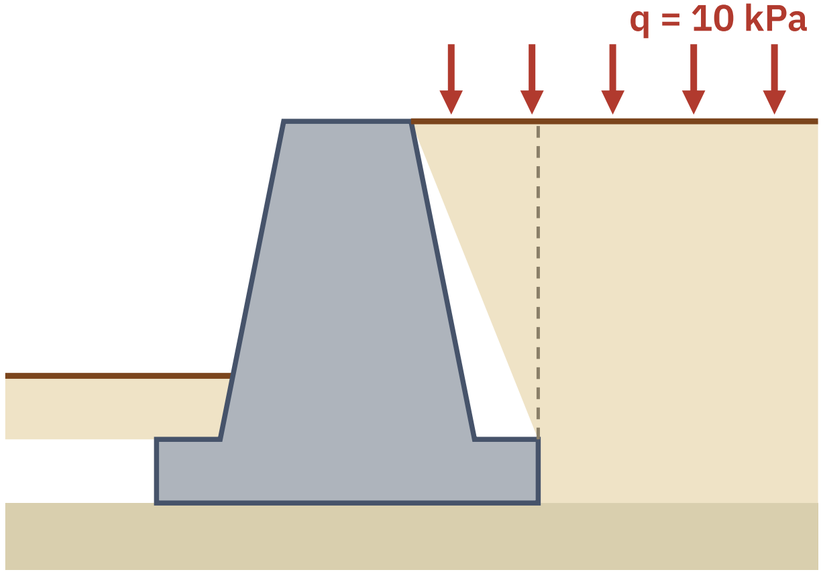
Geotechnisch college · Keermuren

Gewichtskeermuur

College: externe stabiliteit van een gewichtskeermuur van steen of beton; de muur en de grond die ermee meebeweegt, actieve en passieve gronddruk, water, opwaartse waterdruk en aardbeving; toetsen op glijden, kantelen en draagvermogen; bij elk onderwerp een rekenvoorbeeld.

- Glijden · kantelen · draagvermogen
- Rankine · Coulomb · Mononobe–Okabe
- Water en opwaartse waterdruk
- Traagheid bij aardbevingen
- Krachtenoverzicht



Inleiding

Wat leren we in dit college?

Het berekenen van de **geometrie** en het gewicht van een gewichtskeermuur door opsplitsing in delen (oppervlak, zwaartepunt, momentarm)

Het **grondblok** dat met de muur meebeweegt en het **verticale drukvlak** door de achterrand van de fundering

Actieve (Rankine = Coulomb, op een verticaal vlak), bovenbelasting, **passieve voorweerstand** (K_{mob}) en **water + opwaartse waterdruk**

De toetsen op **glijden, kantelen en draagvermogen** met behulp van het **krachtenoverzicht** en één tekenafspraak ($M = x \cdot F_z - z \cdot F_x$)

Bij een aardbeving de **Mononobe–Okabe**-stuwdruk, de seismische toename en de traagheid van de wand meenemen

Hoe u het resultaat leest: veiligheidsfactoren, excentriciteit, spanningen op de basis

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

Alles is per 1.00 m wandlengte (kN/m, kN·m/m); de drukken in kPa. Voorbeeldwand: H = 3 m natuurstenen muur (22 kN/m³).

Wat wordt opgelost, hoe wordt het getekend?

THEORIE

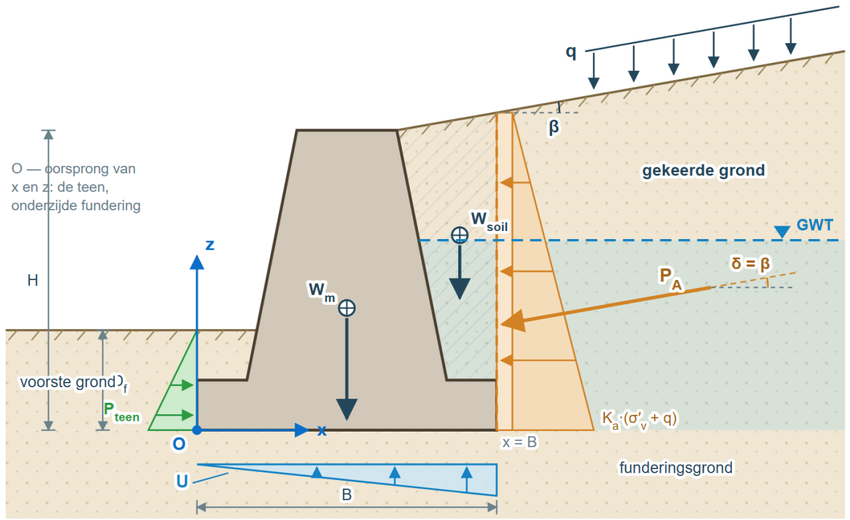
Een gewichtskeermuur weerstaat glijden en kantelen **met zijn eigen gewicht**. De module onderzoekt een muur van natuursteen of massabeton met een hellende, trapeziumvormige opgaande wand en een getrapte voet aan beide zijden:

$$B = W_{bl} + W_{dl} + W_u + W_{dr} + W_{br}$$

Keermuur: H totale hoogte, W_u topbreedte, W_{dl}, W_{dr} offsets van het voor- en achterschot, W_{bl}, W_{br} teensprongen, H_{fl}, H_{fr} teenhoogten; volumiek gewicht 22 voor steen, 24 kN/m³ voor beton.

Grond: niet-samenhangende aanvulling (c′ = 0), hellend maaiveld β, bovenbelasting q, grondwater, en aan de voorzijde grond en water tot een hoogte D_f.

De **drie theorieën**: Rankine, Coulomb (statisch), Mononobe–Okabe (aardbeving).
Toetsen: glijden, kantelen, excentriciteit, draagvermogen.



Vrijlichaamsschema, krachtenoverzicht, eenduidige tekenafspraak

THEORIE

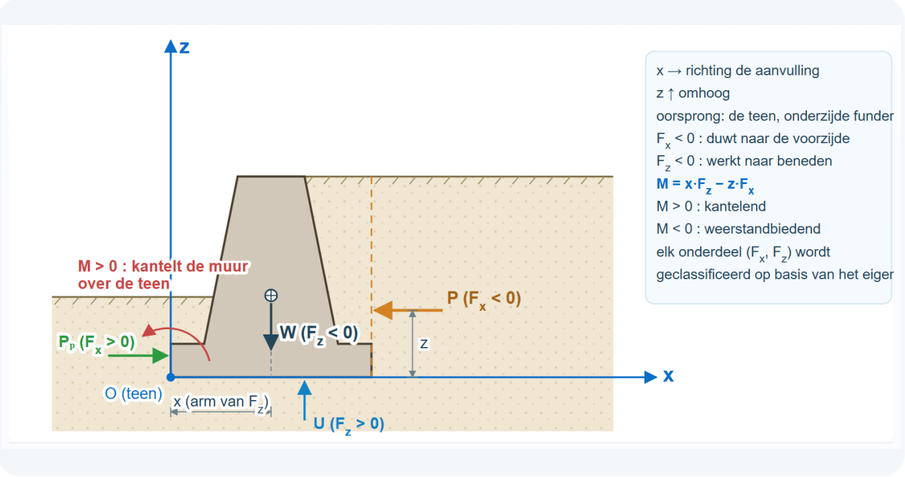
Stabiliteit is een **evenwichts**probleem: eerst wordt besloten wat in evenwicht is en hoe de krachten worden getekend. De oorsprong O ligt bij de **teen** (voorste onderhoek), x naar de aanvulling, z omhoog. Een kracht wordt geschreven met haar componenten (F_x, F_z) en haar aangrijpingspunt; het moment om O:

$$M = x\,F_z - z\,F_x \qquad M > 0:\ \text{kantelen}, \quad M < 0:\ \text{hechting}$$

Voor gewicht ($F_z = -W$, $x > 0$) geldt $M = -xW < 0$: het houdt de muur. Voor een voorwaartse stuwkracht ($F_x < 0$) geldt $M = -zF_x > 0$: het kantelt de muur. Opwaartse waterdruk ($F_z > 0$) kantelt, weerstand aan de voorzijde ($F_x > 0$) houdt tegen.

Geen enkele kracht wordt vooraf als "weerstandbiedend" geclassificeerd; elke component wordt met zijn eigen teken geteld (de verticale component van de schuine stuwkracht is terecht weerstandbiedend).

Vrij lichaam = wand + de grond die ermee meebeweegt; **in de krachtenoverzicht** wordt elk item door alle drie de toetsen identiek gelezen: geen enkele kracht mag in de ene worden vergeten en in de andere worden meegeteld.



Opdelen in delen, zwaartepunten en hefarms

THEORIE

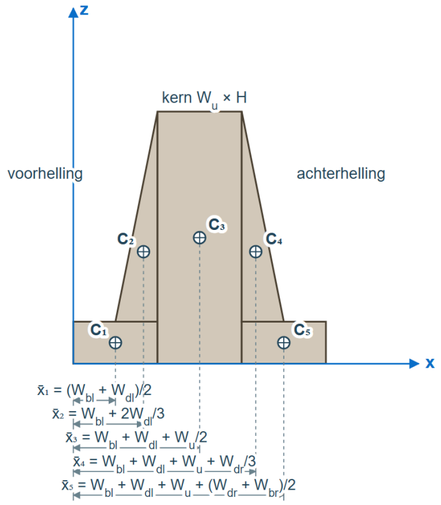
Het gewicht van de keermuur en het moment daarvan om de teen vormen ook de basis van beide stabiliteitstoetsen. De doorsnede wordt verdeeld in eenvoudige vormen met bekende oppervlakte en zwaartepunt (teen, voorfront, kern, achtertalud, hiel):

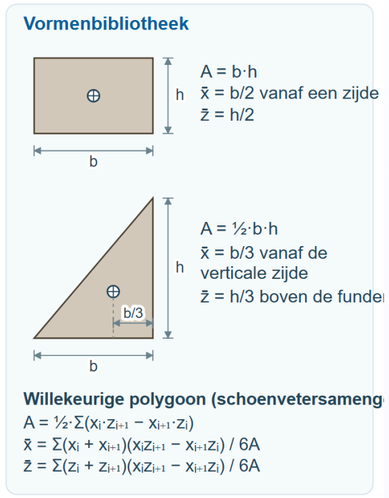
$$W_i = \gamma_m A_i \qquad W_m = \sum W_i \qquad \bar{x}_m = \frac{\sum W_i\,\bar{x}_i}{W_m} \qquad \bar{z}_m = \frac{\sum W_i\,\bar{z}_i}{W_m}$$

In het krachtenoverzicht is de muur één post: $F_z = -W_m$ op $\bar{x}_m$; het moment is $M = -W_m\bar{x}_m = -\Sigma M_i$.

De hoogte $\bar{z}_m$ is alleen nodig voor de horizontale traagheidskracht $k_h W_m$ (aardbeving).

De module berekent de volledige doorsnede ook als één enkel polygoon; beide resultaten stemmen overeen binnen 10^{-9}.





Opgave

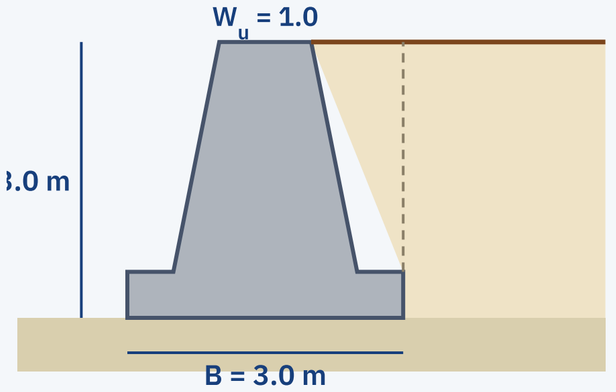
VOORBEELD

Gegeven

Doorsnede	$H = 3.0$ **m;** $W_u = 1.0$ **m;** $W_{dl} = W_{dr} = 0.5$ **m;** $W_{bl} = W_{br} = 0.5$ **m;** $H_{fl} = H_{fr} = 0.5$ **m** **(B = 3.0 m)**
Materiaal	**natuursteenmuur:** $\gamma_m = 22\ \mathrm{kN/m^3}$

GEVRAAGD

Oppervlakte en gewicht van de vijf delen; W_m, $\bar{x}_m$, $\bar{z}_m$.



Oplossing

OPLOSSING

1 Delen (bijv. voortalud: $A = \frac{1}{2}(0.5)(3.0 - 0.5) = 0.625$; $\bar{x} = W_{bl} + 2W_{dl}/3 = 0.833$; $\bar{z} = H_{fl} + (H - H_{fl})/3 = 1.333$)

Deel	A (m²)	$\bar{x}$ (m)	$\bar{z}$ (m)	W = 22A (kN/m)	W·$\bar{x}$	W·$\bar{z}$
Teen	0.500	0.500	0.250	11.00	5.50	2.75
Voorliggend talud	0.625	0.833	1.333	13.75	11.46	18.33
Lichaam (kern)	3.000	1.500	1.500	66.00	99.00	99.00
Achtertalud	0.625	2.167	1.333	13.75	29.79	18.33
Hiel	0.500	2.500	0.250	11.00	27.50	2.75
Totaal	**5.250**			**115.50**	**173.25**	**141.17**

2 Zwaartepunt van de keermuur

$$\bar{x}_m = \frac{173.25}{115.50} = \mathbf{1.500\ m} \qquad \bar{z}_m = \frac{141.17}{115.50} = \mathbf{1.222\ m}$$

Het gewicht van de wand is **W_m = 115.50 kN/m**, $\bar{x}_m$ = 1.50 m vanaf de teen, $\bar{z}_m$ = 1.22 m vanaf de zool; het moment is M = −173.25 kN·m/m (weerstandbiedend).

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Verticaal drukvlak en grondblok

THEORIE

Waarom grijpt de gronddruk aan op de **achterrand van de funderingszool** en niet op het achtertalud van de wand? De grond boven de hiel kan niet ten opzichte van de wand verschuiven: als de wand beweegt, beweegt die grond mee. De glijvlakken in de aanvulling beginnen niet bij het achtertalud maar bij de **achterrand van de hiel**. Consistent vrij lichaam: de wand plus dit grondblok; het **uitwendige drukvlak** op het buitenvlak ervan is verticaal op x = B:

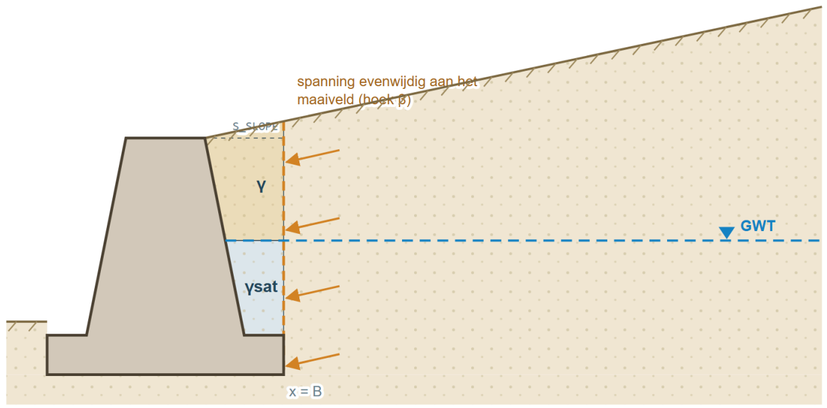
Het vlak loopt van het oppervlak boven de achterrand tot onder de zool; bij een hellende aanvulling omvat het ook de stijging van het oppervlak. Alles tussen het vlak en de achterzijde van de wand is **gewicht**; het vlak tegen de grond is grond tegen grond: wandwrijving wordt niet meegerekend en de stuwkracht grijpt aan met δ = β.

Aan de voorzijde beweegt ook de ophoging boven de teen mee met de muur: verticale belasting W_{toe}; als $D_f = 0$ wordt ingevoerd, betekent dit dat de grond aan de voorzijde mag worden meegerekend.

Het verticale deel van de **bovenbelasting** boven de hiel (Q_{heel}) is gunstig, maar omdat het als een belasting wordt beschouwd die wel of niet aanwezig kan zijn, **komt het in geen enkele toets** voor; het horizontale effect ervan wordt echter altijd meegerekend.

De berekening wordt met de totale spanning uitgevoerd: de grond onder water wordt met γ_{sat} gewogen, en het water zelf wordt als afzonderlijke kracht (U_{rear}, opwaartse waterdruk) toegevoegd; γ′ en de opwaartse waterdruk worden niet samen genomen.

Verticaal vlak door de achterrand van de fundering (alle methoden)



Opgave

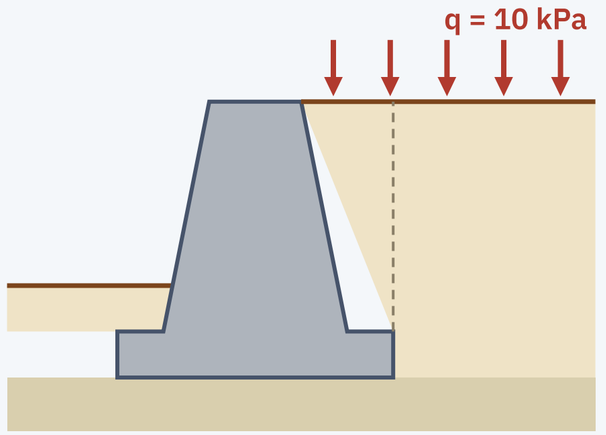
VOORBEELD

Gegeven

Wand	**De doorsnede uit Voorbeeld 1; hoogte van de voorliggende grond $D_f = 1.0$ m**
Grond	**droge aanvulling: $\gamma = 18\ \mathrm{kN/m^3}$, $\varphi' = 30°$; horizontaal maaiveld**
Bovenbelasting	$q = 10$ **kPa (aan het oppervlak)**

GEVRAAGD

Gewicht en plaats van het **grondblok** dat met de wand meebeweegt; **voorbelasting**; waarom $\mathbf{Q_{heel}}$ niet in de toetsen voorkomt?



Oplossing (1/2)

OPLOSSING

1 Rechthoek boven de hiel + driehoek naast het achtertalud (tot het vlak x = B = 3.0)

$$A_r = W_{br}(H - H_{fr}) = 0.5(2.5) = 1.250\ \mathrm{m}^2\ (\bar{x} = 2.75,\ \bar{z} = 1.75)$$

$$A_t = \tfrac{1}{2} W_{dr}(H - H_{fr}) = 0.625\ \mathrm{m}^2\ (\bar{x} = 2.333,\ \bar{z} = 2.167)$$

$$W_s = \gamma(A_r + A_t) = 18(1.875) = \mathbf{33.75}\ \mathrm{kN/m}$$

2 Locatie

$$\bar{x}_s = \frac{1.250(2.75) + 0.625(2.333)}{1.875} = \mathbf{2.611}\ \mathrm{m} \qquad \bar{z}_s = \mathbf{1.889}\ \mathrm{m}$$

Oplossing (2/2)

OPLOSSING

3 Vooraanvulling (boven de teen, D_f = 1.0 m) en bovenbelasting

$$A_{toe} = \tfrac{1}{2}(0.5 + 0.60)(0.5) = 0.275\ \mathrm{m}^2 \quad W_{toe} = 18(0.275) = \mathbf{4.95}\ \mathrm{kN/m}\ (\bar{x} = 0.276)$$

$$Q_{heel} = q(B - x_{BT}) = 10(3 - 2) = \mathbf{10.0}\ \mathrm{kN/m}\ (\text{valt onder geen enkele toets})$$

Totale verticale belasting N = W_m + W_s + W_{toe} = 115.50 + 33.75 + 4.95 = **154.20 kN/m**.
Q_{heel} = 10.00 kN/m is de post die in de tabel als "onbenut" is gemarkeerd.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Rankine en Coulomb, op een verticaal vlak

THEORIE

Als het ophogingsoppervlak onder een hoek β helt, staat in de oplossing van Rankine voor een half-oneindig talud de spanning op het verticale vlak **evenwijdig aan het oppervlak**: $\sigma'_a = K_{a\beta}\sigma'_v$:

$$K_{a\beta} = \cos\beta\,\frac{\cos\beta - \sqrt{\cos^2\beta - \cos^2\varphi'}}{\cos\beta + \sqrt{\cos^2\beta - \cos^2\varphi'}} \qquad K_a = \frac{1-\sin\varphi'}{1+\sin\varphi'}\ (\beta = 0)$$

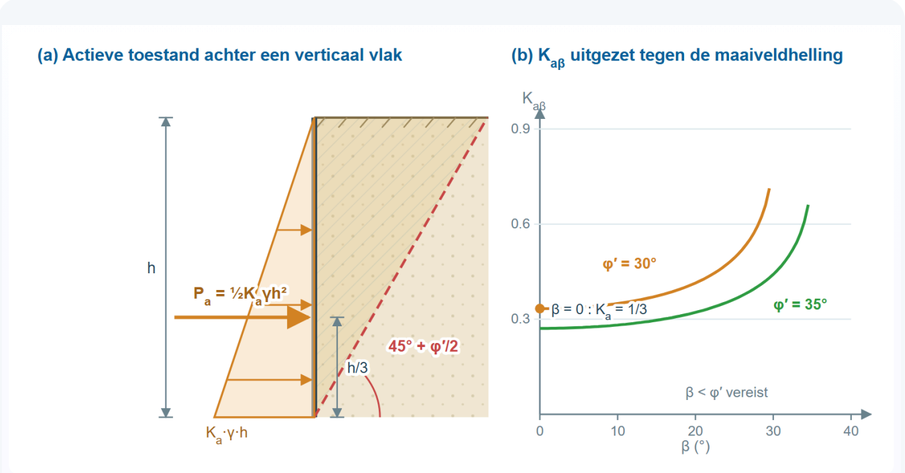
$$P_A = \tfrac{1}{2}K_a\gamma h^2\ \ (h/3) \qquad P_Q = K_a q h\ \ (h/2)$$

Voor de vierkantswortel is β < φ′ vereist; als β ≥ φ′ is het talud zelf instabiel en wordt de berekening geblokkeerd.

Coulomb: voor een verticaal vlak (α = 90°) en δ = β is K_a **exact gelijk** aan de Rankine $K_{a\beta}$ **voor elke β**; beide methoden geven op dit vlak dezelfde druk. h = hoogte van het vlak (inclusief de stijging van het maaiveld).

Horizontale component P cos β, verticale component P sin β (bij een stijgend talud naar beneden: weerstandbiedend).

De bovenbelasting wordt tweemaal berekend (met en zonder q); P_Q is het verschil.



Opgave

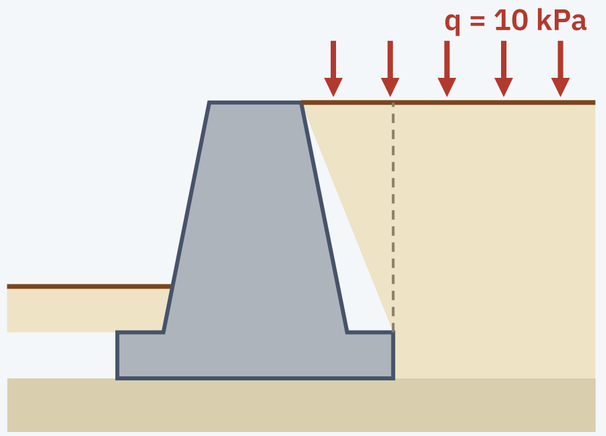
VOORBEELD

Gegeven

Wand en grond	**Keermuur en aanvulling uit voorbeeld 2:** $h = H = 3.0$ **m;** $\gamma = 18\ \mathrm{kN/m^3}$, $\varphi' = 30°$**; horizontaal maaiveld**
Bovenbelasting	$q = 10$ **kPa**

GEVRAAGD

Met K_a, de grondstuwkracht P_A en de bovenbelastingsstuwkracht P_Q en hun momenten.



Oplossing

OPLOSSING

1 K_a = (1 − sin30°)/(1 + sin30°) = 0.3333; de stuwdrukken (in het verticale vlak, horizontaal)

$$P_A = \tfrac{1}{2} K_a \gamma h^2 = \tfrac{1}{2}(0.3333)(18)(9) = \mathbf{27.00}\ \mathrm{kN/m} \quad (z = 1.00\ \mathrm{m})$$

$$P_Q = K_a q h = 0.3333(10)(3) = \mathbf{10.00}\ \mathrm{kN/m} \quad (z = 1.50\ \mathrm{m})$$

2 Totale horizontale stuwkracht en kantelmoment (ten opzichte van de teen)

$$\Sigma H_{drive} = 27.0 + 10.0 = \mathbf{37.0}\ \mathrm{kN/m}$$

$$M_o = 27.0(1.00) + 10.0(1.50) = 27.0 + 15.0 = \mathbf{42.0}\ \mathrm{kN{\cdot}m/m}$$

Gronddruk 27.00, bovenbelasting 10.00 kN/m: totaal **37.00 kN/m**, ten opzichte van de teen **42.00 kN·m/m**.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Opgave

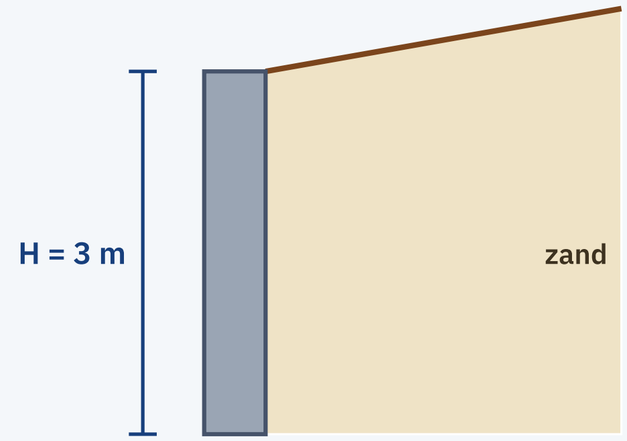
VOORBEELD

Gegeven

Wand en grond	**De keermuur van Voorbeeld 2; dezelfde aanvulling, maar met een maaiveld dat $\beta = 10^\circ$ stijgt (verder van de muur af)**
Bovenbelasting	$q = 10$ **kPa**

GEVRAAGD

$\mathbf{K_{a\beta}}$, de componenten van de stuwkracht; de verandering van het resultaat ten opzichte van de horizontale aanvulling (glijden, kantelen, excentriciteit).



γ = 18 kN/m³, φ′ = 30°, β = 10°

Oplossing (1/2)

OPLOSSING

1 Coëfficiënt $K_{a\beta}$ ($\cos\beta = 0.9848$, $\sqrt{(\cos^2\beta - \cos^2\varphi')} = 0.4689$)

$$K_{a\beta} = \cos\beta\,\frac{\cos\beta - r}{\cos\beta + r} = 0.9848\,\frac{0.5159}{1.4537} = \mathbf{0.3495}\ \ (\text{horizontaal } 0.3333)$$

2 Aandrijvende krachten (h = hoogte van het vlak = H + stijging van het oppervlak; engine)

$$P_A:\ F_x = 31.25,\ F_z = 5.51\ \text{kN/m}\ \ (\text{horizontaal en verticaal})$$

$$P_Q:\ F_x = 10.93,\ F_z = 1.93\ \text{kN/m}$$

Oplossing (2/2)

OPLOSSING

3 Toetsen (engine)

$$\Sigma F_z = -N = -163.23\ \text{kN/m} \quad (\text{grondblok } 35.34)$$

$$FS_s = 2.412 \qquad FS_o = 5.734 \qquad e = 0.037\ \text{m} \qquad q_{max} = 58.4\ \text{kPa}$$

Een oplopend talud vergroot de stuwkracht ($K_{a\beta}$ 0.333 → 0.350), maar de **verticale component van de stuwkracht** en het zwaardere grondblok zijn stabiliserend: FS tegen glijden 2.62 → 2.41, FS tegen kantelen 6.26 → 5.73; excentriciteit 0.068 → 0.037 m.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Gecombineerde coëfficiënt tussen neutrale en passieve gronddruk

THEORIE

De grond vóór de wand (c′ = 0) wordt beschreven door een **combinatie** van de passieve coëfficiënt van Rankine en de neutrale coëfficiënt van Jaky; volledige passieve weerstand zou een verplaatsing vereisen die een functionerende wand niet toelaat:

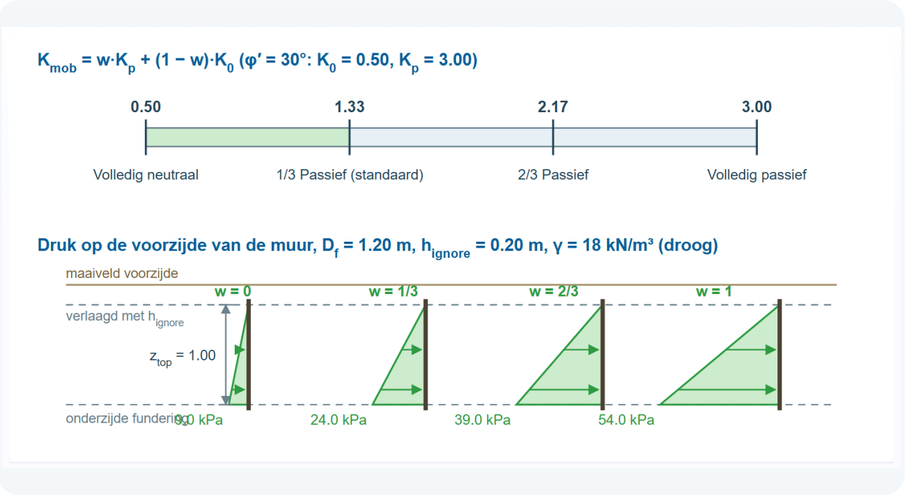
$$K_{mob} = w\,K_p + (1-w)\,K_0 \qquad K_p = \tan^2(45^\circ + \varphi'/2) \qquad K_0 = 1 - \sin\varphi'$$

$$p(z) = K_{mob}\,\sigma'_v(z) \qquad P_P = \tfrac{1}{2}K_{mob}\gamma D_f^2 \;\; (D_f/3)$$

w = 0 volledig neutraal, 1/3 (standaard), 2/3, 1 volledig passief. De bovenste **h_{ignore}**-dikte van de voorliggende grond (ontgraafbaar, kan verweken) wordt niet in rekening gebracht.

Voorweerstand wordt alleen bij **glijden** in rekening gebracht (volledig bij statische belasting, met $\eta_{p,E}$ bij aardbevingen); bij **kantelen en draagvermogen wordt deze nooit** gebruikt.

De stuwdruk van het voorwater (h_{wf}) is naar achteren gericht en vermindert de netto stuwdruk.



Opgave

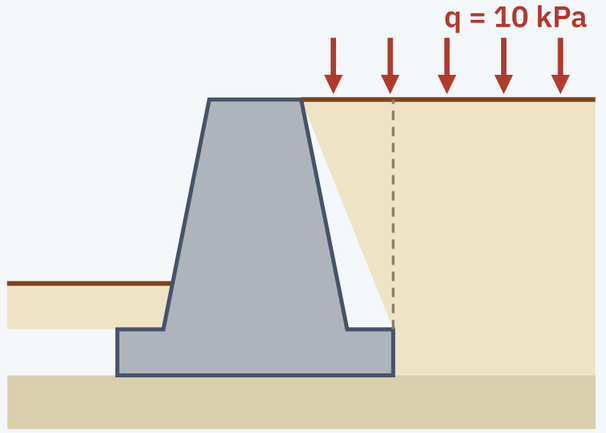
VOORBEELD

Gegeven

Voorgelegen grond	$D_f = 1.0$ **m;** $\gamma = 18\ \mathrm{kN/m^3},\ \varphi' = 30°$**;** $h_{ignore} = 0$
Gevallen	**volledig neutraal, 1/3, 2/3, volledig passief; en wanneer de frontweerstand helemaal niet wordt meegeteld**

GEVRAAGD

K_{mob}, **P_P** en de veiligheidsfactor tegen glijden FS_s (voor de keermuur uit Voorbeeld 2).



Oplossing

OPLOSSING

1 K_{mob} en stuwdruk (standaard w = 1/3)

$$K_{mob} = \tfrac{1}{3}(3.000) + \tfrac{2}{3}(0.500) = \mathbf{1.333}$$

$$P_P = \tfrac{1}{2} K_{mob} \gamma D_f^2 = \tfrac{1}{2}(1.333)(18)(1)^2 = \mathbf{12.0}\ \mathrm{kN/m} \quad (z = D_f/3 = 0.333\ \mathrm{m})$$

2 Vier gevallen ($FS_s = (\mu_b N + P_P)/\Sigma H_{drive} = (84.81 + P_P)/37.0$)

Toestand	w	K_{mob}	P_P (kN/m)	FS_s
Volledig neutraal	0	0.500	4.50	2.414
1/3 passief + 2/3 neutraal (standaard)	1/3	1.333	12.00	2.616
2/3 passief + 1/3 neutraal	2/3	2.167	19.50	2.819
Volledig passief	1	3.000	27.00	3.022
Puntweerstand wordt niet in rekening gebracht	–	–	0	2.292

De verrekening van de frontweerstand verandert FS_s tussen 2.29 en 3.02 (standaard **2.62**); als de grond aan de voorzijde kan worden ontgraven, wordt de verrekening op nul gesteld: D_f en h_{ignore} moeten bewust worden gekozen.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Drie toetsen uit dezelfde krachentabel

THEORIE

Glijden: de basis wordt door wrijving vastgehouden; vereiste schuifkracht $\Sigma H_{drive} - \Sigma P_{resist}$, beschikbare schuifkracht $\mu_b N$ (geen adhesie; N is de effectieve normaalkracht, inclusief opwaartse waterdruk). De weerstand wordt in de noemer gesommeerd:

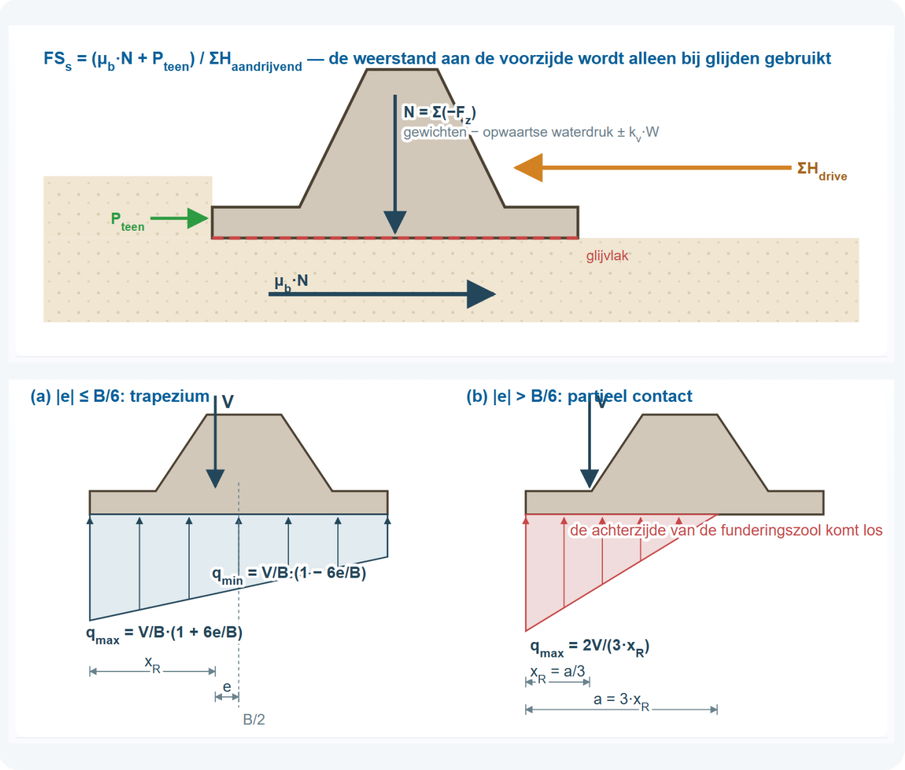
$$FS_s = \frac{\mu_b N + P_{toe}}{\Sigma H_{drive}} \qquad \mu_b = \tan \delta_b$$

Kantelen gebeurt om de teen: de $-zF_x$- en xF_z-componenten van elk element gaan volgens hun teken naar $\Sigma M_{kantelen}$ of $\Sigma M_{weerstand}$; de frontweerstand telt niet mee:

$$FS_o = \frac{\Sigma M_{res}}{\Sigma M_{ov}} \qquad x_R = -\frac{\Sigma M}{V} \qquad e = \frac{B}{2} - x_R$$

Draagvermogen: als $|e| \le B/6$ is de zool volledig in contact; anders kan de grond geen trek opnemen en is slechts een deel in contact:

$$q_{max,min} = \frac{V}{B}\left(1 \pm \frac{6e}{B}\right) \qquad |e| > \frac{B}{6}: \quad q_{max} = \frac{2V}{3x_R}$$



Opgave

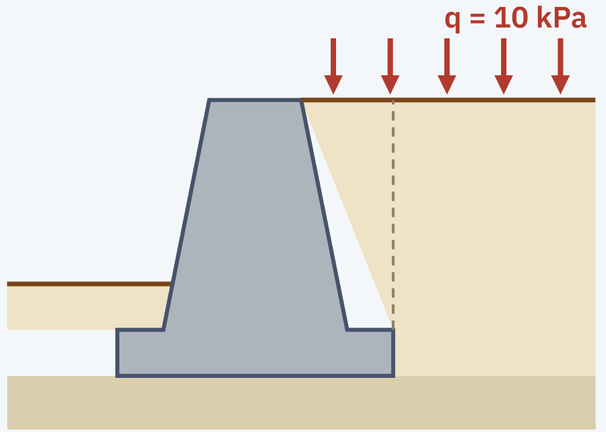
VOORBEELD

Gegeven

Wand en belastingen	**Muur in Voorbeeld 1–5:** $B = 3.0$ **m;** $W_m = 115.5,\ W_s = 33.75,\ W_{toe} = 4.95\ \mathrm{kN/m}$**;** $P_A = 27.0,\ P_Q = 10.0\ \mathrm{kN/m}$
Weerstand	$\mu_b = 0.55$**; puntweerstand** $P_P = 12.0$ **kN/m (w = 1/3);** $q_{all} = 200$ **kPa**
Vereist	$FS_s \geq 1.5,\ \ FS_o \geq 2.0$**; de zool moet volledig in contact zijn**

GEVRAAGD

FS_s, FS_o, x_R, e, q_{max}, q_{min} en het resultaat van elke toets.



Oplossing (1/3)

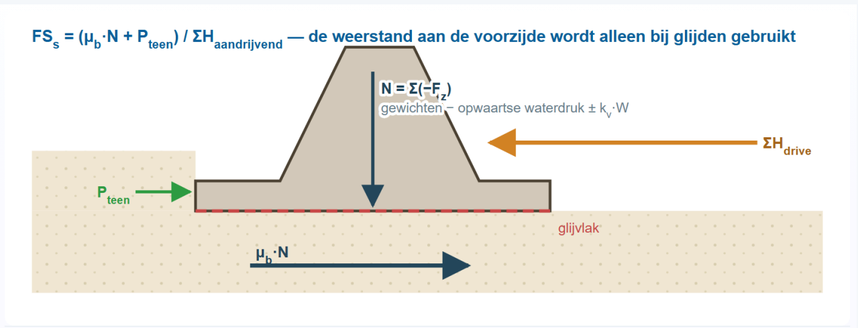
OPLOSSING

1 Wrijving over de basis: N = W_m + W_s + W_{teen} (exclusief Q_{hiel})

$$N = 115.50 + 33.75 + 4.95 = \mathbf{154.20}\ \text{kN/m}$$

$$\mu_b N = 0.55(154.20) = 84.81\ \text{kN/m}$$

$$FS_s = \frac{84.81 + 12.0}{37.0} = \mathbf{2.616}\ \geq 1.5\ \checkmark$$



Oplossing (2/3)

OPLOSSING

2 Kantelmoment (ten opzichte van de teen; alleen aandrijvende krachten)

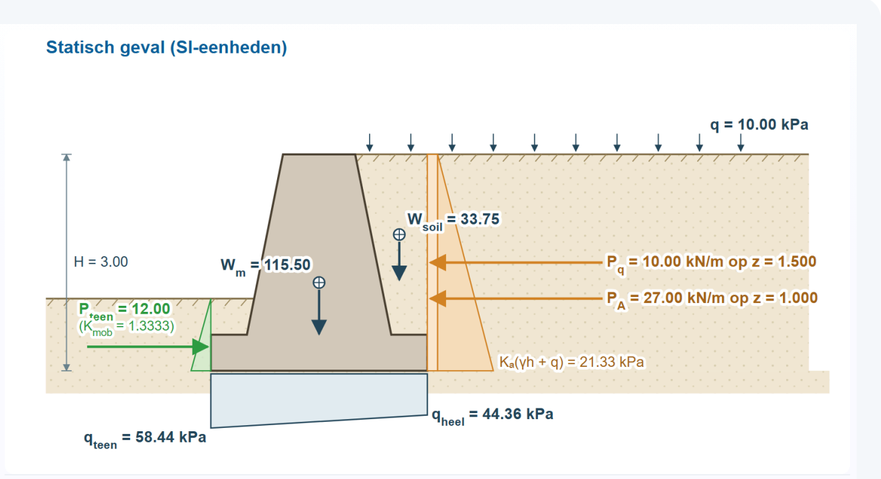
$$M_o = P_A(1.00) + P_Q(1.50) = 27.0 + 15.0 = \mathbf{42.0}\ \text{kN}\cdot\text{m/m}$$

3 Weerstandbiedend moment: muur + grondblok + aanvulling aan de voorzijde

$$M_r = W_m\bar{x}_m + W_s\bar{x}_s + W_{toe}\bar{x}_{toe}$$

$$= 173.25 + 88.13 + 1.36 = \mathbf{262.74}$$

$$FS_o = \frac{262.74}{42.0} = \mathbf{6.256}\ \geq 2.0\ \checkmark$$



Oplossing (3/3)

OPLOSSING

4 Locatie van de resultante en excentriciteit

$$\Sigma M = M_o - M_r = 42.00 - 262.74 = -220.74$$

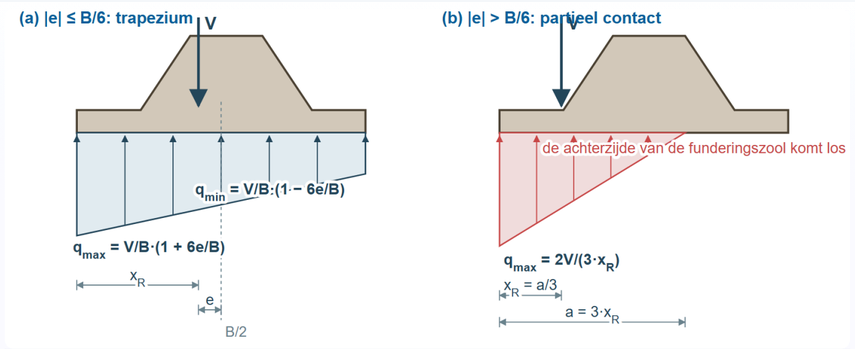
$$x_R = -\frac{\Sigma M}{V} = \frac{220.74}{154.2} = \mathbf{1.4315}\ \text{m}$$

$$e = \frac{B}{2} - x_R = \mathbf{0.0685}\ \text{m} \ \leq\ \frac{B}{6} = 0.500\ \checkmark$$

5 Zoolspanningen (volledige contactdruk)

$$q_{max} = \frac{154.2}{3}\left(1 + \frac{6(0.0685)}{3}\right) = \mathbf{58.44}\ \text{kPa}$$

$$q_{min} = \mathbf{44.36}\ \text{kPa}$$



FS_s = **2.62**, FS_o = **6.26**, e = 0.068 m, q_{max} = **58.4 kPa** ≤ 200, q_{min} = 44.4 kPa > 0: **in de statische situatie voldoen alle toetsen**.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Hydrostatisch water aan beide zijden, lineaire opwaartse waterdruk aan de basis

THEORIE

De waterdruk is isotroop en werkt loodrecht op elk oppervlak dat hij raakt. Het vrij lichaam wordt op drie grensvlakken door water omgeven: het achterste drukvlak, de voorzijde van de wand en het ondervlak van de zool. Elk daarvan is een aparte post in het krachtenoverzicht:

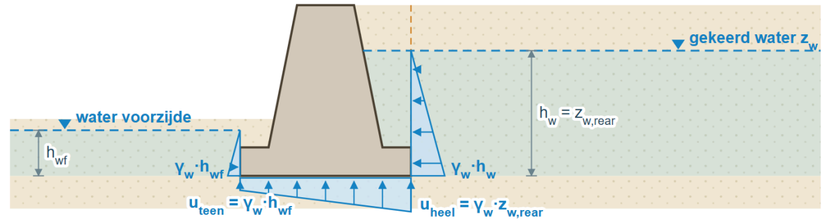
$$U_{rear} = \tfrac{1}{2}\gamma_w h_w^2 \;\; (h_w/3) \qquad U_{front} = \tfrac{1}{2}\gamma_w h_{wf}^2 \;\; (h_{wf}/3,\ \text{naar achteren})$$

De poriënwaterspanning onder de zool verandert **lineair** van de last bij de teen naar de last bij de hiel (lineair spanningsverloop):

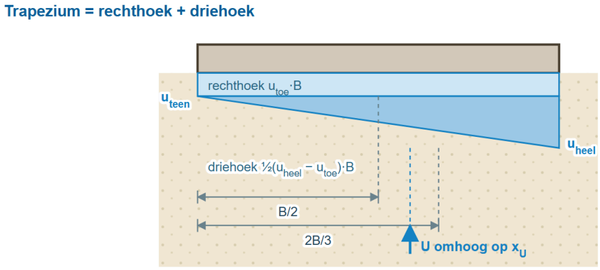
$$U = \frac{B\,(u_{toe} + u_{heel})}{2} \qquad x_U = \frac{B\,(u_{toe} + 2u_{heel})}{3\,(u_{toe} + u_{heel})}$$

De opwaartse waterdruk werkt omhoog (F_z = +U): hij verlaagt N′ en daarmee de wrijving aan de basis, en voegt een kantelmoment $U \cdot x_U$ toe.

$h_W = H - z_W$ (z_W: diepte van het grondwater vanaf de bovenkant van de damwand); de waterhoogte aan de voorzijde h_{Wf} werkt naar de achterzijde en verkleint de netto stuwkracht. Als de waterstanden verschillen, moet de hydraulische stabiliteit (kwel) afzonderlijk worden beschouwd.



U = B·(u_toe + u_heel)/2 op x = B·(u_toe + 2u_heel) / (3(u_toe + u_heel))



Opgave

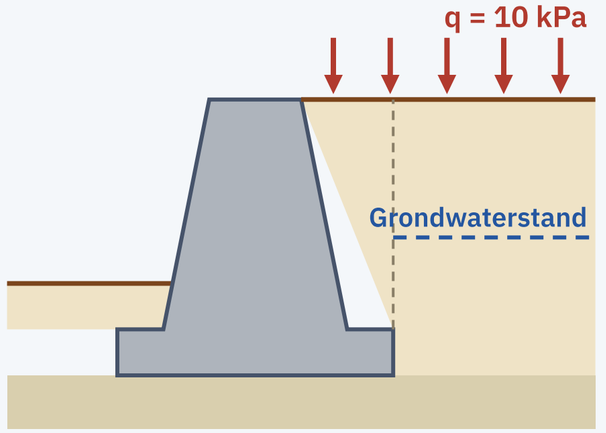
VOORBEELD

Gegeven

Wand en grond	**Keermuur en aanvulling uit voorbeelden 1–5 ($\gamma = 18,\ \gamma_{sat} = 20\ \mathrm{kN/m^3},\ \varphi' = 30^\circ,\ q = 10$ kPa); statische situatie**
Water	**in de aanvulling ligt de grondwaterstand 1.5 m onder de top van de wand ($h_w = 1.5$ m); geen water aan de voorzijde; lineaire opwaartse waterdruk onder de zool**

GEVRAAGD

Verandering van de gronddruk en het water; **opwaartse waterdruk** en **N**; FS_s, FS_o, e, q_{max}.



Oplossing (1/2)

OPLOSSING

1 Gronddruk (γ boven, γ′ = 20 − 9.81 = 10.19 onder) en waterdruk

$$P_A = \tfrac{1}{2}K_a\gamma d_1^2 + K_a\gamma d_1 d_2 + \tfrac{1}{2}K_a\gamma' d_2^2$$

$$= 6.75 + 13.50 + 3.82 = \mathbf{24.07}\ \text{kN/m}\ \ (z = 1.061\ \text{m})$$

$$U_{rear} = \tfrac{1}{2}(9.81)(1.5)^2 = \mathbf{11.04}\ \text{kN/m}\ \ (z = 0.50\ \text{m}) \qquad P_Q = 10.0$$

2 Opwaartse waterdruk (u = 0 aan de teen, u = 9.81·1.5 = 14.72 kPa aan de hiel; driehoekig)

$$U = \tfrac{1}{2}(14.72)(3.0) = \mathbf{22.07}\ \text{kN/m}\ (\text{opwaarts})\ \ \text{at}\ x_U = \tfrac{2B}{3} = 2.00\ \text{m}$$

Oplossing (2/2)

OPLOSSING

3 Effectieve normaalkracht en wrijving (met grondblok γ_{sat}: W_s = 34.95)

$$N = W_m + W_s + W_{toe} - U = 115.50 + 34.95 + 4.95 - 22.07 = \mathbf{133.33}\ \text{kN/m}$$

$$FS_s = \frac{0.55(133.33) + 12.0}{24.07 + 10.0 + 11.04} = \frac{85.33}{45.11} = \mathbf{1.892}$$

4 Kantelen en zool

$$M_o = 25.54 + 15.00 + 5.52 + 44.14 = 90.20 \ \ (P_A,\ P_Q,\ U_{rear},\ \text{opwaartse waterdruk}) \qquad M_r = 265.98$$

$$FS_o = \frac{265.98}{90.20} = \mathbf{2.949} \qquad x_R = \frac{175.78}{133.33} = 1.318\ \text{m} \quad e = 0.182\ \text{m}$$

$$q_{max} = \mathbf{60.58} \qquad q_{min} = \mathbf{28.30}\ \text{kPa}$$

Water verlaagde FS_s van 2.62 naar **1.89**, FS_o van 6.26 naar **2.95** en q_{min} van 44.4 naar 28.3 kPa (de opwaartse waterdruk verlaagde N met 22.1 kN/m en voegde 44.1 kN·m/m aan kantelmoment toe); de toetsen voldoen nog steeds.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Mononobe–Okabe-stuwkracht en traagheid van de muur

THEORIE

In de pseudostatische methode ondervindt elke massa een horizontale kracht $k_h mg$ en een verticale kracht $\pm k_v mg$; de kritieke richting is die waarin de traagheid naar voren duwt (in dezelfde richting als de stuwkracht). Zwaartekracht en traagheid werken samen als een zwaartekrachtveld dat over θ is geroteerd; de wig van Coulomb wordt met de traagheidskrachten opgelost (Mononobe–Okabe). In het verticale vlak, bij een horizontale aanvulling (δ = β = 0):

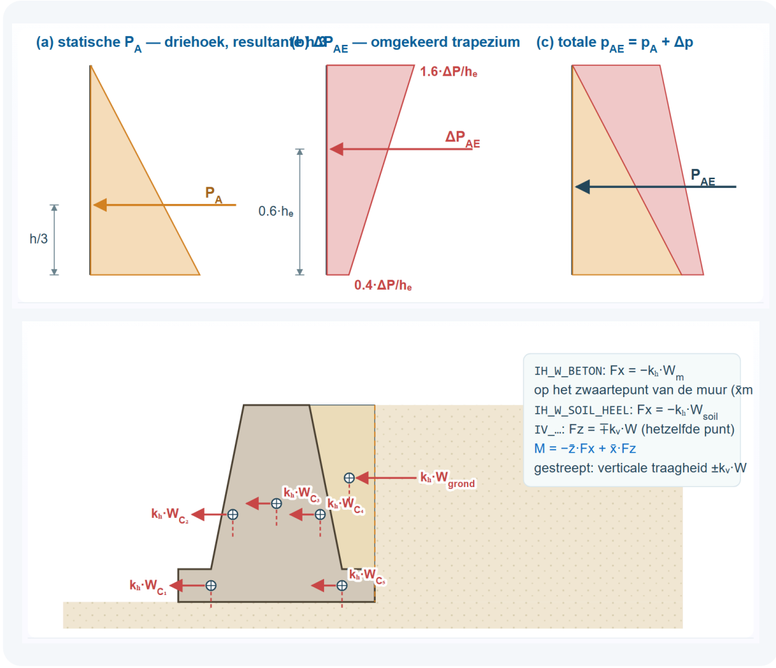
$$\theta = \tan^{-1}\frac{k_h}{1-k_v} \qquad K_{AE} = \frac{\cos^2(\varphi'-\theta)}{\cos^2\theta\left[1+\sqrt{\dfrac{\sin\varphi'\sin(\varphi'-\theta)}{\cos\theta}}\right]^2} \qquad P_{AE} = \left(\tfrac{1}{2}\gamma h^2 + qh\right)K_{AE}$$

Als $\varphi' - \theta < 0$, kan geen enkele wig in evenwicht blijven: "geen oplossing", de toetsen worden als niet voldaan beschouwd.

Verdeling: P_{AE} geeft de grootte, niet de aangrijpingsplaats. $\Delta P_{AE} = P_{AE} - P_{A,statisch}$ als omgekeerd trapezium (boven 1.6ΔP/h, onder 0.4ΔP/h; resultante op **0.6h**); het statische deel behoudt zijn statische vorm.

Traagheid: de wand, het grondblok en de vooraanvulling duwen voorwaarts met kracht $k_h W$ in hun zwaartepunt; als $k_v > 0$, worden beide gevallen met $(1 \pm k_v)$ berekend en is de kleinste FS maatgevend. De hydrodynamische waterdruk $(7/12)k_h\gamma_w h_w^2$ (op $0.4h_w$) wordt toegevoegd.

De passieve weerstand aan de voorzijde wordt bij een aardbeving met $\eta_{p,E}$ vermenigvuldigd; standaard **0** (geen verrekening).



Opgave

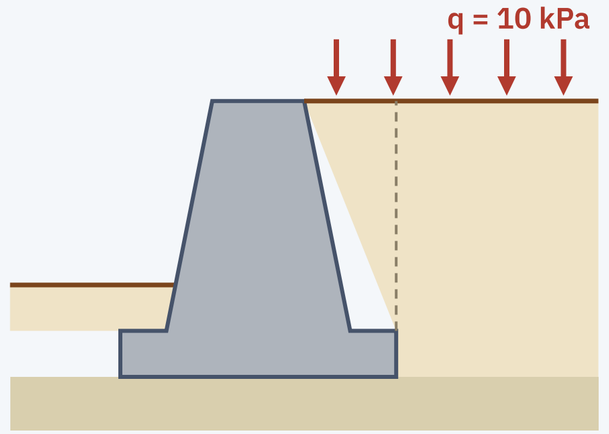
VOORBEELD

GEVRAAGD

θ, **K_{AE}**, **P_{AE}**, **ΔP_{AE}**, **$\bar{z}$**; traagheidskrachten; FS_s, FS_o, e, q_{max}.

Gegeven

Wand en grond	**De wand en de aanvulling uit Voorbeelden 1–6 (statisch FS_s = 2.62; FS_o = 6.26)**
Aardbeving	$k_h = 0.15$, $k_v = 0$; **puntweerstandscredit** $\eta_{p,E} = 0$; **vereist** $FS_s,\ FS_o \geq 1.1$



Oplossing (1/3)

OPLOSSING

1 Seismische hoek en coëfficiënt

$$\theta = \tan^{-1} 0.15 = 8.53^\circ$$

$$\sqrt{\sin 30^\circ \sin(30^\circ - 8.53^\circ)/\cos 8.53^\circ} = 0.4302$$

$$K_{AE} = \frac{\cos^2(21.47^\circ)}{\cos^2 8.53^\circ\,(1+0.4302)^2} = \mathbf{0.4329}$$

2 Dynamische stuwkracht en seismische toename (statisch $P_A + P_Q$ = 37.0 kN/m)

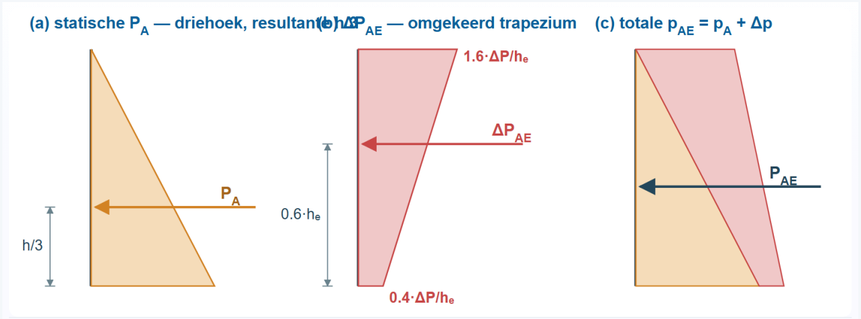
$$P_{AE} = (81+30)(0.4329) = \mathbf{48.06}\ \text{kN/m}$$

$$\Delta P_{AE} = 48.06 - 37.0 = \mathbf{11.06}\ \text{kN/m}\ \ (0.6h)$$

3 Aangrijpingshoogte van de belasting

$$\bar{z}_{AE} = [27.0(1.00) + 10.0(1.50) + 11.06(1.80)]/48.06$$

$$= 61.90/48.06 = \mathbf{1.288}\ \text{m}$$



Oplossing (2/3)

OPLOSSING

4 Traagheidskrachten $k_h W$ (in de zwaartepunten, naar voren)

$$IH_m = 0.15(115.50) = 17.325 \quad (z = 1.222\ \text{m})$$

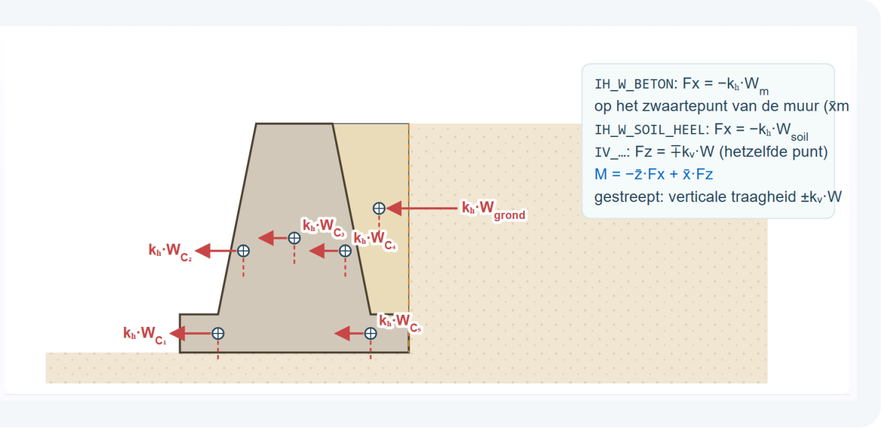
$$IH_s = 0.15(33.75) = 5.062 \quad (z = 1.889\ \text{m})$$

$$IH_{toe} = 0.15(4.95) = 0.743 \quad (z = 0.758\ \text{m})$$

5 Glijden (geen bijdrage van de frontweerstand)

$$\Sigma H_{drive} = 48.06 + 17.32 + 5.06 + 0.74 = 71.19$$

$$FS_{s,E} = \frac{\mu_b N}{\Sigma H_{drive}} = \frac{84.81}{71.19} = \mathbf{1.191} \ \geq 1.1 \ \checkmark$$



Oplossing (3/3)

OPLOSSING

6 Kantelen en plaats van de resultante

$$M_{o,E} = P_{AE}\bar{z} + \Sigma IH\, z = 61.90 + 21.18 + 9.56 + 0.56 = 93.20$$

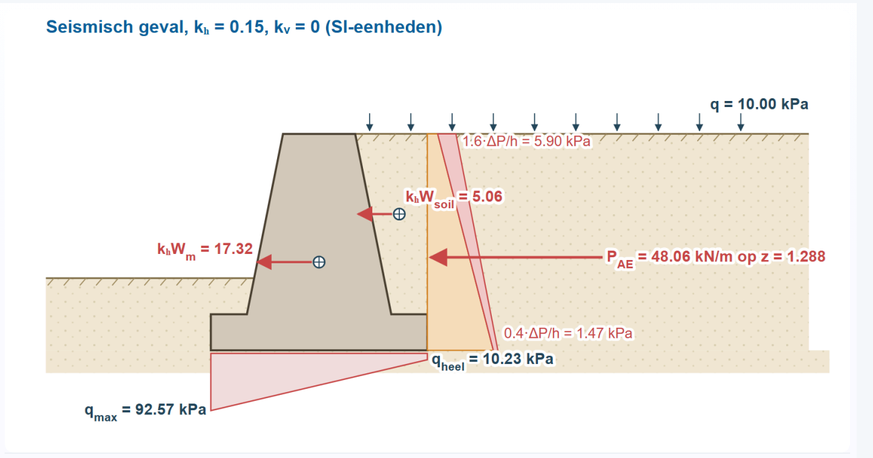
$$FS_{o,E} = \frac{262.74}{93.20} = \mathbf{2.819} \;\geq 1.1$$

$$x_R = \frac{262.74 - 93.20}{154.2} = 1.099 \text{ m} \qquad e = \mathbf{0.401} \text{ m}$$

7 Zoolspanningen (|e| = 0.401 m ≤ B/6 = 0.50 m: volledig contact)

$$q_{max} = \frac{154.2}{3}\left(1 + \frac{6(0.401)}{3}\right) = \mathbf{92.57} \text{ kPa}$$

$$q_{min} = \mathbf{10.23} \text{ kPa}$$



Bij de aardbeving FS_s = **1.19**, FS_o = **2.82**, e = **0.401 m**, q_{max} = **92.6 kPa**; de aardbeving veranderde FS_s van 2.62 naar 1.19 en e van 0.068 naar 0.401 m: **glijden** en **excentriciteit** zijn de maatgevende toetsen.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Waar de toetsen eindigen

THEORIE

Deze toetsen beschouwen de keermuur op haar fundering als **één star blok**: de **externe stabiliteit** van de muur. Een gewichtskeermuur van natuursteen of massa beton kan ook **in zichzelf** bezwijken (vooral bij een hoge of slanke doorsnede, bij droog stapelwerk, bij zwakke mortel en bij een aardbeving); deze toetsen worden uitgevoerd met de effecten die deze module levert.

Cohesieloze aanvulling ($c' = 0$); aanvulling met twee grondsoorten of gelaagde aanvulling zit niet in deze module. Het oppervlak van de aanvulling is vlak of heeft één helling.

Wrijving onder de zool $\mu_b = \tan \delta_b$ (voor metselwerk/beton doorgaans $2/3\varphi'–\varphi'$); er wordt geen adhesie gebruikt. De volledige passieve weerstand aan de voorzijde wordt bij de wrijvingsreserve opgeteld en wordt niet gebruikt bij kantelen en draagvermogen.

Berekening per 1.00 m lengte van de muur; de horizontale drukken door strook- en puntbelasting worden met Boussinesq (starre wand) toegevoegd.

Kantelingseffecten (hydraulische stabiliteit, kwel, macrostabiliteit, zetting) vallen buiten het bereik van deze module.

Samenvatting

Belangrijkste punten

Vrij lichaam = de muur + de grond die ermee meebeweegt; de druk grijpt aan **op het verticale vlak aan de achterrand van de funderingszool** ($\delta = \beta$); één tekenafspraak: $M = x \cdot F_z - z \cdot F_x$, kantelen positief

Gewicht: $W_i = \gamma_m A_i$, $\bar{x} = \Sigma W_i \bar{x}_i / \Sigma W_i$; het grondblok en de vooraanvulling bewegen mee met de wand; de bovenbelasting op de hiel (Q_{heel}) komt in geen enkele toets voor

Actief: $P_A = \frac{1}{2} K_a \gamma h^2$ $(h/3)$, $P_Q = K_a q h$ $(h/2)$; bij een hellende aanvulling $K_{a\beta}$ (Rankine op een verticaal vlak = Coulomb); **passief**: $K_{mob} = wK_p + (1 - w)K_0$, alleen bij glijden

Glijden $FS_s = (\mu_b N + P_P)/\Sigma H_{drive}$; **kantelen** $FS_o = \Sigma M_{res}/\Sigma M_{ov}$ (teen); **draagvermogen**: $x_R = -\Sigma M/V$, $e = B/2 - x_R$, $q = V/B(1 \pm 6e/B)$, als $|e| > B/6$ dan $q_{max} = 2V/(3x_R)$

Water: gewicht met γ_{sat} + U_{rear} als afzonderlijke post; opwaartse waterdruk u_{toe} aan de teen – u_{heel} aan de hiel, lineair verlopend: verlaagt N' en verhoogt het kantelend moment

Aardbeving: $\theta = \tan^{-1} k_h/(1 - k_v)$; $P_{AE} = (\frac{1}{2}\gamma h^2 + qh)K_{AE}$; ΔP_{AE} op 0.6h; $k_h W$ traagheid; passieve bijdrage aan de voorzijde $\eta_{p,E}$ (standaard 0)

Literatuur

De drie theorieën van de module en de bron waarvan de presentatie van hun gesloten formules (Ka, Kp, KAE) in de handleiding wordt gevolgd. Alles wat daar niet uit is afgeleid, is een aanname van deze module en wordt als zodanig in de tekst aangegeven.

Coulomb C.A. (1776) Essai sur une application des règles de maximis et minimis à quelques problèmes de statique relatifs à l'architecture. Mémoires de l'Académie Royale des Sciences 7, Paris.

Das B.M. (2016) Principles of Foundation Engineering, 8th ed. Cengage Learning, Boston.

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

Rankine W.J.M. (1857) On the stability of loose earth. Philosophical Transactions of the Royal Society of London 147:9–27.

OPMERKING

Alle numerieke voorbeelden zijn geproduceerd met de eigen berekeningsmotor van de module; de module geeft dezelfde waarden. Het stapsgewijze voorbeeld op de modulepagina is ook deze muur (H = 3 m stenen muur, q = 10 kPa, k_h = 0.15).

GeoTerva

Online geotechnische berekeningen

Van theorie naar praktijk

Voer in GeoTerva de doorsnede, de aanvulling, de bovenbelasting, het water en de aardbevingscoëfficiënten van uw eigen wand in; de module geeft samen de krachttabel, de drie toetsen en de spanningen op de zool.

Module openen →

Theoriepagina →

Openen op de smartphone

Proefmodules vereisen geen registratie.

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