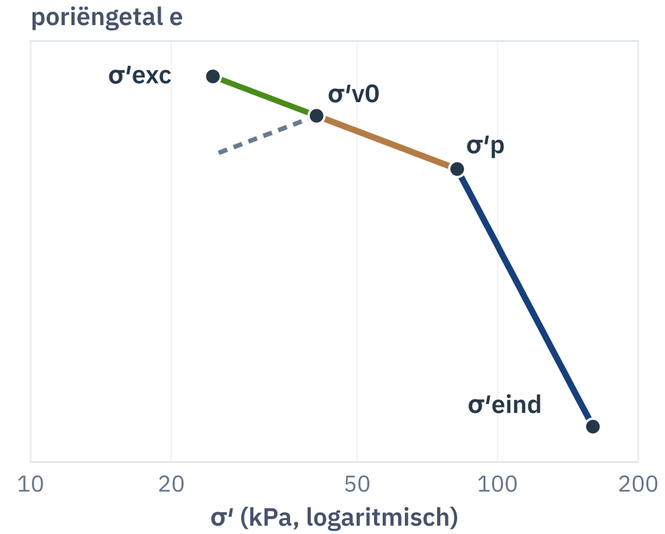
Geotechnisch college · Zettingen

Consolidatiezetting

College: eendimensionale consolidatiezetting van een kleilaag; spanningspad, preconsolidatie, ontgraving en opbolling, spanningen volgens Boussinesq, de m_V-methode en tijd; rekenvoorbeelden bij elk onderwerp.

- Spanningspad
- $C_c \cdot C_r \cdot C_s$
- Ontgraving en opbolling
- Boussinesq
- m_V-methode
- Tijdsafhankelijke zetting



Wat leren we in dit college?

- Het **spanningspad** van de klei volgen: $\sigma'_{v0} \rightarrow \sigma'_{exc} \rightarrow \sigma'_{v0} \rightarrow \sigma'_{p} \rightarrow \sigma'_{eind}$ (C_s, C_r, C_c)
- De beginspanningen (σ_{v0}, u_0, σ'_{v0}) en de **preconsolidatiespanning** ($\sigma'_p = OCR \cdot \sigma'_{v0}$) bepalen
- Onderscheid maken tussen het ontlastings- en zweleffect van **de ontgraving** en **vanaf welke referentie** de zetting wordt gemeten
- De **Boussinesq**-spanningstoename en de **invloedsdiepte** berekenen
- De **vier regimes** van lamelsamendrukking toe te passen (herbelasting, maagdelijke samendrukking); te vergelijken met de **m_v**-methode
- **Tijdsafhankelijke** consolidatie (T_v, U, t_{50}, t_{90}) en het tekenen van de zetting-tijdkromme van het gelaagde profiel

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

Voorbeeldgrond: 6 m dikke klei, grondwaterstand aan het maaiveld ($\sigma'_{v0} = 8.19\ z$), $e_0 = 1.0$, $C_c = 0.30$, $C_r = 0.06$; fundering van 4 × 6 m, q = 150 kPa. Zettingen zijn in mm.

Wat berekent deze module?

THEORIE

Elke laag in het profiel is klei; andere grond kan niet worden ingevoerd. De module berekent de **primaire consolidatie** van de klei: bij aanbrengen van de belasting wordt water langzaam uitgedreven en de klei samengedrukt langs het spanningspad.

Directe (elastische) zetting staat in de modules Elastische zetting; de som van beide staat in de module Totale zetting (2D).

De oplossing is **analytisch**: Boussinesq-spanningstoename, spanningstraject lamel voor lamel en de theorie van Terzaghi; hydrostatische poriënwaterspanning; er is geen eindige elementen.

Buiten beschouwing: granulair lagen, secundaire samendrukking (C_α), zetting van zand volgens SPT/CPT, zetting op rots, 2D/3D-consolidatie, draagvermogen, liquefactie.

TEKENAFSPRAAK

Zetting is **positief**, opbolling is **negatief**. Netto vervorming $S_{net} = S_c + S_{opbolling}$.

Niet in één stap van initiële naar uiteindelijke spanning

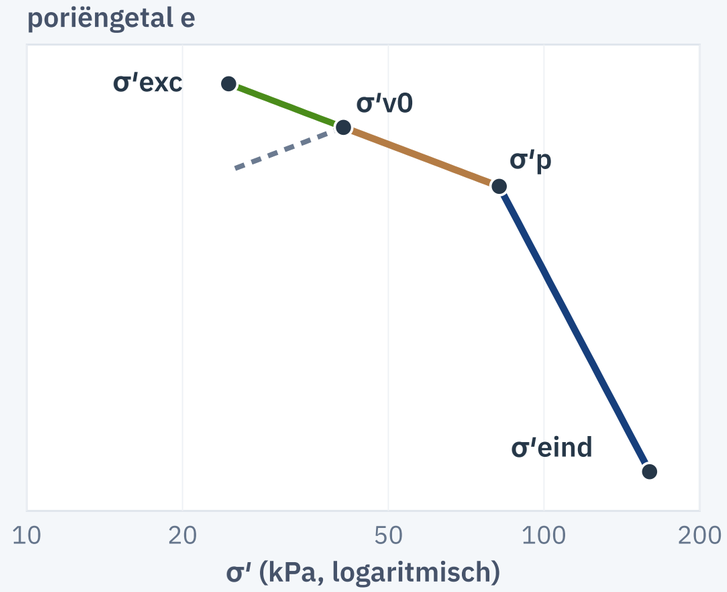
THEORIE

De berekening gaat nooit in **één stap** van de beginspanning naar de eindspanning. De ontgraving verlaagt de effectieve spanning en de klei **zwelt** langs de ontlastingslijn (C_s). Wanneer de constructie haar opnieuw belast, volgt de klei eerst dezelfde lijn terug naar σ'_{v0} (de zwelling wordt ongedaan gemaakt); daarna wordt zij opnieuw samengedrukt langs C_r tot σ'_p, en als de eindspanning σ'_p overschrijdt, wordt zij samengedrukt langs de maagdelijke lijn (C_c):

$$\sigma'_{v0} \xrightarrow{C_s} \sigma'_{exc} \xrightarrow{C_s} \sigma'_{v0} \xrightarrow{C_r} \sigma'_p \xrightarrow{C_c} \sigma'_{final}$$

σ'_p is de grootste spanning uit het verleden; **ze wordt niet verlaagd door ontgraving**.

De belasting-ontlastingscyclus **sluit** bij σ'_{v0}: een belasting die alleen de verwijderde deklaag herstelt, veroorzaakt geen zetting ten opzichte van de begintoestand, ongeacht C_s en C_r.



Schematisch: streeplijn ontlasten, groene lijn herbelasten (C_s), oranje lijn hersamendrukking (C_r), blauwe lijn maagdelijke samendrukking (C_c).

In het midden van elke lamel

THEORIE

Elke laag tussen het funderingsniveau en de rekenkundige diepte z_{lim} wordt verdeeld in **lamellen** met een dikte van ten hoogste Δz (afgekapt op de grondwaterstand); elke spanning wordt in het midden van de lamel berekend:

$$\sigma_{v0} = \sum \gamma_i h_i \qquad u_0 = \gamma_w (z - z_w) \qquad \sigma'_{v0} = \sigma_{v0} - u_0$$

γ wordt boven de grondwaterstand gebruikt, γ_{sat} eronder; γ_w = 9.81 kN/m³.

De spanningen in de grond bij aanvang zijn de **referentie** voor elke volgende bouwfase.

Hoe dunner de lamel, hoe nauwkeuriger het resultaat; bij een handberekening geeft één lamel een benaderend resultaat.

GRONDWATERSTAND AAN HET MAAIVELD

Voor γ_{sat} = 18 is γ′ = 18 − 9.81 = 8.19 kN/m³ en σ'_{v0} = 8.19 z. Alle volgende voorbeelden gebruiken deze grond.

Opgave

VOORBEELD

Gegeven

Grond	$\gamma = 17\ \mathrm{kN/m^3}$ **(boven de grondwaterstand),** $\gamma_{sat} = 18\ \mathrm{kN/m^3}$ **(eronder)**
Grondwaterstand	**1.5 m vanaf het maaiveld**
Diepten	**z = 1.5; 3.0; 4.5; 6.0 m**

GEVRAAGD

Bepaal per diepte de waarden van σ_{v0}, u_0, σ'_{v0}.

Oplossing

OPLOSSING

1 z = 3.0 m (grondwaterstand 1.5 m)

$$\sigma_{v0} = 17(1.5) + 18(1.5) = 52.50\ \text{kPa}$$

$$u_0 = 9.81(3.0 - 1.5) = 14.715\ \text{kPa} \qquad \sigma'_{v0} = 52.50 - 14.715 = \mathbf{37.785}\ \text{kPa}$$

z (m)	σ_{v0} (kPa)	u_0 (kPa)	σ'_{v0} (kPa)
1.5	25.50	0.00	**25.50**
3.0	52.50	14.71	**37.78**
4.5	79.50	29.43	**50.07**
6.0	106.50	44.15	**62.35**

Onder de grondwaterstand neemt σ'_{v0} **langzamer** toe (helling $\gamma' = 8.19$ kN/m³): op z = 6 m is de totale spanning 106.5 en de effectieve spanning slechts 62.4 kPa.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

$\sigma'_p = OCR \cdot \sigma'_{v0}$ of de laboratoriumwaarde

THEORIE

Voor elk model wordt **één definitie** gebruikt: ofwel de overconsolidatiegraad OCR, ofwel de laboratoriumwaarde σ'_p:

$$\sigma'_p = OCR \cdot \sigma'_{v0} \qquad \text{of} \qquad \sigma'_p = \sigma'_{p,lab} \ (\geq \sigma'_{v0})$$

OCR = 1: normaal geconsolideerde klei; $\sigma'_p = \sigma'_{v0}$ en elke belasting voorbij de beginspanning is maagdelijke samendrukking.

Als de laboratoriumwaarde σ'_p lager is dan σ'_{v0}, wordt deze met een waarschuwing verhoogd tot σ'_{v0}: **licht overgeconsolideerde klei valt buiten het toepassingsgebied**.

σ'_p geeft de grootste spanning uit het verleden weer en daalt niet door ontgraving.

WAT ZEGT OCR ONS?

OCR = σ'_p/σ'_{v0}. Een grote OCR betekent een breed herbelastingsgebied waarin de klei onder belasting eerst met een **kleine C_r** wordt samengedrukt.

Opgave

VOORBEELD

Gegeven

Lamel	**middelpunt** $z = 3\ \mathrm{m}$**:** $\sigma'_{v0} = 24.57\ \mathrm{kPa}$ **(grondwaterstand aan maaiveld,** $\gamma_{sat} = 18$**)**
Gevallen	**(a)** $OCR = 3$ **· (b) laboratorium** $\sigma'_p = 60\ \mathrm{kPa}$ **· (c) laboratorium** $\sigma'_p = 20\ \mathrm{kPa}$

GEVRAAGD

In elk geval **σ′p** en **OCR**; interpreteer de toestand.

Oplossing

OPLOSSING

1 (a) OCR gegeven en (b) laboratoriumwaarde

$$(\text{a}):\ \sigma'_p = 3(24.57) = \mathbf{73.71}\ \text{kPa} \qquad (\text{b}):\ OCR = \frac{60}{24.57} = \mathbf{2.44}$$

2 (c) laboratoriumwaarde onder σ′v0

$$\sigma'_{p,lab} = 20 < \sigma'_{v0} \ \Rightarrow\ \sigma'_p = \mathbf{24.57}\ \text{kPa},\ OCR = 1$$

(a) en (b) overgeconsolideerde klei (σ′p > σ′v0); voor (c) geeft de module een waarschuwing en beschouwt zij de klei als **normaal geconsolideerd** (σ′p = σ′v0 = 24.57 kPa): licht overgeconsolideerde klei valt buiten het toepassingsgebied.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Ontlasting en opbolling

THEORIE

De weggenomen belasting is de **aanvankelijke effectieve verticale grondspanning** ter hoogte van de ontgravingsbodem (grondwaterstand ongewijzigd; onder water wordt het weggenomen gewicht met γ′ berekend). De ontlasting spreidt zich met de Boussinesq-invloed van het ontgravingsvlak, I_{exc} (I_{exc} = 1 bij een brede ontgraving):

$$q_{lift} = \sigma'_{v0}(D_{exc}) \qquad \Delta\sigma_{exc} = -q_{lift}\, I_{exc}(z') \qquad \sigma'_{exc} = \sigma'_{v0} + \Delta\sigma_{exc}$$

$$\Delta H_{heave} = -\frac{C_s\,\Delta H}{1+e_0}\,\log_{10}\frac{\sigma'_{v0}}{\sigma'_{exc}}$$

Zwelling is **negatief** (zetting +, zwelling –). Als C_s niet is gegeven, wordt $C_s = C_r$ aangehouden en in het rapport vermeld.

De netto druk $q_{net} = q_{bruto} - q_{opwaarts}$ wordt alleen gerapporteerd; de berekening wordt niet in één stap met de netto druk uitgevoerd, maar de spanningsweg wordt gevolgd.

NEDEN KABARMA?

Ontgraving verlaagt de effectieve spanning en de klei zwelt. Wanneer de constructie opnieuw wordt belast, wordt de zwelling teruggewonnen: dit is de **herbelasting van de gezwollen grond**.

Δσ onder het midden van de fundering

THEORIE

$$\Delta\sigma_{load} = q_{gross}\, I_z(z') \qquad z' = z - D_f$$

Rechthoekig B × L, onder het middelpunt: met de hoekcoëfficiënt van Newmark $I_z = 4 \cdot I_{hoek}$(m = B/2z′, n = L/2z′):

$$I_{köşe} = \frac{1}{4\pi}\left[\frac{2mn\sqrt{V}}{V + m^2n^2}\cdot\frac{V+1}{V} + \tan^{-1}\frac{2mn\sqrt{V}}{V - m^2n^2}\right] \qquad V = m^2 + n^2 + 1$$

(Als $V < m^2n^2$, wordt de arctangens-term met π verhoogd). **Strook** (breedte B), onder de middellijn: $I_z = (\alpha + \sin\alpha)/\pi$, $\alpha = 2\tan^{-1}(B/2z')$. Bij $z' = 0$ is $I_z = 1$.

$$\sigma'_{final} = \sigma'_{exc} + \Delta\sigma_{load}$$

OPMERKING

De spanningstoename wordt genomen langs de verticale door het midden van de fundering (lamellen en tijdsanalyse); in de gekleurde bandgebieden wordt zij voor punten buiten de fundering opgedeeld in hoekrechthoeken.

Opgave

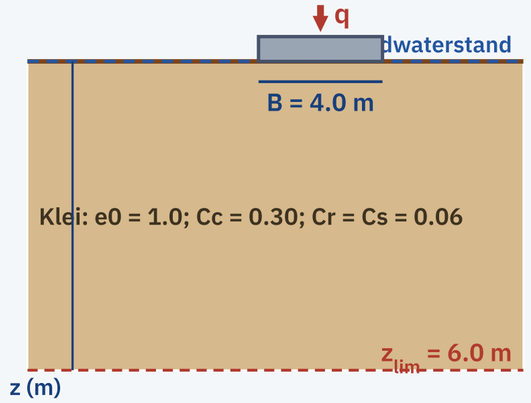
VOORBEELD

Gegeven

Fundering	**Rechthoek 4 × 6 m, $q = 150\ \mathrm{kPa}$, aan het maaiveld ($D_f = 0$)**
Punt	**middelpunt van de lamel z′ = 3 m, onder het centrum**
Vergelijking	**Strook met breedte B = 4 m**

GEVRAAGD

I_z en **Δσ**; dezelfde waarden gelden voor de strook.



Oplossing (1/2)

OPLOSSING

1 Rechthoek: m = B/2z′ = 2/3 = 0.667; n = L/2z′ = 1.0

$$V = m^2 + n^2 + 1 = 2.4444, \quad m^2 n^2 = 0.4444, \quad \sqrt{V} = 1.5635$$

$$T_1 = \frac{2mn\sqrt{V}}{V + m^2 n^2} \cdot \frac{V+1}{V} = \frac{2.0846}{2.8889} \cdot \frac{3.4444}{2.4444} = 1.0168$$

$$T_2 = \tan^{-1} \frac{2.0846}{2.0000} = 0.8061 \qquad I_{köşe} = \frac{T_1 + T_2}{4\pi} = 0.1451$$

2 Rechthoekig en strook

$$\text{rechthoekig} : I;_z = 4(0.1451) = \mathbf{0.5803} \;\Rightarrow\; \Delta\sigma = 150(0.5803) = \mathbf{87.04}\ \text{kPa}$$

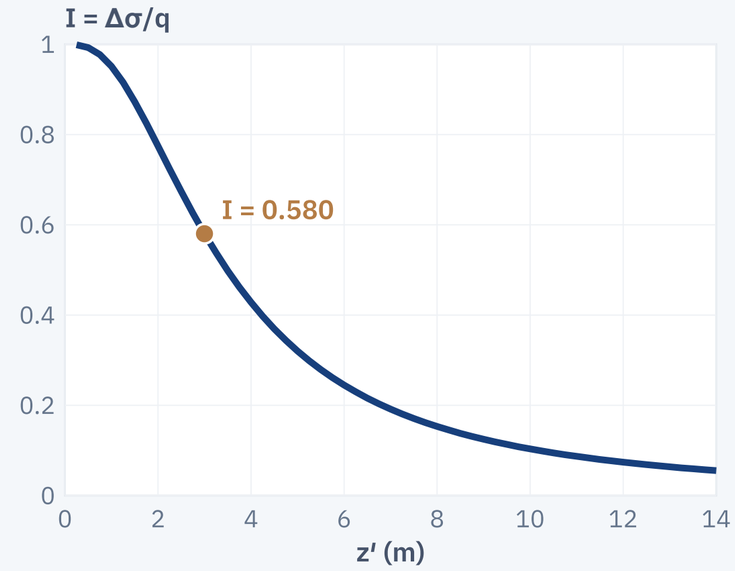
$$\text{strook} : \alpha = 2\tan^{-1}\tfrac{4}{6} = 1.1760 \;\Rightarrow\; I_z = \frac{1.1760 + 0.9231}{\pi} = 0.6682$$

$$\Delta\sigma = 150(0.6682) = \mathbf{100.22}\ \text{kPa}$$

Oplossing (2/2)

OPLOSSING

z′ (m)	I_z	Δσ (kPa)
0.5	0.9927	148.9
1.0	0.9513	142.7
2.0	0.7746	116.2
3.0	0.5803	87.0
4.0	0.4283	64.2
6.0	0.2449	36.7
8.0	0.1532	23.0
10.0	0.1034	15.5



In het midden van de lamel is Δσ = **87.0 kPa** (58% van q); een smalle strook (zelfde B) geeft 100.2 kPa: **een lange fundering grijpt dieper in**. De spanningstoename bedraagt zelfs op z′ = 10 m nog 10%.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Invloedsdiepte: I(z′) = p

THEORIE

De spanningstoename neemt af met de diepte maar wordt nooit nul; de som van de lamelverdichtingen vereist een ondergrens: de **berekeningsdiepte z_{lim}**. Bij de regel van de invloedsdiepte consolideert klei tot de Boussinesq-toename onder het midden daalt tot **p** maal de aangebrachte druk (gebruikelijk p = 10%):

$$I_z(z') = p \;\Rightarrow\; z_{lim} = D_f + z'$$

Dezelfde invloedsfactor bepaalt ook de ontlasting van een bouwput met dezelfde plattegrond; daarom is de diepte dezelfde of die nu wordt afgelezen op basis van q_{bruto} of q_{netto}.

Als het profiel boven z_{lim} eindigt, loopt de laatste laag met dezelfde eigenschappen door tot z_{lim}; eindigt het eronder, dan is de grond onder z_{lim} onsamendrukbaar.

De alternatieve regel is de **basis van het profiel**: er wordt een stijve basis verondersteld. (Het criterium $\Delta\sigma = 0.2\ \sigma'_{v0}$ reikt dieper voor een kleine fundering op diepte; de regel van de module is alleen afhankelijk van de geometrie.)

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

Funderingen	**(a) 4 × 6 m, p = 10% en 20% · (b) plaatfundering 20 × 30 m, p = 10% en 20%**
Regel	**invloedsdiepte; $D_f = 0$**

GEVRAAGD

In elk geval **z'** en **z_{lim}**; toets van I(z′) voor 4 × 6 m.

Oplossing

OPLOSSING

1 Toets: 4 × 6 m, p = 10% ⇒ z′ = 10.19 m

$$m = \frac{2}{10.19} = 0.1963,\ n = \frac{3}{10.19} = 0.2945 \ \Rightarrow\ I_z = 4(0.0250) = \mathbf{0.1000}$$

Fundering	p = %10: z′ (m)	p = %20: z′ (m)
4 × 6 m (L/B = 1.5)	10.19 (2.55 B)	6.82 (1.70 B)
20 × 30 m plaatfundering	50.9 (2.55 B)	34.1 (1.70 B)

z′ is **evenredig met de afmeting van de fundering**: bij een fundering van 4 × 6 m is z_{lim} = 10.19 m, bij een plaatfundering van 20 × 30 m **50.9 m**. De plaatfundering houdt rekening met de klei die tot ongeveer 51 m diepte samendrukt.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Lamelsamendrukking bij herbelasting

THEORIE

f = ΔH/(1 + e_0) voor de lamel; met $\sigma'_{exc} \le \sigma'_{v0} \le \sigma'_p$ volgt de samendrukking van de lamel afhankelijk van de positie van de eindspanning:

Voorwaarde	Lamelsamendrukking bij herbelasting
$\sigma'_{exc} \le \sigma'_{son} \le \sigma'_{v0}$	$S_b = C_s\, f \log(\sigma'_{eind}/\sigma'_{exc})$: een deel van de opbolling wordt teruggewonnen
$\sigma'_{v0} < \sigma'_{eind} \le \sigma'_p$	$S_b = C_s\, f \log(\sigma'_{v0}/\sigma'_{exc}) + S_r = C_r\, f \log(\sigma'_{eind}/\sigma'_{v0})$
$\sigma'_{v0} < \sigma'_p < \sigma'_{eind}$	$S_b + S_r = C_r\, f \log(\sigma'_p/\sigma'_{v0}) + S_v = C_c\, f \log(\sigma'_{son}/\sigma'_p)$
$\sigma'_p = \sigma'_{v0} < \sigma'_{eind}$ (NC)	$S_b + S_v = C_c\, f \log(\sigma'_{eind}/\sigma'_{v0})$
$\sigma'_{eind} < \sigma'_{exc}$	Extra zwelling met C_s (negatief)

ALS ER NIET WORDT ONTEGRAVEN

$\sigma'_{exc} = \sigma'_{v0}$ en $S_b = 0$: klassieke herbelasting en maagdelijke samendrukking, vanaf de beginspanning.

$$S_c = \sum (S_b + S_r + S_v) \qquad S_{net} = S_c + S_{heave}$$

Opgave

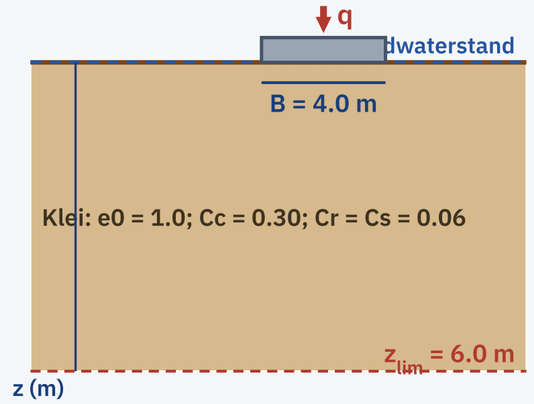
VOORBEELD

Gegeven

Grond	**één kleilaag, 6 m dikte; $\gamma_{sat} = 18\ \mathrm{kN/m^3}$; grondwaterstand aan het maaiveld; $e_0 = 1.0,\ C_c = 0.30,\ C_r = C_s = 0.06$**
Fundering	**Rechthoek van 4 × 6 m, $q = 150\ \mathrm{kPa}$, aan het maaiveld (geen ontgraving)**
Lamel	**enkele lamel, H = 6 m, middelpunt $z = 3\ \mathrm{m}$:** $\sigma'_{v0} = 8.19\,z = 24.57\ \mathrm{kPa}$
Overconsolidatie	**(a) OCR = 1 (NC) · (b) OCR = 6 · (c) OCR = 3**
Spanningstoename	$\Delta\sigma = 150\,I_z(3) = 87.04\ \mathrm{kPa}$ **(Voorbeeld 3)** $\Rightarrow \sigma'_{final} = 111.61\ \mathrm{kPa}$

GEVRAAGD

Het **regime** en de consolidatiezetting **S_c** voor elke kleilaag.



Oplossing (1/2)

OPLOSSING

1 Gemeenschappelijk: f = H/(1 + e_0) = 6/2 = 3 m; log($\sigma'_{eind}/\sigma'_{v0}$) = log(111.61/24.57) = 0.6573

$$\text{(a) NC}: \quad S_v = C_c f \log \frac{\sigma'_{final}}{\sigma'_{v0}} = 0.30(3)(0.6573) = \mathbf{591.6\ mm}$$

2 (b) OCR = 6: σ'_p = 6(24.57) = 147.4 kPa > σ'_{eind} ⇒ alleen herbelasting

$$S_r = C_r f \log \frac{\sigma'_{final}}{\sigma'_{v0}} = 0.06(3)(0.6573) = \mathbf{118.3\ mm}$$

Dezelfde klei, dezelfde belasting: de normaal geconsolideerde klei zakt **591.6 mm**, die met OCR = 6 zakt **118.3 mm**; het verschil komt uit de verhouding C_c/C_r = 5.

Oplossing (2/2)

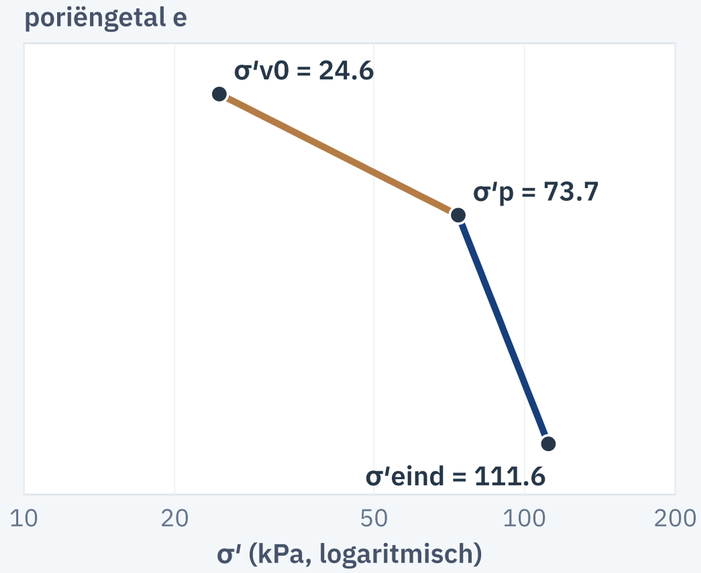
OPLOSSING

3 (c) OCR = 3: $\sigma'_p = 3(24.57) = 73.71$ kPa < $\sigma'_{eind} = 111.61$ ⇒ herbelasting + maagdelijke samendrukking

$$S_r = 0.06(3)\log\frac{73.71}{24.57} = 85.9\ \text{mm}$$

$$S_v = 0.30(3)\log\frac{111.61}{73.71} = 162.2\ \text{mm} \qquad S_c = \mathbf{248.0\ mm}$$

OCR	σ'_p (kPa)	regime	S_r (mm)	S_v (mm)	S_c (mm)
1	24.6	intact	0	591.6	**591.6**
6	147.4	herbelasting	118.3	0	**118.3**
3	73.7	herbelasting + maagdelijke belasting	85.9	162.2	**248.0**



Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Vanuit de oorspronkelijke grond of vanuit de opgebolde bodem?

THEORIE

Na de ontgraving volgt de fundering: de zetting hangt af van **welk referentievlak** voor de verplaatsingen wordt gebruikt (de keuze *verplaatsingen na ontgraving* in de bouwfase van de ontgraving):

Behouden — vanaf de oorspronkelijke grond (standaard): de opbolling wordt afzonderlijk weergegeven; de zetting van de fundering is de netto vervorming aan het einde van de belasting: $\mathbf{S = S_c + S_{opbolling}}$ = de totale samendrukking voorbij σ'_{v0}. Een belasting die niet groter is dan de verwijderde deklaag geeft S = 0; is die kleiner, dan blijft de grond boven het oorspronkelijke niveau (wordt gerapporteerd, zetting 0).

Vóór het belasten op nul gezet: de verplaatsingen van de ontgravingsfase worden op nul gezet; de zetting wordt gemeten vanaf de opgebolde ontgravingsbodem: $\mathbf{S = S_c = S_b + S_r + S_v}$. De herbelasting van de bodemopbolling geldt als zetting: een volledig gecompenseerde fundering zakt evenveel als de bodem is opgebold. Als de ontgraving open bleef tot het bouwwerk werd opgetrokken en de bodemopbolling zich heeft ontwikkeld, is dit het juiste antwoord.

Beide grootheden worden altijd afgedrukt; de keuze bepaalt welke als de zetting van de fundering wordt gerapporteerd, de tijdcurve en het resultaat.

SAMENVATTING

Behouden: $S = S_c + S_{opbolling}$ (klein). Op nul gesteld: $S = S_c$ (groot).

Opgave

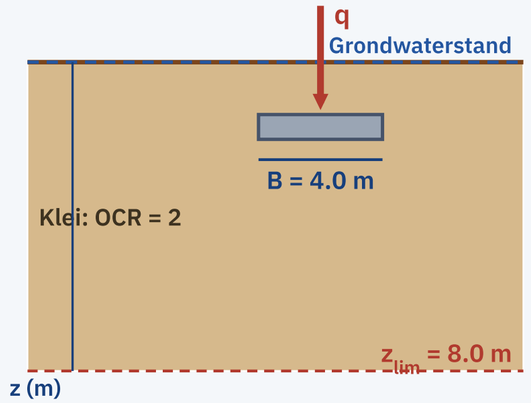
VOORBEELD

Gegeven

Grond	**klei 0–8 m, $\gamma_{sat} = 18$, grondwaterstand aan het maaiveld; $e_0 = 1.0,\ C_c = 0.30,\ C_r = C_s = 0.06$; $OCR = 2$**
Ontgraving	**brede ontgraving (I_{exc} = 1), diepte 2 m; op de bodem van de funderingsontgraving**
Fundering	**4 × 6 m, $q_{gross} = 100\ \mathrm{kPa}$**
Lamel	**enkele lamel 2–8 m, $H = 6$ m, $z = 5$ m, $f = 3$ m: $\sigma'_{v0} = 8.19(5) = 40.95\ \mathrm{kPa}$**

GEVRAAGD

σ'_{exc}, opbolling, S_b, S_r, S_v, S_c; de zetting van de fundering (vanuit de oorspronkelijke grond en na het op nul zetten).



Oplossing (1/3)

OPLOSSING

1 Ontgraving: verwijderde belasting, ontlasting en bodemopbolling

$$q_{lift} = \sigma'_{v0}(2) = 8.19(2) = 16.38 \text{ kPa} \qquad \sigma'_{exc} = 40.95 - 16.38 = \mathbf{24.57} \text{ kPa}$$

$$\Delta H_{heave} = -0.06(3)\log\frac{40.95}{24.57} = -0.06(3)(0.2218) = -\mathbf{39.9 \text{ mm}}$$

2 Belasting: $I_z(z' = 3) = 0.5803$ (Voorbeeld 3); $\sigma'_p = 2(40.95) = 81.9$ kPa

$$\Delta\sigma = 100(0.5803) = 58.03 \text{ kPa} \quad \sigma'_{final} = 24.57 + 58.03 = \mathbf{82.60} \text{ kPa}$$

Oplossing (2/3)

OPLOSSING

3 Regime: $\sigma'_{v0} < \sigma'_p = 81.9 < \sigma'_{eind} = 82.60$

$$S_b = 0.06(3)\log\frac{40.95}{24.57} = 39.9\ \text{mm} \qquad S_r = 0.06(3)\log\frac{81.9}{40.95} = 54.2\ \text{mm}$$

$$S_v = 0.30(3)\log\frac{82.60}{81.9} = 3.3\ \text{mm} \qquad S_c = \mathbf{97.4\ mm}$$

Bij herbelasting wordt eerst de zwelling teruggewonnen (S_b = 39.9 mm = de volledige zwelling), daarna volgt 54.2 mm hercompressie met C_r en 3.3 mm maagdelijke compressie die σ'_p licht overschrijdt.

Oplossing (3/3)

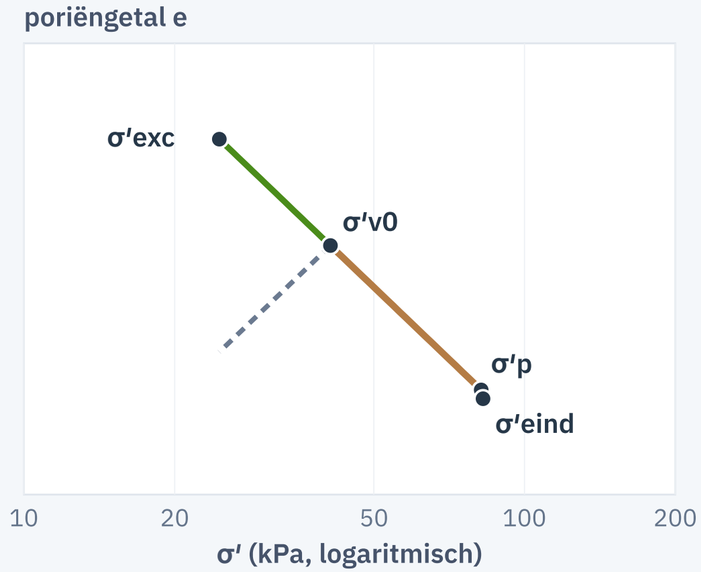
OPLOSSING

4 Zetting van de fundering

$$\text{blijft behouden}: \quad S = S_c + S_{heave} = 97.4 - 39.9 = \mathbf{57.5\ mm}$$

$$\text{wordt nul}: \quad S = S_c = \mathbf{97.4\ mm}$$

De zetting gemeten vanaf het oorspronkelijke maaiveld is **57.5 mm**; gemeten vanaf het opgebolde maaiveld **97.4 mm**. Het verschil is gelijk aan de opbolling (39.9 mm): de keuze van het referentievlak verandert het resultaat met 69%.



Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Lineair verloop: $\Delta H = m_v \, \Delta\sigma' \, H$

THEORIE

Het is een afzonderlijke en **lineaire** berekeningswijze: dezelfde m_v wordt zowel bij ontlasten als bij herbelasten gebruikt; C_c, C_r, C_s en e_0 spelen geen rol:

$$\Delta H = m_v \, \Delta\sigma' \, H_{slice}$$

$$\text{opbolling} = -m_v \left(\sigma'_{v0} - \sigma'_{exc}\right) H \qquad S_c = m_v \left(\sigma'_{final} - \sigma'_{exc}\right) H$$

Het deel van S_c tot σ'_{v0} is de herwonnen zwelling (S_b).

Omdat de relatie lineair is, sluit de lus zich vanzelf.

De eenheid van m_v is 1/kPa (coëfficiënt van volumieke samendrukbaarheid); deze moet worden gekozen op basis van het spanningsbereik.

VERSCHIL MET e – log σ′

De m_v-methode houdt geen rekening met het spanningsniveau (geen σ'_p): elke spanningstoename geeft dezelfde samendrukking.

Opgave

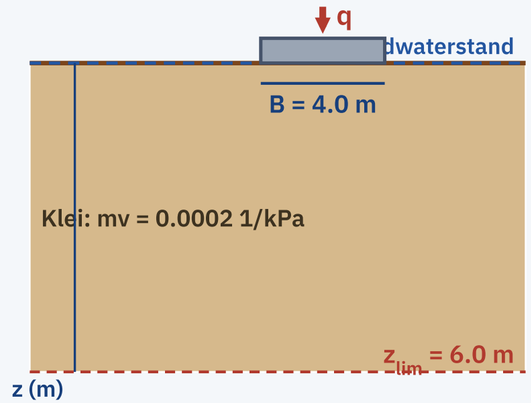
VOORBEELD

Gegeven

Grond	**6 m klei, $m_v = 0.0002\ 1/\mathrm{kPa}$, grondwaterstand aan het maaiveld**
Situatie (a)	**zonder stempel: 4×6 m, $q = 150$ kPa, $\Delta\sigma = 87.04$ kPa (voorbeeld 3)**
Situatie (b)	**De ontgraving en fundering uit Voorbeeld 6 (2 m ontgraving, $q = 100$ kPa, lamel 2–8 m)**

GEVRAAGD

S_c in elk geval; voor (b) de opbolling, S_b en de netto zetting.



Oplossing

OPLOSSING

1 (a) Zonder ontgraving

$$S_c = m_v\,\Delta\sigma'\,H = 0.0002(87.04)(6) = \mathbf{104.4\ mm}$$

2 (b) Ontgraven: σ'_{v0} = 40.95; σ'_{exc} = 24.57; $\Delta\sigma_{belasting}$ = 58.03; σ'_{eind} = 82.60 kPa

$$\text{opbolling} = -0.0002(40.95 - 24.57)(6) = -19.7\ \text{mm} = -S_b$$

$$S_r = 0.0002(82.60 - 40.95)(6) = 50.0\ \text{mm} \qquad S_c = S_b + S_r = \mathbf{69.6\ mm}$$

Netto zetting (ten opzichte van de oorspronkelijke grond) S = S_c + zwelling = **50.0 mm**; alleen de toename van 41.65 kPa die σ'_{v0} overschrijdt, veroorzaakt zetting. In de lineaire route heeft de e – log σ′-methode geen σ'_p-effect.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Terzaghi: T_v, U en t

THEORIE

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

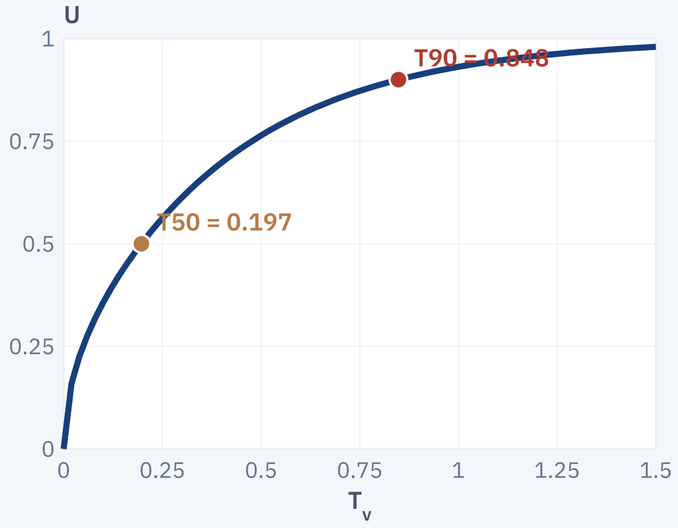
$$S_i(t) = U_i(t)\, S_{c,i} \qquad S(t) = \sum S_i(t) \qquad t = \frac{T_v\, H_{dr}^2}{C_v}$$

H_{dr} = H (eenzijdige drainage) of H/2 (tweezijdige); H is de laagdikte onder het funderingsniveau (tot z_{lim} voor de laatste laag die buiten het profiel doorloopt).

$T_{v,50}$ = 0.197; $T_{v,90}$ = 0.848. Voor T_v < 0.05 wordt de vroegtijdige oplossing $U = 2\sqrt{(T_v/\pi)}$ gebruikt.

Lagen met verschillende waarden van C_v en H_{dr} consolideren met verschillende snelheid: de curve van het profiel is de **som van de laagcurves**; de eigen t_{50} en t_{90} worden uit deze som afgelezen.

De kromme hoort bij de belastingszetting S_c; er wordt aangenomen dat de zwelling vóór de belasting is voltooid.



Opgave

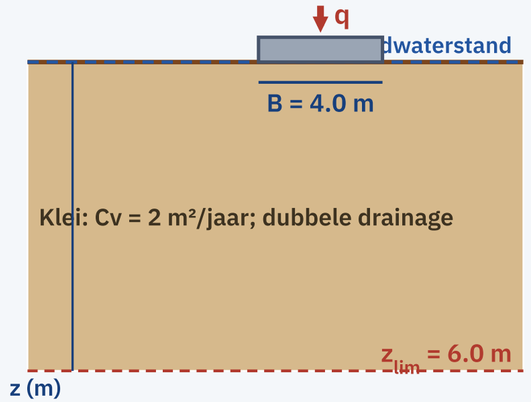
VOORBEELD

Gegeven

Klei	**6 m, normaal geconsolideerd (Voorbeeld 5a): $S_c = 591.6$ mm**
Consolidatie	**$C_v = 2\ \mathrm{m}^2/\mathrm{jaar}$; drainage boven en onder (tweezijdig)**
Tijden	**t = 0.25; 0.5; 1; 2; 4; 8 jaar**

GEVRAAGD

H_{dr}, t_{50}, t_{90} en S(t); t_{90} bij eenzijdige drainage.



Oplossing (1/2)

OPLOSSING

1 Drainageweg en karakteristieke tijden

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

2 Eenzijdige drainage (H_{dr} = 6 m)

$$t_{90} = \frac{0.848(6^2)}{2} = \mathbf{15.3}\ \text{jaar}$$

Bij dubbele drainage halveert de drainageweg en daalt de tijd tot **een kwart**: t_{90} = 3.82 jaar, tegen 15.3 jaar bij enkele drainage.

Oplossing (2/2)

OPLOSSING

t (jaar)	$T_v = C_v t/H_{dr}^2$	U	$S(t) = U\,S_c$ (mm)
0.25	0.056	0.266	**157**
0.50	0.111	0.376	**222**
1.00	0.222	0.531	**314**
2.00	0.444	0.729	**431**
4.00	0.889	0.910	**538**
8.00	1.778	0.990	**586**

In 1 jaar is slechts 53% van de zetting voltooid, in 4 jaar 91% (S_c = 592 mm); in 8 jaar is U = 0.990. Bij kleine T_v-waarden (< 0.05) wordt $U = 2\sqrt{(T_v/\pi)}$ gebruikt.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Opgave

VOORBEELD

Gegeven

Fundering	**4 × 6 m, q = 150 kPa, op het maaiveld; grondwaterstand aan het maaiveld (γ_{sat} = 18)**
Laag A (0–4 m)	**zacht, NC: $e_0 = 1.10,\ C_c = 0.35,\ C_r = 0.07$; $C_v = 1$; dubbele drainage**
Laag B (4–8 m)	**stijf, $OCR = 2$: $e_0 = 0.80,\ C_c = 0.20,\ C_r = 0.04$; $C_v = 3$; eenzijdige drainage**
Berekening	**basis van het profiel (8 m); elke laag als één lamel (A: z = 2 m, B: z = 6 m)**

GEVRAAGD

De **S_c**-waarde, t_{50} en t_{90} van elke laag; de S(t)-kromme van het systeem.

Oplossing (1/3)

OPLOSSING

1 A: z = 2 m, σ'_{v0} = 16.38; $I_z(2)$ = 0.7746 ⇒ Δσ = 116.19; σ'_{eind} = 132.57; f = 4/2.10 = 1.9048 m; NC

$$S_{c,A} = C_c f \log \frac{\sigma'_{final}}{\sigma'_{v0}} = 0.35(1.9048) \log \frac{132.57}{16.38} = \mathbf{605.4\ mm}$$

2 B: z = 6 m, σ'_{v0} = 49.14; σ'_p = 98.28; $I_z(6)$ = 0.2449 ⇒ Δσ = 36.74; σ'_{eind} = 85.88 < σ'_p; f = 4/1.80 = 2.2222 m

$$S_{c,B} = C_r f \log \frac{\sigma'_{final}}{\sigma'_{v0}} = 0.04(2.2222) \log \frac{85.88}{49.14} = \mathbf{21.6\ mm}$$

Totale consolidatiezetting **627.0 mm**: de zachte NC bovenlaag draagt 97% van het totaal; de stijve, overgeconsolideerde onderlaag slechts 21.6 mm.

Oplossing (2/3)

OPLOSSING

3 Drainageweg en tijdsduren ($t = 0.197\ H_{dr}^2/C_v$; $0.848\ H_{dr}^2/C_v$)

$$A:\ H_{dr} = 2\ \text{m}:\ t_{50} = \frac{0.197(4)}{1} = 0.788,\ t_{90} = \frac{0.848(4)}{1} = 3.39\ \text{jaar}$$

$$B:\ H_{dr} = 4\ \text{m}:\ t_{50} = \frac{0.197(16)}{3} = 1.051,\ t_{90} = \frac{0.848(16)}{3} = 4.52\ \text{jaar}$$

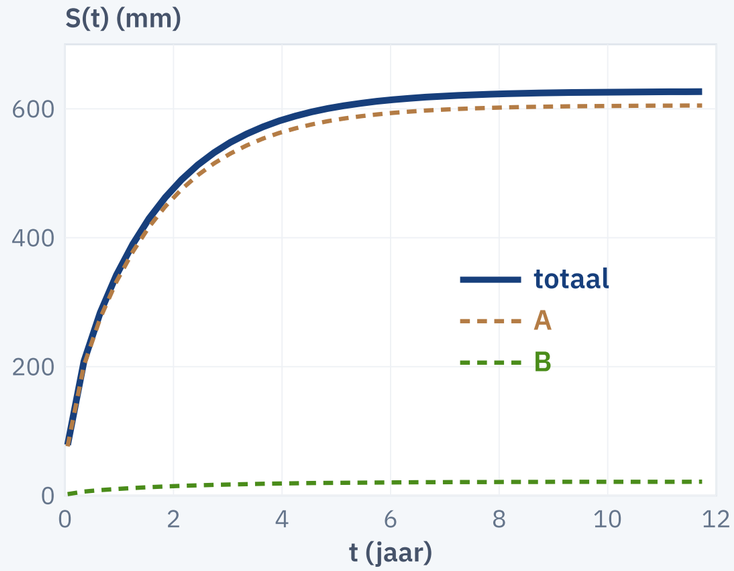
De kromme van het systeem is de som $S(t) = U_A(t)\ S_A + U_B(t)\ S_B$; de eigen tijden worden uit deze som afgelezen: **t_{50} = 0.794 jaar, t_{90} = 3.43 jaar** (dicht bij de dominante laag A).

Oplossing (3/3)

OPLOSSING

t (jaar)	S_A (mm)	S_B (mm)	S(t) (mm)	U
0.5	242	7.4	**249**	0.397
1.0	340	10.5	**351**	0.560
2.0	463	14.6	**477**	0.761
5.0	583	19.8	**603**	0.961
10.0	604	21.4	**626**	0.998
20.0	605	21.6	**627**	1.000

Na 1 jaar is 56% van de zetting voltooid, na 5 jaar 96%; na ongeveer 10 jaar is de zetting voltooid (627 mm). De curve wordt bepaald door de **zachte laag A**.



Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Aandachtspunten bij het lezen van de resultaten

THEORIE

Funderingsniveau = ontgravingsbodem (maaiveld indien geen ontgraving); **hydrostatische** poriënwaterspanning; de grondwaterstand wordt door de ontgraving niet beïnvloed.

De spanningstoename wordt **op de verticaal onder het midden van de fundering** bepaald (lamellen en tijdsanalyse); de kleurzones volgen op elk punt hetzelfde spanningspad.

e_0 is het beginporiëngetal in elke fase; **er is geen secundaire samendrukking (C_α)**.

Zetting is positief, opbolling negatief; de schakelaar in de kop keert dit om en schakelt over naar een opwaarts positieve weergave (de rekenkern blijft klassiek).

Kleurbanden: zones die snel afnemen met de diepte, zoals zetting, zwelling en vervorming, worden gekleurd met de klassen $1 \cdot 1.5 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 7 \times 10^n$; gelijke banden zouden de onderste zone tot één kleur samendrukken.

Samenvatting

Belangrijkste punten

Spanningstraject: $\sigma'_{v0} \rightarrow \sigma'_{exc} \rightarrow \sigma'_{v0}$ (C_s) $\rightarrow \sigma'_p$ (C_r) $\rightarrow \sigma'_{eind}$ (C_c); $\sigma'_p = OCR \cdot \sigma'_{v0}$, neemt niet af door ontgraving

Samendrukking van de lamel $f = \Delta H/(1 + e_0)$: NC: C_c f $\log(\sigma'_{eind}/\sigma'_{v0})$; OC en $\sigma'_{eind} \leq \sigma'_p$: C_r f log(…); $\sigma'_{eind} > \sigma'_p$: delen $C_r + C_c$

Ontgraving: $q_{ontlast} = \sigma'_{v0}(D_{exc})$, opbolling = $-C_s$ f $\log(\sigma'_{v0}/\sigma'_{exc})$; $S = S_c + S_{opbolling}$ (oorspronkelijke grond) of S_c (op nul gesteld)

Boussinesq: $\Delta\sigma = q\ I_z(z')$; rechthoek middelpunt 4 I_{hoek}, strook $(\alpha + \sin\alpha)/\pi$; $\mathbf{z_{lim}}$: $I(z') = p$ (vierkant 2.09 B, L = 1.5 B 2.55 B, strook 6.34 B)

m_v-methode: $\Delta H = m_v\ \Delta\sigma'\ H$, lineair; opbolling = $-m_v(\sigma'_{v0} - \sigma'_{exc})\ H$

Tijd: $T_v = C_v\ t/H_{dr}^2$; $T_{v,50} = 0.197$, $T_{v,90} = 0.848$; $H_{dr} = H$ (enkelzijdig) of H/2 (dubbelzijdig); $S(t) = \Sigma\ U_i\ S_{c,i}$

Literatuur

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

Newmark, N.M. (1935). Simplified computation of vertical pressures in elastic foundations. Univ. of Illinois Bulletin 429.

Das, B.M. (2016). Principles of Geotechnical Engineering, 9th ed. Cengage.

Holtz, R.D., Kovacs, W.D., Sheahan, T.C. (2011). An Introduction to Geotechnical Engineering, 2nd ed. Pearson.

Craig, R.F., Knappett, J.A. (2012). Craig’s Soil Mechanics, 8th ed. Spon.

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

Bereken de voorbeelden in deze presentatie stap voor stap in GeoTerva; in de module worden het aantal lagen en de ontgraving vrij ingevoerd.

Module openen →

Theoriepagina →

Openen op de smartphone

Proefmodules vereisen geen registratie.

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