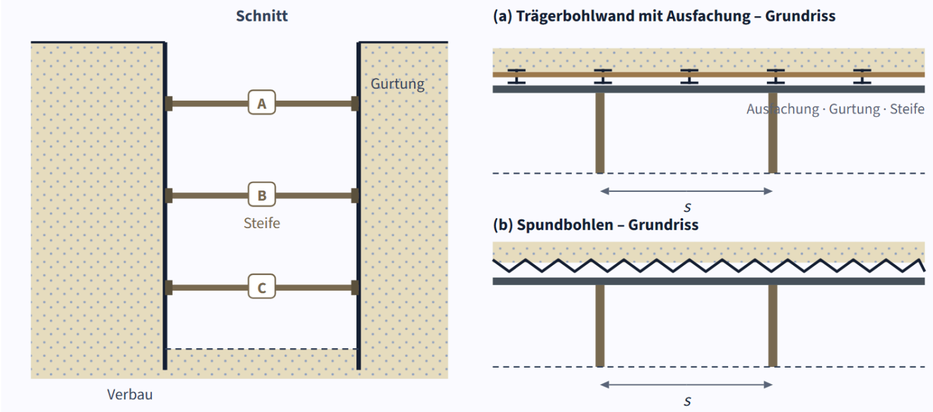
Geotechnische Vorlesung · Spundwände und ausgesteifte Baugruben

Ton über Sand: ausgesteifte Baugrube

Vorlesung: Sand und Ton in derselben Baugrube (äquivalente Kohäsion nach Peck); Einhüllende, Steifenkräfte, Bemessung von Spundwand und Gurtung, Stahlnachweis und Hebungsbruch der Sohle; zu jedem Thema ein Rechenbeispiel.

- Baugrubensicherung
- Äquivalenter Ton (Sand + Ton)
- Steife · Gurtung · Spundwand
- EN 1993 · AISC 360
- Hebungsbruch der Sohle



Was lernen wir in dieser Vorlesung?

Warum der Druck in einer ausgesteiften Baugrube **nicht nach Rankine** verläuft und wie die Einhüllenden konstruiert werden; Einhüllende für Ton (mit γH/c)

Wenn die Baugrube durch Sand und Ton verläuft, werden Pecks **äquivalente Kohäsion** c_{av} und γ_a verwendet; die Einhüllende wird über $\gamma_a H/c_{av}$ gewählt

Wie die Baugrube am National Plaza (Chicago) zunächst **mehrere Tone** nach ihrer Mächtigkeit mittelt und sie dann mit dem Sand zusammenfasst

Die Addition der Auflast neben der Einhüllenden; aus der Einhüllenden die **Steifenkräfte**, die Dimensionierung von **Spundwand** und **Gurtung**

Nachweis des Stahls nach **EN 1993-1-1 und AISC 360-22**; der Nachweis der **Sohlhebung** im geschichteten Profil

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: oben 3 m Sand (γ = 17 kN/m³, φ′ = 30°) über Ton (γ = 18 kN/m³, c = 35 kPa); H = 7.00 m, 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 laufenden Meter Wand (Steifenkräfte mit s multipliziert).

Aussteifungssystem und seine Elemente

THEORIE

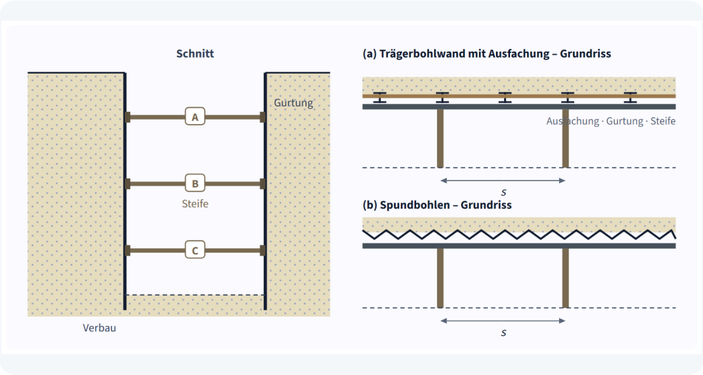
Tiefe Baugruben mit senkrechter Wand (innerstädtische Untergeschosse, Tunnel in offener Bauweise) werden mit einem temporären **Aussteifungssystem** offen gehalten. Zwei Anordnungen sind üblich: vorab gerammte **vertikale Träger** (Stahl oder Holz), zwischen die beim Aushub fortschreitend eine horizontale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

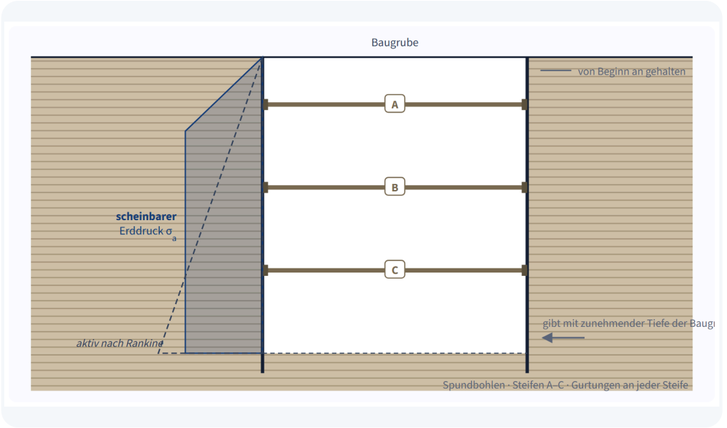
Eine Winkelstützwand dreht sich um ihre Fundamentsohle, und der aktive Erddruck nach Rankine (oben null, unten am größten) beschreibt dies gut. **Eine ausgesteifte Wand bewegt sich in entgegengesetztem Sinn**: Die erste Steife wird gesetzt, solange die Baugrube flach ist, sodass sich der obere Teil kaum 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

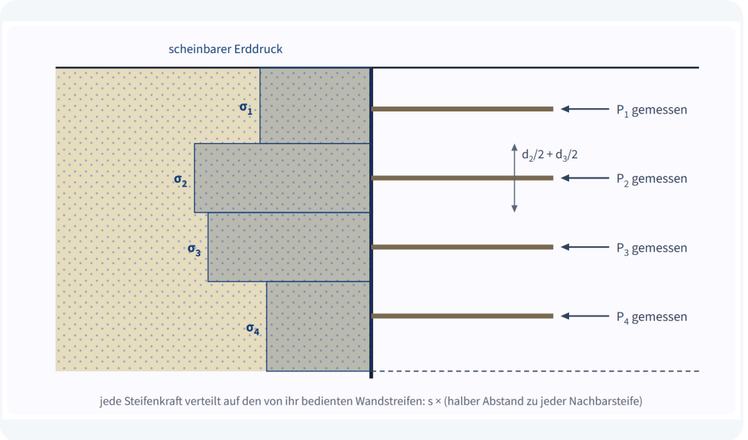
Der Erddruck ist von Ort zu Ort verschieden, und jede Steife ist für die **größte Last** zu bemessen, die auf sie wirken kann. Zu diesem Zweck werden Einhüllende konstruiert: In einer instrumentierten Baugrube wird die Last jeder Steife gemessen, durch den von ihr gestützten Spundwandstreifen geteilt (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

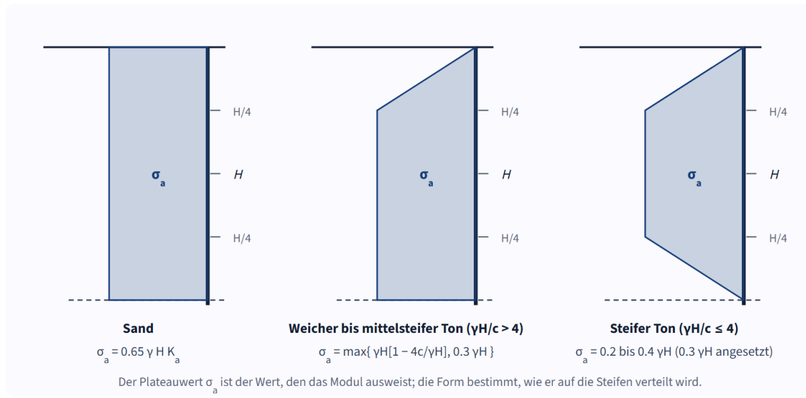
THEORIE

Im Ton wird die Form der Einhüllenden durch die **Stabilitätszahl γH/c** bestimmt (c undränierte Kohäsion, φ = 0). **Weicher bis mittelfester Ton** mit γH/c > 4 wird durch die Baugrube weit über seine Festigkeit hinaus beansprucht; **steifer Ton** liegt näher an seinem elastischen Bereich:

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

Die Einhüllende für weichen bis mittleren Ton ist an der Oberfläche null, wächst im oberen Viertel an und bildet bis zur Sohle ein konstantes Plateau; die Einhüllende für steifen Ton wächst im oberen Viertel an, ist in der mittleren Hälfte konstant und geht im unteren Viertel auf null zurück. Der größere der beiden Ausdrücke ist maßgebend.

Randbedingungen: Aushubtiefe ≳ 6 m; Wasser unterhalb der Sohle; Ton undräniert (Porenwasserdruck wird nicht berücksichtigt).



Äquivalente Kohäsion nach Peck

THEORIE

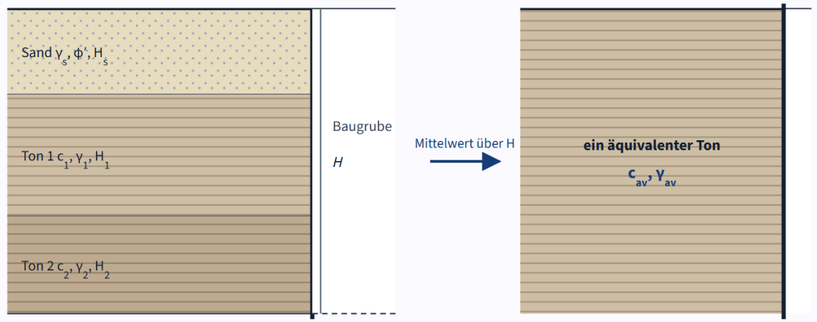
Enthält die Baugrube sowohl Sand als auch Ton, so ersetzt das Peck-Profil beides durch **einen einzigen Ton**: Es mittelt die Festigkeit, die der Boden über die Höhe mobilisieren kann. Sand trägt die Reibung aus dem Eigengewicht bei, Ton die einaxiale Druckfestigkeit (für fortschreitenden Bruch abgemindert):

$$c_{av} = \frac{1}{2H}\left[\gamma_s K_s H_s^2 \tan\varphi'_s + (H - H_s)\, n' q_u\right] \qquad \gamma_a = \frac{1}{H}\left[\gamma_s H_s + (H - H_s)\gamma_c\right]$$

H_s, γ_s, φ'_s: Höhe, Wichte und wirksamer Reibungswinkel des Sandes; K_s Erddruckbeiwert des Sandes (≈ 1); $q_u = 2c$ einaxiale Druckfestigkeit des Tones, γ_c Wichte des wassergesättigten Bodens; n' Beiwert des fortschreitenden Bruchs, 0.5–1.0 (Mittel 0.75).

Mit c_{av} und γ_a werden die Toneinhüllenden über die gesamte Höhe angesetzt; die Einhüllende wird mit $\gamma_a H/c_{av}$ gewählt.

Liegen unter dem Sand mehrere Tone, mittelt die Quelle sie zunächst nach der Mächtigkeit ($c_{av} = \Sigma c_i H_i / \Sigma H_i$, γ_{av}) und kombiniert diesen Ersatzton anschließend mit dem Sand (wie im Fall National Plaza).



Sand: Reibung aus Eigengewicht $\gamma K_s H_s^2 \tan\phi'$ · Ton: $n' q_u H$ · beide über die Höhe summiert, danach gilt die Regel für Ton

Aufgabe

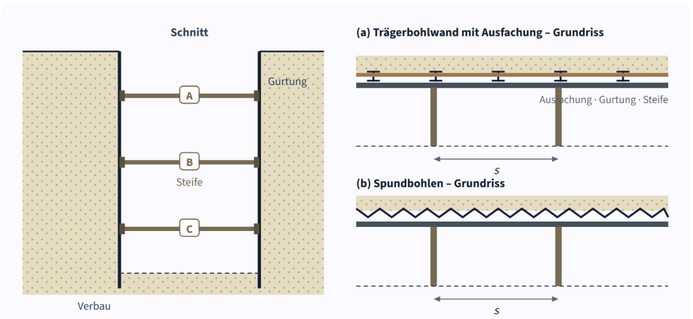
BEISPIEL

Gegeben

Profil	**oben $H_s = 3$ m Sand ($\gamma_s = 17$ kN/m³, $\varphi'_s = 30°$, $K_s = 1$), darunter Ton ($\gamma_c = 18$ kN/m³, $c = 35$ kPa)**
Aushub und Beiwert	$H = 7.0$ **m;** $n' = 0.75$ **(Mittelwert); außerdem** $n' = 0.5$ **und** 1.0

GESUCHT

c_{av}, γ_a, $\gamma_a H/c_{av}$, die Art der Einhüllenden und σ_a; Ergebnis aus der Variation von n′.



Lösung (1/2)

LÖSUNG

1 Äquivalente Kohäsion und Wichte (n′ = 0.75)

$$c_{av} = \frac{1}{2(7)}\left[17(1)(3)^2\tan 30^\circ + (7-3)(0.75)(2\cdot 35)\right] = \frac{88.33 + 210.0}{14} = \mathbf{21.31}\ \text{kPa}$$

$$\gamma_a = \frac{17(3) + (7-3)18}{7} = \mathbf{17.57}\ \text{kN/m}^{\mathbf{3}} \qquad \frac{\gamma_a H}{c_{av}} = \frac{17.57(7)}{21.31} = \mathbf{5.77}\ > 4$$

Äquivalenter Ton: c_{av} = **21.31 kPa**, γ_a = 17.57 kN/m³; $\gamma_a H/c_{av}$ = **5.77** > 4 → Einhüllende für weichen bis mittelsteifen Ton.

Lösung (2/2)

LÖSUNG

2 Einhüllende für weichen bis mittelsteifen Ton und Empfindlichkeit gegenüber n′

$$\sigma_a = \gamma_a H \left[1 - \frac{4c_{av}}{\gamma_a H}\right] = 17.57(7) - 4(21.31) = \mathbf{37.75}\ \text{kPa}$$

n′	c_{av} (kPa)	$\gamma_a H/c_{av}$	σ_a (kPa)	P_{max} (kN)
0.50	16.31	7.54	57.75	424.5
0.75	21.31	5.77	37.75	277.5
1.00	26.31	4.67	36.90	271.2

Äquivalenter Ton: c_{av} = **21.31 kPa**, $\gamma_a H/c_{av}$ = 5.77 > 4: Einhüllende für weichen bis mittelfesten Ton, **σ_a = 37.75 kPa**. Wird n′ = 0.5 angenommen, sinkt c_{av} auf 16.31 und σ_a steigt auf 57.8 kPa: Der Beiwert des fortschreitenden Bruchs beeinflusst das Ergebnis stark.

Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Aufgabe

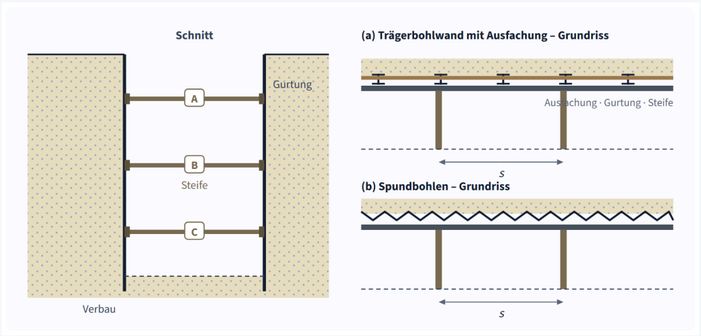
BEISPIEL

Gegeben

Aushub	$H = 70$ ft $= 21.34$ m tief, sechs Steifen darunter; 13 ft Sand unter der Auffüllung, vier Tone (Tabelle unten, SI)
Beiwerte	$K_s = 1$, $\varphi'_s = 30°$, $n' = 0.75$

GESUCHT

Über die Dicke gemittelter Ton $c_{av,Ton}$; c_{av}, γ_{av}, $\gamma H/c$ und σ_a.



Lösung (1/2)

LÖSUNG

1 Profil (SI) und über die Dicke gemittelter Ton

Schicht	Dicke (m)	γ (kN/m³)	c (kPa)	Beitragsterm (kN/m)
Sandschüttung	3.96	17.28	—	156.6
Ton 1	10.06	19.95	19.2	289.0
Ton 2	3.35	20.42	33.5	168.6
Ton 3	1.83	21.21	95.8	262.7
Ton 4	2.13	21.21	191.5	612.9

$$c_{av,clay} = \frac{\Sigma c_i H_i}{\Sigma H_i} = \mathbf{51.16}\ \mathrm{kPa}$$

Der mit der Dicke gewichtete Mittelwert der vier Tone beträgt **51.16 kPa**; der Sandterm $\gamma_s K_s H_s^2 \tan \varphi'_s$ = 156.6, der Tonterm $n' q_u \Sigma H_i$ = 1,333.2 kN/m.

Lösung (2/2)

LÖSUNG

2 Äquivalente Kohäsion, Wichte und Einhüllende

$$c_{av} = \frac{\gamma_s K_s H_s^2 \tan\varphi_s' + n' q_u \Sigma H_i}{2H} = \frac{156.6 + 1{,}333.2}{2(21.34)} = \mathbf{34.91}\ \mathrm{kPa}$$

$$\gamma_{av} = \frac{\Sigma \gamma_i H_i}{H} = \mathbf{19.76}\ \mathrm{kN/m^3} \qquad \frac{\gamma_{av} H}{c_{av}} = \frac{19.76(21.34)}{34.91} = \mathbf{12.08} > 4$$

$$\sigma_a = \gamma_{av} H \left[1 - \frac{4c_{av}}{\gamma_{av} H}\right] = \mathbf{282.0}\ \mathrm{kPa}$$

Es wird die Einhüllende für weichen bis mittelfesten Ton angesetzt: **σ_a = 282.0 kPa** (c_{av} = 34.91 kPa, γ_{av} = 19.76 kN/m³, $\gamma_{av}H/c_{av}$ = 12.08). Ein Vergleich dieser Einhüllenden mit den beobachteten Steifenkräften findet sich im Abschnitt „Einhüllende in realen Baugruben“ (Einhüllende nach Peck ≈ 1.8-fach).

Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Wird neben der Einhüllenden ergänzt

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 $K_a = 1$: $\mathbf{\Delta p_q = q}$.

Wasser: Tonschichten sind undränierte Konstrukte mit totalen Spannungen; im Ton ist das Wasser bereits in der Wichte und in der undränierten Festigkeit enthalten. Wasser über der Sohle wird eingezeichnet und vermerkt, nicht als separate Last angesetzt; es verändert nur das Bodengewicht: Wichte des wassergesättigten Bodens unter Wasser und in einer vom Wasser geschnittenen Schicht der nach der Mächtigkeit gewichtete Mittelwert der beiden Werte.

Da die Mächtigkeit der Sandschicht den äquivalenten Ton bestimmt, wirkt sich die **Schichtfolge** des Profils unmittelbar auf das Ergebnis aus: Mit zunehmender Sandmächtigkeit ändert sich c_{av} (Beispiel unten).

$$\Delta p_q = K_a q = q \;\; (\varphi = 0 \Rightarrow K_a = 1)$$

$$\gamma = \frac{\gamma z_w + \gamma_{sat}(H - z_w)}{H}$$

Aufgabe

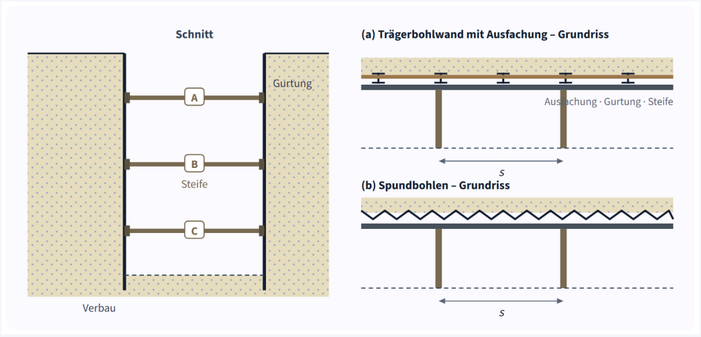
BEISPIEL

Gegeben

Aushub	**Die Baugrube aus Beispiel 1 ($H = 7$ m, $n' = 0.75$): Sand 3 m (Aushub)**
Änderungen	**(a) Sand 5 m mächtig (Ton 2 m); (b) Auflast $q = 10$ kPa**

GESUCHT

In jedem Fall c_{av}, $\gamma_a H/c_{av}$, σ_a, Gesamtlast R und größte Steifenkraft.



Lösung (1/2)

LÖSUNG

1 (a) Sand 5 m: äquivalenter Ton rekonstruiert

$$c_{av} = \frac{1}{14}\left[17(5)^2 \tan 30^\circ + (2)(0.75)(70)\right] = 25.03\ \text{kPa}$$

$$\gamma_a = \frac{17(5) + 2(18)}{7} = 17.29\ \text{kN/m}^3$$

$$\sigma_a = \max\left(\gamma_a H - 4c_{av},\ 0.3\gamma_a H\right) = \max(20.91, 36.31) = \mathbf{36.31}\ \text{kPa}$$

Beträgt die Sandschicht 5 m, so ergibt sich die äquivalente Kohäsion zu 21.3 → **25.0 kPa**, und die Einhüllende wird durch **$0.3\gamma_a H$ = 36.3 kPa** bestimmt.

Lösung (2/2)

LÖSUNG

2 (b) Auflast: getrennt $\Delta p_q = q = 10$ kPa; Zusammenfassung der drei Fälle

Zustand	c_{av} (kPa)	γ_a (kN/m³)	$\gamma_a H/c_{av}$	σ_a (kPa)	R (kN/m)	P_{max} (kN)
Aushub (Sand 3 m)	21.31	17.57	5.77	37.75	231.2	277.5
(a) Sand 5 m	25.03	17.29	4.84	36.31	222.4	266.9
(b) q = 10 kPa	21.31	17.57	5.77	37.75	301.2	351.0

Bei zunehmender Sandmächtigkeit steigt c_{av} von 21.3 auf 25.0 kPa, und die Einhüllende fällt von 37.8 auf **36.3 kPa** (reibungsbehafteter Sand trägt mehr Widerstand bei als Ton; maßgebend ist dann der verbleibende Term $0.3\gamma_a H$). Die Auflast verändert die Einhüllende nicht: Sie addiert lediglich $\Delta p_q = 10$ kPa (R von 231.2 auf 301.2 kN/m).

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:

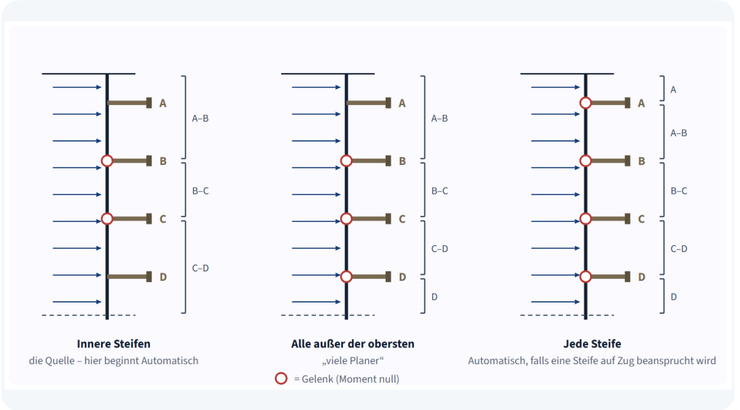
Die Erddruckeinhüllende und die Steifenlagen zeichnen. Die Spundwand außer an der obersten und der untersten **an jeder Steifenlage gelenkig** ansetzen (viele Planer tun dies an allen außer der obersten).

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

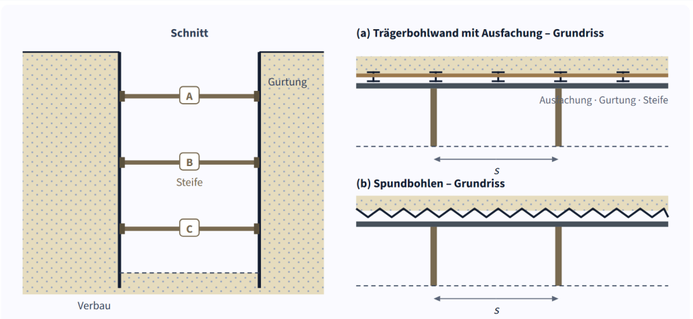
BEISPIEL

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: äquivalenter Ton, Einhüllende für weich–mittel $\sigma_a = 37.75$ kPa (nimmt im oberen Viertel zu, bis zur Sohle konstant); Spundwand bei Steife B gelenkig gelagert (außer oben und 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	99.09	2.139	A (z = 1.00), B (z = 3.50)
2	3.50 – 7.00	132.12	5.250	B (z = 3.50), C (z = 6.00)

2 Erster Teil: Momentengleichgewicht um die erste Steife

$$R_{B_2} = \frac{W(\bar{z} - z_A)}{z_B - z_A} = \frac{99.09(2.139 - 1.00)}{3.50 - 1.00} = \mathbf{45.14} \qquad R_A = W - R_{B_2} = \mathbf{53.95}\ \mathrm{kN/m}$$

Das erste Feld trägt die beiden Steifen mit 53.95 und 45.14 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

$$R_C = \frac{W(\bar{z} - z_B)}{z_C - z_B} = \frac{132.12(5.250 - 3.50)}{6.00 - 3.50} = \mathbf{92.49} \qquad R_{B_1} = W - R_C = \mathbf{39.64}\ \mathrm{kN/m}$$

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	53.95	53.95	**161.85**
B	3.50	45.14 + 39.64	84.78	**254.34**
C	6.00	92.49	92.49	**277.47**

Größte Steifenkraft **P_C = 277.47 kN** (Lage C): 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

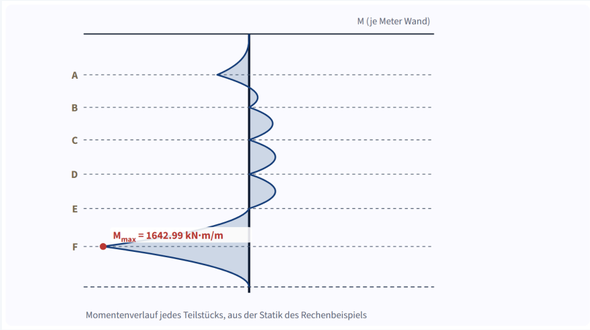
Die **Spundwand** wird aus denselben Abschnitten bemessen: In jedem Abschnitt wird das maximale Biegemoment ermittelt (dort, wo die Querkraft das Vorzeichen wechselt: innerhalb des Feldes oder am Auflager, an dem der Kragarm auf die Steife trifft); das größte ist das Bemessungsmoment für den laufenden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

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

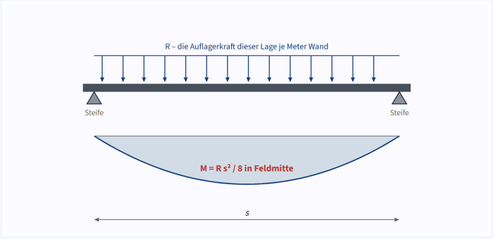
Steifen können bei ordnungsgemäßem Anschluss als durchlaufend angesetzt werden; konservativ werden sie an den Auflagern als **gelenkig** angenommen: ein einfacher Balken mit der Stützweite s, wobei die Reaktion R der Lage (je Längeneinheit der Wand) als Streckenlast wirkt:

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

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

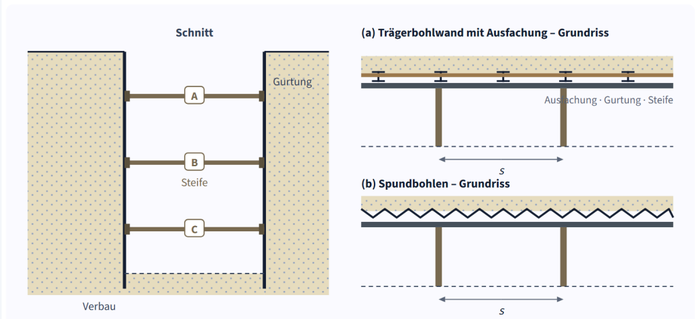
BEISPIEL

Gegeben

Aushub	**Die Baugrube aus Beispiel 1 ($H = 7$ m, äquivalenter Ton, $\sigma_a = 37.75$ kPa); Steifen bei 1.0 · 3.5 · 6.0 m; $s = 3.0$ 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	26.99	2.30
2	3.50 – 7.00	20.81	4.55

2 Erforderliches Widerstandsmoment

$$S = \frac{M_{max}}{\sigma_{allow}} = \frac{26.99}{170{,}000} = 0.0001588\ \mathrm{m^3/m} = \mathbf{158.8\ cm^3/m}$$

Bei der Spundwand **M_{max} = 26.99 kN·m/m** (Abschnitt 1, z = 2.30 m): **S ≥ 158.8 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	53.95	60.69	357
B	84.78	95.38	561
C	92.49	104.05	612

Die größte Reaktion tritt **in der Lage C** auf (R = 92.49 kN/m): Die Gurtung wird mit **M_{max} = 104.05 kN·m, S ≥ 612 cm³** bemessen; die Gurtungen der übrigen Lagen können kleiner ausfallen.

Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Bemessungswirkungen, Klasse, Biegung und Knicken

THEORIE

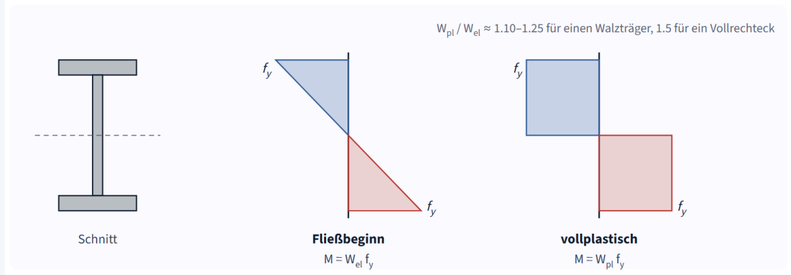
Die Lasten aus der Einhüllenden sind **Gebrauchswerte** (die Einhüllende nach Peck ist eine obere Schranke der gemessenen Lasten); sie werden einmal auf den Bemessungswert erhöht: $E_d = \gamma_F E_k$. Jedes Element wird mit der Streckgrenze seiner eigenen Stahlsorte (f_y) nachgewiesen; der Querschnitt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

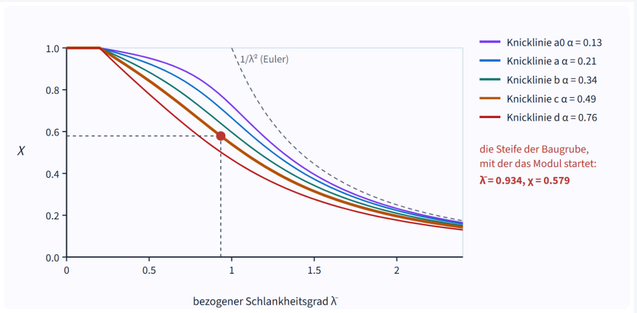
$$M_{c,Rd} = \frac{W f_y}{\gamma_{M0}} \qquad \eta = \frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \le 1 \qquad W = W_{pl}\ (\text{Klasse 1–2}),\ W_{el}\ (\text{Klasse 3})$$

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

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

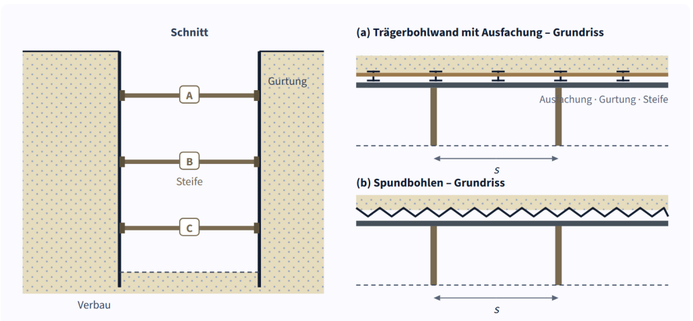
BEISPIEL

Gegeben

Baugrube und Lasten	**Die Baugrube aus Beispiel 1 und die Lasten aus Beispiel 4: $P_{max} = 277.47$ kN**
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): $\eta = \gamma_F M/(W f_y)$

$$\eta_{sp} = \frac{1.35(26.99)}{600 \cdot 10^{-6}(275\,000)} = \frac{36.44}{165.0} = \mathbf{0.221}$$

$$\eta_{belt} = \frac{1.35(104.05)}{1\,000 \cdot 10^{-6}(275\,000)} = \frac{140.47}{275.0} = \mathbf{0.511}$$

η = 0.221 für die Spundwand, **η = 0.511** für die Gurtung: beide sind ausreichend (η ≤ 1).

Lösung (2/2)

LÖSUNG

2 Steife (Knicken): $N_{Ed} = 1.35\ P_{max} = 1.35(277.47) = 374.58$ kN

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

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

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

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

η_{Steife} = 374.6 / 1,046.4 = **0.358**. Alle drei Elemente sind ausreichend ($\eta \le 1$); für die Steife ist **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

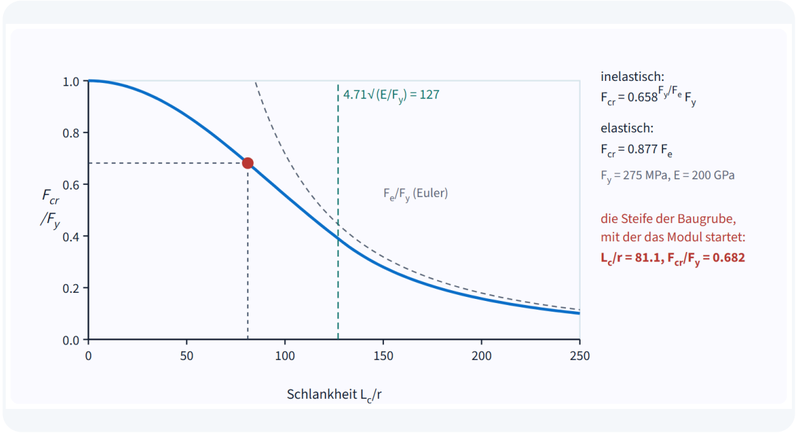
Jedes Tragglied wird mit der **nominellen Tragfähigkeit R_n** nachgewiesen, die sich aus den Regelungen für Druck, Biegung und Schub ergibt. Beim LRFD wird die Last mit Beiwerten versehen und die Tragfähigkeit mit φ abgemindert; beim ASD wird die Gebrauchslast mit der durch den Sicherheitsfaktor Ω geteilten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

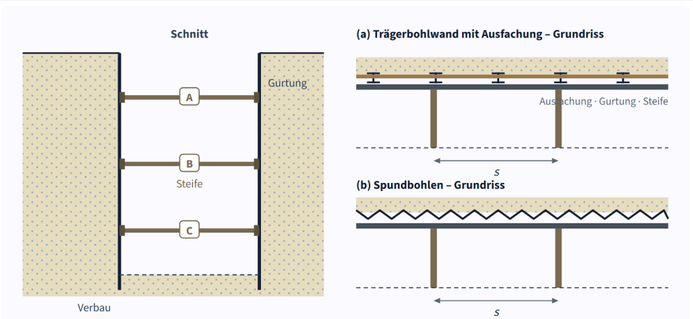
BEISPIEL

Gegeben

Baugrube und Lasten	**Die Baugrube aus Beispiel 1 und die Lasten aus Beispiel 4: $P_{max} = 277.47$ kN**
Elemente	**Bauteile aus Beispiel 6 (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 LRFD- und ASD-Verhältnisse (P = 277.47 kN)

$$\text{LRFD: } P_u = 1.6(277.47) = 444.0\ \text{kN} \leq \phi_c P_n = 0.90(1{,}231.5) = 1{,}108.3\ \text{kN} \quad \eta = \mathbf{0.401}$$

$$\text{ASD: } P_a = 277.47\ \text{kN} \leq \frac{P_n}{\Omega_c} = \frac{1{,}231.5}{1.67} = 737.4\ \text{kN} \quad \eta = \mathbf{0.376}$$

Steife: LRFD η = **0.401**, ASD η = **0.376**. Spundwand (LRFD) 0.291, Gurtung 0.673; in EN 1993-1-1 waren es 0.221, 0.511 und 0.358.

Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Der Ton darunter trägt, die seitlichen Schichten bewirken Schub und Last

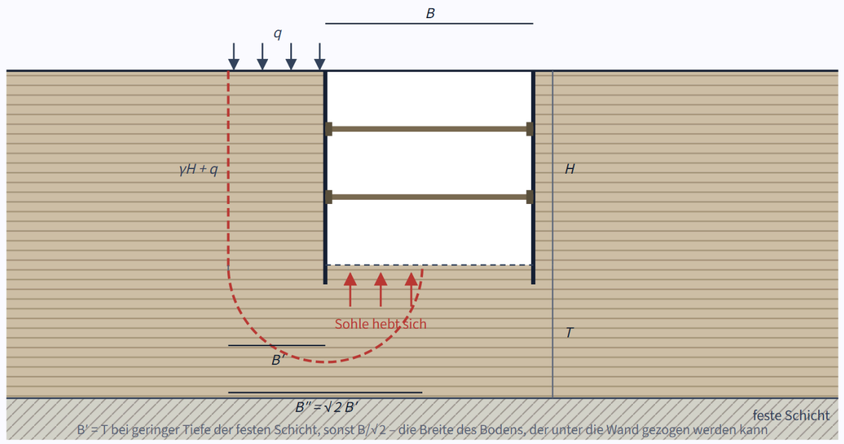
THEORIE

Die Baugrubensohle in Ton kann unter dem Gewicht des seitlichen Bodens nach oben aufbrechen (Terzaghi-Säule, Korrektur nach Chang). Die Formel wurde für homogenen Ton hergeleitet; das Modul verwendet sie **in geschichteten Profilen über die GeoTerva-Erweiterung**:

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

c: der Ton unterhalb der Baugrubensohle (Tragfähigkeitsanteil); **c_{side}**: mittlere Kohäsion über die gestützte Höhe (Sand wird zu null gesetzt; Anteil aus dem seitlichen Abscheren); **$\sigma_v(H)$**: totale Überlagerungsspannung in Höhe der Baugrubensohle am Baugrubenrand ($\Sigma\gamma_i H_i$).

B Aushubbreite, L Länge im Grundriss, T die steife Schicht unter der Sohle; die Einbindung der Wand wird nicht angesetzt (auf der sicheren Seite). Gefordert ist FS ≈ **1.5**.



Aufgabe

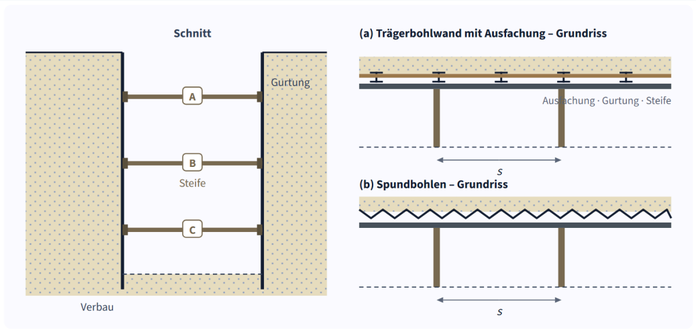
BEISPIEL

Gegeben

Offene Baugrube	$H = 7$ m, $B = 6$ m, $L = 20$ m, Ton $T = 4$ m **unter der Sohle; oben 3 m Sand ($\gamma = 17$), darunter Ton ($\gamma = 18$, $c = 35$ kPa)**
Vergleich	**wenn der Sand 5 m mächtig wäre (Ton 2 m)**

GESUCHT

c_{side}, $\sigma_v(H)$, B' und **FS** (≥ 1.5?); FS bei zunehmender Sandmächtigkeit?



Lösung

LÖSUNG

1 Aus den seitlichen Schichten: mittlere Kohäsion und Überlagerungsspannung

$$c_{side} = \frac{0\,(3) + 35\,(4)}{7} = \mathbf{20.0}\ \text{kPa}\ \ (\text{Sand Null}) \qquad \sigma_v(H) = 17(3) + 18(4) = \mathbf{123}\ \text{kPa}$$

$$B/\sqrt{2} = 4.24\ \text{m} > T = 4\ \text{m}\ \Rightarrow\ B' = 4.00\ \text{m}, \quad B'' = \sqrt{2}B' = 5.66\ \text{m}$$

2 Sicherheitsfaktor (Tragfähigkeitsterm: Ton unter der Sohle c = 35 kPa)

$$FS = \frac{5.14(35)\left(1 + 0.2\frac{5.66}{20}\right) + \frac{20(7)}{4.00}}{123} = \frac{190.1 + 35.0}{123} = \mathbf{1.83}\ \geq 1.5\ \checkmark$$

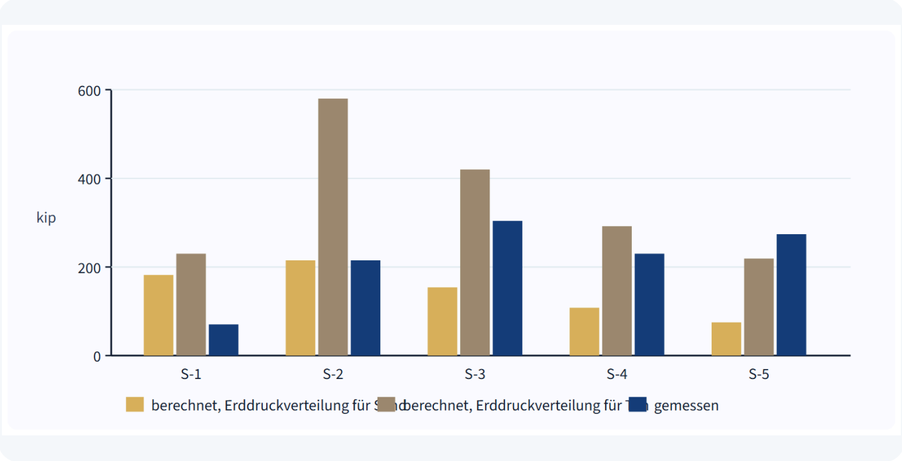
Sicherheit gegen Hebungsbruch **1.83** (≥ 1.5). Bei 5 m Sand sinkt die seitliche Kohäsion auf 10 kPa, die Überlagerungsspannung fällt auf 121 kPa und FS sinkt auf **1.72**: Mit zunehmender Mächtigkeit der Sandschicht nimmt der Anteil der seitlichen Scherung ab.

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, 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, σ_a = 282.0 kPa). Die Einhüllende nach Peck ergab etwa das **1.8-Fache** des beobachteten Drucks: 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 zusammengestellt; **die Einhüllende ist nicht der tatsächliche Erddruck auf die Wand zu einem bestimmten Zeitpunkt**: Sie liefert eine sichere Steifenkraft, nicht die Wandverformung. Ton ist undräniert, Sand dräniert.

Das Sand-+-Ton-Profil wird in **einen einzigen äquivalenten Ton** umgerechnet (c_{av}, γ_a); die Einhüllende wird über $\gamma_a H/c_{av}$ gewählt. Mehrere Tone werden zunächst nach der Mächtigkeit gemittelt. $K_s \approx 1$ und $n' = 0.75$ sind Mittelwerte; eine Streuung von $n' = 0.5–1.0$ hat große Auswirkungen auf das Ergebnis.

Die Auflast wird getrennt hinzugefügt ($\Delta p = q$); das Wasser ändert nur die Wichte. Die **Spundwand** ist eine Kette gelenkig gelagerter, statisch bestimmter Balken; die **Gurtungen** sind einfache Feldträger zwischen den Steifen. Der Stahl wird nach EN 1993-1-1 (Klasse 4 wird nicht bemessen) oder nach AISC 360-22 nachgewiesen.

Der Hebungsbruch wird mit der geschichteten Erweiterung der für homogenen Ton abgeleiteten Formel in GeoTerva nachgewiesen; die Einbindetiefe der Spundwand wird dabei nicht angesetzt.

Während des Aushubs sind seitliche Bewegungen und Bodenverlust in der Umgebung zu erwarten; bei vorhandener harter Schicht werden die Spundwände in diese eingebunden.

Zusammenfassung

Die wichtigsten Punkte

Äquivalenter Ton: $c_{av} = [\gamma_s K_s H_s^2 \tan \varphi'_s + (H - H_s) n' q_u]/(2H)$, $\gamma_a = [\gamma_s H_s + (H - H_s)\gamma_c]/H$; im Beispiel 21.31 kPa und 17.57 kN/m³

Einhüllende: $\gamma_a H/c_{av} = 5.77 > 4 \rightarrow$ Einhüllende für weichen bis mittelsteifen Ton $\sigma_a = \gamma_a H[1 - 4c_{av}/\gamma_a H] = 37.75$ kPa; $n' = 0.5 \rightarrow 57.75$ kPa

National Plaza: $c_{av,Ton} = 51.16$, $c_{av} = 34.91$ kPa, $\gamma_{av} = 19.76$ kN/m³, $\gamma H/c = 12.08 \rightarrow \sigma_a = 282.0$ kPa (≈ 1.8-fach der beobachtete Wert)

Steifenkraft und Bemessung: $P_{max} = 277.47$ kN; Spundwand $M_{max} = 26.99$ kN·m/m; Gurtung M = 104.05 kN·m

Stahl: EN 1993-1-1 η = 0.221 / 0.511 / 0.358; AISC LRFD Steife 0.401, ASD 0.376

Hebungsbruch der Baugrubensohle (geschichtet): $c_{side} = 20$ kPa, $\sigma_v(H) = 123$ kPa, FS = 1.83 ≥ 1.5

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 Zahlenbeispiele wurden mit der eigenen Berechnungsengine des Moduls erzeugt; das Modul liefert dieselben Werte. Die Rechenbeispiele auf der Modulseite sind der Fall National Plaza (Chicago) und die Eröffnungsbaugrube des Moduls (H = 7 m, Sand 3 m + Ton).

GeoTerva

Geotechnische Berechnungen online

Von der Theorie zur Praxis

Geben Sie die Sand- und Tonschichten, Steifenlagen, Auflasten und Ihre Elemente Ihrer eigenen Baugrube in GeoTerva ein; das Modul liefert den äquivalenten Ton, die Einhüllende, die Steifenkräfte, die Momente in Spundwand und Gurtung, den Stahlnachweis und den Hebungsbruch der Baugrubensohle zusammen.

Modul öffnen →

Theorieseite →

Auf dem Smartphone öffnen

Die Beispielmodule erfordern keine Registrierung.

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