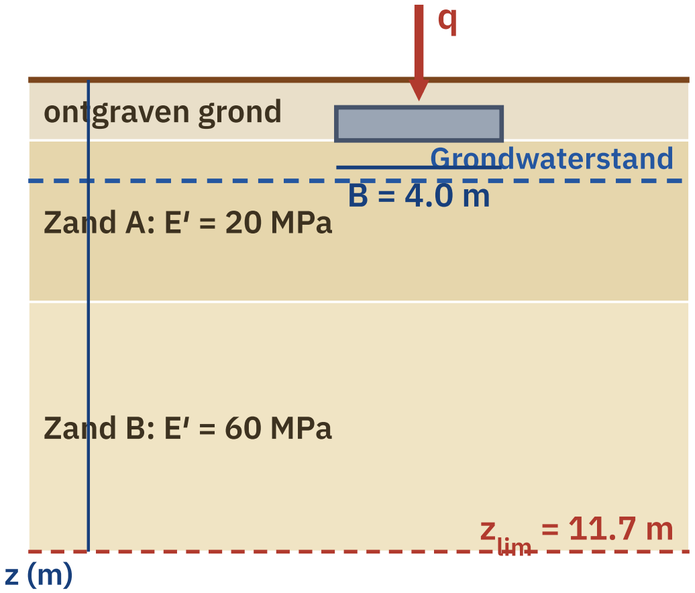
Geotechnisch college · Zettingen

# Elastische zetting: niet-samenhangende grond

College: van de elasticiteitstheorie naar de coëfficiënten van Steinbrenner, van een gelaagd profiel naar een flexibele en een starre fundering; zand- en grindlagen gedragen zich gedraineerd (E′, ν′); bij elk onderwerp een rekenvoorbeeld.

- Wet van Hooke
- Coëfficiënten van Steinbrenner
- Gelaagd profiel
- Netto druk
- Flexibele en starre fundering
- Rekenvoorbeelden



Inleiding

# Wat leren we in dit college?

**Van de wet van Hooke** naar de zettingsintegraal: $\varepsilon_z = [\Delta\sigma_z - \nu(\Delta\sigma_x + \Delta\sigma_y)]/E$ en $S = \int \varepsilon_z \, dz$

De **coëfficiënten van Steinbrenner** ($F_1$, $F_2$, $I_s$) te berekenen en de zetting van een rechthoekige fundering in het **midden** en in de **hoek** te bepalen

Granulaire lagen als **gedraineerd** te behandelen: $E'/p_a = \alpha\, N_{60}$, $\nu' \approx 0.25–0.35$

Om het **gelaagde profiel** te sommeren met het verschil $I_s(z_{onder}) - I_s(z_{boven})$

Het bepalen van de **netto druk** (ontgravingseffect) en de **rekenkundige diepte** (invloedsdiepte)

Onderscheid maken tussen de zetting van een **flexibele** en een **rigide** fundering (rigide ≈ 0.93 × flexibel middelpunt)

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

Voorbeelfundering: flexibele rechthoekige fundering van 4 m × 6 m, q = 180 kPa, ontgravingsdiepte 1.5 m, grondwaterstand 2.5 m; zandlaag. De zettingen zijn in mm.

# Wat berekent deze module?

THEORIE

Deze module behandelt **uitsluitend granulaire** lagen (zand, grind) en berekent de **elastische zetting**: omdat zand zijn water onmiddellijk afgeeft, is de zetting volledig elastisch.

Uit de **Boussinesq**-spanningen van de grond onder belasting wordt de vervorming **met de wet van Hooke** bepaald, en de integraal van de vervorming is de zetting.

De directe zetting van kleilagen staat in de module Zakkingen – elastisch, de consolidatie in de module Consolidatie en de som van alle in de module Totale zakking.

De oplossing is **analytisch**: gesloten invloedsfactoren en laagsgewijze sommatie; geen eindige elementen.

Daarbuiten: de methode van Schmertmann, SPT/CPT-grafieken, met de diepte toenemende modulus (Mayne–Poulos), stijfheid van de fundering en grond-structureninteractie.

**LAAGTYPE**

| | Niet-samenhangend |
|---|---|
| Gedrag | gedraineerd |
| E | $E'$ (bijv. $\alpha N_{60}$) |
| v | 0.25 – 0.35 |

# Wet van Hooke en zettingsintegraal

THEORIE

Onder een **volkomen flexibele** fundering die de netto druk $q_{net}$ overdraagt, is de grond een halfoneindig homogeen elastisch medium (Boussinesq-spanningen). De wet van Hooke geeft de verticale vervorming, en de integraal daarvan geeft de zetting:

$$S = \int \varepsilon_z \, dz = \int \frac{\Delta\sigma_z - \nu\,(\Delta\sigma_x + \Delta\sigma_y)}{E}\, dz$$

De horizontale spanningen zijn afhankelijk van ν; daarom variëren de vervorming en de zetting met **zowel E als ν**.

Naarmate ν toeneemt, **verminderen** de horizontale spanningen de verticale vervorming: bij dezelfde E′ zakt een grond met ν = 0.5 minder dan een met ν = 0.3.

De zetting is **omgekeerd evenredig** met E: verdubbeling van de modulus halveert de zetting.

**NOTATIES**

$q_{net}$: netto druk (na ontgraving aangebracht)

$\Delta\sigma_z$, $\Delta\sigma_x$, $\Delta\sigma_y$: spanningstoenames

E, ν: elastische constanten van de laag

$\varepsilon_z$: verticale vervorming (samendrukking +)

# Opgave

VOORBEELD

**Gegeven**

| | |
|---|---|
| Spanningstoename | $\Delta\sigma_z = 100\ \mathrm{kPa},\ \Delta\sigma_x = \Delta\sigma_y = 40\ \mathrm{kPa}$ |
| Grond | $E' = 20\ \mathrm{MPa},\ \nu' = 0.30$ |
| Lamel | **dikte 1.0 m** |

**GEVRAAGD**

Bepaal de verticale vervorming en de samendrukking van de lamel; vergelijk met de aanname v = 0 (eendimensionaal).

# Oplossing

OPLOSSING

**1** Verticale vervorming

$$\varepsilon_z = \frac{\Delta\sigma_z - \nu(\Delta\sigma_x + \Delta\sigma_y)}{E} = \frac{100 - 0.30(40 + 40)}{20{,}000} = \frac{76.0}{20{,}000} = \mathbf{0.00380}$$

**2** Samendrukking van de lamel (H = 1.0 m)

$$\Delta S = \varepsilon_z H = 0.00380(1.0) = \mathbf{3.80}\ \text{mm}$$

**3** Vergelijking: v = 0

$$\varepsilon_z = \frac{100}{20{,}000} = 0.00500 \ \Rightarrow\ \Delta S = 5.00\ \text{mm}$$

Horizontale spanningen (v = 0.30) verminderen de vervorming met **24%**: 3.80 mm, tegen 5.00 mm bij eendimensionaal.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

# Gesloten oplossing voor de hoek

THEORIE

Voor de **hoek** van een gelijkmatig belaste rechthoek heeft de integraal een gesloten oplossing (Steinbrenner):

$$S = q_{net}\,\alpha\,B'\,\frac{1-\nu^2}{E}\,I_s \qquad I_s = F_1 + \frac{1-2\nu}{1-\nu}\,F_2$$

$$F_1 = \frac{A_0 + A_1}{\pi} \qquad F_2 = \frac{n'}{2\pi}\tan^{-1} A_2$$

m′ = L′/B′ en n′ = z/B′ (B′ is de korte zijde van de hoekrechthoek). Het **midden** is de hoek van vier rechthoeken (B/2 × L/2): α = 4, B′ = B/2. De **hoek** is de hoek van de gehele rechthoek: α = 1, B′ = B. Elk ander punt is de algebraïsche som van de vier rechthoeken die in dat punt een hoek hebben.

Voor v = 0.5, (1 − 2v) = 0: **$I_s$ = $F_1$** en (1 − v²) = 0.75.

**NOTATIES**

α: aantal hoekrechthoeken (4 in het midden, 1 in de hoek)
B′: korte zijde van de hoekrechthoek
m′ = L′/B′, n′ = z/B′
z: diepte vanaf het funderingsvlak
$I_s$: vormfactor

# $A_0$, $A_1$, $A_2$ en de lamelgrens

THEORIE

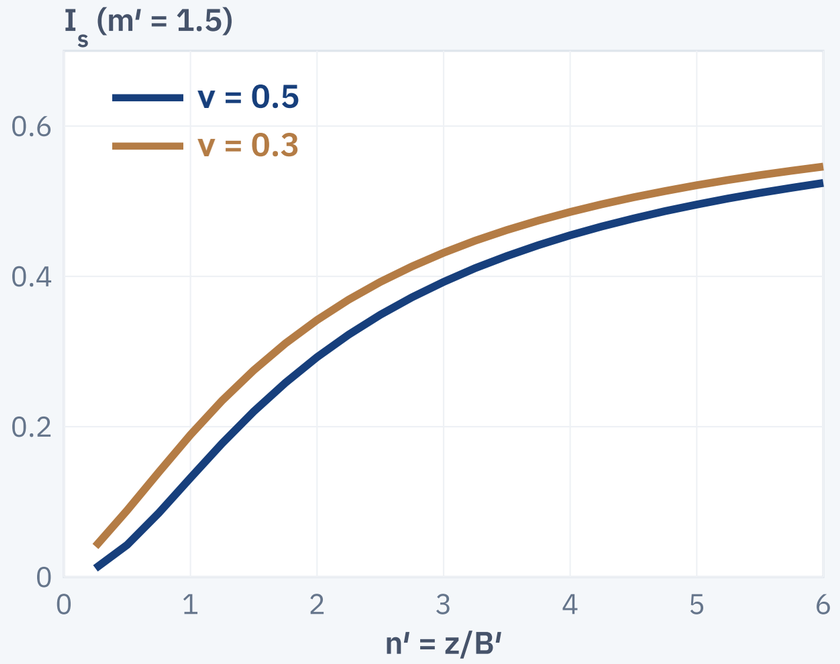
$$A_0 = m' \ln \frac{\left(1 + \sqrt{m'^2 + 1}\right)\sqrt{m'^2 + n'^2}}{m'\left(1 + \sqrt{m'^2 + n'^2 + 1}\right)}$$

$$A_1 = \ln \frac{\left(m' + \sqrt{m'^2 + 1}\right)\sqrt{1 + n'^2}}{m' + \sqrt{m'^2 + n'^2 + 1}} \qquad A_2 = \frac{m'}{n'\sqrt{m'^2 + n'^2 + 1}}$$

**Strook** ($m' \to \infty$): $F_1 = \ln(1 + n'^2)/2\pi$ en $F_2 = (n'/2\pi)\tan^{-1}(1/n')$; aan de rand $\alpha = 2$, $B' = B$.

De berekeningskern rekent de formules rechtstreeks uit; er zijn geen grafieken of afgeronde tabellen nodig.

$I_s$ neemt toe met de diepte en **verzadigt langzaam**: de bijdrage van diepe lagen is beperkt (zijdelings $m' = 1.5$).



# Opgave

VOORBEELD

**Gegeven**

| | |
|---|---|
| Fundering | **B × L = 4 × 6 m, op diepte z′ = 4 m onder het midden (vanaf het funderingsvlak)** |
| Hoekrechthoek | **B/2 × L/2 = 2 × 3 m ⇒ B′ = 2 m, m′ = 1.5, n′ = z′/B′ = 2.0** |
| Grond | $\nu' = 0.30$ |

**GEVRAAGD**

Bepaal de waarden van **$A_0$, $A_1$, $A_2$, $F_1$, $F_2$** en **$I_s$**.

# Oplossing

OPLOSSING

**1** $A_0$, $A_1$, $A_2$ (vierkantswortels: $\sqrt{(m'^2 + 1)} = 1.8028$; $\sqrt{(m'^2 + n'^2)} = 2.5000$; $\sqrt{(m'^2 + n'^2 + 1)} = 2.6926$)

$$A_0 = 1.5 \ln \frac{(1 + 1.8028)(2.5000)}{1.5(1 + 2.6926)} = \mathbf{0.3527} \qquad A_1 = \ln \frac{(1.5 + 1.8028)\sqrt{5}}{1.5 + 2.6926} = \mathbf{0.5662}$$

$$A_2 = \frac{1.5}{2(2.6926)} = \mathbf{0.2785}$$

**2** $F_1$, $F_2$ en $I_s$

$$F_1 = \frac{0.3527 + 0.5662}{\pi} = \mathbf{0.2925} \qquad F_2 = \frac{2}{2\pi} \tan^{-1}(0.2785) = \mathbf{0.0865}$$

$$I_s = F_1 + \frac{1 - 2(0.30)}{1 - 0.30} F_2 = \mathbf{0.3419}$$

$I_s = F_1 + 0.5714\, F_2 =$ **0.3419**; bij $\nu' = 0.5$ zou $F_1 = 0.2925$ resteren (14% minder).

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

# Gedraineerde modulus E′ en ν′

THEORIE

Omdat zand zijn water onmiddellijk afgeeft, gedraagt het zich gedraineerd; de zetting is volledig elastisch. In de bron (Das) wordt de modulus van zand uit de SPT verkregen met **$E'/p_a = \alpha\, N_{60}$** ($p_a \approx 100$ kPa):

$$\frac{E'}{p_a} = \alpha\, N_{60} \qquad \alpha = 5\ (\text{fijn zand})\ \ 10\ (\text{schoon NC})\ \ 15\ (\text{schoon OC})$$

De modulus van zand **neemt toe** met de diepte: deel een dikke laag op in meerdere lagen met toenemende E′.

ν′ is doorgaans 0.25–0.35; ν′ moet < 0.5 zijn (voor een granulaire laag kan ν′ ≥ 0.5 niet worden ingevoerd).

De elastische zetting varieert eveneens met ν′: zij neemt af naarmate ν′ toeneemt.

**α VOOR ZAND**

| α | E′ ($N_{60}$ = 20) |
|---|---|
| 5 | 10 MPa |
| 10 | 20 MPa |
| 15 | 30 MPa |

# Opgave

VOORBEELD

**Gegeven**

| | |
|---|---|
| Zand | $N_{60} = 20$, $p_a = 100\ \text{kPa}$; $\alpha = 5,\ 10,\ 15$ |
| dwarscontractiecoëfficiënt | $\nu' = 0.25;\ 0.30;\ 0.35$ **(E′ = 20 MPa)** |
| Referentie | **Zetting van één laag voor α = 10, ν′ = 0.30: S = 29.0 mm (Voorbeeld 6)** |

**GEVRAAGD**

Voor elke α: **E′**; zetting voor ν′ = 0.25, 0.30, 0.35 en 0.5.

# Oplossing

OPLOSSING

**1** E′ = α $N_{60}$ $p_a$ ($N_{60}$ = 20; $p_a$ = 100 kPa)

$$E' = \alpha\, N_{60}\, p_a: \quad 5(20)(0.1) = \mathbf{10}\ \text{MPa},\ \ 10(20)(0.1) = \mathbf{20},\ \ 15(20)(0.1) = \mathbf{30}\ \text{MPa}$$

| ν′ | 0.25 | 0.30 | 0.35 | 0.50 |
|---|---|---|---|---|
| S (mm) | 30.1 | 29.0 | 27.7 | 22.8 |
| $S / S_{\nu'=0.30}$ | 1.038 | 1.000 | 0.955 | 0.786 |

Als E′ van 10 → 30 MPa verandert, gaat de zetting van 58 → 19 mm (omgekeerd evenredig). ν′ van 0.25 → 0.35 verandert de zetting slechts met 8%; bij ν′ = 0.5 zou deze 21% kleiner zijn.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

# Ontgraving neemt eerst de belasting weg

THEORIE

De ontgraving heft de **effectieve verticale grondspanning** op het niveau van de bodem op (grondwaterstand ongewijzigd). Wanneer één modulus zowel voor ontlasten als voor herbelasten wordt gebruikt, wordt de elastische opbolling van de ontgraving bij herbelasting teruggewonnen; de directe zetting wordt bepaald door de **netto druk**:

$$q_{net} = q_{gross} - \sigma'_{v0}(D_{exc})$$

$\sigma'_{v0}(D_{exc})$: de initiële effectieve spanning aan de ontgravingsbasis ($\gamma$ boven de grondwaterstand, $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$ eronder).

Als $q_{net} \leq 0$, treedt geen zetting op (een negatieve waarde is elastische opheffing).

Als er geen ontgraving is, geldt $q_{net} = q_{gross}$ (de druk wordt op het maaiveld aangebracht).

**NEDEN NET?**

De belasting gelijk aan het gewicht van de tijdens de ontgraving verwijderde grond wordt **teruggegeven** wanneer de fundering wordt aangebracht. De zetting van de grond ontstaat alleen door de druk die **bovenop** deze belasting wordt toegevoegd.

# Opgave

VOORBEELD

**Gegeven**

| | |
|---|---|
| Belasting | $q_{gross} = 180\ \mathrm{kPa}$; **ontgravingsdiepte** $D_{exc} = 1.5\ \mathrm{m}$ |
| Grond | $\gamma = 18.5\ \mathrm{kN/m^3},\ \gamma_{sat} = 19.5\ \mathrm{kN/m^3}$ |
| Grondwaterstand | **(a) 2.5 m (onder het ontgravingsniveau) · (b) 1.0 m (boven het ontgravingsniveau)** |

**GEVRAAGD**

Bepaal in elk geval de waarden van $\sigma'_{v0}(D_{exc})$ en $q_{net}$.

# Oplossing

OPLOSSING

1 (a) Grondwaterstand 2.5 m > 1.5 m: geen water op de ontgravingsbodem

$$\sigma'_{v0} = \gamma D_{exc} = 18.5(1.5) = 27.75\ \text{kPa} \ \Rightarrow\ q_{net} = 180 - 27.75 = \mathbf{152.25}\ \text{kPa}$$

2 (b) Grondwaterstand 1.0 m: ontgravingsvlak 0.5 m onder het water (γ′ = 19.5 – 9.81 = 9.69 kN/m³)

$$\sigma'_{v0} = 18.5(1.0) + 9.69(0.5) = 23.345\ \text{kPa} \ \Rightarrow\ q_{net} = 180 - 23.345 = \mathbf{156.66}\ \text{kPa}$$

Als het water boven de ontgravingsbasis staat, neemt de verwijderde effectieve spanning af en **neemt** de netto druk toe van 152.2 naar 156.7 kPa: een hoge grondwaterstand vergroot de directe zetting.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

# Invloedsdiepte: Δσ = p · q

THEORIE

De spanningstoename onder de belasting neemt met de diepte af maar wordt niet nul; een ondergrens voor het totaal is nodig: **de berekeningsdiepte $z_{lim}$**. De module biedt twee regels:

**Invloedsdiepte**: de diepte onder het midden waarop de Boussinesq-spanningstoename daalt tot **p** maal de aangebrachte druk (gangbaar p = 10%): I(z′) = p en $z_{lim} = D_f + z'$.

**Basis van het profiel**: de berekening eindigt in de laatste laag (een stijve basis zoals rots of dicht grind; de laag met stijve basis van Steinbrenner).

Als het profiel boven $z_{lim}$ eindigt, loopt de laatste laag met dezelfde eigenschappen door tot $z_{lim}$.

$$I = \frac{\Delta\sigma_z}{q} = 4\, I_{corner}(m,n) \qquad m = \frac{B}{2z'},\ n = \frac{L}{2z'}$$

**z′/B (p = %10 | %20)**

| L/B | p = %10 | p = %20 |
|---|---|---|
| 1.0 | 2.09 B | 1.40 B |
| 1.5 | 2.55 B | 1.70 B |
| 2.0 | 2.92 B | 1.94 B |
| 5.0 | 4.33 B | 2.68 B |
| strook | 6.34 B | 3.13 B |

# Opgave

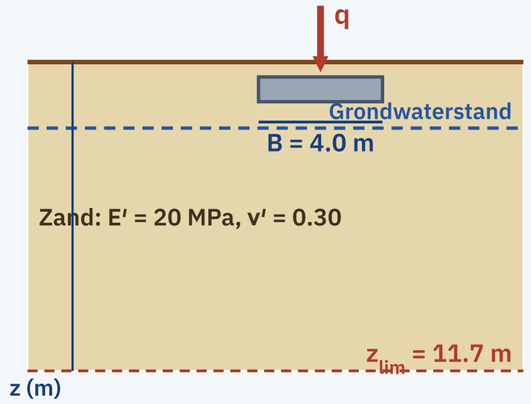
VOORBEELD

## Gegeven

| | |
|---|---|
| Fundering | **B × L = 4 × 6 m (L/B = 1.5), op de ontgravingsbodem; $D_f$ = 1.5 m** |
| Regel | **invloedsdiepte, p = 10% (I = 0.10)** |
| Formule | $I = 4\,I_{corner}(m,n),\ m = B/2z',\ n = L/2z'$ |

## GEVRAAGD

**z′** en **$z_{lim}$**; de waarde van I voor z′ = 4 m en 10.19 m.



# Oplossing

OPLOSSING

**1** z′ = 4 m: m = 2/4 = 0.5; n = 3/4 = 0.75

$$I = 4\, I_{corner}(0.5;\ 0.75) = 4(0.1071) = \mathbf{0.4283}$$

**2** Voorwaarde I = 0.10: via bisectie

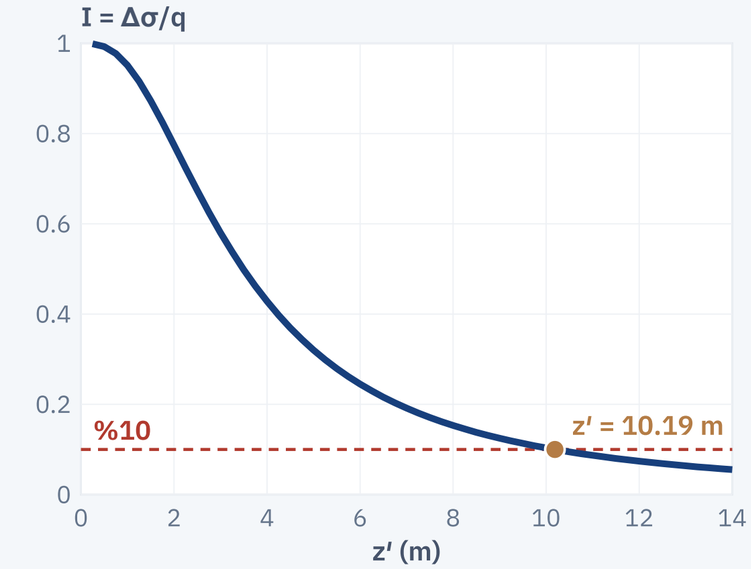
$$z' = \mathbf{10.19}\ \mathrm{m} \quad (= 2.55\, B)$$

$$z_{lim} = D_f + z' = 1.5 + 10.19 = \mathbf{11.69}\ \mathrm{m}$$

**3** Toets: z′ = 10.19 m ⇒ m = 2/z′, n = 3/z′

$$m = 0.1963,\ n = 0.2945$$

$$I = 4(0.0250) = \mathbf{0.1000}$$




Er wordt gesommeerd tot een diepte van 10.19 m (2.55 B); daarbuiten ligt de zone met minder dan 10% van de druk. Bij een vierkante fundering 2.09 B, bij een strook 6.34 B: **een brede fundering werkt dieper**.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

# Laagbijdrage: verschil in $I_s$

THEORIE

Een laag tussen $z_{boven}$ en $z_{onder}$ (vanaf het funderingsniveau) draagt het **verschil van de oplossing voor het halfoneindige medium tussen twee diepten** bij, met zijn eigen E en v:

$$\Delta S = q_{net}\,\alpha\,B'\,\frac{1-\nu^2}{E}\,\left[I_s(z_{bottom}) - I_s(z_{üst})\right]$$

Dit is de integraal van de Hooke-vervorming over de laag (met spanningen van een homogene halve ruimte): voor deze aanname is de uitkomst **exact**; het resultaat is niet afhankelijk van de lameldikte Δz (de lamellen dienen alleen de tabellen en de kleurvlakken).

Deze vervangt de **gewogen gemiddelde modulus** in de formule voor één laag.

Een laag waarvan de stijfheid met de diepte toeneemt, moet in meerdere lagen worden verdeeld.

**TOTAAL**

De zetting van het profiel is de **som** van de bijdragen van de lagen tot $z_{lim}$: $S = \Sigma\,\Delta S_i$.

Van elke laag wordt alleen het deel tussen het funderingsniveau en $z_{lim}$ meegerekend.

# Opgave

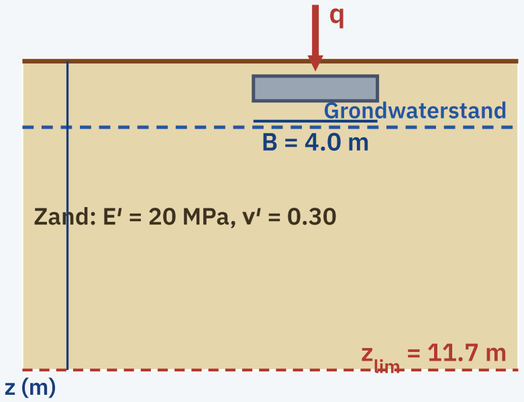
VOORBEELD

## Gegeven

| | |
|---|---|
| Fundering | **rechthoekig, B × L = 4 × 6 m, aanlegdiepte $D_f$ = 1.5 m (ontgravingsniveau)** |
| Belasting | $q_{gross} = 180\ \mathrm{kPa}$ **(flexibele fundering, gelijkmatige druk)** |
| Grond | **één laag zand:** $E' = 20\ \mathrm{MPa},\ \nu' = 0.30,\ \gamma = 18.5\ \mathrm{kN/m^3}$**; grondwaterstand 2.5 m** |
| Rekendiepte | **invloedsdiepte, p = 10% (Voorbeeld 5): z′ = 10.19 m, $z_{lim}$ = 11.69 m; de laag loopt tot deze diepte door** |

## GEVRAAGD

**Midden**zakking **S** van de flexibele fundering.



# Oplossing (1/2)

OPLOSSING

**1** Netto druk (Voorbeeld 4a) en coëfficiënt k = $q_{net}(1 - v^2)/E$

$$q_{net} = 152.25\ \text{kPa} \qquad k = \frac{q_{net}(1-\nu^2)}{E} = \frac{152.25(0.91)}{20{,}000} = 0.006927\ (\text{dimensieloos})$$

**2** Midden: α = 4, B′ = B/2 = 2 m, m′ = 1.5; z′ = 10.19 m ⇒ n′ = z′/B′ = 5.094

$$A_0 = 0.6569,\ A_1 = 0.9097,\ A_2 = 0.0545$$

$$F_1 = 0.4986,\ F_2 = 0.0441 \ \Rightarrow\ I_s = \mathbf{0.5239}$$

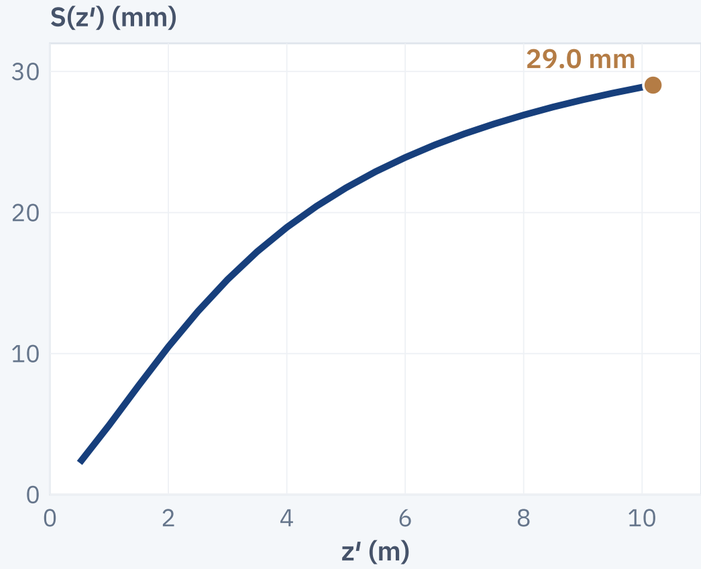
# Oplossing (2/2)

OPLOSSING

**3** Zetting: $S = k \cdot \alpha B' \cdot I_s$

$$S = 0.006927\,(4)(2)(0.5239) = 0.006927(4.1909)$$
$$= 0.02903\ \text{m} = \mathbf{29.0\ mm}$$

Zetting in het midden **29.0 mm**. In de grafiek S(z′): het grootste deel van de zetting treedt op binnen de bovenste 2B (8 m); de bijdrage van de diepere lagen is klein.




Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

# Opgave

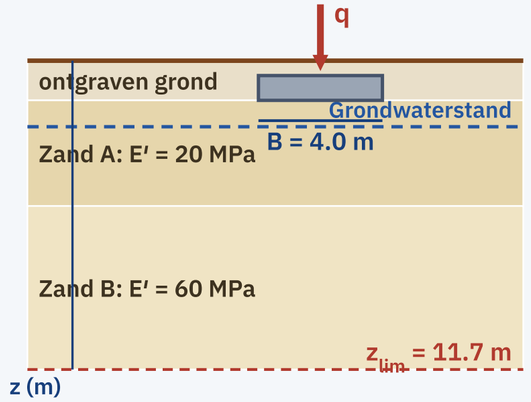
VOORBEELD

## Gegeven

| | |
|---|---|
| Fundering, belasting | **B × L = 4 × 6 m, $q_{gross}$ = 180 kPa, $D_f$ = 1.5 m ⇒ $q_{net}$ = 152.25 kPa** |
| Laag A | **dikte 4 m vanaf het funderingsniveau:** $E' = 20\ \mathrm{MPa}$ |
| Laag B | **eronder, tot $z_{lim}$:** $E' = 60\ \mathrm{MPa}$ |
| Rekendiepte | **$z'_{lim}$ = 10.19 m** |

## GEVRAAGD

Bepaal de zetting in het **midden** van elke laag en de som; vergelijk met één laag.



# Oplossing (1/2)

OPLOSSING

**1** Laagcoëfficiënten k = $q_{net}(1 - \nu^2)/E$ en $\alpha\, B'\, I_s$ (midden; Voorbeeld 2 en 6)

$$k_A = \frac{152.25(0.91)}{20{,}000} = 0.006927 \qquad k_B = \frac{152.25(0.91)}{60{,}000} = 0.002309$$

$$8\, I_s(z' = 4) = 8(0.3419) = 2.7351 \qquad 8\, I_s(z'_{lim}) = 4.1909$$

Wanneer het profiel in twee lagen wordt verdeeld, wordt elke laag **met haar eigen modulus** gesommeerd, via de toename van $I_s$ over haar eigen traject.

# Oplossing (2/2)

OPLOSSING

**2** Laagzettingen en totaal

$$\Delta S_A = k_A (8I_s)_4 = 0.006927(2.7351) = 18.9\ \text{mm}$$

$$\Delta S_B = k_B \left[(8I_s)_{lim} - (8I_s)_4\right] = 0.002309(4.1909 - 2.7351) = 3.4\ \text{mm}$$

$$S = \Delta S_A + \Delta S_B = \mathbf{22.3\ mm}$$

De totale zetting in het midden bedraagt **22.3 mm** (rekenkern: 22.3 mm). Het geval met één laag (E = 20 MPa) gaf 29.0 mm: omdat de onderste laag **stijver** is, nam de zetting met **23%** af; laag A draagt 85% van het totaal.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

# Zetting in het midden, in de hoek en bij een starre fundering

THEORIE

De formules geven de zetting van een **volkomen flexibele** fundering: **maximaal in het midden**, minimaal in de hoek; hun verschil is de **differentiële zetting** van de flexibele fundering. Een starre fundering zakt **gelijkmatig**: ongeveer 0.93 maal de waarde in het flexibele midden:

$$S_{rigid} \approx 0.93\, S_{center} \qquad S_{diff} = S_{center} - S_{köşe}$$

Midden: α = 4, B′ = B/2. Hoek: α = 1, B′ = B (hoek van de volledige rechthoek).

**Inbedding**: de dieptefactor $I_f$ volgens Fox (afhankelijk van $D_f$/B, B/L en v) verkleint de zetting van een ingebedde fundering. De module neemt $I_f$ = 1: geen correctie, **aan de veilige kant**.

**OPMERKING**

Een werkelijke fundering ligt tussen flexibel en star. De module geeft de twee uiterste waarden; tussenliggende stijfheid en grond–constructie-interactie vallen buiten het bereik.

# Opgave

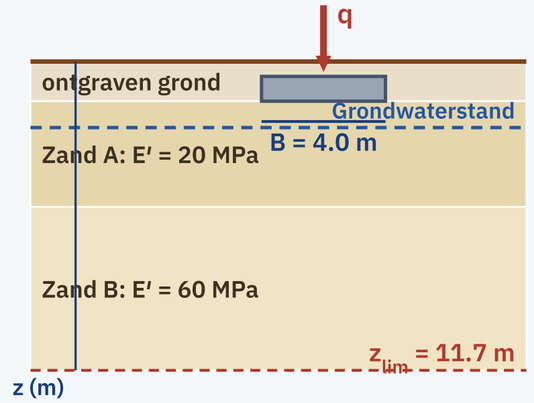
VOORBEELD

## Gegeven

| | |
|---|---|
| Profiel | **Voorbeeld 7: laag A (4 m) en laag B; $z'_{lim}$ = 10.19 m** |
| Fundering | **flexibel, 4 × 6 m** |
| Hoek | **$\alpha = 1$, $B' = B = 4$ m $\Rightarrow m' = L/B = 1.5$; $n' = z'/4$** |

## GEVRAAGD

**Hoek**zetting, zetting van een **rigide** fundering en **differentiële** zetting van een flexibele fundering.



# Oplossing

OPLOSSING

**1** 4·$I_s$-waarden voor de hoek (n′ = z′/4)

$$z' = 4\ (n' = 1):\ 4\,I_s = 0.7565$$

$$z'_{lim} = 10.19\ (n' = 2.547):\ 4\,I_s = 1.5865$$

**2** Zetting in de hoek

$$S_{köşe} = k_A(0.7565) + k_B(1.5865 - 0.7565) = 5.2 + 1.9 = \mathbf{7.2\ mm}$$

**3** Stijf en differentieel

$$S_{rigid} = 0.93(22.3) = \mathbf{20.7\ mm} \qquad S_{diff} = 22.3 - 7.2 = \mathbf{15.2\ mm}$$

Midden 22.3, hoek 7.2, star 20.7 mm; de differentiële zetting van de flexibele fundering is **15.2 mm**. De hoek zakt slechts 32% van het midden.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

# Opgave

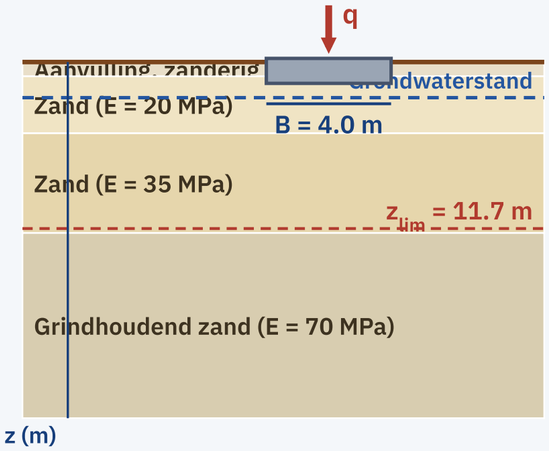
VOORBEELD

## Gegeven

| | |
|---|---|
| Fundering | **B × L = 4 × 6 m, $q_{gross}$ = 180 kPa, ontgravingsdiepte 1.5 m, grondwaterstand 2.5 m** |
| Profiel | **Ophoging, zandig 0–1 m: E′ = 8 MPa; zand 1–5 m: E′ = 20 MPa; zand 5–12 m: E′ = 35 MPa; grindhoudend zand 12–25 m: E′ = 70 MPa** |
| Rekendiepte | **invloedsdiepte, p = 10%** |

## GEVRAAGD

Laag voor laag **centrum**- en **hoek**zetting; flexibel centrum, hoek, starre en differentiële zetting.



# Oplossing (1/2)

OPLOSSING

**1** Netto druk (ontgravingsniveau 1.5 m)

$$\sigma'_{v0}(1.5) = 27.25\ \text{kPa} \quad \Rightarrow \quad q_{net} = 180 - 27.25 = \mathbf{152.75}\ \text{kPa}$$

**2** Berekeningsdiepte en lagen

$z_{lim} = 1.5 + 10.19 = \mathbf{11.69}\ \text{m}$ de laag boven de ontgravingsbodem wordt verwijderd

De ontgravingsbodem (1.5 m) ligt in de laag Zand: alleen het deel van de lagen onder 1.5 m wordt meegerekend. $z_{lim}$ = 11.69 m, dat binnen de laag Zand blijft, zodat die laag wordt afgeknot.

# Oplossing (2/2)

OPLOSSING

| Laag | z (m) | H (m) | E (MPa) | k (×10⁻³) | ΔS midden (mm) | ΔS hoek (mm) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Zand (SM, los–matig dicht) | 1.50 – 5.00 | 3.50 | 20 | 6.950 | 17.3 | 4.6 |
| Zand (SM, matig dicht) | 5.00 – 11.69 | 6.69 | 35 | 3.972 | 6.8 | 3.7 |
| **Totaal** | | | | | **24.1** | **8.3** |

Midden **24.1 mm**, hoek 8.3 mm, star 22.4 mm, differentieel 15.8 mm. De module geeft dezelfde waarden.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

# Aandachtspunten bij het lezen van de resultaten

THEORIE

**Uitgangspunten**:

- Funderingsniveau = ontgravingsniveau; gelijkmatige druk bij een volledig flexibele fundering.
- In elke laag de spanningen van een **homogene halfruimte** (met de v van die laag).
- Elke laag is niet-samenhangend en zakt **gedraineerd** (E′, v′).
- Geen aanlegdieptecorrectie; rigide fundering ≈ 0.93 × flexibel midden.
- Tekenafspraak: zetting is **positief**; de keuzeschakelaar in de kop schakelt over naar de conventie waarbij opwaartse zetting positief is.

**Buiten scope**: kleilagen; Schmertmann, SPT/CPT-diagrammen, modulus die met de diepte toeneemt, stijfheid van de fundering en grond–constructie-interactie, eindige elementen.

### KLEURGEBIEDEN

Doorsnedeweergaven tonen de spanningstoename, de modulus, de vervorming en de zetting S(z) met kleurbanden; de centrale waarde ter hoogte van het funderingsvlak is de resulterende zetting.

Samenvatting

# Belangrijkste punten

**Hooke**: $\varepsilon_z = [\Delta\sigma_z - \nu(\Delta\sigma_x + \Delta\sigma_y)]/E$; $\mathbf{S = \int \varepsilon_z\, dz}$; omgekeerd evenredig met E

**Steinbrenner**: $S = q_{net}\, \alpha\, B'\, (1 - \nu^2)/E \cdot I_s$; $I_s = F_1 + (1 - 2\nu)/(1 - \nu)\, F_2$; midden $\alpha = 4$, $B' = B/2$; hoek $\alpha = 1$, $B' = B$

**Zand**: $E'/p_a = \alpha\, N_{60}$ ($\alpha = 5, 10, 15$), $\nu' \approx 0.25$–$0.35$; naarmate $\nu'$ toeneemt, neemt de zetting af

**Gelaagd**: $\Delta S = q_{net}\, \alpha\, B'\, (1 - \nu^2)/E \cdot [I_s(z_{onder}) - I_s(z_{boven})]$; onafhankelijk van de lameldikte

**Netto druk** $q_{net} = q_{bruto} - \sigma'_{v0}(D_{exc})$; **invloedsdiepte** $I(z') = p$ (2.09 B voor vierkant, 2.55 B voor L = 1.5 B, 6.34 B voor strook)

**Flexibel**: midden > hoek (differentiële zetting); **rigide** ≈ 0.93 × midden; geen correctie voor aanlegdiepte ($I_f = 1$)

# Literatuur

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

Steinbrenner, W. (1934). Tafeln zur Setzungsberechnung. Die Strasse, 1, 121–124.

Fox, E.N. (1948). The mean elastic settlement of a uniformly loaded area at a depth below the ground surface. Proc. 2nd ICSMFE, Rotterdam, 1, 129–132.

Bowles, J.E. (1996). Foundation Analysis and Design, 5th ed. McGraw-Hill.

Duncan, J.M. & Buchignani, A.L. (1976). An engineering manual for settlement studies. University of California, Berkeley.

Kulhawy, F.H. & Mayne, P.W. (1990). Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Design. EPRI EL-6800.

**OPMERKING**

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

GeoTerva

Online geotechnische berekeningen

# Van theorie naar praktijk

Bereken het voorbeeldproject 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