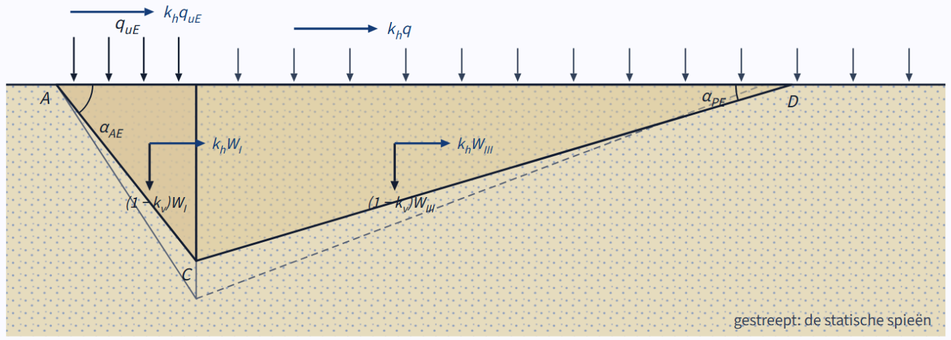
GeoTerva

Geotechnische hoorcollegepresentatie · Funderingen

Draagvermogen van een strookfundering tijdens een aardbeving

College: van de twee Coulombutwiges van Richards, Elms en Budhu naar de statische draagvermogensfactoren, naar de Mononobe–Okabecoëfficiënten bij aardbevingen en naar hoeveel de aardbeving deze reduceert; bij elk onderwerp een rekenvoorbeeld.

- Twee Coulomb-wiggen
- $K_A \cdot K_P \cdot \alpha_A$
- Mononobe–Okabe
- $\theta = \tan^{-1} k_h/(1-k_v)$
- Effect van de aardbeving
- Rekenvoorbeelden



Wat leren we in dit college?

- Het draagvermogensmechanisme van een strookfundering **met twee Coulomb-wiggen** (actief ABC, passief BCD) opzetten
- **K_A, K_P, α_A, α_P**-waarden en daaruit de coëfficiënten **N_q, N_γ, N_c** met gesloten formules te bepalen
- De aardbeving als **pseudostatische** kracht behandelen: $\theta = \tan^{-1}[k_h/(1 - k_v)]$ en de **Mononobe–Okabe**-coëfficiënten K_{AE}, K_{PE}
- Het berekenen van het **seismisch draagvermogen q_{uE}** en de verhouding ervan tot de statische waarde
- Hoe de gevoeligheid van k_h en k_v en de **grens $\theta \geq \varphi$** te interpreteren
- Om de toelaatbare druk uit q_{uE} te nemen en de fundering te **toetsen**

COLLEGESTRUCTUUR

Elk onderwerp wordt in **drie stappen** behandeld:

1 · **Theorie**: wat is de regel, waarom is dat zo?

2 · **Opgave**: gegeven en gevraagd

3 · **Oplossing**: stap voor stap, met getallen

Voorbeeldfundering, het model dat in de module wordt geopend: een strookfundering van 1.5 m breed, D_f = 1 m, c = 30 kPa, φ' = 25°, γ = 17 kN/m³, k_h = 0.25.

Twee Coulomb-wiggen in plaats van een logaritmische spiraal

THEORIE

Richards, Elms en Budhu (1993) stelden een theorie voor een doorlopende fundering voor die **ook op aardbevingsbelasting kan worden toegepast**. In plaats van de logaritmische spiraal van Terzaghi of Meyerhof gebruikt zij een eenvoudig bezwijkvlak dat uit **twee Coulomb-wiggen** bestaat; daarom wordt elke coëfficiënt **in gesloten vorm** verkregen.

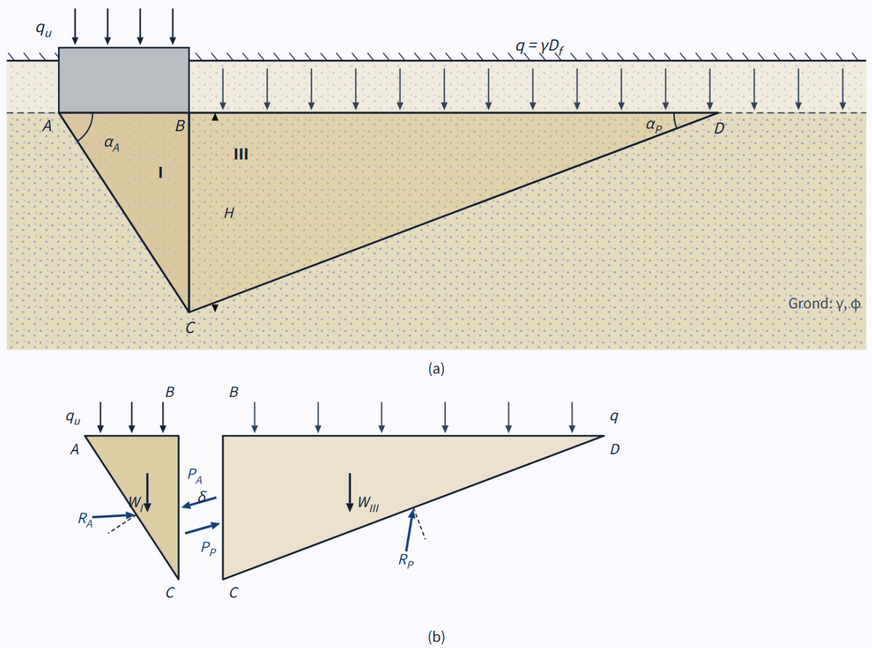
Strookfundering, breedte B, diepte D_f; de grond boven de zool werkt alleen als bovenbelasting $q = \gamma D_f$.

c–φ-grond, $\varphi > 0$; geen grondwater in de bezwijkzone.

Aardbeving als **pseudostatische massakracht**: de horizontale en verticale coëfficiënten k_h, k_v werken op de wiggen en de belastingen.

Wandwrijving δ = φ/2 op het verticale grensvlak tussen de twee wiggen (de aanbeveling van de auteurs).

De **actieve** wig (ABC) onder de fundering en de **passieve** wig (BCD) ernaast; beide ontmoeten elkaar op het vlak BC (hoogte H).



Wighoeken en coëfficiënten van Coulomb

THEORIE

De wighellingen αA en αP zijn de hoeken van de **kritieke wiggren van Coulomb** (gemeten vanaf de horizontaal):

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

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

De horizontale componenten van de Coulomb-krachten worden met de volgende coëfficiënten geschreven:

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

NOTATIES

δ = φ/2: wandwrijving tussen de wiggen

α_A: hoek van het hellende vlak AC met de horizontaal

α_P: hoek van het hellende vlak CD met de horizontaal

P_A, P_P: Coulomb-krachten op het vlak BC

R_A, R_P: resultanten op de hellende vlakken

W_I, W_{III}: gewichten van de wiggen

Opgave

VOORBEELD

Gegeven

Grond	$\varphi' = 25°$ **(het model waarmee de module opent)**
Wandwrijving	$\delta = \varphi/2 = 12.5°$

GEVRAAGD

Bepaal de coëfficiënten **K_A, K_P** en de wigwaarden **α_A, α_P**.

Oplossing (1/2)

OPLOSSING

1 Gemeenschappelijke wortelterm (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 en K_P ($\cos^2 25° = 0.8214$)

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

Oplossing (2/2)

OPLOSSING

3 Wortelterm (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 Wighoeken

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

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

De actieve wig is steil (α_A = 53.97°), de passieve wig is vlak (α_P = 23.85°). Wighoogte H = B tan α_A = 1.5 × 1.375 = **2.06 m**.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Horizontaal evenwicht op het vlak BC

THEORIE

Beschouw alleen de bovenbelasting (φ ≠ 0, γ = 0, q ≠ 0); de funderingsdruk zij q'_u. Op het vlak BC zijn de horizontale krachten in evenwicht:

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

Bij een gelijkmatig verdeelde bovenbelasting is elke kracht drukcoëfficiënt × bovenbelasting × H: q'_u aan de actieve zijde, q aan de passieve zijde:

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

Wanneer beide aan elkaar gelijk worden gesteld, valt H weg en wordt **N_q** de verhouding van de twee Coulomb-coëfficiënten:

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

NEDEN ORAN?

De actieve wig onder de fundering duwt de aangrenzende passieve wig zijwaarts. Beide zijden steunen op elkaar op dezelfde hoogte H en met dezelfde δ; daarom bepaalt alleen de **verhouding** van de twee grondweerstanden het evenwicht.

Het gewicht van de wiggen komt binnen via H = B tan α_A

THEORIE

Beschouw nu alleen het gewicht (φ ≠ 0, γ ≠ 0, q = 0); de funderingsdruk is q''_u. Aan de actieve zijde komt het gewicht er als een bovenbelasting bovenop, aan de passieve zijde werkt alleen het gewicht:

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

Bij gelijkstelling:

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

De hoogte van het front volgt uit de actieve wig, H = B tan α_A; zo wordt **N_γ** verkregen:

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

OPMERKING

N_γ is afhankelijk van de diepte van de wig: de factor **tan α_A** geeft aan hoe steil de wig is. Een steile wig (grote α_A) reikt dieper en de term voor het eigen gewicht neemt toe.

Superpositie en N_c

THEORIE

De termen voor bovenbelasting en gewicht worden gesommeerd (superpositie):

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

Voor cohesie bij φ = 0 geeft de Coulomb-wiganalyse $N_c = 6$; voor de beknoptheid gebruiken de auteurs de bekende relatie:

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

Deze **statische** waarde is het draagvermogen van deze twee wiggen; zij is **verschillend** van de Prandtl-type factoren van Terzaghi, Meyerhof, Hansen of Vesic (φ = 25°: N_q = 9.67; Prandtl–Reissner 10.66).

Het seismisch draagvermogen wordt gevonden door deze waarde te **reduceren**; de module toont beide naast elkaar.

STATISCHE COËFFICIËNTEN (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

Opgave

VOORBEELD

Gegeven

Fundering	**strook (continu), B = 1.5 m, aanlegdiepte D_f = 1.0 m**
Grond	$c = 30\ \mathrm{kPa},\ \varphi' = 25^\circ$
Volumiek gewicht	$\gamma = 17\ \mathrm{kN/m^3}$**; grondwaterstand niet in de breukzone**
Vorig voorbeeld	$K_A = 0.3674,\ K_P = 3.5524,\ \alpha_A = 53.97^\circ$

GEVRAAGD

Bepaal de waarden van **N_q, N_γ, N_c** en het statische **q_u**.

Oplossing

OPLOSSING

1 Draagvermogensfactoren (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 Statisch draagvermogen (q = γ D_f = 17 kPa)

$$q_u = 30(18.59) + 17(9.67) + \tfrac{1}{2}(17)(1.5)(11.92)$$
$$= 557.8 + 164.4 + 152.0 = \mathbf{874.14}\ \mathrm{kPa}$$

Statisch draagvermogen **874.14 kPa**; cohesieterm 64%, bovenbelasting 19%, eigen gewicht 17%. De aardbeving zal deze waarde verlagen (volgende paragraaf).

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Hoek θ en Mononobe–Okabe-coëfficiënten

THEORIE

Onder een aardbeving worden dezelfde twee wiggen **met pseudostatische traagheidskrachten** doorgerekend. De resultante van het gewicht en de traagheidskracht helt over θ ten opzichte van de verticaal; de wiggen worden berekend met α = φ − θ in plaats van φ:

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

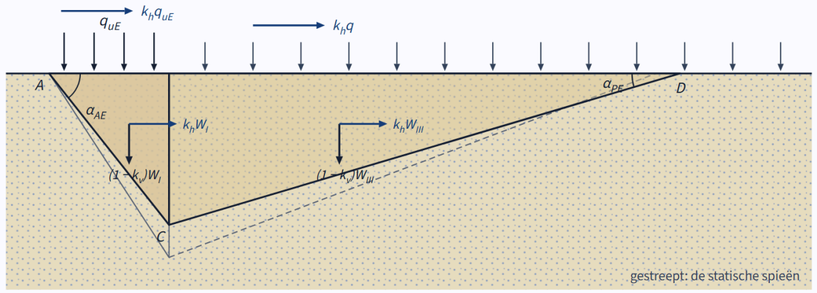
De Coulomb-coëfficiënten worden **Mononobe–Okabe**-coëfficiënten:

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

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

Bij θ = 0 reduceert elke aardbevingsuitdrukking tot haar statische vorm: $K_{AE} = K_A$, $K_{PE} = K_P$.

Naarmate de horizontale versnelling toeneemt, neemt α af: de wiggen worden vlakker, het mechanisme wordt ondieper.



Opgave

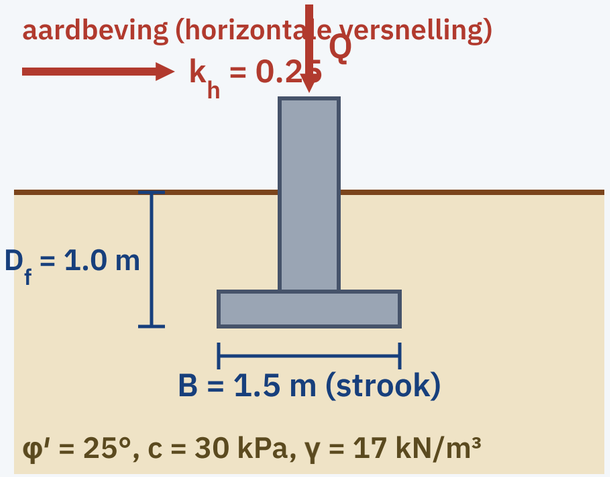
VOORBEELD

Gegeven

Fundering	**strook (continu), B = 1.5 m, aanlegdiepte D_f = 1.0 m**
Grond	$c = 30\ \mathrm{kPa},\ \varphi' = 25^\circ$
Volumiek gewicht	$\gamma = 17\ \mathrm{kN/m^3}$; **grondwaterstand niet in de breukzone**
Aardbeving	**k_h = 0.25; k_v = 0**
Wandwrijving	$\delta = 12.5^\circ$

GEVRAAGD

Bepaal **θ**, α = φ − θ en de waarden van **K_{AE}, K_{PE}**.



Oplossing

OPLOSSING

1 De hellingshoek en de wortelterm (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} en K_{PE} ($\cos^2\alpha = 0.9638$; $\cos\theta = 0.9701$)

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

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

De aardbeving **vergroot** K_A van 0.367 → 0.601 en **verkleint** K_P van 3.552 → 2.709.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Wighoeken, coëfficiënten en q_{uE}

THEORIE

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

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

Omdat het evenwicht hetzelfde is, behouden de coëfficiënten dezelfde vorm:

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

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

OPMERKING

Voor N_{cE} wordt de statische relatie **overgedragen** op de aardbevingssituatie (de auteurs schrijven de theorie voor granulair grond). Bij c > 0 meldt de module dit als een uitgangspunt en geeft de gevoeligheid voor c = 0.

Opgave

VOORBEELD

Gegeven

Fundering	**strook (continu), B = 1.5 m, aanlegdiepte D_f = 1.0 m**
Grond	$c = 30\ \mathrm{kPa},\ \varphi' = 25^\circ$
Volumiek gewicht	$\gamma = 17\ \mathrm{kN/m^3}$**; grondwaterstand niet in de breukzone**
Aardbeving	**k_h = 0.25; k_v = 0**
Vorig voorbeeld	$\theta = 14.04^\circ,\ K_{AE} = 0.6006,\ K_{PE} = 2.7089$

GEVRAAGD

Bepaal **α_{AE}, N_{qE}, $N_{\gamma E}$, N_{cE}** en hun verhoudingen tot de statische coëfficiënten.

Oplossing (1/2)

OPLOSSING

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 Aardbevingswighoek (statische α_A = 53.97°)

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

Oplossing (2/2)

OPLOSSING

3 Coëfficiënten voor seismisch draagvermogen (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
statisch	9.67	11.92	18.59
aardbeving ($k_h = 0.25$)	4.51	2.57	7.53
verhouding	**0.466**	**0.216**	**0.405**

De aardbeving **verkleint vooral** de term voor het eigen gewicht ($N_{\gamma E}$ is slechts 22% van de statische waarde); N_{qE} en N_{cE} behouden ongeveer de helft.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Opgave

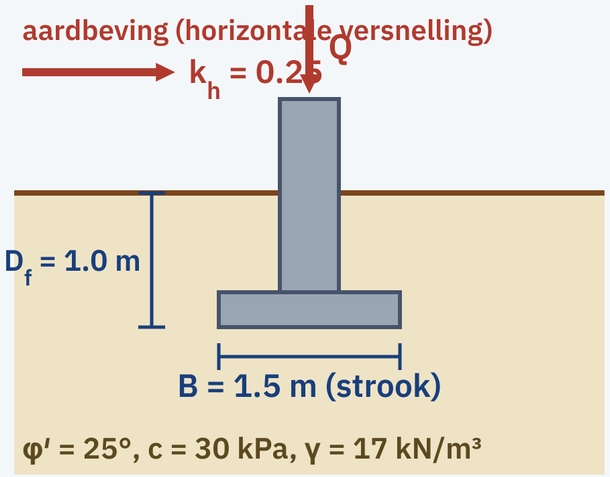
VOORBEELD

Gegeven

Fundering	**strook (continu), B = 1.5 m, aanlegdiepte D_f = 1.0 m**
Grond	$c = 30\ \mathrm{kPa},\ \varphi' = 25^\circ$
Volumiek gewicht	$\gamma = 17\ \mathrm{kN/m^3}$**; grondwaterstand niet in de breukzone**
Aardbeving	**k_h = 0.25; k_v = 0**
Veiligheid	**FS = 3**

GEVRAAGD

q_{uE}, de verhouding ervan tot de statische q_u, bruto en netto **q_{all}** en de toelaatbare belasting **Q_{all}** (per eenheid van lengte).



Oplossing

OPLOSSING

1 Seismisch draagvermogen (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 Toelaatbare gronddruk en belasting

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

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

De aardbeving verlaagt het draagvermogen van **874.14 kPa** naar **335.28 kPa**, dat wil zeggen tot **38%** van de statische waarde (de module geeft de statische q_u ernaast). De toelaatbare drukken worden ontleend aan q_{uE}.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Hoeveel reduceert een aardbeving het draagvermogen, en waar ligt de grens?

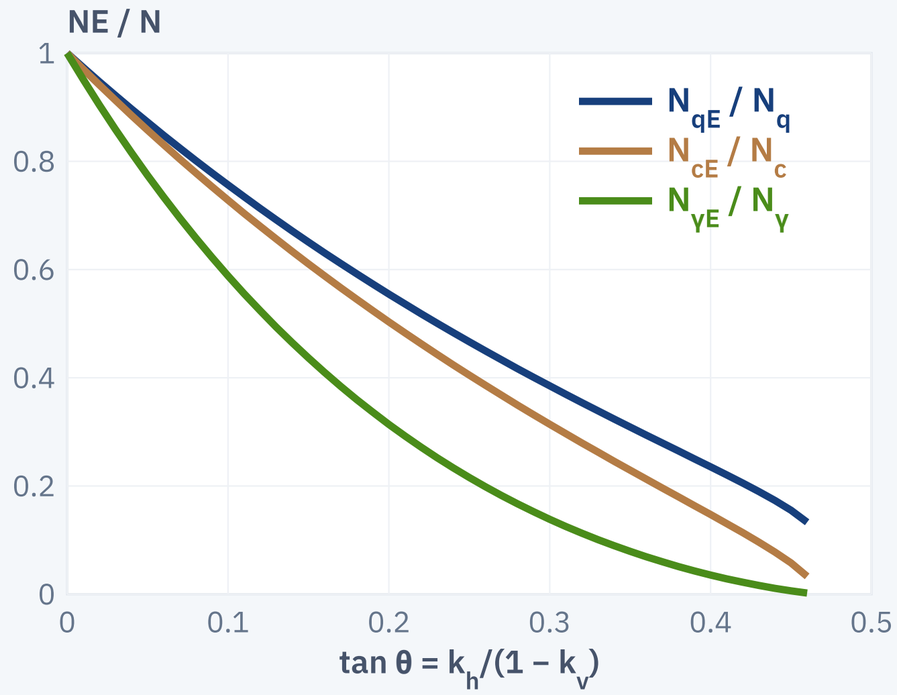
THEORIE

De bron geeft de reducties met de grafieken van Richards et al. (1993); de pagina tekent ze uit de gesloten uitdrukkingen (ernaast). **De eigengewichtsterm neemt het meest af**: bij tan θ = 0.2 is $N_{\gamma E}$ ongeveer een derde van de statische waarde; N_{qE} en N_{cE} blijven ongeveer de helft.

Als θ → φ, dan α = φ − θ → 0: de actieve wig wordt vlakker en alle drie de coëfficiënten naderen nul; de frictiegrond heeft geen weerstandsreserve meer tegen horizontale versnelling.

De theorie is alleen geldig wanneer **$k_h/(1 - k_v) < \tan \varphi$**; de module **stopt** zodra θ ≥ φ. Deze verhouding is tevens de verhouding waarbij de theorie voorspelt dat seismische zetting begint.

Wanneer θ φ′ nadert (θ > 0.85φ), waarschuwt de module: dit is geen ontwerpcapaciteit maar de grens van de methode.



Getekend met de gesloten uitdrukkingen voor φ′ = 25°, δ = φ/2.

Opgave

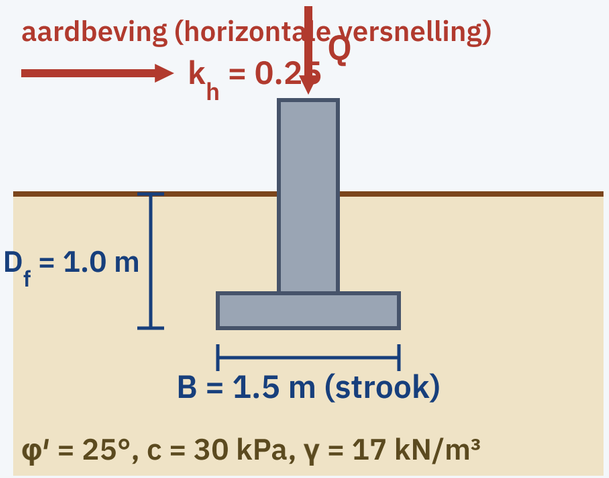
VOORBEELD

Gegeven

Fundering	**strook (continu), B = 1.5 m, aanlegdiepte D_f = 1.0 m**
Grond	$c = 30\ \mathrm{kPa},\ \varphi' = 25°$
Volumiek gewicht	$\gamma = 17\ \mathrm{kN/m^3}$**; grondwaterstand niet in de breukzone**
Aardbeving	**k_v = 0; k_h = 0, 0.05, … 0.45**

GEVRAAGD

Bepaal voor elke k_h de waarden **θ, N_{qE}, $N_{\gamma E}$, N_{cE}, q_{uE}** en q_{uE}/q_u; bereken de grens van k_h waarbij de module stopt.



Oplossing (1/2)

OPLOSSING

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

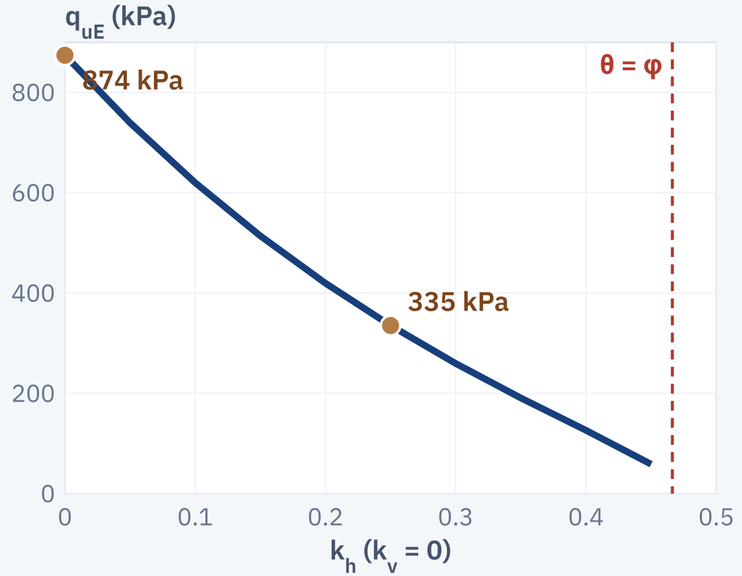
Oplossing (2/2)

OPLOSSING

1 Geldigheidsgrens: θ < φ

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

Bij k_h = 0.25 bedraagt q_{uE} 38% van de statische waarde; **bij k_h = 0.45 slechts 7%**. Als k_h = 0.47 wordt ingevoerd, stopt de module (θ ≥ φ). De curve daalt aan het begin steil: **ook kleine versnellingen** veroorzaken een groot verlies (k_h = 0.05 → 85%).



Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Opgave

VOORBEELD

Gegeven

Fundering	**strook (continu), B = 1.5 m, aanlegdiepte D_f = 1.0 m**
Grond	$c = 30\ \mathrm{kPa},\ \varphi' = 25^\circ$
Volumiek gewicht	$\gamma = 17\ \mathrm{kN/m^3}$**; grondwaterstand niet in de breukzone**
Aardbeving	**k_h = 0.25; k_v = 0, 0.1, 0.2, 0.3**

GEVRAAGD

Bepaal voor elke k_v de waarden van **θ** en **q_{uE}**.

Oplossing

OPLOSSING

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

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

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

Naarmate k_v toeneemt, wordt $(1 - k_v)$ kleiner, neemt θ toe en neemt q_{uE} af: $k_v = 0.2$ verlaagt q_{uE} van 335 naar 242 kPa (28 %). Het verwaarlozen van de verticale versnelling blijft **aan de onveilige kant**.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Toelaatbare druk uit seismisch draagvermogen

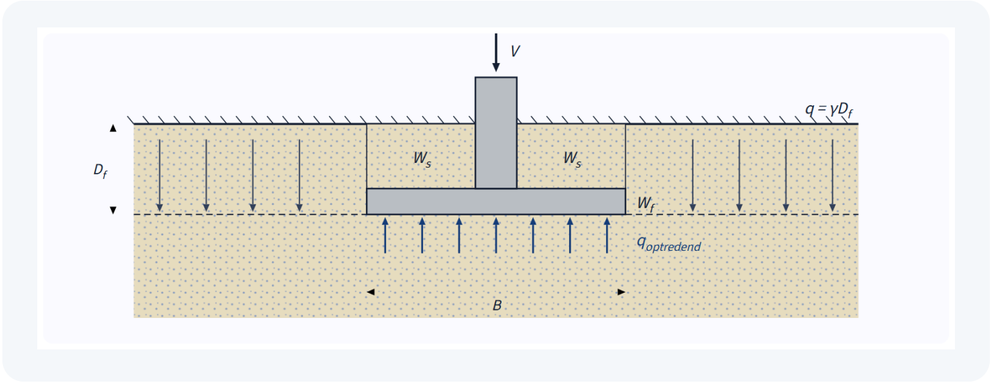
THEORIE

De module neemt de toelaatbare drukken over uit het **seismisch draagvermogen q_{uE}**; zij houdt bruto en netto druk afzonderlijk en geeft de statische q_u ernaast:

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

De aangebrachte druk q_{app} is de **verticale bruto druk aan de basis** in de aardbevingsbelastingsituatie (V/B; kolomlast + fundering + grondgewicht). De fundering voldoet wanneer:

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



Toelaatbare belasting per lengte-eenheid $Q_{all} = q_{all,g}$ B. De horizontale traagheid door de aardbeving zit al in k_h; een afzonderlijke horizontale kracht, moment of excentriciteit valt **buiten het bereik** van deze berekening.

Opgave

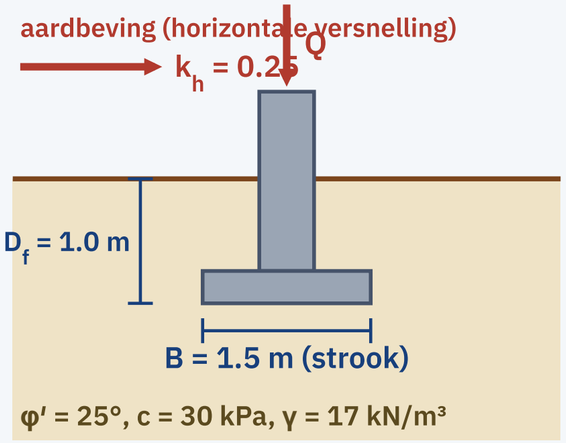
VOORBEELD

GEVRAAGD

Controleer in elk geval de drie voorwaarden (bruto, $FS_{werkelijk}$, netto).

Gegeven

Resultaat (Voorbeeld 5)	**q_{uE} = 335.28 kPa; q = 17 kPa; FS = 3**
Aangebrachte druk	**in het belastingsgeval aardbeving (a) q_{app} = 100 kPa · (b) q_{app} = 150 kPa**



Oplossing

OPLOSSING

1 (a) $q_{opgelegd}$ = 100 kPa

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

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

2 (b) $q_{opgelegd}$ = 150 kPa

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

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

Onder aardbevingsbelasting voldoet alleen een fundering met **q_{aanw} ≤ 111.8 kPa**. Dezelfde fundering zou onder statische omstandigheden tot 291 kPa dragen ($q_{all,g}$ = 291.4).

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Opgave

VOORBEELD

Gegeven

Fundering	**strook (continu), B = 1.5 m, aanlegdiepte D_f = 1.0 m**
Grond	$c = 30\ \mathrm{kPa},\ \varphi' = 25^\circ$
Volumiek gewicht	$\gamma = 17\ \mathrm{kN/m^3}$**; grondwaterstand niet in de breukzone**
Aardbeving	**k_h = 0.25; k_v = 0**
Vergelijking	**c = 30 kPa en c = 0**

GEVRAAGD

Bepaal het statische en seismische draagvermogen voor c = 30 en c = 0; interpreteer het aandeel van de cohesietermen.

Oplossing

OPLOSSING

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

De cohesieterm bedraagt in de aardbevingssituatie **67 %** van q_{uE}; de aanname $N_{cE} = (N_{qE} - 1)\cot\varphi$ heeft een duidelijke invloed op het resultaat. Als conservatieve gevoeligheidsanalyse geldt voor c = 0 q_{uE} = **109.4 kPa** (335.3 kPa bij c = 30).

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Samenvatting

Belangrijkste punten

Twee Coulomb-wiggen (actief ABC, passief BCD), met wandwrijving $\delta = \varphi/2$ daartussen; $H = B \tan \alpha_A$; elke coëfficiënt in gesloten vorm

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

Aardbeving: $\theta = \tan^{-1}[k_h/(1 - k_v)]$, $\alpha = \varphi - \theta$; K_{AE}, K_{PE} volgens Mononobe–Okabe; N_{qE}, $N_{\gamma E}$, N_{cE} in dezelfde vorm; q_{uE} = 335.28 kPa (38% van de statische waarde)

De term voor eigen gewicht neemt het meest af ($N_{\gamma E}/N_\gamma = 0.22$); N_{qE} en N_{cE} behouden ongeveer de helft

Grens: $k_h/(1 - k_v) < \tan \varphi$; zodra $\theta \geq \varphi$ stopt de module, bij $\theta > 0.85\varphi$ volgt een waarschuwing; als k_v wordt verwaarloosd, blijft het resultaat aan de onveilige kant

Toets: toelaatbare druk uit q_{uE}; $q_{appl} \leq q_{all,g}$, $FS_{werkelijk}$ en netto; $Q_{all} = q_{all,g}\, B$

Literatuur

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, 3e druk. CRC Press — Paragraaf 6.3.1; deze pagina volgt de volgorde van de afleiding.

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

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

De figuren zijn op schaal getekend op basis van de vergelijkingen op deze pagina.

OPMERKING

Een deel van de figuren is overgenomen van de Theoriepagina van GeoTerva; alle rekenvoorbeelden zijn gegenereerd met de eigen berekeningsbibliotheek van de module, en de module geeft dezelfde waarden.

GeoTerva

Online geotechnische berekeningen

Van theorie naar praktijk

Bereken de voorbeeldfundering uit dit college stap voor stap in GeoTerva: de module opent met dit model.

Module openen →

Theoriepagina →

Openen op de smartphone

Proefmodules vereisen geen registratie.

Wilt u ze in uw colleges gebruiken: info@geoterva.com