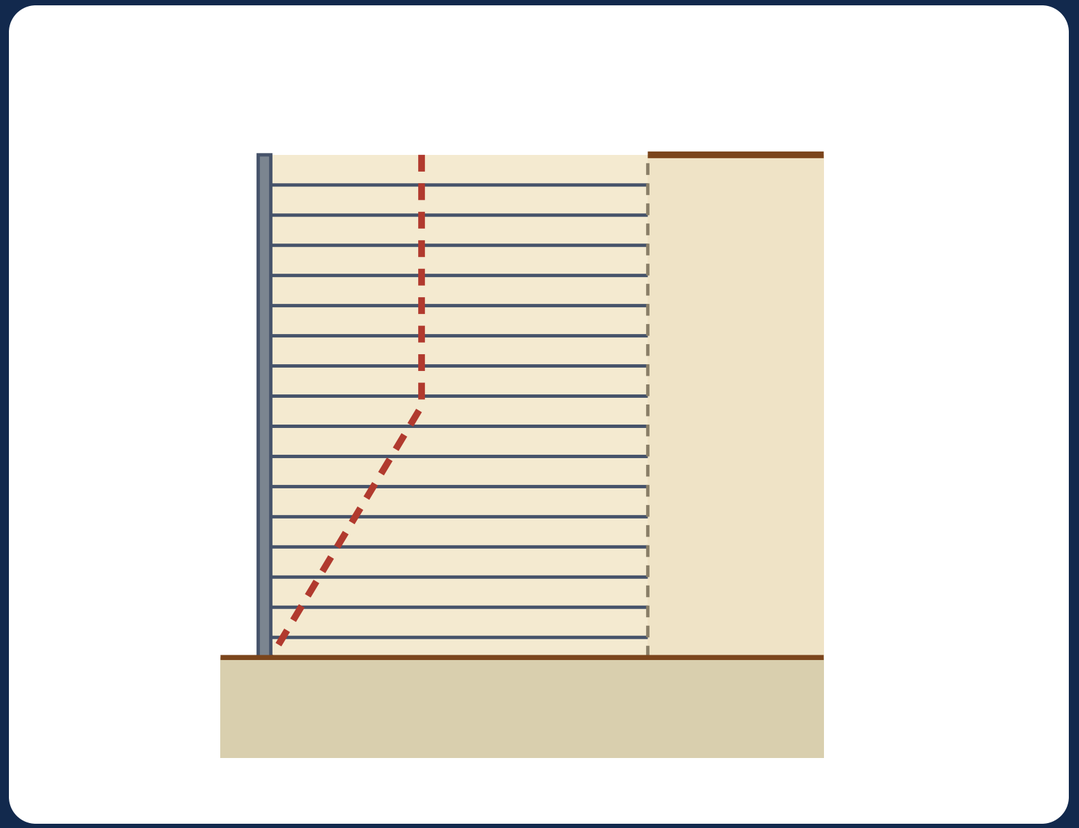
Geotechnische Vorlesung · Stützwände

Stützkonstruktion aus bewehrter Erde (MSE-Wand)

Vorlesung: innere Standsicherheit (Zugbruch, Herausziehen), äußere Standsicherheit (Kippen, Gleiten, Grundbruch) und Erdbebennachweis einer Stützkonstruktion aus bewehrter Erde; zu jedem Thema ein Rechenbeispiel.



Bewehrte Erde

Zugbruch · Herausziehen

Kippen · Gleiten · Grundbruch

Erdbeben

Einführung

Was lernen wir in dieser Vorlesung?

Die Logik des bewehrten Bodens: Der Erddruck ruft Zug in der Bewehrung hervor, und die Reibung zwischen beiden hält beides zusammen; die Frontfläche stützt den Boden lediglich ab

Innere Standsicherheit: Zugkraft in jeder Lage $T = \sigma'_h S_V S_H$, **Zugbruch** (einschließlich Korrosionszuschlag), **Herausziehen** (wirksame Länge hinter der Bruchfläche)

Die **Bruchfläche** (bilinear oder Rankine-Keil) und das Verhältnis K_r/K_a: bei steifer Bewehrung ist die Horizontalspannung oben größer als nach Rankine

Äußere Standsicherheit: Der bewehrte Block L × H wirkt als Schwergewichtsstützwand; Kippen, Ausmitte (L/6), Gleiten und Grundbruch (wirksame Breite nach Meyerhof)

Warum die **Verkehrslast** nur belastet, und die Wirkung des **Erdbebens** auf den Block, den Erddruck und die Bewehrungslagen

Wie eine unzureichende Bemessung **zu korrigieren ist**: Bewehrungslänge, Bewehrungsart

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

Beispielwand: H = 10 m, verzinkte Stahlbänder 75 × 6 mm (f_y = 240 MPa), L = 7.5 m, S_V = 0.6 m, S_H = 1.0 m; Hinterfüllung γ = 16.5 kN/m³, φ′ = 36°; Gründung φ′ = 28°, c′ = 50 kPa. Die Kräfte beziehen sich auf einen Meter Wand (pro Band).

Was leistet das Modul, welche Nachweise werden geführt?

THEORIE

Die Bodenwand steht für sich allein nur unter dem Schüttwinkel. Werden beim Einbau in die Hinterfüllung dünne **Zugbewehrungselemente** (verzinkte Stahlbänder, Geotextil, Geogitter) eingelegt, so nimmt der Boden Druck und die Bewehrung Zug auf, und **Reibung** hält beide zusammen. Die Fassade (Betonplatten, Blöcke oder das Umschlagen der Bewehrung) hält den Boden zurück und trägt keine weitere Last.

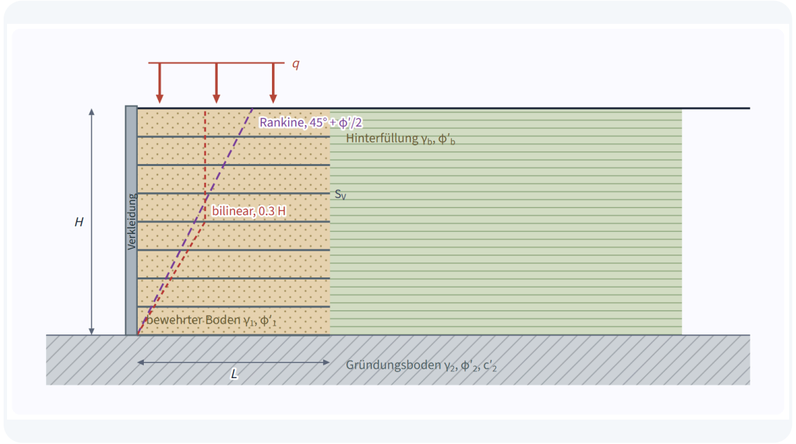
Innere Standsicherheit: Jede Lage muss die Zugkraft aufnehmen, (1) ohne **Zugbruch**, (2) ohne **Herausziehen** hinter der Bruchfläche, (3) ohne **Bruch** an der Front (Anschluss).

Äußere Standsicherheit: Der bewehrte Block der Breite L und der Höhe H ist eine **Schwergewichtsstützwand**: Er darf unter dem Erddruck der hinteren Hinterfüllung nicht kippen, an der Sohle nicht gleiten, und der Baugrund muss ihn tragen können.

Erdbeben: die beiden Nachweisgruppen erneut, mit dynamischem Erddruck + Gleitkeil und Trägheitskraft der effektiven Zone (erforderliche Sicherheitsfaktoren sind 75 % der statischen).

Die **Hinterfüllung** muss ein frei dränierendes granuläres Material sein; die **Geländebruchstandsicherheit** (durch die Gründung verlaufende oder zusammengesetzte Gleitfläche) liegt außerhalb des Umfangs dieses Moduls.

Zwei Verfahren: der **Rankine**-Ansatz der Quelle und das **vereinfachte Verfahren** der Anwendung (FHWA/AASHTO) (das Verfahren, mit dem das Modul geöffnet wird).



Vertikale und laterale Spannung, Verhältnis K_r/K_a

THEORIE

z ist die Tiefe von der Wandkrone, γ_1, φ'_1 sind die Wichte und der Reibungswinkel der bewehrten Hinterfüllung. Die Hinterfüllung befindet sich im aktiven Zustand:

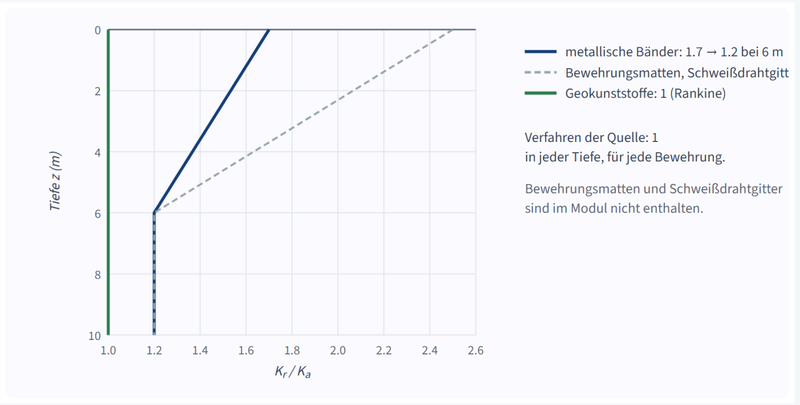
$$\sigma'_v = \gamma_1 z + q_D + q_L \qquad \sigma'_h = K_r\,(\gamma_1 z + q_D + q_L) \qquad K_a = \tan^2\!\left(45^\circ - \frac{\varphi'_1}{2}\right)$$

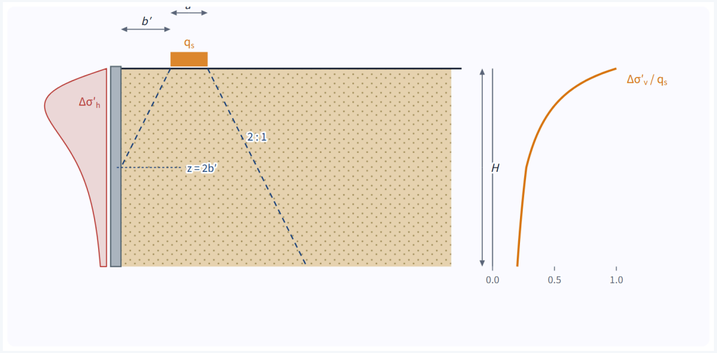
Steife (unverformbare) Bewehrung – Stahlbänder – hält die Hinterfüllung im oberen Bereich **steifer** als der Rankine-Zustand; im vereinfachten Verfahren wird K_r/K_a je nach Bewehrungsart angesetzt:

$$\text{Lamellen: } \frac{K_r}{K_a} = 1.7 - 0.5\frac{z}{6}\ (z \le 6\ \text{m}),\ \ 1.2\ \text{unter} \qquad \text{Geosynthetik: } \frac{K_r}{K_a} = 1$$

Eine gleichmäßige Auflast erhöht die vertikale Spannung in jeder Tiefe um q und über K_r auch die Seitenspannung. Eine **Verkehrs**auflast (q_L) belastet, **hält aber nicht**: Sie geht weder in das Gewicht für Kippen/Gleiten noch in die vertikale Spannung ein, die dem Herausziehen widersteht (auf der sicheren Seite).

Streifenlast (Laba–Kennedy): Die vertikale Spannung breitet sich im Verhältnis 2:1 aus, der Seitendruck ist die elastische Lösung für eine starre Wand (M = 1.4 → 1).





Aufgabe

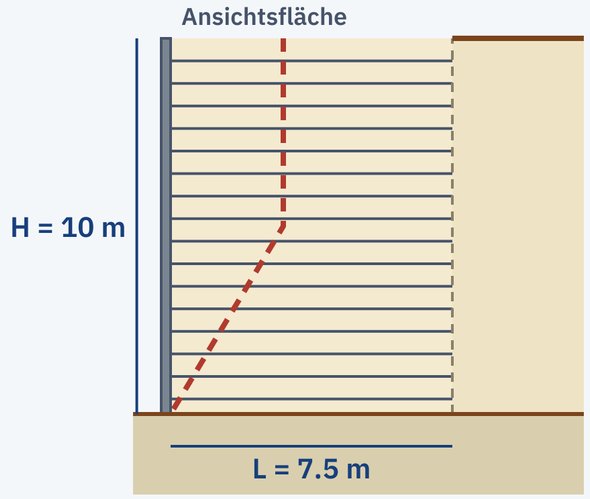
BEISPIEL

Gegeben

Auffüllung	$\gamma_1 = 16.5\ \mathrm{kN/m^3},\ \varphi_1' = 36°$**; Stahlbänder; vereinfachtes Verfahren; keine Auflast**
Tiefen	$z = 0.6;\ 3.0;\ 6.0$ **und** 10.0 **m (Sohle)**

GESUCHT

K_a, K_r/K_a, σ'_v und σ'_h in jeder Tiefe; wo ist die größte Horizontalspannung?



Lösung

LÖSUNG

1 Aktiver Erddruckbeiwert

$$K_a = \tan^2(45^\circ - 18^\circ) = \mathbf{0.2596}$$

2 In jeder Tiefe ($K_r/K_a = 1.7 - 0.5z/6$, $z \le 6$ m; nach 6 m 1.2)

z (m)	$\sigma'_v = 16.5z$ (kPa)	K_r/K_a	K_r	$\sigma'_h = K_r\sigma'_v$ (kPa)
0.6	9.9	1.65	0.4284	4.24
3.0	49.5	1.45	0.3764	18.63
6.0	99.0	1.20	0.3115	30.84
10.0	165.0	1.20	0.3115	51.40

Sohle: σ'_v = **165 kPa**, $K_r = 1.2K_a = 0.3115$, σ'_h = **51.4 kPa**. In der oberen Ebene (z = 0.6 m) ist $K_r/K_a = 1.65$: das 1.65-Fache nach Rankine. σ'_h nimmt mit der Tiefe zu; die größte Horizontalspannung (und Zugspannung) tritt an der Sohle auf.

Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Wirksame Länge $L_e = L - L_a$

THEORIE

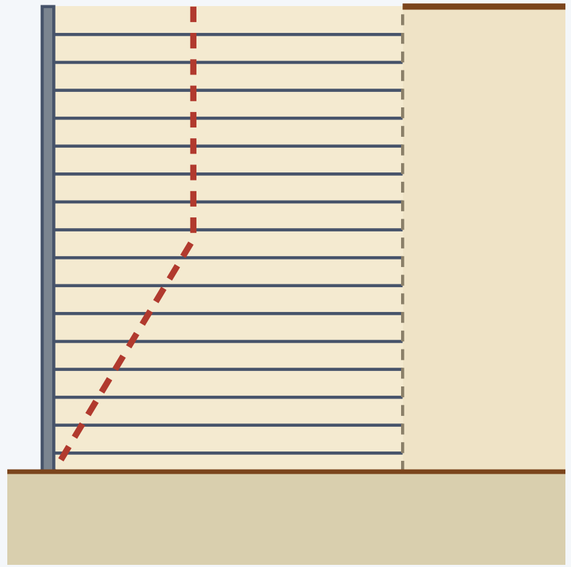
Die Bewehrung wirkt dort, wo die Hinterfüllung andernfalls versagen würde. Der **innerhalb der Bruchzone liegende Teil** jeder Lage (zwischen Front und Bruchfläche) folgt dem ableitenden Boden und trägt nicht; nur der **hinter der Bruchfläche liegende Teil** verankert die Lage: aktive Länge L_a und wirksame Länge $L_e = L - L_a$.

$$\text{Rankine: } L_a = \frac{H - z}{\tan(45° + \varphi'_1/2)} \qquad \text{bilinear: } L_a = 0.3H \ (z \le H/2),\ \ L_a = 0.6(H - z) \ (z > H/2)$$

Die **Quelle** nimmt für jede Bewehrung den an der Front beginnenden Rankine-Keil (45° + φ′$_1$/2 gegen die Horizontale) an: bei φ′ = 36° am Kopf einer 10 m hohen Wand 5.1 m von der Front.

Bei steifer (Stahlband-)Bewehrung zeigen Messungen die maximale Zugfläche deutlich näher an der Front: Die Praxis verwendet eine **bilineare** Fläche – in der oberen Hälfte vertikal im Abstand 0.3H von der Front, von dort geradlinig zum hinteren Sporn. Bei Geokunststoffen bleibt Rankine erhalten.

Im vereinfachten Verfahren des Moduls erhält der Stahlstreifen die bilineare Fläche und das Geokunststoffbewehrungselement die Rankine-Fläche; in beiden Fällen ist die Quellmethode Rankine.



Rot gestrichelt: bilineare Bruchfläche (Streifen). Der Rankine-Keil beginnt 5.1 m von der Stirnfläche entfernt.

Aufgabe

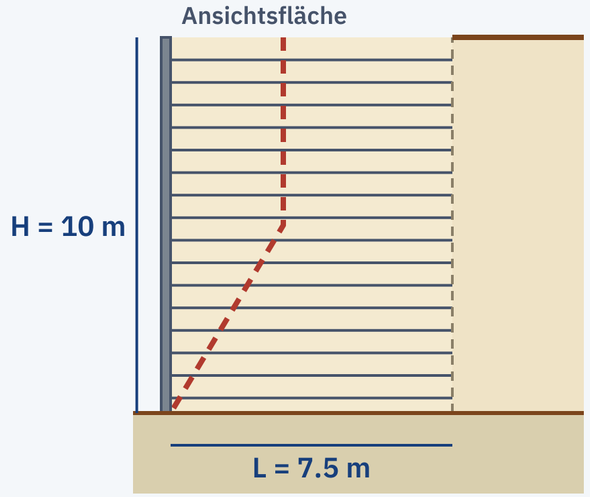
BEISPIEL

Gegeben

Wand	$H = 10$ **m,** $L = 7.5$ **m, Stahlbänder;** $\varphi'_1 = 36°$
Tiefen	$z = 0;\ 0.6;\ 3;\ 5;\ 6;\ 9.4$ **m**

GESUCHT

In jeder Tiefe $\mathbf{L_a}$ (bilinear und Rankine) und $\mathbf{L_e}$ mit der bilinearen Fläche.



Lösung

LÖSUNG

1 Bilinear: für $z \le 5$ m gilt $0.3H = 3.00$ m; für $z > 5$ m gilt $0.6(H - z)$. Rankine: $(H - z)/\tan 63° = (H - z)/1.963$

z (m)	L_a bilinear (m)	$L_e = 7.5 - L_a$ (m)	L_a nach Rankine (m)	L_e nach Rankine (m)
0.0	3.00	4.50	5.10	2.40
0.6	3.00	4.50	4.79	2.71
3.0	3.00	4.50	3.57	3.93
5.0	3.00	4.50	2.55	4.95
6.0	2.40	5.10	2.04	5.46
9.4	0.36	7.14	0.31	7.19

Die bilineare Fläche liegt in den oberen Bereichen näher an der Wandfront als die nach Rankine ($z = 0.6$ m: $L_a = 3.00$ m, Rankine 4.79 m); daher ist die **wirksame Länge größer** (4.50 m, Rankine 2.71 m). Die oberen Bereiche hingegen nehmen K_r/K_a-mal mehr Zugkraft auf (Beispiel 4).

Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Das Absenken des Spiegels und die Tragfähigkeit der Bewehrung

THEORIE

Jede Lage trägt die Horizontalspannung der Hinterfüllung innerhalb einer begrenzten **beitragenden Höhe** (S_V) in halber Höhe der benachbarten Lagen. Der Streifen erfasst eine Hinterfüllungsbreite gleich dem horizontalen Abstand S_H; da die Lage und das Gitter durchlaufend sind, gilt die Zugkraft pro Meter Wand:

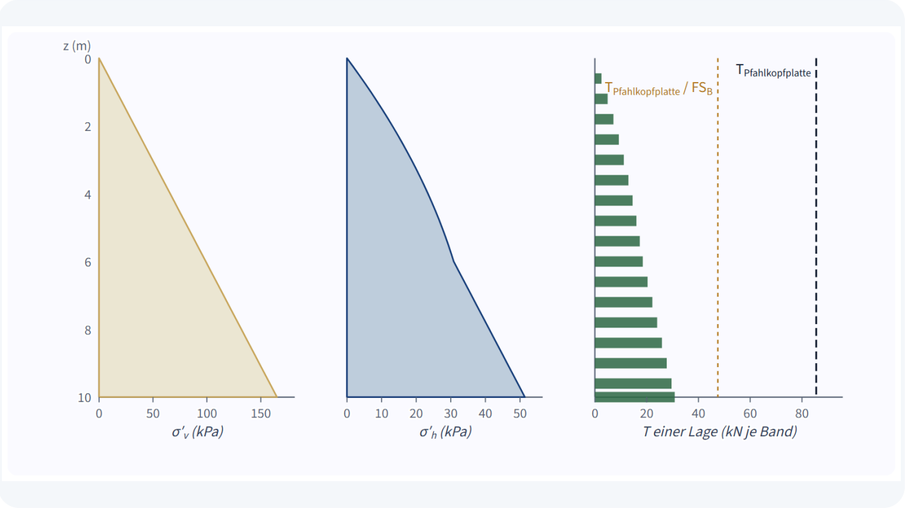
$$T = \sigma'_h S_V S_H \;\; (\text{pro Streifen}) \qquad T = \sigma'_h S_V \;\; (\text{je Meter Wand})$$

Band (Breite w, Dicke t, Streckgrenze f_y): Die verzinkte Stahlbewehrung korrodiert mit 0.025–0.050 mm pro Jahr; bei einer Nutzungsdauer von n Jahren nimmt die Dicke um r n ab:

$$t_{eff} = t - rn \qquad T_{diameter} = w\, t_{eff}\, f_y \qquad FS_B = \frac{T_{diameter}}{T} \qquad t_{req} = \frac{FS_B T_{max}}{w\, f_y} + rn$$

Geokunststoff: Die Langzeitfestigkeit ergibt sich aus der Höchstzugfestigkeit geteilt durch die Beiwerte für Schädigung, Kriechen und Alterung; das Gitter deckt nicht immer den gesamten Grundriss ab (C_r):

$$T_{all} = \frac{T_{ult}}{RF_{id}\, RF_{cr}\, RF_{cbd}} \qquad FS_B = \frac{T_{all} C_r}{T} \qquad S_{V,req} = \frac{T_{all} C_r}{\sigma'_h(H)\, FS_B}$$



Aufgabe

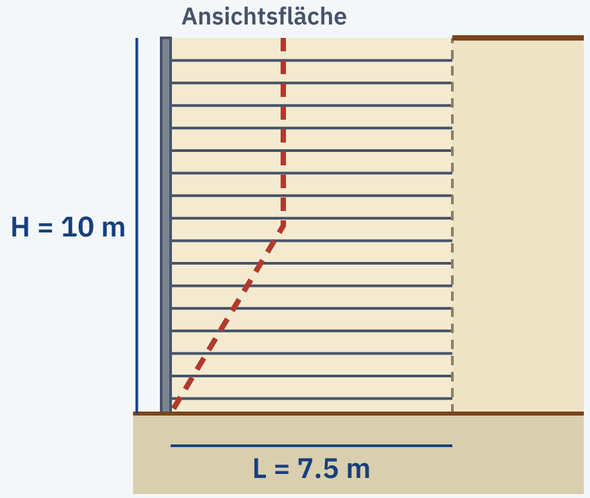
BEISPIEL

Gegeben

Streifen	**75 × 6 mm eingebaut; $f_y = 240$ MPa; Korrosion 0.025 mm/Jahr, Nutzungsdauer 50 Jahre; $S_V = 0.6$ m, $S_H = 1.0$ m**
Erforderlich	$FS_B \geq 1.8$ **(Anwendung: 0.55 f_y im korrodierten Querschnitt)**

GESUCHT

Größte Zugkraft T_{max} (je Bewehrungsstreifen); T_{cap}, FS_B; erforderliche Dicke t_{req}.



Lösung

LÖSUNG

1 Die größte Zugspannung liegt auf Höhe der Sohle (z = 10 m; σ'_h = 51.40 kPa)

$$T_{max} = \sigma'_h S_V S_H = 51.40(0.6)(1.0) = \mathbf{30.84}\ \text{kN/Streifen}$$

2 Korrodierter Querschnitt und Tragfähigkeit

$$t_{eff} = 6 - 0.025(50) = 4.75\ \text{mm} \quad (1.25\ \text{mm Verlust})$$

$$T_{diameter} = w\, t_{eff} f_y = 0.075(0.00475)(240\,000) = \mathbf{85.5}\ \text{kN}$$

$$FS_B = 85.5/30.84 = \mathbf{2.772} \ \geq 1.80\ \checkmark$$

3 Erforderliche Dicke (Korrosionszuschlag wieder hinzugerechnet)

$$t_{req} = \frac{1.8(30.84)}{0.075(240\,000)} + rn = 3.084 + 1.25 = \mathbf{4.33}\ \text{mm}$$

FS_B = **2.77** ≥ 1.80: Ein 6-mm-Streifen ist ausreichend; die erforderliche Dicke beträgt **4.33 mm**. Die kritische Ebene ist die Sohle (k = 17).

Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Reibung hinter der Bruchfläche

THEORIE

Eine Lage, die nicht bricht, kann dennoch aus der Hinterfüllung **herausgezogen** werden. Hinter der Bruchfläche hält die Hinterfüllung die Bewehrung durch Reibung an ihren beiden Flächen; die Reibung ist die vertikale Spannung über der Lage mal dem von der Bewehrung mobilisierten Beiwert:

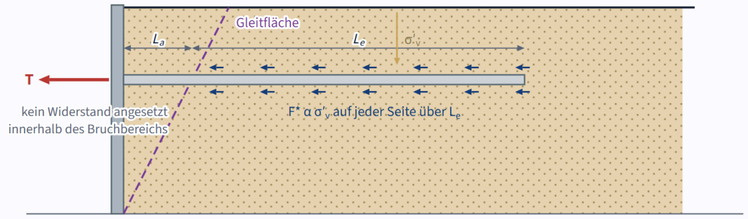
$$P_r = 2R_c\,F^*\alpha\,\sigma'_v\,L_e \qquad FS_P = \frac{P_r}{T} \qquad L_{req} = L_a + \frac{FS_P\,T}{2R_c F^*\alpha\,\sigma'_v}$$

F* Herausziehwiderstandsbeiwert: tan φ′ für Bänder (untere Grenze), ⅔ tan φ′ für Geokunststoffe (untere Grenze des Moduls; durch Herausziehversuch bestimmt). **α** Maßstabseffekt: 1.0 für Bänder, 0.8 für Geogitter, 0.6 für Geotextil.

R_c-Abdeckung: w im Streifen (pro Streifen), C_r im Geogitter (pro Meter Wand), 1 in der Abdeckung. **σ'_v** ist die vertikale Spannung in der widerstandsfähigen Zone: $\gamma_1 z$ + ständige Auflast; **Verkehrslasten sind nicht enthalten** (sie halten nicht).

In einem Streifen wachsen T und P_r mit der Tiefe: Beim Verfahren der Quelle ist die erforderliche wirksame Länge auf jeder Höhe gleich; beim vereinfachten Verfahren tragen die oberen Lagen K_r/K_a-mal mehr Zugkraft, und die wirksame Länge wächst im gleichen Verhältnis.

Anschluss: die Zugkraft T_{max} wird auf die Front übertragen; die Festigkeit wird aus Anschlussversuchen eingegeben und mit dem Bruchbeiwert nachgewiesen.



Aufgabe

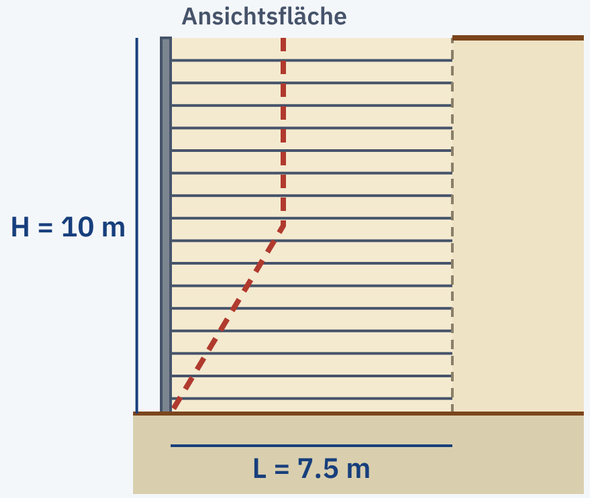
BEISPIEL

Gegeben

Streifen und Baugrund	**Die Wand aus den Beispielen 1–3; $F^* = \tan 36^\circ = 0.727$, $\alpha = 1$; $FS_P \geq 1.5$**
Niveaus	**z = 0.6 m (1. Lage) und weitere Lagen**

GESUCHT

Auf der Lage 1 **P_r**, **FS_P**, die erforderliche Länge **L_{req}**; Zusammenfassung aller Lagen.



Lösung (1/2)

LÖSUNG

1 Ebene 1 (z = 0.6 m): $K_r/K_a = 1.65$; $\sigma'_h = 4.24$ kPa

$$T = \sigma'_h S_V S_H = 4.24(0.6) = 2.54 \text{ kN} \qquad L_a = 0.3H = 3.00, \quad L_e = 4.50 \text{ m}$$

$$P_r = 2(0.075)(0.727)(1.0)(9.9)(4.50) = \mathbf{4.86} \text{ kN}$$

$$FS_P = \frac{4.86}{2.54} = \mathbf{1.908} \geq 1.5 \checkmark$$

2 Erforderliche Länge: $L_{req} = L_a + FS_P T/(F^* \alpha \sigma'_v \cdot 2w)$

$$L_{req} = 3.00 + \frac{1.5(2.54)}{0.727(1)(9.9)(2)(0.075)} = 3.00 + 3.54 = \mathbf{6.54} \text{ m}$$

Lösung (2/2)

LÖSUNG

3 Zusammenfassung aller Lagen

Niveau	z (m)	T (kN)	L_a	L_e	P_r (kN)	FS_P	L_{req} (m)
1	0.6	2.54	3.00	4.50	4.86	1.91	6.54
2	1.2	4.93	3.00	4.50	9.71	1.97	6.43
5	3.0	11.18	3.00	4.50	24.28	2.17	6.11
10	6.0	18.51	2.40	5.10	55.02	2.97	4.97
17	10.0	30.84	0.00	7.50	134.86	4.37	2.57

Die kleinste Sicherheit gegen Herausziehen ist **FS_P = 1.91 in Lage 1** (1.5 erforderlich); die längste erforderliche Länge ist **6.54 m** (L = 7.5 m ist ausreichend). In der oberen Lage ist die Zugkraft klein, da aber auch σ'_v klein ist, ist das Herausziehen dort am schwächsten.

Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Der Block ist eine Schwergewichtsstützwand

THEORIE

Der innere standsichere bewehrte Block ist **ein Bodenblock der Abmessung L × H**, der die dahinter liegende Hinterfüllung stützt. Die gestützte Hinterfüllung (γ_b, φ'_b) drückt mit dem aktiven Erddruck nach Rankine auf die vertikale rückwärtige Wand des Blocks; eine Auflast bewirkt einen zusätzlichen Erddruck:

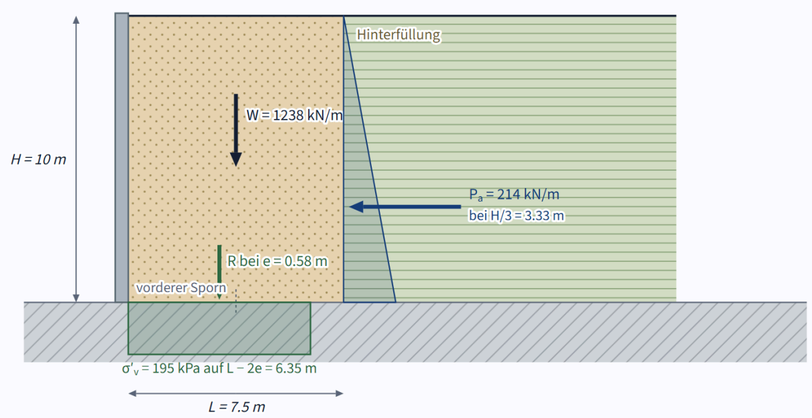
$$P_a = \tfrac{1}{2} K_a \gamma_b H^2 \;\; (H/3) \qquad P_q = K_a \, q \, H \;\; (H/2) \qquad W = \gamma_1 H L \;\; (L/2)$$

$$FS_{ot} = \frac{M_R}{M_o} = \frac{W \, L/2}{P_a H/3 + P_q H/2} \qquad x_R = \frac{M_R - M_o}{\Sigma V} \qquad e = \frac{L}{2} - x_R$$

Rückhaltend: Blockgewicht und **ständige** Auflast. **Verkehrslast wirkt nicht rückhaltend**, wenn der Erddruck wirkt, da sie möglicherweise nicht vorhanden ist (nur Lasten).

Derselbe Nachweis wird in zweifacher Weise geführt: als **Momentenverhältnis** ($FS_{ot} \geq 2$) und über die Lage der Resultierenden: **e ≤ L/6**, damit die Sohle vollständig unter Druck bleibt (bei Erdbeben L/3).

Die Vorsatzschale und der davor liegende eingebettete Teil werden nicht in das rückhaltende Gewicht einbezogen (auf der sicheren Seite).



Aufgabe

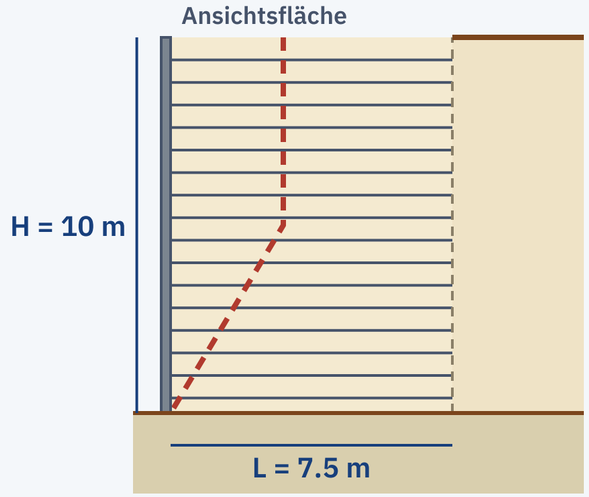
BEISPIEL

Gegeben

Block	$H = 10$ **m,** $L = 7.5$ **m; bewehrte Hinterfüllung** $\gamma_1 = 16.5$ **kN/m³**
hinterfüllter Boden	**gleicher Boden (**$\gamma_b = 16.5$**,** $\varphi'_b = 36°$**); keine Auflast**

GESUCHT

P_a und M_o; **W** und M_R; **FS_{ot}**; Lage der Resultierenden x_R und **e** (Grenze L/6).



Lösung (1/2)

LÖSUNG

1 Aktiver Erddruck (K_a = 0.2596) und Kippmoment

$$P_a = \tfrac{1}{2} K_a \gamma_b H^2 = \tfrac{1}{2}(0.2596)(16.5)(10)^2 = \mathbf{214.18}\ \mathrm{kN/m}$$

$$M_o = P_a\, H/3 = 214.18(3.333) = \mathbf{713.9}\ \mathrm{kN{\cdot}m/m}$$

2 Gewicht des Blocks und rückhaltendes Moment

$$W = \gamma_1 H L = 16.5(10)(7.5) = \mathbf{1{,}237.5}\ \mathrm{kN/m}$$

$$M_R = W\, L/2 = 1{,}237.5(3.75) = \mathbf{4{,}640.6}\ \mathrm{kN{\cdot}m/m}$$

Lösung (2/2)

LÖSUNG

3 Kippen und Lage der Resultierenden

$$FS_{ot} = M_R / M_o = 4{,}640.6 / 713.9 = \mathbf{6.50} \;\geq 2.0 \;\checkmark$$

$$x_R = (M_R - M_o)/\Sigma V = (4{,}640.6 - 713.9)/1{,}237.5 = 3.173\ \mathrm{m}$$

$$e = L/2 - x_R = 3.75 - 3.173 = \mathbf{0.577}\ \mathrm{m} \;\leq L/6 = 1.25 \;\checkmark$$

Kippsicherheit **6.50** (≥ 2.0); die Resultierende ist von der Mitte der Sohle nur um **0.58 m** zum vorderen Sporn verschoben: die Sohle liegt vollständig unter Druckspannung (e ≤ L/6 = 1.25 m).

Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Sohlreibung

THEORIE

Wenn der Schub die Sohlreibung übersteigt, gleitet der Block auf seiner Sohle. Die **Quelle** setzt die Reibung mit k ≈ ⅔ an, wie bei einer auf dem Boden lagernden Betonwand; an der Sohle eines bewehrten Blocks jedoch **liegt Boden auf Boden**: Die Praxis legt den Reibungswinkel des **schwächeren** von bewehrter Hinterfüllung und Baugrund zugrunde. Das Modul behält den Beiwert ⅔ bei, wählt den schwächeren Boden und berücksichtigt die Kohäsion des Baugrunds nicht:

$$FS_{sl} = \frac{\Sigma V \, \tan\left(\frac{2}{3}\varphi'_{min}\right)}{\Sigma H} \qquad \varphi'_{min} = \min\left(\varphi'_1, \varphi'_2\right)$$

ΣH: der Erddruck der rückgehaltenen Hinterfüllung und (falls vorhanden) der Erddruck aus Auflast; ΣV: das Gewicht des Blocks und die ständige Auflast. **Die Verkehrslast geht in den Erddruck ein, nicht in ΣV.**

Auch der Lastpfad der Quelle (nur Hinterfüllung, φ'_1) wird berechnet; ist der Baugrund schwach, ist der Wert des Moduls geringer und ist **der maßgebende**.

Das Gleiten wird durch Verbreiterung des Blocks gelöst (ΣV nimmt mit L linear zu); die Länge verbessert zudem das Herausziehen und die Ausmitte.

ERFORDERLICHE SICHERHEITSFAKTOREN

Nachweis	Statisch (erforderlich)	Erdbeben (erforderlich, 75 %)
Zugbruch FS_B	1.80	1.35
Herausziehen FS_P	1.50	1,125
Kippen FS_{ot}	2.00	1.50
Ausmitte e	≤ L/6	≤ L/3
Gleiten FS_{sl}	1.50	1,125
Tragfähigkeit FS_{bc}	2.50	1,875

Die Erdbebenwerte betragen 75 % der statischen Werte (Ausmitte L/6 → L/3). Die Verkehrslast bleibt in beiden Fällen erhalten.

Aufgabe

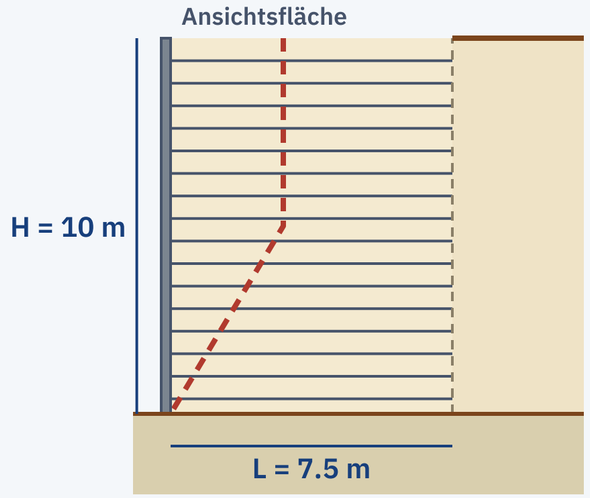
BEISPIEL

Gegeben

Block	**Der Block aus Beispiel 5 ($\Sigma V = 1\,237.5$ kN/m, $\Sigma H = P_a = 214.18$ kN/m)**
Böden	**bewehrte Hinterfüllung $\varphi'_1 = 36°$; Baugrund $\varphi'_2 = 28°$ ($c'_2 = 50$ kPa, Kohäsion wird nicht angesetzt)**

GESUCHT

FS_{sl} aus der Sohlreibung; Vergleich mit dem Ansatz der Quelle (nur Hinterfüllung).



Lösung

LÖSUNG

1 Schwacher Boden: $\varphi'_{min} = \min(36°, 28°) = 28°$ (Fundamentboden)

$$\tan\left(\tfrac{2}{3} \cdot 28^\circ\right) = \tan 18.67^\circ = 0.3378$$

$$R = \Sigma V \tan(\ldots) = 1{,}237.5(0.3378) = 418.1 \text{ kN/m}$$

$$FS_{sl} = \frac{R}{\Sigma H} = \frac{418.1}{214.18} = \mathbf{1.952} \geq 1.5 \checkmark$$

2 Verlauf der Kraftausbreitung (nur Hinterfüllung, $\varphi'_1 = 36°$)

$$\tan\left(\tfrac{2}{3} \cdot 36^\circ\right) = \tan 24^\circ = 0.4452$$

$$FS_{sl} = \frac{1{,}237.5(0.4452)}{214.18} = \mathbf{2.572}$$

Da der Baugrund schwächer ist, beträgt die Sicherheit gegen Gleiten **1.95** (2.57 nach dem Weg der Quelle): Das Modul nimmt den **kleineren** Wert als maßgebend; er liegt über den geforderten 1.5.

Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Der Baugrundblock trägt wie ein Streifenfundament

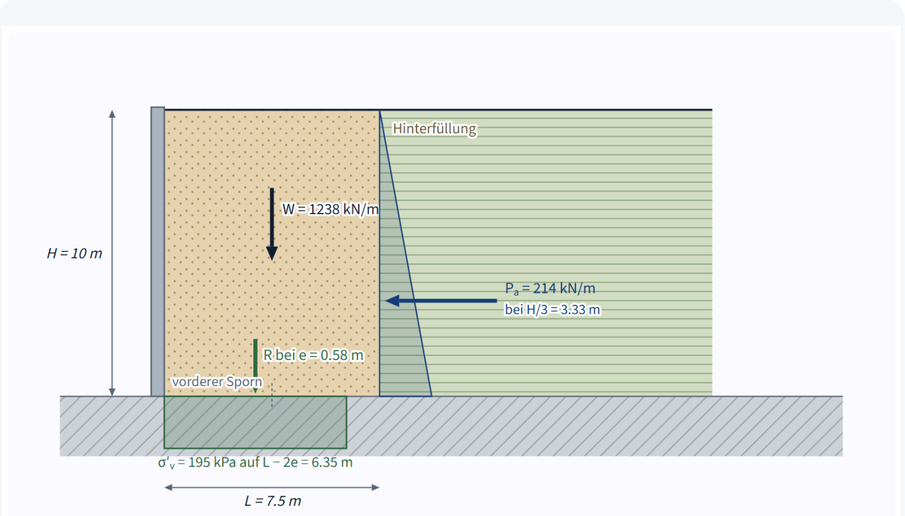
THEORIE

Die Quelle vergleicht die Tragfähigkeit eines Fundamentes der Breite L an der Geländeoberfläche mit der vertikalen Spannung an der Sohle, ohne Tiefenterm. Allgemeine Tragfähigkeitsbeiwerte (Vesic): $N_q = e^{\pi \tan \varphi'} \tan^2(45° + \varphi'/2)$, $N_c = (N_q - 1)\cot \varphi'$, $N_\gamma = 2(N_q + 1)\tan \varphi'$:

$$q_u = c_2' N_c + \tfrac{1}{2}\gamma_2 L N_\gamma \qquad FS_{bc} = \frac{q_u}{\sigma_o'},\ \ \sigma_o' = \gamma_1 H + q_D$$

Anwendung (FHWA/AASHTO): Die Resultierende liegt nicht in der Mitte (e), und die Sohlpressung am vorderen Sporn ist größer als der Mittelwert; daher wird die gesamte vertikale Last gleichmäßig über die **wirksame Breite nach Meyerhof** L′ = L − 2e verteilt, und es wird die Tragfähigkeit eines Fundaments mit dieser Breite berechnet:

$$L' = L - 2e \qquad \sigma_v' = \frac{\Sigma V}{L'} \qquad q_u = c_2' N_c + \tfrac{1}{2}\gamma_2 L' N_\gamma \qquad FS_{bc} = \frac{q_u}{\sigma_v'}$$



Der Erddruck ist größer, das Fundament schmaler: Der Sicherheitsfaktor nach Meyerhof ist kleiner; das Modul **berechnet beide und nimmt den kleineren** als maßgebend an.

Diese Seite ist ein Nachweis für den kurzfristigen Zustand (kein Porenwasserdruck); die Gesamtstandsicherheit und die Setzungen liegen außerhalb des Moduls.

Aufgabe

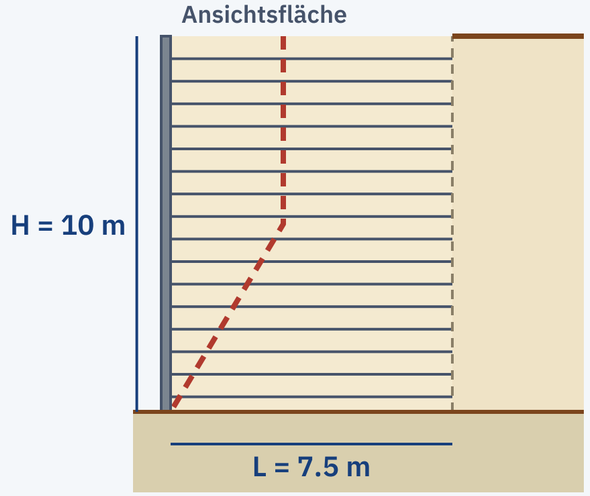
BEISPIEL

Gegeben

Block	**Block aus Beispiel 5:** $\Sigma V = 1\,237.5$ **kN/m,** $e = 0.577$ **m**
Gründungsboden	$\varphi'_2 = 28°$**,** $c'_2 = 50$ **kPa,** $\gamma_2 = 17.3$ **kN/m³**

GESUCHT

FS_{bc} nach dem Ansatz der Quelle, **FS_{bc}** mit der wirksamen Breite nach Meyerhof; welcher maßgebend ist.



Lösung

LÖSUNG

1 Beiwerte (Vesic, $\varphi'_2 = 28°$): $N_q = e^{\pi \tan \varphi'} \tan^2(45° + \varphi'/2)$, $N_c = (N_q - 1)\cot \varphi'$, $N_\gamma = 2(N_q + 1)\tan \varphi'$

$$N_q = 14.72 \qquad N_c = 25.80 \qquad N_\gamma = 16.72$$

2 Der Pfad der Quelle (Breite L = 7.5 m, $\sigma'_o = \gamma_1 H = 165$ kPa)

$$q_u = 50(25.80) + \tfrac{1}{2}(17.3)(7.5)(16.72) = 2{,}375\ \text{kPa} \qquad FS_{bc} = 2{,}375/165 = \mathbf{14.39}$$

3 Wirksame Breite nach Meyerhof (e = 0.577 m)

$$L' = 7.5 - 2(0.577) = 6.346\ \text{m} \qquad \sigma'_v = \Sigma V / L' = 1{,}237.5/6.346 = 195\ \text{kPa}$$

$$q_u = 50(25.80) + \tfrac{1}{2}(17.3)(6.346)(16.72) = 2{,}208\ \text{kPa}$$

$$FS_{bc} = 2{,}208/195 = \mathbf{11.32} \ \geq 2.5\ \checkmark$$

Der Weg der Quelle ergibt **14.39**, die wirksame Breite ergibt **11.32**: Da die Ausmitte den Druck erhöht und das Fundament verschmälert, ist **der Wert nach Meyerhof maßgebend**; beide liegen deutlich über 2.5.

Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Aufgabe

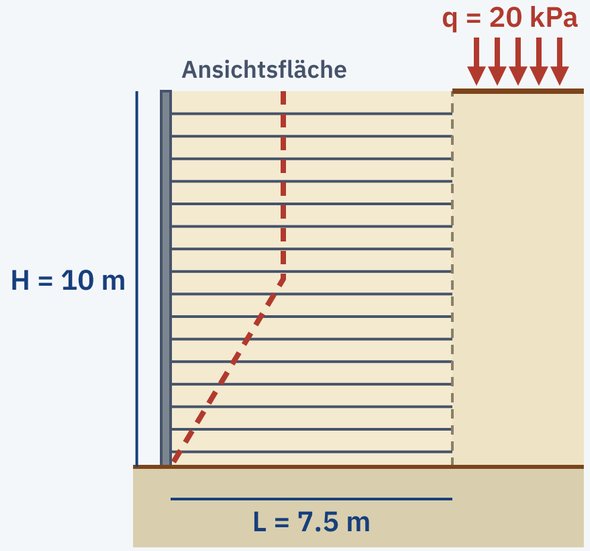
BEISPIEL

Gegeben

Wand	**Wand aus Beispiel 1–7 (H = 10 m, L = 7.5 m, Streifen)**
Last	**Verkehrsauflast als Gleichlast $q_L = 20$ kPa auf der Mauerkrone (über und hinter dem Block)**

GESUCHT

In Lage 1 **FS_P**; am Fuß **T_{max}**, FS_B; äußere Nachweise (Ankerkraft, Kippen, Gleiten, Grundbruch).



Lösung (1/2)

LÖSUNG

1 Lage 1 (z = 0.6 m): Die Auflast erhöht die Seitenspannung, nicht aber den Herausziehwiderstand

$$\sigma_h' = K_r\,(\gamma_1 z + q_L) = 0.4284(9.9 + 20) = 12.81\ \text{kPa} \quad T = 12.81(0.6) = 7.68\ \text{kN}$$

$$P_r = 4.86\ \text{kN} \quad (\sigma_v' = \gamma_1 z = 9.9\ \text{kPa};\ \text{Verkehrslast wird nicht angesetzt})$$

$$FS_P = \frac{4.86}{7.68} = \mathbf{0.632} \ < 1.5 \ \text{✗}$$

2 Sohle: größte Zugbeanspruchung und Zugbruch

$$\sigma_h' = 0.3115(165 + 20) = 57.63\ \text{kPa} \quad T_{max} = 57.63(0.6) = 34.58\ \text{kN}$$

$$FS_B = \frac{85.5}{34.58} = \mathbf{2.47} \ \geq 1.8\ \text{✓} \qquad L_{req} = 13.68\ \text{m} \ > 7.5\ \text{✗}$$

Bei Level 1 steigt die Zugkraft von 2.54 auf **7.68 kN**, während der Widerstand gegen Herausziehen **gleich bleibt**: FS_P 1.91 → **0.63**. Der Zugbruch ist ausreichend nachgewiesen (2.47), die erforderliche Länge beträgt jedoch 13.68 m: Die Verkehrslast **belastet, sie hält nicht**.

Lösung (2/2)

LÖSUNG

3 Äußere Nachweise: der Erddruck nimmt zu; er wird nicht in das Gewicht eingerechnet

$$P_q = K_a q_L H = 0.2596(20)(10) = 51.92\ \text{kN/m}\ \ (H/2) \qquad P_a = 266.11\ \text{kN/m}$$

$$M_o = 713.9 + 51.92(5) = 973.6\ \text{kN·m/m} \qquad W = 1{,}237.5\ \text{kN/m (keine Verkehrslast)}$$

$$FS_{ot} = 4{,}640.6/973.6 = \mathbf{4.77} \qquad e = \mathbf{0.787}\ \text{m}\ \le 1.25\ \checkmark$$

4 Gleiten und Grundbruch (beim Grundbruch belastet auch die Verkehrslast die Sohle)

$$FS_{sl} = 1{,}237.5(0.3378)/266.11 = \mathbf{1.57}\ \ge 1.5\ \checkmark$$

$$V = 1\,237.5 + 20(7.5) = 1{,}387.5\ \Rightarrow\ e_b = 0.702,\ \ L' = 6.10\ \text{m},\ \ \sigma'_v = 227.6\ \text{kPa}$$

$$q_u = 2{,}172\ \text{kPa} \qquad FS_{bc} = \mathbf{9.54}\ \ge 2.5\ \checkmark$$

Die äußere Standsicherheit ist ausreichend (Kippen 4.77, Gleiten 1.57, Grundbruch 9.54), aber **das Herausziehen ist nicht erfüllt** (FS_P = 0.63): Bei einer Stützwand mit Verkehrslast ist die Länge der oberen Lagen maßgebend.

Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Dynamischer Erdwiderstand, Blockträgheit und Trägheit der aktiven Zone

THEORIE

Das Erdbeben (pseudostatisch, k_h; $k_v = 0$) fügt drei Kräfte hinzu: den dynamischen Erddruck der gestützten Hinterfüllung (Mononobe–Okabe), die Trägheit des bewehrten Blocks und die Trägheit der von der Bewehrung gestützten **aktiven Zone**:

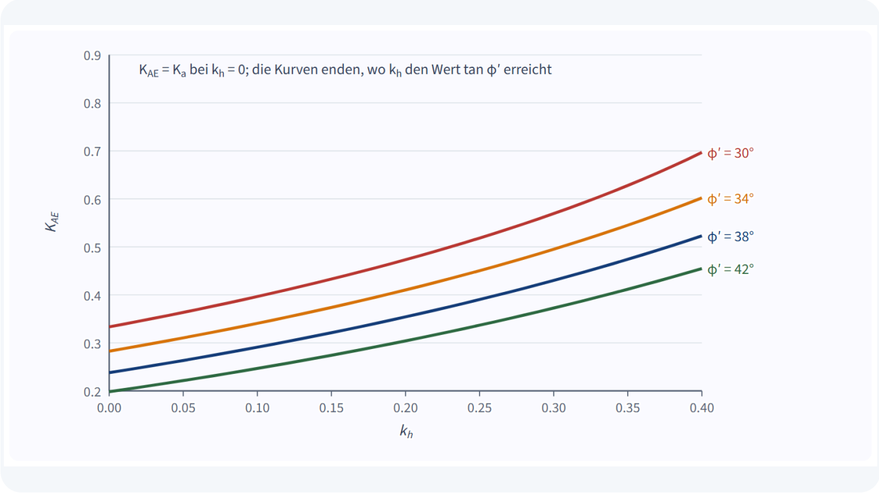
$$\psi = \tan^{-1} k_h \qquad K_{AE} = \frac{\cos^2(\varphi_b' - \psi)}{\cos^2\psi \left[1 + \sqrt{\dfrac{\sin\varphi_b' \sin(\varphi_b' - \psi)}{\cos\psi}}\right]^2}$$

$$\Delta P_{AE} = \tfrac{1}{2}\gamma_b H^2 (K_{AE} - K_a) \;\; (0.6H) \qquad P_{IR} = \tfrac{1}{2} k_h \gamma_1 H^2 \;\; (H/2) \qquad P_i = k_h W_a \;\Rightarrow\; T_{md} = P_i \frac{L_e}{\Sigma L_e}$$

Es wird die **Hälfte** von ΔP_{AE} angesetzt (der Erddruck und die Trägheitskraft erreichen ihre Höchstwerte nicht gleichzeitig); P_{IR} nur für den Block der Breite 0.5H hinter der Wandschale. Eine Auflast erzeugt keine Trägheitskraft.

Äußere Nachweise: $\Sigma H = P_a + \tfrac{1}{2}\Delta P_{AE} + P_{IR}$; $e \le L/3$; die Sicherheitsfaktoren betragen 75 % der statischen Werte.

Innere Nachweise: Jede Lage wird mit $T + T_{md}$ gegen Zugbruch und mit **80 %** von F* gegen Herausziehen nachgewiesen; die Verkehrslast bleibt wie im statischen Fall erhalten.



Aufgabe

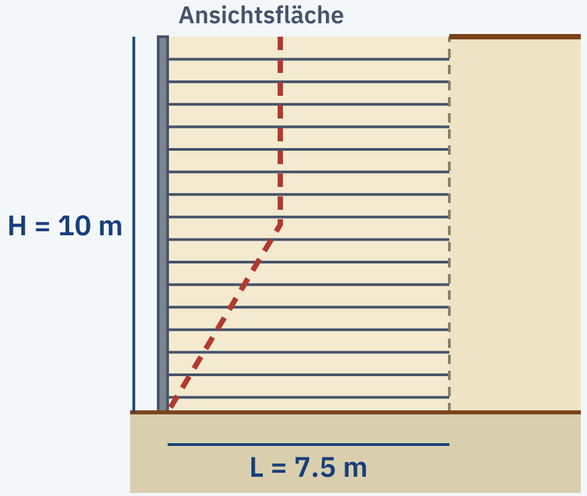
BEISPIEL

Gegeben

Wand	**Wand in den Beispielen 1–7; keine Auflast**
Erdbeben	**$k_h = 0.15$ ($k_v = 0$); erforderlicher FS ist 75 % des statischen Werts; $e \leq L/3$; beim Herausziehen beträgt F^* 80 % des statischen Werts**

GESUCHT

K_{AE}, ΔP_{AE}, P_{IR}; äußere Nachweise; Trägheitskraft der aktiven Zone sowie Nachweis von Zugbruch und Herausziehen jeder Lage mit **T + T_{md}**.



Lösung (1/4)

LÖSUNG

1 Erdbebenwinkel und Erdbebenbeiwert

$$\psi = \tan^{-1} 0.15 = 8.53^\circ \qquad \sqrt{\sin 36^\circ \sin(27.47^\circ)/\cos 8.53^\circ} = 0.5236$$

$$K_{AE} = \cos^2(27.47^\circ)/\left[\cos^2 8.53^\circ (1+0.5236)^2\right] = \mathbf{0.3468} \quad (K_a = 0.2596)$$

2 Dynamischer Zuschlag des Erddrucks, Blockträgheit und gesamte Horizontalkraft

$$\Delta P_{AE} = \tfrac{1}{2}(16.5)(10)^2(0.3468 - 0.2596) = \mathbf{71.89}\ \text{kN/m} \ \ (6.0\ \text{m})$$

$$P_{IR} = \tfrac{1}{2}(0.15)(16.5)(10)^2 = \mathbf{123.75}\ \text{kN/m} \ \ (5.0\ \text{m})$$

$$P_s = 214.18 + \tfrac{1}{2}(71.89) + 123.75 = \mathbf{373.88}\ \text{kN/m}$$

3 Treibendes Moment

$$M_{o,E} = 214.18(3.333) + 35.94(6.0) + 123.75(5.0)$$

$$= 713.9 + 215.7 + 618.8 = \mathbf{1{,}548.4}\ \text{kN}\cdot\text{m/m}$$

Lösung (2/4)

LÖSUNG

4 Kippen und Ausmitte (Grenze L/3 = 2.50 m)

$$FS_{ot,E} = 4{,}640.6/1{,}548.4 = \mathbf{3.00} \ \geq 1.5 \ \checkmark$$

$$x_R = (4{,}640.6 - 1{,}548.4)/1{,}237.5 = 2.499 \text{ m} \qquad e = 3.75 - 2.499 = \mathbf{1.251} \text{ m} \ \leq 2.50 \ \checkmark$$

5 Gleiten (ohne Stirnwiderstand)

$$FS_{sl,E} = 1{,}237.5(0.3378)/373.88 = 418.1/373.88 = \mathbf{1.118} \ < 1.125 \ \times$$

6 Tragfähigkeit (Meyerhof)

$$L' = 7.5 - 2(1.251) = 4.998 \text{ m} \qquad \sigma'_v = 1{,}237.5/4.998 = 247.6 \text{ kPa}$$

$$q_u = 50(25.80) + \tfrac{1}{2}(17.3)(4.998)(16.72) = 2{,}013 \text{ kPa} \quad FS_{bc,E} = \mathbf{8.13} \ \geq 1.875 \ \checkmark$$

Lösung (3/4)

LÖSUNG

7 Trägheit der aktiven Zone und ihre Verteilung auf die Lagen

$$W_a = \gamma_1 A_a = 16.5(22.50) = 371.25\ \text{kN/m} \qquad P_i = 0.15(371.25) = 55.69\ \text{kN/m}$$

$$T_{md} = P_i L_e / \Sigma L_e \qquad \Sigma L_e = 91.5\ \text{m} \quad (17\ \text{Niveau})$$

8 Lage 1 (z = 0.6 m, L_e = 4.50 m): Zugbruchkraft und Herausziehen

$$T_{md} = 55.69(4.50)/91.5 = 2.739\ \text{kN} \qquad T + T_{md} = 2.54 + 2.739 = 5.283\ \text{kN}$$

$$P_{r,E} = 0.8(4.855) = 3.884\ \text{kN} \quad (F^*\ 80\%\ \text{der statischen})$$

$$FS_{P,E} = 3.884/5.283 = \mathbf{0.735} \ < 1.125 \quad ✗$$

9 Lage 17 (Basis, L_e = 7.50 m): Zugbruch

$$T_{md} = 55.69(7.50)/91.5 = 4.565\ \text{kN} \qquad FS_{B,E} = 85.5/(30.84 + 4.565) = \mathbf{2.415} \ \geq 1.35\ ✓$$

Lösung (4/4)

LÖSUNG

10 Zusammenfassung der Ergebnisse (k_h = 0.15)

Nachweis	Statik	Erdbeben	Erforderlich (statisch / Erdbeben)	Entscheidung (Erdbeben)
Zugbruch FS_B (kleinster)	2.77	2.41	1.80 / 1.35	Erfüllt
Herausziehen FS_P (Minimum)	1.91	**0.74**	1.50 / 1,125	**Nicht erfüllt** (Stufe 1)
Kippen FS_{ot}	6.50	3.00	2.00 / 1.50	Erfüllt
Ausmittigkeit e (m)	0.58	1.25	≤ 1.25 / ≤ 2.50	Erfüllt
Gleiten FS_{sl}	1.95	**1.118**	1.50 / 1,125	**Nicht erfüllt** (am Grenzwert)
Tragfähigkeit FS_{bc}	11.32	8.13	2.50 / 1,875	Erfüllt

Das Erdbeben reduziert **das Herausziehen ($FS_{P,E}$ = 0.74) und das Gleiten ($FS_{sl,E}$ = 1.12)** unter den erforderlichen Wert; Kippen, Ausmitte, Grundbruch und Zugbruch sind erfüllt. In den oberen Lagen ist die Zugkraft klein, da jedoch auch σ'_v klein ist, **ist das Herausziehen das schwächste Glied**: Die Bewehrungslänge muss erhöht werden (Beispiel 10).

Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Aufgabe

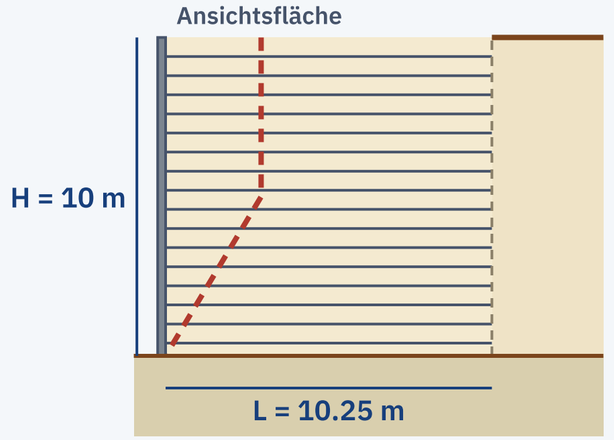
BEISPIEL

Gegeben

Anfang	**Beispiel 9: Herausziehen ($FS_{P,E} = 0.74$) und Gleiten ($FS_{sl,E} = 1.12$) für das Erdbeben nicht ausreichend**
Variable	**Streifenlänge L (in Schritten von 0.25 m erhöht); S_V, S_H, der Streifenquerschnitt und die Auffüllung bleiben gleich**

GESUCHT

Kleinstes L: die Erdbebennachweise ($FS_{P,E} \geq 1.125$; $FS_{sl,E} \geq 1.125$; $e \leq L/3$) müssen erfüllt sein; **L-Tabelle**.



Lösung (1/2)

LÖSUNG

1 Sicherheitsfaktoren mit zunehmender Länge (fett: unter dem erforderlichen Wert)

L (m)	$FS_{P,E}$ (≥ 1,125)	$FS_{sl,E}$ (≥ 1,125)	e_E / (L/3) (m)	FS_P statisch	FS_{sl} statisch	FS_{bc} statisch
7.5	**0.735**	**1.118**	1.25 / 2.50	1.91	1.95	11.32
8.5	**0.884**	1.267	1.10 / 2.83	2.33	2.21	12.65
9.5	**1.033**	1.416	0.99 / 3.17	2.76	2.47	13.87
10.5	1.182	1.565	0.89 / 3.50	3.18	2.73	15.02
11.5	1.331	1.715	0.82 / 3.83	3.60	2.99	16.11
12.5	1.480	1.864	0.75 / 4.17	4.03	3.25	17.16

Bei L = 7.5 m sind Herausziehen (0.74) und Gleiten (1.12) nicht ausreichend; **das Herausziehen ist maßgebend**: Selbst bei L = 9.5 m beträgt es 1.03 < 1.125. Mit zunehmender Länge wachsen sowohl die wirksame Länge L_e (Herausziehen) als auch das Blockgewicht (Gleiten, Ausmitte).

Lösung (2/2)

LÖSUNG

2 Kleinste Länge in Schritten von 0.25 m: L = 10.25 m

$$FS_{P,E} = 1.145 \geq 1.125 \checkmark \qquad FS_{sl,E} = 1.528 \geq 1.125 \checkmark$$

$$e_E = 0.916 \leq \frac{L}{3} = 3.42\ \text{m} \checkmark \qquad FS_{ot,E} = 5.60 \quad FS_{bc,E} = 12.48$$

3 Statischer Fall mit dieser Länge (Nachweis)

$$FS_P = 3.07 \quad FS_{sl} = 2.67 \quad FS_{ot} = 12.14 \quad e = 0.422\ \text{m} \quad FS_{bc} = 14.74$$

Für das Erdbeben ist **L = 10.25 m** (≈ 1.02 H) erforderlich; mit dieser Länge sind die statischen Sicherheitsfaktoren sehr hoch. Dasselbe Ergebnis lässt sich auch durch engere Bewehrungsabstände (S_V, S_H) oder durch breitere Streifen- bzw. beschichtete Bewehrung erzielen; die Länge ist der unmittelbarste Einflussfaktor.

Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Aufgabe

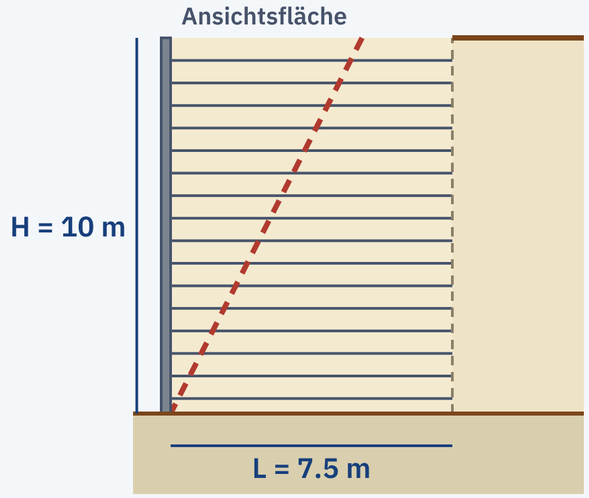
BEISPIEL

Gegeben

Geogitter	$T_{ult} = 150$ **kN/m;** $RF_{id} = 1.2$, $RF_{cr} = 2.5$, $RF_{cbd} = 1.25$; **Auflast** $C_r = 0.8$; $S_V = 0.6$ **m**
Herausziehen	$F^* = \frac{2}{3}\tan 36°$, $\alpha = 0.8$; **Rankinesche Bruchfläche** ($K_r = K_a$); $FS_B \geq 1.8$, $FS_P \geq 1.5$

GESUCHT

T_{all}, T_{cap}, T_{max} (pro Meter Wand), **FS_B**, erforderliches S_V; in der Lage 1 **FS_P** und L_{req}.



Lösung (1/2)

LÖSUNG

1 Langzeitfestigkeit und Tragfähigkeit

$$RF = 1.2(2.5)(1.25) = 3.75 \qquad T_{all} = \frac{T_{ult}}{RF} = \frac{150}{3.75} = 40.0\ \text{kN/m}$$

$$T_{diameter} = T_{all} C_r = 40.0(0.8) = 32.0\ \text{kN/m}$$

2 Zug und Zugbruch ($K_r = K_a$)

$$\sigma_h'(H) = K_a(165) = 42.84\ \text{kPa} \qquad T_{max} = 42.84(0.6) = 25.70\ \text{kN/m}$$

$$FS_B = \frac{32.0}{25.70} = \mathbf{1.245} < 1.8 \ \text{✗} \qquad S_{V,req} = \frac{T_{all} C_r}{\sigma_h' FS_B} = \frac{32.0}{42.84(1.8)} = \mathbf{0.415}\ \text{m}$$

Der gewählte Abstand (0.6 m) ist zu groß: Die Sicherheit gegen Zugbruch beträgt 1.25 < 1.8; der erforderliche Abstand ist **$S_V \leq 0.415$ m** (oder ein zugfesteres Geogitter).

Lösung (2/2)

LÖSUNG

3 Ebene 1 (z = 0.6 m): Rankine-Fläche

$$L_a = (H - z)/\tan 63^\circ = 4.79\ \text{m} \qquad L_e = 7.5 - 4.79 = 2.71\ \text{m}$$

$$\sigma'_h = K_a(9.9) = 2.57\ \text{kPa} \qquad T = 2.57(0.6) = 1.542\ \text{kN/m}$$

4 Herausziehen (pro Meter Wand, $R_c = C_r = 0.8$)

$$F^* = \tfrac{2}{3}\tan 36^\circ = 0.4844$$

$$P_r = 2C_rF^*\alpha\sigma'_vL_e = 2(0.8)(0.4844)(0.8)(9.9)(2.71) = 16.64\ \text{kN/m}$$

$$FS_P = 16.64/1.542 = \mathbf{10.79}\ \geq 1.5\ \checkmark \qquad L_{req} = L_a + \frac{1.5\,T}{2C_rF^*\alpha\sigma'_v} = \mathbf{5.17}\ \text{m}$$

Beim Geosynthetik ist das Herausziehen reichlich nachgewiesen (FS_P = 10.79); die erforderliche Länge folgt dem Rankine-Keil: **L_{req} = 5.17 m** (< 7.5 m). Maßgebend ist der **Zugbruch**: Er wird über die Bemessungsfestigkeit und den Abstand eingestellt.

Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Aufgabe

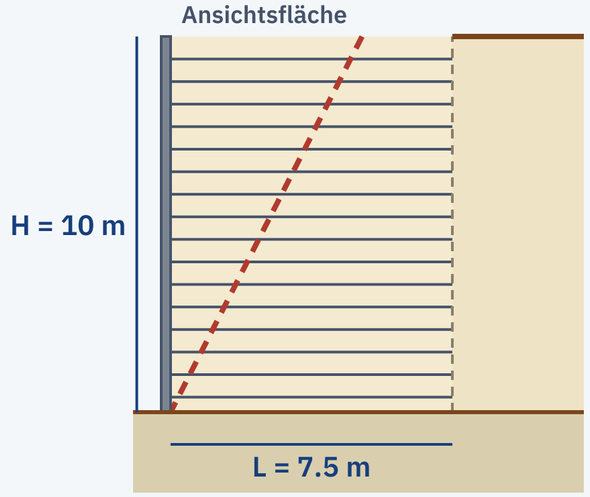
BEISPIEL

Gegeben

Wand	**H = 10 m, L = 7.5 m, $S_V = 0.6$ m; Hinterfüllung $\varphi_1' = 36°$; gleicher Baugrund**
Fälle	**vereinfachtes Verfahren, Rankine-Ansatz (Quelle), Verkehrslast, Streifenlast, Geogitter, kurze Bewehrung**

GESUCHT

Die **Sicherheitsfaktoren** der sieben Fälle nebeneinander angeben und die Unterschiede erläutern.



Lösung

LÖSUNG

1 Dieselbe Wand, sieben Fälle (statisch)

Zustand	FS_B	FS_P	L_{req} (m)	FS_{ot}	e (m)	FS_{sl}	FS_{bc}
Öffnung: vereinfacht, Lamellen, L = 7.5 m	2.77	1.91	6.54	6.50	0.58	1.95	11.32
Rankine-Ansatz der Quelle (gleiche Streifen)	3.33	1.90	6.93	6.50	0.58	1.95	11.32
Ansatz nach Rankine, L = 13.5 m	3.33	6.09	6.93	21.06	0.32	3.51	18.18
Verkehrslastauflast q_L = 20 kPa	2.47	0.63	13.68	4.77	0.79	1.57	9.54
Streifenlast 60 kPa (a′ = 2 m, b′ = 1 m)	2.74	1.32	8.13	3.66	1.14	1.55	7.87
Geogitter 150 kN/m (Rankine, α = 0.8)	1.25	10.79	5.17	6.50	0.58	1.95	11.32
Streifen L = 7 m (0.7H)	2.77	1.70	6.54	5.66	0.62	1.82	10.60

Ansatz nach Rankine verwendet K_a an der Sohle: Die Zugkraft ist klein (T_{max} 25.7 kN), der Zugbruch hoch (3.33), aber die erforderliche Länge an der Oberkante beträgt 6.93 m. **Verkehrslast** verringert jeden Sicherheitsfaktor (FS_P 0.63: die Lasten halten nicht); **Streifenlast** verringert ihn weniger (FS_P 1.32), da sie als Gewicht auf dem Block wirkt. Beim Geogitter ist das Herausziehen reichlich vorhanden, **der Zugbruch ist maßgebend** (FS_B 1.25). Mit L = 7 m sind die Streifen noch ausreichend (FS_P 1.70, e = 0.62 m).

Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Umfang der Lösung

THEORIE

Die Auffüllung ist ein frei dränierendes granuläres Material (kein Porenwasserdruck); es gibt **kein** Grundwasser im oder hinter der Wand und keine geneigte Hinterfüllung über der Wand.

Die Lagen liegen in den Tiefen S_V, $2S_V$, …; eine einheitliche Bewehrungslänge, ein trapezförmiger Querschnitt und Lagen unterschiedlicher Länge werden nicht modelliert. Stab-/Drahtgitter ($K_r/K_a \geq 2.5$) und der mit der Tiefe veränderliche F*-Wert gerippter Bänder liegen außerhalb des Anwendungsbereichs.

Lasten: verteilte Auflast (ständig/Verkehr) und Streifenlasten (Laba–Kennedy; superponiert). Einzellasten und Linienlasten werden nicht modelliert.

Die **Vorsatzschale** trägt keine Last; der Anschluss wird nur dann mit einem Sicherheitsfaktor gegen Zugbruch nachgewiesen, wenn eine Festigkeit eingegeben wird; der davor liegende eingebettete Teil wird nicht angesetzt.

Nicht geprüft: globale und zusammengesetzte Standsicherheit (Böschungsstandsicherheitsanalyse), Setzung und Setzungsdifferenzen, Dränage, Fassade, Bauzustände.

Die Nachweise erfolgen in Form der **zulässigen Spannung** (globale Sicherheitsfaktoren); Last- und Widerstandsfaktoren nach AASHTO LRFD/GEC 11 werden nicht verwendet. Bei einer wichtigen Stützwand sind zusätzlich Produktdaten, die globale Standsicherheit und die Setzungen zu ermitteln.

Zusammenfassung

Die wichtigsten Punkte

Bewehrter Boden: Der Bodendruck wird durch die Zugkraft der Bewehrung aufgenommen, die Haftung stellt den Verbund her. Innere Standsicherheit: Zugbruch, Herausziehen, (Anschluss); äußere Standsicherheit: Kippen, Gleiten, Grundbruch für den Block L × H

Spannung: $\sigma'_h = K_r \sigma'_v$; im Streifen $K_r/K_a = 1.7 \rightarrow 1.2$ (bis 6 m), im Geokunststoff 1. **Zugkraft** $T = \sigma'_h S_V S_H$; die größte Zugkraft tritt an der Sohlfläche auf

Zugbruch: $T_{cap} = w(t - rn)f_y$ (Band) oder $T_{all} C_r$ (Geokunststoff); **Herausziehen**: $P_r = 2R_c F^* \alpha \sigma'_v L_e$, mit L_e hinter der Gleitfläche (bilinear / Rankine)

Äußere Nachweise: FS_{ot}, $e \le L/6$, $FS_{sl} = \Sigma V \tan(⅔\varphi'_{min})/\Sigma H$, Grundbruch (Quelle und Meyerhof $L' = L - 2e$, der kleinere)

Verkehrslasten belasten, sie halten nicht: sie erhöhen Zug und Schub und gehen weder in das Herausziehen noch in das Gewicht ein; im Beispiel FS_P 1.91 → 0.63

Erdbeben: ΔP_{AE} (zur Hälfte, 0.6H), P_{IR}, $P_i \rightarrow T_{md}$; erforderlicher FS beträgt 75 % des statischen Falls; die Beispielwand **versagt beim Herausziehen (0.74) und beim Gleiten (1.12)** und ist mit L = 10.25 m erfüllt

Geogitter: $T_{all} = T_{ult}/(RF_{id} RF_{cr} RF_{cbd})$; der Zugbruch ist maßgebend ($S_{V,req}$ = 0.415 m), das Herausziehen ist reichlich

Literatur

Das, B.M. (2016). Principles of Foundation Engineering, 8th ed. Cengage Learning, Boston. Kapitel 13, Abschnitte 13.10 bis 13.17: Bodenbewehrung, Bemessung von Wänden mit metallischen Bändern, Geotextilien und Geogittern; Tabelle 4.2 für die Tragfähigkeitsbeiwerte.

Berg, R.R., Christopher, B.R. and Samtani, N.C. (2009). Design of Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes, Vol. I, FHWA-NHI-10-024. Federal Highway Administration, Washington, D.C.

American Association of State Highway and Transportation Officials (2012). AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 6th ed., Abschnitt 11.10, Mechanically stabilized earth walls.

Vidal, H. (1966). La terre armée. Annales de l’Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics, Paris, July–August, 888–938.

Laba, J.T. and Kennedy, J.B. (1986). Reinforced earth retaining wall analysis and design. Canadian Geotechnical Journal, 23(3), 317–326.

Koerner, R.M. (2005). Designing with Geosynthetics, 5th ed. Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J.

Binquet, J. and Lee, K.L. (1975). Bearing capacity analysis of reinforced earth slabs. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 101(GT12), 1257–1276.

Martin, J.P., Koerner, R.M. and Whitty, J.E. (1984). Experimental friction evaluation of slippage between geomembranes, geotextiles and soils. Proceedings, International Conference on Geomembranes, Denver, 191–196.

Mononobe, N. and Matsuo, H. (1929). On the determination of earth pressures during earthquakes. Proceedings, World Engineering Congress, Tokyo, 9, 177–185.

Okabe, S. (1926). General theory of earth pressure. Journal of the Japanese Society of Civil Engineers, 12(1).

Vesic, A.S. (1973). Analysis of ultimate loads of shallow foundations. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 99(SM1), 45–73.

HINWEIS

Alle Zahlenbeispiele wurden mit der Berechnungsengine des Moduls selbst erzeugt; das Modul liefert dieselben Werte. Das Schritt-für-Schritt-Beispiel auf der Modulseite ist ebenfalls diese Wand (H = 10 m, verzinktes Band 75 × 6 mm, L = 7.5 m, S_V = 0.6 m, S_H = 1.0 m).

GeoTerva

Geotechnische Berechnungen online

Von der Theorie zur Praxis

Geben Sie in GeoTerva Ihre Wandhöhe, die Bewehrung (Streifen, Geogitter, Geotextil), die Hinterfüllung, die Auflast und den Erdbebenbeiwert ein; das Modul gibt die Sicherheit gegen Bruch und Herausziehen jeder Lage, die äußeren Nachweise des Blocks und die erforderliche Länge gemeinsam an.

Modul öffnen →

Theorieseite →

Auf dem Smartphone öffnen

Die Beispielmodule erfordern keine Registrierung.

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