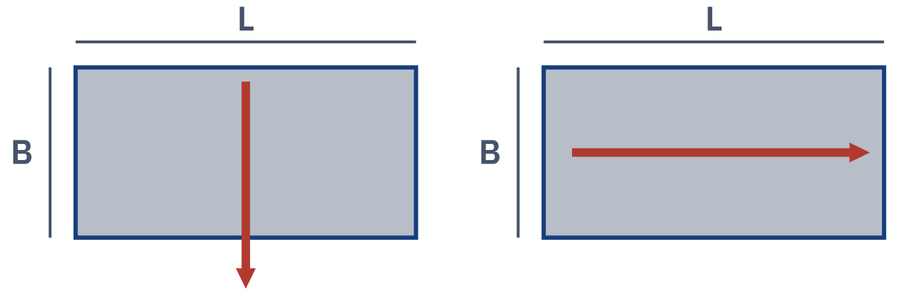
Geotechnische hoorcollegepresentatie · Funderingen

# Draagvermogensvergelijking van Vesic

College: de door Vesic gehanteerde coëfficiënten en zijn eigen bijdrage: de hellingsexponent die rekening houdt met de vorm van de fundering en de richting van de belasting, de zoolhelling en de maaiveldhelling; een rekenvoorbeeld bij elk onderwerp.

- Hellingexponent m
- Schuine belasting
- Zoolhelling
- Maaiveldhelling
- overlap met Meyerhof
- Rekenvoorbeelden




belasting evenwijdig aan B
$m = m_B = 1{,}667$

belasting evenwijdig aan L
$m = m_L = 1{,}333$

# Wat leren we in dit college?

- Onderscheiden welke coëfficiënten **de vergelijking van Vesic** overneemt en welke **er eigen aan zijn**
- Het berekenen van de **exponent m** in de hellingsfactoren op basis van de B/L-verhouding van de fundering en de richting van de belasting
- De **hellingscoëfficiënten** met de werkelijke belastingen h en v bepalen en de glijgrenzen toetsen
- Het toepassen van de factoren voor **zoolhelling** en **maaiveldhelling** (vormen van Vesic); het vergelijken ervan met die van Hansen
- Hoe de ongedraineerde vorm ($\varphi = 0$) en de grondwaterstandsituaties worden behandeld
- Te zien dat de vergelijking zonder helling, zoolhelling en maaiveldhelling reduceert tot de **algemene vergelijking van Meyerhof**

### 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

Voorbeeldfundering, het model dat de module opent: vierkante fundering van 1.2 m × 1.2 m in zand, $D_f$ = 1 m, grondwaterstand 0.5 m, c = 0, $\varphi'$ = 32°.

# Aangenomen coëfficiënten en eigen coëfficiënten

THEORIE

De vergelijking van Vesic heeft **dezelfde structuur** als die van Hansen: in elke term correcties voor vorm, diepte, helling, zoolhelling en maaiveldhelling:

$$\begin{aligned} q_u = {} & c\, N_c\, F_{cs} F_{cd}\, i_c b_c g_c \\ & + q\, N_q\, F_{qs} F_{qd}\, i_q b_q g_q \\ & + \tfrac{1}{2} \gamma B\, N_\gamma\, F_{\gamma s} F_{\gamma d}\, i_\gamma b_\gamma g_\gamma \end{aligned}$$

Vesic **leidde niet alles opnieuw af**: hij nam **de vormfactoren van De Beer** en **de dieptefactoren van Hansen** ongewijzigd over; $N_\gamma$ is eveneens zijn gesloten vorm: $N_\gamma = 2(N_q + 1) \tan \varphi$.

**Eigen bijdrage**: de hellingsfactoren (de exponent hangt af van de vorm van de fundering en de richting van de belasting) en de factoren voor zoolhelling en maaiveldhelling.

Zonder helling, zoolhelling en maaiveldhelling (de standaardwaarden van de module) geldt i = b = g = 1 en is de vergelijking **volledig identiek aan de algemene vergelijking van Meyerhof**.

## BRON VAN DE COËFFICIËNTEN

| Coëfficiënt | Bron |
|---|---|
| $N_c$, $N_q$ | Prandtl, Reissner |
| $N_\gamma$ | Vesic |
| $F_s$ (figuur) | De Beer |
| $F_d$ (diepte) | Hansen |
| i (helling) | **Vesic** |
| b (zoolhelling) | **Vesic** |
| g (maaiveldhelling) | **Vesic** |

# Opgave

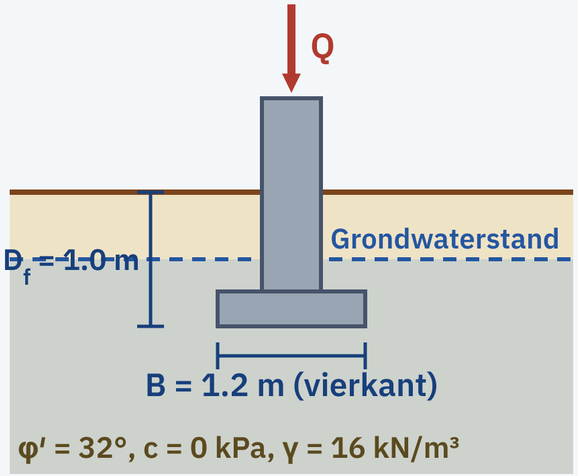
VOORBEELD

## Gegeven

| | |
|---|---|
| Fundering | **vierkant, B = L = 1.2 m, aanlegdiepte $D_f$ = 1.0 m** |
| Grond | **zand:** $\varphi' = 32^\circ,\ c = 0$ |
| Volumiek gewicht | $\gamma = 16\ \mathrm{kN/m^3}$ **(boven),** $\gamma_{sat} = 19.5\ \mathrm{kN/m^3}$ **(onder de grondwaterstand)** |
| Belasting | **verticaal, centrisch** |

## GEVRAAGD

Bepaal de waarden van **$N_c$, $N_q$, $N_\gamma$** samen met **$F_{cs}$, $F_{qs}$, $F_{\gamma s}$** en **$F_{qd}$, $F_{cd}$**.



# Oplossing

OPLOSSING

**1** Draagvermogensfactoren (φ′ = 32°, tan 32° = 0.6249)

$$N_q = e^{\pi \tan 32^\circ} \tan^2(61^\circ) = 23.18 \qquad N_c = \frac{23.18 - 1}{0.6249} = 35.49$$

$$N_\gamma = 2(23.18 + 1)(0.6249) = \mathbf{30.21}$$

**2** Vormfactoren (De Beer; B/L = 1)

$$F_{cs} = 1 + \frac{23.18}{35.49} = \mathbf{1.653} \qquad F_{qs} = 1 + \tan 32^\circ = \mathbf{1.625} \qquad F_{\gamma s} = 1 - 0.4 = \mathbf{0.600}$$

**3** Dieptefactoren (Hansen; $D_f/B$ = 1.0/1.2 = 0.833 ≤ 1)

$$F_{qd} = 1 + 2(0.6249)(0.2210)(0.833) = \mathbf{1.230} \qquad F_{cd} = F_{qd} - \frac{1 - F_{qd}}{N_c \tan \varphi} = \mathbf{1.241}$$

**Identiek** aan de coëfficiënten in de presentatie van Meyerhof: Vesic heeft ze niet gewijzigd.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

# Een exponent die rekening houdt met de vorm van de fundering en de richting van de belasting

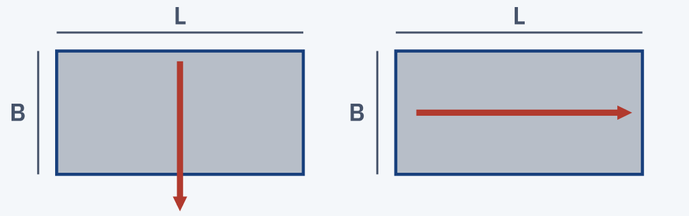
THEORIE

Bij de hellingsfactoren van Meyerhof is de exponent constant (2), en bij die van Hansen ook (5). Die van Vesic hangt af van de **B/L-verhouding** van de fundering en van **aan welke rand** de horizontale belasting **evenwijdig** is:

$$m_B = \frac{2 + B/L}{1 + B/L} \quad (h \parallel B) \qquad m_L = \frac{2 + L/B}{1 + L/B} \quad (h \parallel L)$$

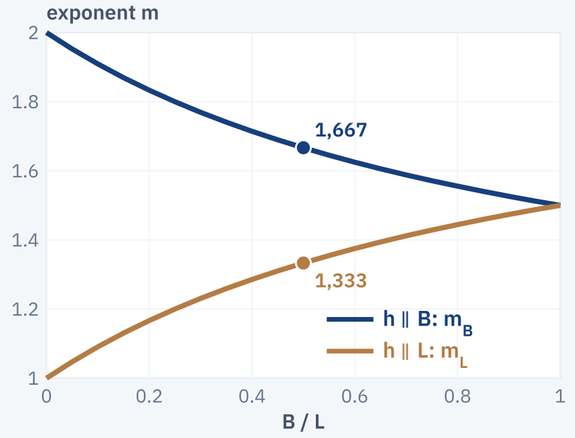
Strookfundering (B/L → 0): $\mathbf{m_B = 2}$, $\mathbf{m_L = 1}$. Bij een vierkante fundering zijn beide richtingen gelijk: m = 1.5.

Bij dezelfde rechthoekige fundering verschilt m voor belasting in twee richtingen: **voor belasting evenwijdig aan de korte zijde is de exponent groter** en nemen de coëfficiënten sneller af. Geen van de andere methoden in deze paragraaf maakt dit onderscheid.




belasting evenwijdig aan B
m = $m_B$ = 1,667

belasting evenwijdig aan L
m = $m_L$ = 1,333



# Opgave

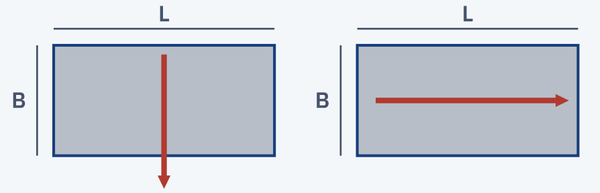
VOORBEELD

## Gegeven

| | |
|---|---|
| Funderingen | **(a) vierkant 1.2 × 1.2 m · (b) strook · (c) rechthoek 1.2 × 2.4 m (B/L = 0.5)** |
| Belasting | **horizontale component evenwijdig aan B en evenwijdig aan L** |

## GEVRAAGD

Bepaal de waarde van **m** voor elke fundering en elke richting.




**belasting evenwijdig aan B**
**$m = m_B = 1{,}667$**

**belasting evenwijdig aan L**
**$m = m_L = 1{,}333$**

# Oplossing

OPLOSSING

**1** (a) Vierkant (B/L = 1) en (b) strook (B/L → 0)

$$(\text{a}):\ m = \frac{2+1}{1+1} = \mathbf{1.500}\ \ (\text{in twee richtingen})$$

$$(\text{b}):\ m_B = \frac{2+0}{1+0} = \mathbf{2.000}, \quad m_L = \mathbf{1.000}$$

**2** (c) Rechthoek 1.2 × 2.4 m (B/L = 0.5; L/B = 2)

$$m_B = \frac{2+0.5}{1+0.5} = \mathbf{1.667} \qquad m_L = \frac{2+2}{1+2} = \mathbf{1.333}$$

Bij dezelfde rechthoekige fundering is m = 1.667 als de belasting evenwijdig aan de korte zijde loopt, en 1.333 als zij evenwijdig aan de lange zijde loopt. Als de belasting in de richting van de korte zijde werkt, neemt de hellingsfactor $(1 - x)^m$ sneller af: deze richting is **ongunstiger**.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

# Vesic: $(1 - h/(v + c \cot \varphi))^m$

THEORIE

h = H/A en v = V/A, in dezelfde vorm als bij Hansen, zijn de drukken van **hetzelfde belastinggeval** (v = $q_{aanw}$; $q_{aanw}$ is vereist wanneer h > 0):

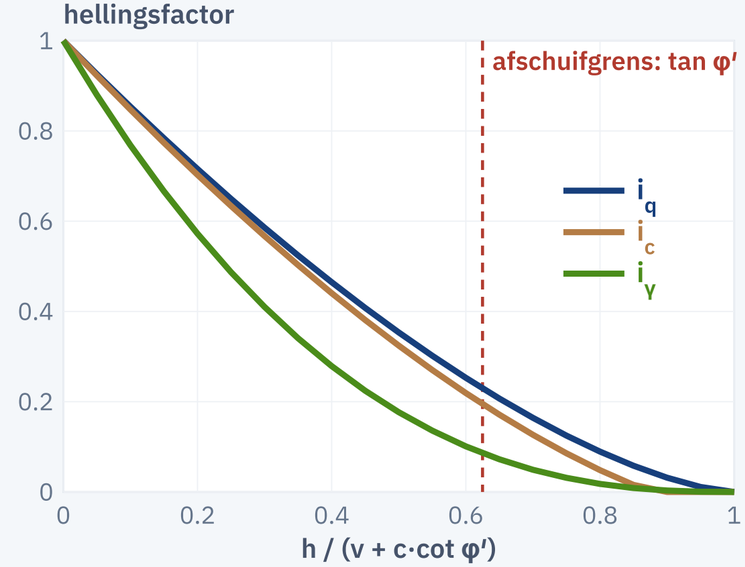
$$i_q = \left(1 - \frac{h}{v + c\cot\varphi}\right)^m \qquad i_\gamma = \left(1 - \frac{h}{v + c\cot\varphi}\right)^{m+1}$$

$$i_c = i_q - \frac{1 - i_q}{N_q - 1} \; (\geq 0)$$

$$\varphi = 0: \quad i_c = 1 - \frac{m\,h}{c\,N_c}, \qquad i_q = i_\gamma = 1$$

**h > v tan φ + c**: de basis glijdt; de module waarschuwt (glijden wordt daarnaast apart getoetst). **h ≥ v + c cot φ** (bij φ = 0: **h ≥ c**): de module stopt.

$i_c$ wordt niet negatief, maar op nul gehouden. In de grafiek is de glijgrens de lijn h/(v + c cot φ) = tan φ.



# Opgave

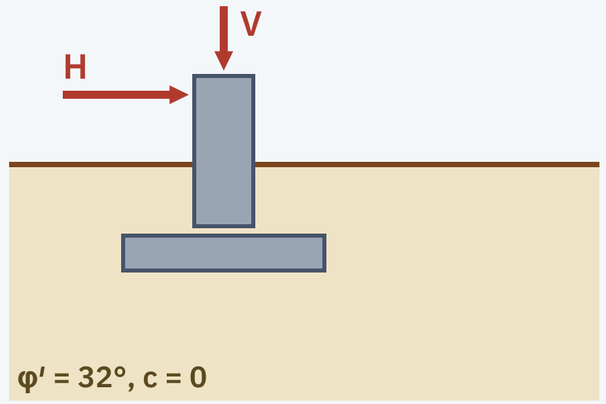
VOORBEELD

## Gegeven

| | |
|---|---|
| Fundering, grond | **vierkant 1.2 × 1.2 m,** $\varphi' = 32^\circ,\ c = 0$ **(modulemodel);** $N_q = 23.18$ |
| Belastingsgeval | $v = q_{apply} = 150\ \mathrm{kPa},\ h = 30\ \mathrm{kPa}$ **(ek: 60, 90, 120)** |
| Belastingsrichting | **vierkante fundering: m = 1.5** |

## GEVRAAGD

Bepaal de coëfficiënten $i_q$, $i_c$, $i_\gamma$ en toets de afschuifgrens.



# Oplossing (1/2)

OPLOSSING

**1** Verhouding (c = 0: v + c cot φ = v = 150 kPa)

$$x = \frac{h}{v + c\cot\varphi} = \frac{30}{150} = \mathbf{0.200} \qquad m = 1.5$$

**2** Coëfficiënten

$$i_q = (1 - 0.2)^{1.5} = \mathbf{0.716} \qquad i_\gamma = (1 - 0.2)^{2.5} = \mathbf{0.572}$$

$$i_c = i_q - \frac{1 - i_q}{N_q - 1} = 0.716 - \frac{0.284}{22.18} = \mathbf{0.703}$$

**3** Glijgrens

$$v\tan\varphi + c = 150(0.6249) = \mathbf{93.7}\ \text{kPa} \geq h = 30 \ \Rightarrow\ \text{geen slip}$$

$$(h \geq v = 150 \text{ blijft staan indien})$$

# Oplossing (2/2)

OPLOSSING

| h (kPa) | h/(v + c cot φ) | $i_c$ | $i_q$ | $i_\gamma$ | toets op glijden |
|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0.00 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | gaat door |
| 30 | 0.20 | 0.703 | 0.716 | 0.572 | gaat door |
| 60 | 0.40 | 0.441 | 0.465 | 0.279 | gaat door |
| 90 | 0.60 | 0.219 | 0.253 | 0.101 | gaat door |
| 120 | 0.80 | 0.048 | 0.089 | 0.018 | **waarschuwing: h > 93.7** |

h = 30 kPa (20% van v) verlaagt de q-term met **28%** en de term van het eigen gewicht met **43%**. Omdat de exponent m + 1 is, wordt **de term van het eigen gewicht altijd sterker beïnvloed**. Bij c = 5 kPa zouden v + c cot φ = 158.0 kPa en $i_q$ = 0.729 zijn.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

# Opgave

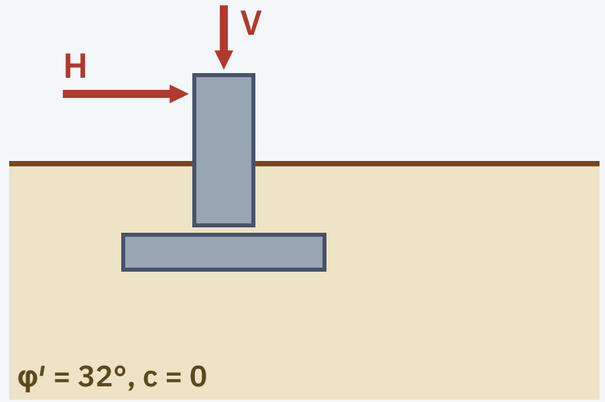
VOORBEELD

## Gegeven

| | |
|---|---|
| Fundering, grond | **vierkant 1.2 m,** $\varphi' = 32°,\ c = 0$ |
| Belastingsgeval | $v = 150\ \mathrm{kPa},\ h = 30\ \mathrm{kPa}$**: met de verticaal** $\beta = \tan^{-1}(30/150) = 11.31°$ |

## GEVRAAGD

Bepaal de waarden van $i_q$ en $i_\gamma$ volgens de methoden van Meyerhof, Hansen en Vesic en vergelijk ze.



# Oplossing

OPLOSSING

**1** Meyerhof (met hoek β), Hansen (x = h/v = 0.2) en Vesic (m = 1.5)

$$\text{Meyerhof}: F_{;qi} = \left(1 - \frac{11.31}{90}\right)^2 = \mathbf{0.764}, \quad F_{\gamma i} = \left(1 - \frac{11.31}{32}\right)^2 = \mathbf{0.418}$$

$$\text{Hansen}: i_{;q} = (1 - 0.5x)^5 = \mathbf{0.590}, \quad i_\gamma = (1 - 0.7x)^5 = \mathbf{0.470}$$

$$\text{Vesic}: i_{;q} = (1 - 0.2)^{1.5} = \mathbf{0.716}, \quad i_\gamma = (1 - 0.2)^{2.5} = \mathbf{0.572}$$

| | $i_q$ | $i_\gamma$ |
|---|---|---|
| Meyerhof | 0.764 | 0.418 |
| Hansen | 0.590 | 0.470 |
| Vesic | **0.716** | **0.572** |

Elke coëfficiënt moet samen met zijn eigen $N_\gamma$ en vormfactoren worden gebruikt. De $i_q$ van Vesic ligt dicht bij die van Meyerhof en zijn $i_\gamma$ is de hoogste van de drie.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

# De eigen coëfficiënten van Vesic

THEORIE

Vesic (1975) stelde ook eigen coëfficiënten voor voor zoolhelling en maaiveldhelling. Voor φ > 0 wordt de cohesiecoëfficiënt afgeleid van de bovenbelastingscoëfficiënt (η en ω in de exponent in radialen):

$$b_q = b_\gamma = (1 - \eta \tan\varphi)^2 \qquad g_q = g_\gamma = (1 - \tan\omega)^2$$

$$\varphi > 0: \quad b_c = b_q - \frac{1 - b_q}{N_q - 1} \qquad g_c = g_q - \frac{1 - g_q}{N_q - 1}$$

$$\varphi = 0: \quad b_c = 1 - \frac{2\eta}{\pi + 2} \quad g_c = 1 - \frac{2\omega}{\pi + 2} \quad b_q = b_\gamma = 1$$

De coëfficiënten $b_q$, $b_\gamma$ van Hansen zijn exponentieel ($e^{-2\eta \tan\varphi}$) en $g_q = (1 - 0.5 \tan\omega)^5$; bij kleine hoeken liggen ze dicht bij elkaar, naarmate ω groter wordt wijken ze uiteen (figuur).

Als ω > φ is het talud op zichzelf niet in evenwicht: de module stopt. η en ω worden ten hoogste 45° ingevoerd ((1 – tan ω)² wordt daar nul).



# Opgave

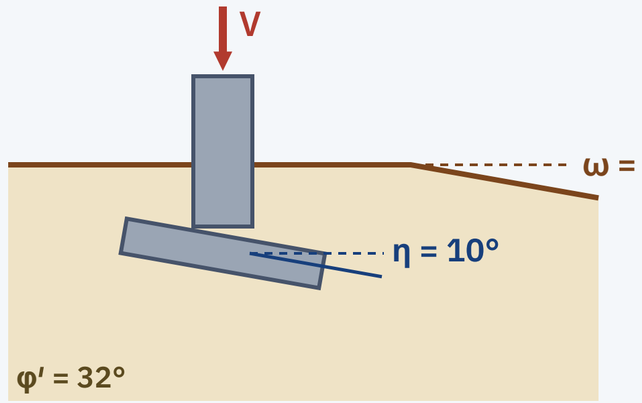
VOORBEELD

## Gegeven

| | |
|---|---|
| Grond | $\varphi' = 32^\circ,\ \tan\varphi = 0.6249,\ N_q = 23.18$ |
| Zoolhelling | **η = 10° (0.1745 rad)** |
| Maaiveldhelling | **ω = 10°** |
| Vergelijking | **Coëfficiënten van Hansen** |

## GEVRAAGD

Bepaal de waarden $b_c$, $b_q$, $b_\gamma$ en $g_c$, $g_q$, $g_\gamma$ volgens Vesic; vergelijk ze met die van Hansen; schrijf de vormen voor φ = 0 op.



# Oplossing (1/2)

OPLOSSING

**1** Zoolhelling η = 10° (Vesic)

$$b_q = b_\gamma = (1 - 0.1745 \cdot 0.6249)^2 = \mathbf{0.7938} \qquad b_c = 0.7938 - \frac{1 - 0.7938}{23.18 - 1} = \mathbf{0.7845}$$

**2** Maaiveldhelling ω = 10° (tan 10° = 0.1763)

$$g_q = g_\gamma = (1 - 0.1763)^2 = \mathbf{0.6784} \qquad g_c = 0.6784 - \frac{1 - 0.6784}{23.18 - 1} = \mathbf{0.6639}$$

**3** φ = 0-vormen (voor 10°)

$$b_c = 1 - \frac{2(0.1745)}{\pi + 2} = \mathbf{0.932} \qquad g_c = 1 - \frac{2(0.1745)}{\pi + 2} = \mathbf{0.932} \qquad b_q = b_\gamma = 1$$

# Oplossing (2/2)

OPLOSSING

| | $b_c$ | $b_q$ | $b_\gamma$ | $g_c$ | $g_q = g_\gamma$ |
|---|---|---|---|---|---|
| Vesic | 0.784 | 0.794 | 0.794 | 0.664 | 0.678 |
| Hansen | 0.932 | 0.804 | 0.745 | 0.932 | 0.630 |

$b_q$ en $g_q$ liggen in de twee methoden **dicht bij elkaar** (0.794 en 0.804; 0.678 en 0.630), maar **de cohesiecoëfficiënten verschillen sterk**: de waarden $b_c$, $g_c$ van Vesic zijn afgeleid van de deklaagdrukcoëfficiënt (0.784 en 0.664), die van Hansen zijn 1 – hoek/147° (0.932). In zand met c = 0 beïnvloedt dit verschil het resultaat niet.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

# De vergelijking combineren en toetsen

THEORIE

Hoewel de zes correcties ontmoedigend kunnen lijken, **zijn ze in het gewone geval allemaal gelijk aan 1**: met de standaardwaarden van de module (h = 0, η = 0, ω = 0) geldt i = b = g = 1 en is de vergelijking identiek aan de algemene vergelijking van Meyerhof. $q_u$ is de verticale druk op het moment van bezwijken; de module houdt bruto en netto druk gescheiden:

$$q_{u,net} = q_u - q \qquad q_{all,g} = \frac{q_u}{FS} \qquad q_{all,n} = \frac{q_{u,net}}{FS}$$

De opgelegde druk $q_{opgelegd}$ is de **verticale bruto druk aan de basis** voor hetzelfde belastingsgeval (V/A). De fundering voldoet onder de volgende voorwaarden:

$$q_{apply} \leq q_{all,g} \qquad FS_{\text{werkelijk}} = \frac{q_u}{q_{apply}} \qquad q_{apply} - q \leq q_{all,n}$$

Toelaatbare verticale belasting $Q_{all} = q_{all,g} \cdot A$. Bij h > 0 moet $q_{opgelegd}$ worden ingevoerd.

## WANNEER IS DE COËFFICIËNT 1?

| Coëfficiënt | situatie waarin deze 1 is |
|---|---|
| $F_s$ | strookfundering (B/L = 0) |
| $F_d$ | $D_f$ = 0 (zool aan het maaiveld) |
| i | h = 0 (verticale belasting) |
| b | η = 0 (gladde zool) |
| g | ω = 0 (vlak maaiveld) |

# Coëfficiënten ongewijzigd; q en γ veranderen

THEORIE

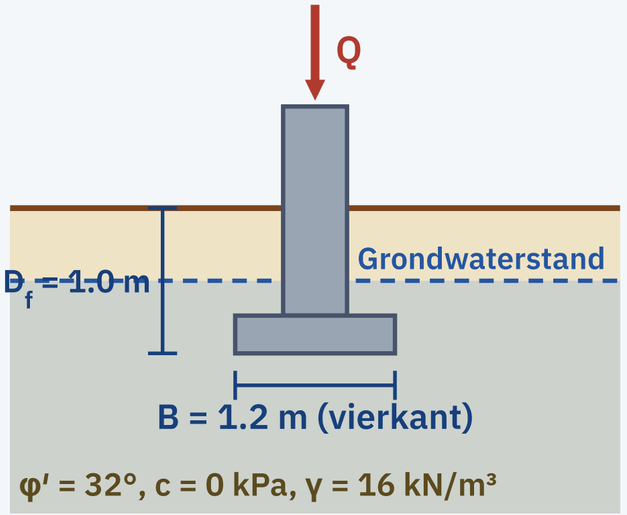
Het grondwater wordt met **dezelfde twee gevallen** behandeld als in de andere modules van dit onderdeel. Onder de grondwaterstand is het effectief volumiek gewicht $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$ ($\gamma_w = 9.81$). $D_w$ is de diepte van het grondwater onder het maaiveld:

$$\text{I } (D_w \leq D_f):\ q = \gamma D_w + \gamma'(D_f - D_w),\ \ \gamma \to \gamma' \text{ (derde term)}$$

$$\text{III } (D_f < D_w \leq D_f + B):\ q = \gamma D_f,\ \ \bar{\gamma} = \frac{1}{B}\left[\gamma D + \gamma'(B - D)\right],\ D = D_w - D_f$$

Voor $D_w = D_f$ geldt $q = \gamma D_f$ en wordt $\gamma'$ in de derde term gebruikt.

Water dieper dan B onder de zool is **niet van invloed**. Water komt alleen binnen via **q en γ**; F, i, b, g blijven gelijk.



# Opgave

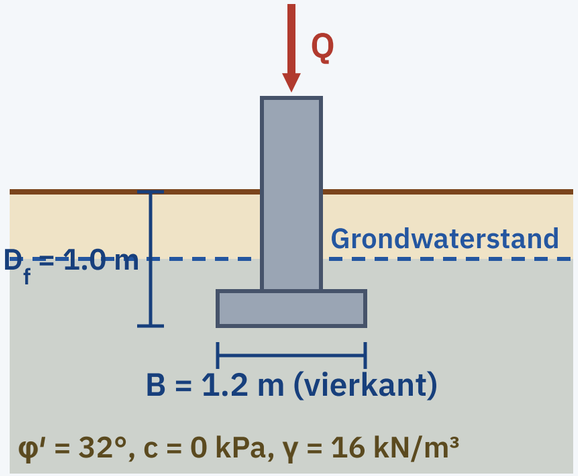
VOORBEELD

## Gegeven

| | |
|---|---|
| Fundering | **vierkant, B = L = 1.2 m, aanlegdiepte $D_f$ = 1.0 m** |
| Grond | **zand:** $\varphi' = 32^\circ,\ c = 0$ |
| Volumiek gewicht | $\gamma = 16\ \mathrm{kN/m^3}$ **(boven),** $\gamma_{sat} = 19.5\ \mathrm{kN/m^3}$ **(onder de grondwaterstand)** |
| Grondwater | **$D_w$ = 0.5 m (geval I)** |
| Belasting | **verticaal, centrisch** |
| Veiligheid | **FS = 3** |

## GEVRAAGD

**$q_u$**, bruto en netto **$q_{all}$** en de toelaatbare belasting **$Q_{all}$**; daarna $q_u$ voor c = 5 kPa.



# Oplossing (1/2)

OPLOSSING

**1** Coëfficiënten (Voorbeeld 1: φ′ = 32°; B/L = 1; $D_f/B$ = 0.833; h = η = ω = 0)

$$N_q = 23.18,\ N_\gamma = 30.21 \qquad F_{qs} = 1.625,\ F_{\gamma s} = 0.6,\ F_{qd} = 1.230 \qquad i = b = g = 1$$

**2** Geval I: q = 16(0.5) + (19.5 – 9.81)(0.5); γ′ = 9.69 kN/m³ (in de derde term)

$$q = \mathbf{12.845}\ \mathrm{kPa} \qquad \gamma' = \mathbf{9.69}\ \mathrm{kN/m^3}$$

# Oplossing (2/2)

OPLOSSING

**3** Draagvermogen (c = 0: geen cohesieterm)

$$q_u = (12.845)(23.18)(1.625)(1.230) + \tfrac{1}{2}(9.69)(1.2)(30.21)(0.6)$$
$$= 595.1 + 105.4 = \mathbf{700.46}\ \text{kPa}$$

**4** Toelaatbare gronddruk en belasting (A = 1.2² = 1.44 m²)

$$q_{all,g} = \frac{700.46}{3} = \mathbf{233.49}\ \text{kPa} \qquad q_{all,n} = \frac{700.46 - 12.845}{3} = 229.20\ \text{kPa}$$

$$Q_{all} = 233.49(1.44) = \mathbf{336.2}\ \text{kN}$$

$q_u$ = **700.46 kPa** gevonden met dezelfde invoergegevens (β = 0) volgens de algemene vergelijking van Meyerhof: de twee vergelijkingen zijn **volledig identiek**. Bij c = 5 kPa zou de cohesieterm 363.9 kPa toevoegen en zou $q_u$ = 1,064.3 kPa zijn.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

# Opgave

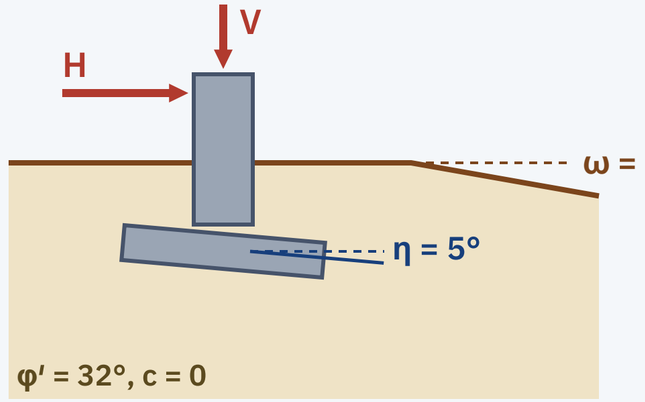
VOORBEELD

## Gegeven

| | |
|---|---|
| Fundering | **vierkant, B = L = 1.2 m, aanlegdiepte $D_f$ = 1.0 m** |
| Grond | **zand:** $\varphi' = 32°,\ c = 0$ |
| Volumiek gewicht | $\gamma = 16\ \mathrm{kN/m^3}$ **(boven),** $\gamma_{sat} = 19.5\ \mathrm{kN/m^3}$ **(onder de grondwaterstand)** |
| Grondwater | **$D_w$ = 0.5 m** |
| Belastingsgeval | $v = q_{apply} = 90\ \mathrm{kPa},\ h = 18\ \mathrm{kPa}$ **(h ∥ B)** |
| Zool, grond | **η = 5°, ω = 10°** |
| Veiligheid | **FS = 3** |

## GEVRAAGD

Bepaal de waarden van **$q_u$** en **$q_{all}$**; toets of de fundering voldoet voor $q_{aanw}$ = 90 kPa en toets het glijden.



# Oplossing (1/3)

OPLOSSING

**1** Hellingcoëfficiënten (x = h/v = 18/90 = 0.2; m = 1.5)

$$i_q = (1 - 0.2)^{1.5} = \mathbf{0.716} \qquad i_\gamma = (1 - 0.2)^{2.5} = \mathbf{0.572} \qquad i_c = 0.703$$

**2** Factoren voor zool- en maaiveldhelling (η = 5° = 0.0873 rad; ω = 10°)

$$b_q = b_\gamma = (1 - 0.0873 \cdot 0.6249)^2 = \mathbf{0.894} \qquad b_c = 0.889$$

$$g_q = g_\gamma = (1 - \tan 10^\circ)^2 = \mathbf{0.678} \qquad g_c = 0.664$$

# Oplossing (2/3)

OPLOSSING

**3** Drie termen (c = 0; F-coëfficiënten als in Voorbeeld 6)

$$q\text{ term} = (12.845)(23.18)(1.625)(1.230)(0.716)(0.894)(0.678) = 258.2$$

$$\gamma\text{ term} = \tfrac{1}{2}(9.69)(1.2)(30.21)(0.6)(0.572)(0.894)(0.678) = 36.6$$

**4** Draagvermogen en toelaatbare gronddruk

$$q_u = 258.2 + 36.6 = \mathbf{294.8}\ \text{kPa} \qquad q_{all,g} = \frac{294.8}{3} = \mathbf{98.3}\ \text{kPa}$$

# Oplossing (3/3)

OPLOSSING

**5** Toets ($q_{aanw}$ = 90 kPa)

$$q_{apply} = 90 \leq q_{all,g} = 98.3 \;\Rightarrow\; \textbf{geldig}$$

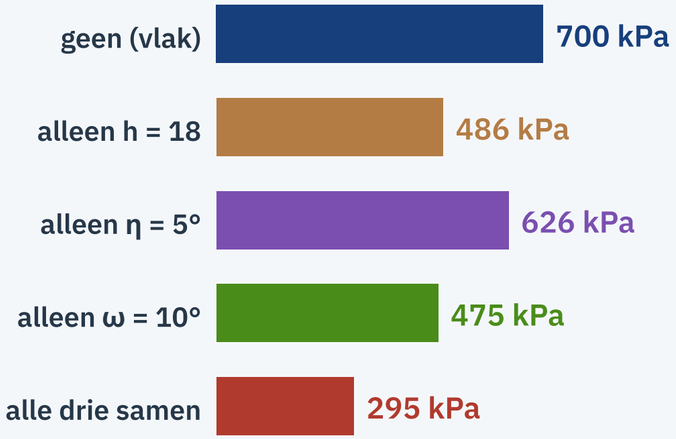
$$FS_{\text{werkelijk}} = \frac{294.8}{90} = \mathbf{3.28} \geq 3$$

$$q_{apply} - q = 77.2 \leq q_{all,n} = 94.0 \;\Rightarrow\; \textbf{geldig}$$

**6** Glijgrens

$$h = 18 \leq v \tan\varphi = 56.2\ \text{kPa} \;\Rightarrow\; \text{geen slip}$$

De $q_u$ van 700 kPa in het vlakke model daalt onder deze belastingtoestand tot **295 kPa** (58%). Afzonderlijk: maaiveldhelling –32%, horizontale belasting –31%, zoolhelling –11%. De fundering voldoet in alle drie de voorwaarden (FS = 3.28).




Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

# φ = 0: de vormen van de cohesiecoëfficiënten zelf

THEORIE

Bij φ = 0 geldt $N_c = 5.14$, $N_q = 1$, $N_\gamma = 0$; de eigengewichts term vervalt en de deklaagterm wordt alleen $q\, g_q$. In deze module blijft de cohesieterm **multiplicatief** (anders dan de additieve vorm van Hansen):

$$q_u = c\, N_c\, F_{cs} F_{cd}\, i_c\, b_c\, g_c + q\, g_q$$

De φ = 0-vormen van de cohesiecoëfficiënten staan in de tabel: voor helling **$i_c = 1 - m\, h/(c\, N_c)$**, voor zool- en maaiveldhelling **1 – 2·hoek/(π + 2)** (hoek in radialen).

Als **h ≥ c**, glijdt de zool weg en stopt de module. Bij φ = 0 geldt $F_{cs} = 1 + (B/L)/5.14$ ($N_q/N_c = 1/5.14$) en $F_{cd} = 1 + 0.4\, k$.

**gevallen φ = 0**

| Coëfficiënt | Waarde |
|---|---|
| $N_c$ | 5.14 |
| $F_{cs}$ | $1 + (B/L)/5.14$ |
| $F_{cd}$ | $1 + 0.4\, k$ |
| $i_c$ | $1 - m\, h/(c\, N_c)$ |
| $b_c$ | $1 - 2\eta/(\pi + 2)$ |
| $g_c$ | $1 - 2\omega/(\pi + 2)$ |
| $g_q$ | $(1 - \tan \omega)^2$ |

# Opgave

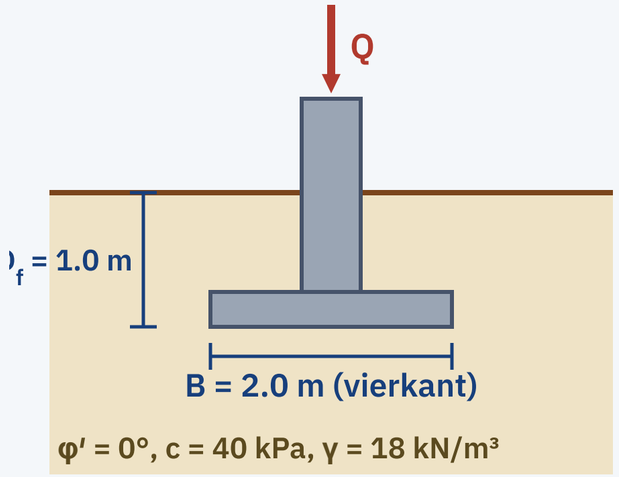
VOORBEELD

## Gegeven

| | |
|---|---|
| Fundering | **vierkant B = L = 2 m, $D_f$ = 1 m** |
| Grond | **klei:** $\varphi = 0,\ c_u = 40\ \mathrm{kPa},\ \gamma = 18\ \mathrm{kN/m^3}$ **; geen grondwater** |
| Gevallen | **(a) verticale belasting** · **(b)** $v = 100,\ h = 10\ \mathrm{kPa}$ · **(c)** $h = 10$ **en** $\eta = \omega = 10^\circ$ |

## GEVRAAGD

Bepaal voor elke situatie de waarde van $q_u$.



# Oplossing (1/2)

OPLOSSING

**1** (a) Verticale belasting: $F_{cs} = 1 + 1/5.14$; $F_{cd} = 1 + 0.4(0.5)$; q = 18 kPa

$$q_u = 40(5.14)(1.195)(1.200) + 18 = 294.72 + 18 = \mathbf{312.72}\ \text{kPa}$$

**2** (b) h = 10 kPa, c = 40 (m = 1.5)

$$i_c = 1 - \frac{1.5(10)}{40(5.14)} = \mathbf{0.927} \;\Rightarrow\; q_u = 273.22 + 18 = \mathbf{291.22}\ \text{kPa}$$

# Oplossing (2/2)

OPLOSSING

**3** (c) h = 10, η = ω = 10°: $b_c = g_c = 1 - 2(0.1745)/(\pi + 2) = 0.932$; $g_q = (1 - \tan 10°)^2$

$$q_u = 40(5.14)(1.195)(1.200)(0.927)(0.932)(0.932) + 18(0.678) = 237.4 + 12.2 = \mathbf{249.6}\ \text{kPa}$$

| Toestand | $c\, N_c F_{cs} F_{cd} \cdot (i\, b\, g)$ | $q\, g_q$ | $q_u$ (kPa) |
|---|---|---|---|
| (a) verticaal | 294.7 | 18.0 | **312.7** |
| (b) h = 10 | 273.2 | 18.0 | **291.2** |
| (c) h, η, ω | 237.4 | 12.2 | **249.6** |

Alleen al h = 10 kPa verlaagt het draagvermogen met 7%, en samen met h verlagen de zool- en maaiveldhelling het met 20%. De additieve vorm van Hansen geeft 305.84 kPa voor hetzelfde verticale geval (Hansen-presentatie): de twee methoden liggen binnen 2% van elkaar.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

# Opgave

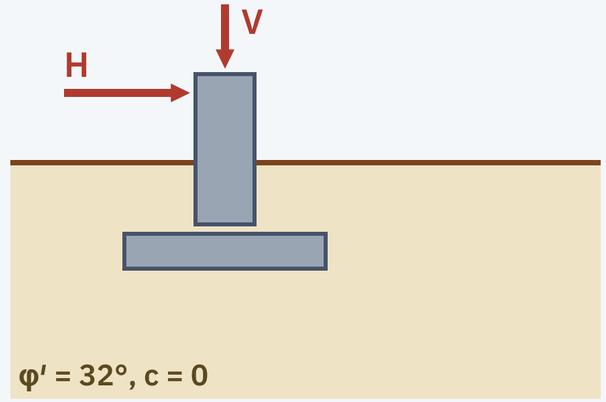
VOORBEELD

## Gegeven

| | |
|---|---|
| Fundering | **vierkant, B = L = 1.2 m, aanlegdiepte $D_f$ = 1.0 m** |
| Grond | **zand:** $\varphi' = 32^\circ,\ c = 0$ |
| Volumiek gewicht | $\gamma = 16\ \mathrm{kN/m^3}$ **(boven),** $\gamma_{sat} = 19.5\ \mathrm{kN/m^3}$ **(onder de grondwaterstand)** |
| Grondwater | **$D_w$ = 0.5 m** |
| Belastingsgeval | $v = 150\ \mathrm{kPa},\ h = 30\ \mathrm{kPa}$**;** $\beta = 11.31^\circ$ **voor Meyerhof** |

## GEVRAAGD

Vergelijk de waarden van **$q_u$** van beide vergelijkingen term voor term, zowel voor de verticale belasting als voor deze schuine belasting.



# Oplossing (1/2)

OPLOSSING

| Verticale belasting | Vesic | Meyerhof |
|---|---|---|
| q-term | 595.1 | 595.1 |
| γ-term | 105.4 | 105.4 |
| **$q_u$ (kPa)** | **700.46** | **700.46** |

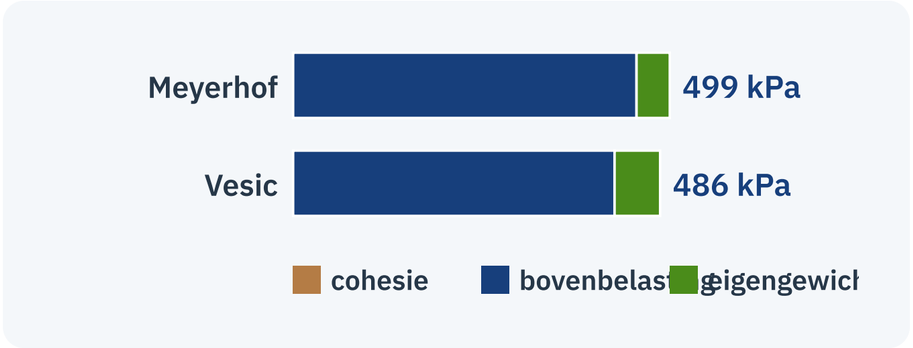
Zonder helling, zoolhelling en maaiveldhelling is de vergelijking van Vesic **exact gelijk** aan de algemene vergelijking van Meyerhof (700.46 kPa): de afwijking van Vesic begint pas bij hellende gevallen. Dit is de eigen verificatieroute van de module.

# Oplossing (2/2)

OPLOSSING

| Schuine belasting | Vesic (m = 1.5) | Meyerhof (β = 11.31°) |
|---|---|---|
| $i_q$ / $F_{qi}$ | 0.716 | 0.764 |
| $i_\gamma$ / $F_{\gamma i}$ | 0.572 | 0.418 |
| q-term | 425.8 | 454.9 |
| γ-term | 60.3 | 44.1 |
| **$q_u$ (kPa)** | **486.1** | **499.0** |

Bij schuine belasting is het verschil klein: **2.6%** (Vesic is lager). Meyerhofs $F_{\gamma i}$ reduceert meer en zijn $F_{qi}$ minder; omdat de q-term domineert, liggen de resultaten dicht bij elkaar.




Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Samenvatting

# Belangrijkste punten

De **vergelijking van Vesic** heeft dezelfde structuur als de vergelijking van Hansen; zij neemt de **vormfactoren van De Beer** en de **dieptefactoren van Hansen** ongewijzigd over, evenals $N_\gamma = 2(N_q + 1)\tan\varphi$

**Zijn eigen bijdrage**: de hellingsexponent m en de coëfficiënten voor zoolhelling b en maaiveldhelling g

**Hellingsfactoren**: $i_q = (1 - h/(v + c\cot\varphi))^m$, $i_\gamma = (\ldots)^{m+1}$; $m = (2 + B/L)/(1 + B/L)$ $(h \parallel B)$ of $(2 + L/B)/(1 + L/B)$ $(h \parallel L)$; voor een strook $m_B = 2$, $m_L = 1$

**Zoolhelling** $b_q = b_\gamma = (1 - \eta\tan\varphi)^2$; **maaiveldhelling** $g_q = g_\gamma = (1 - \tan\omega)^2$; voor $\varphi > 0$ volgen $b_c$ en $g_c$ uit de bovenbelastingsfactor, voor $\varphi = 0$ uit $1 - 2\cdot\text{hoek}/(\pi + 2)$

**Grenzen**: $h > v\tan\varphi + c$ waarschuwing voor afschuiving; $h \geq v + c\cot\varphi$ (bij $\varphi = 0$: $h \geq c$) rust; $\omega > \varphi$ rust

Met $i = b = g = 1$ is de vergelijking de **algemene vergelijking van Meyerhof**; de **grondwaterstand** wijzigt alleen q en γ

**Toets**: $q_{app} \leq q_{all,g}$, $FS_{werkelijk}$ en netto; de coëfficiënten van elke methode worden samen met de eigen $N_\gamma$ gebruikt

# Literatuur

De volledige draagvermogensvergelijking van Vesic — de B/L-afhankelijke belastinghellingsexponent en zijn eigen zoolhellingsfactoren — volgt Vesic, A.S., "Analysis of Ultimate Loads of Shallow Foundations," Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1973, zoals consistent vermeld in standaard geotechnische literatuur (naast de nauw verwante vergelijking van Hansen — zie de Hansen-module in deze sectie). De besloten vorm voor Nγ die in deze hele sectie wordt gebruikt is van Vesic, zoals uiteengezet in Das, B.M., Principles of Geotechnical Engineering, 9th ed., Cengage Learning, 2018 (hoofdstuk 16); de dieptefactoren zijn van Hansen, zoals vermeld in Das, B.M., Principles of Foundation Engineering, 8th ed., Cengage Learning, 2016 (tabel 4.3). In de tekst op deze pagina is "de bron" het eerste van deze twee boeken en "de tweede bron" het tweede.

**OPMERKING**

Alle numerieke voorbeelden zijn geproduceerd met de eigen rekenbibliotheek van de module; de module geeft dezelfde waarden.

GeoTerva

Online geotechnische berekeningen

# Van theorie naar praktijk

Bereken de voorbeeldfundering uit dit college stap voor stap in GeoTerva: de module opent met dit model.

Module openen →

Theoriepagina →

**Openen op de smartphone**

Proefmodules vereisen geen registratie.

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