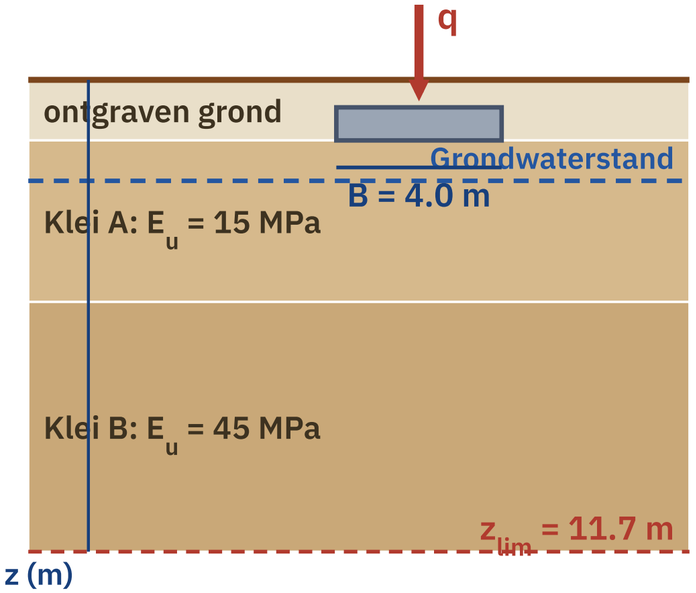
Geotechnisch college · Zettingen

Elastische zetting: samenhangende grond

College: van de elasticiteitstheorie naar de coëfficiënten van Steinbrenner, van een gelaagd profiel naar een flexibele en een starre fundering; kleilagen gedragen zich ongedraineerd (E_u, v = 0.5); bij elk onderwerp een rekenvoorbeeld.

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



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

Cohesieve lagen als **ongedraineerd** te behandelen ($E_u = \beta\, c_u$, $\nu = 0.5$)

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

Voorbeeldfundering: 4 m × 6 m flexibele rechthoekige fundering, q = 180 kPa, ontgravingsdiepte 1.5 m, grondwaterstand 2.5 m; kleilaag. Zettingen in mm.

Wat berekent deze module?

THEORIE

Deze module behandelt **uitsluitend samenhangende** lagen (klei, silt) en berekent de **directe (elastische) zetting**: de zetting die optreedt zodra de belasting wordt aangebracht, zonder volumeverandering.

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 **consolidatie** van de klei (zetting door het uittreden van water) zit in de module Consolidatie; de som van beide zit in de module Totale zetting (2D).

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

	Cohesief
Gedrag	ongedraineerd
E	$E_u = \beta\, c_u$
v	0.5

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

ε_z: verticale vervorming (samendrukking +)

Opgave

VOORBEELD

Gegeven

Spanningstoename	$\Delta\sigma_z = 100\ \text{kPa},\ \Delta\sigma_x = \Delta\sigma_y = 40\ \text{kPa}$
Grond	$E_u = 25\ \text{MPa},\ \nu = 0.5$
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

$$\varepsilon_z = \frac{\Delta\sigma_z - \nu(\Delta\sigma_x + \Delta\sigma_y)}{E} = \frac{100 - 0.50(40 + 40)}{25{,}000} = \frac{60.0}{25{,}000} = \mathbf{0.00240}$$

2 Samendrukking van de lamel (H = 1.0 m)

$$\Delta S = \varepsilon_z H = 0.00240(1.0) = \mathbf{2.40}\ \text{mm}$$

3 Vergelijking: v = 0

$$\varepsilon_z = \frac{100}{25{,}000} = 0.00400 \ \Rightarrow\ \Delta S = 4.00\ \text{mm}$$

Horizontale spanningen (v = 0.50) verminderen de vervorming met **40%**: 2.40 mm, tegen 4.00 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

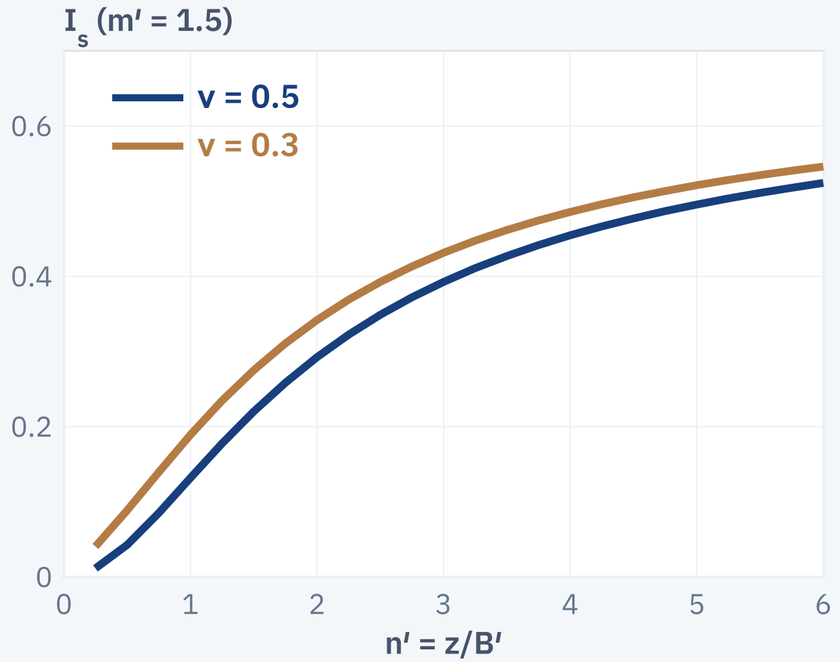
$$A_0 = m' \ln \frac{\left(1 + \sqrt{m'^2 + 1}\right)\sqrt{m'^2 + n'^2}}{m'\left(1 + \sqrt{m'^2 + n'^2 + 1}\right)}$$

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

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	$\nu = 0.5$ **(ongedraineerd)**

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: √(m′² + 1) = 1.8028; √(m′² + n′²) = 2.5000; √(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

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

$$I_s = F_1 + \frac{1-2(0.50)}{1-0.50} F_2 = \mathbf{0.2925}$$

Omdat v = 0.5 is (1 – 2v) = 0 en **I_s = F_1 = 0.2925**; F_2 beïnvloedt het resultaat niet.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Ongedraineerde modulus E_u, $\nu = 0.5$

THEORIE

Verzadigde klei **verandert niet van volume** wanneer de belasting wordt aangebracht (v = 0.5): dit is de directe zetting. De zetting die optreedt doordat water wordt uitgedreven, is consolidatie en wordt in een andere module berekend. De ongedraineerde modulus wordt afgeleid uit de schuifsterkte:

$$E_u = \beta\, c_u \qquad \nu = 0.5$$

β is afhankelijk van de plasticiteitsindex en de overconsolidatiegraad: deze varieert **van enkele honderden tot ongeveer 1500**.

Voor v = 0.5 geldt $I_s = F_1$ en $(1 - v^2) = 0.75$.

Een klei waarvan de stijfheid met de diepte toeneemt, **wordt in meerdere lagen verdeeld**.

β VOOR KLEI

β	E_u (c_u = 50 kPa)
300	15 MPa
500	25 MPa
1000	50 MPa
1500	75 MPa

Opgave

VOORBEELD

Gegeven

Klei	$c_u = 50\ \mathrm{kPa}$; $\beta = 300,\ 500,\ 1000,\ 1500$
Referentie	**Voor β = 500 bedraagt de zetting van één laag in het meerlagige voorbeeld S = 18.1 mm (Voorbeeld 6)**

GEVRAAGD

Voor elke β: **E_u** en de verhouding van de zetting tot de referentie.

Oplossing

OPLOSSING

1 Ongedraineerde modulus (c_u = 50 kPa)

$$E_u = \beta c_u: \quad 300(50) = \mathbf{15}\ \text{MPa},\ \ 500(50) = \mathbf{25},\ \ 1000(50) = \mathbf{50},\ \ 1500(50) = \mathbf{75}\ \text{MPa}$$

β	E_u (MPa)	S (mm)	$S / S_{\beta=500}$
300	15	30.2	1.67
500	25	18.1	1.00
1000	50	9.1	0.50
1500	75	6.0	0.33

De zetting is **omgekeerd evenredig** met E_u: tussen β = 300 en 1500 verandert de zetting met een factor **5** (30 → 6 mm). De modulus van de klei is de meest onzekere invoer van de berekening.

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 (γ 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	$\gamma = 19\ \mathrm{kN/m^3},\ \gamma_{sat} = 19.5\ \mathrm{kN/m^3}$
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

$$\sigma'_{v0} = \gamma D_{exc} = 19.0(1.5) = 28.50\ \text{kPa} \ \Rightarrow\ q_{net} = 180 - 28.50 = \mathbf{151.50}\ \text{kPa}$$

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

$$\sigma'_{v0} = 19.0(1.0) + 9.69(0.5) = 23.845\ \text{kPa} \ \Rightarrow\ q_{net} = 180 - 23.845 = \mathbf{156.16}\ \text{kPa}$$

Als het water boven de ontgravingsbasis staat, neemt de verwijderde effectieve spanning af en **neemt** de netto druk toe van 151.5 naar 156.2 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

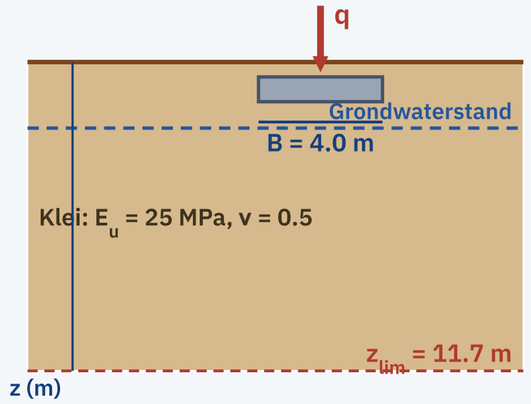
VOORBEELD

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

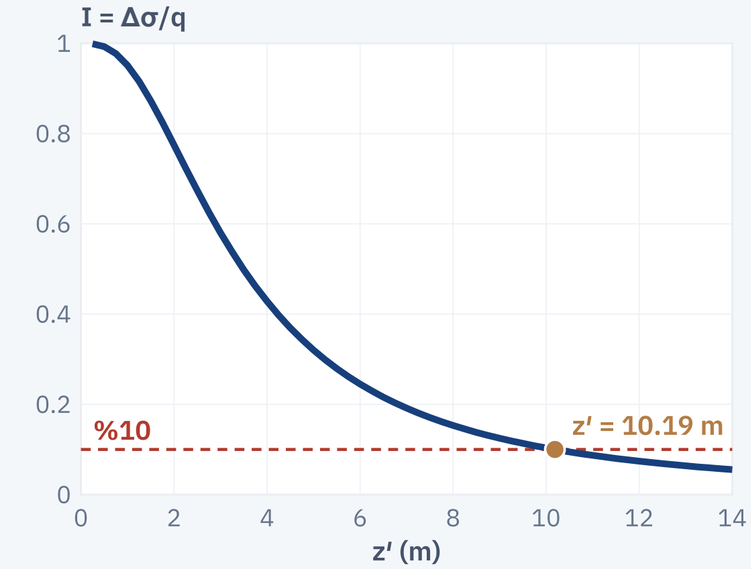
$$z' = \mathbf{10.19}\ \mathrm{m} \quad (= 2.55\,B)$$

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

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:

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

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

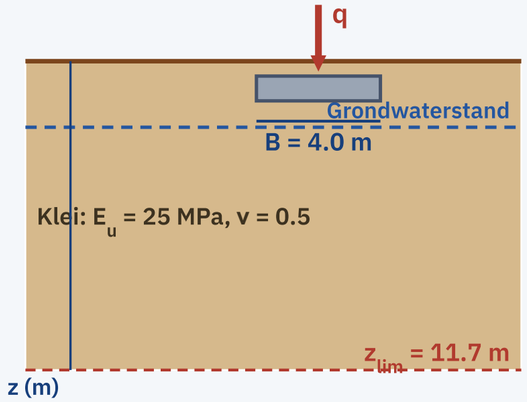
VOORBEELD

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 klei:** $E_u = 25\ \mathrm{MPa},\ \nu = 0.5,\ \gamma = 19\ \mathrm{kN/m^3}$**; 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

Middenzakking **S** van de flexibele fundering.



Oplossing (1/2)

OPLOSSING

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

$$q_{net} = 151.50\ \text{kPa} \qquad k = \frac{q_{net}(1-\nu^2)}{E} = \frac{151.50(0.75)}{25{,}000} = 0.004545\ (\text{dimensieloos})$$

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

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

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

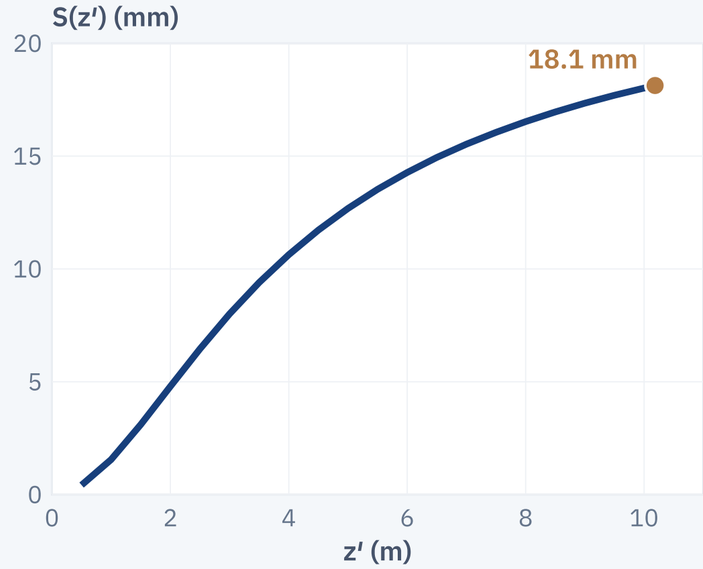
Oplossing (2/2)

OPLOSSING

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

$$S = 0.004545\,(4)(2)(0.4986) = 0.004545(3.9892)$$
$$= 0.01813\ \mathrm{m} = \mathbf{18.1\ mm}$$

Zetting in het midden **18.1 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

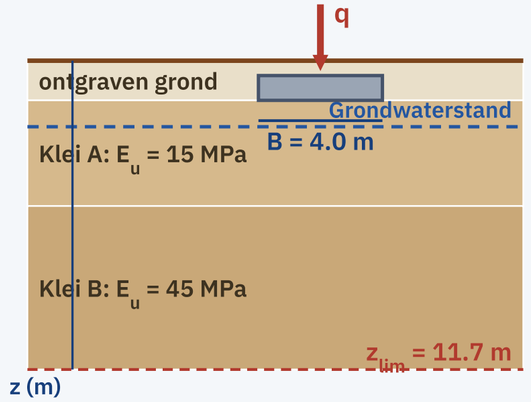
VOORBEELD

Gegeven

Fundering, belasting	**B × L = 4 × 6 m, q_{gross} = 180 kPa, D_f = 1.5 m ⇒ q_{net} = 151.50 kPa**
Laag A	**dikte 4 m vanaf het funderingsniveau:** $E_u = 15\ \mathrm{MPa}$
Laag B	**eronder, tot z_{lim}:** $E_u = 45\ \mathrm{MPa}$
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)

$$k_A = \frac{151.50(0.75)}{15{,}000} = 0.007575 \qquad k_B = \frac{151.50(0.75)}{45{,}000} = 0.002525$$

$$8\, I_s(z' = 4) = 8(0.2925) = 2.3398 \qquad 8\, I_s(z'_{lim}) = 3.9892$$

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

$$\Delta S_A = k_A (8I_s)_4 = 0.007575(2.3398) = 17.7\ \text{mm}$$

$$\Delta S_B = k_B \left[(8I_s)_{lim} - (8I_s)_4\right] = 0.002525(3.9892 - 2.3398) = 4.2\ \text{mm}$$

$$S = \Delta S_A + \Delta S_B = \mathbf{21.9\ mm}$$

De totale zetting in het centrum is **21.9 mm** (rekenkern: 21.9 mm). De enkele laag (E = 25 MPa) gaf 18.1 mm: doordat de bovenste 4 m **zacht** is, nam de zetting met **21%** toe; laag A draagt 81% 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

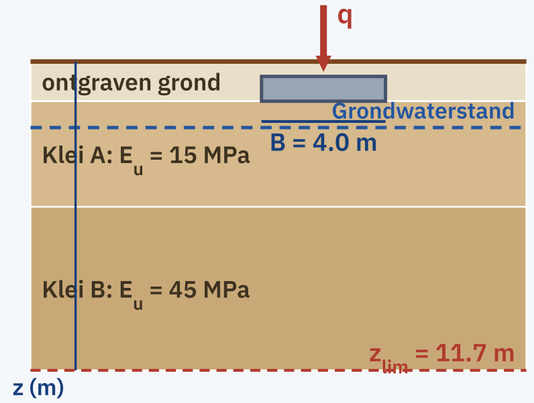
VOORBEELD

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

Hoekzetting, 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)

$$z' = 4\ (n' = 1):\ 4\,I_s = 0.5277$$

$$z'_{lim} = 10.19\ (n' = 2.547):\ 4\,I_s = 1.4137$$

2 Zetting in de hoek

$$S_{köşe} = k_A(0.5277) + k_B(1.4137 - 0.5277) = 4.0 + 2.2 = \mathbf{6.2\ mm}$$

3 Stijf en differentieel

$$S_{rigid} = 0.93(21.9) = \mathbf{20.4\ mm} \qquad S_{diff} = 21.9 - 6.2 = \mathbf{15.7\ mm}$$

Midden 21.9, hoek 6.2, star 20.4 mm; de differentiële zetting van de flexibele fundering is **15.7 mm**. De hoek zakt slechts 28% van het midden.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Opgave

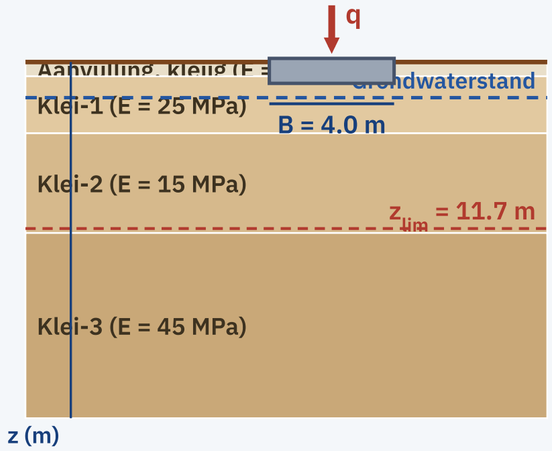
VOORBEELD

Gegeven

Fundering	**B × L = 4 × 6 m, q_{gross} = 180 kPa, ontgravingsdiepte 1.5 m, grondwaterstand 2.5 m**
Profiel	**Ophoging, kleiig 0–1 m: E_u = 8 MPa; Klei-1 1–5 m: E_u = 25 MPa; Klei-2 5–12 m: E_u = 15 MPa; Klei-3 12–25 m: E_u = 45 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)

$$\sigma'_{v0}(1.5) = 27.50\ \text{kPa} \quad \Rightarrow \quad q_{net} = 180 - 27.50 = \mathbf{152.50}\ \text{kPa}$$

2 Berekeningsdiepte en lagen

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

De ontgravingsbasis (1.5 m) ligt in de laag Klei-1: alleen het deel van de lagen onder 1.5 m wordt meegeteld. z_{lim} = 11.69 m, dat in de laag Klei-2 ligt, zodat die laag wordt afgekapt.

Oplossing (2/2)

OPLOSSING

Laag	z (m)	H (m)	E (MPa)	k (×10⁻³)	ΔS midden (mm)	ΔS hoek (mm)
Klei-1 (CL, stijf)	1.50 – 5.00	3.50	25	4.575	9.5	2.0
Klei-2 (CH, hard)	5.00 – 11.69	6.69	15	7.625	14.7	7.5
Totaal					**24.1**	**9.5**

Midden **24.1 mm**, hoek 9.5 mm, star 22.4 mm, differentieel 14.7 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 cohesief en zakt **ongedraineerd** (E_u, v = 0.5).
- 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 beschouwing: consolidatie en secundaire samendrukking van klei; granulair lagen; Schmertmann, SPT/CPT-diagrammen, modulus die met de diepte toeneemt, stijfheid van de fundering en grond-bouwinteractie, 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 $\alpha = 1$, $B' = B$

Klei: $E_u = \beta\, c_u$ (β enkele honderden–1500), $\nu = 0.5 \Rightarrow I_s = F_1$

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