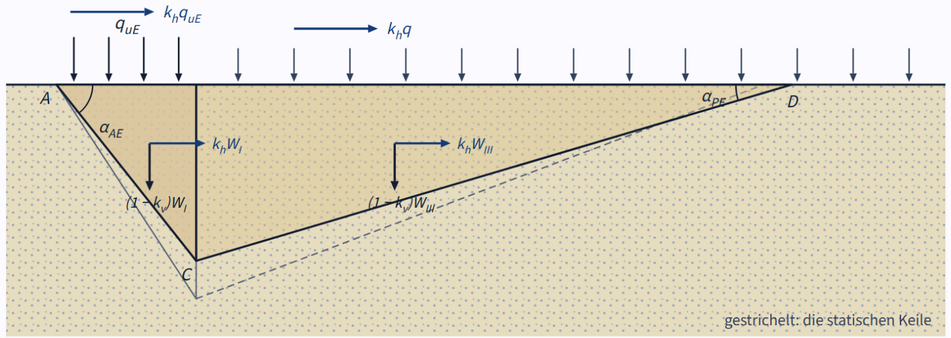
Geotechnische Vorlesungspräsentation · Fundamente

Grundbruchspannung eines Streifenfundaments im Erdbebenfall

Vorlesung: von den zwei Coulomb-Keilen nach Richards, Elms und Budhu zu den statischen Tragfähigkeitsbeiwerten, zu den Mononobe–Okabe-Beiwerten im Erdbebenfall und dazu, um wie viel das Erdbeben sie reduziert; zu jedem Thema ein Rechenbeispiel.

- Zwei Coulomb-Keile
- $K_A \cdot K_P \cdot \alpha_A$
- Mononobe–Okabe
- $\theta = \tan^{-1} k_h/(1-k_v)$
- Wirkung des Erdbebens
- Rechenbeispiele



Was lernen wir in dieser Vorlesung?

- Das Bruchmechanismusmodell des Streifenfundaments **mit zwei Coulomb-Keilen** (aktiver Keil ABC, passiver Keil BCD) aufzustellen
- Die Werte **K_A, K_P, α_A, α_P** und daraus die Beiwerte **N_q, N_γ, N_c** mit geschlossenen Formeln zu ermitteln
- Das Erdbeben als **pseudostatische** Kraft ansetzen: $\theta = \tan^{-1}[k_h/(1 - k_v)]$ und die **Mononobe–Okabe**-Beiwerte K_{AE}, K_{PE}
- Die **Grundbruchspannung im Erdbebenfall q_{uE}** und ihr Verhältnis zum statischen Wert zu berechnen
- Die Empfindlichkeit von k_h und k_v und die **Grenze $\theta \geq \varphi$** zu interpretieren
- Die zulässige Bodenpressung aus q_{uE} zu entnehmen und das Fundament zu **prüfen**

VORLESUNGSABLAUF

Jedes Thema wird in **drei Schritten** behandelt:

1 · **Theorie**: Wie lautet die Regel, warum ist sie so?

2 · **Aufgabe**: Gegeben und Gesucht

3 · **Lösung**: Schritt für Schritt, mit Zahlen

Beispielfundament, das im Modul geöffnete Modell: Streifenfundament mit 1.5 m Breite, D_f = 1 m, c = 30 kPa, φ' = 25°, γ = 17 kN/m³, k_h = 0.25.

Zwei Coulomb-Keile statt einer logarithmischen Spirale

THEORIE

Richards, Elms und Budhu (1993) schlugen für ein durchgehendes Fundament eine Theorie vor, die **auch auf Erdbebenbeanspruchung angewendet werden kann**. Anstelle der logarithmischen Spirale nach Terzaghi oder Meyerhof verwendet sie eine einfache Bruchfläche aus **zwei Coulomb-Keilen**; daher ergibt sich jeder Beiwert **in geschlossener Form**.

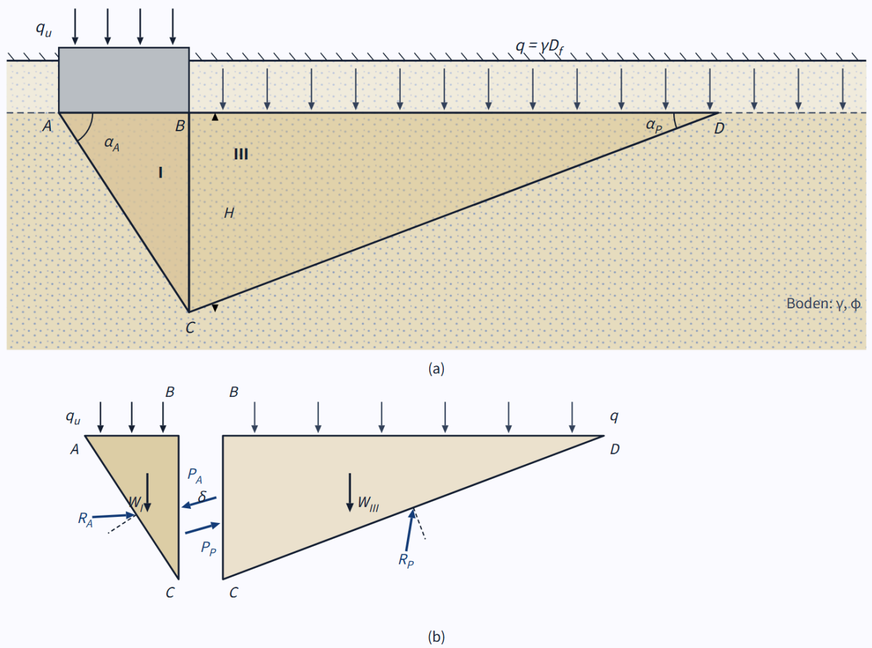
Streifenfundament, Breite B, Tiefe D_f; der Boden über der Sohle wirkt nur als Auflast $q = \gamma D_f$.

c–φ-Boden, $\varphi > 0$; kein Grundwasser in der Bruchzone.

Pseudostatische Massenkraft des Erdbebens: Die horizontalen und vertikalen Beiwerte k_h, k_V wirken auf die Keile und Lasten.

Wandreibung δ = φ/2 an der vertikalen Fuge zwischen den beiden Keilen (Empfehlung der Autoren).

Der **aktive** Keil (ABC) unter dem Fundament und der **passive** Keil (BCD) daneben; beide treffen sich auf der Fläche BC (Höhe H).



Keilwinkel und Coulomb-Beiwerte

THEORIE

Die Keilneigungen αA und αP sind die Winkel der **kritischen Coulomb-Keile** (von der Horizontalen gemessen):

$$\alpha_A = \varphi + \tan^{-1}\left\{\frac{[\tan\varphi(\tan\varphi+\cot\varphi)(1+\tan\delta\cot\varphi)]^{0.5}-\tan\varphi}{1+\tan\delta(\tan\varphi+\cot\varphi)}\right\}$$

$$\alpha_P = -\varphi + \tan^{-1}\left\{\frac{[\tan\varphi(\tan\varphi+\cot\varphi)(1+\tan\delta\cot\varphi)]^{0.5}+\tan\varphi}{1+\tan\delta(\tan\varphi+\cot\varphi)}\right\}$$

Die horizontalen Komponenten der Coulomb-Kräfte werden mit folgenden Beiwerten angesetzt:

$$K_A = \frac{\cos^2\varphi}{\cos\delta\left[1+\sqrt{\frac{\sin(\varphi+\delta)\sin\varphi}{\cos\delta}}\right]^2} \qquad K_P = \frac{\cos^2\varphi}{\cos\delta\left[1-\sqrt{\frac{\sin(\varphi+\delta)\sin\varphi}{\cos\delta}}\right]^2}$$

BEZEICHNUNGEN

δ = φ/2: Wandreibung zwischen den Keilen

α_A: Winkel der geneigten Ebene AC zur Horizontalen

α_P: Winkel der geneigten Ebene CD zur Horizontalen

P_A, P_P: Coulomb-Kräfte auf der Fläche BC

R_A, R_P: Resultierende auf den geneigten Ebenen

W_I, W_{III}: Keilgewichte

Aufgabe

BEISPIEL

Gegeben

Baugrund	$\varphi' = 25°$ **(das Modell, mit dem das Modul geöffnet wird)**
Wandreibung	$\delta = \varphi/2 = 12.5°$

GESUCHT

K_A, K_P Beiwerte und die Keilwinkel **α_A, α_P** bestimmen.

Lösung (1/2)

LÖSUNG

1 Gemeinsamer Wurzelterm (sin 37.5° = 0.6088; sin 25° = 0.4226; cos 12.5° = 0.9763)

$$\sqrt{\frac{\sin(\varphi+\delta)\sin\varphi}{\cos\delta}} = \sqrt{\frac{0.6088\cdot 0.4226}{0.9763}} = \mathbf{0.5133}$$

2 K_A und K_P ($\cos^2 25° = 0.8214$)

$$K_A = \frac{0.8214}{0.9763(1+0.5133)^2} = \mathbf{0.3674} \qquad K_P = \frac{0.8214}{0.9763(1-0.5133)^2} = \mathbf{3.5524}$$

Lösung (2/2)

LÖSUNG

3 Wurzelausdruck (tan φ = 0.4663; cot φ = 2.1445; tan δ = 0.2217)

$$[\tan\varphi(\tan\varphi+\cot\varphi)(1+\tan\delta\cot\varphi)]^{0.5}=[0.4663(2.6108)(1.4754)]^{0.5}=1.3402$$

$$1+\tan\delta(\tan\varphi+\cot\varphi)=1.5788$$

4 Keilwinkel

$$\alpha_A=25^\circ+\tan^{-1}\frac{1.3402-0.4663}{1.5788}=25^\circ+28.97^\circ=\mathbf{53.97}^\circ$$

$$\alpha_P=-25^\circ+\tan^{-1}\frac{1.3402+0.4663}{1.5788}=-25^\circ+48.85^\circ=\mathbf{23.85}^\circ$$

Der aktive Keil ist steil (α_A = 53.97°), der passive Keil flach (α_P = 23.85°). Keilhöhe H = B tan α_A = 1.5 × 1.375 = **2.06 m**.

Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Horizontales Gleichgewicht an der Fläche BC

THEORIE

Betrachtet wird nur die Auflast (φ ≠ 0, γ = 0, q ≠ 0); die Fundamentpressung sei q'_u. Auf der Fläche BC sind die horizontalen Kräfte im Gleichgewicht:

$$P_A \cos\delta = P_P \cos\delta$$

Bei gleichmäßiger Auflast ist jede Kraft Erddruckbeiwert × Auflast × H: q'_u auf der aktiven Seite, q auf der passiven Seite:

$$P_A \cos\delta = q'_u K_A H \qquad P_P \cos\delta = q\, K_P H$$

Werden beide gleichgesetzt, kürzt sich H heraus und **N_q** wird zum Verhältnis der beiden Coulomb-Beiwerten:

$$q'_u = q\,\frac{K_P}{K_A} = q\,N_q \qquad N_q = \frac{K_P}{K_A}$$

NEDEN ORAN?

Der aktive Keil unter dem Fundament drückt den benachbarten passiven Keil seitlich weg. Beide Seiten stützen sich in derselben Höhe H und mit demselben δ gegeneinander ab; daher bestimmt nur das **Verhältnis** der beiden Bodenwiderstände das Gleichgewicht.

Das Gewicht der Keile geht über $H = B \tan \alpha_A$ ein

THEORIE

Nun wird nur das Gewicht betrachtet ($\varphi \neq 0$, $\gamma \neq 0$, $q = 0$); die Fundamentpressung ist q''_u. Auf der aktiven Seite überlagert sich das Gewicht wie eine Auflast, auf der passiven Seite wirkt nur das Gewicht:

$$P_A \cos\delta = q''_u H K_A + \tfrac{1}{2}\gamma H^2 K_A \qquad P_P \cos\delta = \tfrac{1}{2}\gamma H^2 K_P$$

Bei Gleichsetzung:

$$q''_u = \tfrac{1}{2}\gamma H \left(\frac{K_P}{K_A} - 1 \right)$$

Die Höhe der Wandfläche folgt aus dem aktiven Keil, $H = B \tan \alpha_A$; daraus ergibt sich **N_γ**:

$$q''_u = \tfrac{1}{2}\gamma B\, N_\gamma \qquad N_\gamma = \tan\alpha_A \left(\frac{K_P}{K_A} - 1 \right)$$

ANMERKUNG

N_γ hängt von der Tiefe des Keils ab: Der Faktor **$\tan \alpha_A$** gibt an, wie steil der Keil ist. Ein steiler Keil (großes α_A) reicht tiefer und der Eigengewichtsanteil wird größer.

Superposition und N_c

THEORIE

Auflast- und Gewichtsterme werden summiert (Superposition):

$$q_u = q'_u + q''_u = q\,N_q + \tfrac{1}{2}\gamma B\,N_\gamma$$

Für die Kohäsion bei φ = 0 ergibt die Coulomb-Keilanalyse $N_c = 6$; der Kürze halber verwenden die Autoren die bekannte Beziehung:

$$N_c = (N_q - 1)\cot\varphi \qquad q_u = c\,N_c + q\,N_q + \tfrac{1}{2}\gamma B\,N_\gamma$$

Dieser **statische** Wert ist die Tragfähigkeit dieser beiden Keile; er ist **verschieden** von den Prandtl-artigen Beiwerten nach Terzaghi, Meyerhof, Hansen oder Vesic (φ = 25°: N_q = 9.67; Prandtl–Reissner 10.66).

Die Grundbruchspannung im Erdbebenfall wird durch **Abminderung** dieses Wertes ermittelt; das Modul stellt beide nebeneinander dar.

STATISCHE BEIWERTE (δ = φ/2)

φ′	δ	α_A	N_q	N_γ	N_c
5	2.5	42.22	1.53	0.49	6.11
10	5.0	45.19	2.37	1.38	7.77
15	7.5	48.13	3.70	3.02	10.09
20	10.0	51.06	5.90	6.06	13.46
25	12.5	53.97	9.67	11.92	18.59
30	15.0	56.86	16.51	23.76	26.86
35	17.5	59.74	29.89	49.52	41.26
40	20.0	62.60	59.03	111.96	69.16
45	22.5	65.45	133.87	290.89	132.87

Aufgabe

BEISPIEL

Gegeben

Fundament	**Streifen (durchgehend), B = 1.5 m, Fundamentsohle D_f = 1.0 m**
Baugrund	$c = 30\ \mathrm{kPa},\ \varphi' = 25°$
Wichte	$\gamma = 17\ \mathrm{kN/m^3}$**; Grundwasserspiegel nicht in der Bruchzone**
Vorheriges Beispiel	$K_A = 0.3674,\ K_P = 3.5524,\ \alpha_A = 53.97°$

GESUCHT

Ermitteln Sie die Werte **N_q, N_γ, N_c** und das statische **q_u**.

Lösung

LÖSUNG

1 Tragfähigkeitsbeiwerte (tan 53.97° = 1.3748)

$$N_q = \frac{K_P}{K_A} = \frac{3.5524}{0.3674} = \mathbf{9.67} \qquad N_c = \frac{9.67 - 1}{0.4663} = \mathbf{18.59}$$

$$N_\gamma = 1.3748(9.67 - 1) = \mathbf{11.92}$$

2 Statische Tragfähigkeit ($q = \gamma D_f$ = 17 kPa)

$$q_u = 30(18.59) + 17(9.67) + \tfrac{1}{2}(17)(1.5)(11.92)$$

$$= 557.8 + 164.4 + 152.0 = \mathbf{874.14}\ \mathrm{kPa}$$

Statische Grundbruchspannung **874.14 kPa**; Kohäsionsterm 64 %, Auflast 19 %, Eigengewicht 17 %. Das Erdbeben wird diesen Wert verringern (nächster Abschnitt).

Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Winkel θ und Beiwerte nach Mononobe–Okabe

THEORIE

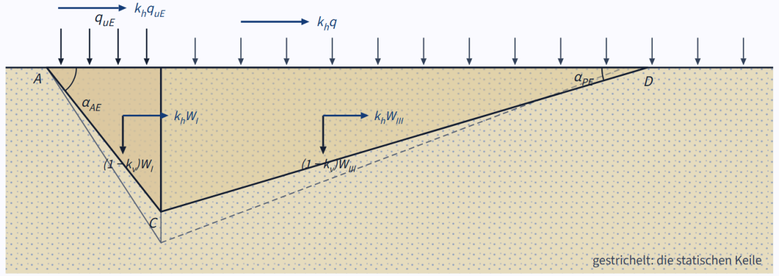
Unter Erdbeben werden dieselben beiden Keile **mit pseudostatischen Trägheitskräften** gelöst. Die Resultierende aus Gewicht und Trägheitskraft neigt sich um θ gegenüber der Vertikalen; die Keile werden mit α = φ − θ anstelle von φ berechnet:

$$\theta = \tan^{-1}\frac{k_h}{1-k_v} \qquad \alpha = \varphi - \theta$$

Die Coulomb-Beanspruchungsbeiwerte werden zu **Mononobe–Okabe**-Beiwerten:

$$K_{AE} = \frac{\cos^2(\varphi-\theta)}{\cos\theta\cos(\delta+\theta)\left[1+\sqrt{\frac{\sin(\varphi+\delta)\sin(\varphi-\theta)}{\cos(\delta+\theta)}}\right]^2}$$

$$K_{PE} = \frac{\cos^2(\varphi-\theta)}{\cos\theta\cos(\delta+\theta)\left[1-\sqrt{\frac{\sin(\varphi+\delta)\sin(\varphi-\theta)}{\cos(\delta+\theta)}}\right]^2}$$



Bei θ = 0 geht jeder Erdbebenausdruck in seine statische Form über: $K_{AE} = K_A$, $K_{PE} = K_P$.

Mit zunehmender horizontaler Beschleunigung nimmt α ab: Die Keile werden flacher, der Mechanismus wird flacher.

Aufgabe

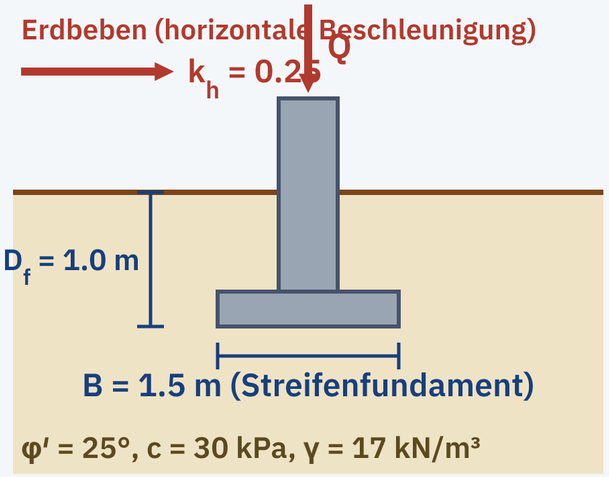
BEISPIEL

Gegeben

Fundament	**Streifen (durchgehend), B = 1.5 m, Fundamentsohle D_f = 1.0 m**
Baugrund	$c = 30\ \mathrm{kPa},\ \varphi' = 25^\circ$
Wichte	$\gamma = 17\ \mathrm{kN/m^3}$; **Grundwasserspiegel nicht in der Bruchzone**
Erdbeben	**k_h = 0.25; k_v = 0**
Wandreibung	$\delta = 12.5^\circ$

GESUCHT

θ, α = φ − θ und die Werte **K_{AE}, K_{PE}** sind zu bestimmen.



Lösung

LÖSUNG

1 Der Neigungswinkel und der Wurzelterm (sin 37.5° = 0.6088; sin α = 0.1901; cos(δ + θ) = cos 26.54° = 0.8945)

$$\theta = \tan^{-1}\frac{0.25}{1-0} = \mathbf{14.04}^\circ \qquad \alpha = \varphi - \theta = 10.96^\circ$$

$$\sqrt{\frac{\sin(\varphi+\delta)\sin\alpha}{\cos(\delta+\theta)}} = \sqrt{\frac{0.6088\cdot 0.1902}{0.8947}} = \mathbf{0.3597}$$

2 K_{AE} und K_{PE} ($\cos^2\alpha = 0.9638$; $\cos\theta = 0.9701$)

$$K_{AE} = \frac{0.9638}{0.9701(0.8947)(1+0.3597)^2} = \mathbf{0.6006}$$

$$K_{PE} = \frac{0.9638}{0.9701(0.8947)(1-0.3597)^2} = \mathbf{2.7089}$$

Das Erdbeben **vergrößert** K_A von 0.367 → 0.601 und **verkleinert** K_P von 3.552 → 2.709.

Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Keilwinkel, Beiwerte und q_{uE}

THEORIE

$$\alpha_{AE} = \alpha + \tan^{-1}\left\{\frac{\sqrt{(1+\tan^2\alpha)\,[1+\tan(\delta+\theta)\cot\alpha]} - \tan\alpha}{1+\tan(\delta+\theta)(\tan\alpha+\cot\alpha)}\right\}$$

$$\alpha_{PE} = -\alpha + \tan^{-1}\left\{\frac{\sqrt{(1+\tan^2\alpha)\,[1+\tan(\delta-\theta)\cot\alpha]} + \tan\alpha}{1+\tan(\delta+\theta)(\tan\alpha+\cot\alpha)}\right\}$$

Da das Gleichgewicht gleich bleibt, behalten die Beiwerte dieselbe Form:

$$N_{qE} = \frac{K_{PE}}{K_{AE}} \qquad N_{\gamma E} = \tan\alpha_{AE}\left(\frac{K_{PE}}{K_{AE}} - 1\right) \qquad N_{cE} \approx (N_{qE}-1)\cot\varphi$$

$$q_{uE} = c\,N_{cE} + q\,N_{qE} + \tfrac{1}{2}\gamma B\,N_{\gamma E}$$

HINWEIS

Für N_{cE} wird die statische Beziehung auf den Erdbebenfall **übertragen** (die Autoren schreiben die Theorie für granularen Boden). Bei c > 0 meldet das Modul dies als Annahme und gibt die Sensitivität für c = 0 an.

Aufgabe

BEISPIEL

Gegeben

Fundament	**Streifen (durchgehend), B = 1.5 m, Fundamentsohle D_f = 1.0 m**
Baugrund	$c = 30\ \mathrm{kPa},\ \varphi' = 25°$
Wichte	$\gamma = 17\ \mathrm{kN/m^3}$**; Grundwasserspiegel nicht in der Bruchzone**
Erdbeben	**k_h = 0.25; k_v = 0**
Vorheriges Beispiel	$\theta = 14.04°,\ K_{AE} = 0.6006,\ K_{PE} = 2.7089$

GESUCHT

Ermitteln Sie **α_{AE}, N_{qE}, $N_{\gamma E}$, N_{cE}** und deren Verhältnisse zu den statischen Beiwerten.

Lösung (1/2)

LÖSUNG

1 α = 10.96°: tan α = 0.1937, cot α = 5.1620, tan(δ + θ) = tan 26.54° = 0.4994

$$\sqrt{(1+\tan^2\alpha)(1+\tan(\delta+\theta)\cot\alpha)} = \sqrt{1.0375(3.5777)} = 1.9267$$

$$1+\tan(\delta+\theta)(\tan\alpha+\cot\alpha) = 3.6745$$

2 Erdbebenkeilwinkel (statisch α_A = 53.97°)

$$\alpha_{AE} = 10.96^\circ + \tan^{-1}\frac{1.9267-0.1937}{3.6745} = 10.96^\circ + 25.25^\circ = \mathbf{36.21}^\circ$$

Lösung (2/2)

LÖSUNG

3 Tragfähigkeitsbeiwerte im Erdbebenfall (tan $\alpha_{AE} = 0.7322$)

$$N_{qE} = \frac{2.7089}{0.6006} = \mathbf{4.51} \qquad N_{\gamma E} = 0.7322(4.51 - 1) = \mathbf{2.57} \qquad N_{cE} = \frac{4.51 - 1}{0.4663} = \mathbf{7.53}$$

	N_q	N_γ	N_c
Statik	9.67	11.92	18.59
Erdbeben ($k_h = 0.25$)	4.51	2.57	7.53
Verhältnis	**0.466**	**0.216**	**0.405**

Das Erdbeben **reduziert am stärksten** den Eigengewichtsterm ($N_{\gamma E}$ beträgt nur 22 % des statischen Werts); N_{qE} und N_{cE} behalten etwa die Hälfte.

Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Aufgabe

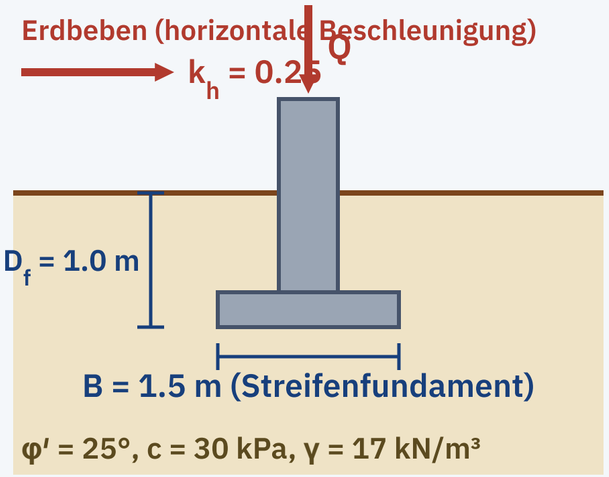
BEISPIEL

Gegeben

Fundament	**Streifen (durchgehend), B = 1.5 m, Fundamentsohle D_f = 1.0 m**
Baugrund	$c = 30\ \mathrm{kPa},\ \varphi' = 25°$
Wichte	$\gamma = 17\ \mathrm{kN/m^3}$**; Grundwasserspiegel nicht in der Bruchzone**
Erdbeben	**k_h = 0.25; k_v = 0**
Sicherheit	**FS = 3**

GESUCHT

q_{uE}, das Verhältnis zum statischen q_u, die Brutto- und Netto-**q_{all}** sowie die zulässige Last **Q_{all}** (pro Längeneinheit).



Lösung

LÖSUNG

1 Grundbruchspannung im Erdbebenfall (q = 17 kPa)

$$q_{uE} = 30(7.53) + 17(4.51) + \tfrac{1}{2}(17)(1.5)(2.57)$$
$$= 225.83 + 76.67 + 32.77 = \mathbf{335.28}\ \mathrm{kPa}$$

2 Zulässige Bodenpressung und Last

$$q_{all,g} = \frac{335.28}{3} = \mathbf{111.76}\ \mathrm{kPa} \qquad q_{all,n} = \frac{335.28 - 17}{3} = 106.09\ \mathrm{kPa}$$

$$Q_{all} = q_{all,g}\, B = 111.76(1.5) = \mathbf{167.6}\ \mathrm{kN/m}$$

Das Erdbeben reduziert die Tragfähigkeit von **874.14 kPa** auf **335.28 kPa**, also auf **38 %** des statischen Werts (das Modul gibt das statische q_u daneben an). Die zulässigen Pressungen werden aus q_{uE} entnommen.

Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Um wie viel reduziert ein Erdbeben sie, wo liegt die Grenze?

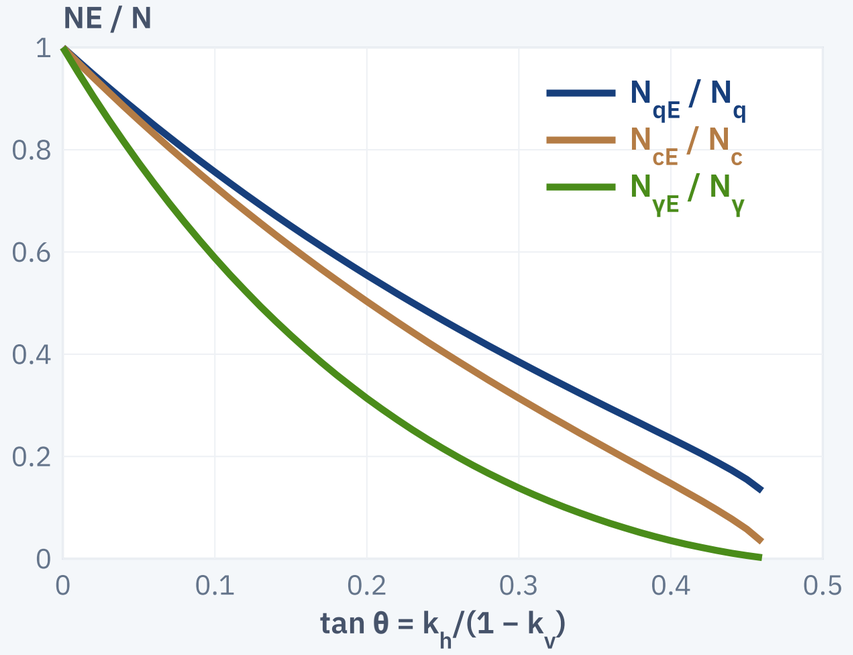
THEORIE

Die Abminderungen gibt die Quelle mit Diagrammen von Richards et al. (1993) an; die Seite zeichnet sie aus den geschlossenen Ausdrücken (seitlich). **Der Eigengewichtsanteil nimmt am stärksten ab**: bei tan θ = 0.2 beträgt $N_{\gamma E}$ etwa ein Drittel des statischen Werts; N_{qE} und N_{cE} bleiben etwa zur Hälfte erhalten.

Für θ → φ gilt α = φ − θ → 0: der aktive Keil wird flacher und alle drei Beiwerte gehen gegen null; der Reibungsboden hat keine Widerstandsreserve gegen horizontale Beschleunigung mehr.

Die Theorie gilt nur, solange $\mathbf{k_h/(1 - k_v) < \tan \varphi}$ ist; das Modul **bricht ab**, sobald θ ≥ φ wird. Dieses Verhältnis ist zugleich das Verhältnis, bei dem die Theorie den Beginn seismischer Setzungen vorhersagt.

Wenn sich θ dem Wert φ′ nähert (θ > 0.85φ), warnt das Modul: Dies ist keine Bemessungstragfähigkeit, sondern die Grenze des Verfahrens.



Aus den geschlossenen Ausdrücken für φ′ = 25°, δ = φ/2 gezeichnet.

Aufgabe

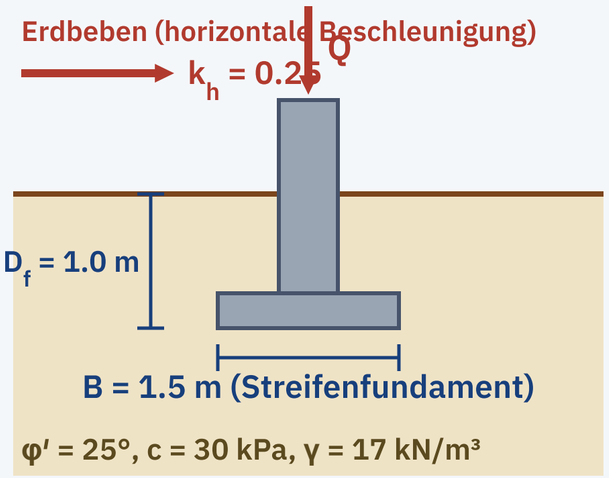
BEISPIEL

Gegeben

Fundament	**Streifen (durchgehend), B = 1.5 m, Fundamentsohle D_f = 1.0 m**
Baugrund	$c = 30\ \mathrm{kPa},\ \varphi' = 25°$
Wichte	$\gamma = 17\ \mathrm{kN/m^3}$**; Grundwasserspiegel nicht in der Bruchzone**
Erdbeben	**k_v = 0; k_h = 0, 0.05, … 0.45**

GESUCHT

Für jedes k_h sind **θ, N_{qE}, $N_{\gamma E}$, N_{cE}, q_{uE}** und q_{uE}/q_u zu ermitteln; die Grenze von k_h, bei der das Modul abbricht, ist zu berechnen.



Lösung (1/2)

LÖSUNG

k_h	θ (°)	N_{qE}	$N_{\gamma E}$	N_{cE}	q_{uE} (kPa)	q_{uE}/q_u
0.00	0.0	9.67	11.92	18.59	**874**	%100
0.05	2.9	8.44	9.23	15.94	**739**	%85
0.10	5.7	7.31	7.01	13.54	**620**	%71
0.15	8.5	6.29	5.20	11.35	**514**	%59
0.20	11.3	5.36	3.74	9.36	**420**	%48
0.25	14.0	4.51	2.57	7.53	**335**	%38
0.30	16.7	3.72	1.65	5.84	**260**	%30
0.35	19.3	2.99	0.94	4.26	**191**	%22
0.40	21.8	2.28	0.42	2.74	**126**	%14
0.45	24.2	1.50	0.07	1.07	**59**	%7

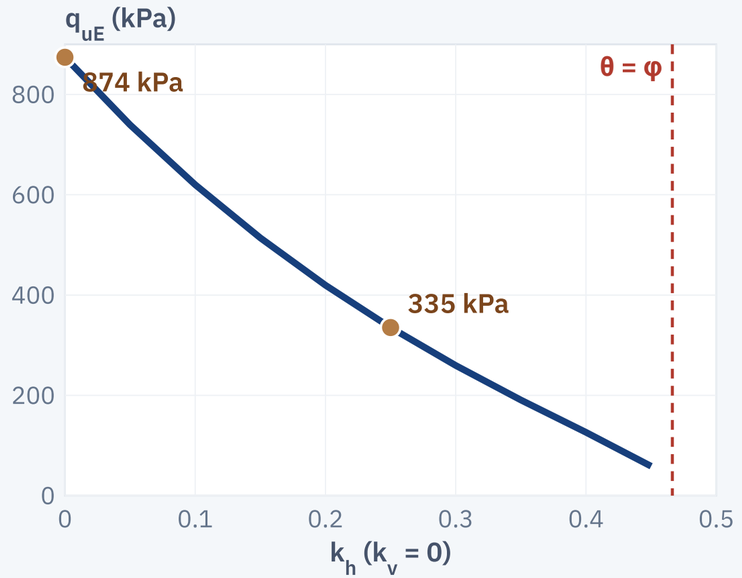
Lösung (2/2)

LÖSUNG

1 Gültigkeitsgrenze: θ < φ

$$\frac{k_h}{1-k_v} < \tan\varphi \;\Rightarrow\; k_{h,\max} = (1-k_v)\tan 25^\circ = \mathbf{0.4663}$$

Bei k_h = 0.25 beträgt q_{uE} 38% des statischen Werts; **bei k_h = 0.45 nur 7%**. Wird k_h = 0.47 eingegeben, stoppt das Modul (θ ≥ φ). Die Kurve fällt anfangs steil ab: **auch kleine Beschleunigungen** verursachen einen großen Verlust (k_h = 0.05 → 85%).



Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Aufgabe

BEISPIEL

Gegeben

Fundament	**Streifen (durchgehend), B = 1.5 m, Fundamentsohle D_f = 1.0 m**
Baugrund	$c = 30\ \mathrm{kPa},\ \varphi' = 25^\circ$
Wichte	$\gamma = 17\ \mathrm{kN/m^3}$**; Grundwasserspiegel nicht in der Bruchzone**
Erdbeben	k_h **= 0.25;** k_v **= 0, 0.1, 0.2, 0.3**

GESUCHT

Für jedes k_v sind die Werte von **θ** und q_{uE} zu ermitteln.

Lösung

LÖSUNG

1 $\theta = \tan^{-1}[k_h/(1 - k_v)]$; Beispiel $k_v = 0.2$

$$\theta = \tan^{-1}\frac{0.25}{1-0.2} = \tan^{-1}(0.3125) = \mathbf{17.35}^\circ$$

k_v	θ (°)	N_{qE}	$N_{\gamma E}$	N_{cE}	q_{uE} (kPa)	q_{uE}/q_u
0.0	14.04	4.51	2.57	7.53	**335**	%38
0.1	15.52	4.07	2.03	6.57	**292**	%33
0.2	17.35	3.54	1.45	5.44	**242**	%28
0.3	19.65	2.88	0.86	4.04	**181**	%21

Mit zunehmendem k_v nimmt $(1 - k_v)$ ab, θ zu und q_{uE} ab: $k_v = 0.2$ verringert q_{uE} von 335 auf 242 kPa (28 %). Die Vernachlässigung der vertikalen Beschleunigung bleibt **auf der unsicheren Seite**.

Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Zulässige Bodenpressung aus der Grundbruchspannung im Erdbebenfall

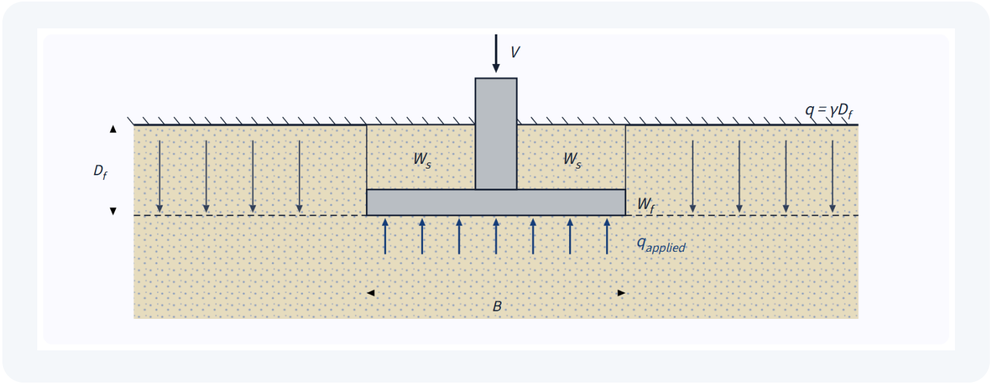
THEORIE

Das Modul entnimmt die zulässigen Bodenpressungen der **Grundbruchspannung im Erdbebenfall q_{uE}**; es trennt Brutto- und Netto-Grundbruchspannung und gibt die statische q_u daneben an:

$$q_{u,net} = q_{uE} - q \qquad q_{all,g} = \frac{q_{uE}}{FS} \qquad q_{all,n} = \frac{q_{u,net}}{FS}$$

Der angesetzte Druck q_{ang} ist der **vertikale Bruttodruck an der Fundamentsohle** im Lastfall Erdbeben (V/B; Stützenlast + Fundament + Bodengewicht). Das Fundament ist zulässig, wenn:

$$q_{apply} \le q_{all,g} \quad (FS_{\text{tatsächlich}} = q_{uE}/q_{apply}) \qquad q_{apply} - q \le q_{all,n}$$



Zulässige Last je Längeneinheit $Q_{all} = q_{all,g}\,B$. Die horizontale Erdbebenträgheit ist mit k_h bereits berücksichtigt; eine unabhängige Horizontalkraft, ein Moment oder eine Ausmitte liegen **außerhalb des Anwendungsbereichs** dieser Berechnung.

Aufgabe

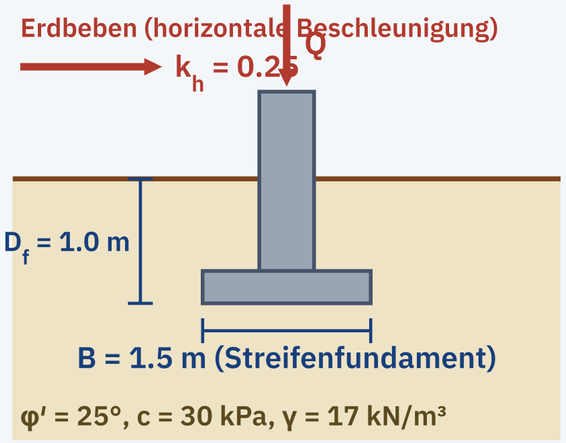
BEISPIEL

Gegeben

Ergebnis (Beispiel 5)	**q_{uE} = 335.28 kPa; q = 17 kPa; FS = 3**
Aufgebrachter Druck	**im Erdbeben-Lastfall (a) q_{app} = 100 kPa · (b) q_{app} = 150 kPa**

GESUCHT

In jedem Fall sind die drei Bedingungen (brutto, $FS_{tatsächlich}$, netto) zu prüfen.



Lösung

LÖSUNG

1 (a) q_{appl} = 100 kPa

$$100 \leq q_{all,g} = 111.76 \;\Rightarrow\; \textbf{gültig} \qquad FS_{\text{tatsächlich}} = \frac{335.28}{100} = \mathbf{3.35} \geq 3$$

$$100 - 17 = 83 \leq q_{all,n} = 106.09 \;\Rightarrow\; \textbf{gültig}$$

2 (b) q_{appl} = 150 kPa

$$150 > q_{all,g} = 111.76 \;\Rightarrow\; \textbf{nicht erfüllt} \qquad FS_{\text{tatsächlich}} = \frac{335.28}{150} = \mathbf{2.24} < 3$$

$$150 - 17 = 133 > q_{all,n} = 106.09 \;\Rightarrow\; \textbf{nicht erfüllt}$$

Unter Erdbebenlast ist nur ein Fundament mit **q_{app} ≤ 111.8 kPa** zulässig. Dasselbe Fundament würde unter statischen Bedingungen bis zu 291 kPa tragen ($q_{all,g}$ = 291.4).

Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Aufgabe

BEISPIEL

Gegeben

Fundament	**Streifen (durchgehend), B = 1.5 m, Fundamentsohle D_f = 1.0 m**
Baugrund	$c = 30\ \mathrm{kPa},\ \varphi' = 25°$
Wichte	$\gamma = 17\ \mathrm{kN/m^3}$**; Grundwasserspiegel nicht in der Bruchzone**
Erdbeben	**k_h = 0.25; k_v = 0**
Vergleich	**c = 30 kPa und c = 0**

GESUCHT

Die statische Grundbruchspannung und die Grundbruchspannung im Erdbebenfall sind für c = 30 und c = 0 zu ermitteln; der Anteil der Kohäsionsterme ist zu interpretieren.

Lösung

LÖSUNG

	$c\,N_c$	$q\,N_q$	$\frac{1}{2}\gamma B\,N_\gamma$	gesamt
statisch, c = 30	557.8	164.4	152.0	**874.1**
Erdbeben, c = 30	225.8	76.7	32.8	**335.3**
statisch, c = 0	0	164.4	152.0	**316.4**
Erdbeben, c = 0	0	76.7	32.8	**109.4**

Im Erdbebenfall beträgt der Kohäsionsterm **67** % von q_{uE}; die Annahme $N_{cE} = (N_{qE} - 1)\cot\varphi$ hat deutliche Auswirkungen auf das Ergebnis. Als konservative Sensitivitätsbetrachtung ergibt sich für c = 0 q_{uE} = **109.4 kPa** (335.3 kPa bei c = 30).

Lösung in GeoTerva prüfen ↗

Zusammenfassung

Die wichtigsten Punkte

Zwei Coulomb-Keile (aktiv ABC, passiv BCD), dazwischen Wandreibung $\delta = \varphi/2$; $H = B \tan \alpha_A$; jeder Beiwert in geschlossener Form

Statik: $N_q = K_P/K_A$, $N_\gamma = \tan \alpha_A (K_P/K_A - 1)$, $N_c = (N_q - 1) \cot \varphi$; $q_u = cN_c + qN_q + \tfrac{1}{2}\gamma B N_\gamma$ (Beispiel: 874.14 kPa)

Erdbeben: $\theta = \tan^{-1}[k_h/(1 - k_v)]$, $\alpha = \varphi - \theta$; K_{AE}, K_{PE} nach Mononobe–Okabe; N_{qE}, $N_{\gamma E}$, N_{cE} in derselben Form; q_{uE} = 335.28 kPa (38 % des statischen Werts)

Der Eigengewichtsterm nimmt am stärksten ab ($N_{\gamma E}/N_\gamma = 0.22$); N_{qE} und N_{cE} behalten etwa die Hälfte

Grenze: $k_h/(1 - k_v) < \tan \varphi$; sobald $\theta \geq \varphi$ gilt, stoppt das Modul, bei $\theta > 0.85\varphi$ erscheint eine Warnung; wird k_v vernachlässigt, bleibt das Ergebnis auf der unsicheren Seite

Nachweis: zulässige Bodenpressung aus q_{uE}; $q_{vorh} \leq q_{zul,g}$, FS_{tats} und netto; $Q_{zul} = q_{zul,g}\, B$

Literatur

Richards, R., Elms, D.G. and Budhu, M. (1993). Seismic bearing capacity and settlements of foundations. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 119(4), 662–674.

Das, B.M. (2017). Shallow Foundations: Bearing Capacity and Settlement, 3rd ed. CRC Press – Abschnitt 6.3.1; diese Seite folgt der Reihenfolge der dortigen Herleitung.

Mononobe, N. and Matsuo, H. (1929). On the determination of earth pressures during earthquakes. Proc. 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).

Die Abbildungen sind maßstäblich aus den Gleichungen dieser Seite gezeichnet.

HINWEIS

Ein Teil der Abbildungen ist der Theorieseite von GeoTerva entnommen; alle Rechenbeispiele wurden mit der moduleigenen Berechnungsbibliothek erzeugt, das Modul liefert dieselben Werte.

GeoTerva

Geotechnische Berechnungen online

Von der Theorie zur Praxis

Berechnen Sie das Beispielfundament aus dieser Vorlesung Schritt für Schritt in GeoTerva: Das Modul öffnet sich mit diesem Modell.

Modul öffnen →

Theorieseite →

Auf dem Smartphone öffnen

Die Beispielmodule erfordern keine Registrierung.

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