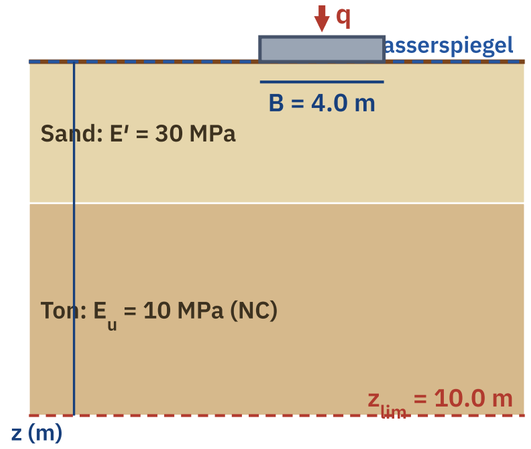
Geotechnische Vorlesungspräsentation · Setzungen

Gesamtsetzung: Ton- und Sandschichten

Vorlesung: Überlagerung von Sofortsetzung (elastisch) und Konsolidation des Tons in einem Profil aus Ton- und Sandschichten, mittiges, Eck- und starres Fundament, zeitabhängige Gesamtsetzung; zu jedem Thema ein Rechenbeispiel.

$S = S_e + S_c$ · Ton- und Sandschichten · Steinbrenner · Spannungspfad · Mitte · Ecke · starr · Setzung–Zeit-Kurve



Einführung

Was lernen wir in dieser Vorlesung?

Trennung der Setzung nach Schichttyp: **bindige** Schicht = Sofortsetzung + Konsolidation, **nichtbindige** Schicht = nur elastische Setzung

Steinbrenner- (Sofortsetzung) und **Spannungspfad**-Berechnungen (Konsolidation) in denselben Lamellen zu kombinieren

Den Einfluss des Aushubs erkennen: Der **Netto-Druck** bestimmt die Sofortsetzung, **Hebung und Wiederbelastung** bestimmen die Konsolidation

Die **Mittelpunkt**- und **Eck**setzung eines elastischen Fundaments, das starre Fundament und die Differenzsetzung aus der Gesamtsetzung zu bestimmen

$\mathbf{S(t) = S_e + \Sigma\, U_i(t)\, S_{c,i}}$ die Setzungs-Zeit-Kurve aufzustellen

zu überprüfen, ob das Ergebnis des Moduls gleich der Summe der Einzelmoduln (elastisch + Konsolidation) ist

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

Beispielprofil: 6 m normalkonsolidierter Ton über 4 m Sand; Fundament 4 × 6 m, q = 150 kPa. Die Setzungen sind in mm angegeben.

Gesamtsetzung = Sofortsetzung + Konsolidation

THEORIE

$$S = S_e + S_c \qquad \text{bindige Schicht: } S_e(\text{undräniert}) + S_c \qquad \text{nichtbindige Schicht: } S_e(\text{dräniert})$$

Beide Komponenten werden **in denselben Lamellen** mit demselben Boussinesq-Spannungszuwachs, demselben Aushub und derselben Berechnungstiefe berechnet. Die Lösung ist **analytisch**: geschlossene Einflussbeiwerte, spannungspfad Lamelle für Lamelle und die Theorie nach Terzaghi; finite Elemente werden nicht verwendet.

Gesättigter Ton ändert bei Lastaufbringung sein Volumen nicht (v = 0.5): Dies ist seine Sofortsetzung. Das Wasser dräniert langsam ab, und der Ton konsolidiert entlang des Spannungspfades: Dies ist die Konsolidation. Da Sand sein Wasser sofort abgibt, ist seine Setzung vollständig elastisch.

> Bei nur einem Profiltyp liefert das Modul **dasselbe Ergebnis** wie das Modul Elastische Setzung oder Konsolidation (Beispiel 6).

> Der Typ jeder Schicht wird in der Tabelle Bodenprofil ausgewählt und bestimmt, welche Parameter für die Schicht erforderlich sind.

SCHICHTTYP

Schicht	Sofortsetzung	Konsolidation
Bindig	Undräniert E_u, v = 0.5	verfügbar: C_c, C_r, C_s, e_0, σ'_p (oder m_v), C_v
Nichtbindig	dräniert E′, v′	keine

Hooke'sches Gesetz und Steinbrenner-Beiwerte

THEORIE

Die Setzung unter einem vollständig biegsamen Fundament, das die Netto-Sohlpressung q_{net} überträgt, ist das Integral der vertikalen Verformung (Boussinesq-Spannungen, homogener Halbraum):

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

Geschlossene Lösung für die Ecke eines Rechtecks (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′. **Mitte**: α = 4, B′ = B/2; **Ecke**: α = 1, B′ = B.

Da in der bindigen Schicht v = 0.5 gilt, ist $I_s = F_1$ und $(1 - v^2) = 0.75$.

ELASTIZITÄTSMODULE DER SOFORTSETZUNG

Die Formeln für F_1, F_2, A_0, A_1, A_2 und ausführliche Beispiele finden sich in den Präsentationen zur elastischen Setzung; hier werden nur ihre Ergebnisse zur Summation verwendet.

Geschichtetes Profil und Netto-Pressung

THEORIE

Eine Schicht zwischen den Tiefen z_o und z_u der Fundamentebene trägt ihre I_s-Differenz mit ihrem eigenen E und v bei:

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

Der Aushub hebt die wirksame Überlagerungsspannung in Höhe der Baugrubensohle auf; im elastischen Boden mit einem einzigen Elastizitätsmodul wird die Entlastung bei der Wiederbelastung rückgängig gemacht, die Sofortsetzung bestimmt der **Netto-Druck**:

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

Ist $q_{net} \le 0$, so tritt keine Sofortsetzung auf (ein negativer Wert ist eine elastische Hebung).

Das Ergebnis ist unabhängig von der Lamellendicke; die Lamellen dienen lediglich den Tabellen und Farbbereichen.

NEDEN FARKLI?

Die Sofortsetzung wird mit der **Netto-Bodenpressung**, die Konsolidation mit dem **Zuwachs der wirksamen Spannung** entlang des Spannungspfads berechnet; der Aushub beeinflusst beide auf unterschiedliche Weise.

Spannungsweg und Lamellenverformung

THEORIE

Bei bindigen Lamellen wird die Konsolidation entlang des **Spannungspfads** berechnet und nicht in einem einzigen Schritt von der Anfangs- zur Endspannung: Schwellung infolge des Aushubs (C_s), bei Wiederbelastung zunächst die Rückbildung der Hebung, Wiederbelastung mit C_r bis σ'_p und darüber hinaus Erstbelastung mit C_c:

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

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

Bei NC-Ton (OCR = 1): $S = C_c\, f \log(\sigma'_{end}/\sigma'_{v0})$ (ohne Aushub).

Die Hebung ist negativ; $S_{net} = S_c + S_{Hebung}$. Bei der Option **Erhalten** wird die Setzung vom ursprünglichen Gelände aus gemessen, bei der Option **Auf null gesetzt** von der gehobenen Sohle aus.

Berechnungstiefe: $I_z(z') = p$ (üblich sind 10 %) oder die Basis des Profils; das m_v-Verfahren ist eine lineare Option.

DETAIL

Die vollständige Darstellung des Spannungspfads, der Regime, des Aushubs und der Zeitkurve findet sich in der Präsentation zur Konsolidation.

Aufgabe

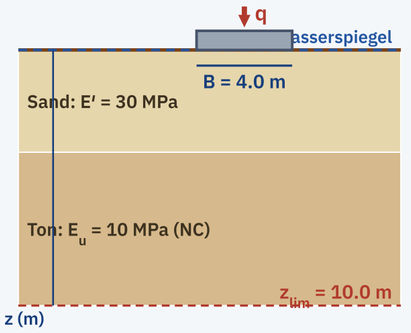
BEISPIEL

Gegeben

Profil	**Sand 0–4 m:** $E' = 30\ \mathrm{MPa},\ \nu' = 0.30, \gamma_{sat} = 19$ · **Ton 4–10 m (NC):** $E_u = 10\ \mathrm{MPa},\ \nu = 0.5, e_0 = 1.0,\ C_c = 0.30,\ C_v = 2\ \mathrm{m^2/Jahr}, \gamma_{sat} = 18$
Fundament	**4 × 6 m flexibles Rechteck, $q = 150\ \mathrm{kPa}$, an der Geländeoberfläche; Grundwasserspiegel an der Oberfläche; Berechnungstiefe 10 m (Basis des Profils)**
Aushub	**keine (q_{net} = 150 kPa)**

GESUCHT

Sofortsetzung S_e jeder Schicht in **Feldmitte** und an der **Ecke**.



Lösung

LÖSUNG

1 Sand (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 Ton (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 der Mitte S_e = 12.4 + 18.3 = **30.7 mm**; in der Ecke 3.4 + 9.8 = **13.2 mm** (in der Ecke α = 1, B′ = B).

Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Boussinesq, Einflusstiefe und m_V-Verfahren

THEORIE

Unter der Fundamentmitte für ein Rechteck B × L mit dem Newmark-Eckbeiwert, für einen Streifen mit der geschlossenen Lösung für α:

$$\Delta\sigma = q\, I_z(z') \qquad I_z = 4\, I_{k\ddot{o}\S e}(m,n)\ \ (m = \tfrac{B}{2z'},\ n = \tfrac{L}{2z'}) \qquad I_{z,\text{Streifen}} = \frac{\alpha + \sin\alpha}{\pi}$$

Einflusstiefe: $I_z(z')$ = p (üblich 10%); Quadrat 2.09 B, 2.55 B für L = 1.5 B, Streifen 6.34 B. Wird die Basis des Profils gewählt, endet die Berechnung in der letzten Schicht (in Fels oder dichtem Kies).

Endet das Profil oberhalb von z_{lim}, so setzt sich die letzte Schicht bis z_{lim} fort.

m_V-Verfahren: $\Delta H = m_v\, \Delta\sigma'\, H$; linear, $C_c/C_r/C_s$ werden nicht kombiniert.

IN DIESEM PROFIL

Die Berechnungstiefe ist die Basis des Profils (10 m); eine starre Basis wird angenommen. Für die Tonschicht bei z = 7 m, $I_z(z' = 7) = 0.1916$.

Aufgabe

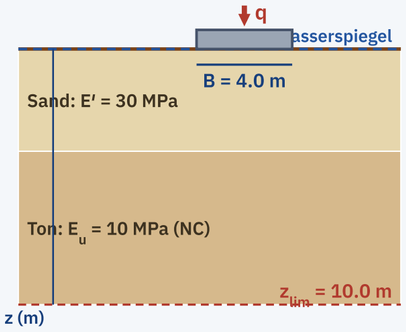
BEISPIEL

Gegeben

Profil	**Sand 0–4 m:** $E' = 30\ \text{MPa},\ \nu' = 0.30,\ \gamma_{sat} = 19$ · **Ton 4–10 m (NC):** $E_u = 10\ \text{MPa},\ \nu = 0.5,\ e_0 = 1.0,\ C_c = 0.30,\ C_v = 2\ \text{m}^2/\text{Jahr},\ \gamma_{sat} = 18$
Fundament	**4 × 6 m flexibles Rechteck,** $q = 150\ \text{kPa}$**, an der Geländeoberfläche; Grundwasserspiegel an der Oberfläche; Berechnungstiefe 10 m (Basis des Profils)**
Lamelle	**Ton, eine Lamelle,** $H = 6$ **m, Mittelpunkt** $z = 7$ **m;** $f = H/(1 + e_0) = 3$ **m**
Spannungen	$\sigma'_{v0} = 9.19(4) + 8.19(3) = 61.33\ \text{kPa}$

GESUCHT

I_z, $\Delta\sigma$, σ'_{End} und **S_c**.



Lösung

LÖSUNG

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 Endspannung und Zusammendrückung (NC: $\sigma'_p = \sigma'_{v0}$)

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

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

Die Konsolidationssetzung des Tons beträgt **150.2 mm**: etwa das **4.9-Fache** der Sofortsetzung (30.7 mm). In weichem, normalkonsolidiertem Ton stammt die maßgebende Setzung aus der Konsolidation.

Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Mitte, Ecke und starres Fundament

THEORIE

Für jede Lamelle werden die Sofort- und (in der bindigen Schicht) die Konsolidationsanteile summiert; die Summe über die Schichten bis z_{lim} ergibt die **mittige** Setzung des elastischen Fundaments:

$$S = \sum \Delta s_e + \sum (\Delta s_b + \Delta s_r + \Delta s_v) \quad [+ s_{heave}]$$

$$s_{ecke} = s_{e,ecke} + s_c \qquad s_{rigid} = 0{,}93\, s_e + s_c \qquad s_{diff} = s_e - s_{e,ecke}$$

Für die Ecke nimmt **nur die Sofortsetzung** den eigenen Wert des Eckrechtecks an; die Konsolidation folgt dem Spannungspfad auf der Mittellinie und wird an der Ecke als gleich angenommen.

Ein starres Fundament setzt sich gleichmäßig: der sofortige Anteil beträgt etwa das 0.93-Fache des flexiblen Mittelpunkts, der Konsolidationsanteil entspricht dem des Mittelpunkts.

Aushub: Der Anteil der Sofortsetzung wird mit q_{net} berechnet, ebenso die Hebung des Tons und die Wiederbelastung; bei der Option „zurückgehalten“ gilt $S = S_e + S_c + S_{Hebung}$.

WENN TON MASSGEBEND IST

Da die Konsolidation in der Mitte und an der Ecke gleich ist, ist die **Differenzsetzung** in ton-dominierten Profilen nur die Differenz der Sofortsetzung.

Aufgabe

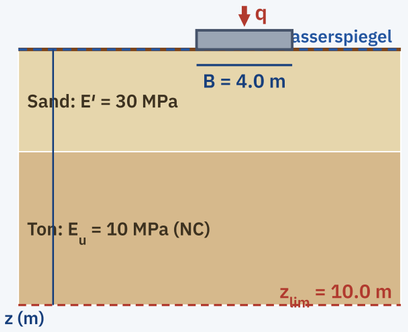
BEISPIEL

Gegeben

Profil	**Sand 0–4 m:** $E' = 30\ \mathrm{MPa},\ \nu' = 0.30,\ \gamma_{sat} = 19$ · **Ton 4–10 m (NC):** $E_u = 10\ \mathrm{MPa},\ \nu = 0.5,\ e_0 = 1.0,\ C_c = 0.30,\ C_v = 2\ \mathrm{m^2/Jahr},\ \gamma_{sat} = 18$
Fundament	**4 × 6 m flexibles Rechteck, $q = 150\ \mathrm{kPa}$, an der Geländeoberfläche; Grundwasserspiegel an der Oberfläche; Berechnungstiefe 10 m (Basis des Profils)**
Vorherige Beispiele	**S_e: Mitte 30.7, Ecke 13.2 mm; S_c = 150.2 mm (Beispiele 1 und 2)**

GESUCHT

Mitte, Ecke, starr Gesamtsetzung; Setzungsunterschied; Anteil der Sofortsetzung.



Lösung

LÖSUNG

1 Summen

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

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

	S_e (mm)	S_c (mm)	Gesamt (mm)
Mittelpunkt (elastisch)	30.7	150.2	**181.0**
Ecke (elastisch)	13.2	150.2	**163.4**
starr	28.6	150.2	**178.8**

Die Sofortsetzung beträgt nur **17 %** der Gesamtsetzung; die Setzungsdifferenz ist 17.5 mm. Da die Konsolidation des Tons in der Mitte und an der Ecke gleich ist, setzt sich die Ecke um 90 % der Mitte.

Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Aufgabe

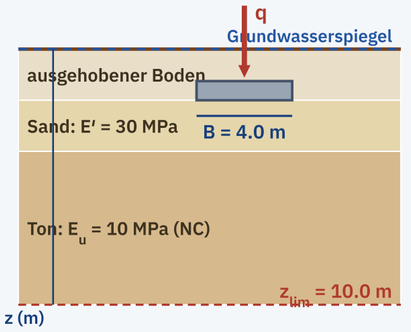
BEISPIEL

Gegeben

Profil	**Sand 0–4 m ($E' = 30,\ \nu' = 0.30,\ \gamma_{sat} = 19$) · Ton 4–10 m (NC; $E_u = 10,\ e_0 = 1.0,\ C_c = 0.30,\ C_s = C_r = 0.06,\ \gamma_{sat} = 18$); Grundwasserspiegel an der Oberfläche**
Aushub	**breite Baugrube (I_{exc} = 1), Tiefe 2 m; an der Baugrubensohle der Gründung**
Fundament	**4 × 6 m, $q_{gross} = 150\ \mathrm{kPa}$; Berechnungstiefe 10 m**
Lamellen	**Sand 2–4 m (H = 2 m), Ton 4–10 m (z = 7 m, f = 3 m)**

GESUCHT

q_{net}, S_e; das Schwellen des Tons und S_c; Gesamtsetzung (gespeichert und zurückgesetzt).



Lösung (1/3)

LÖSUNG

1 Netto-Sohlpressung: $q_{Auftr} = \sigma'_{v0}(2\ m) = 9.19(2) = 18.38$ kPa

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

2 Sofortsetzung: Sand (z′ 0–2 m) k = 0.003992; Ton (z′ 2–8 m) k = 0.009872 ($k = q_{net}(1 - \nu^2)/E$)

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

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

Der nette Aushubdruck sank von 150 auf 131.6 kPa; die Sofortsetzung von 30.7 auf **31.5 mm** (die oberen 2 m Sand wurden ausgehoben, der Ton wurde geringer belastet).

Lösung (2/3)

LÖSUNG

3 Ton: Spannungspfad (z′ = 5 m: I_z = 0.3204)

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

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

4 NC-Ton ($\sigma'_p = \sigma'_{v0}$): S_b hebt das Schwellen wieder auf, S_v ist die Erstbelastungskonsolidation

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

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

Lösung (3/3)

LÖSUNG

	S_e (mm)	S_c (mm)	Hebung (mm)	Gesamt (mm)
ohne Baugrube (Beispiel 3)	30.7	150.2	0	**181.0**
ausgehoben, **erhalten** (aus dem ursprünglichen Baugrund)	31.5	182.1	-27.8	**185.8**
ausgehoben, **auf null gesetzt** (von der aufgehobenen Sohle aus)	31.5	182.1	—	**213.6**

Die vom ursprünglichen Gelände aus gemessene Gesamtsetzung beträgt **185.8 mm** (S_e + S_c + Hebung); vom gehobenen Niveau aus gemessen sind es **213.6 mm**. Die Differenz entspricht der Hebung (27.8 mm).

Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Sofortsetzung unmittelbar, Konsolidation mit der Zeit

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 ist **sofort** vorhanden (t = 0^+); die Konsolidation schreitet in jeder bindigen Schicht mit ihrem eigenen C_v und H_{dr} fort: H_{dr} = H (einseitige Dränage) oder H/2 (beidseitige Dränage).

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

Die Kurve ist die Summe der Schichtkurven; die Werte t_{50} und t_{90} des Systems werden aus dieser Summe abgelesen. In einem Profil ohne bindige Schicht gibt es keine Zeitkurve: Die gesamte Setzung ist sofortig.

Bei der Option „beibehalten“ beginnt die Kurve bei Nullhebung und endet bei der Nettoverformung.

SAND + TON

Sand setzt sich sofort; **die Form der Zeit-Setzungskurve bestimmt der Ton.**

Aufgabe

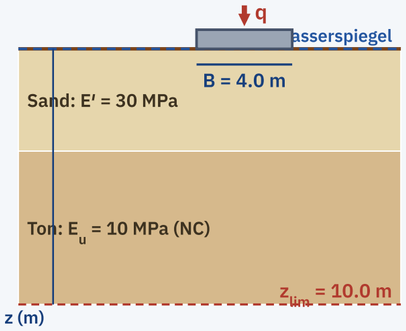
BEISPIEL

Gegeben

Profil	**Sand 0–4 m:** $E' = 30\ \mathrm{MPa},\ \nu' = 0.30, \gamma_{sat} = 19$ · **Ton 4–10 m (NC):** $E_u = 10\ \mathrm{MPa},\ \nu = 0.5, e_0 = 1.0,\ C_c = 0.30,\ C_v = 2\ \mathrm{m^2/Jahr}, \gamma_{sat} = 18$
Fundament	**4 × 6 m flexibles Rechteck, $q = 150\ \mathrm{kPa}$, an der Geländeoberfläche; Grundwasserspiegel an der Oberfläche; Berechnungstiefe 10 m (Basis des Profils)**
Vorherige Beispiele	**S_e = 30.7 mm (Beispiel 1); S_c = 150.2 mm (Beispiel 2); kein Aushub**
Dränage	**Der Ton dräniert oben (Sand) und unten (steife Basis): beidseitige Dränage, H = 6 m**
Zeiten	**t = 0.25; 0.5; 1; 2; 4; 8 Jahre**

GESUCHT

H_{dr}, t_{50}, t_{90} und S(t); Setzung bei t = 0^+.



Lösung (1/2)

LÖSUNG

1 Dränweg und Zeiten (C_v = 2 m²/Jahr)

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

2 Anfangs- und Endsetzung

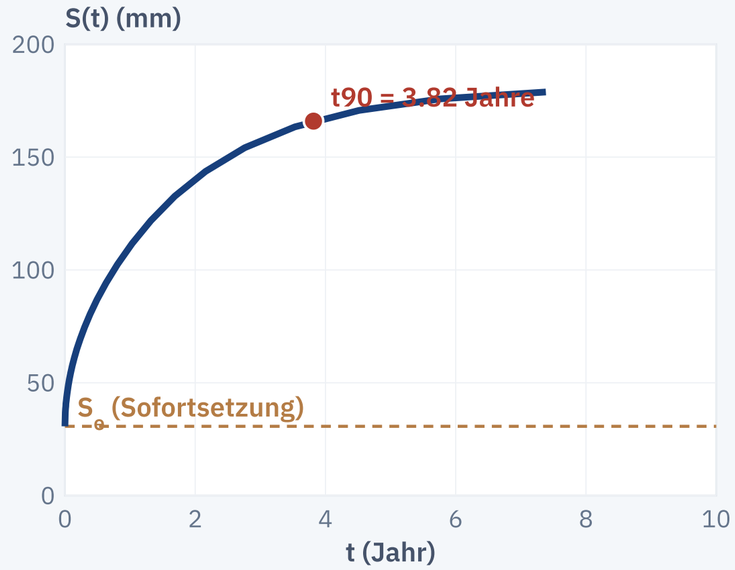
$$S(0^+) = S_e = 30.7\ \text{mm} \qquad S(\infty) = S_e + S_c = 30.7 + 150.2 = \mathbf{181.0\ mm}$$

Sofort nach dem Aufbringen der Last beträgt die Setzung 30.7 mm (17 % der Gesamtsetzung); 90 % der Konsolidation des Tons sind nach **3.82 Jahren** abgeschlossen.

Lösung (2/2)

LÖSUNG

t (Jahr)	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**



Die Gesamtsetzung beträgt nach 1 Jahr 110 mm (61 % des Endwerts) und nach 4 Jahren 167 mm (92 %). Die Kurve beginnt mit der Sofortsetzung und steigt mit der Konsolidation des Tons an.

Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Aufgabe

BEISPIEL

Gegeben

Profil	**nur Ton, 0–6 m (NC):** $E_u = 10\ \mathrm{MPa}$, $e_0 = 1.0$, $C_c = 0.30$, $\gamma_{sat} = 18$; **Grundwasserspiegel an der Geländeoberfläche**
Fundament	**4 × 6 m,** $q = 150\ \mathrm{kPa}$**, kein Aushub; Berechnungstiefe 6 m (Unterseite des Profils)**
Vergleich	**Module Elastische Setzung (bindig) + Konsolidation**

GESUCHT

Vergleichen Sie S_e, S_c und die Summe aus dem Modul Gesamtsetzung mit den Ergebnissen der beiden Module für die einzelnen Setzungsarten.

Lösung

LÖSUNG

Modul	S_e (mm)	S_c (mm)	Gesamt (mm)
Elastische Setzung: bindiger Boden	35.3	—	—
Konsolidation	—	591.6	—
Summe der beiden Elastizitätsmoduln	35.3	591.6	**626.9**
Gesamtsetzung (2D)	35.3	591.6	**626.9**

Das Modul Gesamtsetzung ist bei einem Profil aus einer Bodenschicht **exakt identisch** mit der Summe der beiden Module (626.9 mm). Die Ecksumme beträgt 601.5 mm ($S_{e,Ecke}$ = 9.9 + S_c), das starre Fundament 624.4 mm.

Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Aufgabe

BEISPIEL

Gegeben

Profil	**Auffüllung, sandig 0–2 m (E = 12 MPa) · Ton-1 2–7 m (E_u = 8 MPa; C_c = 0.25; OCR = 1.6) · Sand 7–11 m (E = 35 MPa) · Ton-2 11–20 m (E_u = 15 MPa; C_c = 0.30; OCR = 1.3) · kiesiger Sand 20–30 m (E = 70 MPa)**
Fundament, Baugrube	**10 × 15 m, q_{brutto} = 120 kPa; Aushubtiefe 2 m (Aushubplan = Fundament); Grundwasserspiegel 2 m**
Bemessungstiefe	**Einflusstiefe, p = 10%**
Ergebnis	**Beispielprojekt des Moduls Gesamtsetzung**

GESUCHT

S_e und S_c Schicht für Schicht, Hebung; Mittelpunkt, Ecke, starre Gesamtsetzung; t_{50} und t_{90}.

Lösung (1/2)

LÖSUNG

1 Aushub- und Berechnungstiefe

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

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

Die Auffüllung (0–2 m) wird durch Aushub entfernt; die Berechnung umfasst vier Schichten von 2 m bis z_{lim} = 27.5 m. Die letzte Schicht (kiesiger Sand) wird durch z_{lim} abgeschnitten; der Beitrag tieferer Schichten ist gering.

Lösung (2/2)

LÖSUNG

Schicht	z (m)	S_e (mm)	S_c (mm)	Hebung (mm)	Summe = S_e + S_c + Hebung (mm)
Ton-1 (CL, weich)	2.0 – 7.0	20.8	198.4	-62.6	156.6
Sand (SM, mitteldicht)	7.0 – 11.0	5.6	—	—	5.6
Ton-2 (CH, hart)	11.0 – 20.0	14.1	27.0	-6.5	34.6
Kiesiger Sand (dicht)	20.0 – 27.5	1.2	—	—	1.2
Gesamt (Mitte)		**41.7**	**225.4**	**-69.1**	**198.0**

Mitte **198.0 mm** = S_e 41.7 + S_c 225.4 – Schwellung 69.1 (bleibt erhalten); Ecke 168.7 mm, starr 195.1 mm. Zeit: t_{50} = 0.72 Jahre, t_{90} = 3.71 Jahre. Das Modul liefert dieselben Werte.

Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Was bei der Interpretation der Ergebnisse zu beachten ist

THEORIE

Gründungssohle = Baugrubensohle; gleichmäßige Pressung bei vollständig flexiblem Fundament; starres Fundament ≈ 0.93 × des Wertes eines flexiblen Fundamentes in der Mitte.

Sofortsetzung: in jeder Schicht die Spannungen des homogenen Halbraums (mit der jeweiligen ν); bindige Schicht undräniert (ν = 0.5), nichtbindige Schicht dräniert; keine Einbindungskorrektur ($I_f = 1$).

Konsolidation: eindimensional nach Terzaghi; hydrostatischer Porenwasserdruck, der Grundwasserspiegel wird durch die Baugrube nicht beeinflusst; σ'_p ist die größte Spannung der Vergangenheit, sie nimmt durch die Baugrube nicht ab; der Spannungszuwachs wird in der Vertikalen unterhalb der Mitte angesetzt.

Setzung positiv, Hebung negativ; der Umschalter im Kopf kehrt es um (die Berechnungslogik bleibt klassisch).

Nicht Gegenstand: Sekundärsetzung, Konsolidation von nichtbindigen Schichten, Diagramme nach Schmertmann sowie SPT/CPT-Diagramme, mit der Tiefe innerhalb einer Schicht zunehmender Steifemodul (Schicht unterteilen), Fundamentsteifigkeit und Boden–Bauwerk-Interaktion, 2D/3D-Konsolidation, Finite Elemente, Grundbruch, Bodenverflüssigung.

Zusammenfassung

Die wichtigsten Punkte

$S = S_e + S_c$: bindige Schicht = undränierte Sofortsetzung + Konsolidation; nichtbindige Schicht = nur dränierte elastische Setzung

Sofortsetzung (Steinbrenner): $\Delta S_e = q_{net}\ \alpha\ B'\ (1 - \nu^2)/E \cdot [I_s(z_{unten}) - I_s(z_{oben})]$; $q_{net} = q_{brutto} - \sigma'_{v0}(D_{Aushub})$

Konsolidation: Spannungspfad $\sigma'_{v0} \rightarrow \sigma'_{exc} \rightarrow \sigma'_{v0} \rightarrow \sigma'_p \rightarrow \sigma'_{end}$ (C_s, C_r, C_c); bei normalkonsolidiertem Ton $S_c = C_c\ f\ \log(\sigma'_{end}/\sigma'_{v0})$

Mitte $S_e + S_c$; **Ecke** $S_{e,Ecke} + S_c$; **starr** $0.93\ S_e + S_c$; Differenzsetzung = Differenz der sofortigen Anteile

Baugrube: der sofortige Anteil mit q_{net}, der Ton mit Schwellen + Wiederbelastung; „bleibt erhalten“ $S = S_e + S_c + S_{Schwellen}$, „wird zurückgesetzt“ $S_e + S_c$

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

Bei einem Bodenprofil mit nur einer Bodenschicht ist das Ergebnis **exakt dasselbe** wie im Modul Sofortsetzung oder Konsolidation

Literatur

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

Das, B.M. (2018). Principles of Geotechnical Engineering, 9th ed. Cengage — Kap. 10–11 (Spannungszuwachs, Konsolidationssetzung, Zeitverlauf).

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.

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

Das eigene geschichtete Profil aus Ton und Sand in GeoTerva aufbauen; das Modul liefert die Setzung und die Zeit-Setzungs-Kurve gemeinsam.

Modul öffnen →

Theorieseite →

Auf dem Smartphone öffnen

Die Beispielmodule erfordern keine Registrierung.

Falls Sie sie in Ihren Vorlesungen verwenden möchten: info@geoterva.com