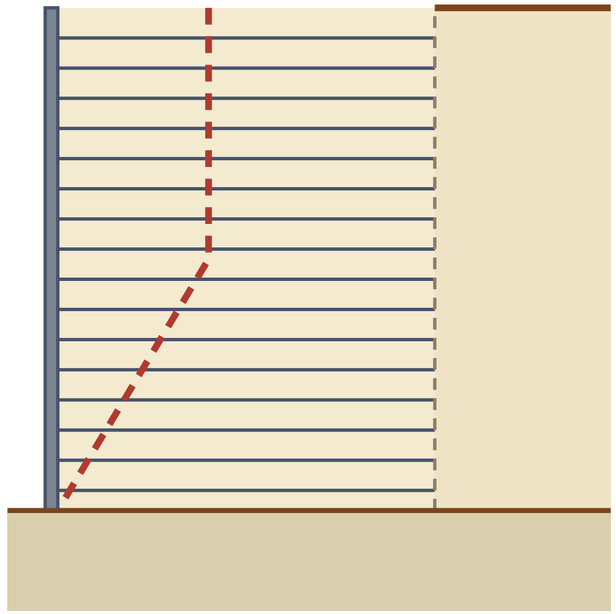
GeoTerva

Geotechnisch college · Keermuren

Gewapende grondconstructie (MSE-keermuur)

College: inwendige stabiliteit (wapeningsbreuk, uittrekken), uitwendige stabiliteit (kantelen, glijden, draagvermogen) en aardbevingscontrole van een gewapende grondconstructie; bij elk onderwerp een rekenvoorbeeld.



Gewapende grond

Breuk · uittrekken

Kantelen · glijden · draagvermogen

Aardbeving

Wat leren we in dit college?

De werking van gewapende grond: de gronddruk veroorzaakt trek in de wapening en de wrijving tussen beide houdt het geheel bijeen; de bekleding keert de grond alleen.

Interne stabiliteit: trek op elk niveau $T = \sigma'_h S_V S_H$, **wapeningsbreuk** (inclusief corrosietoeslag), **uittrekken** (effectieve lengte achter het glijvlak)

Het **bezwijkvlak** (bilineair of Rankine-wig) en de verhouding K_r/K_a: bij stijve wapening is de horizontale spanning bovenaan groter dan volgens Rankine

Externe stabiliteit: het gewapende blok L × H gedraagt zich als een gewichtskeermuur; kantelen, excentriciteit (L/6), glijden en draagvermogen (effectieve breedte volgens Meyerhof)

Waarom **verkeersbelasting als bovenbelasting** alleen belast, en het effect van de **aardbeving** op het blok, de stuwkracht en de wapeningsniveaus

Hoe u een ontoereikend ontwerp corrigeert: wapeningslengte, wapeningstype

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

Voorbeeldmuur: H = 10 m, gegalvaniseerde staalstrips 75 × 6 mm (f_y = 240 MPa), L = 7.5 m, S_V = 0.6 m, S_H = 1.0 m; aanvulling γ = 16.5 kN/m³, φ' = 36°; fundering φ' = 28°, c' = 50 kPa. De krachten gelden per meter muur (per strip).

Wat doet het, wat wordt getoetst?

THEORIE

De grondwand staat op zichzelf alleen onder de hoek van het natuurlijk talud. Worden in de aanvulling dunne **trekelementen** (gegalvaniseerde staalstrips, geotextiel, geogrid) aangebracht, dan neemt de grond druk op en neemt de wapening trek op, en houdt **wrijving** beide bijeen. Het front (betonpanelen, blokken of het omwikkelen van de wapening) houdt de grond binnen en draagt geen andere belasting.

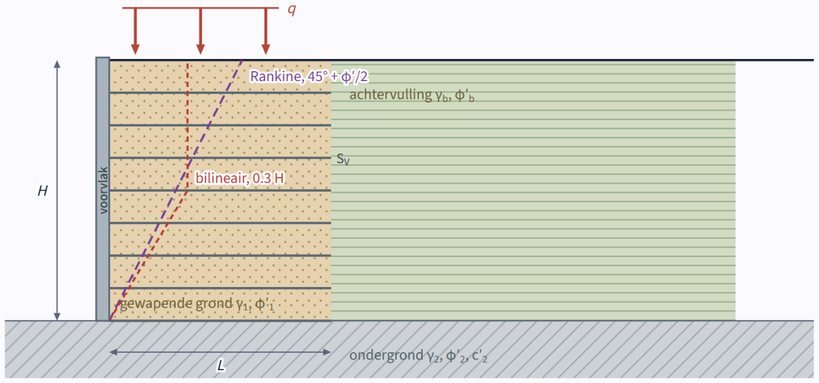
Interne stabiliteit: elke laag moet de trekbelasting dragen (1) zonder **breuk**, (2) zonder **uittrekken** achter het glijvlak, (3) zonder **breuk** aan de voorzijde (aansluiting).

Externe stabiliteit: het gewapende blok van breedte L en hoogte H is een **gewichtskeermuur**: het mag niet kantelen onder de stuwdruk van de aanvulling erachter, mag niet glijden aan de voet, en de funderingsgrond moet het kunnen dragen.

Aardbeving: de twee sets toetsen opnieuw, met dynamische stuwkracht + blok en traagheid van de effectieve zone (de vereiste veiligheidsfactoren bedragen 75% van die van de statische toestand).

Aanvulling moet vrij drainerend korrelig materiaal zijn; **macrostabiliteit** (een glijvlak door de fundering of een samengesteld glijvlak) valt buiten deze module.

Twee methoden: de **Rankine**-benadering van de bron en de **vereenvoudigde methode** van de toepassing (FHWA/AASHTO) (de methode waarmee de module opent).



Verticale en horizontale spanning, verhouding K_r/K_a

THEORIE

z is de diepte vanaf de top van de muur, γ_1, φ'_1 zijn het volumiek gewicht en de wrijvingshoek van de gewapende aanvulling. De aanvulling verkeert in de actieve toestand:

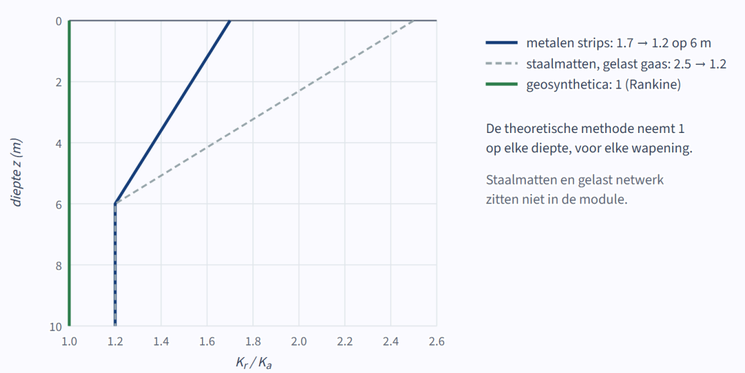
$$\sigma'_v = \gamma_1 z + q_D + q_L \qquad \sigma'_h = K_r\,(\gamma_1 z + q_D + q_L) \qquad K_a = \tan^2\!\left(45^\circ - \frac{\varphi'_1}{2}\right)$$

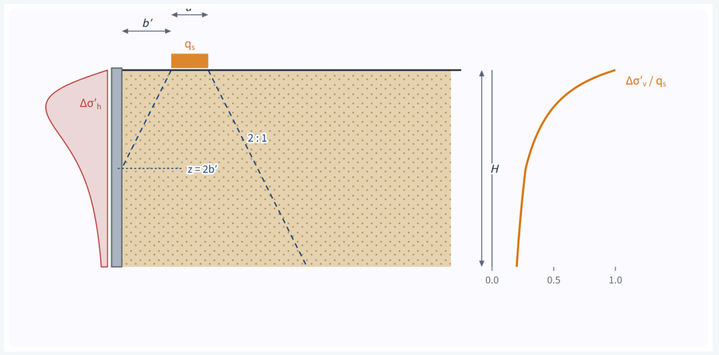
Stijve (niet-rekbare) wapening — stalen strips — houdt de aanvulling aan de bovenkant **stijver** dan de Rankine-toestand; in de vereenvoudigde methode wordt K_r/K_a naar gelang het wapeningstype gekozen:

$$\text{lamellen: } \frac{K_r}{K_a} = 1.7 - 0.5\frac{z}{6}\ (z \le 6\ \text{m}),\ \ 1.2 \text{ onder} \qquad \text{geosynthetisch: } \frac{K_r}{K_a} = 1$$

Een gelijkmatig verdeelde bovenbelasting verhoogt de verticale spanning op elke diepte met q en verhoogt via K_r ook de horizontale spanning. Een **veranderlijke** bovenbelasting (q_L) belast wel maar **houdt niet**: zij wordt niet meegerekend in het gewicht voor kantelen/glijden, noch in de verticale spanning die het uittrekken weerstaat (conservatief).

Strookbelasting (Laba–Kennedy): de verticale spanning spreidt volgens 2:1, de horizontale druk is de elastische oplossing voor een starre muur (M = 1.4 → 1).





Opgave

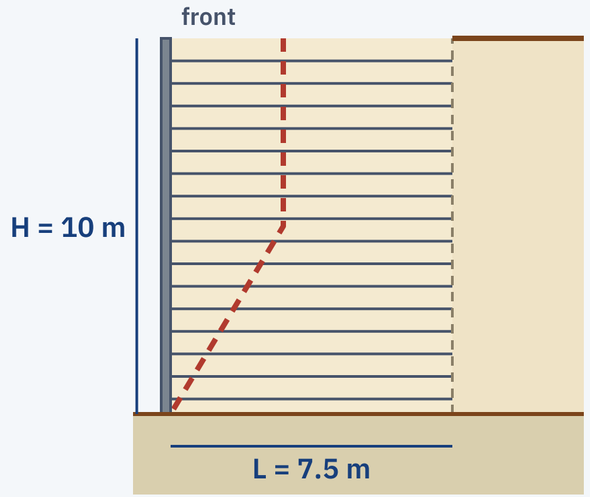
VOORBEELD

GEVRAAGD

K_a, K_r/K_a, σ'_v en σ'_h op elke diepte; waar is de maximale horizontale spanning?

Gegeven

Ophoging	$\gamma_1 = 16.5\ \mathrm{kN/m^3}$, $\varphi'_1 = 36°$**; stalen strips; vereenvoudigde methode; geen bovenbelasting**
Diepten	$z = 0.6;\ 3.0;\ 6.0$ **en** 10.0 **m (basis)**



Oplossing

OPLOSSING

1 Actieve coëfficiënt

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

2 Op elke diepte ($K_r/K_a = 1.7 - 0.5z/6$, $z \le 6$ m; 1.2 na 6 m)

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

Basis: σ'_v = **165 kPa**, $K_r = 1.2K_a = 0.3115$, σ'_h = **51.4 kPa**. Op het bovenste niveau (z = 0.6 m) is $K_r/K_a = 1.65$: 1.65 maal die van Rankine. σ'_h neemt toe met de diepte; de grootste horizontale spanning (en trek) treedt op aan de basis.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Effectieve lengte $L_e = L - L_a$

THEORIE

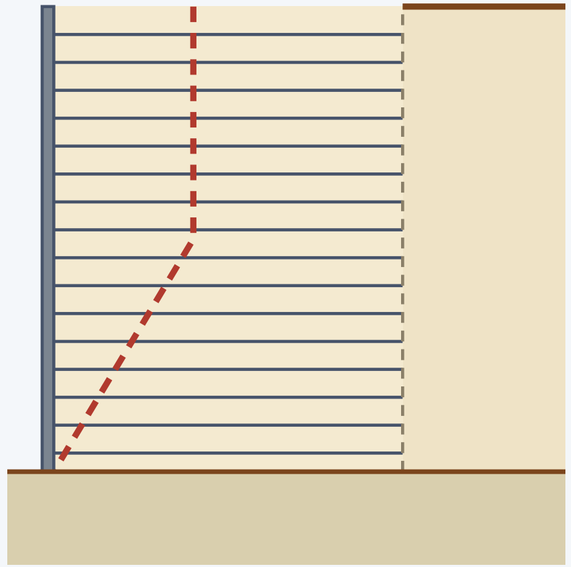
De wapening werkt daar waar de aanvulling anders zou bezwijken. Het **deel van elk niveau binnen de bezwijkzone** (tussen het front en het glijvlak) gaat met de afschuivende grond mee en houdt niets; alleen het **deel achter het glijvlak** verankert het niveau: actieve lengte L_a en effectieve lengte $L_e = L - L_a$.

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

De **bron** neemt voor elke wapening de Rankine-wig die aan de voorzijde begint ($45° + \varphi'_1/2$ met de horizontaal): bij $\varphi' = 36°$ op 5.1 m van de voorzijde aan de top van een keermuur van 10 m.

Bij stijve (stalen strip)wapening wijzen metingen erop dat het vlak van maximale trek veel dichter bij het front ligt: de praktijk hanteert een **bilineair** vlak — in de bovenste helft loodrecht op 0.3H vanaf het front, daarna recht naar de hiel. Bij geosynthetische wapening blijft Rankine gehandhaafd.

In de vereenvoudigde methode van de module neemt de staalstrip het bilineaire oppervlak en het geosyntheet het Rankine-oppervlak; in beide is de bronmethode Rankine.



Rood gestreept: bilineair breukvlak (strook). De wig van Rankine begint op 5.1 m van het front.

Opgave

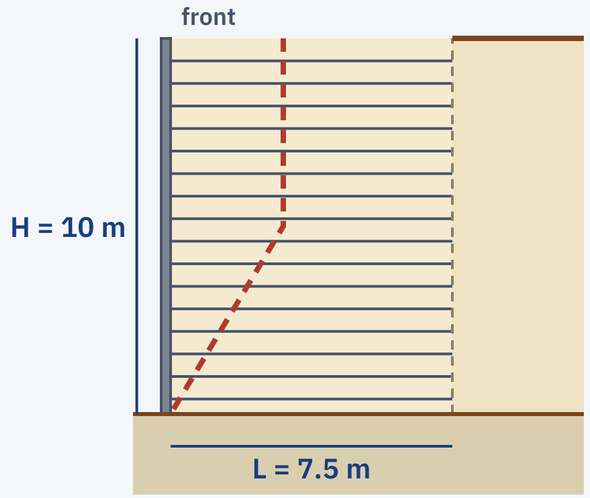
VOORBEELD

GEVRAAGD

Op elke diepte $\mathbf{L_a}$ (bilineair en Rankine) en $\mathbf{L_e}$ met het bilineaire oppervlak.

Gegeven

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



Oplossing

OPLOSSING

1 Bilineair: voor $z \leq 5$ m geldt $0.3H = 3.00$ m; voor $z > 5$ m geldt $0.6(H - z)$. Rankine: $(H - z)/\tan 63° = (H - z)/1.963$

z (m)	L_a bilineair (m)	$L_e = 7.5 - L_a$ (m)	L_a Rankine (m)	L_e 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

Het bilineaire oppervlak ligt op de bovenste niveaus dichter bij het front dan Rankine ($z = 0.6$ m: $L_a = 3.00$ m, Rankine 4.79 m); daarom is **de effectieve lengte groter** (4.50 m, Rankine 2.71 m). De bovenste niveaus dragen op hun beurt K_r/K_a keer meer trek (Voorbeeld 4).

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Het vlak maken van de laag en het draagvermogen van de wapening

THEORIE

Elke laag draagt de horizontale gronddruk van de aanvulling binnen een beperkte **bijdragende hoogte** (S_V) ter hoogte van de halve hoogte van de aangrenzende lagen. De strook houdt een aanvullingsbreedte gelijk aan de horizontale hartafstand S_H; omdat de laag en het raster doorlopend zijn, geldt de trekkracht per meter wand:

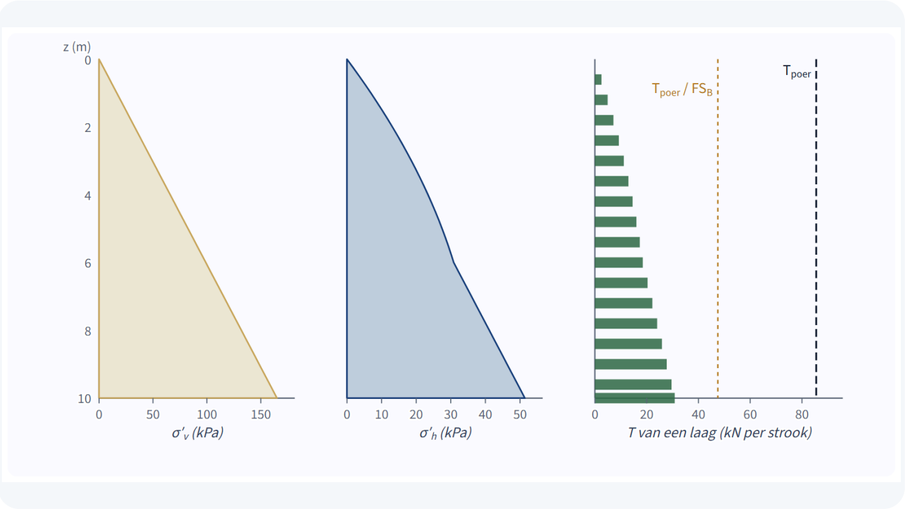
$$T = \sigma'_h S_V S_H \ \text{(per strook)} \qquad T = \sigma'_h S_V \ \text{(per meter wand)}$$

Strip (breedte w, dikte t, vloeigrens f_y): gegalvaniseerde stalen wapening corrodeert met 0.025–0.050 mm per jaar; bij een ontwerplevensduur n neemt de dikte af met r n:

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

Geosyntheet: de langdurige sterkte is de uiterste treksterkte gedeeld door de factoren voor beschadiging, kruip en degradatie; het grid bedekt niet altijd het gehele plan (C_r):

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



Opgave

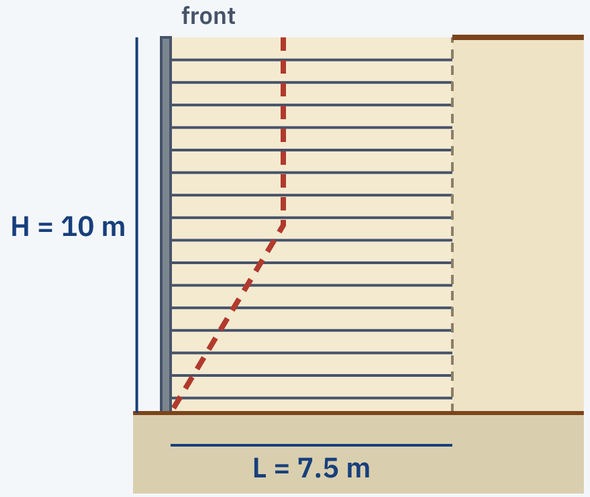
VOORBEELD

Gegeven

Strook	**75 × 6 mm aangebracht; $f_y = 240$ MPa; corrosie 0.025 mm/jaar, ontwerplevensduur 50 jaar; $S_V = 0.6$ m, $S_H = 1.0$ m**
Vereist	$FS_B \geq 1.8$ **(toepassing: 0.55 f_y in een gecorrodeerde doorsnede)**

GEVRAAGD

Maximale trek T_{max} (per strook); T_{cap}, FS_B; vereiste dikte t_{req}.



Oplossing

OPLOSSING

1 De grootste trek treedt op ter hoogte van de zool (z = 10 m; σ'_h = 51.40 kPa)

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

2 Gecorrodeerde doorsnede en draagvermogen

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

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

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

3 Vereiste dikte (corrosietoeslag weer in rekening gebracht)

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

FS_B = **2.77** ≥ 1.80: een strook van 6 mm is voldoende; de vereiste dikte is **4.33 mm**. Het maatgevende niveau is de basis (k = 17).

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Wrijving achter het glijvlak

THEORIE

Een laag die niet breekt, kan toch uit de aanvulling **worden uitgetrokken**. Achter het breukvlak houdt de aanvulling de wapening vast door wrijving op beide zijden; de wrijving is de verticale spanning boven de laag maal de coëfficiënt die de wapening mobiliseert:

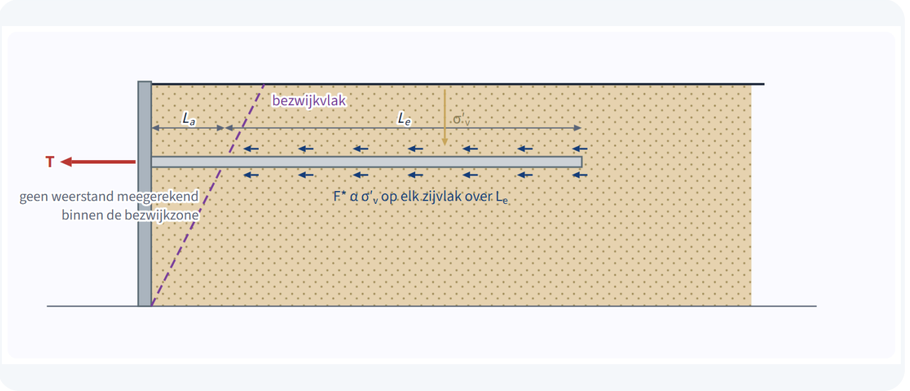
$$P_r = 2R_c\,F^*\alpha\,\sigma'_v\,L_e \qquad FS_P = \frac{P_r}{T} \qquad L_{req} = L_a + \frac{FS_P\,T}{2R_c F^*\alpha\,\sigma'_v}$$

F* uittrekweerstandscoëfficiënt: tan φ′ voor strips (ondergrens), ⅔ tan φ′ voor geosynthetics (ondergrens van de module; bepaald met een uittrekproef). **α** schaaleffect: 1.0 voor strips, 0.8 voor geogrid, 0.6 voor geotextiel.

R_c dekking: w in de strook (per strook), C_r in het geogrid (per meter muur), 1 in de afdekking. **σ'_v** is de verticale spanning in de weerstandbiedende zone: $\gamma_1 z$ + permanente bovenbelasting; **veranderlijke belasting wordt niet meegerekend** (houdt niet).

In een strook groeien T en P_r met de diepte: in de methode van de bron is de vereiste effectieve lengte op elk niveau gelijk; in de vereenvoudigde methode dragen de bovenste niveaus K_r/K_a maal zoveel trek, en de effectieve lengte neemt met dezelfde verhouding toe.

Verbinding: de trek T_{max} wordt overgedragen op het front; de sterkte wordt ingevoerd vanuit verbindingsproeven en getoetst met de breukcoëfficiënt.



Opgave

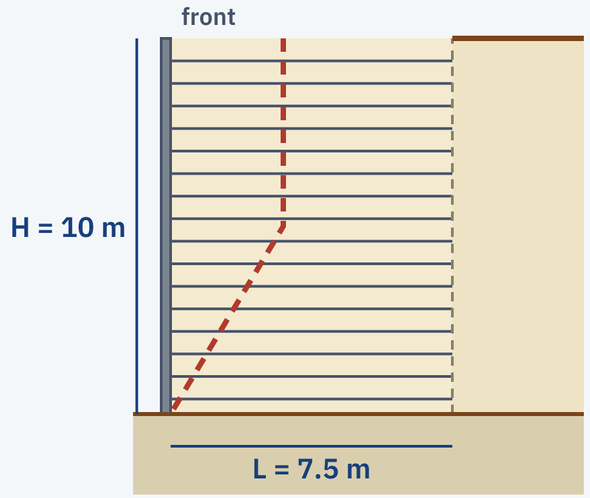
VOORBEELD

GEVRAAGD

Op niveau 1 $\mathbf{P_r}$, $\mathbf{FS_P}$, de vereiste lengte $\mathbf{L_{req}}$; samenvatting van alle niveaus.

Gegeven

Strook en grond	**De wand uit Voorbeelden 1–3; $F^* = \tan 36^\circ = 0.727$, $\alpha = 1$; $FS_P \geq 1.5$**
Niveaus	**z = 0.6 m (1e niveau) en andere niveaus**



Oplossing (1/2)

OPLOSSING

1 Niveau 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 Vereiste lengte: $L_{req} = L_a + FS_P T/(F^* \alpha \, \sigma'_v \cdot 2w)$

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

Oplossing (2/2)

OPLOSSING

3 Samenvatting van alle niveaus

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

De kleinste veiligheidsfactor tegen uittrekken is **FS_P = 1.91 op niveau 1** (1.5 vereist); de grootste vereiste lengte is **6.54 m** (L = 7.5 m is voldoende). Op het bovenste niveau is de trekkracht klein, maar omdat σ'_v ook klein is, is het uittrekken daar het zwakst.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Het blok is een gewichtskeermuur

THEORIE

Het gewapende blok dat inwendige stabiliteit levert, is **een grondblok van L × H** dat de aanvulling erachter keert. De gekeerde aanvulling (γ_b, φ'_b) drukt met de actieve Rankine-stuwkracht op het verticale achtervlak van het blok; bovenbelasting levert een extra stuwkracht:

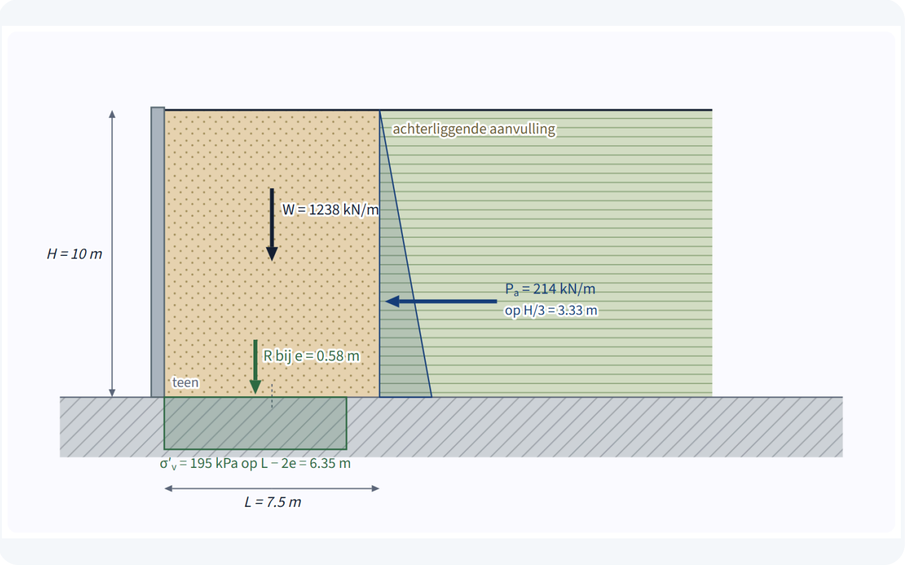
$$P_a = \tfrac{1}{2} K_a \gamma_b H^2 \;\; (H/3) \qquad P_q = K_a\, q\, H \;\; (H/2) \qquad W = \gamma_1 H L \;\; (L/2)$$

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

Weerstandbiedend: blokgewicht en **blijvende** bovenbelasting. **Veranderlijke belasting biedt geen weerstand** wanneer de stuwkracht optreedt, omdat die dan niet aanwezig kan zijn (alleen belastingen).

Dezelfde toets wordt op twee manieren gelezen: **momentenverhouding** ($FS_{ot} \geq 2$) en de plaats van de resultante: **e ≤ L/6** opdat de zool volledig onder druk blijft (bij aardbeving L/3).

Het frontpaneel en het ingegraven deel ervoor worden niet meegerekend in het weerstandbiedend gewicht (conservatief).



Opgave

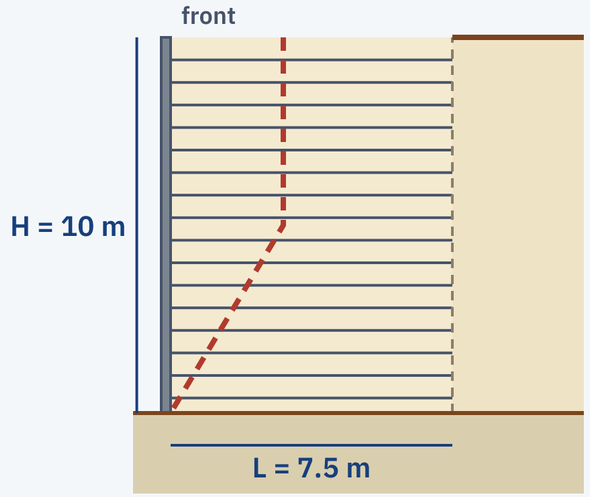
VOORBEELD

Gegeven

Blok	$H = 10$ **m,** $L = 7.5$ **m; gewapende aanvulling** $\gamma_1 = 16.5$ **kN/m³**
gekeerde aanvulling	**zelfde grond (**$\gamma_b = 16.5$**,** $\varphi'_b = 36°$**); geen bovenbelasting**

GEVRAAGD

P_a en M_o; **W** en M_R; **FS_{ot}**; de plaats van de resultante x_R en **e** (grens L/6).



Oplossing (1/2)

OPLOSSING

1 Actieve stuwdruk (K_a = 0.2596) en kantelend moment

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

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

2 Blokgewicht en weerstandbiedend moment

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

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

Oplossing (2/2)

OPLOSSING

3 Kantelen en plaats van de resultante

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

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

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

Veiligheid tegen kantelen **6.50** (≥ 2.0); de resultante is slechts **0.58 m** van het midden van de zool naar de teen verschoven: de zool staat volledig onder druk (e ≤ L/6 = 1.25 m).

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Wrijving aan de zool

THEORIE

Als de stuwkracht de wrijving over de basis overschrijdt, glijdt het blok over zijn basis. De **bron** neemt de wrijving als k ≈ ⅔, zoals bij een betonnen wand die op grond rust; aan de basis van een gewapend blok rust echter **grond op grond**: de praktijk gaat uit van de wrijvingshoek van de **zwakste** van de gewapende aanvulling en de funderingsgrond. De module handhaaft de coëfficiënt ⅔, kiest de zwakkere grond en verwaarloost de cohesie van de funderingsgrond:

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

ΣH: de stuwkracht van de ingesloten aanvulling en (indien aanwezig) de stuwkracht door bovenbelasting; ΣV: het gewicht van het blok en de permanente bovenbelasting. **De veranderlijke belasting telt mee in de stuwkracht, maar niet in ΣV.**

Ook het traject via de bron (alleen aanvulling, φ'_1) wordt berekend; als de funderingsgrond zwak is, is de waarde van de module lager en is deze **maatgevend**.

Glijden wordt opgelost door het blok te verbreden (ΣV neemt lineair toe met L); de lengte verbetert bovendien het uittrekken en de excentriciteit.

VEREISTE VEILIGHEIDSFACTOREN

Toets	Statisch (vereist)	Aardbeving (vereist, 75%)
Breuk FS_B	1.80	1.35
Uittrekken FS_P	1.50	1,125
Kantelen FS_{ot}	2.00	1.50
Excentriciteit e	≤ L/6	≤ L/3
Glijden FS_{sl}	1.50	1,125
Draagvermogen FS_{bc}	2.50	1,875

De aardbevingswaarden bedragen 75% van de statische waarden (excentriciteit L/6 → L/3). De veranderlijke belasting blijft in beide gevallen behouden.

Opgave

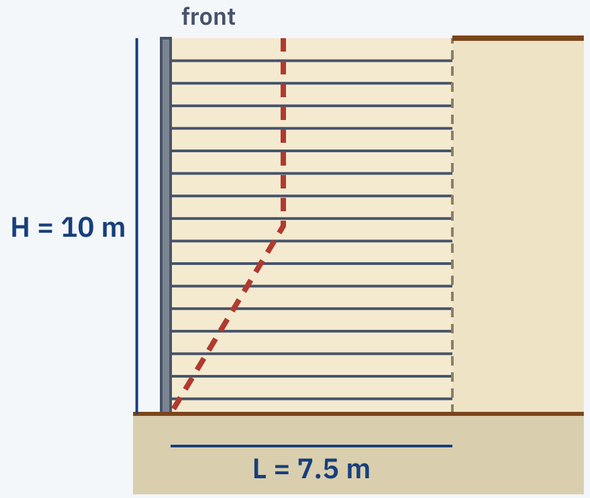
VOORBEELD

Gegeven

Blok	**Het blok uit Voorbeeld 5 ($\Sigma V = 1\,237.5$ kN/m, $\Sigma H = P_a = 214.18$ kN/m)**
Gronden	**gewapende aanvulling $\varphi'_1 = 36°$; funderingsgrond $\varphi'_2 = 28°$ ($c'_2 = 50$ kPa, cohesie wordt verwaarloosd)**

GEVRAAGD

FS_{sl} uit wrijving over de funderingszool; vergelijking met de werkwijze van de bron (alleen aanvulling).



Oplossing

OPLOSSING

1 Zwakke grond: φ'_{min} = min(36°, 28°) = 28° (funderingsgrond)

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

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

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

2 Het pad van de bron (alleen ophoging, φ'_1 = 36°)

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

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

Omdat de ondergrond van de fundering zwakker is, bedraagt de veiligheid tegen glijden **1.95** (2.57 volgens de weg van de bron): de module neemt de **kleinste** als maatgevend; deze ligt boven de vereiste 1.5.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Het blok funderingsgrond draagt als een strookfundering

THEORIE

De bron vergelijkt het draagvermogen van een fundering met breedte L aan het maaiveld met de verticale spanning op het funderingsvlak, zonder dieptefactor. Algemene draagvermogensfactoren (Vesic): $N_q = e^{\pi \tan \varphi'} \tan^2(45° + \varphi'/2)$, $N_c = (N_q - 1)\cot \varphi'$, $N_\gamma = 2(N_q + 1)\tan \varphi'$:

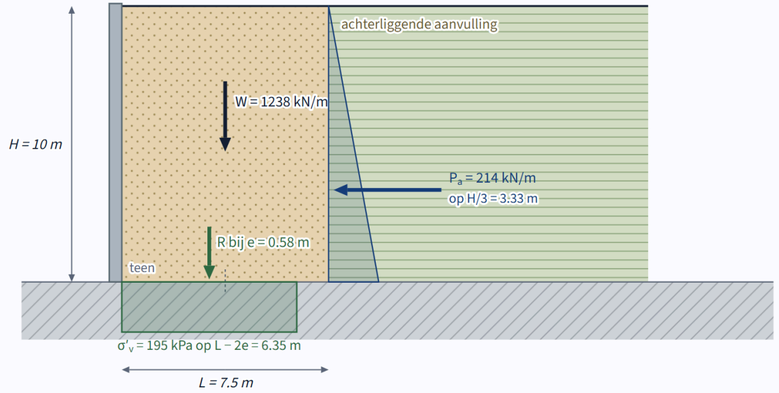
$$q_u = c'_2 N_c + \tfrac{1}{2}\gamma_2 L N_\gamma \qquad FS_{bc} = \frac{q_u}{\sigma'_o},\ \ \sigma'_o = \gamma_1 H + q_D$$

Toepassing (FHWA/AASHTO): de resultante ligt niet in het midden (e) en de druk aan de teen is groter dan het gemiddelde; daarom wordt de volledige verticale belasting gelijkmatig over de **effectieve breedte volgens Meyerhof** L′ = L − 2e gespreid en wordt het draagvermogen van een fundering met deze breedte berekend:

$$L' = L - 2e \qquad \sigma'_v = \frac{\Sigma V}{L'} \qquad q_u = c'_2 N_c + \tfrac{1}{2}\gamma_2 L' N_\gamma \qquad FS_{bc} = \frac{q_u}{\sigma'_v}$$

De druk is groter, de fundering smaller: de veiligheidsfactor volgens Meyerhof is lager; de module **berekent beide en neemt de kleinste** als maatgevend.

Deze pagina is een kortdurende toets (geen poriënwaterspanning); macrostabiliteit en zetting vallen buiten de module.



Opgave

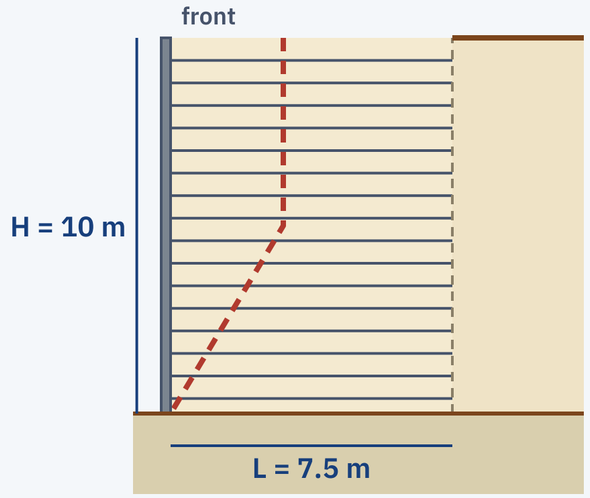
VOORBEELD

Gegeven

Blok	**Blok in Voorbeeld 5:** $\Sigma V = 1\,237.5$ **kN/m,** $e = 0.577$ **m**
Funderingsgrond	$\varphi'_2 = 28^\circ$**,** $c'_2 = 50$ **kPa,** $\gamma_2 = 17.3$ **kN/m³**

GEVRAAGD

FS$_{bc}$ volgens de aanpak van de bron,
FS$_{bc}$ met de effectieve breedte volgens Meyerhof; welke maatgevend is.



Oplossing

OPLOSSING

1 Coëfficiënten (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 Traject van de bron (breedte 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 Effectieve breedte volgens Meyerhof (e = 0.577 m)

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

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

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

De weg van de bron geeft **14.39**, de effectieve breedte geeft **11.32**: doordat de excentriciteit de druk verhoogt en de fundering versmalt, is **de waarde van Meyerhof maatgevend**; beide liggen ruim boven 2.5.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Opgave

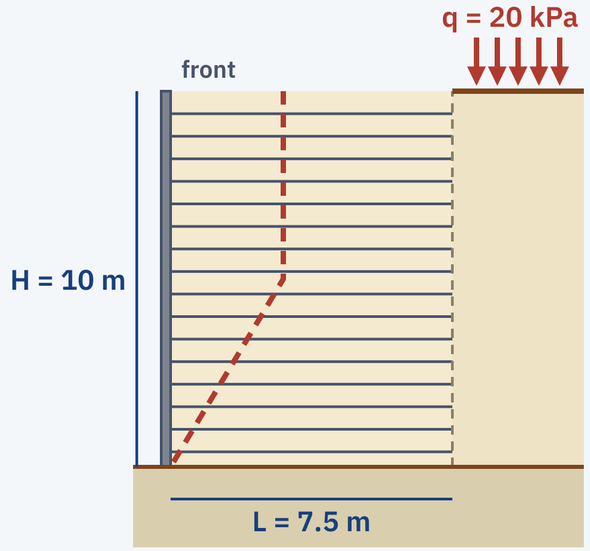
VOORBEELD

Gegeven

Wand	**Muurl uit Voorbeeld 1–7 (H = 10 m, L = 7.5 m, stroken)**
Belasting	**veranderlijke gelijkmatig verdeelde bovenbelasting $q_L = 20$ kPa op de keermuur (boven en achter het blok)**

GEVRAAGD

Op niveau 1 **FS_P**; aan de basis **T_{max}**, FS_B; externe toetsen (stuwdruk, kantelen, glijden, draagvermogen).



Oplossing (1/2)

OPLOSSING

1 Niveau 1 (z = 0.6 m): de bovenbelasting vergroot de horizontale spanning, maar niet de uittrekweerstand

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

$$P_r = 4.86\ \text{kN} \quad (\sigma'_v = \gamma_1 z = 9.9\ \text{kPa; veranderlijke belasting telt niet mee})$$

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

2 Zool: grootste trek en breuk

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

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

Op niveau 1 neemt de trekbelasting toe van 2.54 naar **7.68 kN**, terwijl de uittrekweerstand **gelijk blijft**: FS_P 1.91 → **0.63**. De wapeningsbreuk voldoet (2.47), maar de vereiste lengte wordt 13.68 m: de veranderlijke belasting **belast, houdt niet vast**.

Oplossing (2/2)

OPLOSSING

3 Externe toetsen: de stuwkracht neemt toe; wordt niet in het gewicht meegerekend

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

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

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

4 Glijden en draagvermogen (bij het draagvermogen belast de veranderlijke belasting ook de zool)

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

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

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

De externe stabiliteit is voldoende (kantelen 4.77, glijden 1.57, draagvermogen 9.54), maar **uittrekken voldoet niet** (FS_P = 0.63): bij een muur met veranderlijke belasting is de lengte van de bovenste niveaus maatgevend.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Dynamische stuwkracht, bloktraagheid en traagheid van de actieve zone

THEORIE

De aardbeving (pseudostatisch, k_h; $k_v = 0$) voegt drie krachten toe: de dynamische stuwkracht van de gekeerde aanvulling (Mononobe–Okabe), de traagheid van het gewapende blok en de traagheid van de **actieve zone** die door de wapening wordt gekeerd:

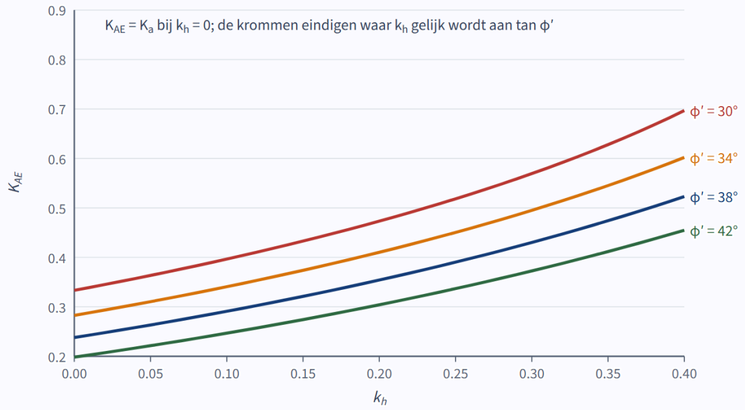
$$\psi = \tan^{-1} k_h \qquad K_{AE} = \frac{\cos^2(\varphi'_b - \psi)}{\cos^2\psi \left[1 + \sqrt{\dfrac{\sin\varphi'_b \sin(\varphi'_b - \psi)}{\cos\psi}}\right]^2}$$

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

Er wordt **de helft** van ΔP_{AE} genomen (de stuwkracht en de traagheid bereiken niet op hetzelfde ogenblik hun maximale waarde); P_{IR} alleen voor het blok met breedte 0.5H achter het front. Bovenbelasting wekt geen traagheidskracht op.

Externe toetsen: $\Sigma H = P_a + \tfrac{1}{2}\Delta P_{AE} + P_{IR}$; $e \le L/3$; veiligheidsfactoren zijn 75% van de statische.

Interne toetsen: elke laag wordt opnieuw getoetst op breuk met $T + T_{md}$ en op uittrekken met **80%** van F*; de veranderlijke belasting blijft behouden zoals in de statische situatie.



Opgave

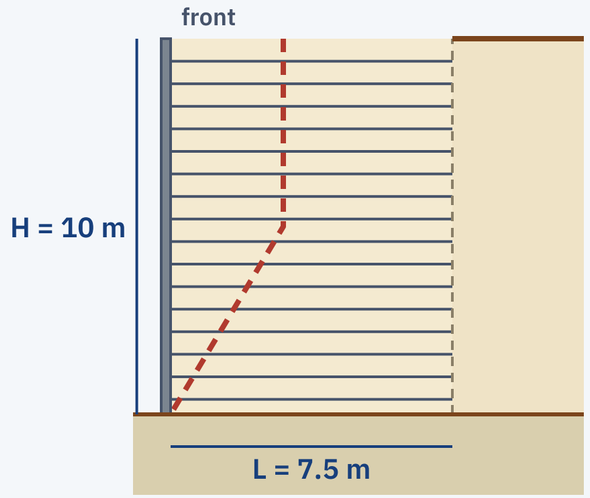
VOORBEELD

Gegeven

Wand	**Keermuur in Voorbeelden 1–7; geen bovenbelasting**
Aardbeving	**$k_h = 0.15$ ($k_v = 0$); vereiste FS is 75% van de statische waarde; $e \leq L/3$; bij uittrekken is F^* 80% van de statische waarde**

GEVRAAGD

K_{AE}, ΔP_{AE}, P_{IR}; uitwendige toetsen; traagheid van de actieve zone en controle op breuk en uittrekken van elke ankerlaag met **T + T_{md}**.



Oplossing (1/4)

OPLOSSING

1 Seismische hoek en coëfficiënt

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

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

2 Toename van de dynamische stuwkracht, bloktraagheid en totale horizontale kracht

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

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

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

3 Aandrijvend moment

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

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

Oplossing (2/4)

OPLOSSING

4 Kantelen en excentriciteit (grens 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 Glijden (geen frontale weerstand)

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

6 Draagvermogen (Meyerhof)

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

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

Oplossing (3/4)

OPLOSSING

7 Traagheid van de actieve zone en verdeling over de niveaus

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

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

8 Niveau 1 (z = 0.6 m, L_e = 4.50 m): breukkracht en uittrekken

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

$$P_{r,E} = 0.8(4.855) = 3.884\ \text{kN} \quad (F^*\ 80\%\ \text{van de statische waarde})$$

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

9 Niveau 17 (basis, L_e = 7.50 m): breuk

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

Oplossing (4/4)

OPLOSSING

10 Samenvatting van de resultaten (k_h = 0.15)

Toets	Statisch	Aardbeving	Vereist (statisch / aardbeving)	Beslissing (aardbeving)
Breuk FS_B (kleinste)	2.77	2.41	1.80 / 1.35	Voldaan
Uittrekken FS_P (minimaal)	1.91	**0.74**	1.50 / 1,125	**Voldoet niet** (niveau 1)
Kantelen FS_{ot}	6.50	3.00	2.00 / 1.50	Voldaan
Excentriciteit e (m)	0.58	1.25	≤ 1.25 / ≤ 2.50	Voldaan
Glijden FS_{sl}	1.95	**1.118**	1.50 / 1,125	**VOLDOET NIET** (op de grens)
Draagvermogen FS_{bc}	11.32	8.13	2.50 / 1,875	Voldaan

De aardbeving brengt **uittrekken ($FS_{P,E}$ = 0.74) en glijden ($FS_{sl,E}$ = 1.12)** onder de vereiste waarde; kantelen, excentriciteit, draagvermogen en wapeningsbreuk voldoen. Op de bovenste niveaus is de trek klein, maar omdat σ'_v ook klein is, is **uittrekken de zwakste schakel**: de wapeningslengte moet worden vergroot (Voorbeeld 10).

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Opgave

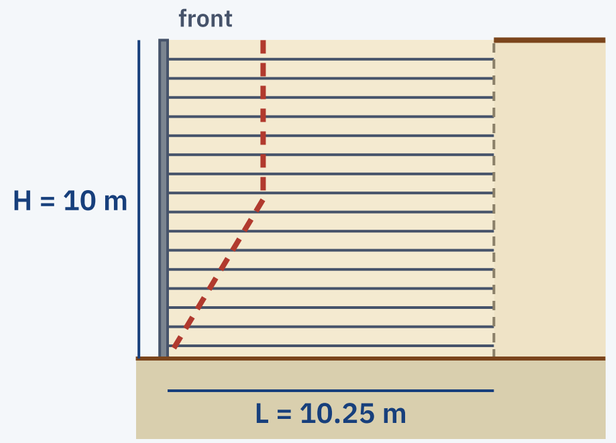
VOORBEELD

Gegeven

Initieel	**Voorbeeld 9: uittrekken ($FS_{P,E} = 0.74$) en glijden ($FS_{sl,E} = 1.12$) ontoereikend voor de aardbeving**
Variabele	**strooklengte L (verhoogd in stappen van 0.25 m); S_V, S_H, de strookdoorsnede en de aanvulling blijven gelijk**

GEVRAAGD

Minimale L: de seismische toetsen ($FS_{P,E} \geq 1.125$; $FS_{sl,E} \geq 1.125$; $e \leq L/3$) moeten voldoen; **L-tabel**.



Oplossing (1/2)

OPLOSSING

1 Veiligheidsfactoren naarmate de lengte toeneemt (vet: onder de vereiste waarde)

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

Bij L = 7.5 m zijn uittrekken (0.74) en glijden (1.12) onvoldoende; **uittrekken is maatgevend**: zelfs bij L = 9.5 m is het 1.03 < 1.125. Naarmate de lengte toeneemt, nemen zowel de effectieve lengte L_e (uittrekken) als het blokgewicht (glijden, excentriciteit) toe.

Oplossing (2/2)

OPLOSSING

2 Kleinste lengte met stappen van 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 Statisch geval met deze lengte (toets)

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

Voor aardbeving is **L = 10.25 m** (≈ 1.02 H) nodig; de statische veiligheidsfactoren zijn bij deze lengte zeer hoog. Hetzelfde resultaat kan ook worden nagestreefd door de wapening te verdichten (S_V, S_H) of met bredere strook-/beklede wapening; de lengte is de meest directe factor.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Opgave

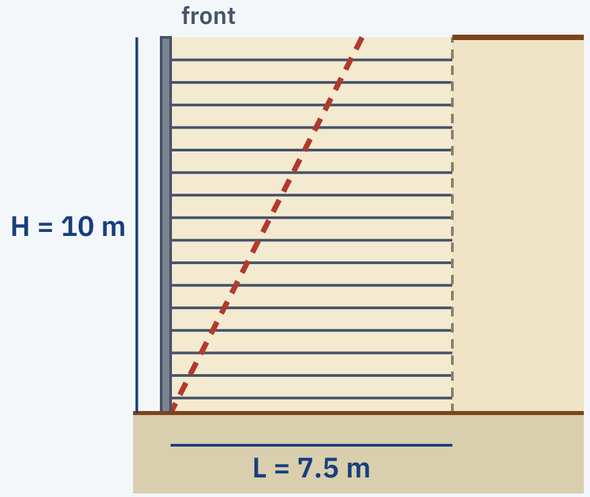
VOORBEELD

Gegeven

Geogrid	$T_{ult} = 150$ **kN/m;** $RF_{id} = 1.2$, $RF_{cr} = 2.5$, $RF_{cbd} = 1.25$**; bovenbelasting** $C_r = 0.8$**;** $S_V = 0.6$ **m**
Uittrekken	$F^* = \frac{2}{3}\tan 36°$, $\alpha = 0.8$**; glijvlak volgens Rankine (**$K_r = K_a$**);** $FS_B \geq 1.8$, $FS_P \geq 1.5$

GEVRAAGD

T_{all}, T_{cap}, T_{max} (per meter muur), **FS_B**, vereiste S_V; op niveau 1 **FS_P** en L_{req}.



Oplossing (1/2)

OPLOSSING

1 Langdurige sterkte en capaciteit

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

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

2 Trek en breuk ($K_r = K_a$)

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

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

De toegepaste tussenafstand (0.6 m) is te groot: de veiligheidsfactor tegen breuk is 1.25 < 1.8; de vereiste tussenafstand is **$S_V \leq 0.415$ m** (of een sterker geogrid).

Oplossing (2/2)

OPLOSSING

3 Niveau 1 (z = 0.6 m): Rankine-oppervlak

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

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

4 Uittrekken (per meter wand, $R_c = C_r = 0.8$)

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

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

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

In het geosynthetisch wapeningsmateriaal is uittrekken ruimschoots gewaarborgd (FS_P = 10.79); de vereiste lengte volgt de wig van Rankine: **L_{req} = 5.17 m** (< 7.5 m). Maatgevend is **wapeningsbreuk**: dit wordt geregeld via de rekensterkte en de hart-op-hartafstand.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Opgave

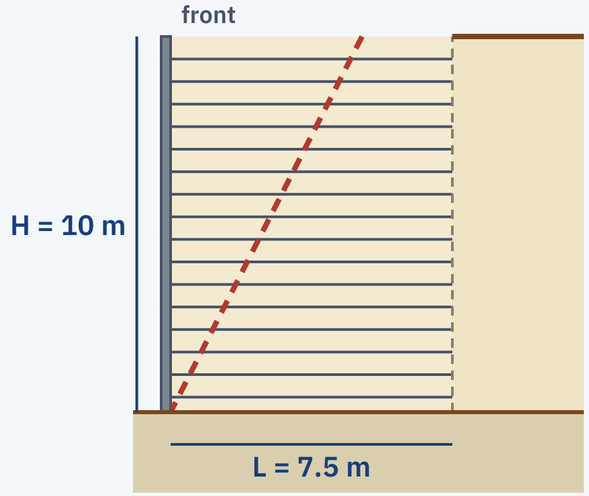
VOORBEELD

Gegeven

Wand	**H = 10 m, L = 7.5 m, $S_V = 0.6$ m; ophoging $\varphi_1' = 36^\circ$; dezelfde ondergrond**
Gevallen	**vereenvoudigde methode, Rankine-benadering volgens de bron, verkeersbelasting, strookbelasting, geogrid, korte wapening**

GEVRAAGD

Schrijf de **veiligheidsfactoren** van de zeven gevallen naast elkaar en interpreteer de verschillen.



Oplossing

OPLOSSING

1 Dezelfde keermuur, zeven gevallen (statisch)

Toestand	FS_B	FS_P	L_{req} (m)	FS_{ot}	e (m)	FS_{sl}	FS_{bc}
Instelling: vereenvoudigd, lamellen, L = 7.5 m	2.77	1.91	6.54	6.50	0.58	1.95	11.32
Rankine-benadering van de bron (dezelfde stroken)	3.33	1.90	6.93	6.50	0.58	1.95	11.32
Rankine-benadering, L = 13.5 m	3.33	6.09	6.93	21.06	0.32	3.51	18.18
Variabele bovenbelasting q_L = 20 kPa	2.47	0.63	13.68	4.77	0.79	1.57	9.54
Strookbelasting 60 kPa (a′ = 2 m, b′ = 1 m)	2.74	1.32	8.13	3.66	1.14	1.55	7.87
Geogrid 150 kN/m (Rankine, α = 0.8)	1.25	10.79	5.17	6.50	0.58	1.95	11.32
Stroken L = 7 m (0.7H)	2.77	1.70	6.54	5.66	0.62	1.82	10.60

Rankine-benadering gebruikt K_a aan de basis: de trek is klein (T_{max} 25.7 kN), de breuk is hoog (3.33), maar de vereiste lengte bovenaan bedraagt 6.93 m. **Veranderlijke belasting** verlaagt elke veiligheidsfactor (FS_P 0.63: de belastingen houden niet); **strookbelasting** verlaagt ze minder (FS_P 1.32), omdat ze als gewicht op het blok tegenwerkt. In het geogrid is het uittrekken ruim voldoende en is **breuk maatgevend** (FS_B 1.25). Met L = 7 m zijn de stroken nog steeds voldoende (FS_P 1.70, e = 0.62 m).

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Scope van de oplossing

THEORIE

De **aanvulling** is vrij drainerend granulaire grond (geen poriënwaterspanning); er is **geen** grondwater in of achter de muur en geen hellende aanvulling boven de muur.

De niveaus liggen op diepten S_V, $2S_V$, ...; een enkele wapeningslengte, een trapeziumvormige doorsnede en niveaus met verschillende lengten worden niet gemodelleerd. Staven/gaaswapening ($K_r/K_a \geq 2.5$) en de met de diepte variërende F*-waarde van geribbelde strippen vallen buiten het bereik.

Belastingen: verdeelde bovenbelasting (blijvend/veranderlijk) en strookbelastingen (Laba–Kennedy; gesuperponeerd). Punt- en lijnbelastingen worden niet gemodelleerd.

De **bekleding** draagt geen belasting; de aansluiting wordt alleen met een veiligheidsfactor tegen breuk getoetst wanneer een sterkte is ingevoerd; het ingegraven deel ervoor wordt niet meegerekend.

Niet getoetst: algehele en samengestelde stabiliteit (taludstabiliteitsanalyse), zetting en ongelijke zetting, drainage, bekleding, bouwfasen.

De toetsen zijn in de vorm van **toelaatbare spanning** (globale veiligheidsfactoren); de belasting- en weerstandsfactoren van AASHTO LRFD/GEC 11 worden niet gebruikt. Voor een belangrijke muur dienen productgegevens, macrostabiliteit en zetting daarnaast apart te worden bepaald.

Samenvatting

Belangrijkste punten

Gewapende grond: de gronddruk wordt door trekkracht in de wapening opgenomen en door wrijving verbonden. Interne stabiliteit: breuk, uittrekken, (aansluiting); externe stabiliteit: kantelen, glijden, draagvermogen voor het blok L × H

Spanning: $\sigma'_h = K_r\sigma'_v$; in de strook $K_r/K_a = 1.7 \rightarrow 1.2$ (tot 6 m), in het geosynthetische 1. **Trek** $T = \sigma'_h S_V S_H$; de grootste trek is aan de basis

Wapeningsbreuk: $T_{cap} = w(t - rn)f_y$ (strip) of $T_{all}C_r$ (geosynthetisch); **uittrekken**: $P_r = 2R_cF^*\alpha\sigma'_vL_e$, met L_e achter het glijvlak (bilineair / Rankine)

Externe toetsen: FS_{ot}, $e \leq L/6$, $FS_{sl} = \Sigma V \tan(\frac{2}{3}\varphi'_{min})/\Sigma H$, draagvermogen (bron en Meyerhof $L' = L - 2e$, de kleinste)

Veranderlijke belasting belast, draagt niet: zij verhoogt de trek en de stuwdruk, en telt niet mee voor uittrekken en gewicht; in het voorbeeld FS_P 1.91 → 0.63

Aardbeving: ΔP_{AE} (de helft, 0.6H), P_{IR}, $P_i \rightarrow T_{md}$; vereiste FS is 75 % van de statische; de voorbeeldwand **voldoet niet op uittrekken (0.74) en glijden (1.12)**, en voldoet met L = 10.25 m

Geogrid: $T_{all} = T_{ult}/(RF_{id}RF_{cr}RF_{cbd})$; breuk is maatgevend ($S_{V,req}$ = 0.415 m), uittrekken is ruim voldoende

Literatuur

Das, B.M. (2016). Principles of Foundation Engineering, 8rd ed. Cengage Learning, Boston. Hoofdstuk 13, paragraaf 13.10 tot 13.17: grondwapening, het ontwerp van muren met metalen strippen, geotextielen en geogrids; Tabel 4.2 voor de draagvermogensfactoren.

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., Section 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.

OPMERKING

Alle numerieke voorbeelden zijn gegenereerd met de eigen berekeningskern van de module; de module geeft dezelfde waarden. Het stapsgewijze rekenvoorbeeld op de modulepagina is ook deze keermuur (H = 10 m, gegalvaniseerde strip 75 × 6 mm, L = 7.5 m, S_V = 0.6 m, S_H = 1.0 m).

GeoTerva

Online geotechnische berekeningen

Van theorie naar praktijk

Voer de hoogte van uw eigen wand, de wapening (strip, geogrid, geotextiel), de aanvulling, de bovenbelasting en de seismische coëfficiënt in GeoTerva in; de module geeft de breuk- en uittrekveiligheid van elk niveau, de externe toetsen van het blok en de vereiste lengte in samenhang.

Module openen →

Theoriepagina →

Openen op de smartphone

Proefmodules vereisen geen registratie.

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