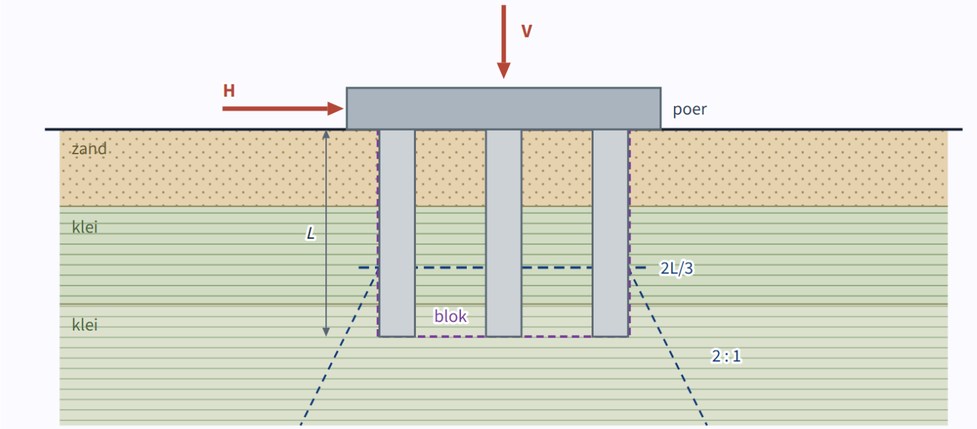
Geotechnisch college · Paalfunderingen

Paalgroepanalyse

College: de belasting op elke paal van een paalgroep onder een poer, het draagvermogen, de zetting en het gedrag onder horizontale belasting; bij elk onderwerp een rekenvoorbeeld.

- Rigide paalkop
- Groepsefficiëntie · blok
- Zetting
- Horizontale belasting: p-vermenigvuldigers
- Rekenvoorbeelden



Wat leren we in dit college?

- Het **aandeel van elke paal in de belasting** onder een starre poer bepalen en de paal herkennen die op trek wordt belast
- Het draagvermogen van de **enkele paal** laag voor laag opbouwen als basis voor het draagvermogen van de groep
- **Groepsefficiëntie** (Converse–Labarre, Los Angeles, Seiler–Keeney; regels voor heipalen en boorpalen in zand) laag voor laag toepassen
- De groep te toetsen op **blokbreuk** en **de kleinste** te kiezen
- De elastische (Vesic) en **consolidatie**zetting berekenen (2:1-spreiding)
- om onder **horizontale belasting** de p-multipliers en de ongelijke aandelen van de rijen te interpreteren

COLLEGESTRUCTUUR

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

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

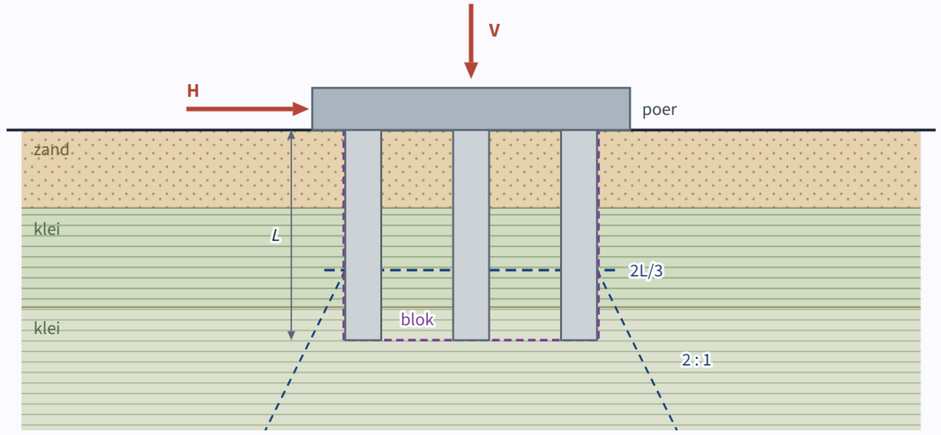
2 · **Opgave**: gegeven en gevraagd

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

Deze presentatie bouwt voort op de presentatie **paal in gelaagde grond**: de laagsgewijze berekening van de enkele paal is daar behandeld, hier bekijken we zijn plaats binnen de groep.

Wat verandert er wanneer de palen gezamenlijk werken?

THEORIE



De palen worden in rijen onder een **poer** geschikt; wanneer ze dicht bij elkaar staan, moet de grond ertussen en eromheen alle palen tegelijk dienen. Er veranderen drie dingen, en de module behandelt elk daarvan als een afzonderlijke toets:

Draagvermogen: de grond tussen de palen wordt vanaf de schacht van elke paal meegetrokken; elke paal draagt minder dan alleen (efficiëntie $\eta < 1$). Bij zwakke grond en dicht bij elkaar staande palen kunnen de groep en de grond ertussen ook als één **blok** bezwijken.

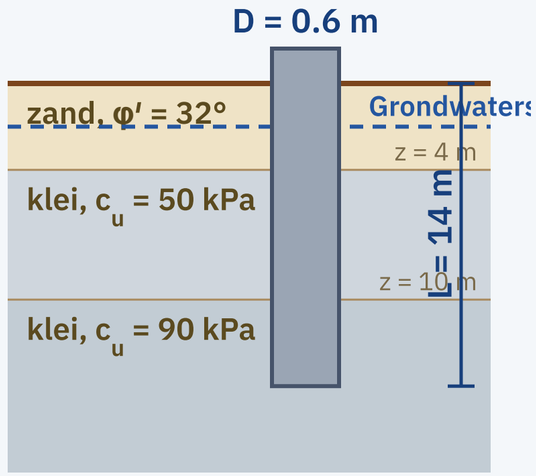
Zetting: de belasting van de groep spreidt zich over **het gehele groepsareaal**, niet over dat van één paal, en bereikt de kleilagen ver onder de paalpunten; de groep zakt veel meer dan een enkele paal.

Horizontale belasting: de achterste rijen werken in grond die door de voorafgaande palen is weggedrukt en vervormd; de voorste rij neemt meer belasting op, de andere minder.

De groep die we tijdens het college gebruiken

Voorbeeldgroep (model dat de module opent)

Palen	**9 boorpalen (diameter D = 0.60 m, lengte L = 14 m), 3 rijen × 3 palen, onderkant van de poer in de grond**
Tussenafstand	$s_x = s_y = 1.80\ \text{m}\ (3.0\,D)$
Grond	**zand 0–4 m (φ′ = 32°), klei 4–10 m (c_u = 50), klei 10–18 m (c_u = 90 kPa); γ = 18, γ_{sat} = 19 kN/m³**
Grondwater	**op 2.0 m diepte**
Belastingen	$V = 1\,600\ \text{kN},\ H = 900\ \text{kN},\ M_y = 900\ \text{kN}\cdot\text{m}$
Materiaal, veiligheid	$E_p = 30\,000\ \text{MPa},\ E_s = 30\ \text{MPa},\ \nu_s = 0.30;\ FS = 3$



De meeste voorbeelden worden met deze groep gemaakt; de resultaten zijn gelijk aan de getallen op het tabblad **Model** van de module.

Starre poer: de palen zijn identieke veren

THEORIE

De poer wordt als star en de palen als identieke verticale veren aangenomen. Een starre poer beweegt als een **vlak**: de zetting en de rotaties zijn de enige onbekenden. Daarom is de belasting op elke paal een **lineaire** functie van de positie (regel van de boutengroep):

$$P_i = \frac{V}{n} + B\,x_i + C\,y_i$$

$$B = \frac{M_y}{\sum x^2} \qquad C = \frac{M_x}{\sum y^2} \qquad \left(\sum xy = 0\right)$$

$$\sum x^2 = n_y s_x^2 \,\frac{n_x(n_x^2 - 1)}{12}$$

Als M_y positief is, voegt deze druk toe aan de **+x**-zijde (de zijde waar de horizontale belasting naartoe duwt, de voorzijde). Momenten worden **aan de onderkant van de poer** bepaald: een belasting H op een hoogte h boven de onderkant geeft M_y = H h.

Als de palen verspringend (driehoekig) zijn opgesteld, is Σxy niet nul; de module neemt de sommen over uit de paalposities en lost de twee vergelijkingen gezamenlijk op.

De grootste belasting gaat naar de voorste palen en de kleinste naar de achterste; **bij een groot moment** kan de achterste paal op trek worden belast.

Opgave

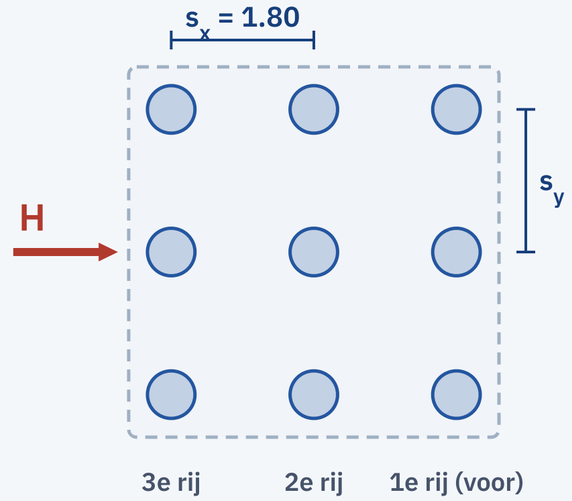
VOORBEELD

Gegeven

Groep	**9 boorpalen, 3 rijen × 3 palen, D = 0.60 m, L = 14 m, s = 1.80 m**
Grond	**zand 0–4 m (φ′ = 32°) · klei 4–10 m (c_u = 50) · klei 10–18 m (c_u = 90 kPa)**
Belastingen	$V = 1\,600\ \mathrm{kN},\ M_y = 900\ \mathrm{kN\cdot m}$ **(aan de basis van de kop)**
Titel	**stijf; palen identiek**

GEVRAAGD

Bepaal de belasting op **elke paal**. De rijen worden **vanaf de voorkant** genummerd (voorkant = de zijde waarheen de horizontale belasting drukt, +x).



Oplossing (1/2)

OPLOSSING

1 Gelijke tussenafstand

$$\frac{V}{n} = \frac{1\,600}{9} = \mathbf{177.8}\ \mathrm{kN}$$

2 Σx² (symmetrische groep, gesloten vorm)

$$\sum x^2 = n_y s_x^2\,\frac{n_x(n_x^2-1)}{12} = 3(1.8)^2\,\frac{3(9-1)}{12} = \mathbf{19.44}\ \mathrm{m}^2$$

3 Momentcoëfficiënt (C = 0 omdat $M_x = 0$)

$$B = \frac{M_y}{\sum x^2} = \frac{900}{19.44} = \mathbf{46.30}\ \mathrm{kN/m}$$

Oplossing (2/2)

OPLOSSING

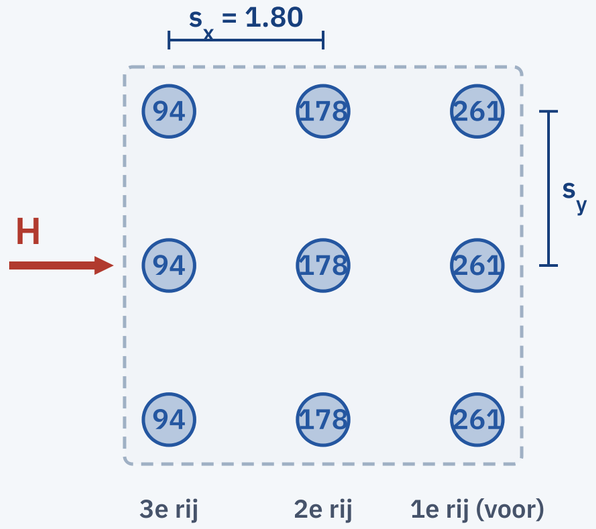
4 Rijbelastingen: P = V/n + B x (x = +1.8; 0; −1.8 m)

$$P_1 = 177.8 + 46.30(1.8) = \mathbf{261.1}\ \text{kN (voor)}$$

$$P_2 = \mathbf{177.8}\ \text{kN}$$

$$P_3 = 177.8 - 46.30(1.8) = \mathbf{94.4}\ \text{kN (achter)}$$

Totaal: 3(261.1 + 177.8 + 94.4) = **1,600 kN** = V. De grootste belasting staat op de voorste palen (261.1 kN), de kleinste op de achterste (94.4 kN); **geen enkele paal staat op trek**.



Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Bij een groot moment worden de achterste palen op trek belast

THEORIE

Als het moment groot is ten opzichte van de verticale belasting, worden de palen aan de tegengestelde zijde van het moment **ontlast** en kunnen ze op trek worden belast. De paal weerstaat de trek **alleen met zijn schacht**: de kleilaag met haar volledige waarde, de zandlaag met **drie vierde** van haar weerstand onder druk; de voet levert niets.

$$T_u = \sum_i \chi_i \, Q_{s,i} \qquad \chi = 1 \text{ (klei)},\ \chi = 0.75 \text{ (zand)}$$

$$T_g = \min(T_{ind},\, T_{block}) \quad T_{ind} = n_T \sum_i \eta_i \chi_i Q_{s,i}$$

Enkele paal op trek: $T_{max} \le T_u/FS$. Palen op trek **gezamenlijk**: $\Sigma T \le T_g/FS$; het blok wordt weerstaan door zijn eigen gewicht en de schuifweerstand langs de zijvlakken.

TOETS OP DRUK

$$P_{max} \le \frac{Q_u}{FS}$$

De grootste paalbelasting wordt vergeleken met de toelaatbare belasting van een **enkele paal**; groupeffecten worden hier niet beschouwd. Onder een moment krijgt de zwaarst belaste paal meer dan V/n en kan deze zijn aandeel overschrijden, **zelfs wanneer de groep als geheel binnen zijn draagvermogen blijft**.

Opgave

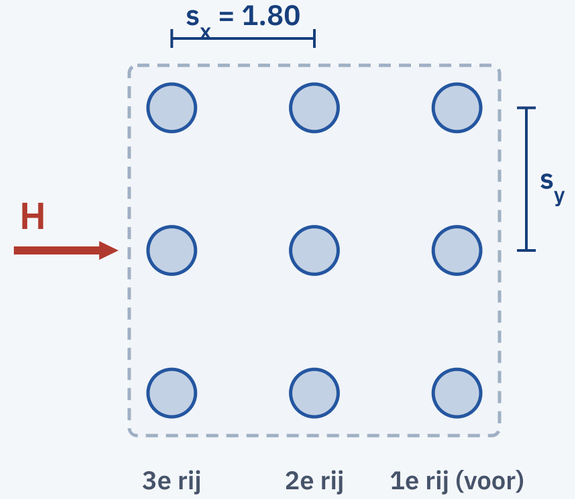
VOORBEELD

Gegeven

Groep	**9 boorpalen, 3 rijen × 3 palen, D = 0.60 m, L = 14 m, s = 1.80 m**
Grond	**zand 0–4 m (φ′ = 32°) · klei 4–10 m (c_u = 50) · klei 10–18 m (c_u = 90 kPa)**
Belasting	$V = 1\,600$ kN**, moment verhoogd:** $M_y = 2\,400$ kN·m
Enkele paal	**Q_s-bijdragen (Voorbeeld 3): zand 49.8, klei 311.0, klei 317.2 kN**
Efficiëntie	**zand 0.767, klei 0.727 (Voorbeeld 5–6)**

GEVRAAGD

Bepaal de belastingen; toets de capaciteit van de paal op trek en van de palen op trek **gezamenlijk** met FS = 3.



Oplossing (1/2)

OPLOSSING

1 Belastingen ($B = M_y/\Sigma x^2$)

$$B = \frac{2\,400}{19.44} = 123.46\ \text{kN/m}$$

$$P_{front} = 177.8 + 123.46(1.8) = \mathbf{400.0}\ \text{kN}$$

$$P_{rear} = 177.8 - 123.46(1.8) = \mathbf{-44.4}\ \text{kN (trek)}$$

2 Draagvermogen van een enkele paal op trek (zand × 0.75, klei × 1)

$$T_u = 0.75(49.8) + 311.0 + 317.2 = \mathbf{665.6}\ \text{kN} \quad \Rightarrow \quad \frac{T_u}{FS} = 221.9\ \text{kN}$$

Paal op trek: T_{max} = **44.4 kN** ≤ T_u/FS = 221.9 kN → **voldoet**. Aantal palen op trek is 3 (achterste rij), totale trek ΣT = 133.3 kN; de groepstoets volgt in de volgende stap.

Oplossing (2/2)

OPLOSSING

3 Gezamenlijke capaciteit van de 3 palen op trek: som van de effectieve schachten × 3

$$T_{ind} = 3\left[\eta_s \chi_s Q_{s1} + \eta_c Q_{s2} + \eta_c Q_{s3}\right] = \mathbf{1{,}456}\ \text{kN}$$

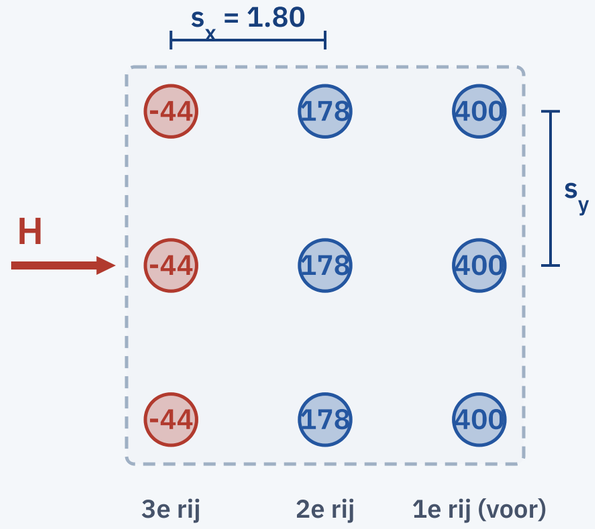
4 Trekblok (3 palen, L_t = D = 0.6 m, B_t = 4.2 m): schachtwrijving + gewicht van het blok

$$T_{block} = \sum \tau_i P_t \Delta L_i + W = 6{,}692 + 369 = \mathbf{7{,}061}\ \text{kN}$$

5 Toets: minimum en FS

$$T_g = \min(1{,}456;\ 7{,}061) = 1{,}456\ \text{kN}$$

$$\sum T = 133.3 \leq \frac{T_g}{3} = 485\ \text{kN} \ \Rightarrow\ \text{voldoende}$$



Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Het draagvermogen van de groep wordt gebaseerd op dat van de enkele paal

THEORIE

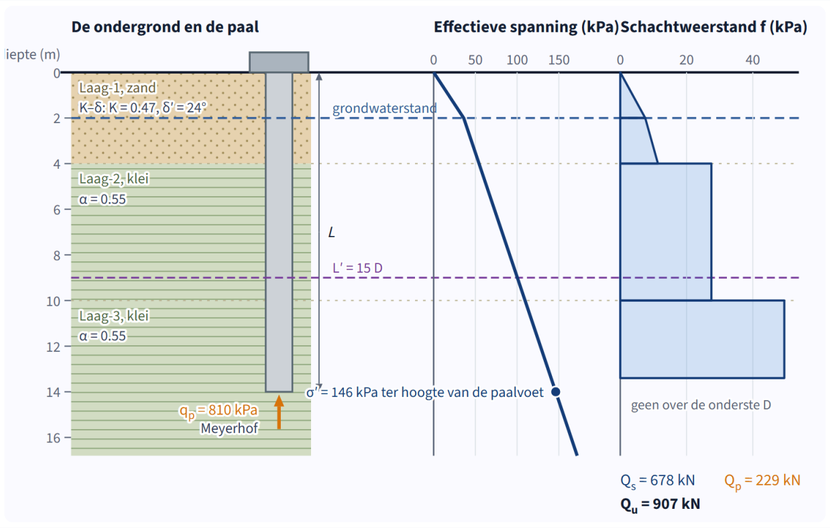
Eerst wordt de weerstand van één paal van de groep **afzonderlijk** berekend: elke laag volgens de regel voor het eigen materiaal, **er wordt geen weerstand ingevoerd**. De regels zijn als in de presentatie *paal in gelaagde grond*:

$$Q_u = Q_s + Q_p \qquad Q_s = p \sum_i f_i \, \Delta L_i \qquad Q_p = A_b \, q_p$$

Zand: f = Kσ′tanδ′ (kritieke diepte L′ = 15D). Bij een boorpaal is **K = K₀ = 1 – sinφ′**, δ′ = 0.75φ′; bij een heipaal is K = 1.4K₀.

Klei: α, λ of β. Voor een boorpaal geldt **α* = 0.55** ($c_u/p_a \le 1.5$) en α* = 0 over de **bovenste 1.5 m en de onderste 1D**.

Punt: de regel van de laag waarin de punt zich bevindt: in zand $q'N^*_q \le q_l$, in klei $9c_u$ (voor een boorpaal kan Reese–O'Neill worden gekozen).



Opgave

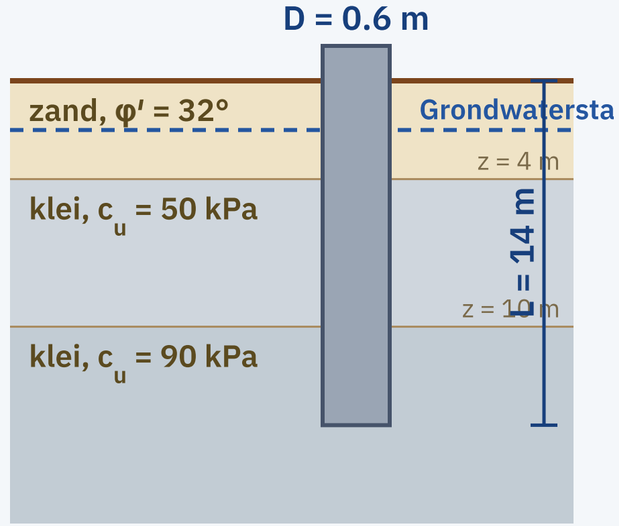
VOORBEELD

Gegeven

Groep	**9 boorpalen, 3 rijen × 3 palen, D = 0.60 m, L = 14 m, s = 1.80 m**
Grond	**zand 0–4 m (φ′ = 32°) · klei 4–10 m (c_u = 50) · klei 10–18 m (c_u = 90 kPa)**
Oprichting	**boorpaal: K = K_0 = 0.47, δ′ = 0.75φ′ = 24°, α* = 0.55; punt: Meyerhof**
Grondwater	**2.0 m**
Volumiek gewicht	$\gamma = 18,\ \gamma_{sat} = 19\ \mathrm{kN/m^3}$

GEVRAAGD

Bepaal de **schacht**weerstand van een enkele paal laag per laag, de **punt**weerstand en de waarde van **Q_u**; voer de toets $P_{max} \le Q_u/FS$ uit.



Oplossing (1/3)

OPLOSSING

1. Zand (0–4 m): L′ = 15D = 9 m > 4 m, geen kap; σ′(2) = 18(2) = 36.0 en σ′(4) = 36.0 + (19 − 9.81)(2) = 54.4 kPa

$$\bar{\sigma}' = \frac{126.4}{4} = 31.6\ \text{kPa}$$

$$f = K \tan\delta'\, \bar{\sigma}' = 0.47(0.4452)(31.6) = 6.61\ \text{kPa}$$

$$Q_{s1} = p\, f\, H = 1.885(6.61)(4) = \mathbf{49.8}\ \text{kN}$$

Oplossing (2/3)

OPLOSSING

2 Klei (4–10 m): α* = 0.55 (c_u/p_a = 0.5 ≤ 1.5); het venster van 1.5 → L − D = 13.4 m omvat de laag volledig

$$f = 0.55(50) = 27.5\ \text{kPa} \qquad Q_{s2} = 1.885(27.5)(6) = \mathbf{311.0}\ \text{kN}$$

3 Klei (10–14 m): het venster eindigt op 13.4 m → onderste 1D = 0.6 m wordt verwaarloosd, effectieve lengte 13.4 − 10 = 3.4 m

$$f = 0.55(90) = 49.5\ \text{kPa} \qquad Q_{s3} = 1.885(49.5)(3.4) = \mathbf{317.2}\ \text{kN}$$

Oplossing (3/3)

OPLOSSING

4 Som over de schacht en de punt (laag ter hoogte van de punt: klei, c_u = 90 kPa, Meyerhof N^*_c = 9)

$$Q_s = 49.8 + 311.0 + 317.2 \approx \mathbf{678.1}\ \text{kN}$$

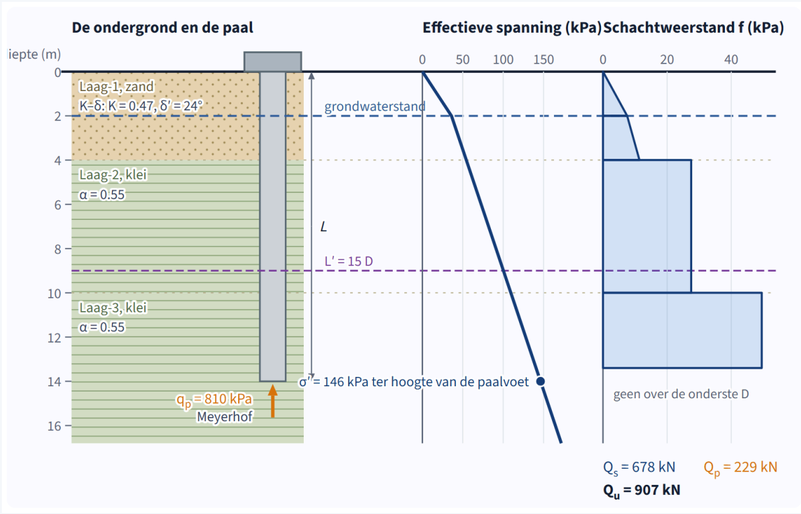
$$q_p = 9(90) = 810\ \text{kPa}$$

$$Q_p = A_b q_p = 0.2827(810) = \mathbf{229.0}\ \text{kN}$$

5 Draagvermogen van een enkele paal en toets

$$Q_u = 678.1 + 229.0 = \mathbf{907.1}\ \text{kN}$$

$$\frac{Q_u}{FS} = 302.4\ \text{kN} \geq P_{max} = 261.1\ \text{kN} \ \Rightarrow\ \text{voldoende}$$



Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Nauw geplaatste palen dragen minder dan afzonderlijke palen

THEORIE

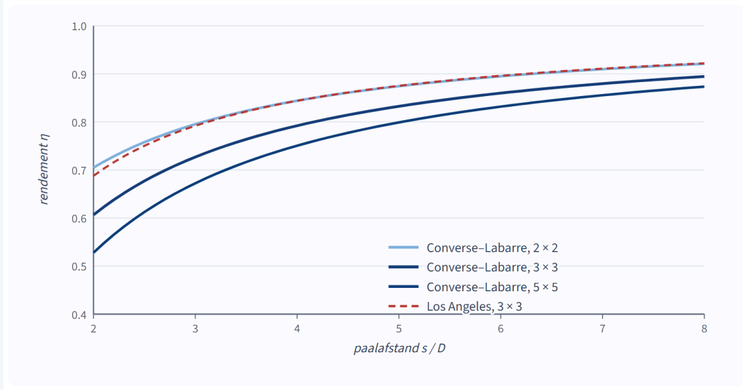
Naarmate de palen dichter bij elkaar staan, overlappen de grondgebieden die elke paal afschuift en vervormt elkaar. **Groepsefficiëntie** is de verhouding van het draagvermogen van de groep tot de som van de draagvermogens van de afzonderlijke palen. De bron geeft drie empirische vergelijkingen voor een groep van $n_1 \times n_2$ palen met diameter D en onderlinge afstand d:

$$\eta = \frac{Q_{g(u)}}{\sum Q_u}$$

$$\eta_{CL} = 1 - \frac{\theta}{90}\,\frac{(n_1-1)n_2 + (n_2-1)n_1}{n_1 n_2}, \quad \theta = \tan^{-1}\frac{D}{d}\ (\text{graad})$$

Converse–Labarre telt **paren naburige palen**: $(n_1 - 1)n_2$ paren in de rij en $(n_2 - 1)n_1$ paren naast elkaar, elk met een eigen hoek $\theta = \tan^{-1}(D/d)$ bij de bijbehorende onderlinge afstand.

De module gebruikt deze vergelijking voor klei; hiermee reduceert zij de schacht van kleilagen en de voet van een paal waarvan de punt in klei staat.



Naarmate de hartafstand toeneemt, nadert de efficiëntie tot 1; in een groep van 3 × 3 ongeveer 0.7 – 0.8 bij 3D.

De overige twee vergelijkingen en grenzen

THEORIE

De andere twee vergelijkingen van de bron gelden ook voor een rechthoekige groep. De vergelijking van **Los Angeles** en de vergelijking van **Seiler–Keeney** (met d in **ft**):

$$\eta_{LA} = 1 - \frac{D}{\pi d\, n_1 n_2}\left[n_1(n_2-1) + n_2(n_1-1) + \sqrt{2}(n_1-1)(n_2-1)\right]$$

$$\eta_{SK} = \left[1 - \frac{11d}{7(d^2-1)}\,\frac{n_1+n_2-2}{n_1+n_2-1}\right] + \frac{0.3}{n_1+n_2}$$

Seiler–Keeney heeft een pool op 1 ft en is zinloos onder 2 ft; de module geeft hem vanaf **2 ft**.

Een hartafstand kleiner dan 2.5D wordt **gemarkeerd**: dit is de kleinste hartafstand die de bron voor wrijvingspalen geeft, en de vergelijkingen zijn geschreven voor grotere hartafstanden.

Bij een driehoeksverband wordt Converse–Labarre geschreven door de aangrenzende paren te tellen; dit is een **uitbreiding van de module** en geeft een lagere efficiëntie dan het raster bij dezelfde hartafstand.

Opgave

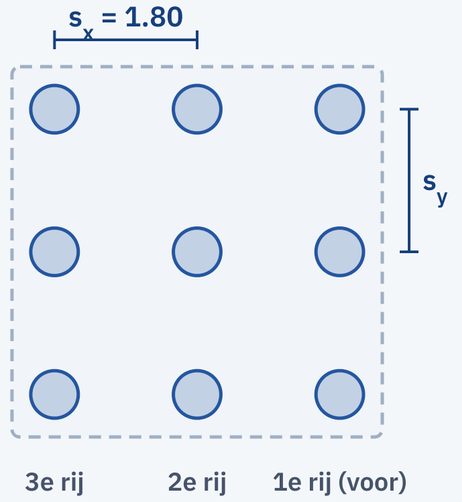
VOORBEELD

GEVRAAGD

Bepaal de groepsefficiëntie met de vergelijkingen van **Converse–Labarre**, **Los Angeles** en **Seiler–Keeney**.

Gegeven

Groep	**3 × 3 palen, D = 0.60 m, onderlinge afstand d = 1.80 m (in beide richtingen)**
Seiler–Keeney	**d in voet: 1.80 m = 5.906 ft**



Oplossing

OPLOSSING

1 Converse–Labarre: θ = tan⁻¹(D/d); aangrenzende paren: (2)(3) + (2)(3) = 12

$$\theta = \tan^{-1}\frac{0.6}{1.8} = 18.43^\circ \;;\quad \eta_{CL} = 1 - \frac{18.43}{90}\cdot\frac{12}{9} = \mathbf{0.727}$$

2 Los Angeles

$$\eta_{LA} = 1 - \frac{0.6}{\pi(1.8)(9)}\left[3(2) + 3(2) + \sqrt{2}(2)(2)\right] = \mathbf{0.792}$$

3 Seiler–Keeney (d = 5.906 ft)

$$\eta_{SK} = \left[1 - \frac{11(5.906)}{7(5.906^2 - 1)}\cdot\frac{4}{5}\right] + \frac{0.3}{6} = \mathbf{0.831}$$

Drie vergelijkingen in het bereik 0.727 – 0.831. In klei gebruikt de module **Converse–Labarre** (0.727).

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Efficiëntie in zand: een regel, geen vergelijking

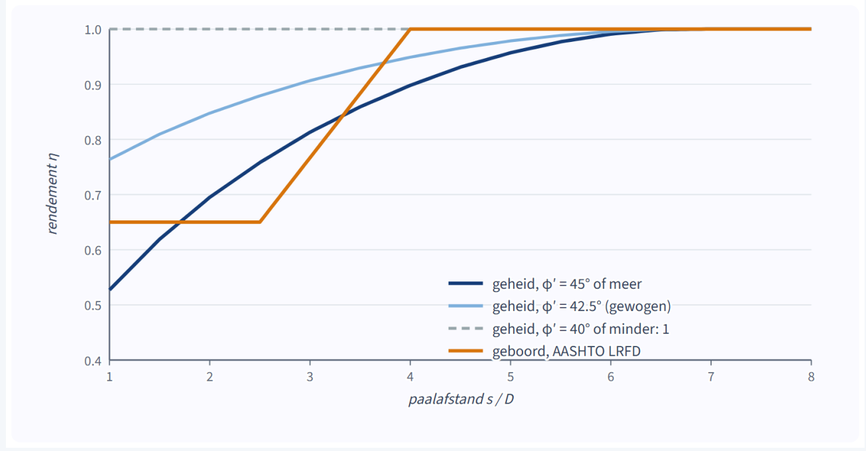
THEORIE

Een heipaal **verdicht** los of matig dicht zand; in dit zand draagt de groep evenveel als de som van de palen (in proeven zelfs meer). Alleen in dicht zand (φ′ > ongeveer 40°) verlaagt een kleine onderlinge afstand het draagvermogen. Voor een heipaal neemt de module de ondergrens van de bron en maakt de efficiëntie **nooit groter dan 1**:

- φ′ ≤ 40°: **η = 1**
- 40° < φ′ < 45°: **lineaire interpolatie** tussen 1 en de 45°-kromme
- φ′ ≥ 45°: de 45°-kromme (1.0 bij s/D = 7; 0.53 bij s/D = 1)

Boorpaal verdicht de grond niet, maar kan deze zelfs losmaken. AASHTO LRFD vermenigvuldigt de weerstand van elke boorpaal in de groep met **0.65** bij s/D = 2.5 en met **1.0** bij 4:

$$\eta = 0.65 + 0.35\,\frac{s/D - 2.5}{1.5} \qquad 2.5 \le s/D \le 4$$



Het draagvermogen van de zandlaag wordt toegepast op de schacht van die laag en op de puntweerstand van de paal waarvan de voet in het zand ligt. Hartafstand: **de kleinste afstand tussen twee palen**.

Opgave

VOORBEELD

Gegeven

Tussenafstand	**s = 1.80 m, D = 0.60 m: s/D = 3.0**
Boorpaal	**AASHTO-regel in zand**
Heipaal	**zand, $\varphi' = 42^\circ$ (45°-kromme bij s/D = 3: $\eta_{45} = 0.813$)**

GEVRAAGD

Bepaal het rendement van de zandlaag voor een **boorpaal** en voor een **heipaal** in zand met φ′ = 42°; wat gebeurt er voor φ′ = 35°?

Oplossing

OPLOSSING

1 Boorpaal (AASHTO): s/D = 3.0

$$\eta = 0.65 + 0.35\,\frac{3.0 - 2.5}{1.5} = \mathbf{0.767}$$

2 Heipaal, φ′ = 42°: gewicht w = (φ′ − 40)/5 en de 45°-kromme

$$w = \frac{42 - 40}{5} = 0.4 \qquad \eta = 1 - w(1 - \eta_{45}) = 1 - 0.4(1 - 0.813) = \mathbf{0.925}$$

3 Heipaal, φ′ = 35°

$$\varphi' \leq 40^\circ \;\Rightarrow\; \eta = \mathbf{1.000}$$

In dezelfde zone krijgt een **boorpaal** in zand 0.767, terwijl een **heipaal** (in los–matig zand) 1.00 krijgt: heien verdicht, boren niet.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

De modulus van elke laag is de modulus van die grond

THEORIE

De paalschacht wordt op de laaggrenzen opgedeeld en elk segment wordt volgens zijn eigen methode berekend. Een groepseffect dat verband houdt met de grond moet ook **segment voor segment** worden toegepast: het draagvermogen van een laag is het draagvermogen van die grond, terwijl de **punt** het draagvermogen krijgt van de grond waarop deze rust:

$$Q_{ind} = n \left(\sum_i \eta_i \, Q_{s,i} + \eta_b \, Q_p \right)$$

$$\eta_{group} = \frac{Q_{ind}}{\sum Q_u}$$

Kleilagen en de basis van een paal met de punt in klei: Converse–Labarre.

Zandlaag: grafiek voor heipalen, AASHTO-regel voor boorpalen.

De groepsefficiëntie is **geen invoergegeven** maar een **gewogen gemiddelde** van de bijdragen van de lagen: een paal die het grootste deel van zijn belasting uit zand haalt, weerspiegelt het groupeffect van dat zand, terwijl een paal die in klei hangt het groupeffect van de klei weerspiegelt.

Opgave

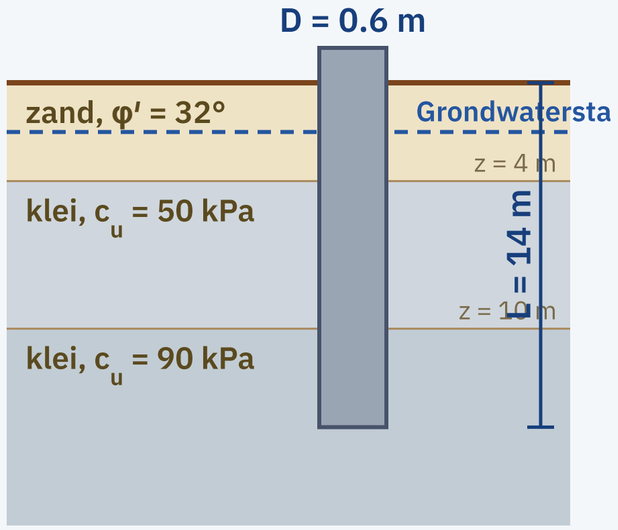
VOORBEELD

Gegeven

Enkele paal (Voorbeeld 3)	**Q_{s1} = 49.8 (zand), Q_{s2} = 311.0, Q_{s3} = 317.2 (klei), Q_p = 229.0 kN**
Efficiënties	**zand (boorpaal, s/D = 3): 0.767; klei: 0.727; paalpunt (klei): 0.727**
Groep	**9 palen**

GEVRAAGD

Wat zijn Q_{ind} en de **groepsefficiëntie** $\eta = Q_{ind}/\Sigma Q_u$?



Oplossing

OPLOSSING

1 De efficiënte bijdrage van elk deel (η Q): zandschacht, kleischacht 1, kleischacht 2, basis

$$0.767(49.8) = 38.2\ ; \quad 0.727(311.0) = 226.1$$
$$0.727(317.2) = 230.6\ ; \quad 0.727(229.0) = 166.5$$

2 Werkzaam draagvermogen van een enkele paal en paalgroep

$$\sum \eta Q = 38.2 + 226.1 + 230.6 + 166.5 = \mathbf{661.4}\ \text{kN}$$
$$Q_{ind} = 9(661.4) \approx \mathbf{5{,}952}\ \text{kN}$$

3 Groepsefficiëntie

$$\eta = \frac{Q_{ind}}{n\,Q_u} = \frac{5{,}952}{9(907.1)} = \mathbf{0.729}$$

De groep draagt **73%** van de som van de afzonderlijke palen (zand η = 0.767, klei η = 0.727).

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

De groep kan bezwijken als een diepe fundering

THEORIE

Als de palen dicht bij elkaar staan, kunnen de groep en de grond ertussen **samen** naar beneden bewegen: een diepe fundering met afmetingen $L_g \times B_g$ en diepte L. Het draagvermogen is de **afschuiving** langs de vier zijden plus het **draagvermogen** onder de basis:

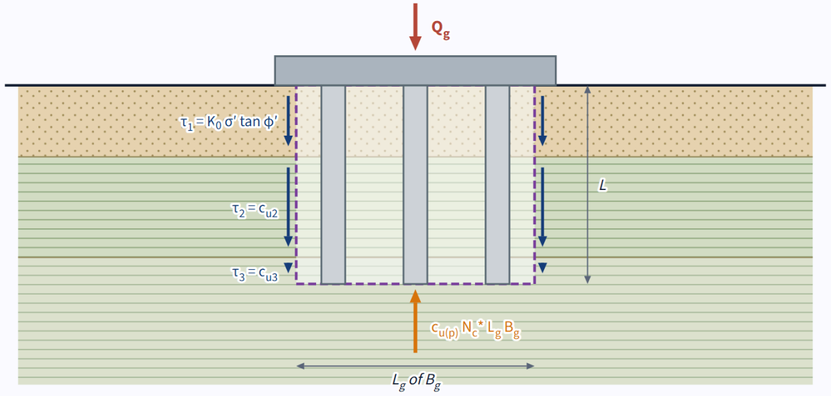
$$Q_{block} = \sum_i \tau_i \, P_b \, \Delta L_i + q_b \, L_g B_g \qquad P_b = 2(L_g + B_g)$$

Klezijde: $\tau = c_u$ (grond schuift langs grond, niet gereduceerd met α).

Zijvlak in zand (uitbreiding van de module ten opzichte van de bron): $\tau = K_0 \sigma' \tan\varphi'$, $K_0 = 1 - \sin\varphi'$.

Kleibasis: $q_b = c_u N^*_c$; N^*_c uit de grafiek, volgens L/B_g en L_g/B_g. **Zandbasis**: nQ_p.

$$Q_{g(u)} = \min(Q_{ind},\, Q_{block}) \qquad Q_{all} = \frac{Q_{g(u)}}{FS}$$



Opgave

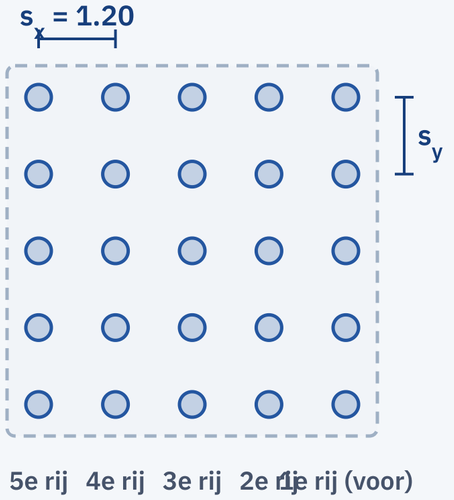
VOORBEELD

Gegeven

Groep	**9 boorpalen, 3 rijen × 3 palen, D = 0.60 m, L = 14 m, s = 1.80 m**
Grond	**zand 0–4 m (φ′ = 32°) · klei 4–10 m (c_u = 50) · klei 10–18 m (c_u = 90 kPa)**
Blok	**$L_g = B_g = (3 - 1)(1.8) + 0.6$**
Zijvlakken	**zand: $\tau = K_0\sigma'_v \tan\varphi'$ (σ'_v = 31.6 kPa); klei: $\tau = c_u$**
Basis	**klei, c_u = 90 kPa; N^*_c uit de grafiek (L_g/B_g = 1)**
Individueel	**Q_{ind} = 5,952 kN (Voorbeeld 6); V = 1 600 kN, FS = 3**

GEVRAAGD

Bepaal de waarde van **Q_{blok}**, het draagvermogen van de groep en de toelaatbare belasting.



Oplossing (1/2)

OPLOSSING

1 Blokafmetingen en omtrek

$$L_g = B_g = 4.2\ \text{m} \qquad P_b = 2(L_g + B_g) = \mathbf{16.8}\ \text{m}$$

2 Afschuiving op de zijvlakken (τ P_b ΔL)

$$\text{zand}: \tau = K_0 \bar{\sigma}' \tan\varphi' = 0.470(31.6)(0.6249) = 9.28 \ \Rightarrow\ 624\ \text{kN}$$

$$\text{klei 1}: \tau = 50 \ \Rightarrow\ 50(16.8)(6) = 5{,}040\ \text{kN}$$

$$\text{klei 2}: \tau = 90 \ \Rightarrow\ 90(16.8)(4) = 6{,}048\ \text{kN}$$

Oplossing (2/2)

OPLOSSING

3 Basis: N^*_c uit de abak voor $L/B_g = 14/4.2 = 3.33$ en $L_g/B_g = 1$

$$q_b L_g B_g = c_u N_c^* \, L_g B_g = 90(8.90)(17.64) = \mathbf{14{,}126}\ \text{kN}$$

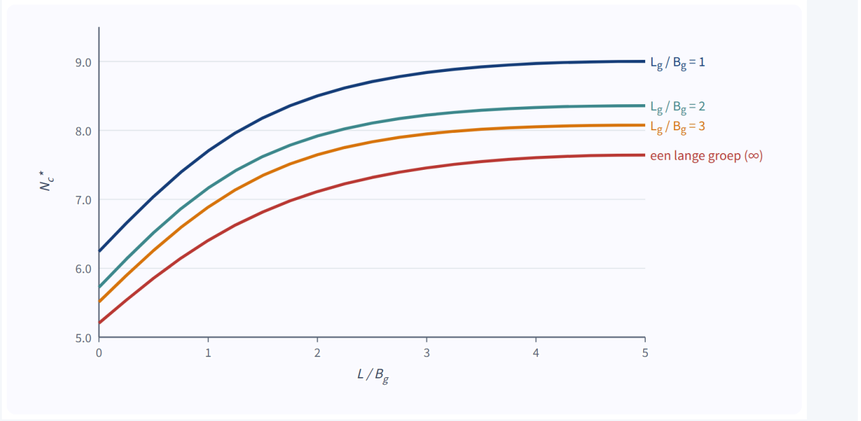
4 Blokcapaciteit, draagvermogen van de groep en toelaatbare belasting

$$Q_{block} = 11{,}712 + 14{,}126 = 25{,}838\ \text{kN}$$

$$Q_{g(u)} = \min(5{,}952;\ 25{,}838) = \mathbf{5{,}952}\ \text{kN}$$

$$Q_{all} = \frac{5{,}952}{3} = 1{,}984\ \text{kN} \geq V = 1\,600\ \text{kN}$$

De blokcapaciteit is **meer dan 4 keer** de som van de individuele palen: in deze groep zijn **de individuele palen maatgevend** (individueel). Het blok komt in beeld bij dicht opeengeplaatste groepen met veel palen; zie de grafiek aan de zijkant.



Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Opgave

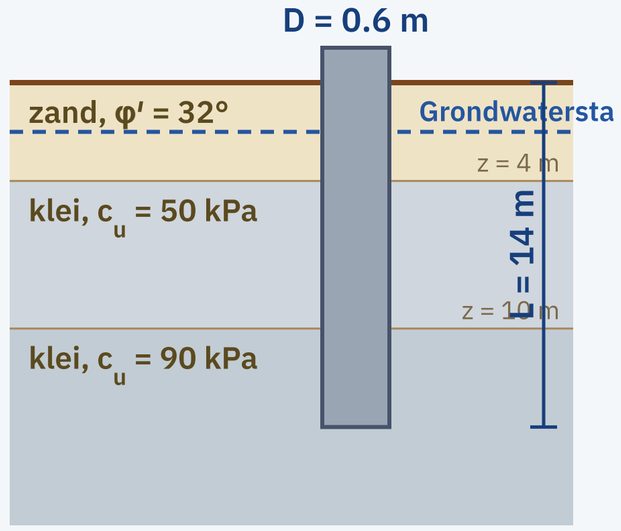
VOORBEELD

Gegeven

Groep	**5 × 5 heipalen, D = 0.40 m, s = 1.20 m (3D), L = 12 m**
Grond	**één zandlaag, $\varphi' = 32°$, $\gamma = 18$, $\gamma_{sat} = 19$ kN/m³, grondwaterstand op 3 m**
Enkele paal	**$Q_s = 285.7$, $Q_p = 318.0$ kN (geheid, K–δ en Meyerhof)**
Efficiëntie	**heipaal, in zand met $\varphi' < 40°$: $\eta = 1$**

GEVRAAGD

Vergelijk de waarden van Q_{ind} en Q_{blok} en bepaal het draagvermogen van de groep.



Oplossing (1/2)

OPLOSSING

1 Individuele palen (η = 1)

$$Q_{ind} = n\,Q_u = 25(603.7) = \mathbf{15{,}094}\ \text{kN}$$

2 Blok: $L_g = B_g = 4(1.2) + 0.4 = 5.2$ m; $\sigma'(3) = 54.0$, $\sigma'(12) = 136.7$ kPa

$$P_b = 2(5.2 + 5.2) = 20.8\ \text{m} \qquad \bar{\sigma}' = \frac{939.2}{12} = 78.3\ \text{kPa}$$

$$\tau = K_0 \bar{\sigma}' \tan\varphi' = 0.470(78.3)(0.6249) = 22.99\ \text{kPa}$$

$$\text{zijdelings glijden} = 22.99(20.8)(12) = \mathbf{5{,}738}\ \text{kN}$$

Oplossing (2/2)

OPLOSSING

3 Blokvoet in zand: de voet is de som van de puntweerstanden van de palen

$$\text{basis} = nQ_p = 25(318.0) = \mathbf{7{,}950}\ \text{kN} \qquad Q_{block} = 5{,}738 + 7{,}950 = \mathbf{13{,}689}\ \text{kN}$$

4 Draagvermogen en efficiëntie van de groep

$$Q_{block} = 13{,}689 \ < \ Q_{ind} = 15{,}094$$

$$Q_{g(u)} = \mathbf{13{,}689}\ \text{kN} \qquad \eta_{group} = \frac{13{,}689}{15{,}094} = \mathbf{0.907}$$

Hier is **het blok maatgevend**: in een grote groep is de som van de paalschachten groter dan de schuifcapaciteit van de buitenomtrek van de groep. Hoewel de palen afzonderlijk η = 1.00 geven, bedraagt de capaciteit van de groep **91%** van de som van de afzonderlijke palen.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Vesic: drie delen, dan de groep

THEORIE

Een enkele paal zakt door de verkorting van zijn eigen lengte, door de samendrukking van de grond onder de punt en door de samendrukking van de grond die langs de schacht wordt belast. Vesic (1969) sommeert deze drie componenten voor de werkbelasting Q_w (Q_{ws} is het aandeel van de schacht, Q_{wp} dat van de punt):

$$s_e = s_{e1} + s_{e2} + s_{e3}$$

$$s_{e1} = \frac{(Q_{wp} + \xi Q_{ws})L}{A_p E_p} \qquad s_{e2} = \frac{q_{wp} D}{E_s}(1 - \mu_s^2) I_{wp}$$

$$s_{e3} = \frac{Q_{ws}}{pL}\frac{D}{E_s}(1 - \mu_s^2) I_{ws} \qquad I_{ws} = 2 + 0.35\sqrt{L/D}$$

$$S_{g(e)} = \sqrt{\frac{B_g}{D}}\, s_e$$

De werkbelasting $Q_w = V/n$; de module verdeelt deze tussen schacht en basis in de verhouding **$Q_s : Q_p$**.

De groep zakt **$\sqrt{(B_g/D)}$** keer meer dan een enkele paal onder dezelfde paalbelasting (empirische betrekking van Vesic voor palen in zand).

ξ: verdeling van de schachtweerstand, tussen 0.5 (uniform) en 0.67 (toenemend met de diepte); I_{wp} = 0.85.

Opgave

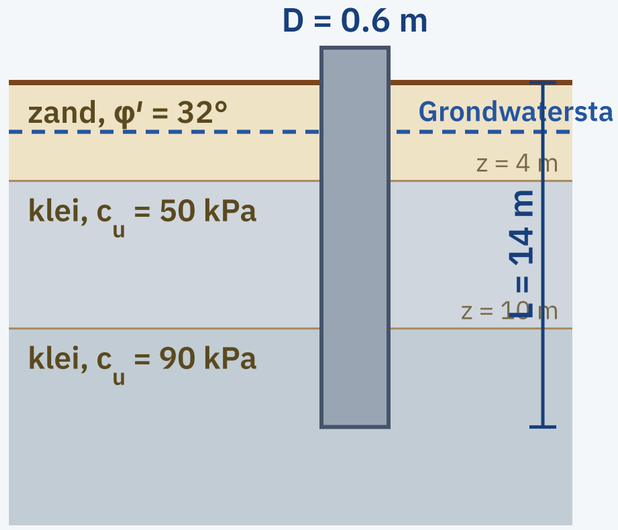
VOORBEELD

Gegeven

Groep	**9 boorpalen, 3 rijen × 3 palen, D = 0.60 m, L = 14 m, s = 1.80 m**
Grond	**zand 0–4 m (φ′ = 32°) · klei 4–10 m (c_u = 50) · klei 10–18 m (c_u = 90 kPa)**
Werkbelasting	**Q_w = V/n = 177.8 kN; Q_s : Q_p = 678.1 : 229.0 (Voorbeeld 3)**
Materiaal	$E_p = 30\,000$ MPa, $E_s = 30$ MPa, $\nu_s = 0.30$, $\xi = 0.6$, $I_{wp} = 0.85$

GEVRAAGD

Bepaal de elastische zetting van een enkele paal in drie delen en de elastische zetting van de **groep**.



Oplossing (1/2)

OPLOSSING

1 Verdeling van de werkbelasting

$$Q_{ws} = Q_w \frac{Q_s}{Q_u} = 177.8 \frac{678.1}{907.1} = 132.9\ \text{kN} \qquad Q_{wp} = 177.8 - 132.9 = 44.9\ \text{kN}$$

2 Verkorting van de paal

$$s_{e1} = \frac{(44.9 + 0.6(132.9))(14)}{(0.2827)(30\,000\,000)} = 0.21\ \text{mm}$$

3 Basis

$$q_{wp} = \frac{Q_{wp}}{A_b} = 158.7\ \text{kPa} \quad s_{e2} = \frac{158.7(0.6)}{30\,000}(1 - 0.3^2)(0.85) = 2.46\ \text{mm}$$

Oplossing (2/2)

OPLOSSING

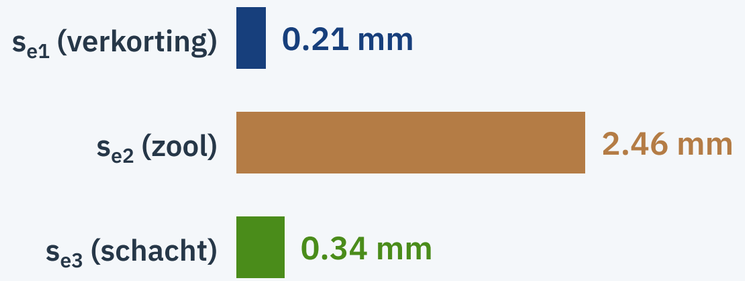
4 Schacht: $I_{ws} = 2 + 0.35\sqrt{(14/0.6)} = 3.69$

$$s_{e3} = \frac{132.9}{(1.885)(14)} \cdot \frac{0.6}{30\,000}(0.91)(3.69) = 0.34 \text{ mm}$$

5 Enkele paal en paalgroep

$$s_e = 0.21 + 2.46 + 0.34 \approx 3.00 \text{ mm}$$

$$S_{g(e)} = \sqrt{\frac{B_g}{D}}\, s_e = \sqrt{\frac{4.2}{0.6}}(3.00) = \mathbf{7.9} \text{ mm}$$



82% van de zetting komt van de component van de funderingszool (s_{e2}); de totale elastische zetting is **7.9 mm**. De eigenlijke zetting van de kleilagen volgt in de volgende stap: consolidatie.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Langzame en grote zetting van kleilagen

THEORIE

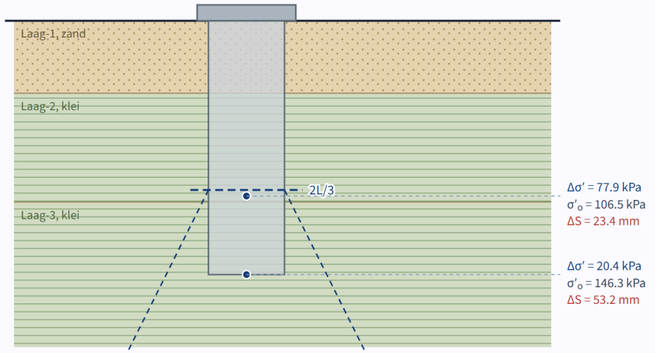
De kleilagen onder de poer zetten langzaam en grotendeels door **consolidatie**. De bron brengt de groepsbelasting vanaf het niveau van de poer over op een equivalente fundering **2L/3 daaronder** (de palen hebben een deel van de belasting op de bovenliggende grond overgedragen) en spreidt die daaronder volgens **2 verticaal : 1 horizontaal**. In het midden van een kleilaag, op een diepte z onder het niveau 2L/3, bedraagt de toegevoegde spanning:

$$\Delta\sigma'_i = \frac{Q_g}{(B_g + z_i)(L_g + z_i)}$$

$$\Delta S_i = \frac{C_c H_i}{1 + e_0} \log \frac{\sigma'_o + \Delta\sigma'_i}{\sigma'_o} \quad \text{(NC)}$$

Bij overgeconsolideerde klei wordt C_s (C_c/5 indien niet gegeven) gebruikt tot de preconsolidatiespanning en daarboven C_c.

Het deel van de kleilaag **onder** 2L/3 wordt in de berekening meegenomen; σ'_o wordt in het midden van dit deel bepaald, afhankelijk van de laag en de waterstand. $S_c = \Sigma\Delta S_i$.



Opgave

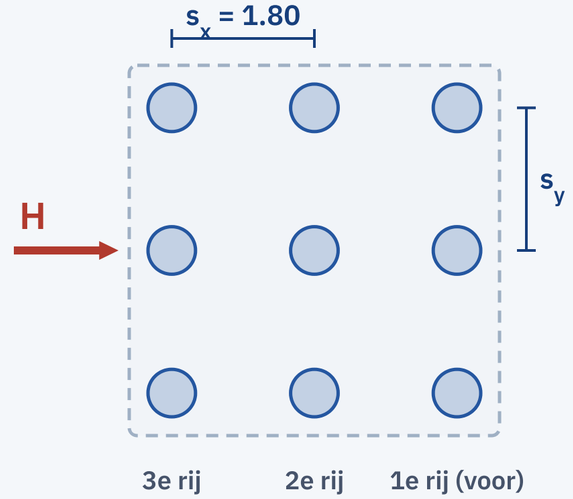
VOORBEELD

Gegeven

Groep	**9 boorpalen, 3 rijen × 3 palen, D = 0.60 m, L = 14 m, s = 1.80 m**
Grond	**zand 0–4 m (φ′ = 32°) · klei 4–10 m (c_u = 50) · klei 10–18 m (c_u = 90 kPa)**
Belasting	$Q_g = V = 1\,600$ kN; **blok** $L_g = B_g = 4.2$ m
Klei 1 (4–10 m)	$e_0 = 0.90,\ C_c = 0.28$ **(NC)**
Klei 2 (10–18 m)	$e_0 = 0.70,\ C_c = 0.20$ **(NC)**

GEVRAAGD

Bepaal het niveau 2L/3 en bereken de zetting van **elke kleilaag** (het deel onder 2L/3) en de totale consolidatiezetting.



Oplossing (1/2)

OPLOSSING

1 Niveau 2L/3 (vanaf de onderkant van de poer)

$$z_0 = \frac{2L}{3} = \frac{2(14)}{3} = \mathbf{9.33}\ \text{m} \ \Rightarrow\ \text{klei 1 (9.33–10 m) en geheel klei 2 tellen mee}$$

2 Klei 1 (4–10 m): 9.33–10 m, H = 0.67 m; middelpunt 9.67 m, z = 0.33 m

$$\Delta\sigma' = \frac{1\,600}{(4.2+0.33)(4.2+0.33)} = 77.9\ \text{kPa} \qquad \sigma'_o = 106.5\ \text{kPa}$$

$$\Delta S = \frac{0.28(0.67)}{1+0.90}\log\frac{106.5+77.9}{106.5} = \mathbf{23.4}\ \text{mm}$$

Oplossing (2/2)

OPLOSSING

3 Klei 2 (10–18 m): 10.00–18 m, H = 8.00 m; middelpunt 14.00 m, z = 4.67 m

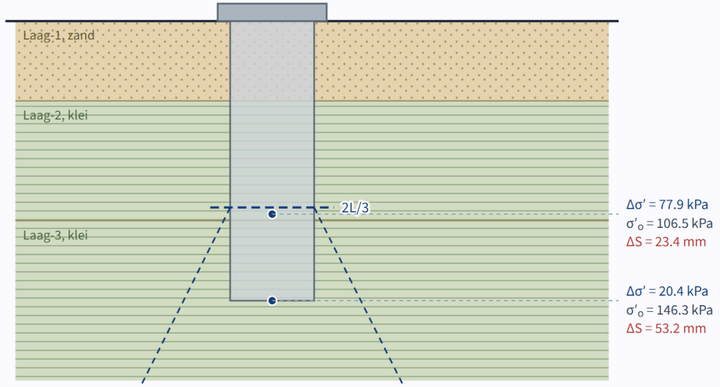
$$\Delta\sigma' = \frac{1\,600}{(4.2+4.67)(4.2+4.67)} = 20.4\ \text{kPa} \qquad \sigma'_o = 146.3\ \text{kPa}$$

$$\Delta S = \frac{0.20(8.00)}{1+0.70}\log\frac{146.3+20.4}{146.3} = \mathbf{53.2}\ \text{mm}$$

4 Totale consolidatiezetting en de combinatie met de elastische component

$$S_c = 23.4 + 53.2 = \mathbf{76.7}\ \text{mm}$$

$$S = S_{g(e)} + S_c = 7.9 + 76.7 = \mathbf{84.6}\ \text{mm}$$



91% van de zetting is afkomstig van consolidatie, en daarvan 69% uit de kleilagen van 10–18 m: de paalgroepzetting wordt bepaald door de dikke klei **ver onder** de paalpunten; de zetting van een enkele paal laat dit niet zien.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

De achterste rijen staan in de schaduw van de voorste

THEORIE

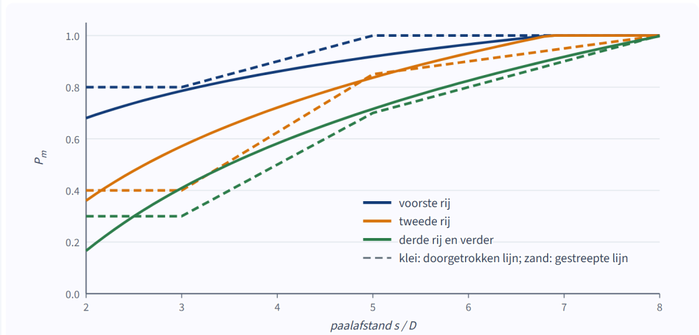
Onder horizontale belasting duwt een paal de grond weg en de grond reageert over de paallengte (de p–y-kromme in de horizontale modulus). Wanneer palen in de belastingsrichting **achter elkaar** staan, werkt elke paal in grond die door de voorliggende paal wordt vervormd en weggeduwd. Proeven (Brown et al. 1988; McVay et al. 1995; Rollins et al. 2006) tonen aan dat de p–y-kromme van de groep haar vorm behoudt, maar met een **p-vermenigvuldigingsfactor P_m** wordt verkleind; de factor hangt af van de rij en de onderlinge afstand:

$$p_{group}(y) = P_m \; p_{single}(y)$$

$$\text{klei (Rollins):} \quad \begin{aligned} P_{m1} &= 0.26 \ln \tfrac{s}{D} + 0.5 \\ P_{m2} &= 0.52 \ln \tfrac{s}{D} \\ P_{m3} &= 0.60 \ln \tfrac{s}{D} - 0.25 \end{aligned}$$

Zand: AASHTO LRFD-factoren (bij 3D en 5D: 0.8·0.4·0.3 en 1.0·0.85·0.7; daartussen lineair).

In gelaagde grond wordt de p–y-kromme van **elke laag** geschaald met de factor die bij het grondtype van die laag hoort. Als de belasting **omkeert**, neemt elke rij het gemiddelde van de rijfactoren van de groep.



Opgave

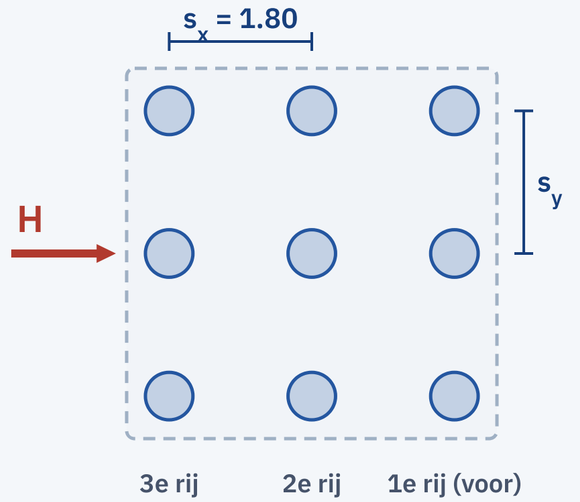
VOORBEELD

Gegeven

Hartafstand (in de richting van de belasting)	s_x = 1.80 m, D = 0.60 m: s/D = 3
Klei	Vergelijkingen van Rollins et al. (2006)
Zand	AASHTO LRFD: in 3D $P_m = 0.8 \cdot 0.4 \cdot 0.3$

GEVRAAGD

Bepaal de **p-multipliers** van de drie rijen voor de kleilaag; als de belasting **wordt omgekeerd**, wat is dan de gemiddelde multiplier van de rijen voor klei en zand?



Oplossing

OPLOSSING

1 Klei: ln(s/D) = ln 3 = 1.099

$$P_{m1} = 0.26(1.099) + 0.5 = \mathbf{0.786}$$

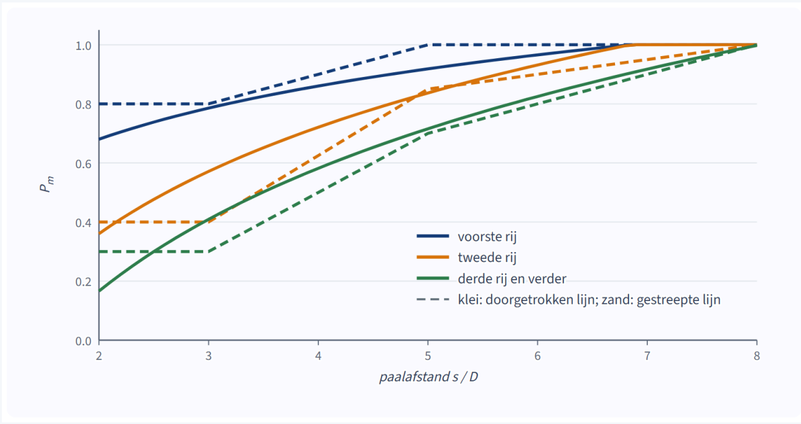
$$P_{m2} = 0.52(1.099) = \mathbf{0.571}$$

$$P_{m3} = 0.60(1.099) - 0.25 = \mathbf{0.409}$$

2 Omkeerbare belasting: gemiddelde van de rijen

$$\bar{P}_{m,clay} = \frac{0.786 + 0.571 + 0.409}{3} = \mathbf{0.589}$$

$$\bar{P}_{m,sand} = \frac{0.8 + 0.4 + 0.3}{3} = \mathbf{0.500}$$



De voorste rij behoudt ongeveer 79% van de curve, terwijl de derde en volgende rijen slechts 41% behouden (in klei); in zand 80% en 30%. Naarmate de hartafstand toeneemt, naderen de factoren 1 (bij 5D, zand 1.0 · 0.85 · 0.7).

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

De kap ondergaat één enkele verplaatsing

THEORIE

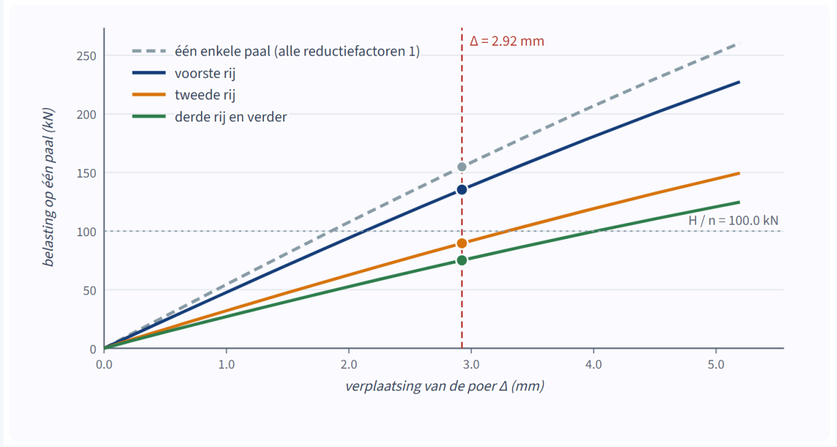
De poer is star en de rotatie ervan is verhinderd: **elke paalkop verplaatst over dezelfde Δ**; maar omdat de p–y-krommen verschillend geschaald zijn, dragen de rijen verschillende belastingen. De module bepaalt de Δ waarbij de som van de rijbelastingen gelijk is aan de belasting op de poer:

$$\sum_{k=1}^{n_x} n_y \, H_k(\Delta) = H$$

De paal in rij k is de enkele paal van de **module horizontale paalbelasting** (eindige elementen + Newton); de krommen worden geschaald met de multiplicatoren van die rij.

De verplaatsing is **gestuurd**: de paalkop wordt op Δ gehouden en de reactie wordt afgelezen; zo kan ook de top van de verzwakkende (cyclische klei) kromme worden gevolgd.

De maximale belasting die de groep kan dragen is de **eerste piek** van de rijsom; als de vereiste belasting groter is, meldt de module dit.



Opgave

VOORBEELD

Gegeven

Oplossing (module)	**Δ = 2.92 mm; belasting per paal: 1e rij 135.3, 2e rij 89.6, 3e rij 75.1 kN**
Enkele paal	**Draagt 154.8 kN bij Δ′; verplaatst 1.85 mm onder 100 kN**
Belasting	**H = 900 kN, n = 9: gelijk deel H/n = 100 kN**

GEVRAAGD

Controleer het evenwicht; bepaal de verhouding van de verplaatsing van de poer tot die van een enkele paal en de **groepsefficiëntie onder horizontale belasting**.

Oplossing

OPLOSSING

1 Evenwicht: $\Sigma n_\gamma H_k = H$

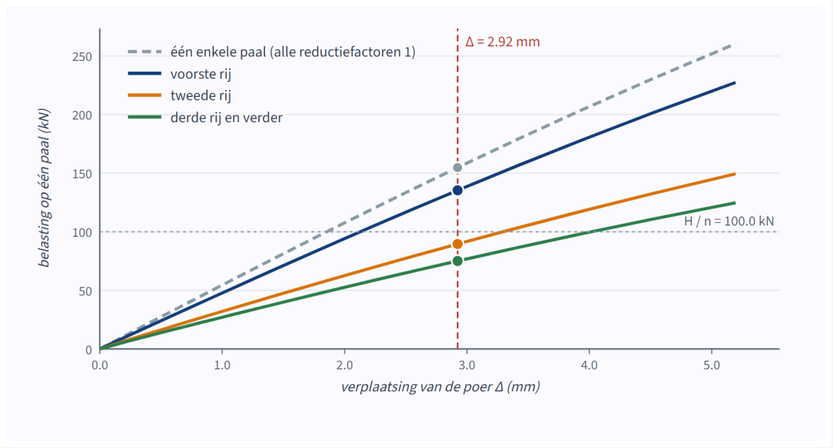
$$3(135.3 + 89.6 + 75.1) = \mathbf{900}\ \text{kN} = H\ \checkmark$$

2 Verhouding van de verplaatsing van de poer tot die van een enkele paal

$$\frac{\Delta}{y_{single}} = \frac{2.92}{1.85} = \mathbf{1.58}$$

3 Groepsefficiëntie onder horizontale belasting: gemiddelde paalbelasting / belasting op een enkele paal bij dezelfde Δ

$$\eta_{lateral} = \frac{H/n}{H_{single}(\Delta)} = \frac{100.0}{154.8} = \mathbf{0.65}$$



De voorste rij draagt **1.35 keer** het gelijke aandeel, de derde rij 0.75 keer; de poer verplaatst **1.58 keer** meer dan bij een enkele paal. Het maximale buigende moment treedt op aan de paalkop: 207 kN·m.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Welke waarde hoort bij welke toets?

THEORIE

Paalbelastingen: $P_{max} \leq Q_u/FS$ (enkele paal, geen groepsEffect); de paal op trek $T_{max} \leq T_u/FS$, en de palen op trek samen $\Sigma T \leq T_g/FS$

Groepscapaciteit: $V \leq Q_{all} = Q_{g(u)}/FS$; welke van beide (individueel of blok) maatgevend is

Zetting: elastisch + consolidatie, vergeleken met de ingevoerde toelaatbare waarde

Horizontaal: verplaatsing van de poer, belasting van de voorste rij, maximaal buigend moment en horizontale efficiëntie; vergeleken met de toelaatbare verplaatsing

De belasting per paal en het buigend moment zijn de belastingen voor het **constructieve ontwerp** van de paaldoorsnede

VOORBEELDGROEP: TOETSEN

Toets	Resultaat
$P_{max} \leq Q_u/FS$	261 ≤ 302 kN ✓
$V \leq Q_{all}$	1 600 ≤ 1,984 kN ✓
Zetting	84.6 mm
Δ (horizontaal)	2.92 mm

Opgave

VOORBEELD

Gegeven

Groep	**9 boorpalen, 3 rijen × 3 palen, D = 0.60 m, L = 14 m, s = 1.80 m**
Grond	**zand 0–4 m (φ′ = 32°) · klei 4–10 m (c_u = 50) · klei 10–18 m (c_u = 90 kPa)**
Variërend	**paalafstand s = 2.5D · 3D · 4D · 5D · 6D (in beide richtingen)**
Belastingen	**V = 1 600, H = 900 kN, M_y = 900 kN·m**

GEVRAAGD

Hoe veranderen het draagvermogen, de efficiëntie en de verplaatsing van de poer van de groep naarmate de onderlinge afstand toeneemt?

Oplossing (1/2)

OPLOSSING

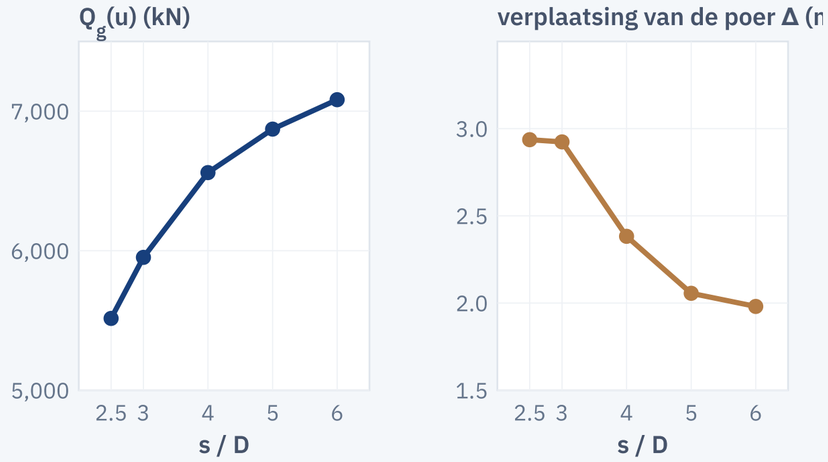
s / D	s (m)	η zand	η klei	$Q_{g(u)}$ (kN)	η groep	Δ (mm)
2.5	1.50	0.65	0.677	5,515	**0.676**	2.94
3.0	1.80	0.77	0.727	5,952	**0.729**	2.92
4.0	2.40	1.00	0.792	6,560	**0.803**	2.38
5.0	3.00	1.00	0.832	6,871	**0.842**	2.06
6.0	3.60	1.00	0.860	7,083	**0.868**	1.98

s = 2.5D → 6D: capaciteit **5,515 → 7,083 kN**, groepsefficiëntie 0.68 → 0.87, verplaatsing van de poer **2.94 → 1.98 mm**. Naarmate de onderlinge afstand toeneemt, naderen zowel de efficiëntie als de p-factoren 1; 2.5D is de kleinste afstand die de bron geeft.

Oplossing (2/2)

OPLOSSING

Toelichting. Het vergroten van de tussenafstand van 2.5D naar 6D verhoogt het draagvermogen met 28% en vermindert de verplaatsing van de poer met 33%; maar de poer wordt groter en de palen komen verder uit elkaar te staan. In de praktijk is een tussenafstand tussen 3D – 3.5D en 5D een compromis. In de grafiek links $Q_{g(u)}$, rechts Δ.



Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

De uitgangspunten achter de getallen

THEORIE

Groep: verticale palen in een rechthoekig raster of driehoeksverband, met één doorsnede en lengte, onder een starre poer. De poer draagt de belasting over maar voegt geen weerstand toe (passieve druk, de wrijving eronder en het draagvermogen worden aan de veilige kant gelaten).

Enkele paal: regels voor gelaagde grond, er wordt geen enkele weerstand ingevoerd.

Efficiëntie: empirische vergelijkingen voor heipalen in klei; in zand één enkele afstand (de kleinste afstand). Bij een driehoeksopstelling is Converse–Labarre een **uitbreiding**.

Blok: de fundering van de bron in klei; het glijvlak in zand en de zandbasis zijn een **uitbreiding van de module**.

Belastingen: V omvat het gewicht van de poer; horizontale belasting en momenten grijpen aan op de onderzijde van de poer. Bij trek wordt alleen de schacht beschouwd, zand ¾.

Zetting: dit is een optie; het elastische deel met één E_s en v_s, consolidatie met 2:1-spreiding, in het midden van elke laag.

Horizontaal: de p-multiplicatoren komen uit proeven op specifieke gronden en onderlinge afstanden; de 3D-waarden zijn gemarkeerd.

Samenvatting

Belangrijkste punten

Stijve poer: **P = V/n + Bx + Cy**; de grootste belasting op de voorste paal, de kleinste op de achterste paal; bij een groot moment komt de achterste paal op **trek**

De **enkele paal** wordt laag voor laag berekend; het groepsdraagvermogen wordt daarop gebaseerd

Efficiëntie wordt laag per laag toegepast: Converse–Labarre in klei, het nomogram voor heien in zand ($\eta \leq 1$) en de AASHTO-regel voor boorpalen

Draagkracht = **min(individueel, blok)**; het blok is maatgevend bij dicht opeengepakte groepen met veel palen

Zetting: elastisch (Vesic, met $\sqrt{(B_g/D)}$) + consolidatie (2:1-spreiding vanaf 2L/3); de zetting van de groep wordt bepaald door de dikke kleilaag

Lateraal: de p-multipliers nemen af van de voorste rij naar achteren; de poer ondergaat één Δ, de rijen dragen ongelijke belasting

Literatuur

Das, B.M. (2016). Principles of Foundation Engineering, 8th ed. Cengage Learning, Boston.

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, Washington.

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.

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.

Terzaghi, K., Peck, R.B. and Mesri, G. (1996). Soil Mechanics in Engineering Practice, 3rd ed. John Wiley & Sons, New York.

Vijayvergiya, V.N. and Focht, J.A. (1972). A new way to predict capacity of piles in clay. Proceedings of the 4th Offshore Technology Conference, Houston, Paper OTC 1718.

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

O'Neill, M.W. and Reese, L.C. (1999). Drilled Shafts: Construction Procedures and Design Methods. FHWA-IF-99-025, Federal Highway Administration, Washington.

Reese, L.C. and O'Neill, M.W. (1989). Drilled Shafts: Construction Procedures and Design Methods. FHWA-HI-88-042, Federal Highway Administration, Washington; the base of a drilled shaft in clay.

Terzaghi, K. and Peck, R.B. (1967). Soil Mechanics in Engineering Practice, 2nd ed. John Wiley & Sons, New York.

Kishida, H. and Meyerhof, G.G. (1965). Bearing capacity of pile groups under eccentric loads in sand. Proceedings of the 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Montreal, 2, 270–274.

Vesic, A.S. (1969). Experiments with instrumented pile groups in sand. Performance of Deep Foundations, ASTM STP 444, 177–222.

Jaky, J. (1944). The coefficient of earth pressure at rest. Journal of the Society of Hungarian Architects and Engineers, 7, 355–358.

American Association of State Highway and Transportation Officials (2012). AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 6th ed.: the p-multipliers of pile groups and the resistance of shaft groups in cohesionless soil.

Washington State Department of Transportation (2010). Bridge Design Memorandum No. 07-2010, Bearing resistance of shaft groups.

Brown, D.A., Morrison, C. and Reese, L.C. (1988). Lateral load behavior of pile group in sand. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 114(11), 1261–1276.

McVay, M., Casper, R. and Shang, T.-I. (1995). Lateral response of three-row groups in loose to dense sands at 3D and 5D pile spacing. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 121(5), 436–441.

Rollins, K.M., Olsen, R.J., Egbert, J.J., Jensen, D.H., Olsen, K.G. and Garrett, B.H. (2006). Pile spacing effects on lateral pile group behavior: analysis. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 132(10), 1272–1283.

Matlock, H. (1970). Correlations for design of laterally loaded piles in soft clay. Proceedings of the 2nd Offshore Technology Conference, Houston, Paper OTC 1204, 577–594.

Reese, L.C., Cox, W.R. and Koop, F.D. (1974). Analysis of laterally loaded piles in sand. Proceedings of the 6th Offshore Technology Conference, Houston, Paper OTC 2080, 473–485.

American Petroleum Institute (2000). Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms — Working Stress Design, API RP 2A-WSD, 21st ed.

GeoTerva

Online geotechnische berekeningen

Van theorie naar praktijk

Bereken de voorbeeldgroep 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