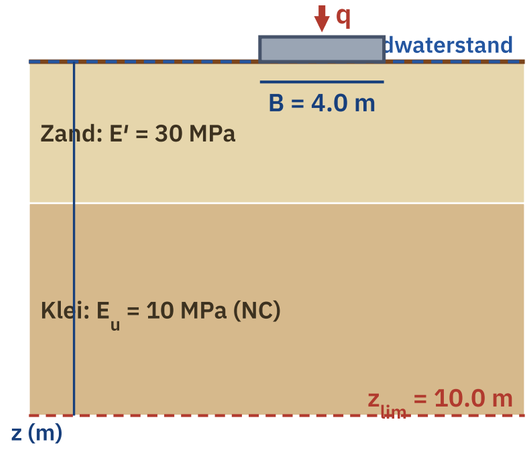
Geotechnisch college · Zettingen

Totale zetting: klei- en zandlagen

College: het samenstellen van de directe (elastische) zetting en de consolidatie van klei in een profiel van klei- en zandlagen, middelpunt, hoek en starre fundering, tijdsafhankelijke totale zetting; bij elk onderwerp een rekenvoorbeeld.

$S = S_e + S_c$ · Klei- en zandlagen · Steinbrenner · Spanningspad · Midden · hoek · star · Zetting-tijdkromme



Wat leren we in dit college?

- Zetting splitsen naar laagtype: **cohesieve** laag = directe zetting + consolidatie, **granulaire** laag = alleen elastische zetting
- **Steinbrenner** (directe zetting) en **spanningspad** (consolidatie) in dezelfde lamellen combineren
- Het effect van de ontgraving zien: de **netto druk** bepaalt de directe zetting, terwijl **opbolling en herbelasting** de consolidatie bepalen
- Het bepalen van de zetting **in het midden** en **in de hoek** van een flexibele fundering, en van de starre fundering en de differentiële zetting uit de totale zetting
- De zetting-tijdkromme $\mathbf{S(t) = S_e + \Sigma\, U_i(t)\, S_{c,i}}$ opstellen
- Verifiëren dat het resultaat van de module gelijk is aan de som van de enkelvoudige modules (Elastisch + Consolidatie)

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

Voorbeeldprofiel: 6 m normaal geconsolideerde klei op 4 m zand; fundering van 4 × 6 m, q = 150 kPa. De zettingen zijn in mm.

Totale zetting = directe zetting + consolidatie

THEORIE

$S = S_e + S_c$ samenhangende laag: S_e(ongedraineerd) + S_c granulaire laag: S_e(gedraineer

Beide componenten worden **in dezelfde lamellen** berekend, met dezelfde Boussinesq-spanningstoename, dezelfde ontgraving en dezelfde berekeningsdiepte. De oplossing is **analytisch**: gesloten invloedsfactoren, een spanningstraject lamel voor lamel en de theorie van Terzaghi; er zijn geen eindige elementen.

Verzadigde klei verandert niet van volume terwijl de belasting wordt aangebracht (v = 0.5): dit is de directe zetting. Het water wordt langzaam afgevoerd en de klei wordt samengedrukt langs het spanningstraject: dit is consolidatie. Omdat zand zijn water onmiddellijk afgeeft, is zijn zetting volledig elastisch.

> Bij één grondprofieltype geeft de module **hetzelfde resultaat** als de module Zakkingen (elastisch) of Consolidatie (Voorbeeld 6).

> Het type van elke laag wordt gekozen in de tabel Grondprofiel en bepaalt welke parameters de laag nodig heeft.

LAAGTYPE

Laag	Directe zetting	Consolidatie
Cohesief	ongedraineerd E_u, v = 0.5	beschikbaar: C_c, C_r, C_s, e_0, σ'_p (of m_v), C_v
Niet-samenhangend	gedraineerd E′, v′	geen

Wet van Hooke en coëfficiënten van Steinbrenner

THEORIE

De zetting onder een volledig flexibele fundering die de nettodruk q_{net} draagt, is de integraal van de verticale vervorming (Boussinesq-spanningen, homogene halfruimte):

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

Analytische oplossing voor de hoek van een rechthoek (Steinbrenner):

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

m′ = L′/B′, n′ = z/B′. **Midden**: α = 4, B′ = B/2; **hoek**: α = 1, B′ = B.

Omdat in de cohesieve laag v = 0.5 geldt, is $I_s = F_1$ en $(1 - v^2) = 0.75$.

ELASTISCHE ZETTINGSMODULI

De formules voor F_1, F_2, A_0, A_1, A_2 en uitgewerkte voorbeelden staan in de presentaties over elastische zetting; hier worden alleen de resultaten gebruikt voor de sommatie.

Gelaagd profiel en netto druk

THEORIE

Een laag tussen de diepten z_{boven} en z_{onder} van het funderingsvlak draagt het verschil in I_s bij met zijn eigen E en v:

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

De ontgraving heft de effectieve deklaagspanning op het niveau van de putbodem op; in een elastische grond met één modulus wordt de ontlasting bij herbelasting teruggewonnen, en de directe zetting wordt bepaald door de **netto druk**:

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

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

Het resultaat is niet afhankelijk van de lameldikte; de lamellen dienen alleen voor de tabellen en de kleurzones.

NEDEN FARKLI?

De directe zetting wordt met de **netto druk** berekend en de consolidatie met de **effectieve spanningstoename** langs de spanningsweg; de ontgraving beïnvloedt beide op verschillende manieren.

Spanningstraject en lamelcompressie

THEORIE

In samenhangende lamellen wordt de consolidatie niet in één stap van de begin- naar de eindspanning berekend, maar langs het **spanningspad**: zwelling door de ontgraving (C_s), bij herbelasting eerst het terugdraaien van de zwelling, hercompressie met C_r tot σ'_p en daarboven maagdelijke compressie met C_c:

$$\sigma'_{v0} \xrightarrow{C_s} \sigma'_{exc} \xrightarrow{C_s} \sigma'_{v0} \xrightarrow{C_r} \sigma'_p \xrightarrow{C_c} \sigma'_{final} \qquad \sigma'_p = OCR \cdot \sigma'_{v0}$$

$$S_c = \sum (S_b + S_r + S_v)\,, \quad f = \frac{\Delta H}{1 + e_0} \qquad \Delta\sigma_{load} = q\, I_z(z') \qquad \sigma'_{final} = \sigma'_{exc} + \Delta\sigma_{load}$$

In NC-klei (OCR = 1): $S = C_c\, f \log(\sigma'_{eind}/\sigma'_{v0})$ (zonder ontgraving).

Zwelling is negatief; $S_{net} = S_c + S_{zwelling}$. In de optie **behouden** wordt de zetting gemeten vanaf de oorspronkelijke grond, in de optie **op nul gezet** vanaf de opgezwollen basis.

RekenDiepte: $I_z(z') = p$ (gangbaar 10%) of de basis van het profiel; de m_v-methode is een lineaire optie.

DETAIL

De volledige beschrijving van het spanningspad, de regimes, de ontgraving en de tijdkromme staat in de presentatie Consolidatie.

Opgave

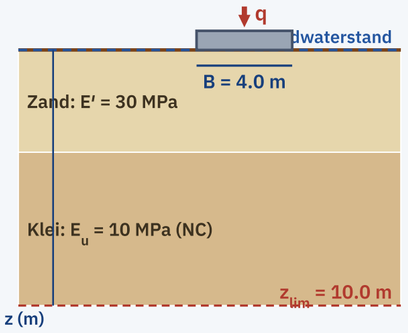
VOORBEELD

Gegeven

Profiel	**zand 0–4 m:** $E' = 30\ \mathrm{MPa},\ \nu' = 0.30,\ \gamma_{sat} = 19$ · **klei 4–10 m (NC):** $E_u = 10\ \mathrm{MPa},\ \nu = 0.5,\ e_0 = 1.0,\ C_c = 0.30,\ C_v = 2\ \mathrm{m^2/jaar},\ \gamma_{sat} = 18$
Fundering	**4 × 6 m flexibele rechthoek, $q = 150\ \mathrm{kPa}$, aan het maaiveld; grondwaterstand aan het maaiveld; rekendiepte 10 m (basis van het profiel)**
Ontgraving	**geen (q_{net} = 150 kPa)**

GEVRAAGD

Directe zetting S_e van elke laag in het **midden** en in de **hoek**.



Oplossing

OPLOSSING

1 Zand (0–4 m): k = q(1 − ν′²)/E′ = 150(0.91)/30 000 = 0.004550; 8 $I_s(4)$ = 2.7351

$$\Delta S_e = k\,[(\alpha B' I_s)_4 - 0] = 0.004550(2.7351) = \mathbf{12.4\ mm}$$

2 Klei (4–10 m): k = 150(0.75)/10 000 = 0.011250; 8 $I_s(4)$ = 2.3398; 8 $I_s(10)$ = 3.9643

$$\Delta S_e = 0.011250(3.9643 - 2.3398) = \mathbf{18.3\ mm}$$

In het midden S_e = 12.4 + 18.3 = **30.7 mm**; in de hoek 3.4 + 9.8 = **13.2 mm** (in de hoek α = 1, B′ = B).

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Boussinesq, invloedsdiepte en de m_V-methode

THEORIE

Voor een rechthoek B × L onder het midden van de fundering met de hoekcoëfficiënt van Newmark, en voor een strook met de gesloten oplossing voor α:

$$\Delta\sigma = q\, I_z(z') \qquad I_z = 4\, I_{köşe}(m,n)\ \ (m = \tfrac{B}{2z'},\ n = \tfrac{L}{2z'}) \qquad I_{z,\text{strook}} = \frac{\alpha + \sin\alpha}{\pi}$$

Invloedsdiepte: $I_z(z')$ = p (gangbaar 10%); vierkant 2.09 B, 2.55 B voor L = 1.5 B, strook 6.34 B. Als de basis van het profiel wordt gekozen, eindigt de berekening in de laatste laag (in rots of dicht grind).

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

m_V-methode: $\Delta H = m_v\, \Delta\sigma'\, H$; lineair, $C_c/C_r/C_s$ worden niet gecombineerd.

IN DIT PROFIEL

De berekeningsdiepte is de basis van het profiel (10 m); er wordt een starre basis aangenomen. Voor de kleilaag op z = 7 m geldt $I_z(z' = 7) = 0.1916$.

Opgave

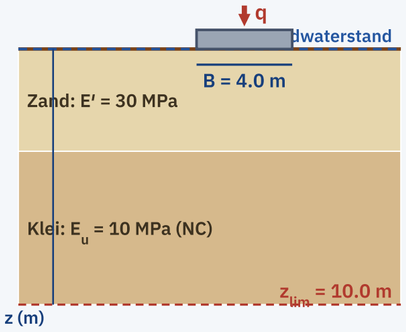
VOORBEELD

Gegeven

Profiel	**zand 0–4 m:** $E' = 30\ \mathrm{MPa},\ \nu' = 0.30,\ \gamma_{sat} = 19$ · **klei 4–10 m (NC):** $E_u = 10\ \mathrm{MPa},\ \nu = 0.5,\ e_0 = 1.0,\ C_c = 0.30,\ C_v = 2\ \mathrm{m^2/jaar},\ \gamma_{sat} = 18$
Fundering	**4 × 6 m flexibele rechthoek,** $q = 150\ \mathrm{kPa}$**, aan het maaiveld; grondwaterstand aan het maaiveld; rekendiepte 10 m (basis van het profiel)**
Lamel	**klei één lamel,** $H = 6$ **m, middelpunt** $z = 7$ **m;** $f = H/(1 + e_0) = 3$ **m**
Spanningen	$\sigma'_{v0} = 9.19(4) + 8.19(3) = 61.33\ \mathrm{kPa}$

GEVRAAGD

I_z, Δσ, σ'_{eind} en **S_c**.



Oplossing

OPLOSSING

1 Boussinesq (z′ = 7 m): m = 2/7 = 0.2857; n = 3/7 = 0.4286

$$I_z = 4\,I_{köşe}(0.2857;\,0.4286) = 4(0.0479) = \mathbf{0.1916} \qquad \Delta\sigma = 150(0.1916) = 28.75\ \text{kPa}$$

2 Eindspanning en samendrukking (NC: $\sigma'_p = \sigma'_{v0}$)

$$\sigma'_{final} = 61.33 + 28.75 = 90.08\ \text{kPa}$$

$$S_c = C_c f \log\frac{\sigma'_{final}}{\sigma'_{v0}} = 0.30(3)\log\frac{90.08}{61.33} = \mathbf{150.2\ mm}$$

De consolidatiezetting van de klei bedraagt **150.2 mm**: ongeveer **4.9 keer** de directe zetting (30.7 mm). In zachte NC-klei komt de belangrijkste zetting uit consolidatie.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Midden, hoek en starre fundering

THEORIE

Voor elke lamel worden de directe en (in de cohesieve laag) de consolidatiecomponenten gesommeerd; het totaal over de lagen tot z_{lim} geeft de **centrale** zetting van de flexibele fundering:

$$S = \sum \Delta S_e + \sum (\Delta S_b + \Delta S_r + \Delta S_v) \quad [+ S_{heave}]$$

$$S_{köşe} = S_{e,köşe} + S_c \qquad S_{rigid} = 0.93\, S_e + S_c \qquad S_{diff} = S_e - S_{e,köşe}$$

Voor de hoek krijgt **alleen de directe zetting** de eigen waarde van de hoekrechthoek; de consolidatie volgt uit het spanningspad op de middellijn en wordt in de hoek als gelijk aangenomen.

Een starre fundering zakt gelijkmatig: de directe component bedraagt ongeveer 0.93 keer die van het flexibele centrum, de consolidatiecomponent is gelijk aan die van het centrum.

Ontgraving: het directe deel wordt met q_{net} berekend, en de kleiopbolling en herbelasting eveneens; bij de keuze "behouden" geldt $S = S_e + S_c + S_{opbolling}$.

ALS KLEI DOMINANT IS

Omdat de consolidatie in het midden en in de hoek gelijk is, is in klei-gedomineerde profielen de **differentiële zetting** alleen het verschil in de directe component.

Opgave

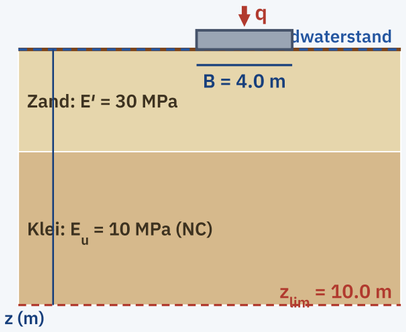
VOORBEELD

Gegeven

Profiel	**zand 0–4 m:** $E' = 30\ \mathrm{MPa},\ \nu' = 0.30,\ \gamma_{sat} = 19$ · **klei 4–10 m (NC):** $E_u = 10\ \mathrm{MPa},\ \nu = 0.5,\ e_0 = 1.0,\ C_c = 0.30,\ C_v = 2\ \mathrm{m^2/jaar},\ \gamma_{sat} = 18$
Fundering	**4 × 6 m flexibele rechthoek,** $q = 150\ \mathrm{kPa}$**, aan het maaiveld; grondwaterstand aan het maaiveld; rekendiepte 10 m (basis van het profiel)**
Vorige voorbeelden	S_e**: midden 30.7, hoek 13.2 mm;** S_c **= 150.2 mm (Voorbeeld 1 en 2)**

GEVRAAGD

Midden, hoek, star totale zetting; differentiële zetting; het aandeel van de directe component.



Oplossing

OPLOSSING

1 Totalen

$$S_{center} = 30.7 + 150.2 = \mathbf{181.0\ mm} \qquad S_{köşe} = 13.2 + 150.2 = \mathbf{163.4\ mm}$$

$$S_{rigid} = 0.93(30.7) + 150.2 = \mathbf{178.8\ mm} \qquad S_{diff} = 30.7 - 13.2 = \mathbf{17.5\ mm}$$

	S_e (mm)	S_c (mm)	totaal (mm)
midden (flexibel)	30.7	150.2	**181.0**
hoek (flexibel)	13.2	150.2	**163.4**
rigide	28.6	150.2	**178.8**

De directe zetting bedraagt slechts **17%** van het totaal; het differentiële zettingsverschil is 17.5 mm. Omdat de consolidatie van de klei in het midden en in de hoek gelijk is, zakt de hoek met 90% van het midden.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Opgave

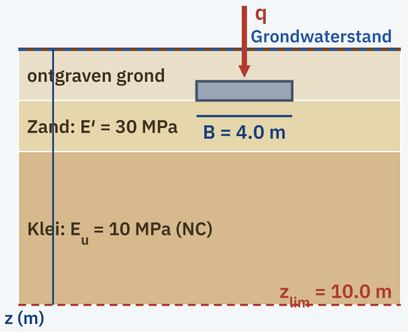
VOORBEELD

Gegeven

Profiel	**zand 0–4 m ($E' = 30,\ \nu' = 0.30,\ \gamma_{sat} = 19$) · klei 4–10 m (NC; $E_u = 10,\ e_0 = 1.0,\ C_c = 0.30,\ C_s = C_r = 0.06,\ \gamma_{sat} = 18$); grondwaterstand aan het maaiveld**
Ontgraving	**brede ontgraving (I_{exc} = 1), diepte 2 m; op de bodem van de funderingsontgraving**
Fundering	**4 × 6 m, $q_{gross} = 150\ \mathrm{kPa}$; berekeningsdiepte 10 m**
Lamellen	**zand 2–4 m (H = 2 m), klei 4–10 m (z = 7 m, f = 3 m)**

GEVRAAGD

q_{netto}, S_e; zwelling van de klei en S_c; totale zetting (bewaard en gereset).



Oplossing (1/3)

OPLOSSING

1 Netto spanning: $q_{opwaarts} = \sigma'_{v0}(2\text{ m}) = 9.19(2) = 18.38$ kPa

$$q_{net} = 150 - 18.38 = \mathbf{131.62}\ \text{kPa}$$

2 Directe zetting: zand (z′ 0–2 m) k = 0.003992; klei (z′ 2–8 m) k = 0.009872 ($k = q_{net}(1 - \nu^2)/E$)

$$\text{zand} : \Delta S_e = 0.003992(1.5131 - 0) = 6.0\ \text{mm}$$

$$\text{klei} : \Delta S_e = 0.009872(3.6370 - 1.0554) = 25.5\ \text{mm}$$

De netto ontgravingsdruk daalde van 150 naar 131.6 kPa; de directe zetting van 30.7 naar **31.5 mm** (de bovenste 2 m zand werd ontgraven, waardoor de klei minder werd belast).

Oplossing (2/3)

OPLOSSING

3 Klei: spanningspad (z′ = 5 m: I_z = 0.3204)

$$\sigma'_{exc} = 61.33 - 18.38 = 42.95\ \text{kPa} \qquad \Delta\sigma = 150(0.3204) = 48.05\ \text{kPa}$$

$$\text{opbolling} = -0.06(3)\log\frac{61.33}{42.95} = -27.8\ \text{mm} \qquad \sigma'_{final} = 42.95 + 48.05 = 91.00\ \text{kPa}$$

4 NC-klei ($\sigma'_p = \sigma'_{v0}$): S_b neemt de zwelling terug, S_v is de maagdelijke samendrukking

$$S_b = 0.06(3)\log\frac{61.33}{42.95} = 27.8\ \text{mm} \qquad S_v = 0.30(3)\log\frac{91.00}{61.33} = 154.2\ \text{mm}$$

$$S_c = S_b + S_v = \mathbf{182.1\ mm}$$

Oplossing (3/3)

OPLOSSING

	S_e (mm)	S_c (mm)	opbolling (mm)	totaal (mm)
zonder ontgraving (Voorbeeld 3)	30.7	150.2	0	**181.0**
ontgraven, **gehandhaafd** (ten opzichte van het oorspronkelijke maaiveld)	31.5	182.1	-27.8	**185.8**
ontgraven, **op nul gesteld** (vanaf de opgebolde bodem)	31.5	182.1	—	**213.6**

De totale zetting gemeten vanaf het oorspronkelijke maaiveld is **185.8 mm** (S_e + S_c + zwelling); gemeten vanaf de opgezwollen basis is zij **213.6 mm**. Het verschil is gelijk aan de zwelling (27.8 mm).

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Directe zetting onmiddellijk, consolidatie in de tijd

THEORIE

$$T_v = \frac{C_v\, t}{H_{dr}^2} \qquad U(T_v) = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M^2} e^{-M^2 T_v} \qquad M = \frac{\pi(2m+1)}{2}$$

$$S(t) = S_e + \sum_i U_i(t)\, S_{c,i} \;\; [+ S_{heave}] \qquad t = \frac{T_v\, H_{dr}^2}{C_v}$$

S_e is **onmiddellijk** aanwezig (t = 0^+); de consolidatie verloopt in elke samenhangende laag met zijn eigen C_v en H_{dr}: H_{dr} = H (eenzijdige drainage) of H/2 (tweezijdige drainage).

$T_{v,50}$ = 0.197; $T_{v,90}$ = 0.848; T_v < 0.05'te U = $2\sqrt{(T_v/\pi)}$.

De curve is de som van de laagcurves; de t_{50}- en t_{90}-waarden van het systeem worden uit deze som afgelezen. In een profiel zonder samenhangende laag is er geen tijdcurve: de gehele zetting is direct.

Bij de keuze "behouden" begint de kromme bij nul opbolling en eindigt deze bij de netto vervorming.

ZAND + KLEI

Zand zakt onmiddellijk; **klei bepaalt de vorm van de tijd-zettingcurve**.

Opgave

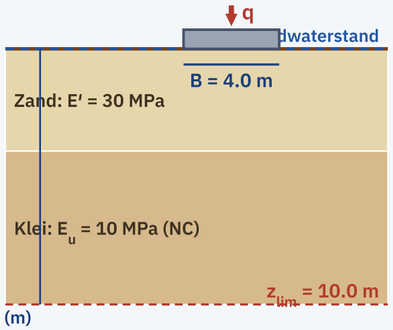
VOORBEELD

Gegeven

Profiel	**zand 0–4 m: $E' = 30\ \mathrm{MPa},\ \nu' = 0.30,\ \gamma_{sat} = 19$ · klei 4–10 m (NC): $E_u = 10\ \mathrm{MPa},\ \nu = 0.5,\ e_0 = 1.0,\ C_c = 0.30,\ C_v = 2\ \mathrm{m^2/jaar},\ \gamma_{sat} = 18$**
Fundering	**4 × 6 m flexibele rechthoek, $q = 150\ \mathrm{kPa}$, aan het maaiveld; grondwaterstand aan het maaiveld; rekendiepte 10 m (basis van het profiel)**
Vorige voorbeelden	**S_e = 30.7 mm (Voorbeeld 1); S_c = 150.2 mm (Voorbeeld 2); geen ontgraving**
Drainage	**klei draineert aan de bovenkant (zand) en aan de onderkant (stijve basis): dubbele drainage, H = 6 m**
Tijden	**t = 0.25; 0.5; 1; 2; 4; 8 jaar**

GEVRAAGD

H_{dr}, t_{50}, t_{90} en S(t); de zetting op t = 0⁺.



Oplossing (1/2)

OPLOSSING

1 Drainageweg en tijdsduren (C_v = 2 m²/jaar)

$$H_{dr} = \frac{H}{2} = 3\ \text{m} \qquad t_{50} = \frac{0.197(3^2)}{2} = \mathbf{0.89}\ \text{jaar} \qquad t_{90} = \frac{0.848(3^2)}{2} = \mathbf{3.82}\ \text{jaar}$$

2 Begin- en eindzetting

$$S(0^+) = S_e = 30.7\ \text{mm} \qquad S(\infty) = S_e + S_c = 30.7 + 150.2 = \mathbf{181.0\ mm}$$

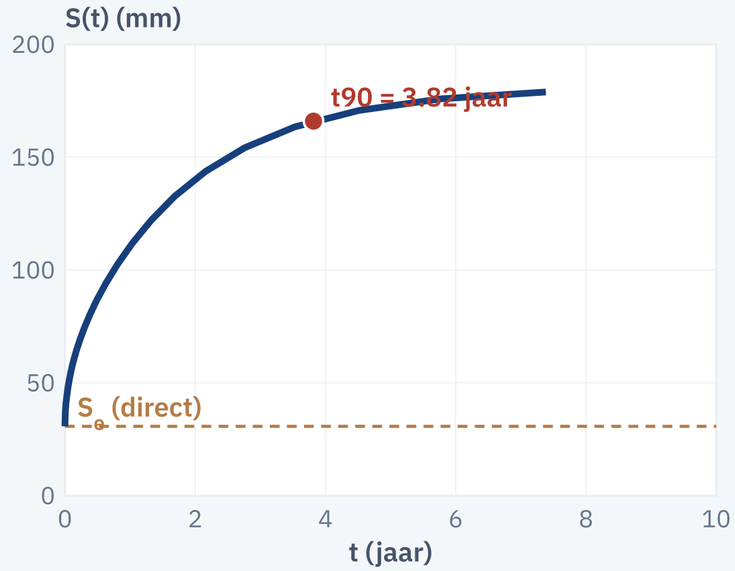
Zodra de belasting wordt aangebracht, bedraagt de zetting 30.7 mm (17% van het totaal); 90% van de consolidatie van de klei is voltooid in **3.82 jaar**.

Oplossing (2/2)

OPLOSSING

t (jaar)	U	$S_c(t)$ (mm)	$S(t) = S_e + S_c(t)$ (mm)
0.25	0.266	40.0	**71**
0.50	0.376	56.5	**87**
1.00	0.531	79.8	**110**
2.00	0.729	109.6	**140**
4.00	0.910	136.7	**167**
8.00	0.990	148.7	**179**

Totale zetting in 1 jaar is 110 mm (61% van de eindwaarde), na 4 jaar 167 mm (92%). De curve begint met de directe zetting en stijgt met de consolidatie van de klei.



Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Opgave

VOORBEELD

Gegeven

Profiel	**alleen klei, 0–6 m (NC): $E_u = 10\ \mathrm{MPa}$, $e_0 = 1.0$, $C_c = 0.30$, $\gamma_{sat} = 18$; grondwaterstand aan het maaiveld**
Fundering	**4 × 6 m, $q = 150\ \mathrm{kPa}$, geen ontgraving; rekendiepte 6 m (basis van het profiel)**
Vergelijking	**Modules Directe zetting (cohesief) + Consolidatie**

GEVRAAGD

Vergelijk S_e, S_c en het totaal uit de module Totale zetting met de resultaten van de twee modules met één zettingstype.

Oplossing

OPLOSSING

Module	S_e (mm)	S_c (mm)	totaal (mm)
Elastische zetting: samenhangende grond	35.3	—	—
Consolidatie	—	591.6	—
som van de twee modules	35.3	591.6	**626.9**
Totale zetting (2D)	35.3	591.6	**626.9**

De module Totale zetting is voor een profiel van één type **exact identiek** aan de som van de twee modules (626.9 mm). De som van de hoeken is 601.5 mm ($S_{e,hoek}$ = 9.9 + S_c), de starre fundering 624.4 mm.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Opgave

VOORBEELD

Gegeven

Profiel	**Ophoging, zand 0–2 m (E = 12 MPa) · Klei-1 2–7 m (E_u = 8 MPa; C_c = 0.25; OCR = 1.6) · Zand 7–11 m (E = 35 MPa) · Klei-2 11–20 m (E_u = 15 MPa; C_c = 0.30; OCR = 1.3) · Grindhoudend zand 20–30 m (E = 70 MPa)**
Fundering, ontgraving	**10 × 15 m, q_{bruto} = 120 kPa; ontgravingsdiepte 2 m (ontgravingsplan = fundering); grondwaterstand 2 m**
Rekendiepte	**invloedsdiepte, p = 10%**
Resultaat	**Voorbeeldproject van de module Totale zetting**

GEVRAAGD

S_e en S_c laag voor laag, opbolling; middelpunt, hoekpunt, starre som; t_{50} en t_{90}.

Oplossing (1/2)

OPLOSSING

1 Ontgravings- en berekeningsdiepte

$$q_{lift} = \sigma'_{v0}(2) = 18(2) = 36.0\ \text{kPa} \qquad q_{net} = 120 - 36.0 = \mathbf{84.0}\ \text{kPa}$$

$$z_{lim} = D_f + z' = 2 + 25.47 = \mathbf{27.47}\ \text{m}$$

De ophoging (0–2 m) wordt door ontgraving verwijderd; de berekening omvat vier lagen van 2 m tot z_{lim} = 27.5 m. De laatste laag (grindhoudend zand) wordt door z_{lim} afgesneden; de bijdrage van de diepere lagen is klein.

Oplossing (2/2)

OPLOSSING

Laag	z (m)	S_e (mm)	S_c (mm)	opbolling (mm)	totaal = S_e + S_c + zwelling (mm)
Klei-1 (CL, zacht)	2.0 – 7.0	20.8	198.4	-62.6	156.6
Zand (SM, matig dicht)	7.0 – 11.0	5.6	—	—	5.6
Klei-2 (CH, hard)	11.0 – 20.0	14.1	27.0	-6.5	34.6
Grindhoudend zand (vast)	20.0 – 27.5	1.2	—	—	1.2
Totaal (midden)		**41.7**	**225.4**	**-69.1**	**198.0**

Midden **198.0 mm** = S_e 41.7 + S_c 225.4 – zwelling 69.1 (behouden); hoek 168.7 mm, star 195.1 mm. Tijd: t_{50} = 0.72 jaar, t_{90} = 3.71 jaar. De module geeft dezelfde waarden.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Aandachtspunten bij het lezen van de resultaten

THEORIE

Funderingsniveau = ontgravingsbodem; gelijkmatige druk onder een volledig flexibele fundering; starre fundering ≈ 0.93 × flexibel midden in het plotselinge deel.

Directe zetting: spanningen van een homogene halve ruimte in elke laag (met de eigen ν); samenhangende laag ongedraineerd (ν = 0.5), niet-samenhangende laag gedraineerd; geen aanlegdieptecorrectie ($I_f = 1$).

Consolidatie: eendimensionaal volgens Terzaghi; hydrostatische poriënwaterspanning, de grondwaterstand wordt niet beïnvloed door de ontgraving; σ'_p is de grootste spanning uit het verleden en neemt niet af door de ontgraving; de spanningstoename wordt langs de verticaal onder het midden bepaald.

Zetting positief, opbolling negatief; de schakelaar in de kop keert het teken om (de rekenkern blijft klassiek).

Buiten het toepassingsgebied: secundaire samendrukking, consolidatie van granulair materiaal, de diagrammen van Schmertmann en SPT/CPT, een modulus die binnen een laag met de diepte toeneemt (deel de laag op), stijfheid van de fundering en grond–constructie-interactie, 2D/3D-consolidatie, eindige elementen, draagvermogen, liquefactie.

Samenvatting

Belangrijkste punten

$S = S_e + S_c$: samenhangende laag = ongedraineerde directe zetting + consolidatie; niet-samenhangende laag = alleen gedraineerde elastische zetting

Directe zetting (Steinbrenner): $\Delta S_e = q_{netto}\ \alpha\ B'\ (1 - \nu^2)/E \cdot [I_s(z_{onder}) - I_s(z_{boven})]$; $q_{netto} = q_{bruto} - \sigma'_{v0}(D_{exc})$

Consolidatie: spanningstraject $\sigma'_{v0} \rightarrow \sigma'_{exc} \rightarrow \sigma'_{v0} \rightarrow \sigma'_p \rightarrow \sigma'_{eind}$ (C_s, C_r, C_c); in NC-klei $S_c = C_c\ f\ \log(\sigma'_{eind}/\sigma'_{v0})$

Midden $S_e + S_c$; **hoek** $S_{e,hoek} + S_c$; **star** $0.93\ S_e + S_c$; differentiële zetting = verschil van de directe componenten

Ontgraving: het onmiddellijke deel met q_{net}, de klei door zwelling + herbelasting; "behouden" $S = S_e + S_c + S_{zwelling}$, "gereset" $S_e + S_c$

Tijd: $S(t) = S_e + \Sigma\ U_i(t)\ S_{c,i}$; $T_{v,50} = 0.197$, $T_{v,90} = 0.848$; $H_{dr} = H$ (eenzijdig) of $H/2$ (tweezijdig)

Bij één grondsoort is het resultaat **exact hetzelfde** als in de module Elastische zetting of Consolidatie

Literatuur

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

Das, B.M. (2018). Principles of Geotechnical Engineering, 9e druk. Cengage — hfst. 10–11 (spanningstoename, consolidatiezakking, tijdsverloop).

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

Terzaghi, K. (1943). Theoretical Soil Mechanics. Wiley.

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 (voorbeeldlamellen: dz = laagdikte).

GeoTerva

Online geotechnische berekeningen

Van theorie naar praktijk

Stel uw eigen gelaagde klei- en zandprofiel samen in GeoTerva; de module geeft de zetting en de tijd-zettingkromme samen.

Module openen →

Theoriepagina →

Openen op de smartphone

Proefmodules vereisen geen registratie.

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