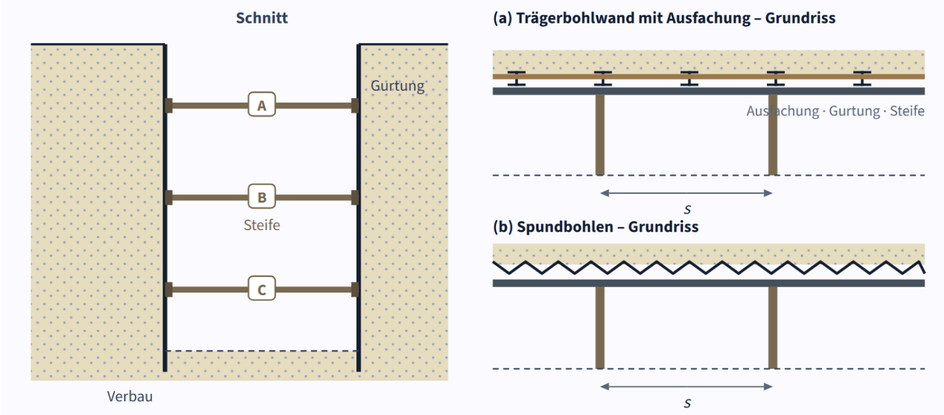
Geotechnische Vorlesung · Spundwände und ausgesteifte Baugruben

Ausgesteifte Baugrube in Ton

Vorlesung: ausgesteifte (abgestützte) Baugrube in Ton; Toneinhüllende, Zugriss, Steifenkräfte, Bemessung von Spundwand und Gurtung, Stahlnachweis und Hebungsbruch der Sohle; zu jedem Thema ein Rechenbeispiel.

- Baugrubenaussteifung
- Einhüllende nach Peck (Ton)
- Zugriss · erste Steife
- Steife · Gurtung · Spundwand
- Sohlenhebung



Was lernen wir in dieser Vorlesung?

- **warum der Druck in einer ausgesteiften Baugrube nicht nach Rankine** verteilt ist und **wie die Einhüllenden** aus gemessenen Lasten konstruiert werden
- Die beiden Einhüllenden des Tons über die **Stabilitätszahl γH/c**: weicher–mittlerer Ton (γH/c > 4) und steifer Ton (≤ 4)
- Die **Auflast** wird als gesonderter Druck ergänzt, das Wasser im Ton ändert nur die Wichte; der **Zugriss $z_c = 2c/\gamma$** und die erste Steife
- Aus der Einhüllenden die **Steifenkräfte** (gelenkige Abschnitte) sowie die Bemessung von **Spundwand** und **Gurtung**
- den Stahl nach **EN 1993-1-1 und AISC 360-22** nachzuweisen
- Den Nachweis des **Hebungsbruchs** der Baugrubensohle im Ton (Terzaghi-Säule, Korrektur nach Chang)

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

Beispielbaugrube: Ton (γ = 18 kN/m³, c = 35 kPa, φ = 0), Tiefe H = 7.00 m, Breite B = 6.00 m; Steifen in den Tiefen 1.00, 3.50, 6.00 m, horizontaler Abstand s = 3.00 m. Die Kräfte beziehen sich auf den Meter Wand (Steifenkräfte mit s multipliziert).

Aussteifungssystem und seine Elemente

THEORIE

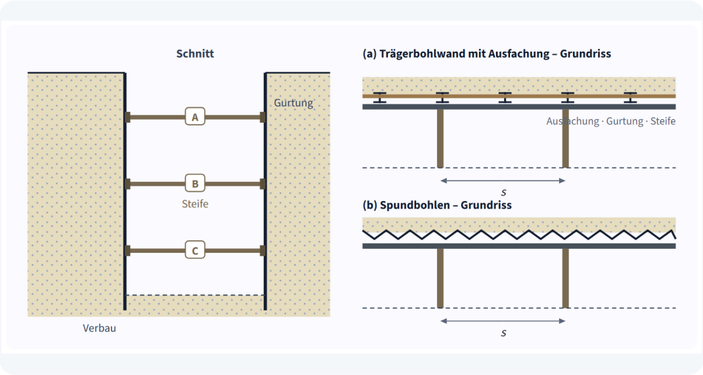
Tiefe Baugruben mit senkrechter Wand (innerstädtische Untergeschosse, Tunnel in offener Bauweise) werden mit einem temporären **Aussteifungssystem** offen gehalten. Zwei Anordnungen sind üblich: vorab gerammte **vertikale Träger** (Stahl oder Holz), zwischen die beim Aushub fortschreitend eine horizontale Holzausfachung gesetzt wird; oder ineinandergreifende **Spundbohlen**, die eine durchgehende Wand bilden.

Auf jeder Aussteifungsebene werden horizontale **Gurtungen** (wale) eingebaut, sobald der Aushub diese Ebene erreicht; **Steifen** (strut) sind horizontale druckbeanspruchte Stahlbauteile, die die Baugrube von Gurtung zu Gurtung kreuzen.

Für die Auswahl der Bauteile wird der seitliche Druck benötigt, den das Aussteifungssystem aufnimmt. Die Theorie liefert die gesamte Druckkraft, nicht aber ihre **Verteilung**: Die Verteilung hängt vom Baugrund, von der Reihenfolge und Geschwindigkeit der Arbeiten sowie von Mannschaft und Gerät ab.

Die Bemessungsdrücke sind daher **empirische Einhüllende**: Sie werden um die Drücke gelegt, die aus den in tatsächlichen Baugruben gemessenen Steifenkräften zurückgerechnet wurden.

Der Steifenabstand sollte beim Bau in vertikaler Richtung mindestens etwa 2.75 m betragen.



Dreht um die Wandkrone

THEORIE

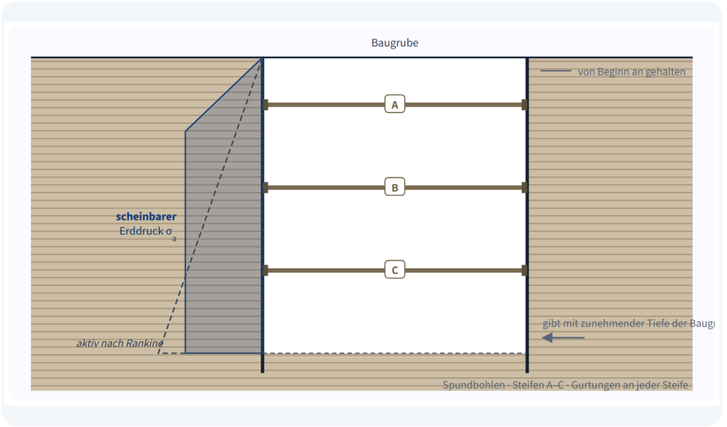
Eine Winkelstützwand dreht sich um ihre Fundamentsohle, und der aktive Erddruck nach Rankine (oben null, unten am größten) beschreibt dies gut. **Eine ausgesteifte Wand bewegt sich in entgegengesetztem Sinn**: Die erste Steife wird gesetzt, solange die Baugrube flach ist, sodass sich der obere Teil kaum bewegt; jeder weitere Bauzustand wird ausgehoben, bevor die Steife eingebaut wird, und das Zeitintervall verlängert sich mit der Tiefe, sodass sich die Wand zunehmend weiter unten durchbiegt: Bei abgeschlossener Baugrube hat sie sich **um ihren Kopf gedreht**.

Nahe der Oberkante bleibt der Druck nahe dem **Erdruhedruckwert** (der Boden hat sich nur sehr wenig bewegt).

Am Fuß kann der Druck unter den aktiven Rankine-Wert absinken (der Boden hat das plastische Gleichgewicht längst überschritten).

Die resultierende Erddruckkraft P_a wirkt **oberhalb** des Drittelspunkts des Dreiecks: in der Höhe n_aH über der Sohle, $n_a > 1/3$.

Die gesamte Reaktionskraft wird mit dem logarithmischen Spiral-Gleitkeil ermittelt ($r = r_o e^{\theta \tan \varphi'}$); in nichtbindigem Boden liegt sie 15–20 % über dem Wert nach Coulomb. Da jedoch ihre Verteilung und n_a vom Boden und von der Baustelle abhängen, werden Baugruben mit **Einhüllenden** bemessen.



Wie wurden die Einhüllenden konstruiert?

THEORIE

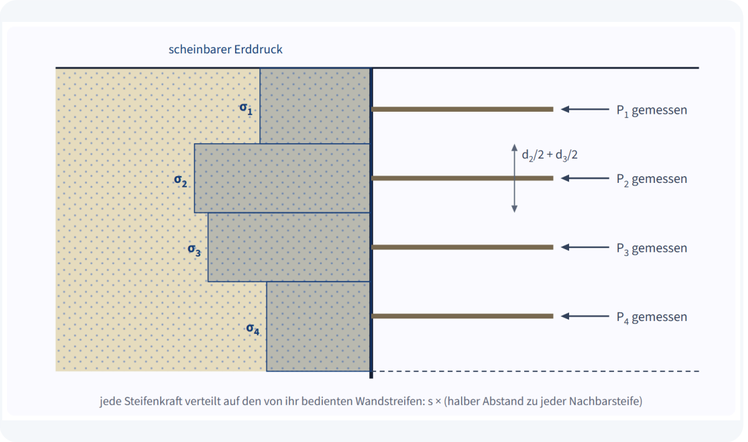
Der Erddruck ist von Ort zu Ort verschieden, und jede Steife ist für die **größte Last** zu bemessen, die auf sie wirken kann. Zu diesem Zweck werden Einhüllende konstruiert: In einer instrumentierten Baugrube wird die Last jeder Steife gemessen, durch den von ihr gestützten Spundwandstreifen geteilt (horizontaler Abstand s × halbe Abstände zu den Steifen darüber und darunter) und über diesem Streifen in einen **scheinbaren Erddruck** umgerechnet:

$$\sigma_1 = \frac{P_1}{s\left(d_1 + \frac{d_2}{2}\right)} \qquad \sigma_i = \frac{P_i}{s\left(\frac{d_i}{2} + \frac{d_{i+1}}{2}\right)}$$

d_1 ist die Tiefe der ersten Steife, d_i sind die Abstände zwischen den nachfolgenden Steifen. Die Einhüllende aller übereinander gezeichneten Diagramme ist eine **scheinbare Erddruckverteilung**.

Die Einhüllenden von Peck beruhen auf Sandlasten, die in U-Bahn-Baugruben in Berlin, München und New York gemessen wurden; für weiche bis mittelsteife und für steife Tone wurden sie nach derselben Methode konstruiert.

Die Einhüllende ist **nicht** der zu einem beliebigen Zeitpunkt auf die Wand wirkende Erddruck: Die für eine Steife daraus entnommene Last ist so angesetzt, dass sie auf der sicheren Seite der gemessenen Lasten bleibt.



Weich–steif oder fest: γH/c

THEORIE

In Ton wird die Form der Einhüllenden durch die **Standfestigkeitszahl γH/c** bestimmt (c undränierte Kohäsion, φ = 0). Ein **weicher bis mittelsteifer Ton** mit γH/c > 4 wird durch die Baugrube weit über seine Festigkeit hinaus beansprucht:

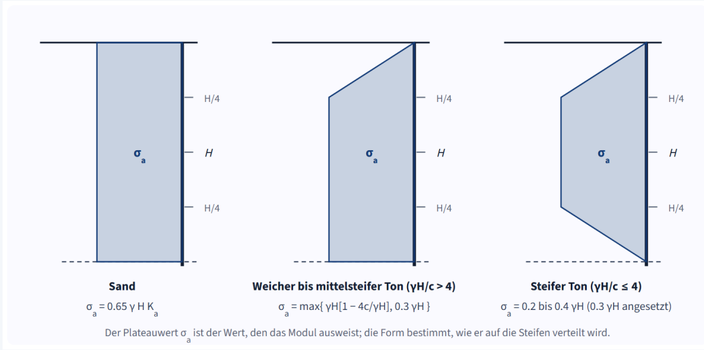
$$\frac{\gamma H}{c} > 4: \quad \sigma_a = \max\left(\gamma H\left[1 - \frac{4c}{\gamma H}\right],\ 0.3\gamma H\right)$$

Die Einhüllende ist an der Oberfläche null, wächst im oberen Viertel linear an und bleibt bis zur Sohle konstant; maßgebend ist der größere der beiden Ausdrücke. **Steifer Ton** liegt näher an seinem elastischen Bereich:

$$\frac{\gamma H}{c} \leq 4: \quad \sigma_a = 0.2\gamma H \text{ mit } 0.4\gamma H \ \ (\text{Mittelwert } 0.3\gamma H)$$

Bei steifem Ton nimmt die Einhüllende im oberen Viertel zu, ist in der mittleren Hälfte konstant und geht im unteren Viertel auf null zurück. Die Randbedingungen sind dieselben wie bei der Einhüllenden für Sand (≳ 6 m Tiefe, Wasser unterhalb der Sohle, Ton undräniert).

Verläuft die Baugrube durch mehrere Tone, mittelt die Quelle diese nach der Dicke: $c_{av} = \Sigma c_i H_i/H$, $\gamma_{av} = \Sigma \gamma_i H_i/H$, anschließend werden die Ton-Einhüllenden mit den Mittelwerten verwendet.



Aufgabe

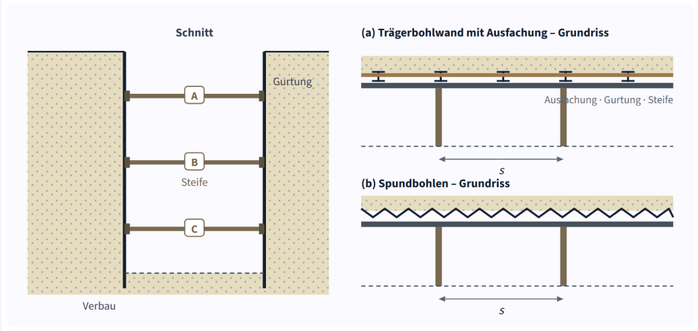
BEISPIEL

Gegeben

Offene Baugrube	$H = 7.0$ **m,** $\gamma = 18$ **kN/m³,** $c = 35$ **kPa**
Weicherer Ton	**dieselbe Baugrube,** $c = 20$ **kPa**

GESUCHT

Für beide Tone **γH/c**, die Art der Einhüllenden und σ_a.



Lösung

LÖSUNG

1 Anfangston (c = 35 kPa)

$$\frac{\gamma H}{c} = \frac{18(7)}{35} = \mathbf{3.60} \leq 4 \Rightarrow \text{steifer Ton}$$

$$\sigma_a = 0.3\gamma H = 0.3(18)(7) = \mathbf{37.80}\ \text{kPa}$$

2 Weicherer Ton (c = 20 kPa)

$$\frac{\gamma H}{c} = \frac{126}{20} = \mathbf{6.30} > 4 \Rightarrow \text{weicher bis mittelsteifer Ton}$$

$$\sigma_a = \gamma H\left[1 - \frac{4c}{\gamma H}\right] = 126(1 - 0.635) = \mathbf{46.00}\ \text{kPa} \geq 0.3\gamma H = 37.8$$

Der anstehende Ton wird als steif angesetzt: σ_a = **37.80 kPa** (größte Steifenkraft P = 271.3 kN). Fällt die Kohäsion auf 20 kPa ab, verhält sich die Baugrube wie weicher bis mittelsteifer Ton: σ_a = **46.0 kPa**, und der Fuß der Einhüllenden wird zu einem konstanten Plateau (P = 338.1 kN).

Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Neben der Einhüllenden; mit der Wichte; Lage der ersten Steife

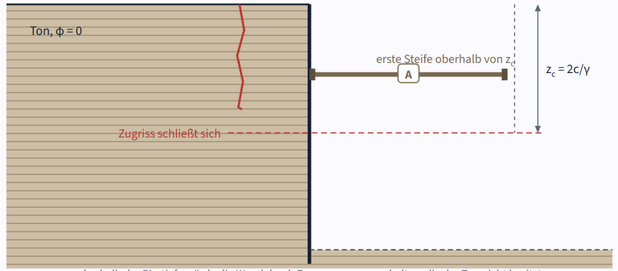
THEORIE

Die **Auflast q** wird nicht in die Einhüllende einbezogen (die empirischen Beiwerte würden dann auch auf sie angewendet); sie wird über die gesamte Höhe als eigene gleichmäßige Pressung getragen, in undräniertem Ton mit $K_a = 1$: $\Delta p_q = q$.

Wasser: Ton-Einhüllende sind undränierte Berechnungen mit totalen Spannungen; das Wasser im Ton ist bereits in der Wichte und in der undränierten Festigkeit enthalten. Wasser über der Sohle wird eingezeichnet und vermerkt, nicht als separate Last angesetzt; es ändert nur das Bodengewicht: unter Wasser die Wichte des wassergesättigten Bodens und in der vom Wasser geschnittenen Schicht der nach der Mächtigkeit gewichtete Mittelwert der beiden Werte, $\gamma = (\gamma z_w + \gamma_{sat}(H - z_w))/H$.

Zugriss: Die Tonwand kann bis zu der Tiefe ohne Unterstützung stehen, in der sich der Zugriss schließt (die Tiefe, in der der kohäsive aktive Rankine-Erddruck null ist). Bei $\varphi = 0$ ist $K_a = 1$; die erste Steife muss **oberhalb** dieser Tiefe angeordnet werden, damit sich die Wand nicht auf eine offene Wandfläche stützt, die der Ton nicht halten kann.

$$\Delta p_q = q \qquad z_c = \frac{2c}{\gamma}\ (q = 0), \qquad z_c = \frac{2c - q}{\gamma}\ (\text{Auflast q})$$



oberhalb der Risstiefe würde die Wand durch Zugspannungen gehalten, die der Ton nicht besitzt

Aufgabe

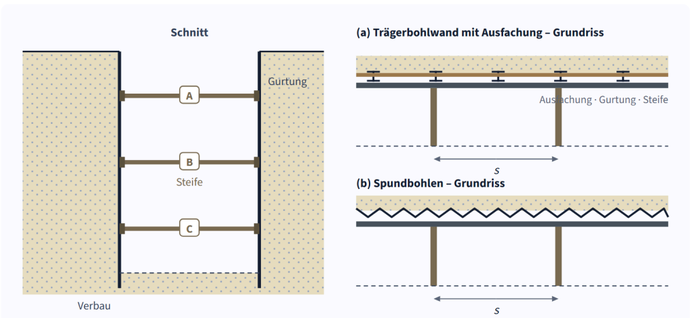
BEISPIEL

Gegeben

Aushub	**Die offene Baugrube aus Beispiel 1 ($H = 7$ m, $\gamma = 18$, $\gamma_{sat} = 19$ kN/m³, $c = 35$ kPa); erste Steife bei $z = 1.0$ m**
Fälle	**(a) q = 0, kein Wasser; (b) Auflast $q = 10$ kPa; (c) Grundwasser $z_w = 3$ m**

GESUCHT

z_c, ob die Lage der ersten Steife geeignet ist; in (c) **$\bar{\gamma}$** und **$\bar{\gamma}H/c$**; in jedem Fall die Gesamtlast R und die größte Steifenlast.



Lösung (1/2)

LÖSUNG

1 Zugriss und anfängliche Stützung

$$z_c = \frac{2c}{\gamma} = \frac{2(35)}{18} = \mathbf{3.889}\ \mathrm{m}\ > 1.00\ \mathrm{m}\ \checkmark$$

$$z_c = \frac{2c - q}{\gamma} = \frac{70 - 10}{18} = 3.333\ \mathrm{m}\ \ (q = 10\ \mathrm{kPa})$$

Die erste Steife (z = 1.0 m) liegt deutlich über der Tiefe des Zugrisses (3.89 m): geeignet. Mit Auflast verringert sich die Risstiefe auf 3.33 m.

Lösung (2/2)

LÖSUNG

2 Wasser (c): $\bar{\gamma} = (\gamma z_w + \gamma_{sat}(H - z_w))/H$; Zusammenfassung der drei Fälle

$$\bar{\gamma} = \frac{18(3) + 19(4)}{7} = 18.571\ \mathrm{kN/m^3} \qquad \frac{\bar{\gamma} H}{c} = \frac{18.571(7)}{35} = 3.714$$

$$\sigma_a = 0.3\bar{\gamma} H = 39.00\ \mathrm{kPa}$$

Zustand	γH/c	σ_a (kPa)	z_c (m)	R (kN/m)	P_{max} (kN)
(a) q = 0, kein Wasser	3.60	37.80	3.89	198.4	271.3
(b) q = 10 kPa	3.60	37.80	3.33	268.4	334.3
(c) Wasser z_w = 3 m	3.71	39.00	—	204.8	279.8

Die Auflast fügt nur $\Delta p_q = q$ = 10 kPa hinzu (R 198.4 → 268.4 kN/m); das Wasser erhöht nur $\bar{\gamma}$ auf 18.57 kN/m³ (σ_a 37.8 → 39.0 kPa).

Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Von der Einhüllenden zu den Steifenkräften

THEORIE

Steifen sind horizontale Bauteile: Sie tragen den Druck entlang ihrer Achse und biegen sich unter ihrem Eigengewicht; die Tragfähigkeit hängt von der Schlankheit ab, bei breiten Baugruben können zusätzliche Steifen erforderlich sein. Die Quelle gibt ein einfaches und konservatives Verfahren für die Last an:

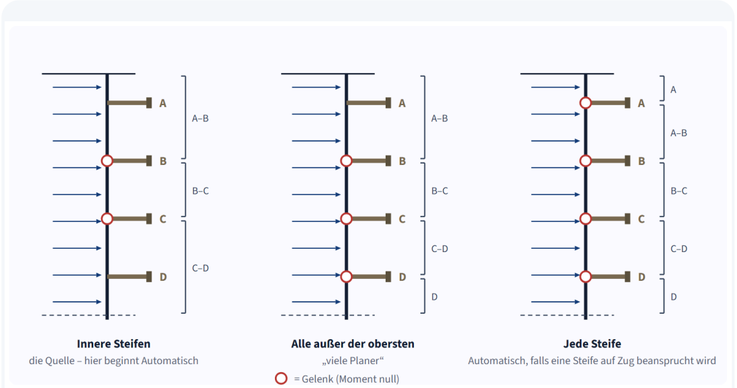
Die Erddruckeinhüllende und die Steifenlagen zeichnen. Die Spundwand außer an der obersten und der untersten **an jeder Steifenlage gelenkig** ansetzen (viele Planer tun dies an allen außer der obersten).

Die Wand an den Gelenken in **einfache Kragträger an den Enden und einfache Träger dazwischen** unterteilen; die Auflagerreaktionen jedes Teils mit der Statik ermitteln (bei einer Baugrube mit vier Steifen A, B_1, B_2, C_1, C_2, D).

Die Last einer Steife ist die Summe der aufgenommenen Reaktionen × der horizontale Abstand s.

$$P_A = A\,s \quad P_B = (B_1 + B_2)\,s \quad P_C = (C_1 + C_2)\,s \quad P_D = D\,s$$

Jedes Segment ist statisch bestimmt: Es trägt zwei Auflager; das Momenten- und das Horizontalkraftgleichgewicht um eines der Auflager liefert beide. Da das Auflager am Gelenk zu beiden Seiten gehört, sammelt es **zwei Reaktionen**. Die Reaktionen gelten je Längeneinheit der Wand (kN/m); s rechnet sie in eine Auflagerlast um.



Aufgabe

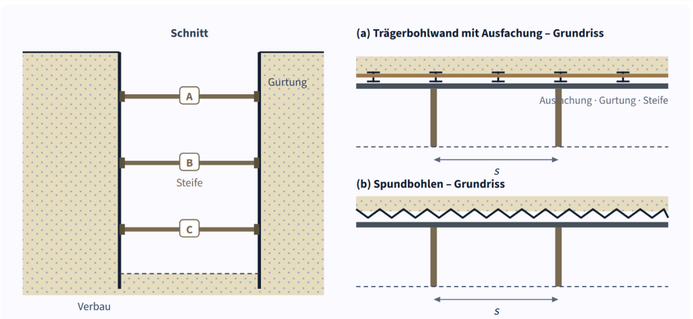
BEISPIEL

Gegeben

Aushub	$H = 7.00$ m; $B = 6$ m; Steifen $z = 1.00, 3.50, 6.00$ m (A, B, C); horizontaler Abstand $s = 3.00$ m
Druck	Beispiel 1: steifer Ton (γH/c = 3.6): trapezförmige Einhüllende $\sigma_a = 0.3\gamma H = 37.8$ kPa (Anstieg im oberen Viertel, Abfall auf null im unteren Viertel); Spundwand bei Auflager B gelenkig gelagert (außer ganz oben und ganz unten)

GESUCHT

Die **Resultierende W** der Teile und ihr Hebelarm **z̄**; die Reaktionen **A, B_1, B_2, C**; die Auflagerlasten **P_A, P_B, P_C**.



Lösung (1/2)

LÖSUNG

1 Die Einhüllende an den Gelenken in Abschnitte unterteilen; Resultierende und Hebelarm jedes Abschnitts (Tiefe von der Oberfläche)

Teil	Bereich (m)	W (kN/m)	z̄ (m)	Auflager
1	0.00 – 3.50	99.23	2.139	A (z = 1.00), B (z = 3.50)
2	3.50 – 7.00	99.23	4.861	B (z = 3.50), C (z = 6.00)

2 Erster Teil: Momentengleichgewicht um die erste Steife

$$R_{B_2} = \frac{W(\bar{z} - z_A)}{z_B - z_A} = \frac{99.23(2.139 - 1.00)}{3.50 - 1.00} = \mathbf{45.20} \qquad R_A = W - R_{B_2} = \mathbf{54.02}\ \mathrm{kN/m}$$

Das erste Feld trägt die beiden Steifen mit 54.02 und 45.21 kN/m; die Reaktion der obersten Steife (A) ist größer, da sie auch die Last des Kragarms enthält.

Lösung (2/2)

LÖSUNG

3 Zweiter Teil

$$R_C = \frac{W(\bar{z} - z_B)}{z_C - z_B} = \frac{99.23(4.861 - 3.50)}{6.00 - 3.50} = \mathbf{54.02} \qquad R_{B_1} = W - R_C = \mathbf{45.20}\ \mathrm{kN/m}$$

4 Jede Steife summiert die von ihr aufgenommenen Reaktionen; Last = Summe × s (s = 3.00 m)

Niveau	z (m)	Aufgenommene Reaktionen (kN/m)	Summe (kN/m)	P = R·s (kN)
A	1.00	54.02	54.02	**162.06**
B	3.50	45.21 + 45.21	90.42	**271.26**
C	6.00	54.02	54.02	**162.06**

Größte Steifenkraft **P_B = 271.26 kN** (Lage B): Diese Last ist für die Bemessung der Steife maßgebend. Da die Steife B zu zwei Abschnitten gehört, summiert sie zwei Reaktionen.

Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Größtes Moment und erforderliches Widerstandsmoment

THEORIE

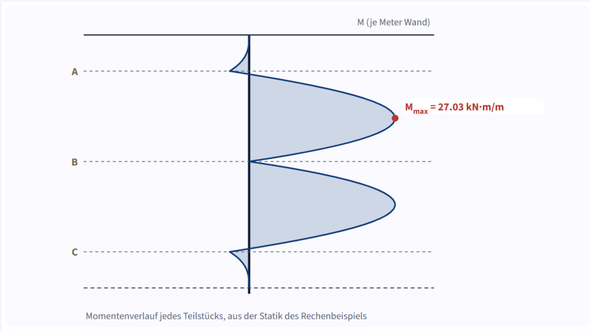
Die **Spundwand** wird aus denselben Abschnitten bemessen: In jedem Abschnitt wird das maximale Biegemoment ermittelt (dort, wo die Querkraft das Vorzeichen wechselt: innerhalb des Feldes oder am Auflager, an dem der Kragarm auf die Steife trifft); das größte ist das Bemessungsmoment für den laufenden Meter Wand. Das erforderliche Widerstandsmoment folgt aus der zulässigen Biegespannung, und aus der Tabelle wird ein Profil mit mindestens diesem Wert gewählt:

$$M_{max} = \max_{parts} |M| \qquad S = \frac{M_{max}}{\sigma_{allow}}$$

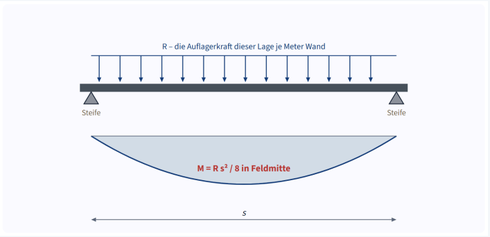
Steifen können bei ordnungsgemäßem Anschluss als durchlaufend angesetzt werden; konservativ werden sie an den Auflagern als **gelenkig** angenommen: ein einfacher Balken mit der Stützweite s, wobei die Reaktion R der Lage (je Längeneinheit der Wand) als Streckenlast wirkt:

$$M_{max} = \frac{R\,s^2}{8} \qquad S = \frac{M_{max}}{\sigma_{allow}}$$

Die Ebene mit der größten Reaktion ist maßgebend. Die Gurtungen werden manchmal an der Spundwand an Punkten angeschlossen, an denen sie die erforderliche seitliche Unterstützung bieten.



Momentenverlauf jedes Teilstücks, aus der Statik des Rechenbeispiels



Aufgabe

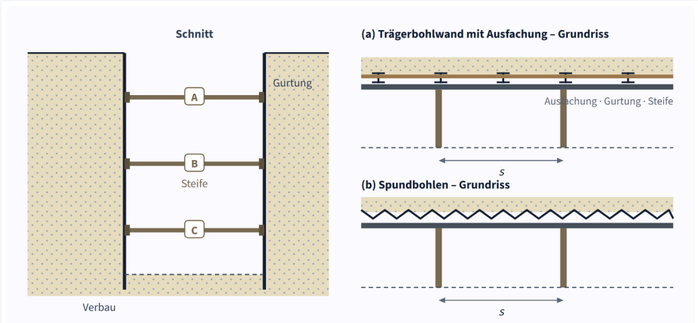
BEISPIEL

Gegeben

Aushub	**Die Baugrube aus Beispiel 1 ($H = 7$ m, steifer Ton, $\sigma_a = 37.8$ kPa); Steifen bei 1.0 · 3.5 · 6.0 m; horizontaler Abstand $s = 3.0$ m; Gelenk bei B**
Stahl	**zulässige Biegespannung $\sigma_{allow} = 170\,000$ kPa**

GESUCHT

Das **M_{max}** der Spundwand und das erforderliche **S** (cm³/m); in der Ebene der größten Reaktion das **M_{max}** und **S** der Gurtung (cm³).



Lösung (1/2)

LÖSUNG

1 Spundwand: maximales Moment in jedem Abschnitt

Teil	Bereich (m)	M_{max} (kN·m/m)	Lage z (m)
1	0.00 – 3.50	27.03	2.30
2	3.50 – 7.00	27.03	4.70

2 Erforderliches Widerstandsmoment

$$S = \frac{M_{max}}{\sigma_{allow}} = \frac{27.03}{170{,}000} = 0.0001590\ \mathrm{m^3/m} = \mathbf{159.0}\ \mathrm{cm^3/m}$$

In der Spundwand **M_{max} = 27.03 kN·m/m** (Abschnitt 1, z = 2.30 m): **S ≥ 159.0 cm³/m**.

Lösung (2/2)

LÖSUNG

3 Gurtung: Einfeldträger auf jeder Lage (s = 3.000 m)

Niveau	R (kN/m)	M = R s²/8 (kN·m)	S = M/σ_{zul} (cm³)
A	54.02	60.77	357
B	90.42	101.72	598
C	54.02	60.77	357

Die größte Reaktion tritt **in der Lage B** auf (R = 90.42 kN/m): Die Gurtung wird mit **M_{max} = 101.72 kN·m** und **S ≥ 598 cm³** bemessen; die Gurtungen der übrigen Lagen können kleiner ausgeführt werden.

Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Bemessungswirkungen, Klasse, Biegung und Knicken

THEORIE

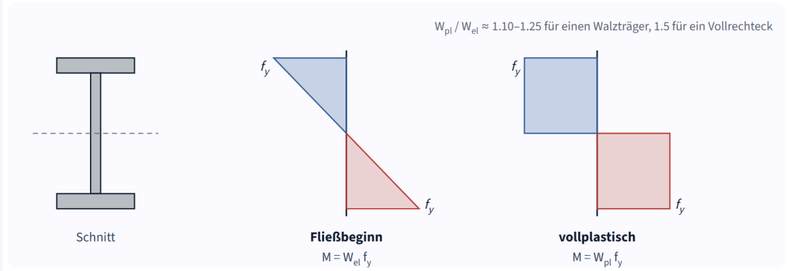
Die Lasten aus der Einhüllenden sind **Gebrauchswerte** (die Einhüllende nach Peck ist eine obere Schranke der gemessenen Lasten); sie werden einmal auf den Bemessungswert erhöht: $E_d = \gamma_F E_k$. Jedes Element wird mit der Streckgrenze seiner eigenen Stahlsorte (f_y) nachgewiesen; der Querschnitt wird über das **Widerstandsmoment** des Elements angegeben (Spundwand: W_{el} pro Meter; Gurtung: W; Steife: A und I um die schwache Achse).

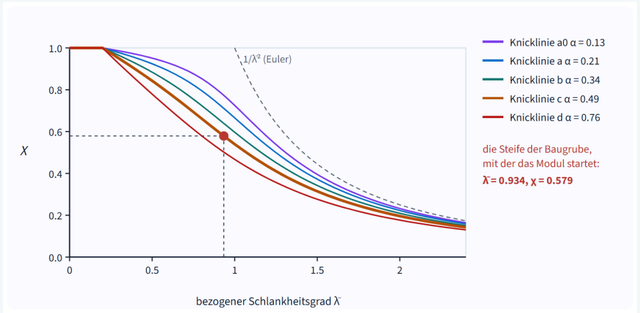
$$M_{c,Rd} = \frac{W f_y}{\gamma_{M0}} \qquad \eta = \frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \le 1 \qquad W = W_{pl}\ (\text{Klasse 1–2}),\ W_{el}\ (\text{Klasse 3})$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_{cr}^2} \qquad \bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}} \qquad \Phi = 0.5\left[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0.2) + \bar{\lambda}^2\right] \qquad \chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \le 1 \qquad N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}}$$

Die Steife knickt um ihre schwache Achse aus: I ist das kleine Trägheitsmoment, $L_{cr} = K\,L_b$ die effektive Knicklänge (Baugrubenbreite, wenn dazwischen kein Königsträger oder keine Queraussteifung verläuft). α stammt aus der Knickkurve (Kurve c: 0.49).

Bei der Spundwand gilt derselbe Widerstand pro Einheitsbreite (EN 1993-5; Verbundgleiten β_B bei U-Profilen, 1.0 bei Z-Profilen). Da der Druckgurt der Gurtung an der Wand anliegt, ist Biegedrillknicken nicht maßgebend.





Aufgabe

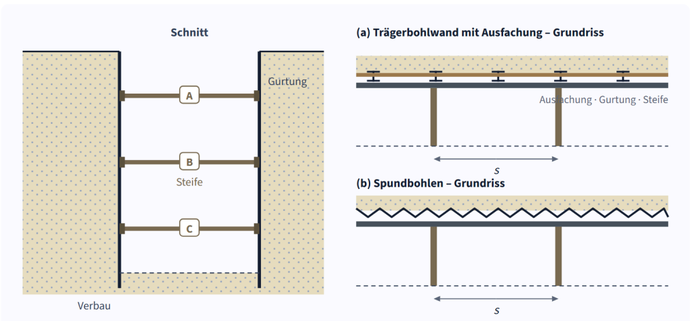
BEISPIEL

Gegeben

Baugrube und Lasten	**Die Baugrube aus Beispiel 1 und die Lasten aus Beispiel 3: $P_{max} = 271.26$ kN (Steife B)**
Elemente	**S275 ($f_y = 275$ MPa), $\gamma_F = 1.35$, $\gamma_{M0} = \gamma_{M1} = 1.00$: Spundwand $W_{el} = 600$ cm³/m; Gurtung $W_{el,y} = 1\,000$ cm³; Steife $A = 65.7$ cm², $I = 3\,598$ cm⁴, Kurve c, $L_{cr} = 6.00$ m**

GESUCHT

η für die Spundwand, die am stärksten belastete Gurtung und die am stärksten belastete Steife (≤ 1).



Lösung (1/2)

LÖSUNG

1 Spundwand und Gurtung (Biegung): $\eta = \gamma_F M/(W f_y)$

$$\eta_{sp} = \frac{1.35(27.03)}{600 \cdot 10^{-6}(275\,000)} = \frac{36.49}{165.0} = \mathbf{0.221}$$

$$\eta_{belt} = \frac{1.35(101.72)}{1\,000 \cdot 10^{-6}(275\,000)} = \frac{137.33}{275.0} = \mathbf{0.499}$$

Spundwand η = **0.221**, Gurtung η = **0.499**: beide sind ausreichend ($\eta \leq 1$).

Lösung (2/2)

LÖSUNG

2 Steife (Knicken): $N_{Ed} = 1.35\ P_{max} = 1.35(271.26) = 366.20$ kN

$$N_{cr} = \frac{\pi^2(210\,000\,000)(3\,598 \cdot 10^{-8})}{6.00^2} = 2{,}071.5\ \text{kN}$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{1\,806.8}{2{,}071.5}} = 0.9339$$

$$\Phi = 0.5\left[1 + 0.49(0.9339 - 0.2) + 0.9339^2\right] = 1.1159$$

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = 0.5791 \quad N_{b,Rd} = \chi A f_y = 1{,}046.4\ \text{kN}$$

η_{Steife} = 366.2 / 1,046.4 = **0.350**. Alle drei Bauteile sind ausreichend ($\eta \le 1$); bei der Steife ist das **Knicken** maßgebend ($N_{c,Rd}$ = 1,806.8 kN, $N_{b,Rd}$ = 1,046.4 kN).

Lösung in GeoTerva prüfen ↗

LRFD oder ASD; Klassen, Biegung, Querkraft, Knickkurve

THEORIE

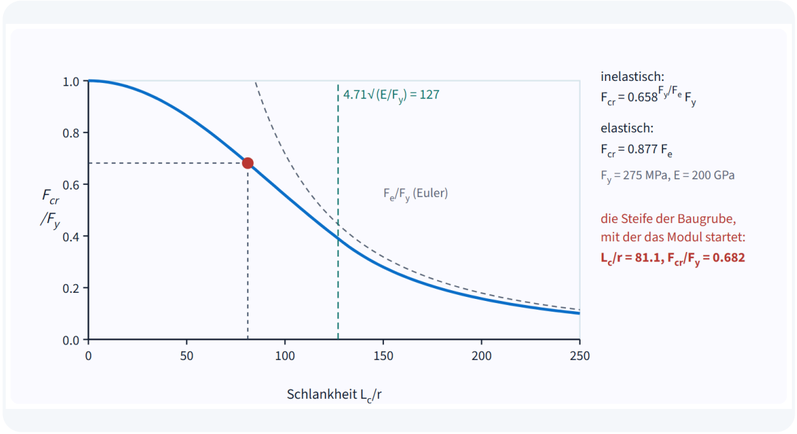
Jedes Tragglied wird mit der **nominellen Tragfähigkeit R_n** nachgewiesen, die sich aus den Regelungen für Druck, Biegung und Schub ergibt. Beim LRFD wird die Last mit Beiwerten versehen und die Tragfähigkeit mit φ abgemindert; beim ASD wird die Gebrauchslast mit der durch den Sicherheitsfaktor Ω geteilten Tragfähigkeit verglichen:

$$R_u \le \phi R_n \ (\text{LRFD}) \qquad R_a \le \frac{R_n}{\Omega} \ (\text{ASD}) \qquad P_u = \gamma_H P,\ M_u = \gamma_H M,\ \gamma_H = 1.6$$

Seitlicher Erddruck H nach ASCE 7-22: In den LRFD-Kombinationen geht er mit 1.6 ein, wo er zur Last hinzugefügt wird (bei Aussteifungen von Baugruben stets), im ASD mit 1.0. Die Spundwand und die mit dem Modul angegebene Gurtung werden mit der vom Modul zugrunde gelegten Festigkeit angesetzt: F_yZ bei kompaktem Querschnitt, F_yS bei Erreichen der Fließgrenze. Da die Gurtung durch die Wand seitlich gehalten wird, ist $L_b = 0$ und Biegedrillknicken kein Grenzzustand.

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{(L_c/r)^2} \qquad F_{cr} = 0.658^{F_y/F_e} F_y \ \left(\tfrac{L_c}{r} \le 4.71\sqrt{E/F_y}\right) \ \text{andernfalls } 0.877 F_e \qquad P_n = F_{cr} A_g$$

Eine einzige Stützenkurve gilt für jeden Querschnitt (keine auszuwählende Kurve wie in EN 1993-1-1); r ist der kleine Trägheitsradius, $L_c = K\,L_b$ die effektive Länge; $L_c/r \le 200$ wird empfohlen. AISC setzt im Gegensatz zu EN 1993-1-1 die Biegefestigkeit wegen der Querkraft nicht herab.



Aufgabe

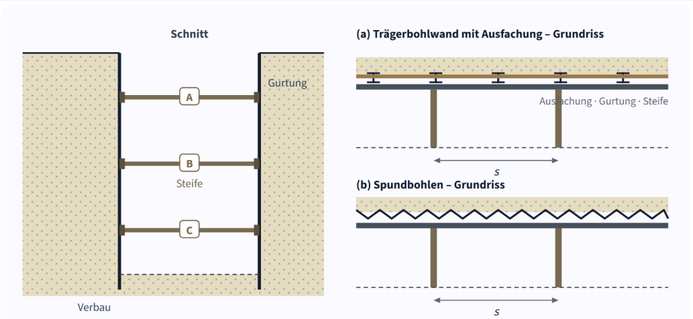
BEISPIEL

Gegeben

Baugrube und Lasten	**Die Baugrube aus Beispiel 1 und die Lasten aus Beispiel 3: $P_{max} = 271.26$ kN (Steife B)**
Elemente	**Bauteile aus Beispiel 5 (S275, $F_y = 275$ MPa); $E = 200$ GPa; LRFD $\gamma_H = 1.6$, $\phi_c = \phi_b = 0.90$; ASD $\Omega_c = 1.67$, $\Omega_b = 1.67$ ($M_n = F_y S$)**

GESUCHT

Für die am stärksten belastete Steife: **L_c/r, F_e, F_{cr}, P_n**; LRFD- und ASD-Verhältnisse; LRFD-Verhältnis für die Spundwand und die Gurtung.



Lösung (1/2)

LÖSUNG

1 Steife: Knicklinie (A_g = 65.7 cm², r = 7.40 cm, L_c = 6.00 m)

$$\frac{L_c}{r} = \frac{600}{7.40} = 81.1 \;\le 4.71\sqrt{E/F_y} = 127$$

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{(L_c/r)^2} = \frac{\pi^2(200\,000)}{(81.1)^2} = 300.3\ \text{MPa}$$

$$F_{cr} = 0.658^{275/300.3}(275) = 187.4\ \text{MPa}$$

$$P_n = F_{cr}A_g = 187.4 \times 6\,570\ \text{mm}^2 = \mathbf{1{,}231.5}\ \text{kN}$$

An der Steife beträgt die **Nennfestigkeit P_n = 1,231.5 kN**; die Schlankheit L_c/r = 81.1 liegt im Bereich des unelastischen Knickens (Grenze 127).

Lösung (2/2)

LÖSUNG

2 Verhältnisse nach LRFD und ASD (P = 271.26 kN)

$$\text{LRFD: } P_u = 1.6(271.26) = 434.0\ \text{kN} \leq \phi_c P_n = 0.90(1{,}231.5) = 1{,}108.3\ \text{kN} \quad \eta = \mathbf{0.392}$$

$$\text{ASD: } P_a = 271.26\ \text{kN} \leq \frac{P_n}{\Omega_c} = \frac{1{,}231.5}{1.67} = 737.4\ \text{kN} \quad \eta = \mathbf{0.368}$$

Steife: LRFD η = **0.392**, ASD η = **0.368**. Spundwand (LRFD) 0.291, Gurtung 0.658; in EN 1993-1-1 waren es 0.221, 0.499 und 0.350.

Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Terzaghi-Säule, Korrektur nach Chang

THEORIE

Eine ausgesteifte Baugrube kann auch ohne Versagen der Steifen versagen: Das Gewicht des Bodens neben der Baugrube und der Auflast presst den Ton unterhalb der Baugrubensohle nach innen und oben. Die Bodensäule der Breite B′ lastet in Höhe der Baugrubensohle mit der Grundbruchspannung cN_C (N_C = 5.7) auf dem Ton; die Scherfestigkeit cH an den Seitenflächen entlastet sie:

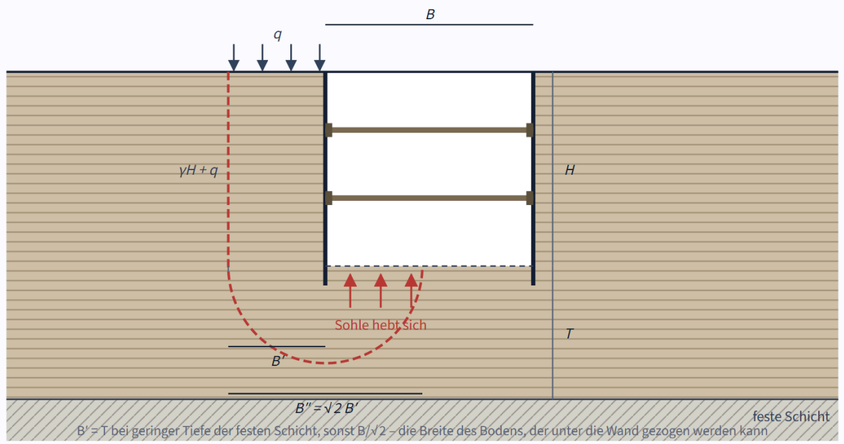
$$FS = \frac{cN_c}{\gamma H + q - cH/B'}$$

Die Gleichung wurde **in dreierlei Hinsicht korrigiert**: Die seitliche Schubkraft reduziert nicht, sie **fügt Widerstand hinzu**; der Sohlenstreifen der Breite B″ wirkt wie ein nach oben belastetes Fundament; da die Baugrubensohle unbegrenzt ist, gilt N_C = 5.14 (glattes Fundament):

$$FS = \frac{5.14\,c\left(1 + 0.2\dfrac{B''}{L}\right) + \dfrac{cH}{B'}}{\gamma H + q} \qquad B' = \min\left(T, \frac{B}{\sqrt{2}}\right),\ B'' = \sqrt{2}\,B'$$

B ist die Baugrubenbreite, L die Länge im Grundriss, T die Tondicke unter der Sohle; q ist die Auflast neben der Baugrube. Bei vollständig eingebrochenen Baugruben ergibt sich FS ≈ 1, bei teilweise bzw. geringfügig versagten Baugruben etwas darüber; erforderlich ist FS ≈ **1.5**.

In homogenem Ton werden die Spundbohlen bei FS < 1.5 tiefer eingerammt (im Allgemeinen nicht mehr als B/2 unterhalb der Baugrubensohle); die Einbindetiefe nimmt eine Kraft auf, die veröffentlichten Bemessungstafeln entnommen wird.



Aufgabe

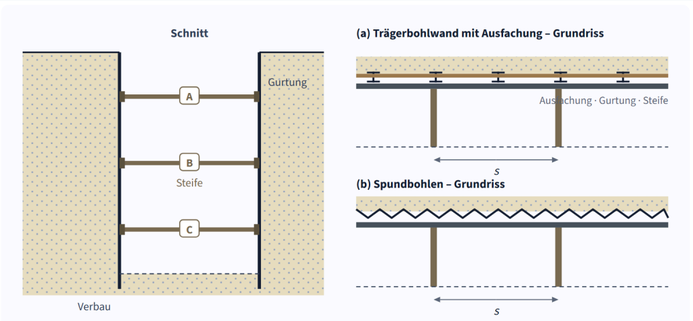
BEISPIEL

Gegeben

Offene Baugrube	$H = 7$ m, $B = 6$ m, $L = 20$ m; Ton $\gamma = 18$, $c = 35$ kPa, Tonmächtigkeit unter der Sohle $T = 4$ m; keine Auflast
Aushub nach Literaturangabe	4 m breit, 15 m lang, 6 m tief; $\gamma = 17$, $c = 40$ kPa; steife Schicht 2 m unter der Sohle

GESUCHT

Für beide Baugruben: **B′**, **B″** und **FS** (≥ 1.5?); bei der offenen Baugrube, wenn keine harte Schicht vorhanden ist und die Breite 10 m beträgt?



Lösung

LÖSUNG

1 Ausgehobene Böschung: B/√2 = 4.24 m > T = 4 m, daher B′ = T

$$B' = T = 4.00\ \text{m} \qquad B'' = \sqrt{2}B' = 5.66\ \text{m}$$

$$FS = \frac{5.14(35)\left(1 + 0.2\frac{5.66}{20}\right) + \frac{35(7)}{4.00}}{18(7)} = \frac{190.1 + 61.2}{126} = \mathbf{1.99} \geq 1.5\ \checkmark$$

2 Kelleraushub (T = 2 m ≤ B/√2 = 2.83 m: B′ = T = 2.00 m, B″ = 2.83 m)

$$FS = \frac{5.14(40)\left(1 + 0.2\frac{2.83}{15}\right) + \frac{40(6)}{2.00}}{17(6)} = \mathbf{3.27}$$

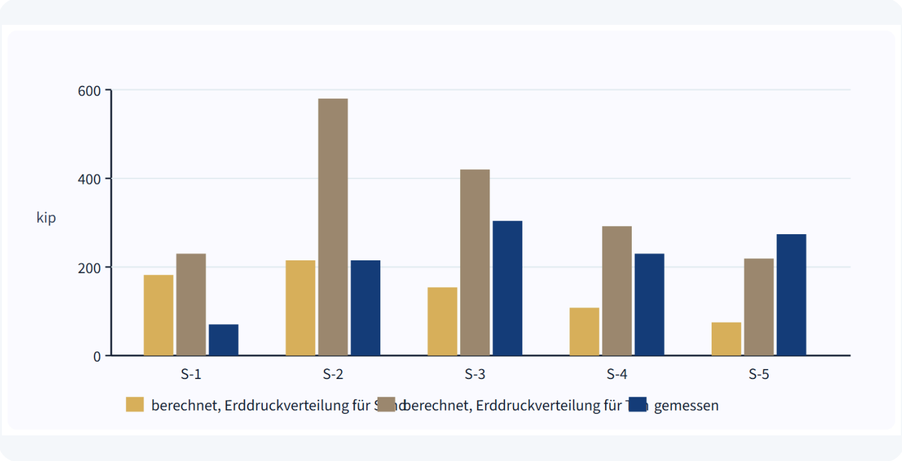
Die offene Baugrube ergibt **FS = 1.99**, die Baugrube des Buchs **3.27**: beide ≥ 1.5. Wird die steife Schicht nicht angetroffen (B′ = B/√2), sinkt FS bei der Baugrube des Buchs auf 2.96; die offene Baugrube fällt bei 10 m Breite und ohne steife Schicht auf 1.80 (sie nimmt in konservativer Richtung ab): Der Hebungsbruch verschlechtert sich mit der Breite und mit dem Fehlen der steifen Schicht.

Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Fallstudien Boston und Chicago

THEORIE

Boston (Testabschnitt B): 17.7 m tief, fünf Steifen; das Profil wurde durch zwei Einhüllende für Sand und Ton begrenzt (Sand-Einhüllende 53.5 kPa, Einhüllende für weichen bis mittelfesten Ton 146.1 kPa); die gemessenen Lasten wichen von beiden Schätzungen stark ab (die Bodenparameter sind unsicher), und die Steifen waren für Lasten weit über den gemessenen bemessen worden. **Chicago, National Plaza**: 21.3 m tief, sechs Steifen; das Profil wurde in einen äquivalenten Ton umgerechnet (c_{av} = 34.91 kPa, γ_{av} = 19.76 kN/m³, γH/c = 12.08 > 4, σ_a = 282.0 kPa). Die Einhüllende nach Peck ergab einen Druck von etwa dem **1.8-Fachen** des beobachteten: Eine um viele Baugruben gelegte Einhüllende ist für eine einzelne Baugrube konservativ; bei gleichem Boden kann die Felderfahrung die Überbemessung erheblich verringern.



Was das Verfahren annimmt

THEORIE

Die Einhüllenden wurden aus Baugruben mit mehr als etwa 6 m Tiefe ermittelt; **die Einhüllende ist nicht der tatsächliche Erddruck auf die Wand zu einem beliebigen Zeitpunkt**: Sie liefert eine sichere Steifenkraft, nicht die Wanddurchbiegung. Der Ton ist **undräniert**; der Porenwasserdruck wird nicht zusätzlich berücksichtigt.

Mehrere Tone werden nach der Mächtigkeit gemittelt (c_{av}, γ_{av}); $\gamma H/c$ wird mit diesen Mittelwerten gewählt. Die Auflast wird neben der Einhüllenden addiert ($\Delta p = q$); das Wasser ändert nur die Wichte.

Spundwand wird als Kette diskreter Gelenke betrachtet; ihre eigene Steifigkeit und die Einbindung unterhalb der Sohle werden nicht angesetzt. Die **Gurtungen** sind einfache Träger zwischen den Auflagern (Steifen). Der Stahl wird nach EN 1993-1-1 (Klasse 4 wird nicht bemessen) oder nach AISC 360-22 nachgewiesen.

Der Nachweis gegen Hebungsbruch wird mit der korrigierten Gleichung von Chang geführt; die Einbindung der Spundwand unterhalb der Baugrubensohle wird nicht angesetzt (auf der sicheren Seite). Bei mehreren Schichten wird die Formel mit der geschichteten Erweiterung von GeoTerva verwendet.

Während der Bauausführung sind seitliche Verformungen und Bodenverluste im Umfeld zu erwarten; ist eine steife Schicht vorhanden, werden die Spundwände in diese eingebunden. In weichem Ton können bei $\gamma H/c \approx 8$ große Verschiebungen und ein Versagen der Steifen auftreten.

Zusammenfassung

Die wichtigsten Punkte

Einhüllende: $\gamma H/c > 4$ weich–mittel ($\sigma_a = \max(\gamma H[1 - 4c/\gamma H], 0.3\gamma H)$); ≤ 4 steif (≈ $0.3\gamma H$). Beispiel: $\gamma H/c = 3.6$, $\sigma_a = 37.8$ kPa

Auflast und Wasser: $\Delta p = q$ wird gesondert ergänzt; das Wasser ändert nur $\bar{\gamma}$. **Zugriss** $z_c = 2c/\gamma = 3.89$ m; die erste Steife (1.0 m) liegt oberhalb davon

Auflagerkraft: Die Einhüllende wird an den Gelenken in Teile zerlegt, die Reaktionen werden mit der Statik ermittelt; im Beispiel $P_B = 271.26$ kN (summiert die beiden Reaktionen)

Bemessung: Spundwand $M_{max} = 27.03$ kN·m/m ($S = 159$ cm³/m), Gurtung $M = R\,s^2/8 = 101.72$ kN·m ($S = 598$ cm³; $\sigma_{zul} = 170$ MPa)

Stahl: EN 1993-1-1 $\eta = 0.221 / 0.499 / 0.350$ (Spundwand / Gurtung / Steife); AISC LRFD Steife 0.392, ASD 0.368

Hebungsbruch: $FS = (5.14c(1 + 0.2B''/L) + cH/B')/(\gamma H + q) \geq 1.5$; 2.00 bei der offenen Baugrube, 3.27 bei der Lehrbuch-Baugrube

Literatur

Das, B.M. (2016). Principles of Foundation Engineering, 8th ed. Cengage Learning — Kapitel 15, „Braced Cuts“; diese Seite folgt dieser Darstellung.

Peck, R.B. (1943). Earth pressure measurements in open cuts, Chicago (Ill.) subway. Transactions, ASCE, 108, 1008–1058.

Peck, R.B. (1969). Deep excavation and tunneling in soft ground. Proceedings, 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico City, State-of-the-Art Volume, 225–290.

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

Lambe, T.W. (1970). Braced excavations. Proceedings, Specialty Conference on Lateral Stresses in the Ground and Design of Earth-Retaining Structures, ASCE, 149–218.

Swatek, E.P., Asrow, S.P. and Seitz, A. (1972). Performance of bracing for deep Chicago excavation. Proceedings, Specialty Conference on Performance of Earth and Earth-Supported Structures, ASCE, Vol. 1, Part 2, 1303–1322.

Bjerrum, L. and Eide, O. (1956). Stability of strutted excavations in clay. Géotechnique, 6(1), 32–47.

Chang, M.F. (2000). Basal stability analysis of braced cuts in clay. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 126(3), 276–279.

U.S. Department of the Navy (1971). Design Manual — Soil Mechanics, Foundations, and Earth Structures, NAVFAC DM-7, Washington, D.C.

Moormann, C. (2004). Analysis of wall and ground movements due to deep excavations in soft soil based on a new worldwide database. Soils and Foundations, 44(1), 87–98.

EN 1990:2002, Eurocode — Basis of structural design. CEN.

EN 1993-1-1:2005, Eurocode 3: Design of steel structures — Part 1-1: General rules and rules for buildings. CEN.

EN 1993-5:2007, Eurocode 3: Design of steel structures — Part 5: Piling. CEN.

ANSI/AISC 360-22, Specification for Structural Steel Buildings. American Institute of Steel Construction, Chicago, 2022.

ASCE/SEI 7-22, Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures. American Society of Civil Engineers, Reston, 2022.

HINWEIS

Alle Rechenbeispiele wurden mit der Berechnungsengine des Moduls selbst erzeugt; das Modul liefert dieselben Werte. Das Rechenbeispiel auf der Modulseite ist ebenfalls diese Baugrube (H = 7 m, γ = 18 kN/m³, c = 35 kPa, Steifen bei 1 · 3.5 · 6 m).

GeoTerva

Geotechnische Berechnungen online

Von der Theorie zur Praxis

Geben Sie das Tonprofil Ihrer Baugrube, die Aussteifungsebenen, die Auflast, das Wasser und Ihre Tragglieder in GeoTerva ein; das Modul liefert gemeinsam die Einhüllende, den Zugriss, die Steifenkräfte, die Momente in Spundwand und Gurtung, den Stahlnachweis und den Hebungsbruch der Sohle.

Modul öffnen →

Theorieseite →

Auf dem Smartphone öffnen

Die Beispielmodule erfordern keine Registrierung.

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