geeft een grotere waarde, maar het plafond van $9c_u$ treedt in werking. Q_p = **1,476 kN**.

Oplossing (2/2)

OPLOSSING

4 α* en de wrijvingsdragende lengte (bovenaan wordt 1.5 m en onderaan 1D verwaarloosd)

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

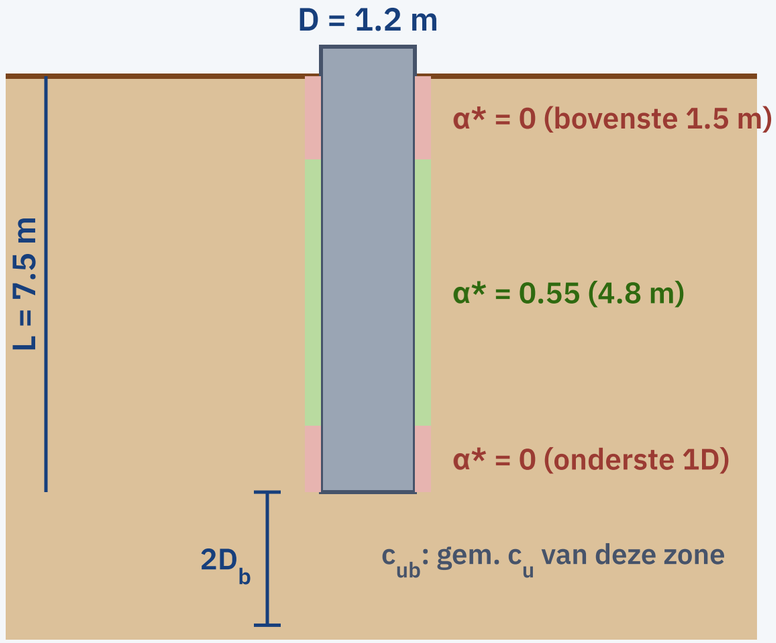
$$L_{eff} = 7.5 - 1.5 - 1.2 = \mathbf{4.8}\ \text{m}$$

5 schachtwrijving

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

6 Uiterst en toelaatbaar draagvermogen

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



Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Totaal met één veiligheidsfactor

THEORIE

Het uiterste draagvermogen is de som van de twee componenten; het toelaatbare draagvermogen wordt gevonden door **één enkele veiligheidsfactor op de gehele som** toe te passen:

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

Gebruikelijke **FS = 2.5 – 4** voor een enkele paal

Bovengrens: wanneer de grond slechts uit enkele boringen bekend is, wanneer de klei **stijf en gescheurd** is of wanneer een **belastingproef** niet gepland is

De punt- en schachtmethoden kunnen **onafhankelijk** van elkaar worden gekozen; de resultaten worden samen geïnterpreteerd

Opgave

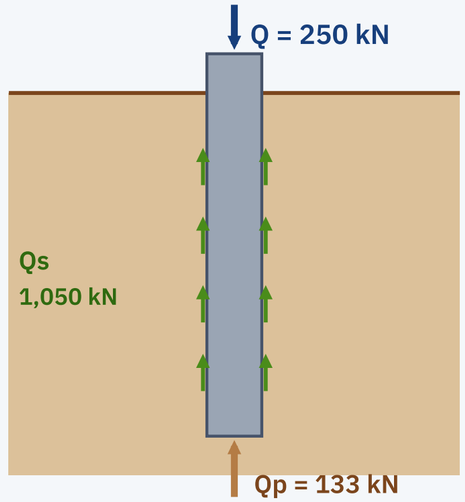
VOORBEELD

Gegeven

Puntweerstand	**Q_p = 132.9 kN (Meyerhof, Voorbeeld 2)**
schachtwrijving	**Q_s = 1,050 kN (α-methode, voorbeeld 4)**
Veiligheidsfactor	**FS = 4**
Werkbelasting op de paal	**Q = 250 kN**

GEVRAAGD

Wat is het **toelaatbare draagvermogen** Q_{all} van de paal? Is de werkbelasting **voldoende**?



Oplossing

OPLOSSING

1 Uiterst draagvermogen

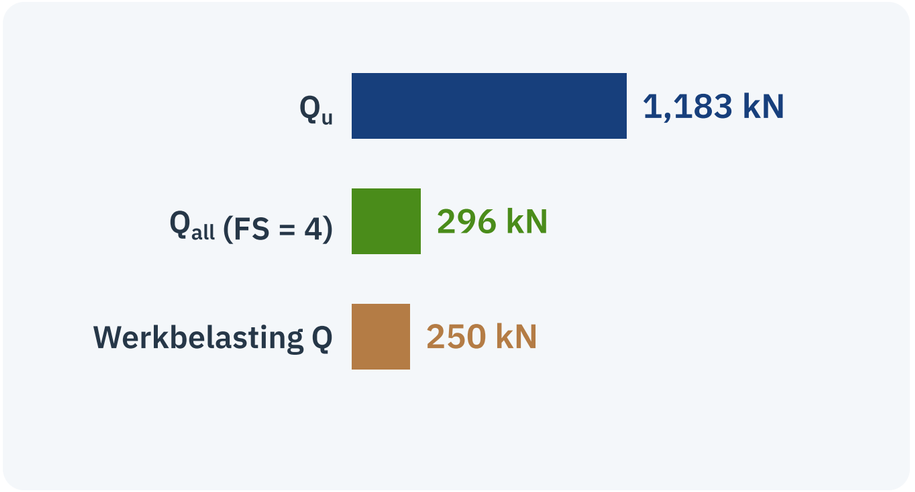
$$Q_u = Q_p + Q_s = 132.9 + 1{,}050.1 = \mathbf{1{,}183}\ \text{kN}$$

2 Toelaatbare gronddruk

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

3 Toets

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



Benuttingsgraad Q / Q_{all} = 250 / 296 = **0.85**. De schacht draagt ongeveer 89% van het totaal.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Zelfde paal: Q_u en 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**

Over de zes combinaties varieert Q_u slechts tussen **1,183 – 1,283 kN**: omdat de punt klein is, beïnvloedt de keuze het totaal zeer weinig; het werkelijke verschil zit in de schachtwrijving.

Interpreteer de bandbreedte, vertrouw niet op één getal

Schachtwrijving is **ongeveer negen tiende** van het totaal

Bij grote werken verifiëren met een **paalbelastingproef**

Samenvatting

Belangrijkste punten

Klei is **ongedraineerd** ($\varphi = 0$, $\tau_f = c_u$); de weerstand is niet evenredig met de effectieve spanning

Punt: Meyerhof $N^*_c = 9$; Vesic $N^*_c = f(I_{rr})$, $I_r \approx 347 c_u/p_a - 33$; de puntweerstand is een klein deel van het totaal

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

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

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

Literatuur

Das, B.M. (2016). Principles of Foundation Engineering, 8th ed. Cengage Learning; deze pagina volgt deze methode.

Terzaghi, K., Peck, R.B. en Mesri, G. (1996). Soil Mechanics in Engineering Practice, 3e druk. Wiley — de α-waarden van Tabel 2.

O'Neill, M.W. and Reese, L.C. (1999). Drilled Shafts: Construction Procedures and Design Methods. FHWA-IF-99-025 — de α-factor voor boorpalen en de stijfheidsindex van een klei.

Reese, L.C. en O'Neill, M.W. (1989). Drilled Shafts: Construction Procedures and Design Methods. FHWA — de basisformule voor een boorpaal in klei.

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 — de √OCR-aanpassing van de β-methode.

Vijayvergiya, V.N. en 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.

OPMERKING

De figuren in deze presentatie zijn overgenomen van de Theoriepagina van GeoTerva; alle numerieke voorbeelden zijn geproduceerd met de eigen berekeningsbibliotheek van de module, en de module geeft dezelfde waarden.

GeoTerva

Online geotechnische berekeningen

Van theorie naar praktijk

Bereken de voorbeeldpaal uit deze presentatie stap voor stap in GeoTerva: de getallen zijn dezelfde.

Module openen →

Theoriepagina →

Openen op de smartphone

Proefmodules vereisen geen registratie.

Wilt u ze in uw colleges gebruiken: info@geoterva.com