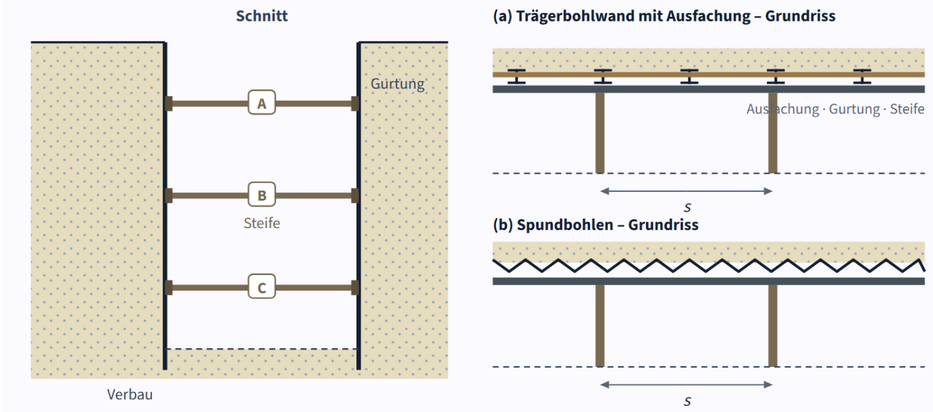
Geotechnische Vorlesung · Spundwände und ausgesteifte Baugruben

Ausgesteifte Baugrube in Sand

Vorlesung: ausgesteifte (abgestützte) Baugrube in Sand; scheinbare Erddruckverteilung nach Peck, Steifenkräfte, Bemessung von Spundwand und Gurtung, Nachweis des Stahls und hydraulischer Grundbruch an der Sohle; zu jedem Thema ein Rechenbeispiel.

Baugrubensicherung · Einhüllende nach Peck (Sand) · Steife · Gurtung · Spundwand · EN 1993 · AISC 360 · Erosionsgrundbruch an der Sohle



Einführung

Was lernen wir in dieser Vorlesung?

Warum der Druck in einer ausgesteiften Baugrube **nicht nach Rankine** verläuft und wie die **Einhüllenden** aus gemessenen Steifenkräften konstruiert werden

Für Sand die **Peck-Einhüllende $\sigma_a = 0.65\ \gamma\ H\ K_a$** und drei Regeln für K_a bei mehreren Sandschichten

Die Ergänzung von **Wasser** und **Auflast** als separate Diagramme neben der Einhüllenden

Von der Einhüllenden zu den **Auflagerlasten** (Gelenksegmente, Reaktionen A, B_1, B_2, C, P = R·s)

Die Bemessung der **Spundwand** (M_{max}, S) und der **Gurtung** (M = R s^2/8); der Nachweis des Stahls nach **EN 1993-1-1 und AISC 360-22**

Kontrolle der **Erosionsgrundbruch** (hydraulischer Grundbruch) an der Sandbasis (Ausgangsgradient, FS = i_{cr}/i_{exit})

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: Sand (γ = 17.6 kN/m³, φ′ = 32°), Tiefe H = 8.00 m, Breite B = 6.00 m; Steifen in den Tiefen 1.80 · 4.60 · 7.30 m, horizontaler Abstand s = 3.00 m. Die Kräfte gelten je Meter Wand (Steifenkräfte mit s multipliziert).

Aussteifungssystem und seine Elemente

THEORIE

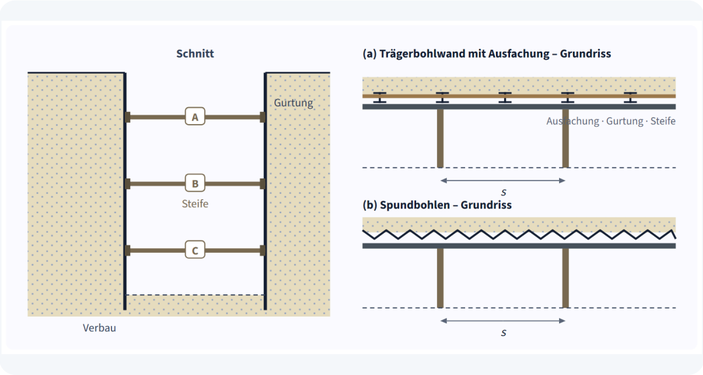
Tiefe Baugruben mit senkrechter Wand (innerstädtische Untergeschosse, Tunnel in offener Bauweise) werden mit einem temporären **Aussteifungssystem** offen gehalten. Zwei Anordnungen sind üblich: vorab gerammte **vertikale Träger** (Stahl oder Holz), zwischen die beim Aushub fortschreitend eine horizontale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

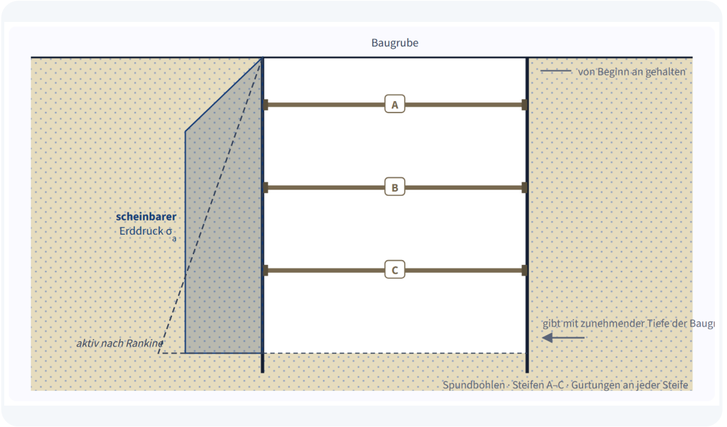
Eine Winkelstützwand dreht sich um ihre Fundamentsohle, und der aktive Erddruck nach Rankine (oben null, unten am größten) beschreibt dies gut. **Eine ausgesteifte Wand bewegt sich in entgegengesetztem Sinn**: Die erste Steife wird gesetzt, solange die Baugrube flach ist, sodass sich der obere Teil kaum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

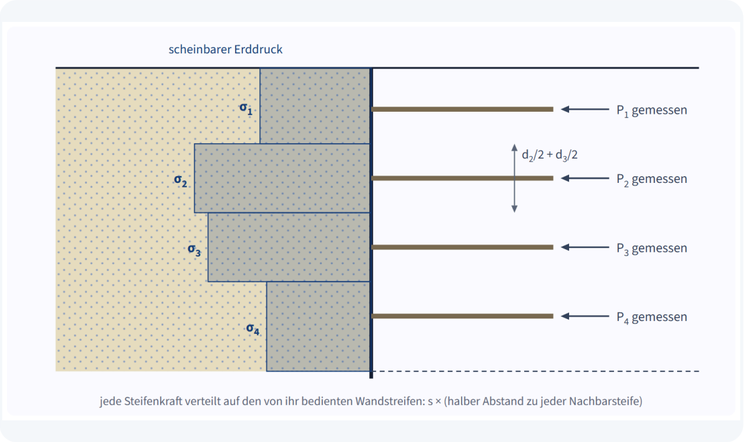
Der Erddruck ist von Ort zu Ort verschieden, und jede Steife ist für die **größte Last** zu bemessen, die auf sie wirken kann. Zu diesem Zweck werden Einhüllende konstruiert: In einer instrumentierten Baugrube wird die Last jeder Steife gemessen, durch den von ihr gestützten Spundwandstreifen geteilt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



jede Steifenkraft verteilt auf den von ihr bedienten Wandstreifen: s × (halber Abstand zu jeder Nachbarsteife)

$\sigma_a = 0.65\,\gamma\,H\,K_a$, über die gesamte Höhe

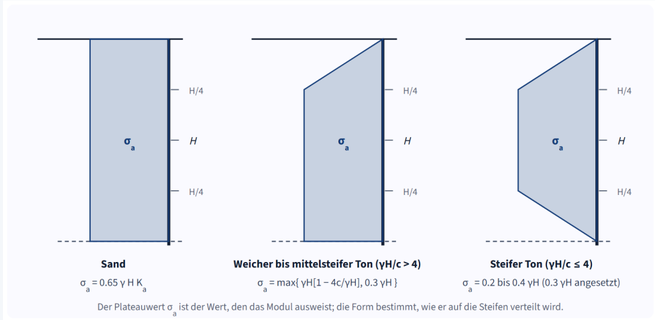
THEORIE

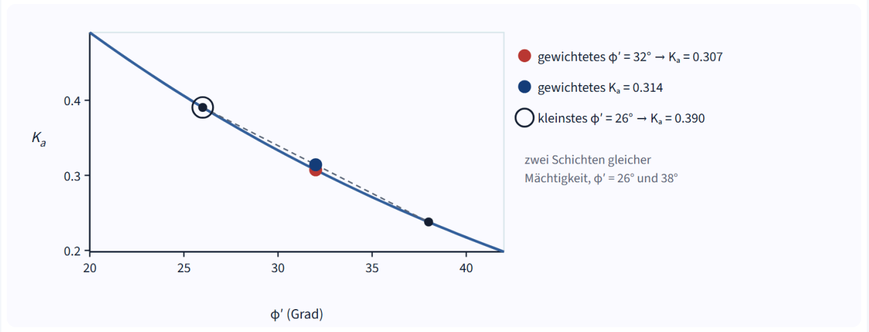
In Sand ist die Einhüllende nach Peck ein **Rechteck**: ein einziger Druck über die gesamte Aushubhöhe, 65 % der größten Ordinate des aktiven Rankine-Dreiecks:

$$\sigma_a = 0.65\,\gamma H K_a \qquad K_a = \tan^2\left(45^\circ - \frac{\varphi'}{2}\right)$$

Die Einhüllenden gelten unter folgenden Bedingungen: Aushubtiefe größer als etwa 6 m; **Grundwasser unterhalb der Baugrubensohle**; dränierter Sand (Porenwasserdruck null).

Die Einhüllende erfordert einen einzigen K_a; für **mehrere Sande** gibt die Quelle keine Regel an. Es werden drei Regeln verwendet, die nicht übereinstimmen, weil K_a eine konvexe Funktion von φ′ ist (der innerhalb der Kurve gebildete Mittelwert liegt unterhalb der Kurve): $K_a(\bar{\varphi} = \Sigma\varphi H/H)$, das mittlere $K_a = \Sigma K_{a,i} H/H$ und $K_a(\varphi'_{min})$.





Aufgabe

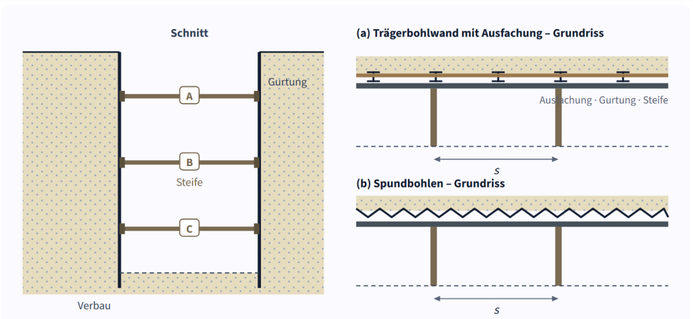
BEISPIEL

Gegeben

Aushub	$H = 8.00$ **m, einheitlicher Sand** $\gamma = 17.6$ **kN/m³,** $\varphi' = 32°$
Dreischichtiges Profil	**0–3 m:** $\gamma = 17$, $\varphi' = 28°$**; 3–6 m:** 18, $38°$**; unter 6 m:** 18.5, $33°$ **(gleiche Baugrube)**

GESUCHT

(a) **K_a** und **σ_a**; (b) die K_a- und σ_a-Werte der drei Regeln für das dreischichtige Profil.



Lösung

LÖSUNG

1 (a) Einzelsand

$$K_a = \tan^2(45^\circ - 16^\circ) = \mathbf{0.3073}$$

$$\sigma_a = 0.65\,\gamma H K_a = 0.65(17.6)(8.00)(0.3073) = \mathbf{28.12}\ \text{kPa}$$

2 (b) Drei Schichten: nach der Aushubhöhe gewichtetes $\bar{\gamma} = 17.75$ kN/m³ (Schichtdicken 3 + 3 + 2 m)

Regel	K_a	$\sigma_a = 0.65\,\bar{\gamma} H K_a$ (kPa)	P_{max} (kN)
$K_a(\bar{\varphi} = 33.0°)$	0.2948	27.21	308.5
mittleres $K_a = \Sigma K_{a,i} H_i / H$	0.2983	27.53	312.1
$K_a(\varphi'_{min} = 28°)$	0.3610	33.32	377.7

Bei einem einzelnen Sand beträgt die Einhüllende **28.12 kPa**. Die K_a-Werte der drei Regeln liegen zwischen 0.295 – 0.361: Die Berechnung mit dem kleinsten φ′ (σ_a = 33.3 kPa) liefert einen um 22 % größeren Wert als die Mittelwerte; die mittelnden Regeln bleiben innerhalb der Kurve, **der konservative Wert ist φ'_{min}**.

Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Wird neben der Einhüllenden ergänzt, nicht in ihr

THEORIE

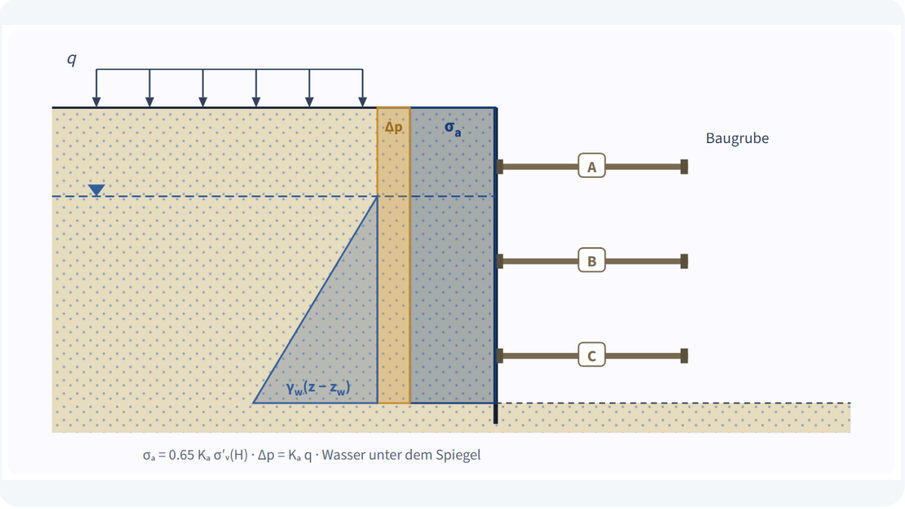
Die Einhüllenden wurden aus Baugruben mit keiner Auflast unter der Sohle und neben der Baugrube konstruiert. Das Modul fügt beide neben der Einhüllenden als **separate Diagramme** hinzu; die Einhüllende wird nicht über den Bereich hinaus skaliert, in dem sie gemessen wurde.

Wasser: Die Sand-Einhüllende nach Peck ist ein wirksames Spannungsdiagramm. Befindet sich Wasser in der Baugrube, so wird die Überlagerungsspannung in Höhe der Baugrubensohle wirksam angesetzt (über Wasser natürliche, unter Wasser Wichte unter Auftrieb); das Wasser drückt außerdem über die volle Höhe auf die Wand, und die Steifen tragen beides gemeinsam.

Auflast q wird nicht in die Einhüllende einbezogen (der empirische Faktor 0.65 würde auch für sie gelten); sie wird über die gesamte Höhe als eigene Gleichlast angesetzt.

$$\sigma'_v(H) = \sum \gamma_i h_i + \sum (\gamma_{sat,i} - \gamma_w) h_i \qquad \sigma_a = 0.65 K_a \sigma'_v(H) \qquad u(z) = \gamma_w (z - z_w)$$

$$\Delta p_q = K_a q \qquad R = \sigma_a H + \Delta p_q H + \tfrac{1}{2} \gamma_w (H - z_w)^2$$



Aufgabe

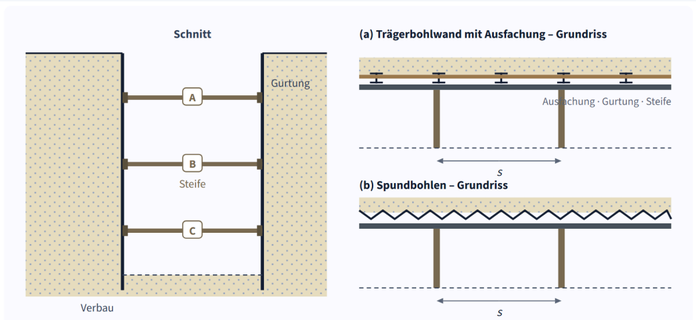
BEISPIEL

Gegeben

Aushub	**Die Baugrube aus Beispiel 1(a) ($H = 8$ m, $\gamma = 17.6$, $\gamma_{sat} = 20$ kN/m³, $\varphi' = 32°$)**
Fälle	**(a) kein Wasser, keine Auflast; (b) Grundwasserspiegel bei $z_w = 3$ m; (c) gleichmäßige Auflast $q = 10$ kPa**

GESUCHT

In jedem Fall σ_a, die Auflast und der Wasserdruck; die **Gesamtlast R** und die größte Steifenkraft.



Lösung (1/2)

LÖSUNG

1 (b) Wasser: wirksame Überlagerungsspannung und Einhüllende; das Wasser wirkt außerdem über die volle Höhe

$$\sigma_v'(H) = 17.6(3) + (20 - 9.81)(5) = 103.75\ \text{kPa}$$

$$\sigma_a = 0.65(0.3073)(103.75) = 20.72\ \text{kPa}$$

$$R = \sigma_a H + \tfrac{1}{2}\gamma_w (H - z_w)^2 = 20.72(8) + \tfrac{1}{2}(9.81)(5)^2 = \mathbf{288.41}\ \text{kN/m}$$

Unter Wasser verringert sich die wirksame Überlagerung (σ_a 28.12 → 20.72 kPa), das Wasser wirkt jedoch über die volle Höhe auf die Spundwand: R = **288.4 kN/m**.

Lösung (2/2)

LÖSUNG

2 (c) Auflast: separate Gleichlast; Zusammenfassung von (a), (b), (c)

$$\Delta p_q = K_a q = 0.3073(10) = 3.073\ \text{kPa}$$

$$R = \sigma_a H + \Delta p_q H = 28.12(8) + 3.073(8) = 249.52\ \text{kN/m}$$

Zustand	σ_a (kPa)	Ek (kPa)	R (kN/m)	P_{max} (kN)	M_{max} Spundwand (kN·m/m)
(a) Kein Wasser, q = 0	28.12	—	224.96	318.8	45.55
(b) Wasser z_w = 3 m	20.72	u(H) = 49.05	288.38	376.7	37.09
(c) q = 10 kPa	28.12	Δp_q = 3.07	249.52	353.5	50.53

Die Wassereinhüllende **verkleinert** sie, addiert aber den Wasserdruck: R 225.0 → **288.4 kN/m**. Die Auflast verändert die Einhüllende nicht; sie addiert Δp_q = 3.07 kPa (R = 249.5 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:

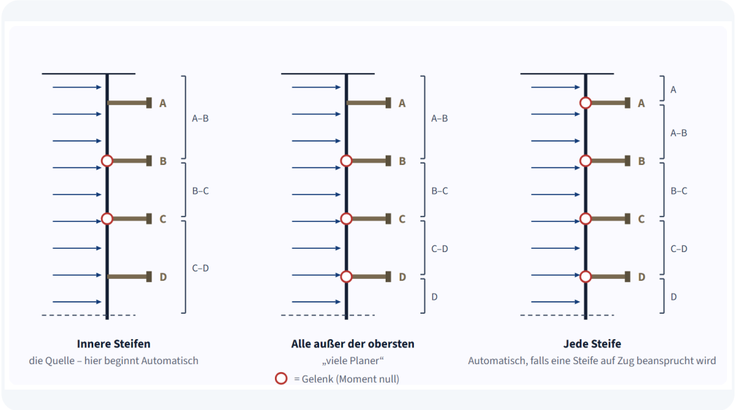
Die Erddruckeinhüllende und die Steifenlagen zeichnen. Die Spundwand außer an der obersten und der untersten **an jeder Steifenlage gelenkig** ansetzen (viele Planer tun dies an allen außer der obersten).

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

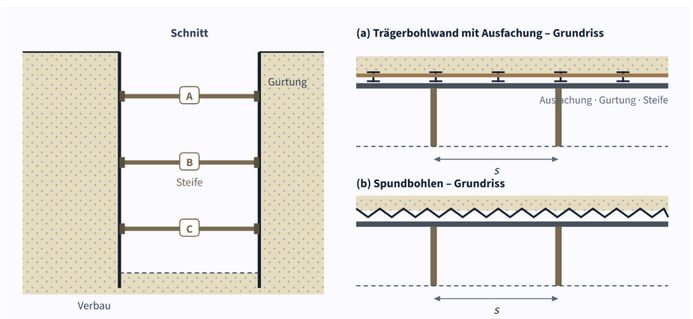
BEISPIEL

Gegeben

Aushub	$H = 8.00$ m; $B = 6$ m; Steifen $z = 1.80, 4.60, 7.30$ m (A, B, C); horizontaler Abstand $s = 3.00$ m
Druck	Beispiel 1(a): kontinuierliche rechteckige Einhüllende $\sigma_a = 28.12$ kPa; Spundwand bei Steife B gelenkig gelagert (außer am obersten und untersten Rand)

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 – 4.60	129.35	2.300	A (z = 1.80), B (z = 4.60)
2	4.60 – 8.00	95.61	6.300	B (z = 4.60), C (z = 7.30)

2 Erster Teil: Momentengleichgewicht um die erste Steife

$$R_{B_2} = \frac{W(\bar{z} - z_A)}{z_B - z_A} = \frac{129.35(2.300 - 1.80)}{4.60 - 1.80} = \mathbf{23.10} \qquad R_A = W - R_{B_2} = \mathbf{106.25}\ \mathrm{kN/m}$$

Der erste Abschnitt trägt die beiden Auflager mit 106.25 und 23.10 kN/m; die Reaktion des obersten Auflagers (A) ist größer, da sie auch die Last des Kragarmabschnitts enthält.

Lösung (2/2)

LÖSUNG

3 Zweiter Teil

$$R_C = \frac{W(\bar{z} - z_B)}{z_C - z_B} = \frac{95.61(6.300 - 4.60)}{7.30 - 4.60} = \mathbf{60.20} \qquad R_{B_1} = W - R_C = \mathbf{35.41}\ \mathrm{kN/m}$$

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	1.80	106.25	106.25	**318.75**
B	4.60	23.10 + 35.41	58.51	**175.53**
C	7.30	60.20	60.20	**180.60**

Größte Steifenkraft **P_A = 318.75 kN** (Lage A): 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

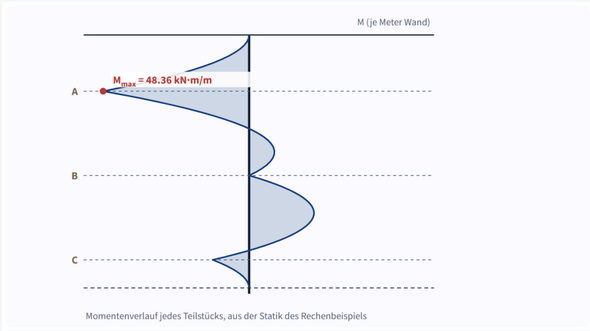
Die **Spundwand** wird aus denselben Abschnitten bemessen: In jedem Abschnitt wird das maximale Biegemoment ermittelt (dort, wo die Querkraft das Vorzeichen wechselt: innerhalb des Feldes oder am Auflager, an dem der Kragarm auf die Steife trifft); das größte ist das Bemessungsmoment für den laufenden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

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

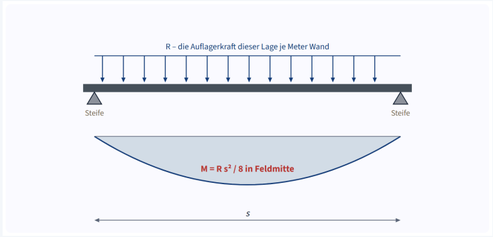
Steifen können bei ordnungsgemäßem Anschluss als durchlaufend angesetzt werden; konservativ werden sie an den Auflagern als **gelenkig** angenommen: ein einfacher Balken mit der Stützweite s, wobei die Reaktion R der Lage (je Längeneinheit der Wand) als Streckenlast wirkt:

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

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

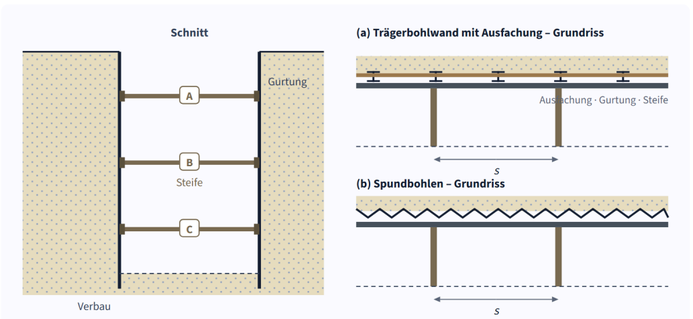
BEISPIEL

Gegeben

Aushub	**Tiefe $H = 27$ ft (8.23 m), Sand $\gamma = 17.59$ kN/m³, $\varphi' = 32°$; Steifen bei 6, 15, 24 ft (1.83; 4.57; 7.32 m); horizontaler Abstand 12 ft (3.66 m); Gelenk bei B**
Stahl	**zulässige Biegespannung $\sigma_{allow} = 165\,474$ 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 – 4.57	48.36	1.83
2	4.57 – 8.23	21.49	5.79

2 Erforderliches Widerstandsmoment

$$S = \frac{M_{max}}{\sigma_{allow}} = \frac{48.36}{165{,}474} = 0.0002923\ \mathrm{m^3/m} = \mathbf{292.3}\ \mathrm{cm^3/m}$$

In der Spundwand **M_{max} = 48.36 kN·m/m** (Abschnitt 1, z = 1.83 m): **S ≥ 292.3 cm³/m**.

Lösung (2/2)

LÖSUNG

3 Gurtung: Einfeldträger auf jeder Lage (s = 3.658 m)

Niveau	R (kN/m)	M = R s²/8 (kN·m)	S = M/σ_{zul} (cm³)
A	110.18	184.25	1,113
B	57.30	95.82	579
C	70.52	117.93	713

Die größte Reaktion tritt **auf der Lage A** auf (R = 110.18 kN/m): Die Gurtung wird mit **M_{max} = 184.25 kN·m** und **S ≥ 1,113 cm³** bemessen; die Gurtungen der übrigen Lagen können kleiner ausfallen.

Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Bemessungswirkungen, Klasse, Biegung und Knicken

THEORIE

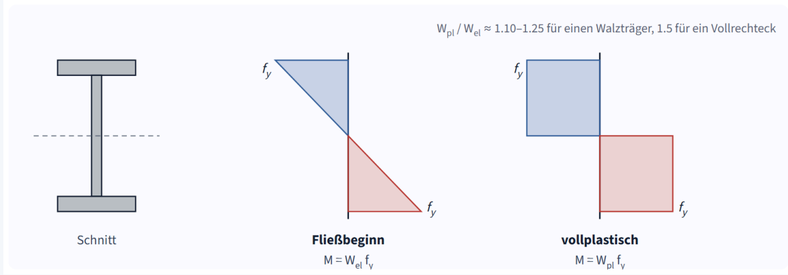
Die Lasten aus der Einhüllenden sind **Gebrauchswerte** (die Einhüllende nach Peck ist eine obere Schranke der gemessenen Lasten); sie werden einmal auf den Bemessungswert erhöht: $E_d = \gamma_F E_k$. Jedes Element wird mit der Streckgrenze seiner eigenen Stahlsorte (f_y) nachgewiesen; der Querschnitt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

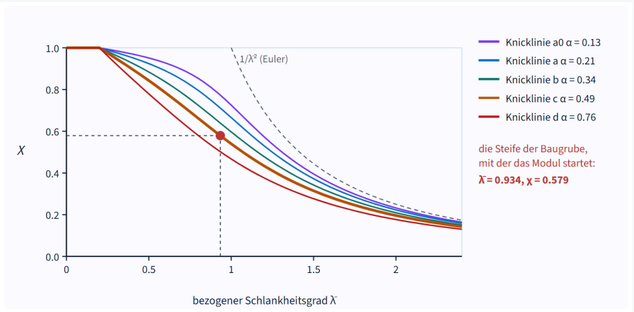
$$M_{c,Rd} = \frac{W f_y}{\gamma_{M0}} \qquad \eta = \frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \le 1 \qquad W = W_{pl}\ (\text{Klasse 1–2}),\ W_{el}\ (\text{Klasse 3})$$

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

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

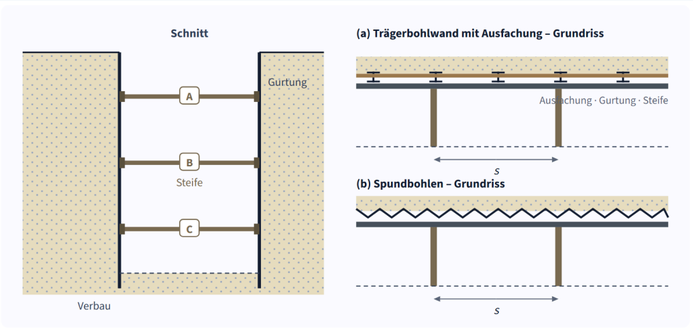
BEISPIEL

Gegeben

Baugrube und Lasten	**Die Baugrube aus Beispiel 1(a) und die Lasten aus Beispiel 3: $P_{max} = 318.75$ kN (Steife A)**
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): $\eta = \gamma_F M/(W f_y)$

$$\eta_{sp} = \frac{1.35(45.55)}{600 \cdot 10^{-6}(275\,000)} = \frac{61.50}{165.0} = \mathbf{0.373}$$

$$\eta_{belt} = \frac{1.35(119.53)}{1\,000 \cdot 10^{-6}(275\,000)} = \frac{161.37}{275.0} = \mathbf{0.587}$$

Spundwand η = **0.373**, Gurtung η = **0.587**: beide sind ausreichend ($\eta \leq 1$).

Lösung (2/2)

LÖSUNG

2 Steife (Knicken): $N_{Ed} = 1.35\ P_{max} = 1.35(318.75) = 430.31$ 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} = 430.3 / 1,046.4 = **0.411**. 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

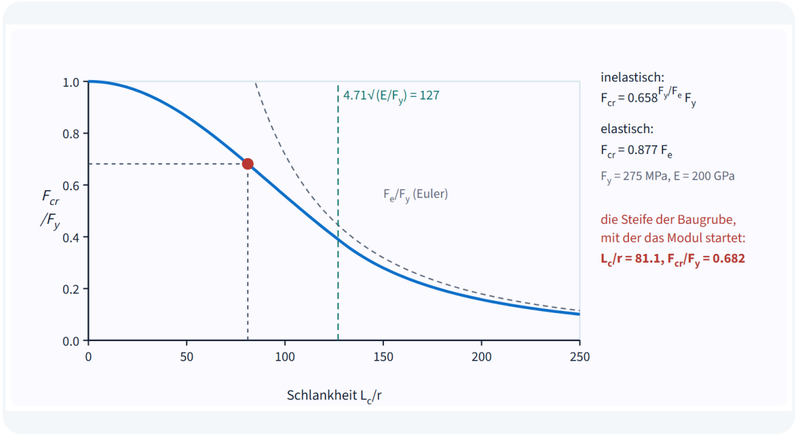
Jedes Tragglied wird mit der **nominellen Tragfähigkeit R_n** nachgewiesen, die sich aus den Regelungen für Druck, Biegung und Schub ergibt. Beim LRFD wird die Last mit Beiwerten versehen und die Tragfähigkeit mit φ abgemindert; beim ASD wird die Gebrauchslast mit der durch den Sicherheitsfaktor Ω geteilten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

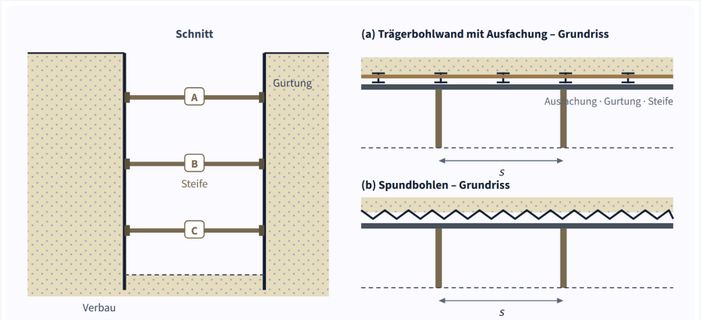
BEISPIEL

Gegeben

Baugrube und Lasten	**Die Baugrube aus Beispiel 1(a) und die Lasten aus Beispiel 3: $P_{max} = 318.75$ kN (Steife A)**
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 LRFD- und ASD-Verhältnisse (P = 318.75 kN)

$$\text{LRFD: } P_u = 1.6(318.75) = 510.0\ \text{kN} \leq \phi_c P_n = 0.90(1{,}231.5) = 1{,}108.3\ \text{kN} \quad \eta = \mathbf{0.460}$$

$$\text{ASD: } P_a = 318.75\ \text{kN} \leq \frac{P_n}{\Omega_c} = \frac{1{,}231.5}{1.67} = 737.4\ \text{kN} \quad \eta = \mathbf{0.432}$$

Steife: LRFD η = **0.460**, ASD η = **0.432**. Spundwand (LRFD) 0.491, Gurtung 0.773; in EN 1993-1-1 waren es 0.373, 0.587 und 0.411.

Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Auslaufgradient und kritischer Gradient

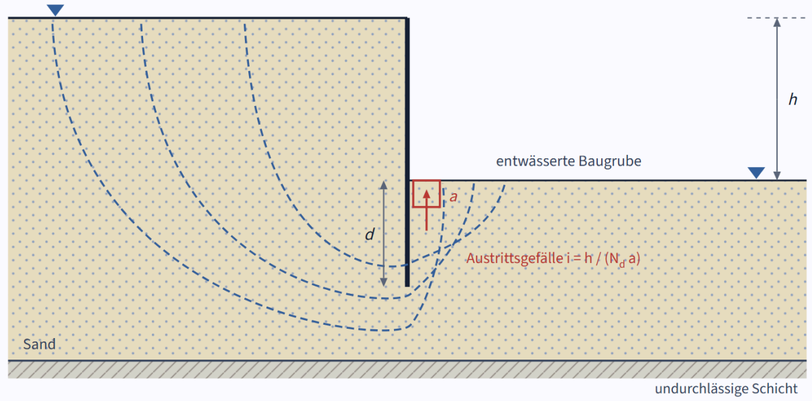
THEORIE

Ein Sandboden ist in der Regel standsicher und bleibt es, solange das Wasser innerhalb der Baugrube nicht unter dem außerhalb anstehenden Grundwasserspiegel liegt. Wird die Baugrube entwässert, strömt das Wasser unter der Wand hindurch und an der Sohle nach oben; das hohe nach oben gerichtete Gefälle an der Austrittsstelle kann die Körner abheben: **die Baugrubensohle kocht (Erosionsgrundbruch)**. Das größte Austrittsgefälle neben der Wand wird aus dem Strömungsnetz abgelesen:

$$i_{exit(max)} = \frac{h/N_d}{a} = \frac{h}{N_d\, a} \qquad FS = \frac{i_{cr}}{i_{exit(max)}} \qquad i_{cr} = \frac{G_s - 1}{1 + e}$$

h ist der Höhenverlust im Strömungsnetz, N_d die Anzahl der Potentialabfälle und a die Länge des Strömungselements, in dem das Wasser neben der Wand aus dem Baugrund austritt. i_{cr} beträgt in den meisten Böden 0.9–1.1 (im Mittel 1); erforderlich ist FS **≈ 1.5**.

Der Austrittsgradient für eine ausgesteifte Baugrube in tiefem Sand wurde theoretisch gelöst: Aus zwei Nomogrammen werden der Modul m (mit $2L_2/B$ und $2L_1/B$) und $L_2 i_{Austritt}/h$ ermittelt; $i = (L_2 i/h)_{Nomogramm} \cdot h/L_2$. Dabei ist L_1 die Tiefe des außen anstehenden Sandes bis zur Sohlebene und L_2 die Einbindetiefe der Wand unterhalb der Baugrubensohle.



Aufgabe

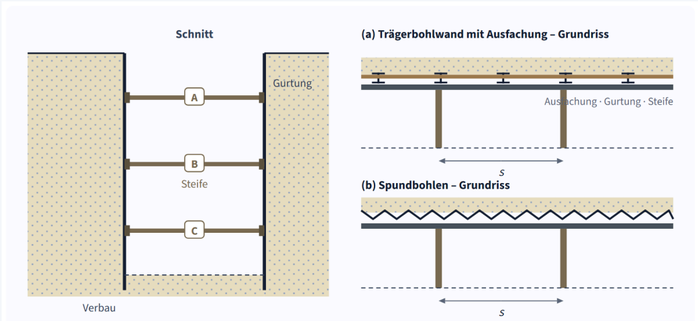
BEISPIEL

Gegeben

Strömungsnetz (Anfangsbaugrube)	**Lastverlust $h = 3.0$ m, Anzahl der Gefällestufen $N_d = 8$, Auslaufelement $a = 1.0$ m; $i_{cr} = 1.0$; $FS_{required} = 1.5$**
Beispiel zur Einflusskarte (Lehrbuch)	$h = 4.5$ m, $L_1 = 5$ m, $L_2 = 4$ m, $B = 5$ m: $2L_1/B = 2$, $B/2L_2 = 0.625$, $m \approx 0.033$, $L_2 i_{exit}/h = 0.54$

GESUCHT

i_{exit} und **FS** nach beiden Verfahren; Entscheidung gegenüber dem geforderten Wert 1.5.



Lösung

LÖSUNG

1 Strömungsnetz: $i_{Aus} = h/(N_d\, a)$

$$i_{exit(max)} = \frac{h}{N_d a} = \frac{3.0}{8(1.0)} = \mathbf{0.375}$$

$$FS = \frac{i_{cr}}{i_{exit(max)}} = \frac{1.0}{0.375} = \mathbf{2.67} \;\geq 1.5 \;\checkmark$$

2 Nomogrammverfahren (tiefe Sandschicht)

$$i_{exit(max)} = \left(\frac{L_2 i_{exit}}{h}\right)_{nomograph} \frac{h}{L_2} = 0.54 \cdot \frac{4.5}{4} = 0.6075$$

$$FS = \frac{1.0}{0.6075} = \mathbf{1.646} \;\geq 1.5 \;\checkmark$$

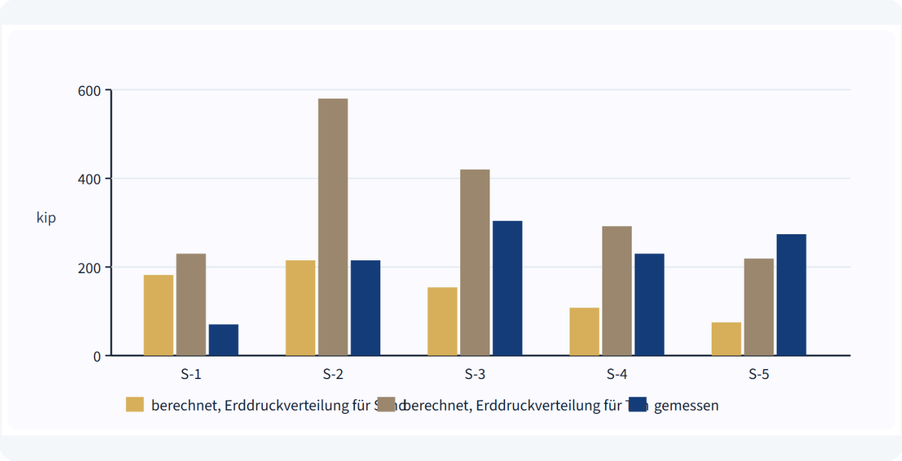
Im Strömungsnetz beträgt die Sicherheit gegen Erosionsgrundbruch **2.67**, im Diagramm **1.65**: beide liegen über den geforderten 1.5.

Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Fallstudien Boston und Chicago

THEORIE

Boston (Testabschnitt B): 17.7 m tief, fünf Steifen (Abstand 3.66 m); das Profil wurde durch zwei Einhüllende für Sand und Ton begrenzt: die Sand-Einhüllende 53.5 kPa, die Einhüllende für weichen bis mittelfesten Ton 146.1 kPa; die gemessenen Lasten wichen stark von beiden Schätzungen ab (Bodenparameter unsicher), die Steifen waren für Lasten weit über den gemessenen bemessen. **Chicago, National Plaza**: 21.3 m tief, sechs Steifen, Tone unter 13 ft Sandauffüllung; das Profil wurde in einen äquivalenten Ton umgerechnet: c_{av} = 34.91 kPa, γ_{av} = 19.76 kN/m³, $\gamma H/c = 12.08 > 4 \rightarrow \sigma_a$ = 282.0 kPa. Die Einhüllende nach Peck ergab einen Druck von etwa dem **1.8-fachen** des beobachteten Werts: Eine um viele Baugruben gelegte Einhüllende ist für eine einzelne Baugrube konservativ; die Felderfahrung im selben Boden kann eine Überbemessung erheblich verringern.



Was das Verfahren annimmt

THEORIE

Die Einhüllenden wurden aus Baugruben mit mehr als etwa 6 m Tiefe zusammengestellt; flachere Baugruben liegen außerhalb der Daten, das Modul weist darauf hin. **Eine Einhüllende ist nicht der tatsächliche Erddruck, der zu einem beliebigen Zeitpunkt auf die Wand wirkt**: sie liefert eine sichere Steifenkraft, keine Wandverformung.

Der **Grundwasserspiegel** wird unterhalb der Sohle angenommen; das Modul hält die Sandhülle innerhalb der wirksamen Überlagerung und addiert bei Wasser oberhalb den hydrostatischen Druck daneben; die Sickerströmung in die Baugrube wird an der Sohle nachgewiesen.

Die Spundwand wird als Kette von Einfeldträgern auf den festgelegten Auflagerniveaus betrachtet; die Eigensteifigkeit der Wand und die Einbindung unterhalb der Baugrubensohle werden nicht angesetzt. Die **Gurtungen** werden als Einfeldträger zwischen den Auflagern betrachtet (konservativ für eine durchlaufende Gurtung über mehrere Auflager).

Der Stahl wird nach EN 1993-1-1 nachgewiesen; Querschnitte der Klasse 4 werden nicht bemessen, das Biegedrillknicken der Gurtungen wird nicht nachgewiesen. Es gibt eine Option nach AISC 360-22 LRFD/ASD.

Eine gewisse seitliche Bewegung der Wand ist zu erwarten: Das Maß hängt von der Zeit zwischen dem Aushub einer Stufe und dem Einbau von Gurtung und Steifen ab. Die Bewegung führt im umgebenden Baugrund zu **Bodenverlust**; aus 150 Fällen beträgt die größte Setzung ≈ 1.1 % der Aushubtiefe bei weichem Ton, 0.2 % bei steifem Ton und 0.3 % bei nichtbindigem Boden.

Zusammenfassung

Die wichtigsten Punkte

Einhüllende: Sie dreht sich um die Oberkante der ausgesteiften Wand; der Druck ist nicht der Rankine-Wert, sondern ein empirisches Diagramm, das um die gemessenen Lasten gezeichnet wird. **Rechteckig in Sand**: $\sigma_a = 0.65\ \gamma\ H\ K_a$ (Beispiel: 28.12 kPa)

Mehrere Sande: $K_a(\bar{\varphi})$, der mittlere K_a und $K_a(\varphi'_{min})$ stimmen nicht überein (konvex); φ'_{min} liegt auf der sicheren Seite

Wasser und Auflast sind getrennt zu betrachten: Wasser verringert die wirksame Überlagerung, fügt aber den vollen hydrostatischen Druck hinzu (R: 225 → 288 kN/m); q liefert $\Delta p = K_a q$

Steifenkraft: Die Einhüllende wird an den Gelenken in Abschnitte unterteilt, die Reaktionen werden mit der Statik ermittelt, P = (Summe der Reaktionen)·s; im Beispiel P_A = 318.75 kN

Bemessung: $S = M_{max}/\sigma_{zul}$ (Spundwand), Gurtung $M = R\ s^2/8$; bei der Baugrube des Lehrbuchs beträgt die Spundwand 292 cm³/m, die Gurtung 1 113 cm³

Stahl: EN 1993-1-1 η = 0.373 / 0.587 / 0.411 (Spundwand / Gurtung / Knicken der Steife); AISC LRFD Steife 0.460, ASD 0.432

Erosionsgrundbruch: $FS = i_{kr}/i_{austritt} \geq 1.5$; im Beispiel 2.67 (Strömungsnetz) und 1.65 (Diagramm)

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.

Harr, M.E. (1962). Groundwater and Seepage. McGraw-Hill, New York.

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 Berechnungs-Engine des Moduls erzeugt; das Modul liefert dieselben Werte. Das Rechenbeispiel auf der Modulseite sind ebenfalls diese Baugruben (Lehrbuchbaugrube: 27 ft, γ = 112 pcf, φ' = 32°; die Startbaugrube des Moduls: 8 m).

GeoTerva

Geotechnische Berechnungen online

Von der Theorie zur Praxis

Geben Sie Ihr eigenes Baugrubenprofil, die Aussteifungsebenen, den Grundwasserspiegel, die Auflast und Ihre Bauteile in GeoTerva ein; das Modul liefert die Einhüllende, die Steifenkräfte, die Momente in Spundwand und Gurtung, den Stahlnachweis und den Hebungsbruch der Sohle zusammen.

Modul öffnen →

Theorieseite →

Auf dem Smartphone öffnen

Die Beispielmodule erfordern keine Registrierung.

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