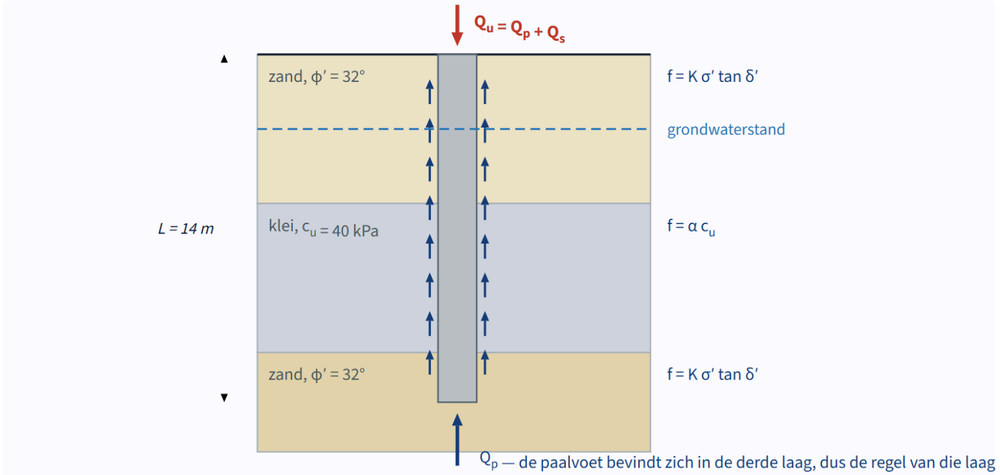
Geotechnisch college · Paalfunderingen

Draagvermogen van een paal in gelaagde grond

College: draagvermogen van een paal die door zand- en kleilagen gaat. Welke regel waar geldt, hoe de effectieve spanning zich door de lagen opbouwt; bij elk onderwerp een rekenvoorbeeld.

- Laagsgewijze berekening
- Punt: laag ter hoogte van de paalpunt
- Regels voor zand + klei
- Boorpaal
- Rekenvoorbeelden



Wat leren we in dit college?

De effectieve spanning **laag voor laag accumuleren**; zien hoe een kleilaag, ook al reikt haar eigen sterkte niet tot in het zand, via haar gewicht het zand eronder beïnvloedt

Weten dat de **puntweerstand** alleen afhangt van de laag waarin de paalpunt zich bevindt en volgens de regel van die laag wordt berekend

De K–δ-regel **in de zandlaag** toepassen (de kritieke diepte L′ = 15D geldt voor de gehele paal) en de α-, λ- en β-regels **in de kleilaag**

Hoe de **schachtwrijving over de lagen wordt gesommeerd**; hoe de sprongen in de wrijving aan de laaggrenzen en het effect van de paallengte worden geïnterpreteerd

Begrijpen dat **bij een boorpaal** het α*-venster en c_{ub} uit meerdere lagen kunnen komen

COLLEGESTRUCTUUR

Elk onderwerp wordt in **drie stappen** behandeld:

1 · **Theorie**: wat is de regel, waarom is dat zo?

2 · **Opgave**: gegeven en gevraagd

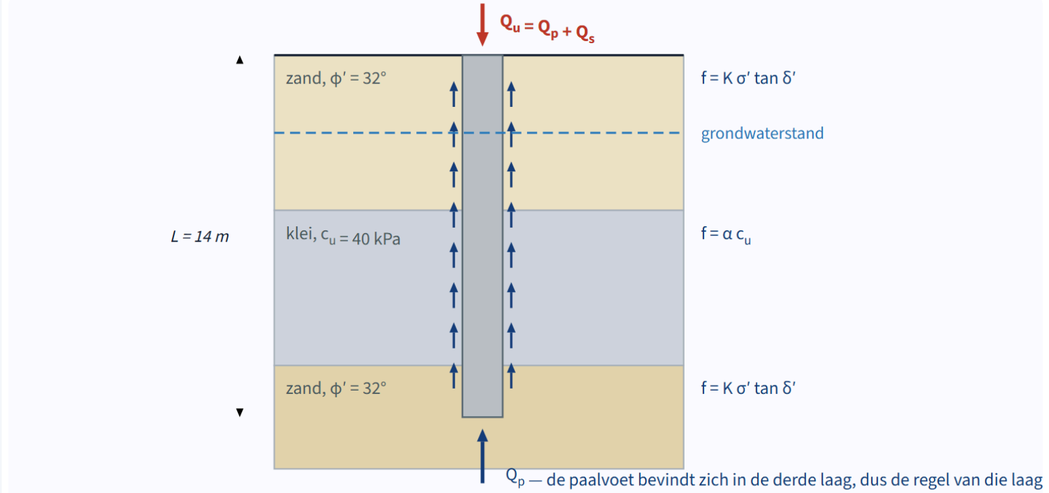
3 · **Oplossing**: stap voor stap, met getallen

De meeste voorbeelden gebruiken dezelfde paal: een paal met een diameter van 0.4 m en een lengte van 14 m, die een profiel van zand–klei–zand doorloopt.

Dit college bouwt voort op de colleges **palen in zand** en **palen in klei**: de regels hebben we daar geleerd, hier bekijken we welke waar geldt.

Elke laag reageert volgens haar eigen regel

THEORIE



Een paal komt zelden in één enkele grondlaag terecht. Het profiel bestaat uit **meerdere lagen**; elke laag wordt als zand of klei gedefinieerd en **de regel van het eigen materiaal** wordt toegepast. Het draagvermogen bestaat weer uit twee delen, maar wordt niet meer uit één formule afgelezen; het wordt **stuk voor stuk opgebouwd**:

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

Geen nieuwe theorie: de zandregels horen bij de zandmodule, de kleiregels bij de kleimodule.

Nieuw is het **berekeningsschema**: welke regel in welk deel van de schacht geldt en hoe de effectieve spanning zich vanuit de bovenliggende lagen opbouwt.

De puntweerstand komt uit **één enkele laag**, de schachtwrijving uit **de som van alle lagen**.

Spanning continu, wrijving stapsgewijs

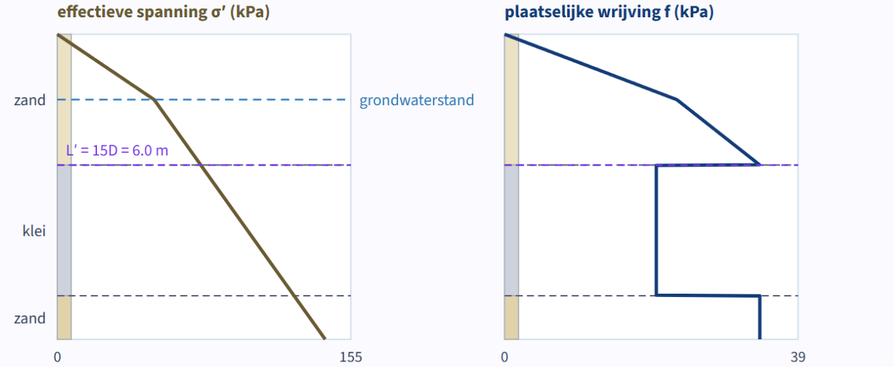
THEORIE

De effectieve verticale spanning is wat de lagen met elkaar verbindt: **het gewicht van elke laag erboven** telt op; boven de grondwaterstand wordt het vochtige volumiek gewicht gebruikt, eronder het effectieve volumiek gewicht.

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

De kleilaag levert geen eigen sterkte aan het zand; maar **door haar gewicht** verandert zij de weerstand die het zand eronder biedt.

De wrijving is echter niet continu: op de grens zand–klei **verandert de regel zelf** en kan de eenheidswrijving een grote sprong vertonen. Deze sprong is geen fout in de berekening maar de **signatuur** van het gelaagde profiel.



De spanning verloopt continu door de lagen; de wrijving vertoont een sprong bij elke laagscheiding omdat de rekenregel daar

Opgave

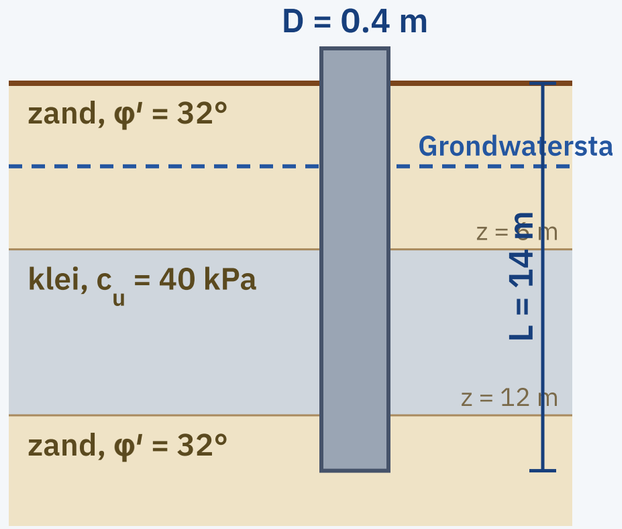
VOORBEELD

Gegeven

Zand 1 (0–6 m)	$\varphi' = 32^\circ$
Klei (6–12 m)	$c_u = 40\ \mathrm{kPa}$
Zand 2 (12–16 m)	$\varphi' = 32^\circ$
Volumiek gewicht	$\gamma = 17,\ \gamma_{sat} = 18\ \mathrm{kN/m^3}$ **(drie lagen)**
Grondwater	**op 3.0 m diepte**
Paal	**geheid, D = 0.4 m, L = 14 m**
Volumiek gewicht van water	$\gamma_w = 9.81\ \mathrm{kN/m^3}$

GEVRAAGD

Bepaal de effectieve verticale spanning op de diepten **3, 6, 12 en 14 m** (14 m = paalpunt).



Oplossing (1/2)

OPLOSSING

1 Tot de grondwaterstand (3 m): de gehele laag is vochtig, γ = 17

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

2 6 m (zand–klei-grens): onder de grondwaterstand $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w = 18 - 9.81$

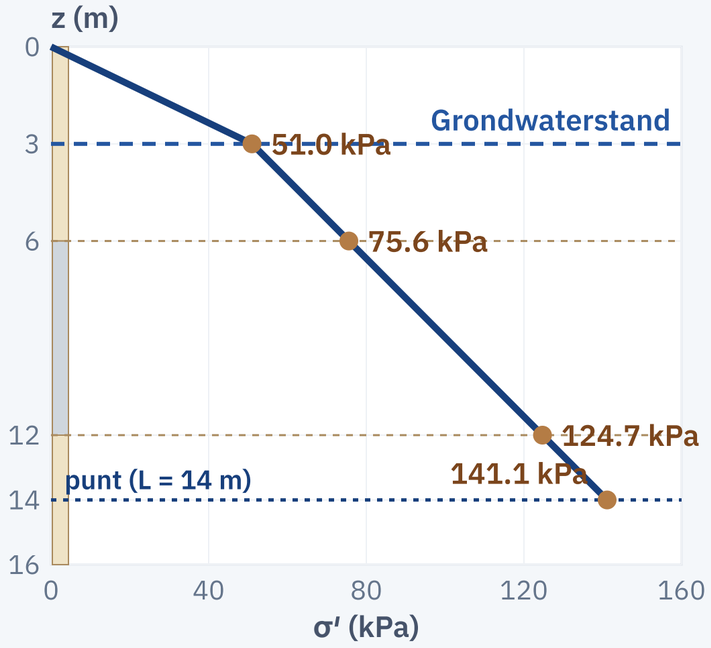
$$\sigma'(6) = 51.0 + (18 - 9.81)(3) = \mathbf{75.6}\ \text{kPa}$$

3 12 m (klei–zandgrens): de γ_{sat} van de klei is ook 18

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

4 14 m (paalpunt)

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



Oplossing (2/2)

OPLOSSING

5 In elk segment de oppervlakte van het σ′-diagram (trapezium); deze geven de gemiddelde spanning in de schachtberekening

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

σ′ is **continu over de lagen**: er is geen sprong aan de zand–klei-grens; de helling verandert alleen bij de grondwaterstand en waar γ′ verandert. Deze drie gebieden worden in Voorbeeld 4 en 5 als gemiddelde $\bar{\sigma}'$ gebruikt.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

De punt vraagt alleen zijn eigen laag

THEORIE

De puntweerstand behoort tot **één enkele laag**: de laag waarin de paalpunt zich bevindt. Deze wordt berekend volgens het materiaal van die laag; de bovenliggende lagen werken alleen via σ′ (**bij een zandpunt**) en **hebben geen invloed bij een kleipunt**.

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

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

Een paal waarvan de punt **samenvalt met een exacte laaggrens**, wordt geacht te rusten op de laag **onder** de grens.

Coyle–Castello is een correlatie voor **zand**; aan een kleipunt heeft zij geen betekenis, en ook indien gekozen blijft de kleiregel geldig.



Aan de zandpunt zijn σ′ en N^*_q maatgevend; aan de kleipunt alleen de c_u-waarde van die laag.

Opgave

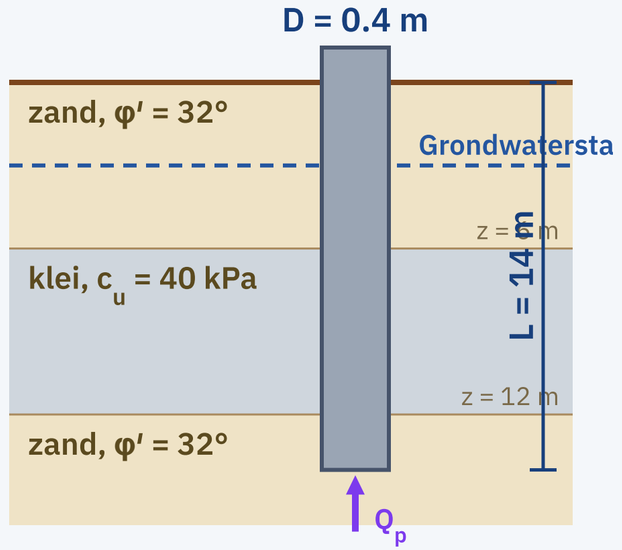
VOORBEELD

Gegeven

Zand 1 (0–6 m)	$\varphi' = 32^\circ$
Klei (6–12 m)	$c_u = 40\ \mathrm{kPa}$
Zand 2 (12–16 m)	$\varphi' = 32^\circ$
Volumiek gewicht	$\gamma = 17,\ \gamma_{sat} = 18\ \mathrm{kN/m^3}$ **(drie lagen)**
Grondwater	**op 3.0 m diepte**
Paal	**geheid, cirkelvormige doorsnede, D = 0.4 m, L = 14 m**
Puntmethode	**Meyerhof**
atmosferische druk	$p_a = 100\ \mathrm{kPa}$
Effectieve spanning aan de punt	$q' = \sigma'(14) = 141.1\ \mathrm{kPa}$ **(Voorbeeld 1)**

GEVRAAGD

Bepaal in welke laag de punt ligt en bereken de **puntweerstand** Q_p.



Oplossing (1/2)

OPLOSSING

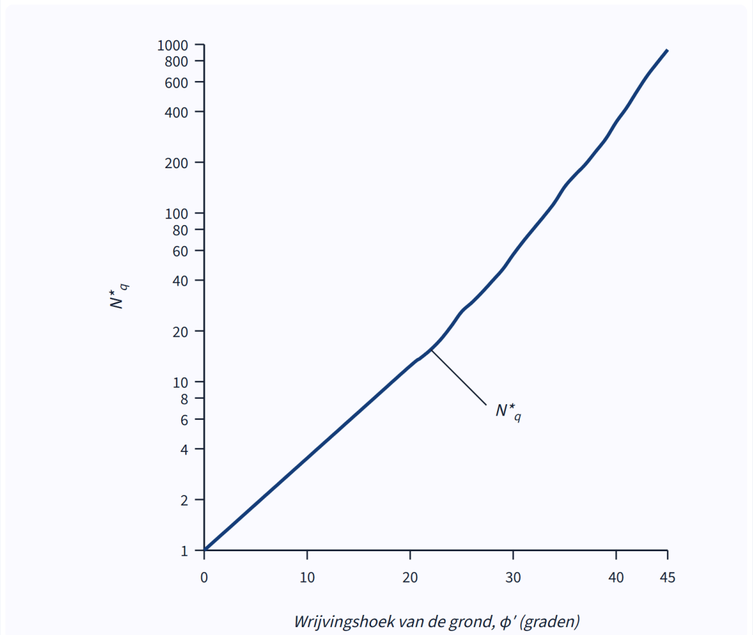
1 Laag van de punt: L = 14 m, in het zand tussen 12–16 m → zandregel (de klei daarboven is niet van belang voor de punt)

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

2 N^*_q uit het diagram van Meyerhof voor φ′ = 32°; daarna de twee waarden naast elkaar

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

De waarde N^*_q in het nomogram (in de zijde) is 81; $q'N^*_q$ = 11,428 kPa, veel groter dan de grenswaarde q_l = 2,531 kPa: **de grenswaarde is maatgevend**.



Oplossing (2/2)

OPLOSSING

3 Eenheidspuntweerstand: de kleinste van de twee

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

4 Oppervlak van de paalpunt en puntweerstand

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

Puntweerstand **318.0 kN**. Omdat de paalpunt in zand ligt, geldt de zandregel; omdat de grenswaarde maatgevend is, verandert de waarde van σ′ in dit voorbeeld het resultaat niet.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Opgave

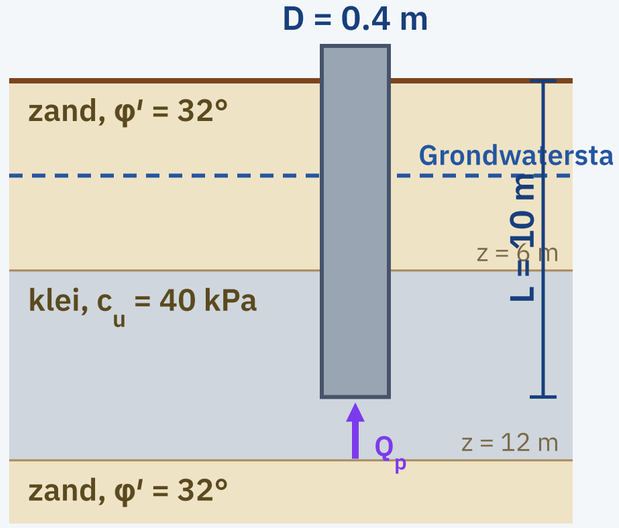
VOORBEELD

Gegeven

Zand 1 (0–6 m)	$\varphi' = 32^\circ$
Klei (6–12 m)	$c_u = 40\ \mathrm{kPa}$
Zand 2 (12–16 m)	$\varphi' = 32^\circ$
Volumiek gewicht	$\gamma = 17,\ \gamma_{sat} = 18\ \mathrm{kN/m^3}$ **(drie lagen)**
Grondwater	**op 3.0 m diepte**
Paal	**dezelfde paal, maar L = 10 m**
Puntmethoden	**Meyerhof en Vesic**
atmosferische druk	$p_a = 100\ \mathrm{kPa}$

GEVRAAGD

Bepaal in welke laag de punt zich bevindt als de paal tot 10 m wordt ingekort en bepaal de **puntweerstand** met twee methoden.



Oplossing

OPLOSSING

1 Laag ter hoogte van de punt: L = 10 m, in de klei tussen 6–12 m → kleiregel (zand en σ′ spelen niet meer mee in de berekening)

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

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

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

Bij een paal met de punt in zand was Q_p = **318 kN**; in klei is dit **45 – 51 kN**: ongeveer een zevende. Dezelfde paal 2 m verlengen om de punt in zand te brengen verhoogt de puntweerstand plotseling.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

K–δ: de kritieke diepte geldt voor de gehele paal

THEORIE

In de zandlaag biedt de schacht weerstand door wrijving tegen de horizontale effectieve spanning. Elke zandlaag heeft **zijn eigen** K- en δ′-waarde:

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

L′ heeft betrekking op **de gehele paal**, niet op een laag: onder L′ wordt de waarde van σ′ op die ter hoogte van L′ aangehouden.

Een diepe zandlaag levert een **constante** eenheidswrijving langs de laag, ongeacht waar de grens ligt.

Optie: **Coyle–Castello**. De eigen K van de laag (uit de abak), δ′ = 0.8φ′ en de gemiddelde σ′-waarde van de laag; er is geen kritieke diepte, het gemiddelde volstaat.

COYLE–CASTELLO (PER LAAG)

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

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

In de K–δ-methode wordt δ′ vaak in het bereik 0.75φ′ – 0.8φ′ gekozen; in deze presentatie worden **δ′ = 0.8φ′ = 25.6°** en **K = 1.0** gebruikt.

Opgave

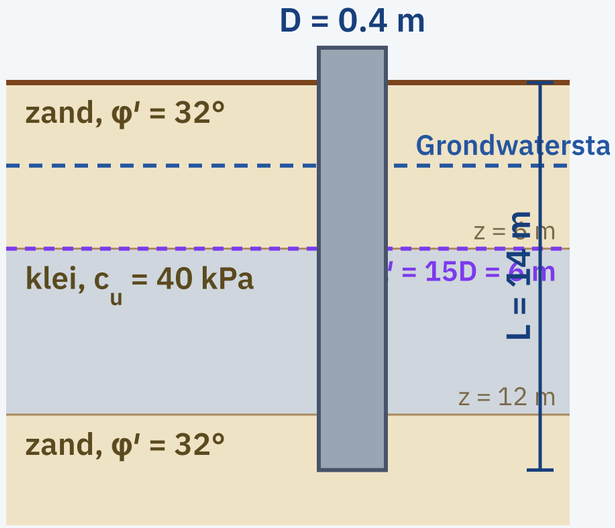
VOORBEELD

Gegeven

Zand 1 (0–6 m)	$\varphi' = 32^\circ$
Klei (6–12 m)	$c_u = 40\ \mathrm{kPa}$
Zand 2 (12–16 m)	$\varphi' = 32^\circ$
Volumiek gewicht	$\gamma = 17,\ \gamma_{sat} = 18\ \mathrm{kN/m^3}$ **(drie lagen)**
Grondwater	**op 3.0 m diepte**
Paal	**geheid, D = 0.4 m, L = 14 m**
Omtrek	$p = \pi D = 1.257\ \mathrm{m}$
In zandlagen	$K = 1.0,\ \delta' = 0.8\varphi' = 25.6^\circ$ **(voer deze waarden in de module in; de module opent met K = 0.66 en δ′ = 24°)**

GEVRAAGD

Bepaal de schachtwrijving van de **zandlagen** (0–6 m en 12–14 m) met de K–δ-methode. Kritieke diepte L′ = 15D.



Oplossing (1/2)

OPLOSSING

1 Kritieke diepte (één waarde voor de gehele paal)

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

2 Zand 1 (0–6 m): de laag ligt volledig binnen L′; geen kap; gemiddelde σ′ = oppervlak / dikte

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

3 Eenheidswrijving en weerstand

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

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

Oplossing (2/2)

OPLOSSING

4 Zand 2 (12–14 m): volledig onder L′ → de waarde van σ′ wordt op haar waarde ter hoogte van L′ gehouden

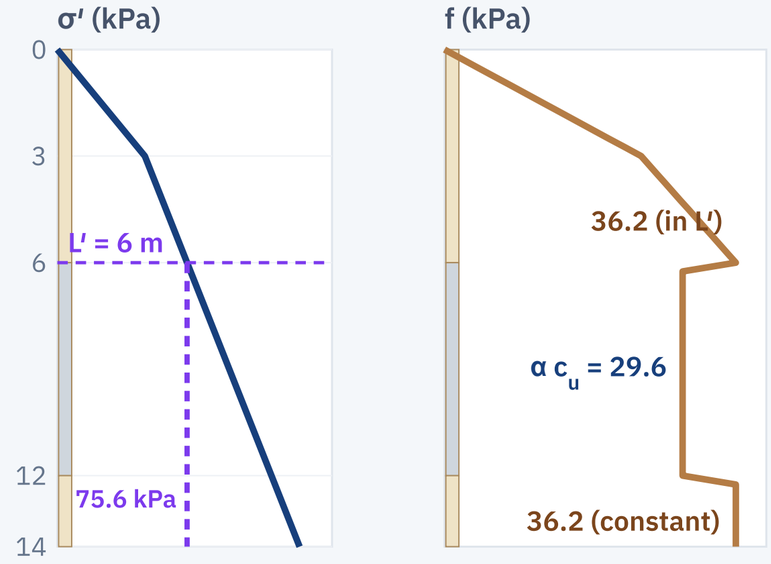
$$\sigma' = \sigma'(L') = 75.6\ \text{kPa}$$

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

5 Weerstand (dikte 14 − 12 = 2 m)

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

Zonder de kritieke diepte zou dit segment σ̄′ = 132.9 kPa, f = 63.7 kPa en Q_{s3} = 160 kN opleveren. De **begrenzing met L′** vermindert het diepe segment van het zand met **69 kN**.



Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Ook in klei kiest elke laag zijn eigen methode

THEORIE

In de kleilaag biedt de schacht weerstand via **adhesie** of via **effectieve spanning**; alle drie de methoden van de kleimodule kunnen per laag worden gebruikt:

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

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

α: **hangt niet af** van de diepte binnen de laag; de wrijving is constant langs de laag (uniform).

λ en β herstellen de effectieve spanning; afhankelijk van de bovenliggende lagen ontstaat een **sprong**.

EEN EERLIJKE OPMERKING

Vijayvergiya en Focht schreven λ als **één enkel gemiddelde over de gehele ingebedde lengte**. Het afzonderlijk toepassen op elke kleilaag in een gelaagd profiel (λ over lengte L, met het gemiddelde σ′ en c_u van die laag) is **een uitbreiding van de methode die specifiek is voor deze software**; de module vermeldt dit overal.

φ'_R en OCR worden **ingevoerd**, niet via een correlatie uit de grond afgelezen (opent met 30° en 1).

Opgave

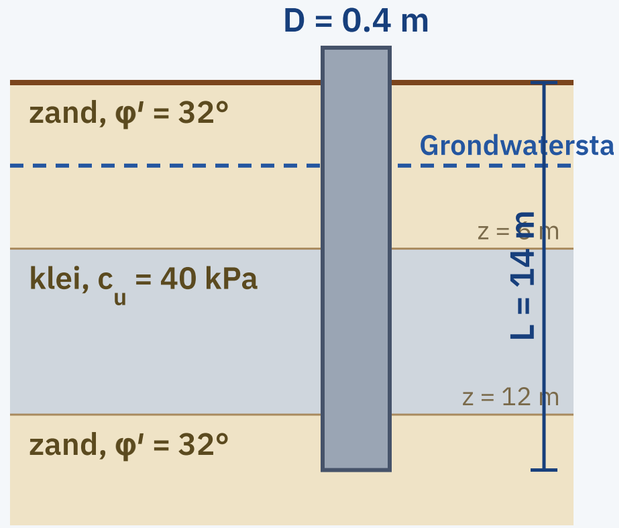
VOORBEELD

Gegeven

Zand 1 (0–6 m)	$\varphi' = 32^\circ$
Klei (6–12 m)	$c_u = 40\ \mathrm{kPa}$
Zand 2 (12–16 m)	$\varphi' = 32^\circ$
Volumiek gewicht	$\gamma = 17,\ \gamma_{sat} = 18\ \mathrm{kN/m^3}$ **(drie lagen)**
Grondwater	**op 3.0 m diepte**
Paal	**geheid, D = 0.4 m, L = 14 m, p = 1.257 m**
gem. σ′ van de klei	$\bar{\sigma}'_2 = A_{6-12}/6 = 100.1\ \mathrm{kPa}$ **(Voorbeeld 1)**
voor β	$\varphi'_R = 30^\circ,\ OCR = 1$
voor α	$p_a = 100\ \mathrm{kPa}$**, α uit tabel**

GEVRAAGD

Bepaal de schachtweerstand van de kleilaag (6–12 m) met de **α-, λ- en β-**methode.



Oplossing (1/2)

OPLOSSING

1 α-methode: uit de tabel α voor $c_u/p_a = 0.4$

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

2 λ-methode: λ uit de tabel langs de **paallengte** (L = 14 m) ($\lambda_{10} = 0.245$; $\lambda_{15} = 0.200$)

$$\lambda = 0.209$$

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

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

Oplossing (2/2)

OPLOSSING

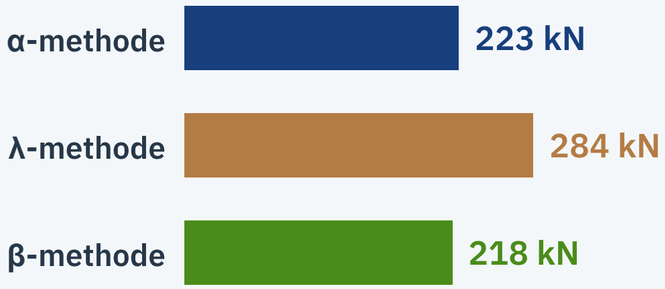
3 β-methode: $\varphi'_R = 30°$, OCR = 1

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

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

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

De drie methoden geven voor dezelfde kleilaag **223**, **284** en **218 kN**: α en β liggen dicht bij elkaar, λ is ongeveer 27% hoger. Het verschil komt voort uit de aannames waarop de methoden berusten; het gebruik van λ per laag is bovendien een uitbreiding.



Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Eén enkele integraal: langs de paal

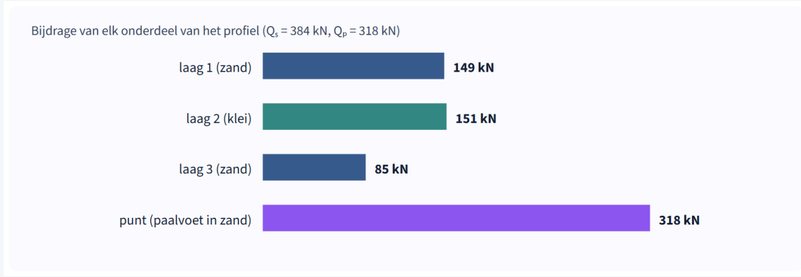
THEORIE

De schachtweerstand is de integraal van de wrijving langs de paal, vermenigvuldigd met de omtrek. De berekening wordt numeriek uitgevoerd; de grens kan **overal** liggen, en een paal die midden in een laag eindigt vereist geen bijzondere behandeling:

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

Zo bekeken is gelaagdheid geen probleem meer maar wordt het een **ontwerpvraag**: **welk deel** van het profiel draagt de paal?

Hoe verandert het draagvermogen als de paal voorbij de volgende grens wordt verlengd of wordt ingekort?



Bijdrage van elk segment van de voorbeeldpaal (Q_s = 475 kN, Q_p = 318 kN).

Opgave

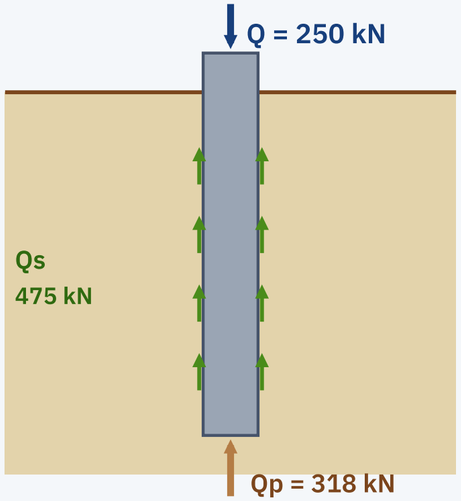
VOORBEELD

Gegeven

Puntweerstand	Q_p = 318.0 kN (Voorbeeld 2)
Zand 1 (0–6 m)	Q_{s1} = 160.4 kN (Voorbeeld 4)
Klei (6–12 m)	Q_{s2} = 223.2 kN (α-methode, Voorbeeld 5)
Zand 2 (12–14 m)	Q_{s3} = 91.0 kN (Voorbeeld 4)
Veiligheidsfactor	FS = 3
Werkbelasting op de paal	Q = 250 kN

GEVRAAGD

Bepaal het **uiterste** en het **toelaatbare** draagvermogen van de paal; is de werkbelasting voldoende?



Oplossing

OPLOSSING

1 Schachtwrijving: som van de segmenten

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

2 Uiterst draagvermogen

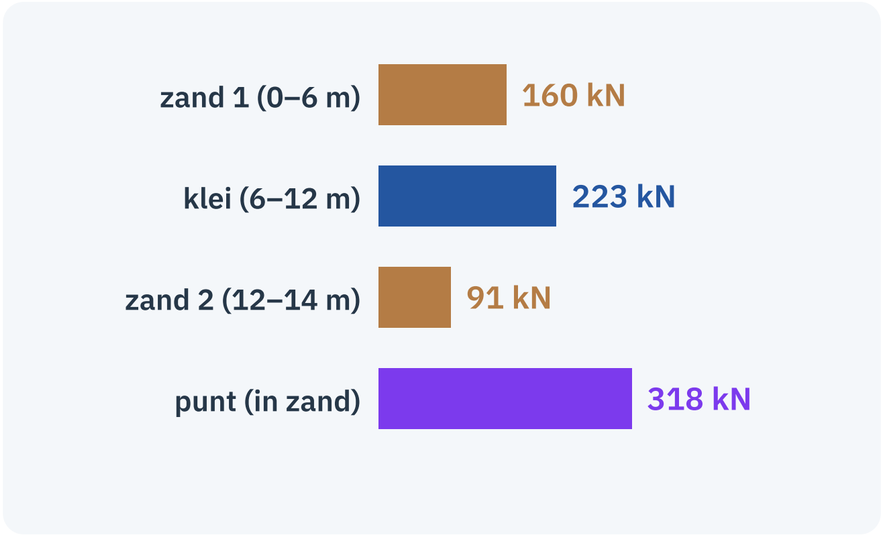
$$Q_u = Q_p + Q_s = 318.0 + 474.5 = \mathbf{792.6}\ \text{kN}$$

3 Toelaatbare gronddruk en toets

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

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

De benuttingsgraad is 0.95. De kleilaag vormt slechts 43 % van de schacht, maar levert 47 % van het draagvermogen: voorbij de kritieke diepte stopt het zand met het winnen van σ′, terwijl de klei op elke diepte dezelfde waarde α c_u levert.



Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Opgave

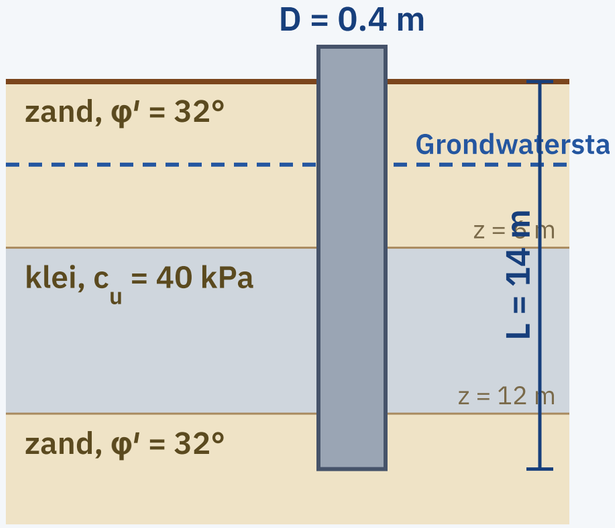
VOORBEELD

Gegeven

Zand 1 (0–6 m)	$\varphi' = 32^\circ$
Klei (6–12 m)	$c_u = 40\ \mathrm{kPa}$
Zand 2 (12–16 m)	$\varphi' = 32^\circ$
Volumiek gewicht	$\gamma = 17,\ \gamma_{sat} = 18\ \mathrm{kN/m^3}$ **(drie lagen)**
Grondwater	**op 3.0 m diepte**
Methoden	**geheid, D = 0.4 m; Meyerhof, α, K–δ**
Lengtes	**L = 10, 12, 14 en 16 m**
Bekenden	**Voorbeeld 2–6 voor L = 14 m**

GEVRAAGD

Hoe verandert Q_u als de paallengte **10, 12 en 16 m** bedraagt? Licht de **oorzaak** van de verandering toe.



Oplossing (1/2)

OPLOSSING

1 L = 10 m: paalpunt in klei (Voorbeeld 3); kleitraject slechts 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: de punt ligt precies op de grens → **draagt op het zand eronder**; zand 2 komt nog niet in de schacht

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

3 L = 16 m: zand 2 wordt met een dikte van vier meter in de schacht opgenomen (σ′ afgetopt: f constant)

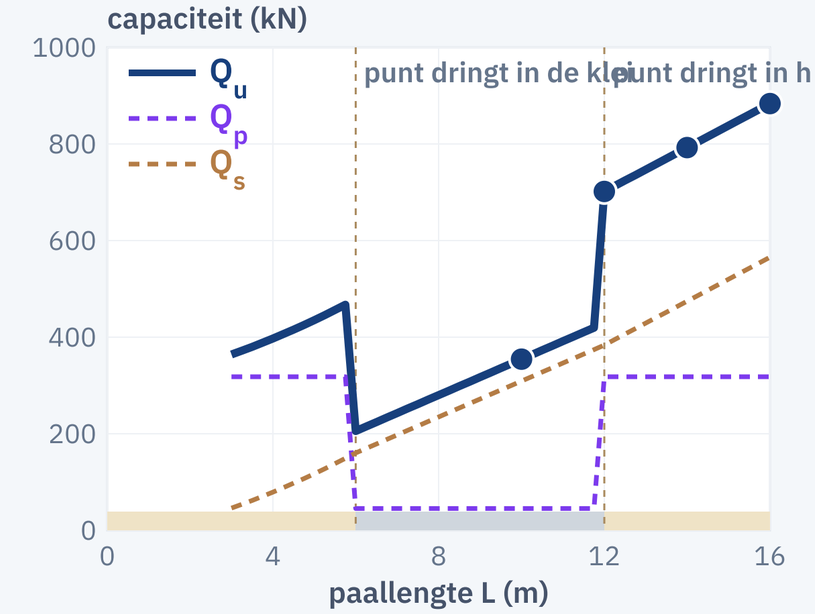
$$Q_p = 318.0\ ; \quad Q_s = 160.4 + 223.2 + 182.0 = 565.5\ ; \quad Q_u = \mathbf{883.6}\ \mathrm{kN}$$

Oplossing (2/2)

OPLOSSING

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

10 m → 12 m: het draagvermogen neemt toe met **347 kN** (98%): daarvan komt 273 kN uit **het binnendringen van de punt in het zand**. Na 12 m levert elke meter slechts ≈ 45 kN op. In een gelaagd profiel bepaalt **in welke laag de punt eindigt** de paallengte.



Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

De regels van de boorpaal gelden ook in een gemengd profiel

THEORIE

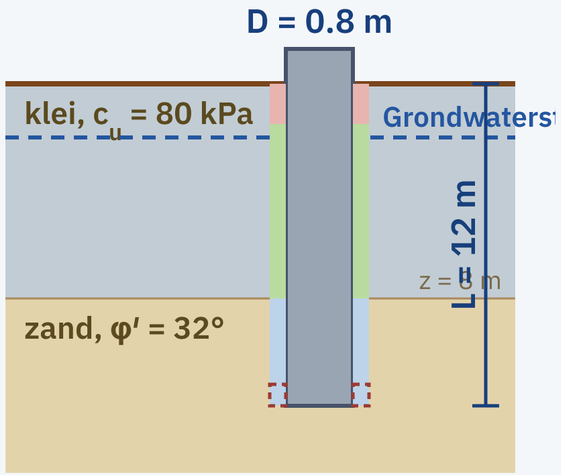
Er wordt een gat geboord en beton gestort: de grond wordt niet opzij gedrukt, de klei verweekt langs de boorgatwand, onder de voet kan boorpuin zich ophopen. Bij een gemengd profiel wordt elke helft van de procedure **toegepast waar die hoort**:

Kleilagen (α): α* = 0.55 ($c_u/p_a \le 1.5$); **bovenste 1.5 m en onderste 1D**: α* = 0. Het venster geldt **alleen voor α** en wordt niet doorgetrokken naar λ en β.

Zandlagen behouden hun eigen K–δ- of Coyle–Castello-regel; K ligt rond **$K_0 = 1 - \sin\varphi'$** omdat de grond bij het heien niet wordt verplaatst.

Als de **basis** in klei ligt, geldt Reese–O'Neill: $q_p = \min[6c_{ub}(1 + 0.2L/D_b), 9c_{ub}, 40p_a]$. c_{ub} is de gemiddelde c_u over **$2D_b$** onder de basis; strekt de zone zich over meer dan één laag uit, dan wordt ze naar dikte gewogen.

Deze zone moet **volledig uit klei** bestaan: loopt zij door in zand, dan stopt de module en wordt gevraagd Meyerhof of Vesic te selecteren.



Rood: α* = 0 (bovenste 1.5 m). Groen: α* = 0.55. Blauw: K–δ in zand. Gestreept rood: onderste 1D, geen venster in zand.

Opgave

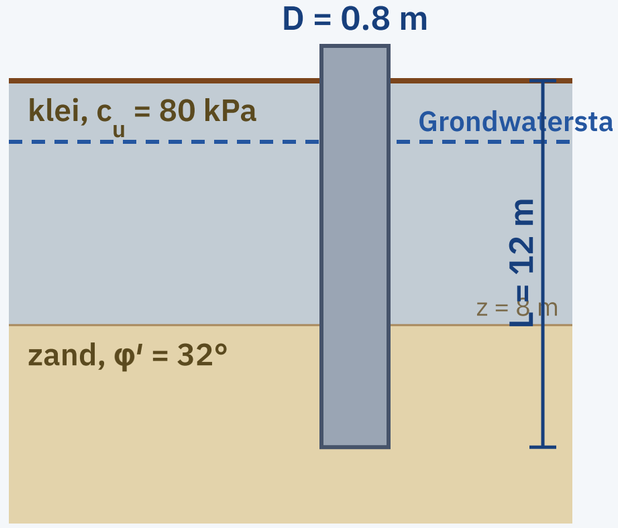
VOORBEELD

Gegeven

Paal	**boorpaal, cirkelvormige doorsnede, D = 0.8 m, L = 12 m**
Klei (0–8 m)	$c_u = 80\ \text{kPa},\ \gamma = \gamma_{sat} = 18\ \text{kN/m}^3$
Zand (8–20 m)	$\varphi' = 32°,\ \gamma = 18,\ \gamma_{sat} = 19\ \text{kN/m}^3$
Grondwater	**op 2.0 m diepte**
Voor zand	$K = K_0 = 0.47,\ \delta' = 0.75\varphi' = 24°$
Punt	**Meyerhof; FS = 3**

GEVRAAGD

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



Oplossing (1/3)

OPLOSSING

1 Kleilaag: α* en venster (bovenste 1.5 m en onderste 1D = 0.8 m vervallen: 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 Eenheidswrijving en weerstand

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

Oplossing (2/3)

OPLOSSING

3 Zandlaag (8–12 m): eigen K–δ-regel; L′ = min(15D; L) = min(12; 12) = 12 m, dus geen kap binnen de laag

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

4 Eenheidswrijving en weerstand

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

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

Het **onderste 1D**-deel van het α-venster (11.2 – 12 m) valt in de zandlaag; omdat het venster bij α hoort, behoudt het zand over deze 0.8 m ook zijn wrijving.

Oplossing (3/3)

OPLOSSING

5 Punt in zand → zandregel (Meyerhof); geen extra reductie voor boren, de ingevoerde φ′ wordt gebruikt

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

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

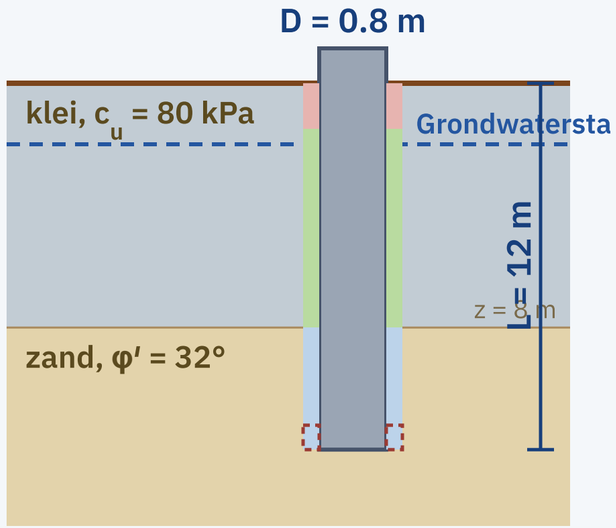
$$Q_p = A_p q_p = 0.5027(2{,}531) = \mathbf{1{,}272}\ \text{kN}$$

6 Totaal en toelaatbaar draagvermogen

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

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

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



Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Opgave

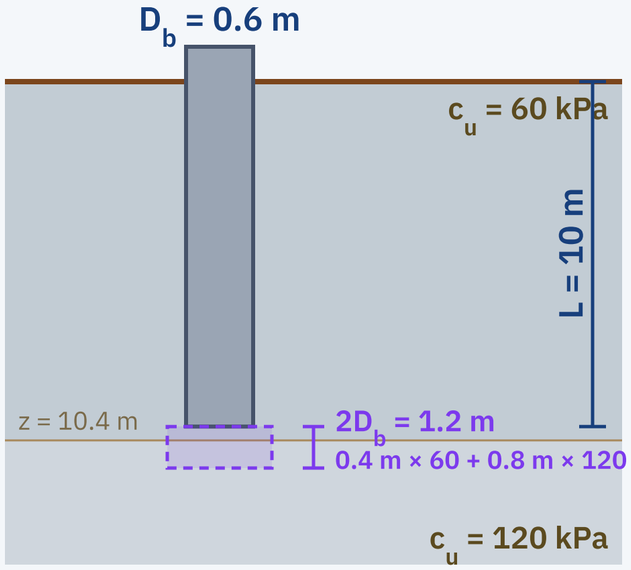
VOORBEELD

Gegeven

Paal	**boorpaal, $D_b = D = 0.6$ m, $L = 10$ m**
Klei 1 (0–10.4 m)	$c_u = 60$ kPa
Klei 2 (10.4–20 m)	$c_u = 120$ kPa
Basis	**Reese–O'Neill; $p_a = 100$ kPa**

GEVRAAGD

Bepaal c_{ub} in de zone $2D_b$ onder de zool, en de waarden van q_p en Q_p.



Oplossing

OPLOSSING

1 Zone 10 → 10 + 2D$_b$ = 11.2 m; op de grens 10.4 m: diktegewogen gemiddelde

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

2 Kleinste van de drie waarden

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

3 Oppervlakte van de voet en puntweerstand

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

Als alleen de puntwaarde c$_u$ = 60 kPa was genomen, zou Q$_p$ = 152.7 kN volgen: de stijvere klei eronder geeft **67%** meer.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Eén veiligheidsfactor, maar de onzekerheid is groot

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:

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

Voor een enkele paal geldt gewoonlijk **FS = 2.5 – 4**.

Bovengrens: wanneer het profiel uit **weinig boringen** bekend is. Een gelaagd profiel is precies dit geval: **tussen boringen zijn de grenzen het meest onzeker**, en het voorbeeld hierboven toonde hoeveel één meter grensverschuiving het draagvermogen verandert.

DE TWEE ONDERWERPEN VEREISEN AFZONDERLIJKE BEREKENINGEN

In een gelaagd profiel, afzonderlijk van de draagvermogenberekening:

Een zachte laag die zet en aan de paal hangt als **negatieve kleef**

Zetting bepaald door de samendrukbare laag onder de paalpunt

Regels per laag en uitvoering

THEORIE

Laag	Schacht (Q_s)	Punt (Q_p): laag ter hoogte van de paalpunt
Zand	K–δ (L′ = 15D, één waarde voor de gehele paal) of Coyle–Castello (K σ′ tan0.8φ′)	$q'N^*_q \le q_l$ (Meyerhof), Vesic, Coyle–Castello
Klei	α · λ (per laag: uitbreiding) · β	$9c_u$ (Meyerhof) · $N^*_c(I_{rr})$ (Vesic)
Boorpaal, klei	α* = 0.55; bovenste 1.5 m en onderste 1D = 0	Reese–O'Neill: gemiddelde van $c_{ub} = 2D_b$
Boorpaal, zand	$K \approx K_0 = 1 - \sin\varphi'$; het venster wordt niet toegepast	$q'N^*_q$ (ingevoerde φ′)

Elke rij is een afzonderlijke keuze voor de betreffende laag; **in dezelfde paal** worden zowel de zand- als de kleiregel gebruikt.

Samenvatting

Belangrijkste punten

De effectieve spanning **accumuleert over de lagen** en is continu; de eenheidswrijving daarentegen **springt bij de laaggrenzen**

De punt wordt uitsluitend berekend volgens de regel van de laag waarin de punt zich bevindt; een punt die samenvalt met een grens rust in de **onderliggende** laag

Zand: f = Kσ′tanδ′ en **L′ = 15D geldt voor de gehele paal** · **Klei**: α, λ (één verlenging per laag), β

De **schacht** is de som van de lagen: $Q_s = p\Sigma f_i \Delta z_i$; wat de lengte bepaalt, is de laag waarin de punt eindigt

Boorpaal: het α*-venster geldt alleen voor klei/α; als de punt in klei ligt, c_{ub} over $2D_b$ (kan meerdere lagen omvatten)

$Q_{all} = (Q_p + Q_s)/FS$, FS = 2.5 – 4; bij grote werken een **paalbelastingproef**

Literatuur

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. en Mesri, G. (1996). Soil Mechanics in Engineering Practice, 3e druk. Wiley — de α-waarden van Tabel 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 — de α-waarde voor een boorpaal.

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.

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, waarin deze methoden zijn gebundeld volgens de opzet van deze pagina.

OPMERKING

De figuren in deze presentatie zijn overgenomen van de Theoriepagina van GeoTerva; alle numerieke voorbeelden zijn geproduceerd met de eigen berekeningsregels en bibliotheek 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