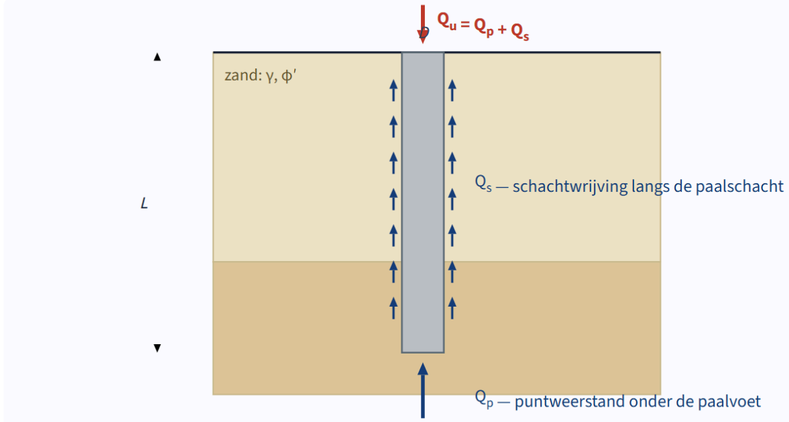
Geotechnisch college · Paalfunderingen

Draagvermogen van een paal in zand

College: puntweerstand, schachtwrijving en kritieke diepte. De theorie van elke methode, gevolgd door een rekenvoorbeeld.

Meyerhof (1976) · Vesic (1977) · Coyle en Castello (1981) · Rekenvoorbeelden



Inleiding

Wat leren we in dit college?

- Kunnen uitleggen hoe een paal zijn belasting draagt als **puntweerstand** en **schachtwrijving**
- Het **effectieve spanningsprofiel** in zand kunnen opstellen, inclusief de waterstand
- Het puntweerstand met drie methoden kunnen berekenen: **Meyerhof**, **Vesic**, **Coyle en Castello**
- De rol van de schachtwrijving en van de **kritieke diepte** (L′) kunnen interpreteren
- Het **toelaatbare draagvermogen** kunnen bereiken en de resultaten van de methoden samen kunnen beoordelen

COLLEGESTRUCTUUR

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

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

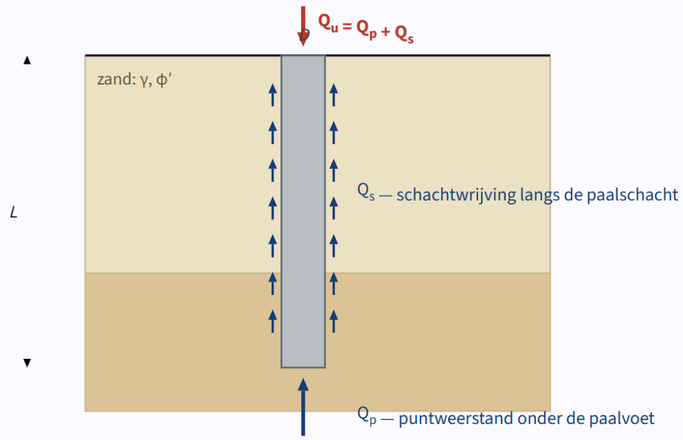
2 · **Opgave**: gegeven en gevraagd

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

Alle voorbeelden worden met dezelfde paal uitgevoerd: zo worden de methoden naast elkaar vergeleken.

De belasting wordt op twee manieren overgedragen

THEORIE



De paal brengt de belasting **langs twee wegen tegelijk** op de grond over: de grond onder de punt weerstaat met **puntweerstand** (Q_p), en het zand langs de schacht met **schachtwrijving** (Q_s).

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

Schachtwrijving bereikt haar volledige waarde bij een **kleine** verplaatsing, puntweerstand daarentegen bij een **veel grotere** verplaatsing; de twee componenten bereiken niet gelijktijdig hun maximum.

In dit college: **één paal**, **zand** ($c' = 0$), hei- of boorpaal, constante doorsnede.

In zand is alles evenredig met de effectieve spanning

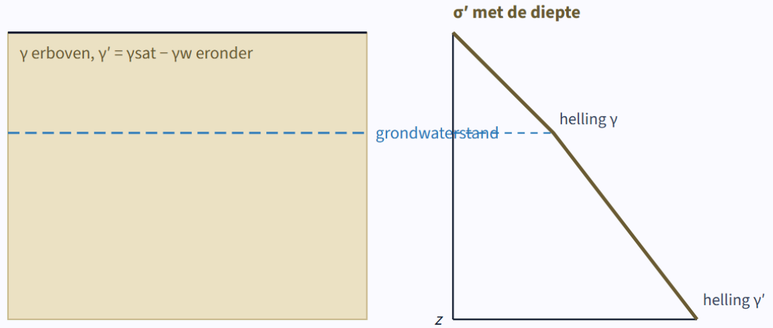
THEORIE

In zand zijn zowel de **puntweerstand** als de **eenheidsschachtwrijving** evenredig met de effectieve verticale spanning. De berekening begint met het correct bepalen van de σ'_v-waarden in het profiel.

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

γ : vochtig volumiek gewicht (boven de grondwaterstand)
γ_{sat} : verzadigd volumiek gewicht (onder de grondwaterstand)
$\gamma_w = 9.81$ kN/m³ : volumiek gewicht van water
grondwaterstand

> Onder de grondwaterstand wordt de spanningsgradiënt **kleiner**: $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$



Opgave

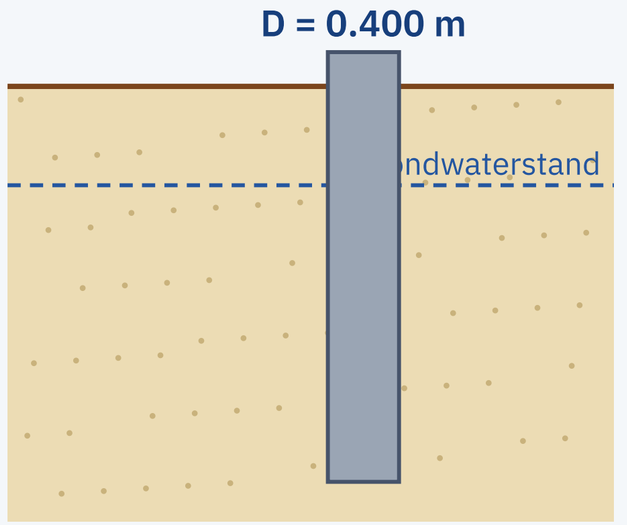
VOORBEELD

Gegeven

Zand, boven de grondwaterstand	$\gamma = 17\ \mathrm{kN/m^3}$
Zand, onder de grondwaterstand	$\gamma_{sat} = 19.5\ \mathrm{kN/m^3}$
Diepte van de grondwaterstand	**2.0 m**
Volumiek gewicht van water	$\gamma_w = 9.81\ \mathrm{kN/m^3}$

GEVRAAGD

Bepaal op **8 m diepte** de totale verticale spanning, de poriënwaterspanning en de **effectieve verticale spanning**.



Oplossing

OPLOSSING

1 Totale verticale spanning (vochtig volumiek gewicht boven de grondwaterstand, verzadigd volumiek gewicht eronder)

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

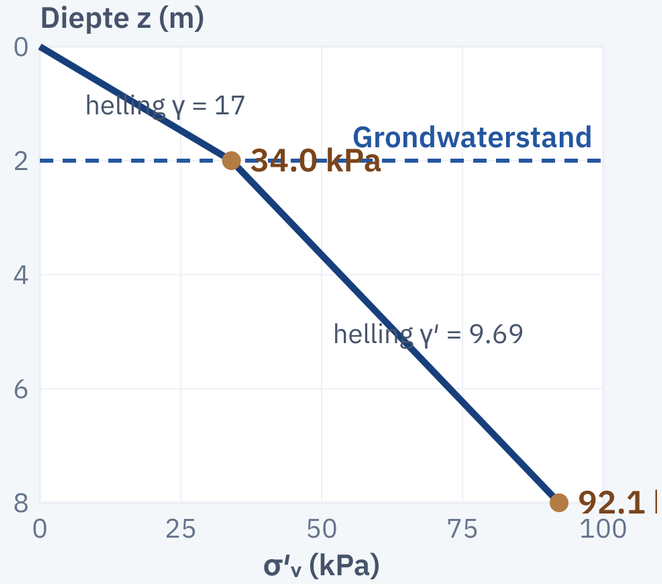
2 Poriënwaterspanning (6 m waterkolom onder de grondwaterstand)

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

3 Effectieve verticale spanning

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

Zelfde resultaat: σ′$_V$ = 17(2) + (19.5 – 9.81)(6) = **92.1 kPa**. Onder de grondwaterstand is het effectief volumiek gewicht 9.69 kN/m³.



Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Puntweerstand: algemene uitdrukking

THEORIE

Het zand onder de punt bezwijkt door **draagvermogensbreuk**, zoals onder een fundering; op de diepte van de punt echter omsluit de **deklaagspanning** het zand stevig.

Omdat c′ = 0 in zand, blijft alleen de diepte-(deklaag)term over. Omdat de paaldiameter klein is, wordt de breedteterm ($0.5\gamma' D N_\gamma$) verwaarloosd:

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

σ'_v : effectieve verticale spanning op de diepte van de paalpunt

N^*_q : draagvermogensfactor voor het paalprobleem

A_p : oppervlak van de paalpunt

WAAR KOMT N^*_q VANDAAN? DRIE BENADERINGEN

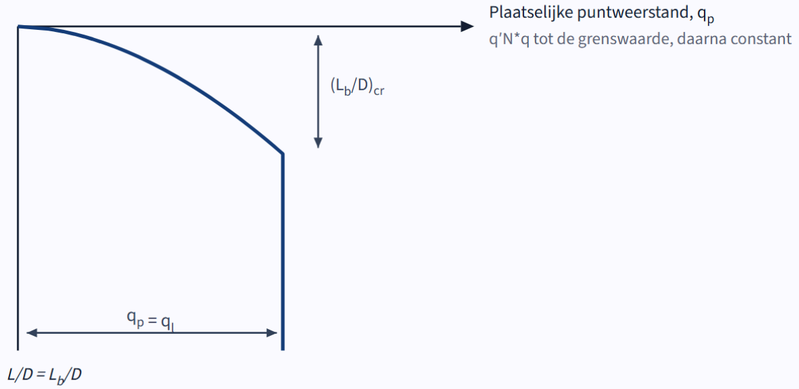
Meyerhof (1976): N^*_q hangt alleen van φ′ af; q_p wordt afgekapt door een **grenswaarde**

Vesic (1977): theorie van holte-uitbreiding; ook de **stijfheid** van het zand wordt in rekening gebracht

Coyle en Castello (1981): aangepast aan 24 proeven op ware schaal; N^*_q hangt ook van L/D af

De puntweerstand neemt niet onbeperkt toe

THEORIE



In homogeen zand neemt de eenheidspuntweerstand toe met de inbeddingsverhouding en bereikt een **piek** bij **$(L_b/D)_{cr}$**; daarna blijft deze constant (q_l).

VESIC (1970) · PAALPROEF OGEECHEE RIVER (D = 0.457 m)

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

Maximale waarde van q_p is ongeveer **12 000 kN/m²**

$(L/D)_{cr}$ ongeveer **16 – 18**

Voor een gemiddelde $N_{60} \approx 30$ geldt $4p_aN_{60} = 4(100)(30) = 12\,000$ kN/m²: **de correlatie stemt overeen met het gemeten plateau**

Meyerhof: N*q uit φ′, met een bovengrens

THEORIE

Meyerhof neemt N^*_q uitsluitend uit de **inwendige wrijvingshoek** (zijn eigen diagram, hieronder). De berekende q_p kan een **grenswaarde** niet overschrijden:

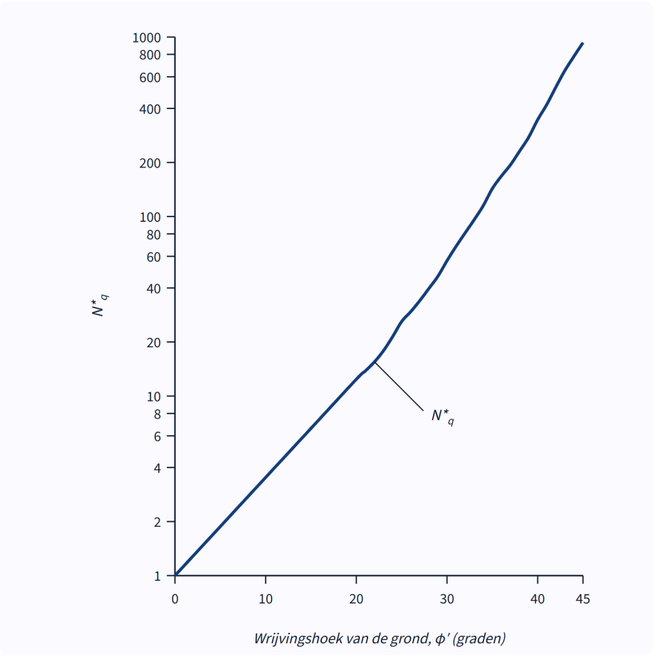
$$q_p = \sigma'_v N^*_q \;\leq\; q_l \qquad q_l = 0.5\, p_a\, N^*_q \tan\varphi'$$

p_a = 100 kN/m² : atmosferische druk

φ′ : effectieve wrijvingshoek van het zand op het niveau van de paalpunt

WAARDEN VAN N^*_q (GRAFIEK VAN MEYERHOF; DE REEKS DIE DE MODULE LEEST)

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



Voor φ′ = 35° is N^*_q = 143.0 en q_l = 5,006 kPa; in zand met γ = 18 kN/m³ wordt deze grens op een diepte van ongeveer **1.9 m** bereikt

Meyerhof: stap voor stap en de betekenis van de grens

THEORIE

BEREKENINGSSTAPPEN

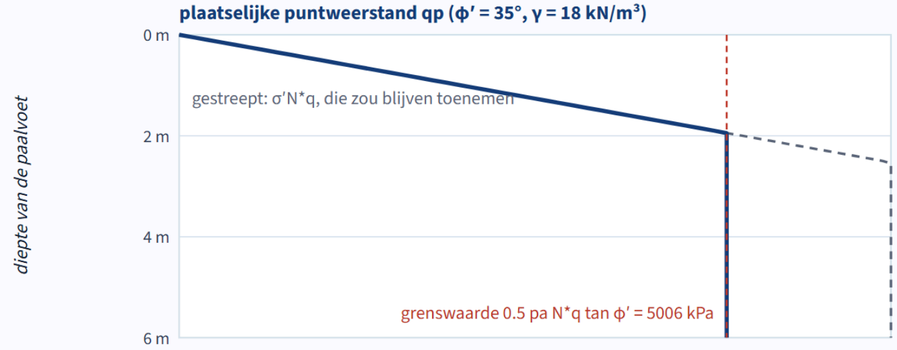
1. Bereken σ'_v op het niveau van de paalpunt

2. Lees de waarde van N^*_q voor φ' af uit de grafiek/tabel

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

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

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



De kromme volgt de lijn $\sigma' N^*_q$ **totdat de grenswaarde maatgevend wordt**; daarna blijft zij horizontaal. Zonder de grens zou q_p met de diepte onbeperkt toenemen, wat veldproeven niet aantonen.

Opgave

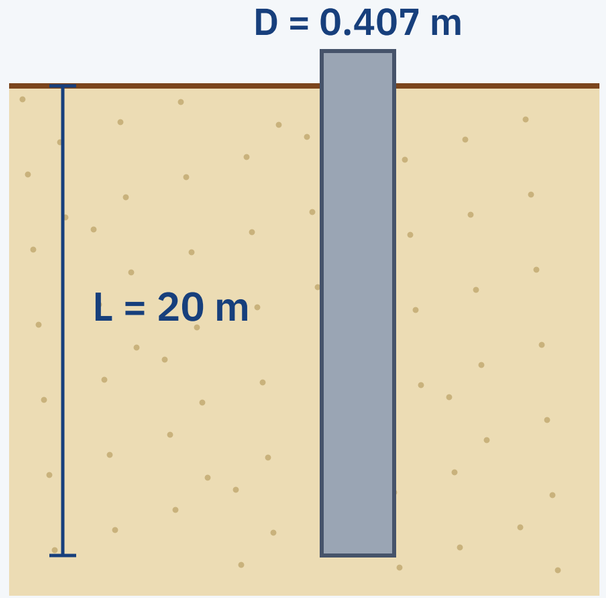
VOORBEELD

Gegeven

Paal	**gewapend beton, heipaal, vierkante doorsnede**
Afmetingen van de doorsnede	**D = 0.407 m**
Lengte	**L = 20 m**
Zand (homogeen)	$\gamma = 18\ \mathrm{kN/m^3}$, $\varphi' = 35°$
Grondwater	**geen**

GEVRAAGD

Bepaal de **puntweerstand** Q_p van de paal volgens de methode van **Meyerhof (1976)**.



Oplossing

OPLOSSING

1 Dwarsdoorsnedeoppervlak en effectieve spanning aan de punt

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

2 Waarde N*q (φ′ = 35°, tabel van Meyerhof) en σ′N*q

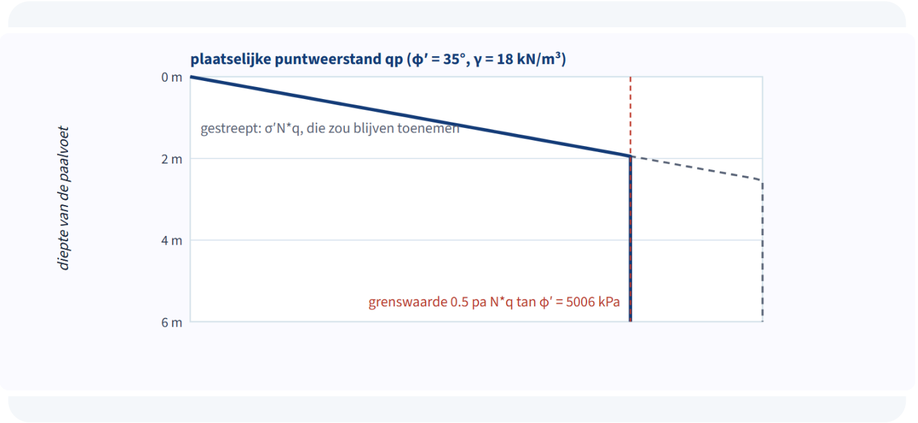
$$N_q^* = 143.0 \qquad \sigma'_v N_q^* = 360(143.0) = 51{,}480\ \text{kPa}$$

3 Grenswaarde

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

4 Eenheidspuntweerstand: de kleinste van de twee; de grenswaarde is maatgevend

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



$Q_p = A_p\, q_p = 0.1656 \times 5{,}006 =$ **829 kN**. Zonder de begrenzing zou het ongeveer 8,528 kN zijn geweest.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Vesic: het zand onder de punt expandeert als een holte

THEORIE

Vesic leidt de puntweerstand af **uit de theorie van holte-expansie**: de paalpunt expandeert een holte in de omringende grond; daarom speelt in de uitkomst niet alleen de **sterkte** van het zand een rol, maar ook de **stijfheid**.

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

Hierbij is $\bar{\sigma}'_o$ niet **verticaal** maar de **gemiddelde effectieve normaalspanning** op het niveau van de paalpunt:

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

K_o: neutrale gronddrukcoëfficiënt

q': effectieve verticale spanning op het niveau van de paalpunt ($= \sigma'_v$)

RELATIE MET MEYERHOF

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

De vorm is dezelfde als bij Meyerhof; de twee methoden verschillen in **waaruit de coëfficiënt wordt afgeleid**, niet in de vorm van de vergelijking.

Vesic: gereduceerde stijfheidsindex

THEORIE

N^*_σ hangt af van de **gereduceerde stijfheidsindex** I_{rr} van het zand en van φ'; I_{rr} houdt ook rekening met de volumeverandering in de plastische zone:

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

E_s : elasticiteitsmodulus van de grond, μ_s : dwarscontractiecoëfficiënt, G_s : schuifmodulus

Δ : gemiddelde volumieke vervorming in de plastische zone onder de punt

PRAKTISCHE BENADERINGEN (CHEN EN KULHAWY, 1994; 25° ≤ φ′ ≤ 45°)

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

ÉÉN INVOER: m = E_s / p_a

Zand	m
los	100 – 200
matig dicht	200 – 500
dicht	500 – 1000

De stijfheidsindex bedraagt in het algemeen **75 – 150** (zand met een relatieve dichtheid van 50 – 80%)

Als een CPT beschikbaar is: $I_r = 300/F_r(\%)$ (mechanisch), $170/F_r(\%)$ (elektrische conus)

Vesic: stap voor stap

THEORIE

BEREKENINGSSTAPPEN

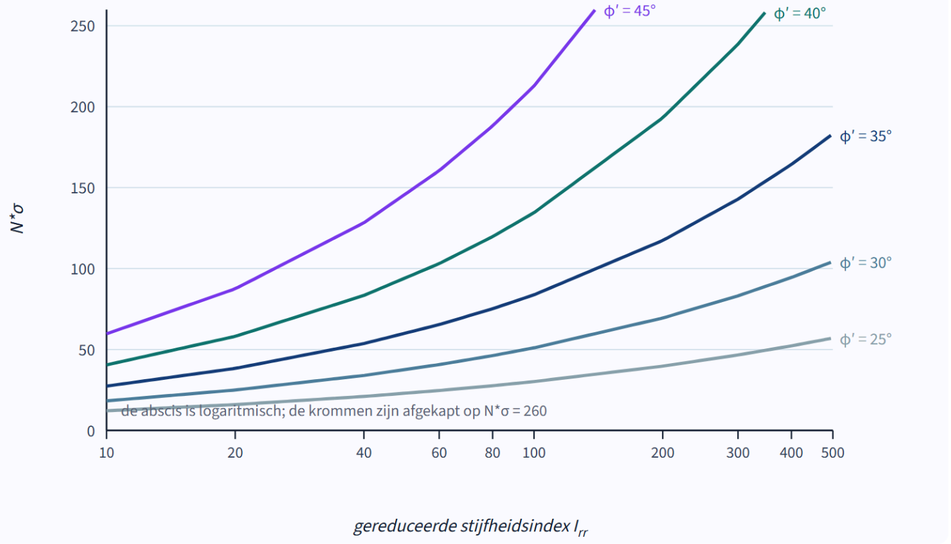
1. $K_o = 1 - \sin\varphi'$ en $\bar{\sigma}_o = (1 + 2K_o)q'/3$

2. $E_s = m \cdot p_a$, μ_s, I_r

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

4. N^*_σ uit φ' en I_{rr} (uit de tabel, logaritmische interpolatie)

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



Eén kromme per φ': **N^*_σ neemt toe met de stijfheid**; dicht en stijf zand levert veel meer puntweerstand dan los zand.

Opgave

VOORBEELD

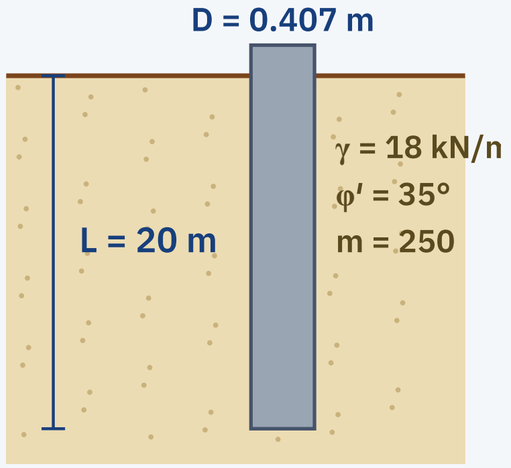
Gegeven

Paal	**Zelfde als voorbeeld 2: D = 0.407 m, L = 20 m**
Zand	$\gamma = 18\ \mathrm{kN/m^3}$, $\varphi' = 35°$
Grondwater	**geen**
Verhouding van elasticiteitsmoduli	$m = E_s/p_a = 250$ **(matig dicht – dicht)**
atmosferische druk	$p_a = 100\ \mathrm{kPa}$

GEVRAAGD

Bepaal de **puntweerstand** Q_p van de paal volgens de methode van **Vesic (1977)**.

Effectieve spanning aan de punt: q′ = 18(20) = 360 kPa



Oplossing (1/3)

OPLOSSING

1 Neutrale gronddrukcoëfficiënt en gemiddelde effectieve normaalspanning

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

2 Grond eigenschappen

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

3 Stijfheidsindex en volumieke eenheidsvervorming

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

Oplossing (2/3)

OPLOSSING

4 Gereduceerde stijfheidsindex

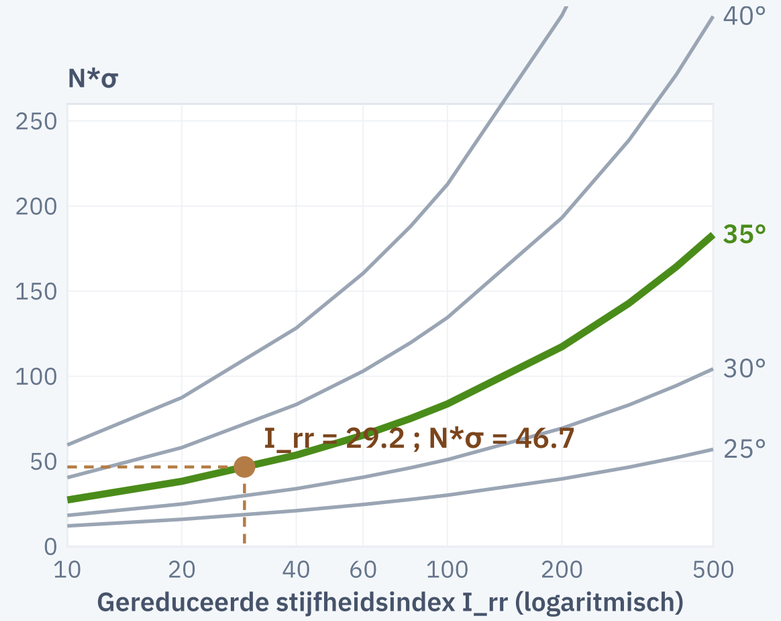
$$I_{rr} = \frac{I_r}{1 + I_r \Delta} = \frac{39.7}{1 + (39.7)(0.0090)} = \mathbf{29.2}$$

5 N*σ: in de tabel, logaritmische interpolatie tussen 20 en 40 voor de rij φ′ = 35° en I_{rr} = 29.2

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

$$= \mathbf{46.7}$$

In de grafiek de groene curve φ′ = 35°: op het snijpunt met de verticale lijn I_{rr} = 29.2 geldt **$N^*_\sigma \approx 46.7$**.



Oplossing (3/3)

OPLOSSING

6 eenheidspuntweerstand

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

7 Puntweerstand

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

Voor dezelfde paal **Meyerhof: 829 kN**, **Vesic: 1,721 kN**. Omdat Vesic de stijfheid van het zand (m = 250) in rekening brengt, geeft deze ongeveer 2.1 maal de begrensde waarde van Meyerhof.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Coyle en Castello: empirische N*q

THEORIE

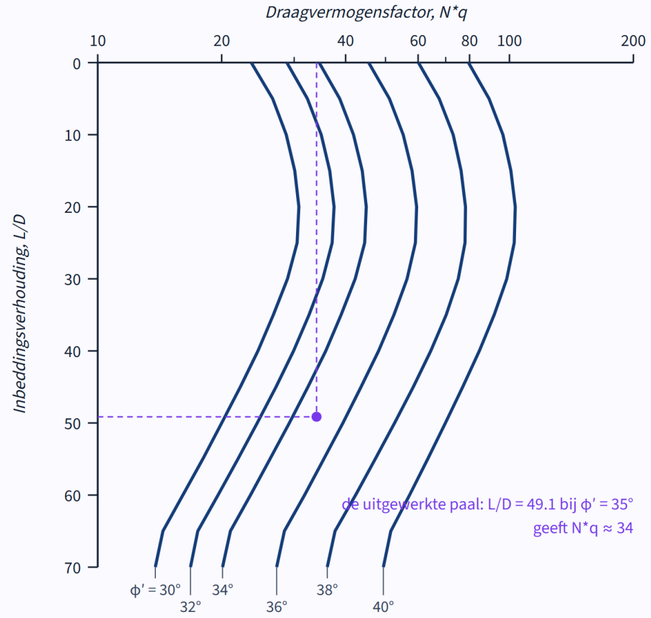
Coyle en Castello onderzochten **24 grootschalige veldbelastingsproeven op heipalen** en stelden voor zand de volgende betrekking voor:

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

q′ is de effectieve verticale spanning aan de punt; N^*_q hangt naast φ′ ook af van **de inbeddingsverhouding L/D** (grafiek, ernaast).

De coëfficiënt is **veel kleiner** dan die van Meyerhof: ongeveer **34** voor φ′ = 35° en een diepe paal, tegenover **143** bij Meyerhof. Dit komt doordat hij is gefit op **gemeten draagkrachten** en niet op een bezwijkmechanisme.

Zodra de inbeddingsverhouding ongeveer 20 overschrijdt, **neemt** de coëfficiënt **af**: een langere paal met dezelfde diameter krijgt een kleinere N^*_q.



Opgave

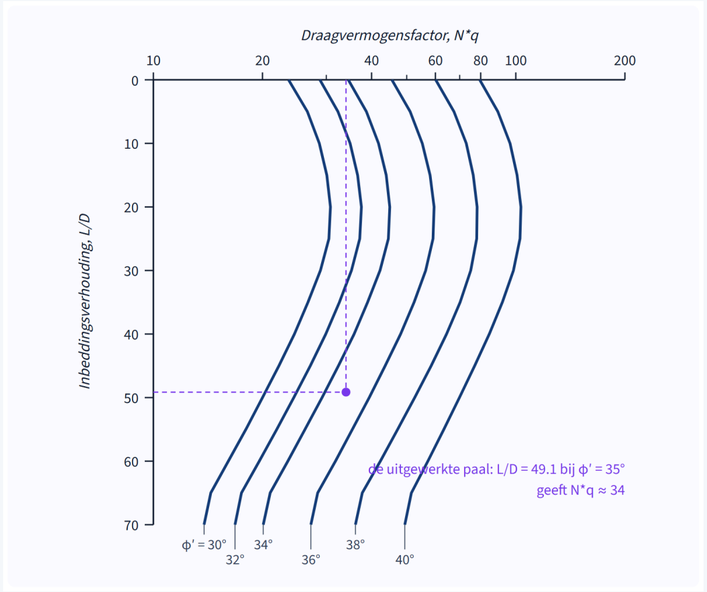
VOORBEELD

Gegeven

Paal en zand	**Hetzelfde als Voorbeeld 2: L = 20 m, D = 0.407 m, φ′ = 35°, γ = 18 kN/m³**
Inbeddingsverhouding	$L/D = 20/0.407 = 49.1$
Coëfficiënt afgelezen uit de grafiek	$N_q^* \approx 34$ **(Figuur 7; φ′ = 35°, L/D ≈ 49)**

GEVRAAGD

Bepaal met de methode van **Coyle en Castello (1981)** de **puntweerstand** Q_p van de paal.



Oplossing

OPLOSSING

1 Effectieve spanning aan de punt en coëfficiënt (uit de abacus, globale aflezing)

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

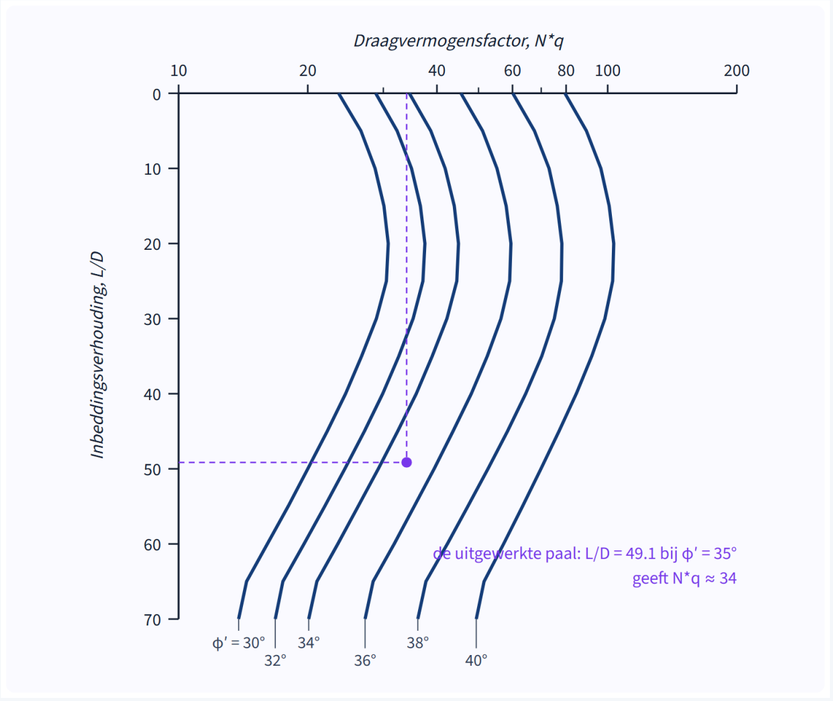
2 eenheidspuntweerstand

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

3 Puntweerstand

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

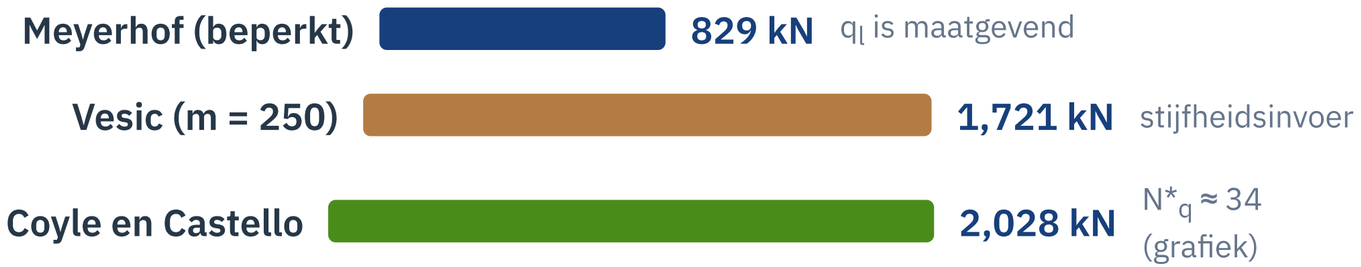
De N*$_q$ die uit het nomogram wordt afgelezen, is een benaderende waarde; deze kan met ±1 – 2 eenheden variëren afhankelijk van φ′ en L/D. Het resultaat is de grootste van de drie methoden: **2,028 kN**.



Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Drie methoden, dezelfde paal

THEORIE



Omdat de methoden op **afzonderlijke aannamen** berusten, lopen ook de resultaten uiteen. De spreiding is een eerlijke indicatie van hoe goed de puntweerstand bekend kan zijn.

Meyerhof: **conservatief** vanwege de grenswaarde

Vesic: neemt de dichtheid van het zand expliciet op via **m**

Coyle–Castello: gebaseerd op gemeten heipalen; het aflezen van de grafiek is bij benadering

In de praktijk: er worden ten minste twee methoden berekend, het bereik wordt bekeken en bij gebrek aan een **paalbelastingproef** of lokale ervaring wordt een waarde nabij het voorzichtige uiteinde gekozen.

Schachtwrijving: f = K σ′ tanδ′

THEORIE

Schachtwrijving is de som van de eenheidswrijving langs het schachtoppervlak:

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

De eenheidswrijving f wordt als functie van de diepte als volgt geschreven (L′: kritieke diepte):

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

p : omtrek van de paaldoorsnede, ΔL : lengte waarover p en f constant worden genomen

K : coëfficiënt van de effectieve horizontale gronddruk, σ'_o : effectieve verticale spanning op die diepte

δ′ : wrijvingshoek grond–paal (gewoonlijk 0.5φ′ – 0.8φ′)

K-WAARDEN (NAAR PAALTYPE)

Paaltype	K
Geboord of gespoten	≈ Ko = 1 – sin φ′
Gering-grondverdringend geheid	≈ Ko tot 1.4Ko = 1.4(1 – sin φ′)
Sterk-grondverdringend geheid	≈ Ko tot 1.8Ko = 1.8(1 – sin φ′)

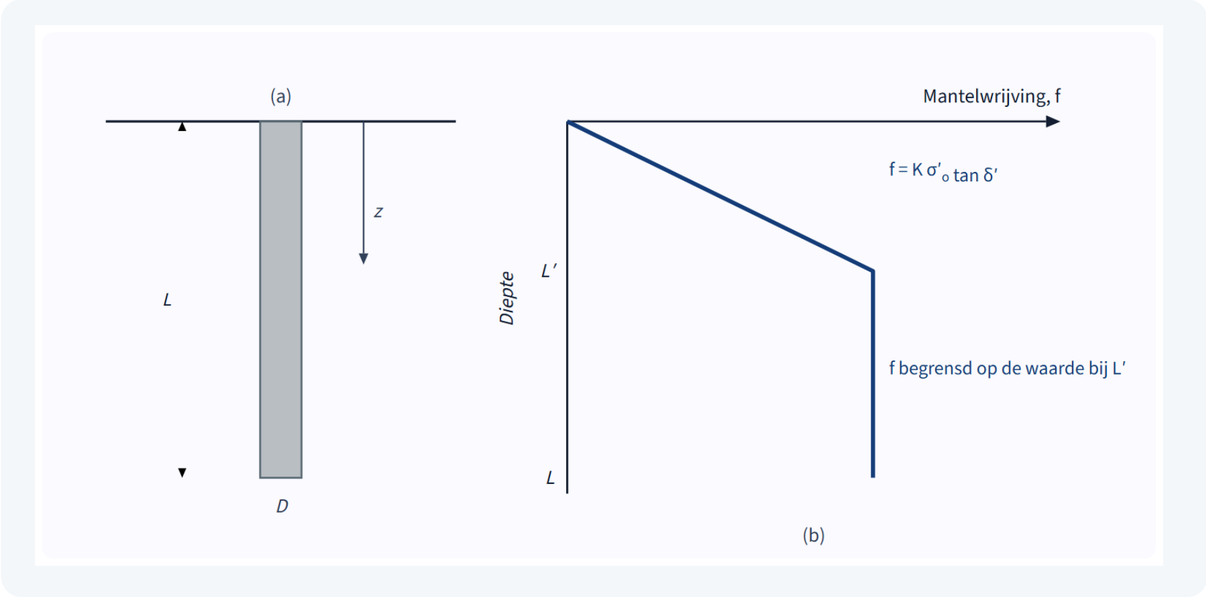
Heien verdicht het zand eromheen (tot ongeveer 2.5D)

Een paal met grote verdringing ondervindt meer schachtwrijving dan een paal met kleine verdringing

Boor-/jetpalen geven minder wrijving dan heipalen

Kritieke diepte: waarom neemt de wrijving niet toe?

THEORIE



De gemeten wrijving neemt met de diepte niet **onbeperkt** toe zoals de effectieve spanning; zij neemt toe tot een benaderde **kritieke diepte** en blijft daarna constant.

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

De gebruikelijke verklaring is **boogwerking**: het zand draagt niet de volledige deklaagspanning rond de schacht over aan de paal. De module houdt de effectieve spanning onder L′ **op de waarde op diepte L′**; de eenheidswrijving blijft tot aan de paalpunt constant.

> Voor L′ geeft de bron 15D – 20D; conservatieve waarde **15D**

Opgave

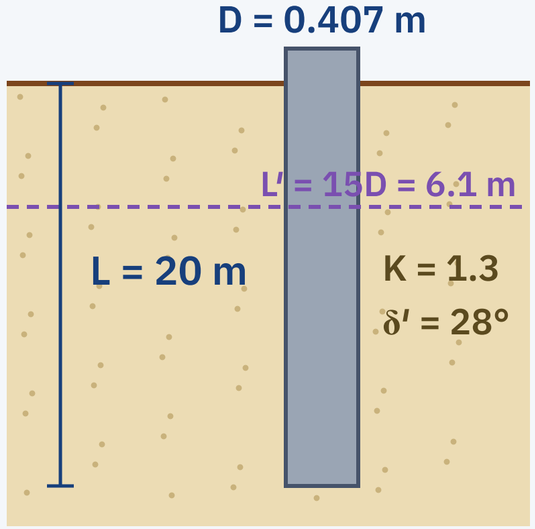
VOORBEELD

Gegeven

Paal en zand	**Zelfde als voorbeeld 2: L = 20 m, D = 0.407 m, γ = 18 kN/m³**
Omtrek	$p = 4D = 4(0.407) = 1.628\ \text{m}$
Coëfficiënten	$K = 1.3$ **(heipaal met grote verdringing),** $\delta' = 28^\circ$ **(**$\approx 0.8\varphi'$**)**

GEVRAAGD

Bepaal, rekening houdend met de kritieke diepte (L′ = 15D), de **schachtwrijving** Q_s van de paal.



Oplossing

OPLOSSING

1 Kritieke diepte en de spanning op die diepte

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

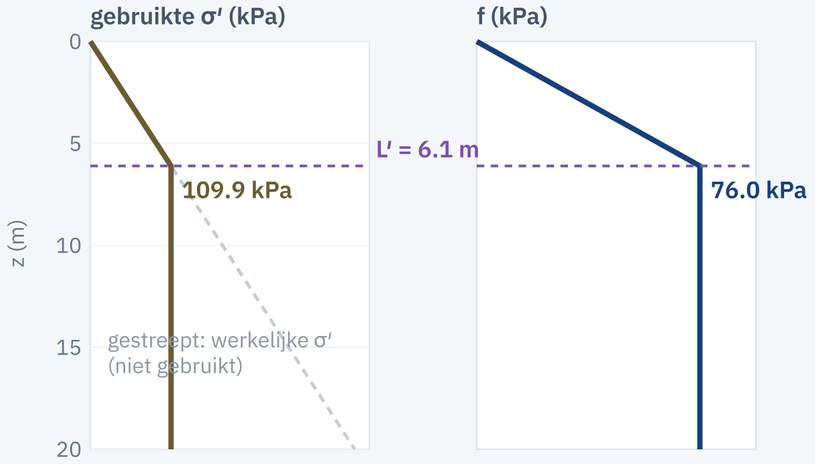
2 L′ en de eenheidswrijving aan de punt (constant onder L′)

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

3 Q_s: driehoek (0 – L′) + rechthoek (L′ – L) oppervlak × omtrek

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

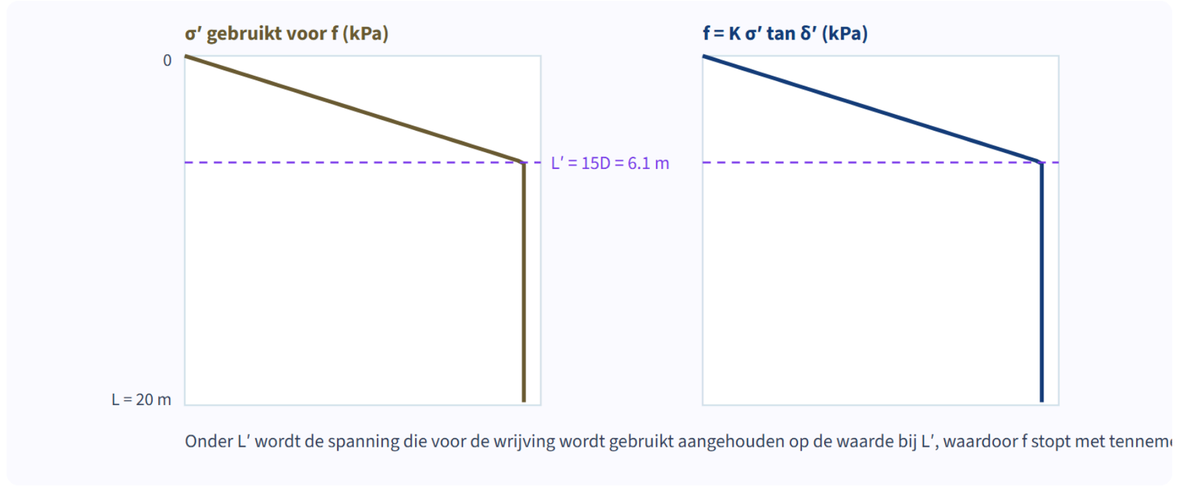
Q_S = 1,628 [231.9 + 1,055.4] = **2,096 kN**.



Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Wat gebeurt er als we de kritieke diepte vergeten?

THEORIE



Laten we dezelfde paal **zonder rekening te houden met L′** berekenen, waarbij de spanning lineair tot aan de punt toeneemt:

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

2,096 kN in plaats van **4,051 kN**: ongeveer **93% te veel**. Het verwaarlozen van de kritieke diepte bij een lange paal veroorzaakt een grote fout aan de onveilige kant.

Coyle en Castello: met één gemiddelde spanning

THEORIE

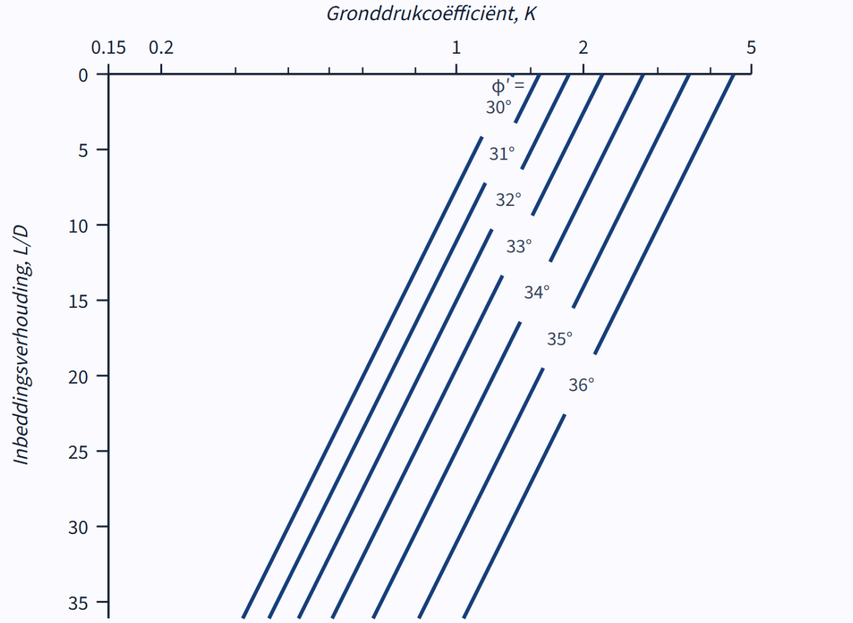
Coyle en Castello stelden voor de schachtwrijving **in één stap te berekenen met de gemiddelde effectieve spanning over de ingebedde lengte**:

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

K is uit proeven bepaald en wordt uit de grafiek (hiernaast) afgelezen op basis van **L/D** en φ′.

Er is geen afzonderlijke kritieke diepte: middeling vangt dit op

Daarom kunnen de twee omtrekmethoden **grote verschillen geven bij lange palen**



Opgave

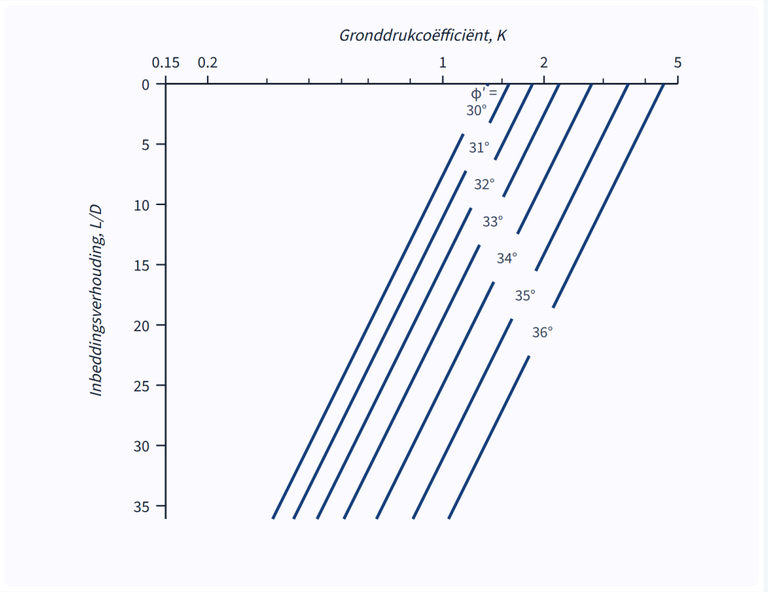
VOORBEELD

Gegeven

Paal en zand	**Hetzelfde als Voorbeeld 2: L = 20 m, D = 0.407 m, φ′ = 35°, γ = 18 kN/m³**
Coëfficiënt	$K \approx 0.41$ **(Figuur 10; de grafiek is getekend tot L/D = 36, voor L/D ≈ 49 wordt de curve door extrapolatie afgelezen; voer deze waarde in het K-vak van de module in, de module vult 0.48 in op basis van zijn eigen aflezing van de grafiek)**
Wrijvingshoek	$\delta' = 0.8\varphi' = 0.8(35^\circ) = 28^\circ$

GEVRAAGD

Bepaal met de methode van **Coyle en Castello (1981)** de **schachtwrijving** Q_s van de paal.



Oplossing

OPLOSSING

1 Gemiddelde effectieve spanning langs de schacht (homogeen zand, geen grondwaterstand)

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

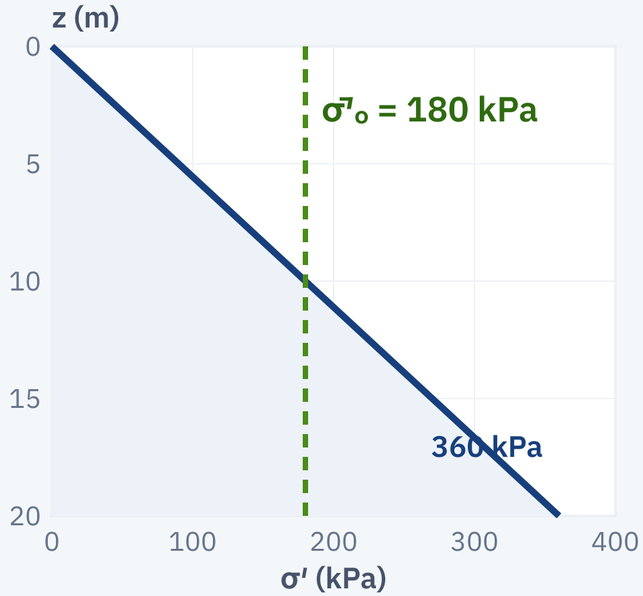
2 Gemiddelde eenheidswrijving langs de schacht

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

3 schachtwrijving

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

De K–δ′-methode (met L′) geeft **2,096 kN**, Coyle–Castello geeft **1,278 kN**: bij deze lange paal is er ongeveer 64% verschil tussen beide.



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

Het bovenste uiteinde wordt gekozen als de grond slechts uit enkele boringen bekend is of als het draagvermogen hoofdzakelijk door de **punt** wordt gedragen

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

Opgave

VOORBEELD

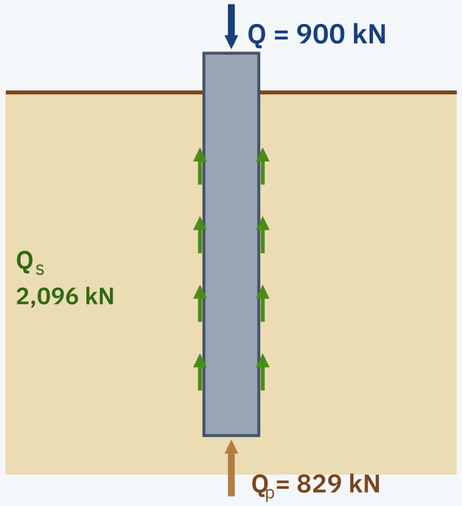
Gegeven

Puntweerstand	**Q_p = 829 kN (Meyerhof, voorbeeld 2)**
schachtwrijving	**Q_s = 2,096 kN (K–δ′, Voorbeeld 5)**
Veiligheidsfactor	**FS = 3**
Werkbelasting op de paal	**Q = 900 kN**

GEVRAAGD

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

Is de werkbelasting **voldoende**?



Oplossing

OPLOSSING

1 Uiterst draagvermogen

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

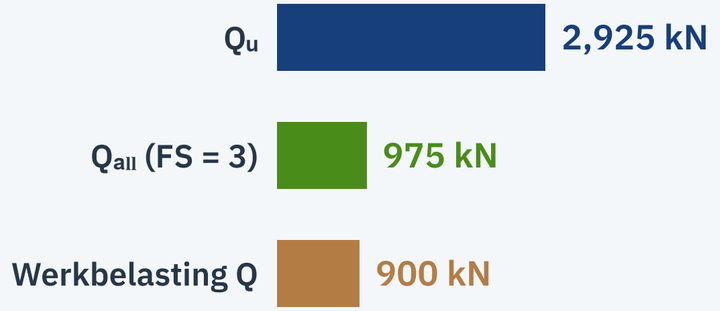
2 Toelaatbare gronddruk

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

3 Toets

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

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



Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Zelfde paal: Q_u en Q_{all} (FS = 3)

THEORIE

Q_u · Q_{all} (kN)

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

Voor een paal van twintig meter geven twee schacht- en drie puntweerstandsmethoden zes verschillende waarden van Q_u: **2,107 – 4,123 kN**. Welke combinatie wordt gekozen, is een **technische beslissing**.

Interpreteer de bandbreedte, vertrouw niet op één getal

Schachtwrijving vormt het grootste deel van het totaal: de beslissing over de **kritische diepte** is bepalend

Indien mogelijk verifiëren met een **paalbelastingproef**

Samenvatting

Belangrijkste punten

$Q_u = Q_p + Q_s$; in zand zijn beide componenten afhankelijk van de **effectieve spanning**

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

Vesic: $\sigma'_o N^*_\sigma$; de stijfheid van het zand (m, I_{rr}) wordt in rekening gebracht

Coyle en Castello: $N^*_q(\varphi', L/D)$ en $K(\varphi', L/D)$ aangepast aan gemeten draagvermogens

Schachtwrijving: $f = K\sigma'\tan\delta'$, constant onder $\mathbf{L' \approx 15D}$

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

Literatuur

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

Meyerhof, G.G. (1976). Bearing capacity and settlement of pile foundations. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 102(GT3), 197–228.

Vesic, A.S. (1977). Design of Pile Foundations. NCHRP Synthesis of Highway Practice 42, Transportation Research Board.

Coyle, H.M. and Castello, R.R. (1981). New design correlations for piles in sand. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 107(GT7), 965–986.

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