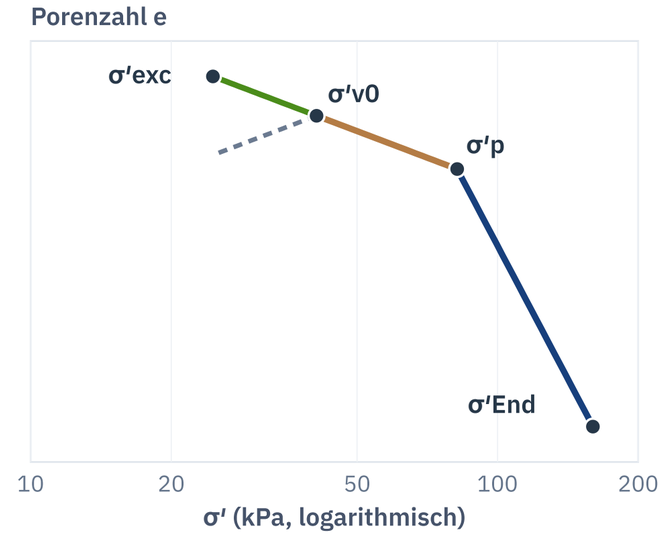
GeoTerva

Geotechnische Vorlesungspräsentation · Setzungen

Konsolidationssetzung

Vorlesung: eindimensionale Konsolidationssetzung einer Tonschicht; Spannungspfad, Vorbelastung, Baugrube und Hebung, Boussinesq-Spannungen, das m_V-Verfahren und die Zeit; Rechenbeispiele zu jedem Thema.

Spannungspfad | $C_c \cdot C_r \cdot C_s$ | Aushub und Hebung | Boussinesq | m_V-Verfahren | zeitabhängige Setzung



Was lernen wir in dieser Vorlesung?

- Den **Spannungspfad** des Tons verfolgen: $\sigma'_{v0} \rightarrow \sigma'_{exc} \rightarrow \sigma'_{v0} \rightarrow \sigma'_{p} \rightarrow \sigma'_{son}$ (C_s, C_r, C_c)
- Die Ausgangsspannungen (σ_{v0}, u_0, σ'_{v0}) und die **Vorbelastungsspannung** ($\sigma'_p = OCR \cdot \sigma'_{v0}$) zu bestimmen
- Den Entlastungs- und Schwellungseffekt **des Aushubs** und **von welcher Bezugslinie** aus die Setzung gemessen wird, zu unterscheiden
- Die **Boussinesq**-Spannungszunahme und die **Einflusstiefe** zu berechnen
- Die **vier Regime** der Lamellenkompression (Wiederbelastung, Erstbelastung) anzuwenden; der Vergleich mit dem **m_v**-Verfahren
- **Zeitabhängige** Konsolidation (T_v, U, t_{50}, t_{90}) und das Zeichnen der Setzung–Zeit-Kurve des geschichteten Profils

VORLESUNGSABLAUF

Jedes Thema wird in **drei Schritten** behandelt:

1 · **Theorie**: Wie lautet die Regel, warum ist sie so?

2 · **Aufgabe**: Gegeben und Gesucht

3 · **Lösung**: Schritt für Schritt, mit Zahlen

Beispielbaugrund: 6 m mächtiger Ton, Grundwasserspiegel an der Geländeoberkante ($\sigma'_{v0} = 8.19\ z$), $e_0 = 1.0$, $C_c = 0.30$, $C_r = 0.06$; Fundament 4 × 6 m, q = 150 kPa. Die Setzungen sind in mm angegeben.

Was berechnet dieses Modul?

THEORIE

Jede Schicht im Profil ist Ton; ein anderer Boden kann nicht eingegeben werden. Das Modul berechnet die **Primärkonsolidation** des Tons: Bei Lastaufbringung wird das Wasser langsam ausgetrieben, und der Ton konsolidiert entlang des Spannungspfads.

Die Sofortsetzung (elastische Setzung) ist in den Modulen Elastische Setzung enthalten; die Summe der beiden ist im Modul Gesamtsetzung (2D) enthalten.

Die Lösung ist **analytisch**: Spannungszuwachs nach Boussinesq, Spannungspfad Lamelle für Lamelle und Theorie nach Terzaghi; hydrostatischer Porenwasserdruck; es wird keine Finite-Elemente-Methode verwendet.

Nicht im Umfang enthalten: nichtbindige Schichten, Sekundärsetzung (C_α), SPT/CPT-Setzung von Sanden, Setzung im Fels, 2D/3D-Konsolidation, Grundbruch, Bodenverflüssigung.

VORZEICHENKONVENTION

Die Setzung ist **positiv**, die Hebung **negativ**. Nettoverformung $S_{net} = S_c + S_{Hebung}$.

Nicht in einem einzigen Schritt von der Anfangs- zur Endspannung

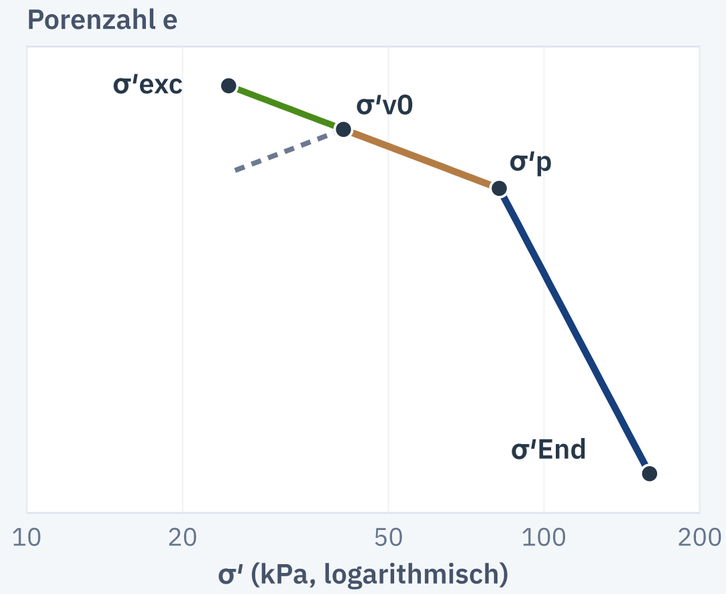
THEORIE

Die Berechnung geht niemals **in einem einzigen Schritt** von der Anfangsspannung zur Endspannung über. Der Aushub verringert die wirksame Spannung, und der Ton **schwillt** entlang der Entlastungsgeraden (C_s) an. Wird er durch das Bauwerk wiederbelastet, folgt der Ton zunächst derselben Geraden zurück bis σ'_{v0} (die Schwellung wird rückgängig gemacht); anschließend wird er entlang C_r bis σ'_p wieder komprimiert, und überschreitet die Endspannung σ'_p, so wird entlang der Erstbelastungsgeraden (C_c) komprimiert:

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

σ'_p ist die größte Spannung der Vergangenheit; **sie wird durch den Aushub nicht verringert**.

Der Be- und Entlastungszyklus **schließt** sich bei σ'_{v0}: Eine Last, die lediglich die entfernte Überlagerung wiederherstellt, erzeugt gegenüber dem Ausgangszustand keine Setzung, unabhängig von C_s und C_r.



Schematisch: gestrichelte Linie Entlastung, grüne Linie Wiederbelastung (C_s), orange Linie Wiederverdichtung (C_r), blaue Linie Erstbelastung (C_c).

Im Mittelpunkt jeder Lamelle

THEORIE

Jede Schicht zwischen der Fundamentebene und der Berechnungstiefe z_{lim} wird in **Lamellen** mit einer Dicke von höchstens Δz unterteilt (am Grundwasserspiegel abgeschnitten); jede Spannung wird in der Mitte der Lamelle berechnet:

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

γ wird oberhalb des Grundwasserspiegels, γ_{sat} unterhalb verwendet; γ_w = 9.81 kN/m³.

Die Anfangsspannungen des Baugrunds sind für jeden weiteren Bauzustand die **Referenz**.

Je dünner die Lamelle, desto genauer das Ergebnis; bei der Handrechnung liefert eine einzelne Lamelle ein Näherungsergebnis.

GRUNDWASSERSPIEGEL AN DER GELÄNDEOBERFLÄCHE

Für γ_{sat} = 18 ergibt sich γ′ = 18 − 9.81 = 8.19 kN/m³ und σ'_{v0} = 8.19 z. Alle folgenden Beispiele verwenden diesen Boden.

Aufgabe

BEISPIEL

Gegeben

Baugrund	$\gamma = 17\ \mathrm{kN/m^3}$ **(oberhalb des Grundwasserspiegels),** $\gamma_{sat} = 18\ \mathrm{kN/m^3}$ **(unterhalb)**
Grundwasserspiegel	**1.5 m unter der Geländeoberfläche**
Tiefen	**z = 1.5; 3.0; 4.5; 6.0 m**

GESUCHT

Für jede Tiefe sind die Werte **σ_{v0}, u_0, σ'_{v0}** zu ermitteln.

Lösung

LÖSUNG

1 z = 3.0 m (Grundwasserspiegel 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**

Unterhalb des Grundwasserspiegels nimmt σ'_{v0} **langsamer** zu (Anstieg $\gamma' = 8.19$ kN/m³): bei z = 6 m beträgt die totale Spannung 106.5, die wirksame Spannung nur 62.4 kPa.

Lösung in GeoTerva prüfen ↗

$\sigma'_p = OCR \cdot \sigma'_{v0}$ oder der Laborwert

THEORIE

Für jedes Modell wird **eine einzige Definition** verwendet: entweder das Überkonsolidierungsverhältnis OCR oder der Laborwert σ'_p:

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

OCR = 1: normalkonsolidierter Ton; $\sigma'_p = \sigma'_{v0}$, und jede Belastung über die Ausgangsspannung hinaus ist Erstbelastung (virgin compression).

Liegt der Laborwert σ'_p unter σ'_{v0}, wird er mit einer Warnung auf σ'_{v0} angehoben: **leicht überkonsolidierter Ton liegt außerhalb des Anwendungsbereichs**.

σ'_p gibt die größte Spannung der Vergangenheit an und nimmt durch den Aushub nicht ab.

WAS SAGT OCR AUS?

OCR = σ'_p/σ'_{v0}. Ein großes OCR bedeutet einen breiten Wiederbelastungsbereich, in dem sich der Ton unter Last zunächst mit **kleinem C_r** zusammendrückt.

Aufgabe

BEISPIEL

Gegeben

Lamelle	**Mittelpunkt $z = 3\ \mathrm{m}$: $\sigma'_{v0} = 24.57\ \mathrm{kPa}$ (Grundwasserspiegel an der Geländeoberkante, $\gamma_{sat} = 18$)**
Fälle	**(a) $OCR = 3$ · (b) Labor $\sigma'_p = 60\ \mathrm{kPa}$ · (c) Labor $\sigma'_p = 20\ \mathrm{kPa}$**

GESUCHT

In jedem Fall **σ′p** und **OCR**; den Zustand interpretieren.

Lösung

LÖSUNG

1 (a) OCR gegeben und (b) Laborwert

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

2 (c) Laborwert unterhalb von σ′v0

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

(a) und (b) überkonsolidierter Ton (σ′p > σ′v0); für (c) gibt das Modul eine Warnung aus und behandelt den Ton als **normalkonsolidiert** (σ′p = σ′v0 = 24.57 kPa): schwach überkonsolidierter Ton ist nicht Gegenstand der Betrachtung.

Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Entlastung und Hebung

THEORIE

Die abgetragene Last ist die **anfängliche wirksame Überlagerungsspannung** in Höhe der Baugrubensohle (Grundwasserspiegel unverändert; unter Wasser wird das abgetragene Gewicht mit γ′ berechnet). Die Entlastung breitet sich mit dem Boussinesq-Einfluss des Baugrubengrundrisses I_{exc} aus (bei breiter Baugrube $I_{exc} = 1$):

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

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

Das Schwellen ist **negativ** (Setzung +, Schwellen –). Ist C_s nicht gegeben, wird $C_s = C_r$ angesetzt und im Bericht angegeben.

Der Nettodruck $q_{net} = q_{brutto} - q_{Auftrieb}$ wird lediglich berichtet; die Berechnung erfolgt nicht in einem einzigen Schritt mit dem Nettodruck, sondern es wird dem Spannungspfad gefolgt.

NEDEN KABARMA?

Durch den Aushub sinkt die wirksame Spannung, und der Ton schwillt. Wird das Bauwerk wieder belastet, wird das Schwellen rückgängig gemacht: Dies ist die **Wiederbelastung des geschwollenen Bodens**.

Δσ unter der Fundamentmitte

THEORIE

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

Rechteck B × L, unter seinem Mittelpunkt: mit dem Newmark-Eckbeiwerte $I_z = 4 \cdot I_{Ecke}$(m = B/2z′, n = L/2z′):

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

(Ist V < m²n², wird der Arkustangens-Term um π erhöht). **Streifen** (Breite B), unter seiner Mittellinie: $I_z = (\alpha + \sin\alpha)/\pi$, $\alpha = 2\tan^{-1}(B/2z')$. Bei z′ = 0 ist $I_z = 1$.

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

HINWEIS

Der Spannungszuwachs wird entlang der Vertikalen unter dem Fundamentmittelpunkt angesetzt (Lamellen und Zeitanalyse); in den Farbbandbereichen wird er für Punkte außerhalb des Fundaments in Eckrechtecke unterteilt.

Aufgabe

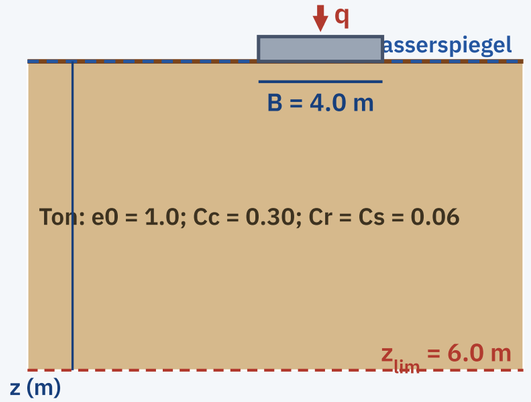
BEISPIEL

Gegeben

Fundament	**Rechteck 4 × 6 m, $q = 150\ \mathrm{kPa}$, an der Geländeoberfläche ($D_f = 0$)**
Punkt	**Mittelpunkt der Lamelle z′ = 3 m, unterhalb des Zentrums**
Vergleich	**B = 4 m breiter Streifen**

GESUCHT

$\mathbf{I_z}$ und **Δσ**; für den Streifen gelten dieselben Werte.



Lösung (1/2)

LÖSUNG

1 Rechteck: 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 Rechteck und Streifen

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

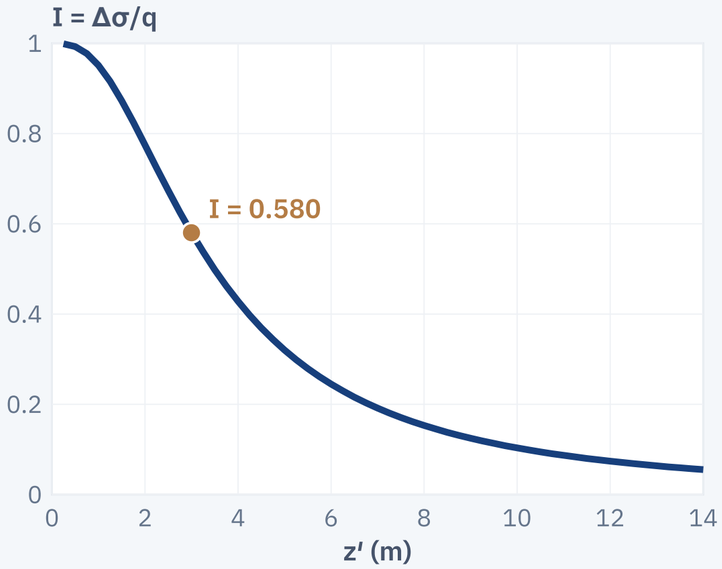
$$\text{Streifen} : \alpha = 2\tan^{-1}\tfrac{4}{6} = 1.1760 \;\Rightarrow\; I_z = \frac{1.1760 + 0.9231}{\pi} = 0.6682$$

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

Lösung (2/2)

LÖSUNG

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 der Mitte der Lamelle Δσ = **87.0 kPa** (58 % von q); ein schmaler Streifen (gleiches B) ergibt 100.2 kPa: **ein langes Fundament wirkt tiefer**. Der Spannungszuwachs beträgt selbst bei z′ = 10 m noch 10 %.

Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Einflussstiefe: I(z′) = p

THEORIE

Der Spannungszuwachs nimmt mit der Tiefe ab, wird aber nie null; die Summe der Lamellenpressungen benötigt eine untere Grenze: die **Berechnungstiefe z_{lim}**. Bei der Regel der Einflusstiefe konsolidiert der Ton, bis der Boussinesq-Zuwachs unterhalb der Mitte auf **p**-mal die aufgebrachte Pressung abfällt (üblich p = 10 %):

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

Derselbe Einflussbeiwert bestimmt auch die Entlastung einer Baugrube mit gleichem Grundriss; daher ist die Tiefe dieselbe, ob sie über q_{brutto} oder q_{netto} abgelesen wird.

Endet das Profil oberhalb von z_{lim}, so setzt sich die letzte Schicht mit denselben Eigenschaften bis z_{lim} fort; endet es darunter, so ist der Boden unterhalb von z_{lim} unzusammendrückbar.

Die alternative Regel ist die **Unterkante des Profils**: Es wird eine starre Unterlage angenommen. (Das Kriterium $\Delta\sigma = 0.2\ \sigma'_{v0}$ reicht bei einem kleinen Fundament in der Tiefe weiter hinab; die Regel des Moduls hängt nur von der Geometrie ab.)

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
Streifen	6.34 B	3.13 B

Aufgabe

BEISPIEL

Gegeben

Fundamente	**(a) 4 × 6 m, p = 10 % und 20 % · (b) 20 × 30 m Plattengründung, p = 10 % und 20 %**
Regel	**Einflusstiefe; $D_f = 0$**

GESUCHT

In jedem Fall **z'** und **z_{lim}**; Nachweis von $I(z')$ für 4 × 6 m.

Lösung

LÖSUNG

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

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

Fundament	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 Plattengründung	50.9 (2.55 B)	34.1 (1.70 B)

z′ ist **proportional zur Fundamentgröße**: bei einem Fundament von 4 × 6 m ist z_{lim} = 10.19 m, bei einer Fundamentplatte von 20 × 30 m **50.9 m**. Die Fundamentplatte berücksichtigt den bis etwa 51 m Tiefe zusammendrückbaren Ton.

Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Lamellenverzahnung bei Wiederbelastung

THEORIE

$f = \Delta H/(1 + e_0)$ für die Lamelle; mit $\sigma'_{exc} \leq \sigma'_{v0} \leq \sigma'_p$ ergibt sich die Zusammendrückung der Lamelle je nach Lage der Endspannung:

Bedingung	Lamellenverzahnung bei Wiederbelastung
$\sigma'_{exc} \leq \sigma'_{son} \leq \sigma'_{v0}$	$S_b = C_s\, f \log(\sigma'_{son}/\sigma'_{exc})$: Ein Teil der Hebung wird rückgebildet
$\sigma'_{v0} < \sigma'_{End} \leq \sigma'_p$	$S_b = C_s\, f \log(\sigma'_{v0}/\sigma'_{exc}) + S_r = C_r\, f \log(\sigma'_{son}/\sigma'_{v0})$
$\sigma'_{v0} < \sigma'_p < \sigma'_{son}$	$S_b + S_r = C_r\, f \log(\sigma'_p/\sigma'_{v0}) + S_v = C_c\, f \log(\sigma'_{son}/\sigma'_p)$
$\sigma'_p = \sigma'_{v0} < \sigma'_{end}$ (NC)	$S_b + S_v = C_c\, f \log(\sigma'_{son}/\sigma'_{v0})$
$\sigma'_{end} < \sigma'_{exc}$	Zusätzliches Schwellen mit C_s (negativ)

OHNE BAUGRUBE

$\sigma'_{exc} = \sigma'_{v0}$ und $S_b = 0$: klassische Wiederbelastung und Erstbelastung, ausgehend von der Ausgangsspannung.

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

Aufgabe

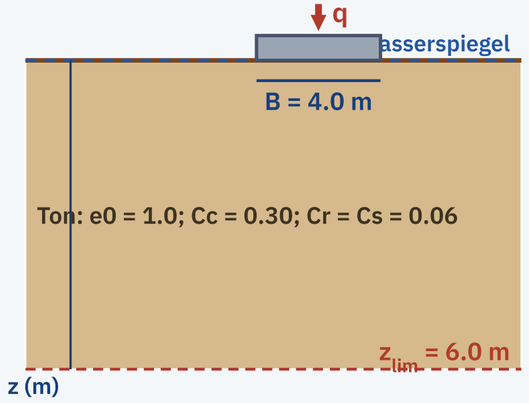
BEISPIEL

Gegeben

Baugrund	**einzelne Tonschicht, 6 m Mächtigkeit;** $\gamma_{sat} = 18\ \mathrm{kN/m^3}$**; Grundwasserspiegel an der Geländeoberfläche;** $e_0 = 1.0,\ C_c = 0.30,\ C_r = C_s = 0.06$
Fundament	**Rechteck 4 × 6 m,** $q = 150\ \mathrm{kPa}$**, an der Geländeoberfläche (kein Aushub)**
Lamelle	**einzelne Lamelle, H = 6 m, Mittelpunkt** $z = 3\ \mathrm{m}$**:** $\sigma'_{v0} = 8.19\,z = 24.57\ \mathrm{kPa}$
Überkonsolidierung	**(a) OCR = 1 (NC) · (b) OCR = 6 · (c) OCR = 3**
Spannungszuwachs	$\Delta\sigma = 150\,I_z(3) = 87.04\ \mathrm{kPa}$ **(Beispiel 3)** ⇒ $\sigma'_{final} = 111.61\ \mathrm{kPa}$

GESUCHT

Das **Regime** und die Konsolidationssetzung $\mathbf{S_c}$ für jeden Ton.



Lösung (1/2)

LÖSUNG

1 Gemeinsam: f = H/(1 + e_0) = 6/2 = 3 m; log($\sigma'_{son}/\sigma'_{v0}$) = 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'_{end} ⇒ nur Wiederbelastung

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

Derselbe Ton, dieselbe Last: Der normalkonsolidierte Ton setzt sich um **591.6 mm**, der mit OCR = 6 um **118.3 mm**; der Unterschied folgt aus dem Verhältnis C_c/C_r = 5.

Lösung (2/2)

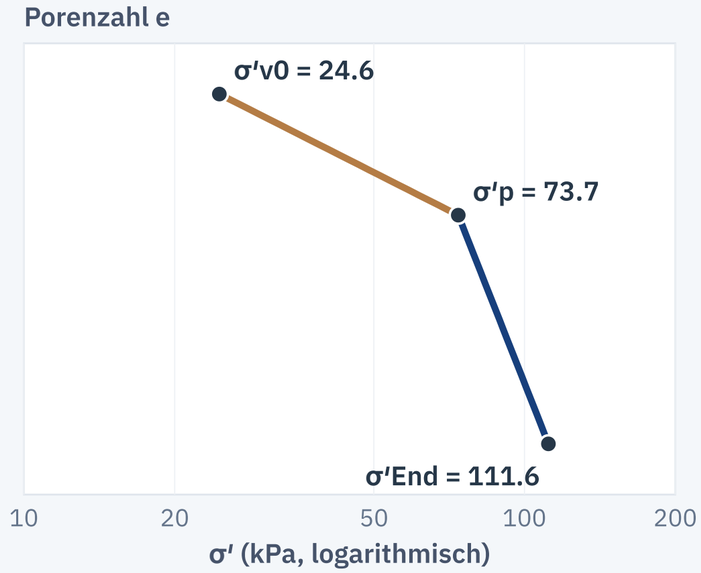
LÖSUNG

3 (c) OCR = 3: $\sigma'_p = 3(24.57) = 73.71$ kPa $< \sigma'_{son} = 111.61 \Rightarrow$ Wiederbelastung + Erstbelastung

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

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

OCR	σ'_p (kPa)	Regime	S_r (mm)	S_v (mm)	S_c (mm)
1	24.6	ungestört	0	591.6	**591.6**
6	147.4	Wiederbelastung	118.3	0	**118.3**
3	73.7	Wiederbelastung + Erstbelastung	85.9	162.2	**248.0**



Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Vom ursprünglichen Gelände oder von der aufgehobenen Sohle?

THEORIE

Nach dem Aushub folgt das Fundament: Die Setzung hängt davon ab, **von welcher Referenz** aus die Verschiebungen gemessen werden (Option *Verschiebungen nach dem Aushub* im Bauzustand Aushub):

Erhalten — aus dem ursprünglichen Baugrund (Standard): Die Hebung wird zusätzlich getrennt dargestellt; die Setzung des Fundaments ist die Nettoverformung am Ende der Belastung: **$S = S_c + S_{Hebung}$** = Gesamtkompression über σ'_{v0} hinaus. Eine Last, die nicht größer als die entfernte Überlagerung ist, ergibt S = 0; ist sie kleiner, bleibt der Boden über dem ursprünglichen Niveau (wird berichtet, Setzung 0).

Vor dem Aufbringen der Last wird auf null gesetzt: Die Verschiebungen des Aushubzustands werden zu null gesetzt; die Setzung wird von der aufgehobenen Baugrubensohle aus gemessen: **$S = S_c = S_b + S_r + S_v$**. Die Wiederzusammendrückung der Hebung wird als Setzung gezählt: Ein vollständig entlastetes Fundament setzt sich so weit, wie sich die Sohle gehoben hat. Bleibt die Baugrube bis zur Errichtung des Bauwerks offen und hat sich eine Hebung entwickelt, ist dies die richtige Antwort.

Beide Maße werden stets ausgegeben; die Auswahl bestimmt, welches Maß als Fundamentsetzung berichtet wird, die Zeitkurve und das Ergebnis.

ZUSAMMENFASSUNG

Bleibt erhalten: $S = S_c + S_{Hebung}$ (klein). Wird zu null gesetzt: $S = S_c$ (groß).

Aufgabe

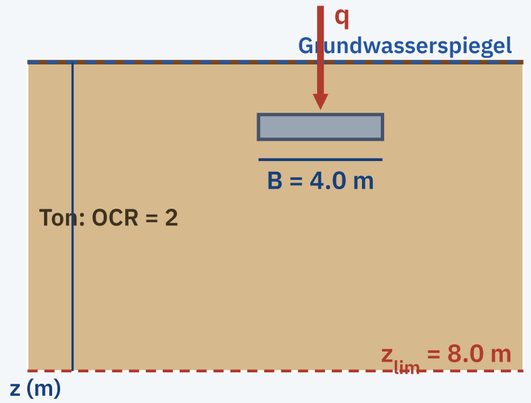
BEISPIEL

Gegeben

Baugrund	**Ton 0–8 m, $\gamma_{sat} = 18$, Grundwasserspiegel an der Geländeoberkante; $e_0 = 1.0,\ C_c = 0.30,\ C_r = C_s = 0.06$; $OCR = 2$**
Aushub	**breite Baugrube ($I_{exc} = 1$), Tiefe 2 m; an der Baugrubensohle der Gründung**
Fundament	**4 × 6 m, $q_{gross} = 100\ \mathrm{kPa}$**
Lamelle	**einzelne Lamelle 2–8 m, $H = 6$ m, $z = 5$ m, $f = 3$ m: $\sigma'_{v0} = 8.19(5) = 40.95\ \mathrm{kPa}$**

GESUCHT

σ'_{exc}, Hebung, S_b, S_r, S_v, S_c; Setzung des Fundaments (ausgehend vom ursprünglichen Baugrund und nach dem Zurücksetzen).



Lösung (1/3)

LÖSUNG

1 Baugrube: abgetragene Last, Entlastung und Hebung

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

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

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

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

Lösung (2/3)

LÖSUNG

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

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

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

Bei der Wiederbelastung wird zunächst die Schwellung zurückgebildet (S_b = 39.9 mm = die gesamte Schwellung), dann folgen 54.2 mm Wiederbelastung mit C_r und 3.3 mm Erstbelastung, die σ'_p geringfügig überschreitet.

Lösung (3/3)

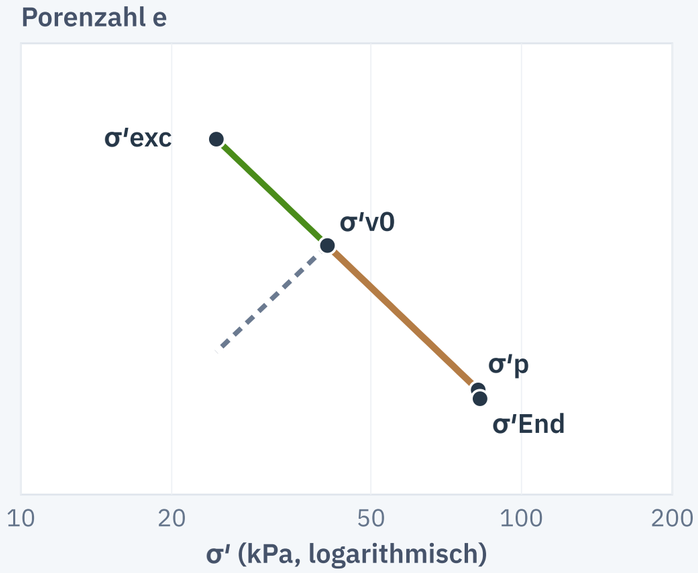
LÖSUNG

4 Setzung des Fundaments

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

$$\text{wird zu null}: \quad S = S_c = \mathbf{97.4\ mm}$$

Die von der ursprünglichen Geländeoberfläche gemessene Setzung beträgt **57.5 mm**; von der aufgewölbten Oberfläche gemessen **97.4 mm**. Die Differenz entspricht der Hebung (39.9 mm): die Wahl des Bezugspunkts ändert das Ergebnis um 69 %.



Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Linearer Verlauf: $\Delta H = m_v \, \Delta\sigma' \, H$

THEORIE

Es ist ein getrennter und **linearer** Berechnungsweg: Derselbe m_v wird sowohl bei der Entlastung als auch bei der Wiederbelastung verwendet; C_c, C_r, C_s und e_0 gehen nicht ein:

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

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

Der Teil von S_c bis σ'_{v0} ist die rückgewonnene Schwellung (S_b).

Da sie linear ist, schließt sich die Schleife von selbst.

Die Einheit von m_v ist 1/kPa (Koeffizient der Volumenkompressibilität); er ist nach dem Spannungsbereich zu wählen.

UNTERSCHIED ZU e – log σ′

Das m_v-Verfahren berücksichtigt das Spannungsniveau nicht (kein σ'_p): Jeder Spannungszuwachs erzeugt dieselbe Zusammendrückung.

Aufgabe

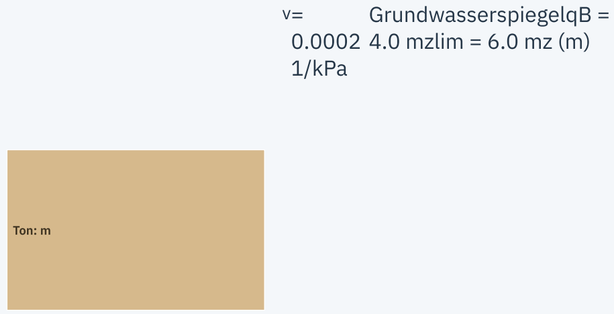
BEISPIEL

Gegeben

Baugrund	**6 m Ton, $m_v = 0.0002\ 1/\mathrm{kPa}$, Grundwasserspiegel an der Oberfläche**
Fall (a)	**ohne Aussteifung: 4×6 m, $q = 150$ kPa, $\Delta\sigma = 87.04$ kPa (Beispiel 3)**
Fall (b)	**Die Baugrube und das Fundament aus Beispiel 6 (2 m Aushub, $q = 100$ kPa, Lamelle 2–8 m)**

GESUCHT

S_c in jedem Fall; für (b) Hebung, S_b und Nettosetzung.



Lösung

LÖSUNG

1 (a) Ohne Aushub

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

2 (b) Mit Aushub: σ'_{v0} = 40.95; σ'_{exc} = 24.57; $\Delta\sigma_{Last}$ = 58.03; σ'_{end} = 82.60 kPa

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

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

Netto-Setzung (vom ursprünglichen Gelände) S = S_c + Hebung = **50.0 mm**; nur der Zuwachs von 41.65 kPa, der σ'_{v0} übersteigt, ruft Setzung hervor. Beim linearen Weg hat das Verfahren e – log σ′ keinen σ'_p-Einfluss.

Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Terzaghi: T_v, U und t

THEORIE

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

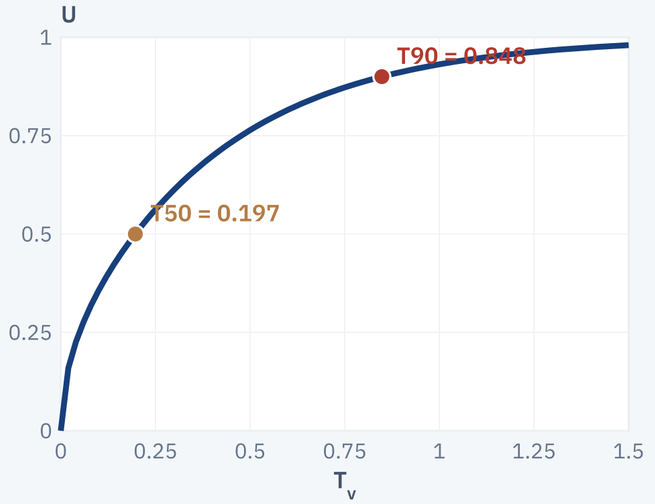
$$S_i(t) = U_i(t)\, S_{c,i} \qquad S(t) = \sum S_i(t) \qquad t = \frac{T_v\, H_{dr}^2}{C_v}$$

H_{dr} = H (einseitige Dränage) oder H/2 (zweiseitige Dränage); H ist die Schichtdicke unterhalb der Gründungssohle (bis z_{lim} für die letzte, über das Profil hinausreichende Schicht).

$T_{v,50}$ = 0.197; $T_{v,90}$ = 0.848. Für T_v < 0.05 wird die Frühzeitlösung $U = 2\sqrt{(T_v/\pi)}$ verwendet.

Schichten mit unterschiedlichen C_v- und H_{dr}-Werten konsolidieren mit unterschiedlicher Geschwindigkeit: Die Kurve des Profils ist die **Summe der Schichtkurven**; ihre eigenen t_{50}- und t_{90}-Werte werden aus dieser Summe abgelesen.

Die Kurve gehört zur Setzung unter Last S_c; es wird angenommen, dass die Hebung vor der Belastung abgeschlossen ist.



Aufgabe

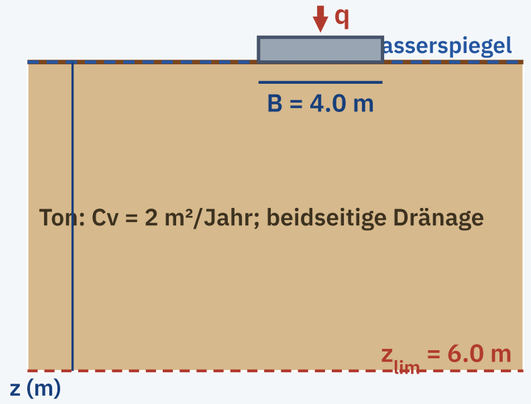
BEISPIEL

Gegeben

Ton	**6 m, normalkonsolidiert (Beispiel 5a): $S_c = 591.6$ mm**
Konsolidation	**$C_v = 2\ \mathrm{m^2/Jahr}$; Dränage oben und unten (beidseitig)**
Zeiten	**t = 0.25; 0.5; 1; 2; 4; 8 Jahre**

GESUCHT

H_{dr}, t_{50}, t_{90} und S(t); t_{90} bei einseitiger Dränage.



Lösung (1/2)

LÖSUNG

1 Dränweg und charakteristische Zeiten

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

2 Einseitige Dränage (H_{dr} = 6 m)

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

Bei beidseitiger Dränage halbiert sich der Dränweg und die Zeit sinkt auf **ein Viertel**: t_{90} = 3.82 Jahre gegenüber 15.3 Jahren bei einseitiger Dränage.

Lösung (2/2)

LÖSUNG

t (Jahr)	$T_v = C_v t/H_{dr}^2$	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 Jahr sind nur 53 % der Setzung abgeschlossen, in 4 Jahren 91 % (S_c = 592 mm); in 8 Jahren ist U = 0.990. Bei kleinen T_v-Werten (< 0.05) wird $U = 2\sqrt{(T_v/\pi)}$ verwendet.

Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Aufgabe

BEISPIEL

Gegeben

Fundament	**4 × 6 m, q = 150 kPa, an der Geländeoberfläche; Grundwasserspiegel an der Oberfläche (γ_{sat} = 18)**
Schicht A (0–4 m)	**weich, NC: $e_0 = 1.10,\ C_c = 0.35,\ C_r = 0.07$; $C_v = 1$; doppelte Dränage**
Schicht B (4–8 m)	**steif, $OCR = 2$: $e_0 = 0.80,\ C_c = 0.20,\ C_r = 0.04$; $C_v = 3$; einseitige Dränage**
Berechnung	**Basis des Profils (8 m); jede Schicht als eine Lamelle (A: z = 2 m, B: z = 6 m)**

GESUCHT

Der **S_c**-Wert, t_{50} und t_{90} jeder Schicht; die S(t)-Kurve des Systems.

Lösung (1/3)

LÖSUNG

1 A: z = 2 m, σ'_{v0} = 16.38; $I_z(2)$ = 0.7746 ⇒ Δσ = 116.19; σ'_{End} = 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'_{son} = 85.88 < σ'_p; f = 4/1.80 = 2.2222 m

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

Gesamte Konsolidationssetzung **627.0 mm**: Die weiche, normalkonsolidierte obere Schicht trägt 97 % der Gesamtsetzung; die steife, überkonsolidierte untere Schicht nur 21.6 mm.

Lösung (2/3)

LÖSUNG

3 Dränweg und Zeiten ($t = 0.197\ H_{dr}^2/C_v$; $0.848\ H_{dr}^2/C_v$)

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

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

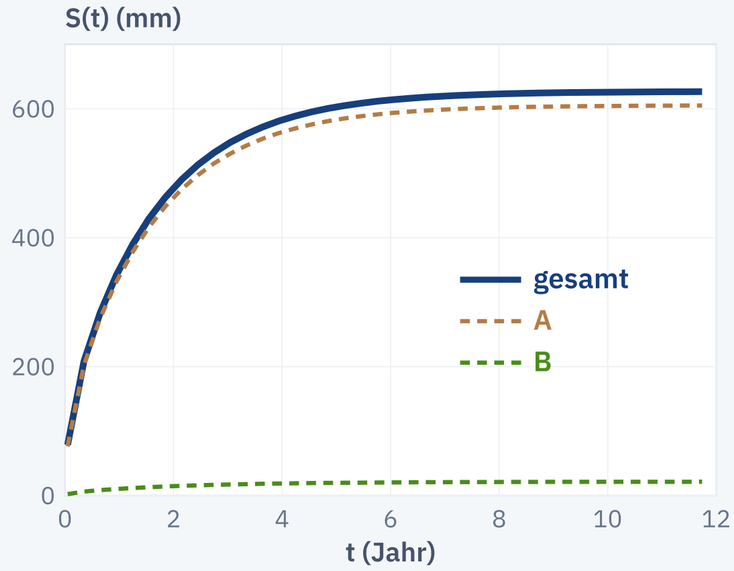
Die Setzungskurve des Systems ist die Summe $S(t) = U_A(t)\,S_A + U_B(t)\,S_B$; die zugehörigen Zeiten werden aus dieser Summe abgelesen: **t_{50} = 0.794 Jahre, t_{90} = 3.43 Jahre** (nahe der dominierenden Schicht A).

Lösung (3/3)

LÖSUNG

t (Jahr)	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

56 % der Setzung sind nach 1 Jahr abgeschlossen, 96 % nach 5 Jahren; nach etwa 10 Jahren ist sie beendet (627 mm). Die Kurve wird durch die **weiche Schicht A** bestimmt.



Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Was bei der Interpretation der Ergebnisse zu beachten ist

THEORIE

Fundamentsohle = Baugrubensohle (ohne Aushub die Geländeoberfläche); **hydrostatischer** Porenwasserdruck; der Grundwasserspiegel wird durch den Aushub nicht beeinflusst.

Der Spannungszuwachs wird **auf der Vertikalen unter der Fundamentmitte** angesetzt (Lamellen und Zeitanalyse); die Farbflächen folgen an jedem Punkt demselben Spannungspfad.

e_0 ist die Anfangs-Porenzahl jeder Stufe; **eine Sekundärsetzung (C_α) tritt nicht auf**.

Setzung ist positiv, Hebung negativ; der Umschalter in der Kopfzeile kehrt dies um und wechselt auf die Anzeige mit positiver Richtung nach oben (die Berechnungsengine bleibt klassisch).

Farbbänder: Bereiche, die mit der Tiefe rasch abnehmen, wie Setzung, Aufschwellung und Verformung, werden mit den Klassen $1 \cdot 1.5 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 7 \times 10^n$ eingefärbt; gleich breite Bänder würden den unteren Bereich in einer einzigen Farbe zusammenfassen.

Zusammenfassung

Die wichtigsten Punkte

Spannungspfad: $\sigma'_{v0} \rightarrow \sigma'_{exc} \rightarrow \sigma'_{v0}$ (C_s) $\rightarrow \sigma'_p$ (C_r) $\rightarrow \sigma'_{end}$ (C_c); $\sigma'_p = OCR \cdot \sigma'_{v0}$, nimmt durch Aushub nicht ab

Lamellenpressung $f = \Delta H/(1 + e_0)$: NC: $C_c\ f \log(\sigma'_{end}/\sigma'_{v0})$; OC und $\sigma'_{end} \leq \sigma'_p$: $C_r\ f \log(\ldots)$; $\sigma'_{end} > \sigma'_p$: Anteile $C_r + C_c$

Aushub: $q_{Entlastung} = \sigma'_{v0}(D_{Aushub})$, Hebung $= -C_s\ f \log(\sigma'_{v0}/\sigma'_{Aushub})$; $S = S_c + S_{Hebung}$ (ursprünglicher Baugrund) oder S_c (auf null zurückgesetzt)

Boussinesq: $\Delta\sigma = q\ I_z(z')$; Rechteckmitte $4\ I_{Ecke}$, Streifen $(\alpha + \sin\alpha)/\pi$; $\mathbf{z_{lim}}$: $I(z') = p$ (Quadrat 2.09 B, L = 1.5 B 2.55 B, Streifen 6.34 B)

m_v-Verfahren: $\Delta H = m_v\ \Delta\sigma'\ H$, linear; Hebung $= -m_v(\sigma'_{v0} - \sigma'_{exc})\ H$

Zeit: $T_v = C_v\ t/H_{dr}^2$; $T_{v,50} = 0.197$, $T_{v,90} = 0.848$; $H_{dr} = H$ (einseitig) oder $H/2$ (beidseitig); $S(t) = \Sigma\ U_i\ S_{c,i}$

Literatur

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.

HINWEIS

Alle Zahlenbeispiele wurden mit der Berechnungsengine des Moduls erzeugt; das Modul liefert dieselben Werte (Beispiellamellen: dz = Schichtdicke).

GeoTerva

Geotechnische Berechnungen online

Von der Theorie zur Praxis

Die Beispiele dieser Präsentation in GeoTerva Schritt für Schritt berechnen; im Modul werden die Anzahl der Schichten und die Baugrube frei eingegeben.

Modul öffnen →

Theorieseite →

Auf dem Smartphone öffnen

Die Beispielmodule erfordern keine Registrierung.