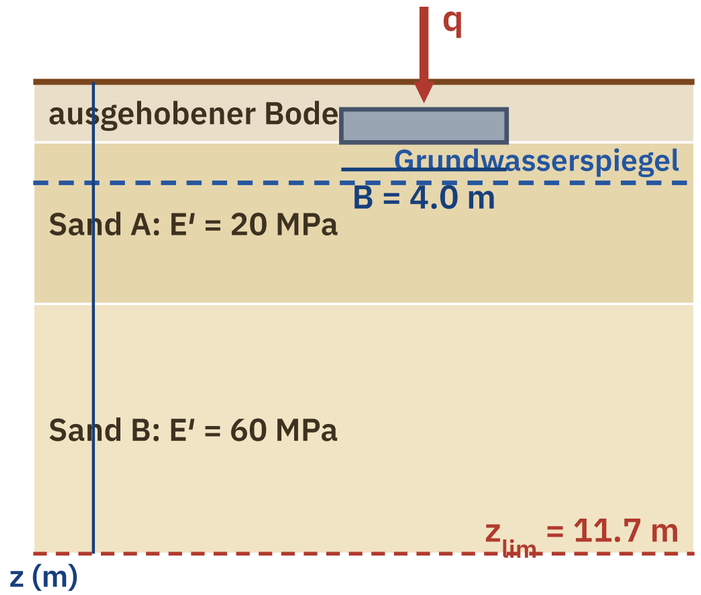
Geotechnische Vorlesungspräsentation · Setzungen

Elastische Setzung: nichtbindiger Boden

Vorlesung: von der Elastizitätstheorie zu den Steinbrenner-Beiwerten, vom geschichteten Profil zum flexiblen und starren Fundament; Sand- und Kiesschichten verhalten sich dräniert (E′, ν′); zu jedem Thema ein Rechenbeispiel.

- Hookesches Gesetz
- Beiwerte nach Steinbrenner
- Geschichtetes Profil
- Nettodruck
- Elastisches und starres Fundament
- Rechenbeispiele



Einführung

Was lernen wir in dieser Vorlesung?

Vom Hooke'schen Gesetz zum Setzungsintegral: $\varepsilon_z = [\Delta\sigma_z - \nu(\Delta\sigma_x + \Delta\sigma_y)]/E$ und $S = \int \varepsilon_z \, dz$

Die **Steinbrenner-Beiverte** (F_1, F_2, I_s) zu berechnen und die Setzung eines Rechteckfundaments in **der Mitte** und an der **Ecke** zu ermitteln

Granulare Schichten **dräniert** zu behandeln: $E'/p_a = \alpha\, N_{60}$, $\nu' \approx 0.25–0.35$

Das **geschichtete Profil** mit der Differenz $I_s(z_u) - I_s(z_o)$ zu summieren

Die **Netto-Spannung** (Aushubwirkung) und die **Berechnungstiefe** (Einflusstiefe) zu bestimmen

Flexible und **starre** Fundament setzung unterscheiden können (starr ≈ 0.93 × flexibel in der Mitte)

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

Beispielfundament: 4 m × 6 m flexibles Rechteckfundament, q = 180 kPa, Aushubtiefe 1.5 m, Grundwasserspiegel 2.5 m; Sandschicht. Die Setzungen sind in mm angegeben.

Was berechnet dieses Modul?

THEORIE

Dieses Modul behandelt **nur granulare** Schichten (Sand, Kies) und berechnet die **elastische Setzung**: Da Sand sein Wasser sofort abgibt, ist seine Setzung vollständig elastisch.

Aus den **Boussinesq**-Spannungen des belasteten Bodens wird die Verzerrung **nach dem Hookeschen Gesetz** ermittelt, und das Integral der Verzerrung ist die Setzung.

Die Sofortsetzung bindiger Schichten findet sich im Modul Elastische Setzung, die Konsolidation im Modul Konsolidation und die Summe aller Anteile im Modul Gesamtsetzung.

Die Lösung erfolgt **analytisch**: geschlossene Einflussbeiwerte und schichtweises Aufsummieren; keine finiten Elemente.

Darüber hinaus: das Verfahren nach Schmertmann, SPT/CPT-Tafeln, mit der Tiefe zunehmender Steifemodul (Mayne–Poulos), Fundamentsteifigkeit und Boden–Bauwerk-Interaktion.

SCHICHTTYP

	Nichtbindig
Verhalten	dräniert
E	E' (z. B. $\alpha\, N_{60}$)
v	0.25 – 0.35

Hookesches Gesetz und Setzungsintegral

THEORIE

Unter einem **vollständig biegeweichen** Fundament, das die Netto-Bodenpressung q_{net} überträgt, ist der Baugrund ein halbunendliches, homogenes elastisches Medium (Boussinesq-Spannungen). Das Hooke'sche Gesetz liefert die vertikale Dehnung, deren Integral die Setzung ergibt:

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

Die Seitenspannungen hängen von v ab; daher ändern sich Verformung und Setzung mit **sowohl E als auch v**.

Mit zunehmendem v **verringern** die Seitenspannungen die vertikale Verformung: bei gleichem E′ setzt sich ein Boden mit v = 0.5 weniger als einer mit v = 0.3.

Die Setzung ist zu E **umgekehrt proportional**: Eine Verdopplung des Moduls halbiert die Setzung.

BEZEICHNUNGEN

q_{net}: Netto-Sohlpressung (nach dem Aushub aufgebracht)

$\Delta\sigma_z$, $\Delta\sigma_x$, $\Delta\sigma_y$: Spannungszuwächse

E, v: elastische Konstanten der Schicht

ε_z: vertikale Dehnung (Zusammendrückung +)

Aufgabe

BEISPIEL

Gegeben

Spannungszuwachs	$\Delta\sigma_z = 100\ \mathrm{kPa},\ \Delta\sigma_x = \Delta\sigma_y = 40\ \mathrm{kPa}$
Baugrund	$E' = 20\ \mathrm{MPa},\ \nu' = 0.30$
Lamelle	**Dicke 1.0 m**

GESUCHT

Die vertikale Verformung und die Zusammendrückung der Lamelle bestimmen; mit der Annahme v = 0 (eindimensional) vergleichen.

Lösung

LÖSUNG

1 Vertikale Dehnung

$$\varepsilon_z = \frac{\Delta\sigma_z - \nu(\Delta\sigma_x + \Delta\sigma_y)}{E} = \frac{100 - 0.30(40 + 40)}{20{,}000} = \frac{76.0}{20{,}000} = \mathbf{0.00380}$$

2 Zusammendrückung der Lamelle (H = 1.0 m)

$$\Delta S = \varepsilon_z H = 0.00380(1.0) = \mathbf{3.80}\ \text{mm}$$

3 Vergleich: v = 0

$$\varepsilon_z = \frac{100}{20{,}000} = 0.00500 \ \Rightarrow\ \Delta S = 5.00\ \text{mm}$$

Seitliche Spannungen (v = 0.30) verringern die Verformung um **24 %**: 3.80 mm gegenüber 5.00 mm bei eindimensionaler Betrachtung.

Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Geschlossene Lösung für die Ecke

THEORIE

Für die **Ecke** eines gleichmäßig belasteten Rechtecks existiert eine geschlossene Lösung des Integrals (Steinbrenner):

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

$$F_1 = \frac{A_0 + A_1}{\pi} \qquad F_2 = \frac{n'}{2\pi}\tan^{-1} A_2$$

m′ = L′/B′ und n′ = z/B′ (B′ ist die kurze Seite des Eckrechtecks). Die **Mitte** ist die Ecke von vier (B/2 × L/2)-Rechtecken: α = 4, B′ = B/2. Die **Ecke** ist die Ecke des gesamten Rechtecks: α = 1, B′ = B. Jeder andere Punkt ist die vorzeichenrichtige Summe der vier Rechtecke, die an diesem Punkt eine Ecke haben.

> Für v = 0.5 ist (1 − 2v) = 0: **$I_s = F_1$** und (1 − v²) = 0.75.

BEZEICHNUNGEN

α: Anzahl der Eckrechtecke (4 in der Mitte, 1 an der Ecke)
B′: kurze Seite des Eckrechtecks
m′ = L′/B′, n′ = z/B′
z: Tiefe ab der Fundamentebene
I_s: Formbeiwert

A_0, A_1, A_2 und die Lamellengrenze

THEORIE

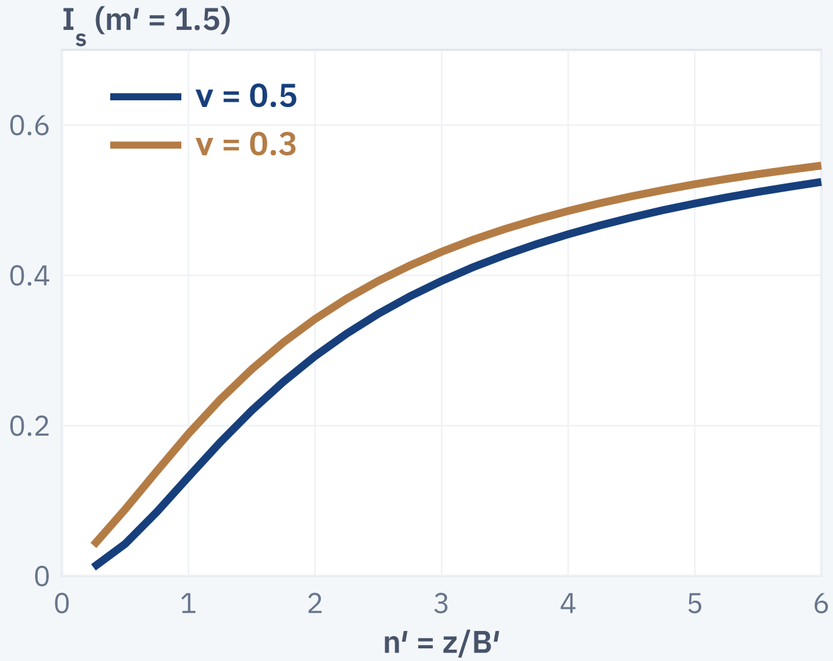
$$A_0 = m' \ln \frac{\left(1+\sqrt{m'^2+1}\right)\sqrt{m'^2+n'^2}}{m'\left(1+\sqrt{m'^2+n'^2+1}\right)}$$

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

Streifen ($m' \to \infty$): $F_1 = \ln(1+n'^2)/2\pi$ und $F_2 = (n'/2\pi)\tan^{-1}(1/n')$; an seinem Rand $\alpha = 2$, $B' = B$.

Die Formeln werden direkt berechnet; Tafeln oder gerundete Tabellen sind nicht erforderlich.

I_s wächst mit der Tiefe und **sättigt langsam**: der Beitrag tiefer Schichten ist begrenzt (seitlich $m' = 1.5$).



Aufgabe

BEISPIEL

Gegeben

Fundament	**B × L = 4 × 6 m, in der Tiefe z′ = 4 m unter der Mitte (ab Gründungssohle)**
Eckrechteck	**B/2 × L/2 = 2 × 3 m ⇒ B′ = 2 m, m′ = 1.5, n′ = z′/B′ = 2.0**
Baugrund	$\nu' = 0.30$

GESUCHT

Die Werte von **A_0, A_1, A_2, F_1, F_2** und **I_s** bestimmen.

Lösung

LÖSUNG

1 A_0, A_1, A_2 (Quadratwurzeln: $\sqrt{(m'^2+1)} = 1.8028$; $\sqrt{(m'^2+n'^2)} = 2.5000$; $\sqrt{(m'^2+n'^2+1)} = 2.6926$)

$$A_0 = 1.5 \ln \frac{(1+1.8028)(2.5000)}{1.5(1+2.6926)} = \mathbf{0.3527} \qquad A_1 = \ln \frac{(1.5+1.8028)\sqrt{5}}{1.5+2.6926} = \mathbf{0.5662}$$

$$A_2 = \frac{1.5}{2(2.6926)} = \mathbf{0.2785}$$

2 F_1, F_2 und I_s

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

$$I_s = F_1 + \frac{1-2(0.30)}{1-0.30} F_2 = \mathbf{0.3419}$$

$I_s = F_1 + 0.5714\, F_2 =$ **0.3419**; wäre $\nu' = 0.5$, so bliebe $F_1 = 0.2925$ (14 % weniger).

Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Dränierter Elastizitätsmodul E′ und ν′

THEORIE

Da Sand sein Wasser sofort abgibt, verhält er sich dräniert; seine Setzung ist vollständig elastisch. In der Quelle (Das) wird der Elastizitätsmodul des Sandes aus der SPT-Schlagzahl mit **$E'/p_a = \alpha\, N_{60}$** ermittelt ($p_a \approx 100$ kPa):

$$\frac{E'}{p_a} = \alpha\, N_{60} \qquad \alpha = 5\ (\text{feinkörniger Sand})\ \ 10\ (\text{reiner NC})\ \ 15\ (\text{reiner OK})$$

Der Elastizitätsmodul von Sand **nimmt** mit der Tiefe zu: Eine dicke Schicht wird in mehrere Schichten mit ansteigendem E′ unterteilt.

ν′ liegt üblicherweise bei 0.25–0.35; es muss ν′ < 0.5 gelten (für eine granulare Schicht kann ν′ ≥ 0.5 nicht eingegeben werden).

Die elastische Setzung ändert sich ebenfalls mit ν′: Sie nimmt ab, wenn ν′ zunimmt.

α FÜR SAND

α	E′ (N_{60} = 20)
5	10 MPa
10	20 MPa
15	30 MPa

Aufgabe

BEISPIEL

Gegeben

Sand	$N_{60} = 20$, $p_a = 100\ \mathrm{kPa}$; $\alpha = 5,\ 10,\ 15$
Querdehnzahl v	$\nu' = 0.25;\ 0.30;\ 0.35$ **(E′ = 20 MPa)**
Literatur	**Setzung der Einzelschicht für α = 10, v′ = 0.30: S = 29.0 mm (Beispiel 6)**

GESUCHT

Für jedes α **E′**; Setzung für v′ = 0.25, 0.30, 0.35 und 0.5.

Lösung

LÖSUNG

1 E' = α N_{60} p_a (N_{60} = 20; p_a = 100 kPa)

$$E' = \alpha\, N_{60}\, p_a: \quad 5(20)(0.1) = \mathbf{10}\ \text{MPa},\ \ 10(20)(0.1) = \mathbf{20},\ \ 15(20)(0.1) = \mathbf{30}\ \text{MPa}$$

v′	0.25	0.30	0.35	0.50
S (mm)	30.1	29.0	27.7	22.8
$S / S_{v'=0.30}$	1.038	1.000	0.955	0.786

Ändert sich E′ von 10 → 30 MPa, so geht die Setzung von 58 → 19 mm (umgekehrt proportional). v′ von 0.25 → 0.35 verändert die Setzung nur um 8%; bei v′ = 0.5 wäre sie um 21% geringer.

Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Der Aushub hebt zuerst die Last auf

THEORIE

Der Aushub hebt die **wirksame Überlagerungsspannung** in Höhe der Baugrubensohle auf (Grundwasserspiegel unverändert). Wird ein einziges Modul sowohl für die Entlastung als auch für die Wiederbelastung verwendet, so wird die elastische Hebung des Aushubs bei der Wiederbelastung zurückgewonnen; die Sofortsetzung wird durch die **Netto-Bodenpressung** bestimmt:

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

$\sigma'_{v0}(D_{exc})$: wirksame vertikale Überlagerungsspannung in Höhe der Baugrubensohle (γ oberhalb des Grundwasserspiegels, $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$ unterhalb).

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

Wenn kein Aushub erfolgt, gilt $q_{net} = q_{gross}$ (die Pressung wird an der Geländeoberfläche aufgebracht).

NEDEN NET?

Die Last in Höhe des beim Aushub entfernten Bodengewichts wird beim Bau des Fundaments **zurückgegeben**. Die Setzung des Bodens entsteht nur aus dem Druck, der **zusätzlich zu** dieser Last **aufgebracht wird**.

Aufgabe

BEISPIEL

Gegeben

Last	$q_{gross} = 180\ \mathrm{kPa}$; **Aushubtiefe** $D_{exc} = 1.5\ \mathrm{m}$
Baugrund	$\gamma = 18.5\ \mathrm{kN/m^3},\ \gamma_{sat} = 19.5\ \mathrm{kN/m^3}$
Grundwasserspiegel	**(a) 2.5 m (unter der Baugrubensohle) · (b) 1.0 m (über der Baugrubensohle)**

GESUCHT

In jedem Fall sind die Werte $\sigma'_{v0}(D_{exc})$ und q_{net} zu ermitteln.

Lösung

LÖSUNG

1 (a) Grundwasserspiegel 2.5 m > 1.5 m: kein Wasser an der Baugrubensohle

$$\sigma'_{v0} = \gamma D_{exc} = 18.5(1.5) = 27.75\ \text{kPa} \ \Rightarrow\ q_{net} = 180 - 27.75 = \mathbf{152.25}\ \text{kPa}$$

2 (b) Grundwasserspiegel bei 1.0 m: Baugrubensohle liegt 0.5 m unter dem Wasser (γ′ = 19.5 − 9.81 = 9.69 kN/m³)

$$\sigma'_{v0} = 18.5(1.0) + 9.69(0.5) = 23.345\ \text{kPa} \ \Rightarrow\ q_{net} = 180 - 23.345 = \mathbf{156.66}\ \text{kPa}$$

Liegt der Grundwasserspiegel über der Baugrubensohle, verringert sich die entfernte wirksame Spannung, und die Nettopressung **steigt** von 152.2 auf 156.7 kPa: Ein hoher Grundwasserspiegel vergrößert die Sofortsetzung.

Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Einflusstiefe: $\Delta\sigma = p \cdot q$

THEORIE

Der Spannungszuwachs unter der Last nimmt mit der Tiefe ab, wird aber nicht null; für die Summe ist eine untere Grenze erforderlich: **die Berechnungstiefe z_{lim}**. Das Modul bietet zwei Regeln:

Einflusstiefe: die Tiefe unter der Mitte, in der der Spannungszuwachs nach Boussinesq auf **p** der aufgebrachten Pressung abfällt (üblich p = 10 %): $I(z') = p$ und $z_{lim} = D_f + z'$.

Sohle des Profils: Die Berechnung endet in der letzten Schicht (eine starre Sohle wie Fels oder dichter Kies; die Schicht mit starrer Sohle nach Steinbrenner).

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

$$I = \frac{\Delta\sigma_z}{q} = 4\, I_{corner}(m, n) \qquad m = \frac{B}{2z'},\ n = \frac{L}{2z'}$$

z′/B (p = %10 | %20)

L/B	p = %10	p = %20
1.0	2.09 B	1.40 B
1.5	2.55 B	1.70 B
2.0	2.92 B	1.94 B
5.0	4.33 B	2.68 B
Streifen	6.34 B	3.13 B

Aufgabe

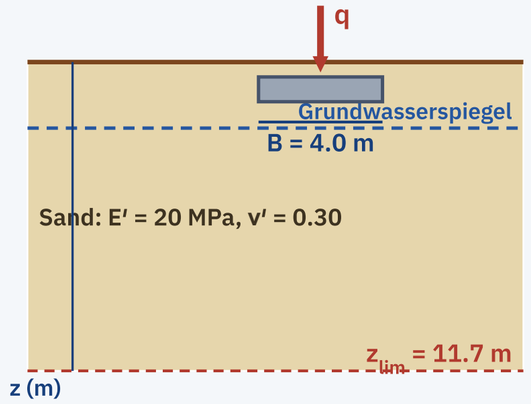
BEISPIEL

Gegeben

Fundament	**B × L = 4 × 6 m (L/B = 1.5), an der Baugrubensohle; D_f = 1.5 m**
Regel	**Einflusstiefe, p = 10% (I = 0.10)**
Formel	$I = 4\, I_{corner}(m, n),\ m = B/2z',\ n = L/2z'$

GESUCHT

z′ und **z_{lim}**; der Wert von I für z′ = 4 m und 10.19 m.



Lösung

LÖSUNG

1 z′ = 4 m: m = 2/4 = 0.5; n = 3/4 = 0.75

$$I = 4\,I_{corner}(0.5;\ 0.75) = 4(0.1071) = \mathbf{0.4283}$$

2 Bedingung I = 0.10: durch Halbierung

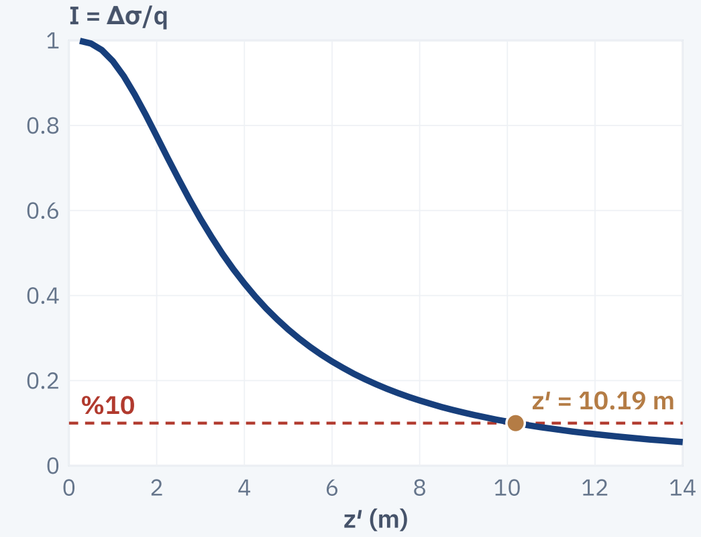
$$z' = \mathbf{10.19}\ \mathrm{m} \quad (= 2.55\,B)$$

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

3 Nachweis: z′ = 10.19 m ⇒ m = 2/z′, n = 3/z′

$$m = 0.1963,\ n = 0.2945$$

$$I = 4(0.0250) = \mathbf{0.1000}$$



Bis zu einer Tiefe von 10.19 m (2.55 B) wird aufsummiert; darüber liegt der Bereich mit weniger als 10 % des Drucks. Beim quadratischen Fundament 2.09 B, beim Streifenfundament 6.34 B: **ein breites Fundament wirkt tiefer.**

Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Beitrag der Schicht: Differenz von I_s

THEORIE

Eine Schicht zwischen z_{oben} und z_{unten} (von der Gründungssohle aus) trägt die **Differenz der Lösung für das halbunendliche Medium zwischen zwei Tiefen** bei, mit ihrem eigenen E und v:

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

Dies ist das Integral der Hooke'schen Verformung über die Schicht (mit den Spannungen des homogenen Halbraums): für diese Annahme ist es **exakt**; das Ergebnis hängt nicht von der Lamellendicke Δz ab (die Lamellen dienen nur den Tabellen und den Farbflächen).

Es ersetzt den **gewichteten mittleren Steifemodul** in der Formel für die Einzelschicht.

Eine Schicht, deren Steifigkeit mit der Tiefe zunimmt, sollte in mehrere Schichten unterteilt werden.

GESAMT

Die Setzung des Profils ist die **Summe** der Schichtbeiträge bis z_{lim}: $S = \Sigma\,\Delta S_i$. Von jeder Schicht wird nur der Teil zwischen der Gründungssohle und z_{lim} berücksichtigt.

Aufgabe

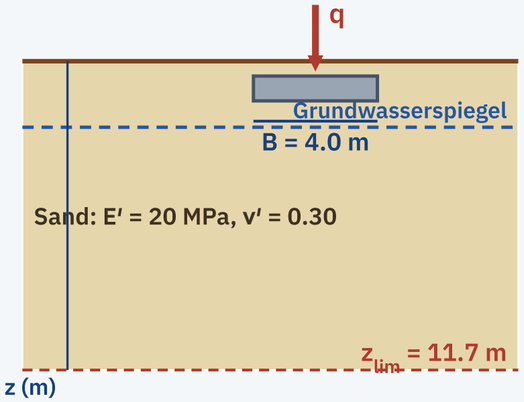
BEISPIEL

Gegeben

Fundament	**rechteckig, B × L = 4 × 6 m, Gründungstiefe D_f = 1.5 m (Baugrubensohle)**
Last	$q_{gross} = 180\ \mathrm{kPa}$ **(elastisches Fundament, gleichförmige Pressung)**
Baugrund	**einschichtiger Sand:** $E' = 20\ \mathrm{MPa},\ \nu' = 0.30,\ \gamma = 18.5\ \mathrm{kN/m^3}$**; Grundwasserspiegel 2.5 m**
Bemessungstiefe	**Einflusstiefe, p = 10 % (Beispiel 5): z′ = 10.19 m, z_{lim} = 11.69 m; die Schicht reicht bis zu dieser Tiefe**

GESUCHT

Mittensetzung S des elastischen Fundaments.



Lösung (1/2)

LÖSUNG

1 Netto-Sohldruck (Beispiel 4a) und Beiwert $k = q_{net}(1 - \nu^2)/E$

$$q_{net} = 152.25\ \text{kPa} \qquad k = \frac{q_{net}(1-\nu^2)}{E} = \frac{152.25(0.91)}{20{,}000} = 0.006927\ (\text{dimensionslos})$$

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

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

$$F_1 = 0.4986,\ F_2 = 0.0441 \ \Rightarrow\ I_s = \mathbf{0.5239}$$

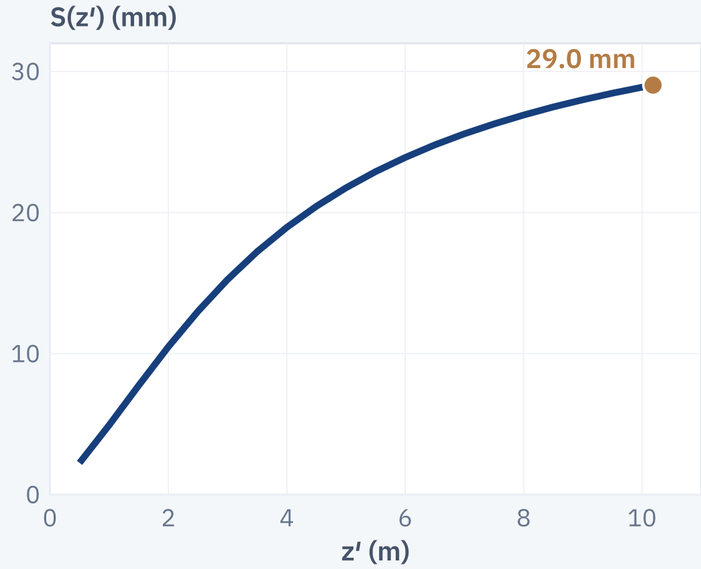
Lösung (2/2)

LÖSUNG

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

$$S = 0.006927\,(4)(2)(0.5239) = 0.006927(4.1909)$$
$$= 0.02903\ \mathrm{m} = \mathbf{29.0\ mm}$$

Setzung in der Mitte **29.0 mm**. Im Diagramm S(z′): der größte Teil der Setzung entsteht innerhalb der oberen 2B (8 m); der Beitrag der tieferen Schichten ist gering.



Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Aufgabe

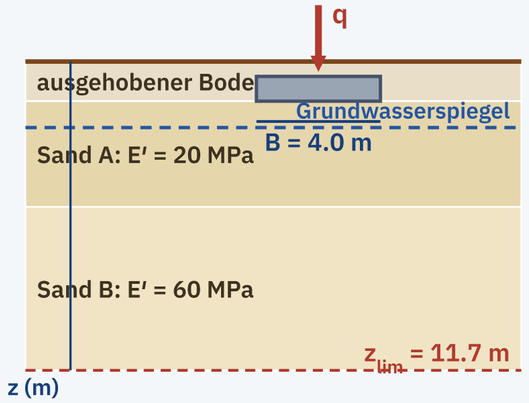
BEISPIEL

Gegeben

Fundament, Last	**B × L = 4 × 6 m, q_{gross} = 180 kPa, D_f = 1.5 m ⇒ q_{net} = 152.25 kPa**
Schicht A	**4 m Mächtigkeit ab Gründungssohle:** $E' = 20\ \mathrm{MPa}$
Schicht B	**darunter, bis z_{lim}:** $E' = 60\ \mathrm{MPa}$
Bemessungstiefe	**z'_{lim} = 10.19 m**

GESUCHT

Die **Setzung in der Schichtmitte** jeder Schicht sowie die Summe zu ermitteln; mit einer einzelnen Schicht zu vergleichen.



Lösung (1/2)

LÖSUNG

1 Schichtbeiwerte $k = q_{net}(1 - \nu^2)/E$ und $\alpha\, B'\, I_s$ (Mitte; Beispiel 2 und 6)

$$k_A = \frac{152.25(0.91)}{20{,}000} = 0.006927 \qquad k_B = \frac{152.25(0.91)}{60{,}000} = 0.002309$$

$$8\, I_s(z' = 4) = 8(0.3419) = 2.7351 \qquad 8\, I_s(z'_{lim}) = 4.1909$$

Wird das Profil in zwei Schichten unterteilt, so wird jede Schicht **mit ihrem eigenen Modul** über den Zuwachs von I_s in ihrem eigenen Bereich summiert.

Lösung (2/2)

LÖSUNG

2 Setzungen der Schichten und Summe

$$\Delta S_A = k_A (8I_s)_4 = 0.006927(2.7351) = 18.9\ \text{mm}$$

$$\Delta S_B = k_B \left[(8I_s)_{lim} - (8I_s)_4\right] = 0.002309(4.1909 - 2.7351) = 3.4\ \text{mm}$$

$$S = \Delta S_A + \Delta S_B = \mathbf{22.3\ mm}$$

Die gesamte Setzung in der Mitte beträgt **22.3 mm** (Berechnungsmodul: 22.3 mm). Der Einzelschichtfall (E = 20 MPa) ergab 29.0 mm: da die untere Schicht **steifer** ist, verringerte sich die Setzung um **23%**; die Schicht A trägt 85% der Gesamtsetzung.

Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Setzung in der Mitte, in der Ecke und bei starrem Fundament

THEORIE

Die Formeln liefern die Setzung eines **vollständig biegeweichen** Fundaments: **am größten in der Mitte**, am kleinsten in der Ecke; deren Differenz ist die **Differenzsetzung** des biegeweichen Fundaments. Ein starres Fundament setzt sich **gleichmäßig**: etwa das 0.93-Fache des Werts in der Mitte des biegeweichen Fundaments:

$$S_{rigid} \approx 0.93\, S_{center} \qquad S_{diff} = S_{center} - S_{köşe}$$

Mitte: α = 4, B′ = B/2. Ecke: α = 1, B′ = B (Ecke des gesamten Rechtecks).

Einbindung: Der Tiefenbeiwert I_f nach Fox (abhängig von D_f/B, B/L und ν) verringert die Setzung eines eingebundenen Fundaments. Das Modul setzt $I_f = 1$ an: keine Korrektur, **auf der sicheren Seite**.

HINWEIS

Ein reales Fundament liegt zwischen elastisch und starr. Das Modul liefert die beiden Extremwerte; Zwischensteifigkeiten und die Boden–Bauwerk-Interaktion sind nicht Gegenstand.

Aufgabe

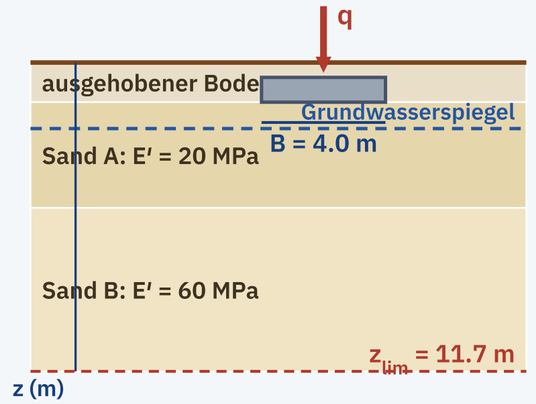
BEISPIEL

Gegeben

Profil	**Beispiel 7: Schicht A (4 m) und Schicht B; z'_{lim} = 10.19 m**
Fundament	**flexibel, 4 × 6 m**
Ecke	**α = 1, B′ = B = 4 m ⇒ m′ = L/B = 1.5; n′ = z′/4**

GESUCHT

Ecksetzung, Setzung eines **starren** Fundaments und **differentielle** Setzung eines flexiblen Fundaments.



Lösung

LÖSUNG

1 4·I_s-Werte für die Ecke (n′ = z′/4)

$$z' = 4\ (n' = 1):\ 4\,I_s = 0.7565$$

$$z'_{lim} = 10.19\ (n' = 2.547):\ 4\,I_s = 1.5865$$

2 Setzung an der Ecke

$$S_{köşe} = k_A(0.7565) + k_B(1.5865 - 0.7565) = 5.2 + 1.9 = \mathbf{7.2\ mm}$$

3 Starr und differenziell

$$S_{rigid} = 0.93(22.3) = \mathbf{20.7\ mm} \qquad S_{diff} = 22.3 - 7.2 = \mathbf{15.2\ mm}$$

Mitte 22.3, Ecke 7.2, starr 20.7 mm; die Differenzsetzung des flexiblen Fundaments beträgt **15.2 mm**. Die Ecke setzt sich nur zu 32 % der Mitte.

Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Aufgabe

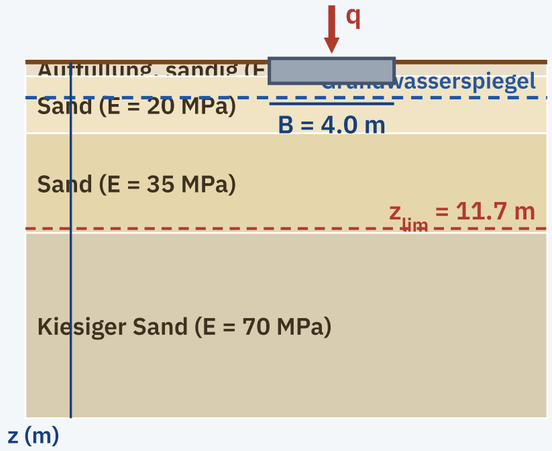
BEISPIEL

Gegeben

Fundament	**$B \times L = 4 \times 6$ m, $q_{gross} = 180$ kPa, Aushubtiefe 1.5 m, Grundwasserspiegel 2.5 m**
Profil	**Auffüllung, sandig 0–1 m: E′ = 8 MPa; Sand 1–5 m: E′ = 20 MPa; Sand 5–12 m: E′ = 35 MPa; kiesiger Sand 12–25 m: E′ = 70 MPa**
Bemessungstiefe	**Einflusstiefe, p = 10%**

GESUCHT

Schichtweise **mittige** und **Eck**-Setzung; elastische mittige, Eck-, starre und differentielle Setzung.



Lösung (1/2)

LÖSUNG

1 Netto-Sohlpressung (Baugrubensohle 1.5 m)

$$\sigma'_{v0}(1.5) = 27.25\ \text{kPa} \quad \Rightarrow \quad q_{net} = 180 - 27.25 = \mathbf{152.75}\ \text{kPa}$$

2 Berechnungstiefe und Schichten

$z_{lim} = 1.5 + 10.19 = \mathbf{11.69}\ \text{m}$ die Schicht über der Baugrubensohle wird entfernt

Die Baugrubensohle (1.5 m) liegt in der Sandschicht: Es wird nur der Teil der Schichten unterhalb von 1.5 m angesetzt. z_{lim} = 11.69 m, was innerhalb der Sandschicht bleibt, daher wird diese Schicht abgeschnitten.

Lösung (2/2)

LÖSUNG

Schicht	z (m)	H (m)	E (MPa)	k (×10⁻³)	ΔS Mitte (mm)	ΔS Ecke (mm)
Sand (SM, locker–mitteldicht)	1.50 – 5.00	3.50	20	6.950	17.3	4.6
Sand (SM, mitteldicht)	5.00 – 11.69	6.69	35	3.972	6.8	3.7
Summe					**24.1**	**8.3**

Mitte **24.1 mm**, Ecke 8.3 mm, starr 22.4 mm, differentiell 15.8 mm. Das Modul liefert dieselben Werte.

Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Was bei der Interpretation der Ergebnisse zu beachten ist

THEORIE

Annahmen:

- Fundamentebene = Baugrubensohle; gleichmäßige Pressung bei vollständig flexiblem Fundament.
- In jeder Schicht die Spannungen des **homogenen Halbraums** (mit der Querdehnzahl v dieser Schicht).
- Jede Schicht ist nichtbindig und setzt sich **dräniert** (E′, v′).
- Keine Einbindetiefenkorrektur; starres Fundament ≈ 0.93 × flexibles Zentrum.
- Vorzeichen: Setzung ist **positiv**; die Auswahl in der Kopfzeile wechselt auf die Konvention, bei der die Setzung nach oben positiv ist.

Nicht Gegenstand: Tonschichten; Schmertmann, SPT/CPT-Diagramme, mit der Tiefe zunehmender Steifemodul, Fundamentsteifigkeit und Boden–Bauwerk-Interaktion, finite Elemente.

FARBBEREICHE

Die Schnittansichten zeigen den Spannungszuwachs, den Elastizitätsmodul, die Verformung und die Setzung S(z) mit Farbbändern; der Mittenwert in Höhe der Fundamentsohle ist die resultierende Setzung.

Zusammenfassung

Die wichtigsten Punkte

Hooke: $\varepsilon_z = [\Delta\sigma_z - \nu(\Delta\sigma_x + \Delta\sigma_y)]/E$; $\mathbf{S = \int \varepsilon_z\, dz}$; umgekehrt proportional zu E

Steinbrenner: $S = q_{net}\, \alpha\, B'\, (1 - \nu^2)/E \cdot I_s$; $I_s = F_1 + (1 - 2\nu)/(1 - \nu)\, F_2$; Mitte $\alpha = 4$, $B' = B/2$; Ecke $\alpha = 1$, $B' = B$

Sand: $E'/p_a = \alpha\, N_{60}$ ($\alpha = 5, 10, 15$), $\nu' \approx 0.25$–0.35; mit zunehmendem ν' nimmt die Setzung ab

Geschichtet: $\Delta S = q_{net}\, \alpha\, B'\, (1 - \nu^2)/E \cdot [I_s(z_{unten}) - I_s(z_{oben})]$; unabhängig von der Lamellendicke

Netto-Sohlpressung $q_{net} = q_{gross} - \sigma'_{v0}(D_{exc})$; **Einflusstiefe** $I(z') = p$ (2.09 B für Quadrat, 2.55 B für L = 1.5 B, 6.34 B für Streifen)

Nachgiebig: Mitte > Ecke (differenzielle Setzung); **starr** ≈ 0.93 × Mitte; keine Einbindungskorrektur ($I_f = 1$)

Literatur

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

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

Fox, E.N. (1948). The mean elastic settlement of a uniformly loaded area at a depth below the ground surface. Proc. 2nd ICSMFE, Rotterdam, 1, 129–132.

Bowles, J.E. (1996). Foundation Analysis and Design, 5th ed. McGraw-Hill.

Duncan, J.M. & Buchignani, A.L. (1976). An engineering manual for settlement studies. University of California, Berkeley.

Kulhawy, F.H. & Mayne, P.W. (1990). Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Design. EPRI EL-6800.

HINWEIS

Alle Zahlenbeispiele wurden mit der Berechnungsengine des Moduls erzeugt; das Modul liefert dieselben Werte.

GeoTerva

Geotechnische Berechnungen online

Von der Theorie zur Praxis

Berechnen Sie das Beispielprojekt dieser Vorlesung Schritt für Schritt in GeoTerva: Das Modul wird mit diesem Modell geöffnet.

Modul öffnen →

Theorieseite →

Auf dem Smartphone öffnen

Die Beispielmodule erfordern keine Registrierung.

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