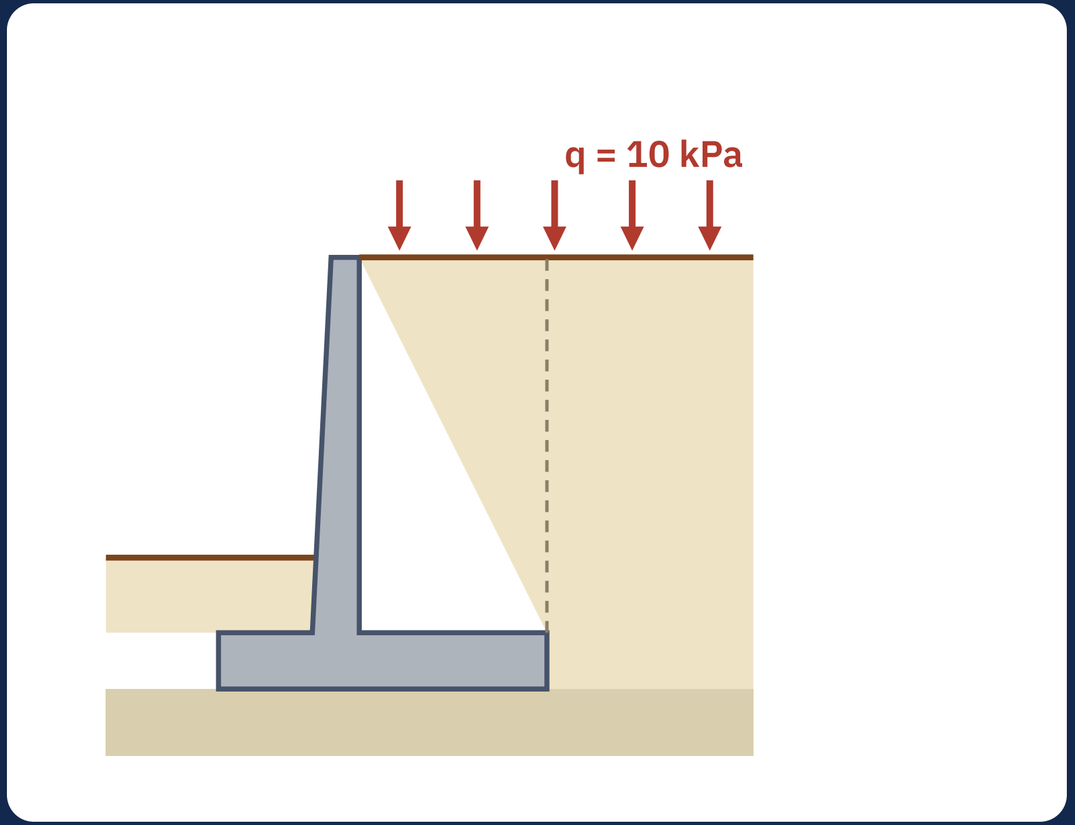
Geotechnisch college · Keermuren

Hoekkeermuur

College: externe stabiliteit van een gewapend betonnen hoekkeermuur (glijden, kantelen, draagvermogen) en de doorsnedekrachten in de opgaande wand, de teen en de hielplaat; hielblok, gronddruk, water, aardbeving, afschuiftand en ontlastplateau; rekenvoorbeelden bij elk onderwerp.

- Opgaande wand + funderingszool
- Glijden · kantelen · draagvermogen
- Snijkrachten in wand, teen en hiel
- Afschuiftand · ontlastplateau
- Water en aardbeving



Wat leren we in dit college?

- Hoekkeermuur: **opgaande wand + funderingszool** (teen L_t, hiel L_h), het gewicht en het zwaartepunt bepalen uit de samenstellende delen
- Het **grondblok** boven de teen en het **verticale drukvlak** aan de achterrand van de fundering; actieve stuwdruk, bovenbelasting en passieve weerstand aan de voorzijde
- Het lezen van de toetsen **glijden, kantelen, excentriciteit en draagvermogen** en van de aardbevingssituatie (Mononobe–Okabe + traagheid)
- **Uit de bodemdruk** de dwarskracht- en momenteffecten op de teen- en hielplaat, en uit de stuwdruk op **de opgaande wand**
- Hoe de **afschuiftand** en de **ontlastplateau** de veiligheid verhogen; het effect van water en opwaartse waterdruk
- Te zien **hoe een niet-voldoende doorsnede wordt herzien** (glijden en excentriciteit bij aardbeving)

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 geldt per 1.00 m lengte van de wand. Voorbeeld: H = 4.0 m opgaande wand, funderingszool 0.60 m, B = 3.5 m gewapend-betonnen wand (24 kN/m³), q = 10 kPa.

Opgaande wand, funderingszool en teenconstructie

THEORIE

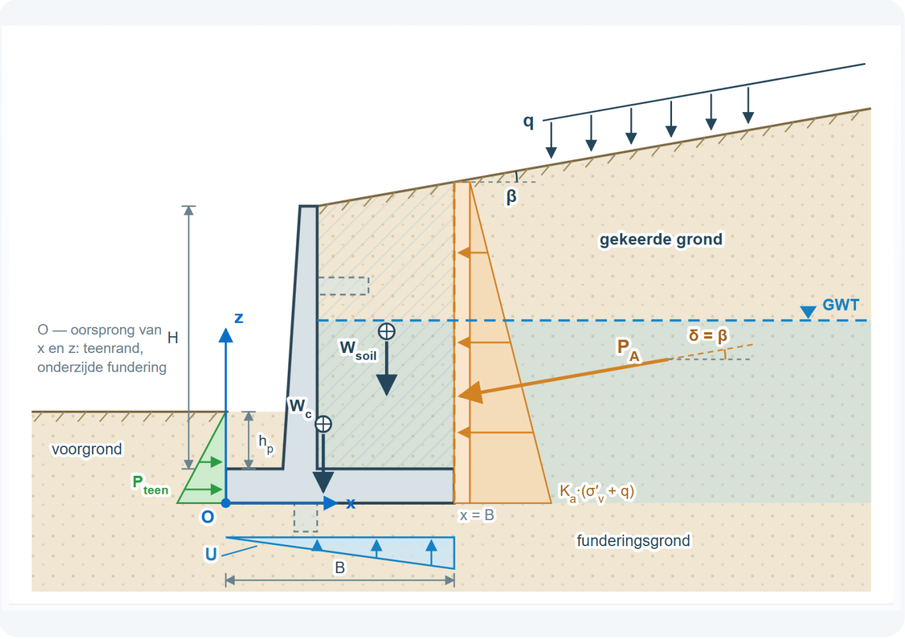
De hoekkeermuur weerstaat glijden en kantelen ook **door het gewicht van de grond boven de funderingszool**: niet alleen het eigen gewicht van de muur, maar ook het grondblok boven de hiel is stabiliserend. Module:

$$B = L_t + t_b + L_h \qquad z_T = t_f + H$$

Opgaande wand: hoogte H; dikte t_t bovenaan, t_b onderaan (verticale rug, hellend front); **funderingszool**: dikte t_f, teen L_t, hiel L_h; beton 24 kN/m³.

Grond: cohesieloze ophoging (c′ = 0), vlak of hellend maaiveld, bovenbelasting q, grondwater, en aan de voorzijde een ophoging van hoogte h_p op de funderingszool.

Opties: afschuiftand, ontlastplateau; **toetsen**: glijden, kantelen, excentriciteit, draagvermogen; **doorsnedegrootheden**: opgaande wand, teen, hiel, ontlastplateau, tand.



Funderingszool + rechthoek van de opgaande wand + driehoek van de opgaande wand

THEORIE

Het gewicht van de muur wordt in drie eenvoudige vormen verdeeld (bekende oppervlakte, zwaartepunt); het moment ervan om de teen is weerstandbiedend:

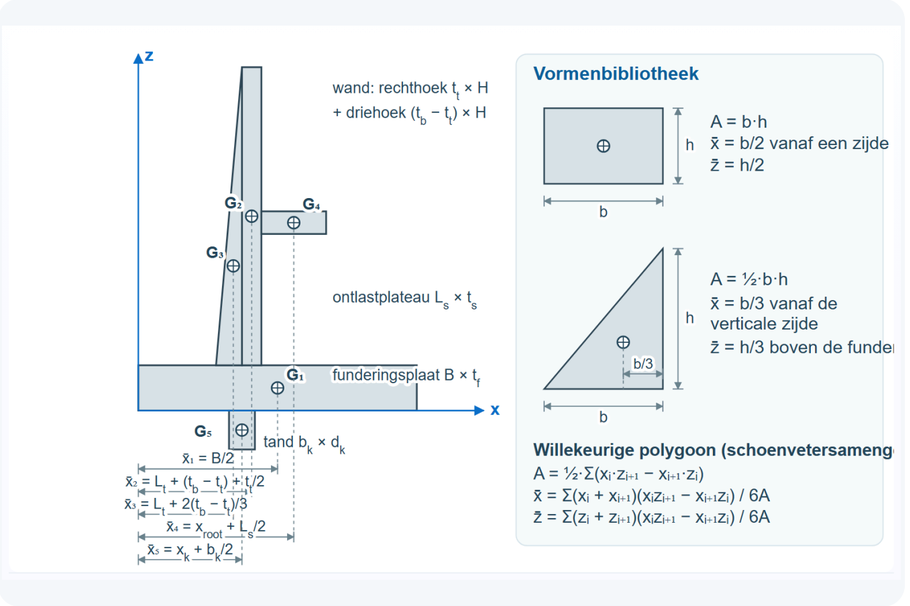
$$W_i = \gamma_c A_i \qquad W_c = \sum W_i \qquad \bar{x}_c = \frac{\sum W_i \bar{x}_i}{W_c} \qquad \bar{z}_c = \frac{\sum W_i \bar{z}_i}{W_c}$$

Voetplaat: A = B t_f, $\bar{x}$ = B/2, $\bar{z}$ = t_f/2.

Rechthoek van de opgaande wand (aansluitend aan de rug): A = t_tH, $\bar{x}$ = L_t + (t_b − t_t) + t_t/2, $\bar{z}$ = t_f + H/2.

Driehoek van de opgaande wand (vooraanzicht talud): A = ½(t_b − t_t)H, $\bar{x}$ = L_t + 2(t_b − t_t)/3, $\bar{z}$ = t_f + H/3.

In het krachtenoverzicht is de muur één post: F_z = −W_c op $\bar{x}_c$; $\bar{z}_c$ wordt alleen gebruikt voor horizontale traagheid (aardbeving).



Opgave

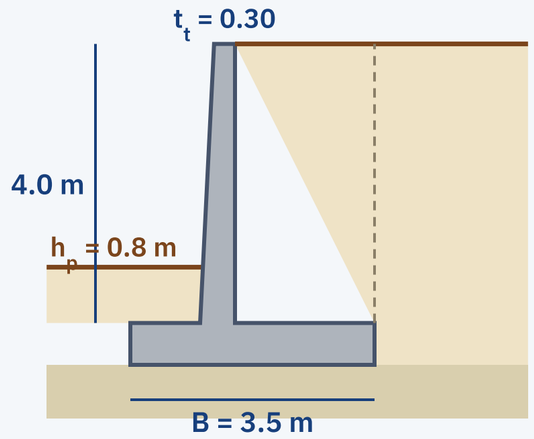
VOORBEELD

GEVRAAGD

Oppervlakte, gewicht en ligging van de drie delen; $\mathbf{W_c}$, $\mathbf{\bar{x}_c}$, $\mathbf{\bar{z}_c}$.

Gegeven

Doorsnede	$H = 4.0$ **m;** $t_t = 0.30$**,** $t_b = 0.50$ **m;** $L_t = 1.00$**,** $L_h = 2.00$ **m;** $t_f = 0.60$ **m (B = 3.5 m)**
Materiaal	**gewapend beton:** $\gamma_c = 24\ \mathrm{kN/m^3}$



Oplossing

OPLOSSING

1 Deelvlakken (bijv. driehoek: A = ½(0.50 − 0.30)(4.0) = 0.40; $\bar{x}$ = 1.00 + 2(0.20)/3 = 1.133; $\bar{z}$ = 0.60 + 4.0/3 = 1.933)

Deel	A (m²)	$\bar{x}$ (m)	$\bar{z}$ (m)	W = 24A (kN/m)	W·$\bar{x}$	W·$\bar{z}$
Basisplaat	2.100	1.750	0.300	50.40	88.20	15.12
Rechthoek van de schacht	1.200	1.350	2.600	28.80	38.88	74.88
Driehoek van de opgaande wand	0.400	1.133	1.933	9.60	10.88	18.56
Totaal				**88.80**	**137.96**	**108.56**

2 Zwaartepunt

$$\bar{x}_c = \frac{137.96}{88.80} = \mathbf{1.554}\ \text{m} \qquad \bar{z}_c = \frac{108.56}{88.80} = \mathbf{1.223}\ \text{m}$$

Het eigen gewicht van de muur **W_c = 88.80 kN/m**, $\bar{x}_C$ = 1.55 m vanaf de teen, $\bar{z}_C$ = 1.22 m vanaf de basis; het moment M = −137.96 kN·m/m (weerstandbiedend).

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Grond en drukvlak die met de wand meebewegen

THEORIE

De grond boven de hiel van de funderingszool kan niet ten opzichte van de zool glijden: als de muur beweegt, beweegt die **ermee mee**. De bezwijkvlakken beginnen **aan de achterrand van de hiel**, niet aan de achterzijde van de opgaande wand. Vrij lichaam = muur + hielblok; het buitenvlak ervan is het **verticale drukvlak** op x = B (grond tegen grond: geen wandwrijving, stuwkracht δ = β):

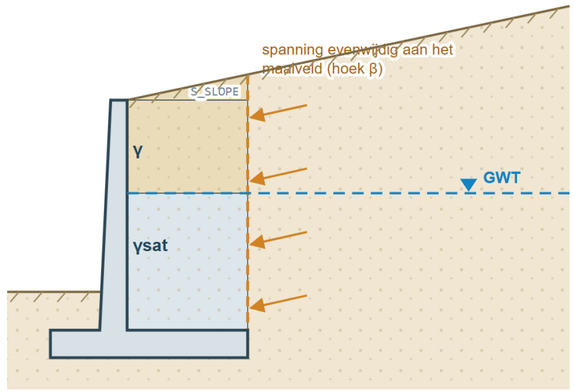
Het gewicht van het hielblok $W_s = \gamma\, L_h\, H$ (opgesplitst in vochtige/verzadigde zones; omdat met totale spanning wordt gerekend, wordt onder water γ_{sat} gebruikt en blijft de waterstuwkracht een afzonderlijke post).

Bij de teen beweegt de ophoging boven de zoolplaat (h_p) mee met de plaat: verticale belasting W_{toe}.

Bovenbelasting op de hiel $\mathbf{Q_{heel} = qL_h}$ is gunstig, maar omdat het een belasting is die ook afwezig kan zijn, **gaat zij in geen enkele toets**; het horizontale effect wordt altijd meegerekend.

De hoogte van het drukvlak $h = t_f + H$ (inclusief de stijging van het maaiveld).

Verticaal vlak op de hiel (alle methoden)



Opgave

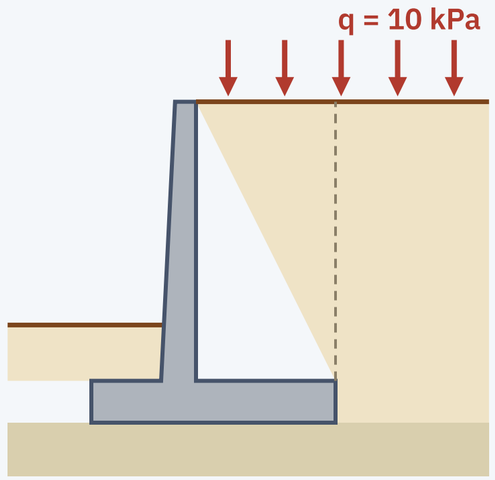
VOORBEELD

Gegeven

Wand	**Doorsnede uit Voorbeeld 1; hoogte vooraanvulling $h_p = 0.80$ m (boven de funderingszool)**
Grond	**droge aanvulling: $\gamma = 18\ \mathrm{kN/m^3}$, $\varphi' = 30°$; horizontaal maaiveld**
Bovenbelasting	$q = 10$ **kPa**

GEVRAAGD

Het **gewicht en de plaats** van het hielblok; de **teenaanvulling**; $\mathbf{Q_{heel}}$; de totale verticale belasting N.



Oplossing

OPLOSSING

1 Hielblok (rechthoek L_h × H, achter de opgaande wand)

$$A_s = L_h H = 2.00(4.0) = 8.0\ \text{m}^2 \qquad W_s = 18(8.0) = \mathbf{144.0}\ \text{kN/m}$$

$$\bar{x}_s = L_t + t_b + \frac{L_h}{2} = 2.50\ \text{m} \qquad \bar{z}_s = t_f + \frac{H}{2} = 2.60\ \text{m}$$

2 Teenaanvulling (trapezium: L_t = 1.00 aan de basis, $x_{teen}(h_p)$ = 1.04 bovenaan) en bovenbelasting

$$A_{toe} = \tfrac{1}{2}(1.00 + 1.04)(0.80) = 0.816\ \text{m}^2 \quad W_{toe} = 18(0.816) = \mathbf{14.69}\ \text{kN/m}\ (\bar{x} = 0.510)$$

$$Q_{heel} = qL_h = 10(2.00) = \mathbf{20.0}\ \text{kN/m}\ (\text{valt onder geen enkele toets})$$

N = W_c + W_s + W_{toe} = 88.80 + 144.00 + 14.69 = **247.49 kN/m**; Q_{heel} = 20.00 kN/m is in de tabel het "onbenutte" post.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Stuwdruk in het verticale vlak, bovenbelasting en gecombineerde passieve druk

THEORIE

Het drukvlak ligt op hoogte h = t_f + H. Omdat de aanvulling horizontaal is en δ = β = 0, geldt Rankine = Coulomb:

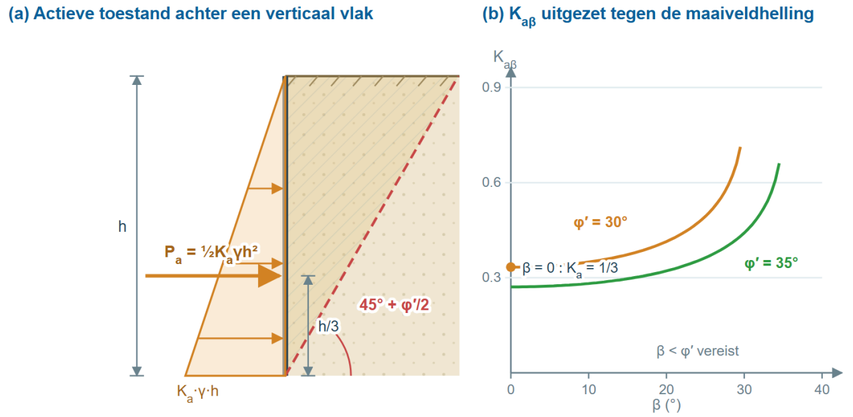
$$K_a = \frac{1-\sin\varphi'}{1+\sin\varphi'} \qquad P_A = \tfrac{1}{2}K_a\gamma h^2\ (h/3) \qquad P_Q = K_a q h\ (h/2)$$

Bij een hellend ophoging is de spanning op het vlak evenwijdig aan het oppervlak ($K_{a\beta}$) en is de verticale component van de stuwkracht een weerstandbiedende kracht. Voorweerstand (alleen bij glijden):

$$K_{mob} = wK_p + (1-w)K_0 \qquad P_P = \tfrac{1}{2}K_{mob}\gamma D_p^2\ (D_p/3) \qquad D_p = t_f + h_p$$

Standaard geldt w = 1/3; als de grond vóór de wand kan worden verwijderd, wordt de bijdrage verlaagd met h_p = 0 of h_{ignore}; **bij kantelen en draagvermogen wordt geen weerstand aan de voorzijde gebruikt**.

Details (gelijkwaardigheid Rankine/Coulomb, K_{mob}, h_{ignore}) staan in de presentatie over de gewichtskeermuur.



Opgave

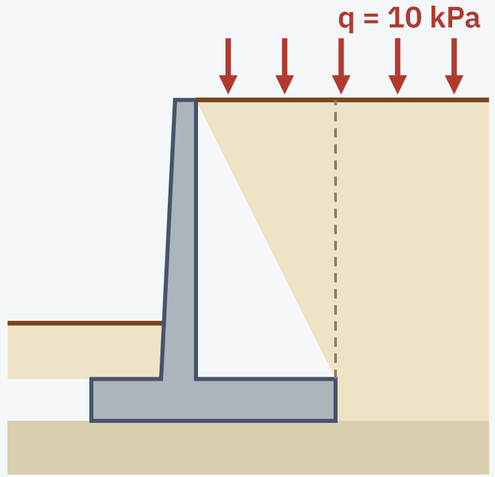
VOORBEELD

Gegeven

Wand en grond	**De keermuur uit Voorbeelden 1–2: h = t_f + H = 4.60 m;** $\gamma = 18\ \mathrm{kN/m^3},\ \varphi' = 30^\circ$**; horizontaal maaiveld;** $q = 10$ **kPa**
Voorgelegen grond	$D_p = t_f + h_p = 1.40$ **m; w = 1/3**

GEVRAAGD

P_A, P_Q, P_P en het kantelmoment ten opzichte van de teen.



Oplossing

OPLOSSING

1 K_a = 0.3333; stuwdrukken (h = 4.60 m)

$$P_A = \tfrac{1}{2} K_a \gamma h^2 = \tfrac{1}{2}(0.3333)(18)(21.16) = \mathbf{63.48}\ \mathrm{kN/m} \quad (z = 1.533\ \mathrm{m})$$

$$P_Q = K_a q h = 0.3333(10)(4.6) = \mathbf{15.33}\ \mathrm{kN/m} \quad (z = 2.30\ \mathrm{m})$$

2 Weerstand aan de voorzijde: K_{mob} = ⅓(3.00) + ⅔(0.50) = 1.333

$$P_P = \tfrac{1}{2}(1.333)(18)(1.40)^2 = \mathbf{23.52}\ \mathrm{kN/m} \quad (z = D_p/3 = 0.467\ \mathrm{m})$$

3 Horizontale stuwkracht en kantelmoment (ten opzichte van de teen)

$$\Sigma H_{drive} = 63.48 + 15.33 = \mathbf{78.81}\ \mathrm{kN/m}$$

$$M_o = 63.48(1.533) + 15.33(2.30) = 97.34 + 35.27 = \mathbf{132.60}\ \mathrm{kN{\cdot}m/m}$$

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Vier toetsen uit dezelfde krachttabel

THEORIE

$$FS_s = \frac{\mu_b N + P_{toe}}{\Sigma H_{drive}} \qquad FS_o = \frac{\Sigma M_{res}}{\Sigma M_{ov}} \qquad x_R = -\frac{\Sigma M}{V} \qquad e = \frac{B}{2} - x_R$$

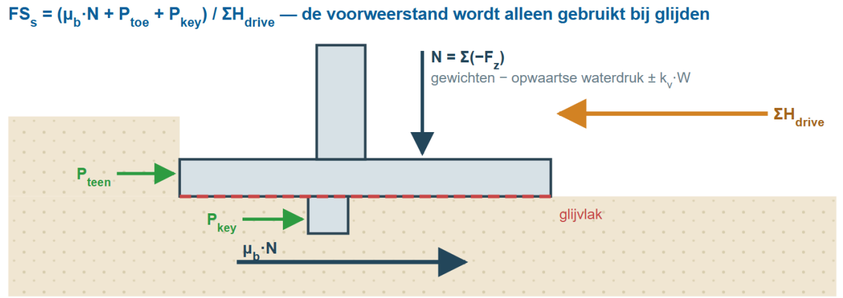
$$|e| \le \frac{B}{6}: \quad q_{max,min} = \frac{V}{B}\left(1 \pm \frac{6e}{B}\right) \qquad |e| > \frac{B}{6}: \quad q_{max} = \frac{2V}{3x_R}$$

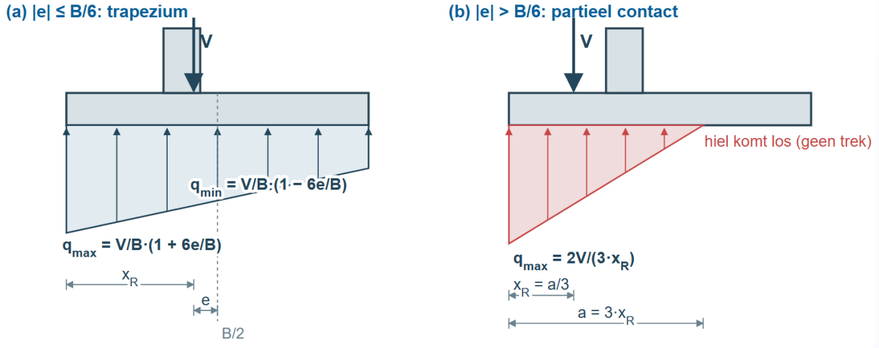
Glijden: N is de effectieve normaalkracht (exclusief Q_{heel}, opwaartse waterdruk afgetrokken); $\mu_b = \tan \delta_b$; geen adhesie.

Kantelen: om de teen (de voorste onderhoek van de funderingszool); van elk onderdeel worden de $-zF_x$- en xF_z-componenten met hun eigen teken meegerekend; de frontweerstand telt niet mee.

Draagvermogen: als de resultante binnen het middelste derde deel van de zool ligt ($|e| \le B/6$), is de zool volledig in contact; zo niet, dan kan de grond geen trek opnemen en is alleen een lengte $a = 3x_R$ in contact.

Vereist: in statische toestand $FS_s \ge 1.5$, $FS_o \ge 2.0$; bij aardbeving ≥ 1.1; $q_{max} \le q_{all}$.





Opgave

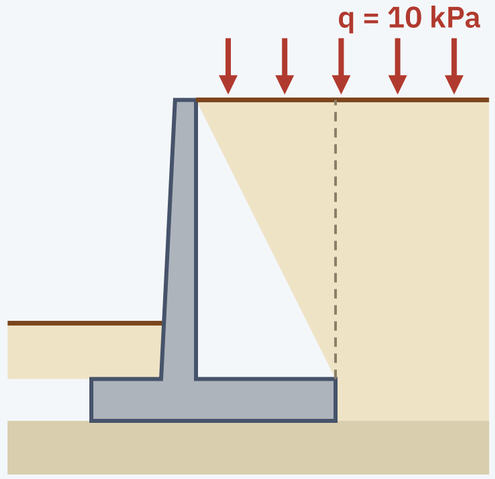
VOORBEELD

Gegeven

Wand en belastingen	**Keermuur uit Voorbeeld 1–3:** $B = 3.5$ **m;** $W_c = 88.8,\ W_s = 144.0,\ W_{toe} = 14.69\ \mathrm{kN/m}$**;** $P_A = 63.48,\ P_Q = 15.33\ \mathrm{kN/m}$
Weerstand	$\mu_b = 0.55$**;** $P_P = 23.52$ **kN/m;** $q_{all} = 200$ **kPa**
Vereist	$FS_s \geq 1.5,\ \ FS_o \geq 2.0$**; zool volledig in contact**

GEVRAAGD

FS_s, FS_o, x_R, e, q_{max}, q_{min} en de resultaten.



Oplossing (1/3)

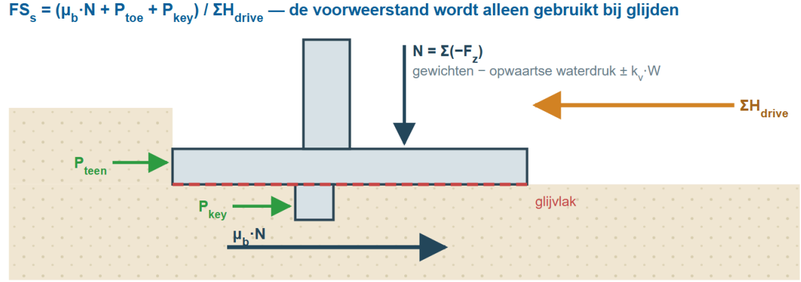
OPLOSSING

1 Wrijving aan de basis ($N = W_c + W_s + W_{toe}$)

$$N = 88.8 + 144.0 + 14.69 = \mathbf{247.49}\ \mathrm{kN/m}$$

$$\mu_b N = 0.55(247.49) = 136.12\ \mathrm{kN/m}$$

$$FS_s = \frac{136.12 + 23.52}{78.81} = \mathbf{2.026}\ \geq 1.5\ \checkmark$$



Oplossing (2/3)

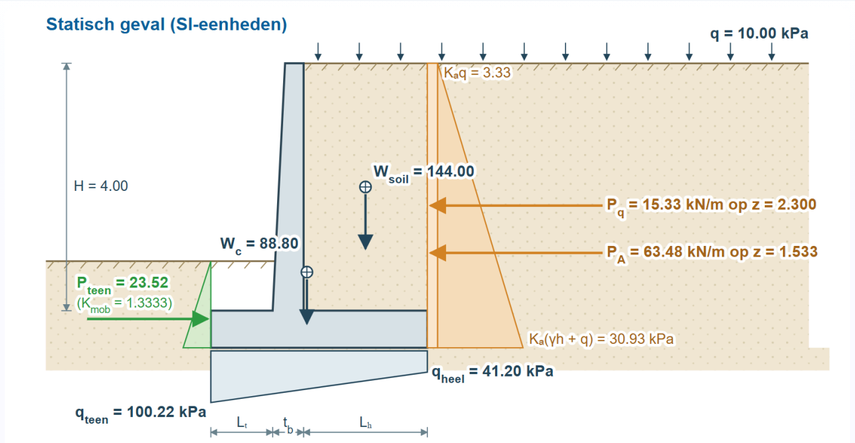
OPLOSSING

2 Kantelend moment (stuwkrachten) en weerstandbiedend moment (wand, hielblok, vooraanvulling)

$$M_o = 97.34 + 35.27 = \mathbf{132.60}$$

$$M_r = 137.96 + 360.00 + 7.49 = \mathbf{505.45}\ \mathrm{kN{\cdot}m/m}$$

$$FS_o = \frac{505.45}{132.60} = \mathbf{3.812}\ \geq 2.0\ \checkmark$$



Oplossing (3/3)

OPLOSSING

3 Locatie van de resultante en excentriciteit

$$\Sigma M = M_o - M_r = -372.85$$

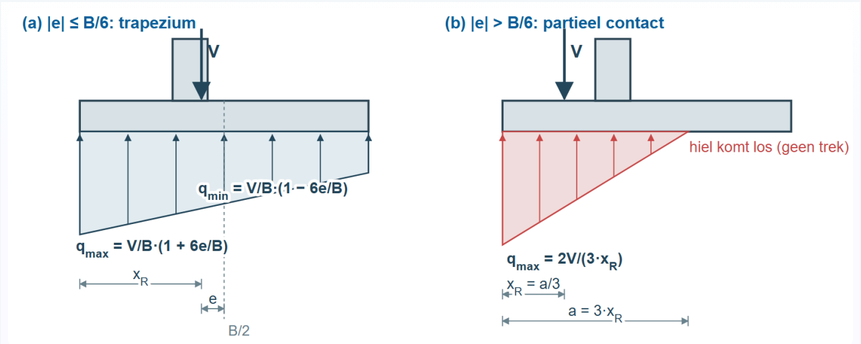
$$x_R = -\frac{\Sigma M}{V} = \frac{372.85}{247.49} = \mathbf{1.5065}\ \text{m}$$

$$e = \frac{B}{2} - x_R = \mathbf{0.2435}\ \text{m} \ \leq\ \frac{B}{6} = 0.583\ \checkmark$$

4 Zoolspanningen (volledige contactdruk)

$$q_{max} = \frac{247.49}{3.5}\left(1 + \frac{6(0.2435)}{3.5}\right) = \mathbf{100.22}\ \text{kPa}$$

$$q_{min} = \mathbf{41.20}\ \text{kPa}$$



FS_s = **2.03**, FS_o = **3.81**, e = 0.243 m, q_{max} = **100.2 kPa** ≤ 200, q_{min} = 41.2 kPa > 0: **in de statische situatie wordt aan alle toetsen voldaan**.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Mononobe–Okabe-stuwdruk en toevoeging van traagheid

THEORIE

In het aardbevingsgeval wordt in plaats van de statische stuwkracht $P_A + P_Q$ de **Mononobe–Okabe**-stuwkracht P_{AE} genomen; de traagheid van de wand, het hielblok en de vooraanvulling $k_h W$ duwt eveneens naar voren in hun zwaartepunten (als $k_v > 0$ worden beide richtingen beschouwd). In het verticale vlak, bij horizontale aanvulling:

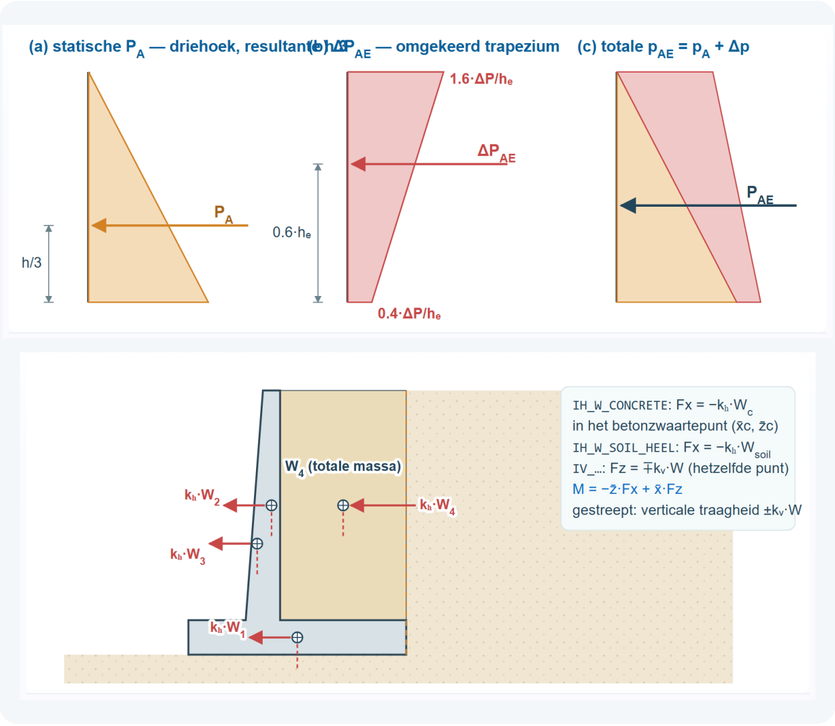
$$\theta = \tan^{-1}\frac{k_h}{1-k_v} \qquad K_{AE} = \frac{\cos^2(\varphi'-\theta)}{\cos^2\theta\left[1+\sqrt{\dfrac{\sin\varphi'\sin(\varphi'-\theta)}{\cos\theta}}\right]^2}$$

$$P_{AE} = \left(\tfrac{1}{2}\gamma h^2 + qh\right)K_{AE} \qquad \Delta P_{AE} = P_{AE} - (P_A + P_Q)\ \ (0.6h)$$

ΔP_{AE} wordt als een omgekeerd trapezium verdeeld (bovenaan 1.6ΔP/h, onderaan 0.4ΔP/h); het statische deel behoudt zijn vorm. Bij water wordt de hydrodynamische druk $(7/12)k_h\gamma_w h_w^2$ toegevoegd.

Het passieve aandeel aan de voorzijde wordt vermenigvuldigd met $\eta_{p,E}$; **standaard 0** (de veiligheid tegen glijden komt alleen uit de wrijving aan de voet).

Als de resultante buiten het middelste derde deel van de funderingszool valt, ontstaat **gedeeltelijk contact** ($q_{max} = 2V/(3x_R)$).



Opgave

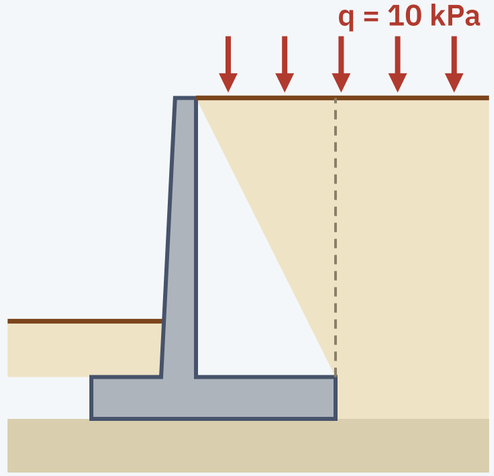
VOORBEELD

Gegeven

Wand en grond	**De keermuur uit de voorbeelden 1–4 (statisch FS_s = 2.03; FS_o = 3.81)**
Aardbeving	$k_h = 0.15$, $k_v = 0$; $\eta_{p,E} = 0$; **vereist** $FS_s,\ FS_o \geq 1.1$; **de zool moet volledig in contact zijn (|e| ≤ B/6)**

GEVRAAGD

K_{AE}, **P_{AE}**, **$\bar{z}$**, traagheidskrachten; FS_s, FS_o, e, q_{max} en het resultaat van elke toets.



Oplossing (1/4)

OPLOSSING

1 Seismische hoek en coëfficiënt

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

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

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

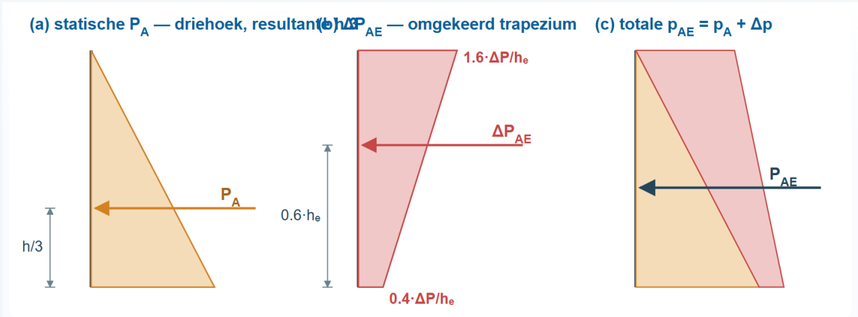
2 Dynamische stuwdruk (statisch P_A + P_Q = 78.81 kN/m) en de aangrijpingsplaats

$$P_{AE} = (190.44 + 46.0)(0.4329) = \mathbf{102.36}\ \text{kN/m}$$

$$\Delta P_{AE} = 102.36 - 78.81 = 23.55\ \text{kN/m}\ \ (0.6h)$$

$$\bar{z}_{AE} = [63.48(1.533) + 15.33(2.30) + 23.55(2.76)]/102.36$$

$$= \mathbf{1.930}\ \text{m}$$



Oplossing (2/4)

OPLOSSING

3 Traagheidskrachten $k_h W$ en glijden (geen credit voor passieve weerstand)

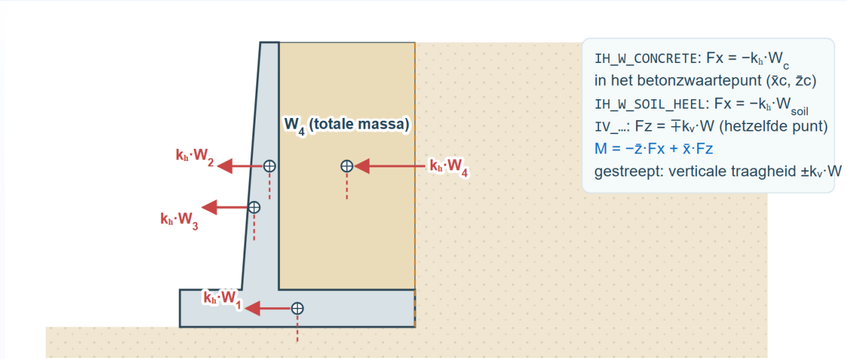
$$IH_c = 0.15(88.8) = 13.32 \;\; (z = 1.223\ \text{m})$$

$$IH_s = 0.15(144.0) = 21.60 \;\; (z = 2.60\ \text{m})$$

$$IH_{toe} = 0.15(14.69) = 2.20\ \text{kN/m}$$

$$\Sigma H_{drive} = 102.36 + 13.32 + 21.60 + 2.20 = 139.49$$

$$FS_{s,E} = \frac{\mu_b N}{\Sigma H_{drive}} = \frac{136.12}{139.49} = \mathbf{0.976} \;<\; 1.1 \;\; \text{✗}$$



Oplossing (3/4)

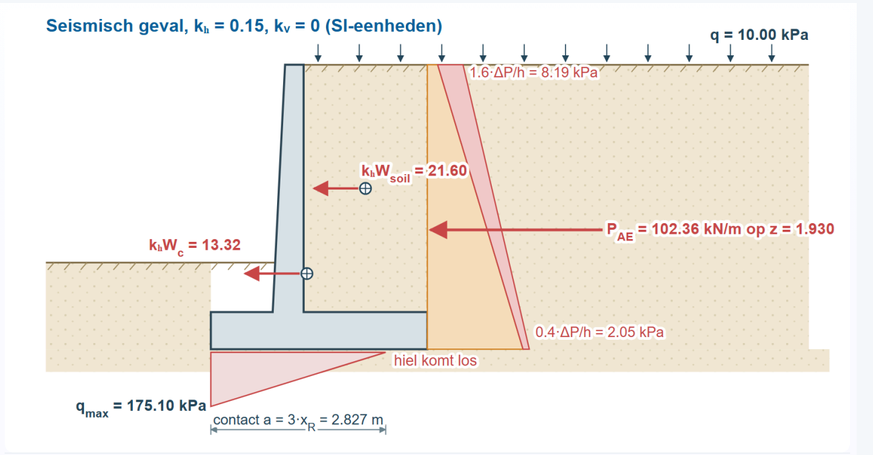
OPLOSSING

4 Kantelen (momentarmen: $\bar{z}_{AE}$ = 1.930; z_c = 1.223; 2.60; 1.003 m)

$$M_{o,E} = 197.60 + 16.28 + 56.16 + 2.21 = 272.26$$

$$FS_{o,E} = \frac{505.45}{272.26} = \mathbf{1.857} \;\geq 1.1 \;\checkmark$$

$$x_R = \frac{505.45 - 272.26}{247.5} = 0.942 \text{ m}$$



Oplossing (4/4)

OPLOSSING

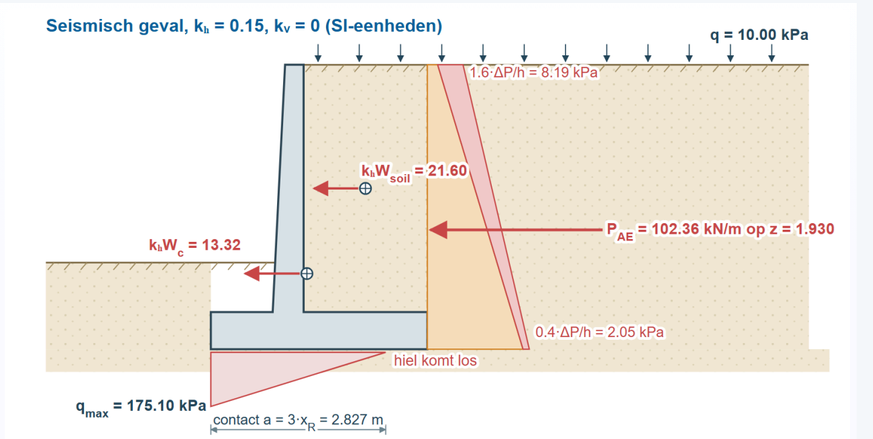
5 Excentriciteit en gedeeltelijk contact

$$e = \frac{B}{2} - x_R = 1.750 - 0.942 = \mathbf{0.808}\ \text{m} \ > \ \frac{B}{6} = 0.583 \quad ✗$$

$$a = 3x_R = 2.827\ \text{m} \quad \text{(alleen over deze lengte in contact)}$$

$$q_{max} = \frac{2V}{a} = \frac{2(247.5)}{2.827} = \mathbf{175.1}\ \text{kPa} \qquad q_{min} = 0$$

Bij de aardbeving voldoen **glijden (FS_s = 0.98 < 1.1)** en **excentriciteit (e = 0.81 m > B/6)** niet; kantelen (FS_o = 1.86) en q_{max} = 175.1 kPa zijn voldoende. De doorsnede **moet worden herzien** (Voorbeeld 6).



Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Opgave

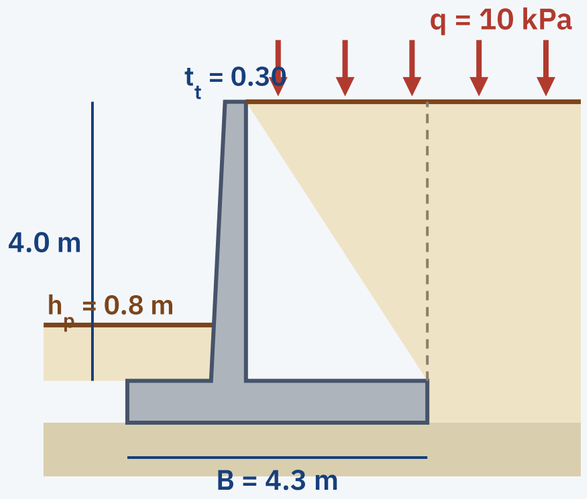
VOORBEELD

Gegeven

Probleem	**In Voorbeeld 5 bij aardbeving FS_s = 0.98 < 1.1 en e = 0.81 m > B/6 = 0.58 m**
Voorgestelde wijziging	**teen en hiel verlengd: $L_t = 1.20$ m, $L_h = 2.60$ m (B = 4.30 m); overige afmetingen en grond ongewijzigd**

GEVRAAGD

Met de nieuwe doorsnede de statische en seismische **FS_s**, **FS_o**, **e**, **q_{max}**; voldoet de doorsnede?



Oplossing

OPLOSSING

1 Dezelfde belasting, nieuwe geometrie (module; B = 4.30 m, W_c = 100.3 kN/m, N = 305.1 kN/m)

	Huidig (B = 3.5 m)	Herzien (B = 4.3 m)	Vereist
Statische FS_s	2.026	2.427	≥ 1.5
Statische FS_o	3.812	5.753	≥ 2.0
Statische e (m) / q_{max} (kPa)	0.243 / 100.2	0.084 / 79.3	|e| ≤ B/6
Aardbeving FS_s	0.976 ✗	1.133 ✓	≥ 1.1
Aardbeving FS_o	1.857	2.630	≥ 1.1
Aardbeving e (m) / contact	0.808 / gedeeltelijk ✗	0.600 / volledig ✓ (B/6 = 0.717)	|e| ≤ B/6
Aardbeving q_{max} (kPa)	175.1	130.4	≤ 200

Het verlengen van de teen en de hiel verhoogde N van 247 naar 305 kN/m en vergrootte de wrijving: bij aardbeving **FS_s = 1.13 ≥ 1.1**, de resultante viel binnen het middelste derde deel (e = 0.60 ≤ B/6 = 0.717): **aan alle toetsen wordt voldaan**. Alternatieven: afschuiftand + $\eta_{p,E}$ (Voorbeeld 9), een bredere hiel.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Opgaande wand, teen en hiel: kritieke doorsneden

THEORIE

Nadat de externe stabiliteit is aangetoond, worden de **doorsnedegrootheden** van de elementen bepaald. De **opgaande wand** is een console die door de rugdruk wordt belast en aan de voet (boven de funderingszool) is ingeklemd:

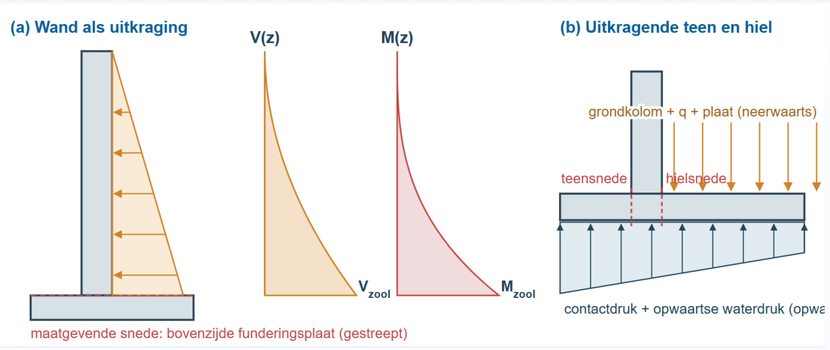
$$V_{st} = K_a\left(\tfrac{1}{2}\gamma H^2 + qH\right) \qquad M_{st} = K_a\left(\frac{\gamma H^3}{6} + \frac{qH^2}{2}\right)$$

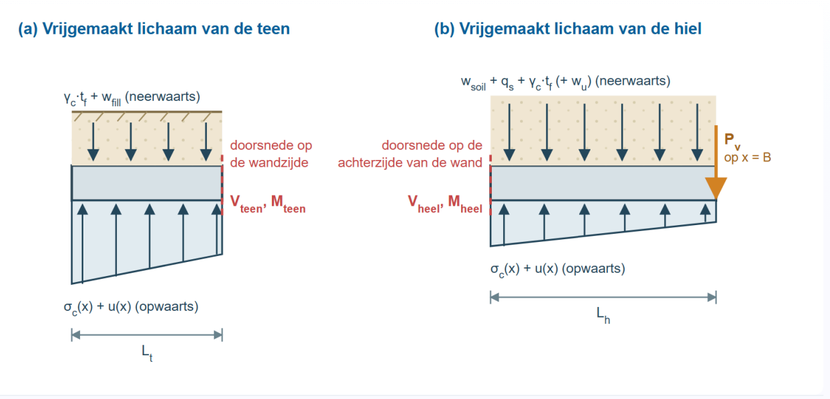
Bij aardbeving: $V_E = V + \Delta P_{AE,st} + k_h W_{wand}$, $M_E = M + \Delta P_{AE,st}(0.6H) + k_h W_{wand}\bar{z}$ ($\Delta P_{AE,st} = K_{AE}(\tfrac{1}{2}\gamma H^2 + qH) - V_{st}$). De **teen en hiel** zijn ingeklemde platen op de wandvlakken; belasting = contactdruk – het gewicht van de plaat en de grond erboven:

$$V_{toe} = L_t\frac{q_0 + q_L}{2} - w_{toe}L_t \qquad M_{toe} = \frac{L_t^2(2q_0 + q_L)}{6} - \frac{w_{toe}L_t^2}{2}$$

$$V_{heel} = w_h L_h - L_h\frac{q_a + q_b}{2} \qquad M_{heel} = \frac{w_h L_h^2}{2} - \frac{L_h^2(q_a + 2q_b)}{6}$$

$w_{toe} = \gamma_c t_f + \gamma h_p$; $w_h = \gamma H + q + \gamma_c t_f$; q_0, q_L, q_a, q_b zijn de zoolspanningen in de maatgevende doorsneden (lineaire verdeling).





Opgave

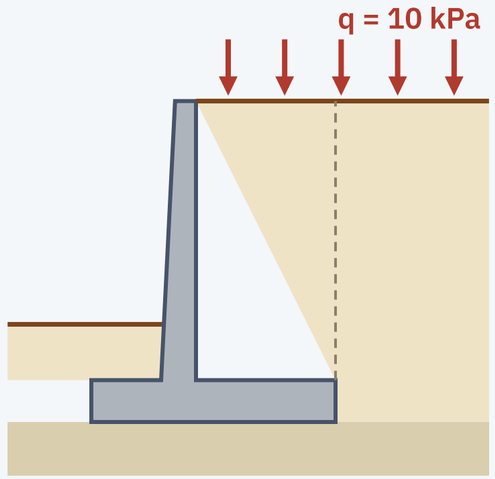
VOORBEELD

Gegeven

Wand en grond	**Muur in Voorbeeld 1–5:** $H = 4.0$ **m;** $\gamma = 18\ \mathrm{kN/m^3}$, $\varphi' = 30°$**;** $q = 10$ **kPa; opgaande wand:** $t_t = 0.30$**,** $t_b = 0.50$ **m**
Aardbeving	$k_h = 0.15$ **(**$K_{AE} = 0.4329$**)**

GEVRAAGD

De **V** en **M** aan de voet van de opgaande wand: in de statische situatie en de aardbevingssituatie.



Oplossing (1/2)

OPLOSSING

1 Statisch (aan de voet van de wand, H = 4.0 m)

$$V_{st} = K_a\left(\tfrac{1}{2}\gamma H^2 + qH\right) = 0.3333(144 + 40) = \mathbf{61.33}\ \mathrm{kN/m}$$

$$M_{st} = K_a\left(\frac{\gamma H^3}{6} + \frac{qH^2}{2}\right) = 0.3333(192 + 80) = \mathbf{90.67}\ \mathrm{kN\cdot m/m}$$

Oplossing (2/2)

OPLOSSING

2 Aardbeving: seismische toename en traagheid van de wand

$$\Delta P_{AE,st} = K_{AE}(184) - V_{st} = 79.66 - 61.33 = 18.33\ \text{kN/m} \quad (0.6H = 2.40\ \text{m})$$

$$k_h W_{st} = 0.15(24)(1.2 + 0.4) = 5.76\ \text{kN/m}; \qquad M_i = 10.56\ \text{kN·m/m}$$

3 Totale aardbevingseffecten

$$V_E = 61.33 + 18.33 + 5.76 = \mathbf{85.42}\ \text{kN/m}$$

$$M_E = 90.67 + 18.33(2.40) + 10.56 = \mathbf{145.21}\ \text{kN·m/m}$$

Aan de voet van de opgaande wand statisch **V = 61.33 kN/m, M = 90.67 kN·m/m**; aardbeving **V_E = 85.42, M_E = 145.21** (een toename van het moment met 60%). De dimensionering van het gewapend beton wordt met deze effecten uitgevoerd.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Opgave

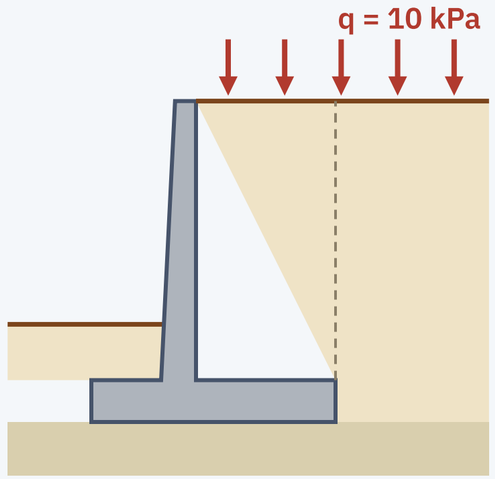
VOORBEELD

Gegeven

Zoolspanningen (Voorbeeld 4)	$q_{max} = 100.22$ **(teen),** $q_{min} = 41.20$ **kPa (hielpunt);** $B = 3.5$ **m**
Plaatbelastingen	$L_t = 1.00$**,** $L_h = 2.00$ **m,** $t_b = 0.50$ **m,** $t_f = 0.60$ **m;** $\gamma_c = 24$**; vooraanvulling** $h_p = 0.8$ **m**

GEVRAAGD

De waarden van **V** en **M** in de teen- en hielplaat aan het vlak van de opgaande wand (statisch); de aardbevingswaarden.



Oplossing (1/2)

OPLOSSING

1 Contactdrukken bij de kritieke doorsneden (lineair): q_0 bij de teen, q_L en q_a bij het vlak van de opgaande wand, q_b aan het uiteinde van de hiel

$$q_0 = 100.22 \qquad q_L = q_0 + (q_{min} - q_0)\frac{L_t}{B} = 83.36$$

$$q_a = q_0 + (q_{min} - q_0)\frac{L_t + t_b}{B} = 74.93 \qquad q_b = 41.20\ \text{kPa}$$

2 Damwandpunt (w_{toe} = 24(0.60) + 18(0.80) = 28.8 kPa)

$$V_{toe} = 1.00\frac{100.22 + 83.36}{2} - 28.8(1.00) = \mathbf{62.99}\ \text{kN/m}$$

$$M_{toe} = \frac{1^2(2\cdot 100.22 + 83.36)}{6} - \frac{28.8(1)^2}{2} = \mathbf{32.90}\ \text{kN·m/m}$$

Oplossing (2/2)

OPLOSSING

3 Teen (w_h = 18(4.0) + 10 + 24(0.60) = 96.4 kPa; belasting omlaag, zoolspanning omhoog)

$$V_{heel} = 96.4(2.00) - 2.00\frac{74.93+41.20}{2} = \mathbf{76.67}\ \mathrm{kN/m}$$

$$M_{heel} = \frac{96.4(2)^2}{2} - \frac{2^2(74.93+2\cdot 41.20)}{6} = \mathbf{87.92}\ \mathrm{kN\cdot m/m}$$

Teen: **V = 62.99, M = 32.90**; hiel: **V = 76.67, M = 87.92** (teenhelling omhoog, hielhelling omlaag). Bij de aardbeving (gedeeltelijk contact, module): teen V = 115.33, M = 62.83; hiel V = 138.28, M = 168.69: **het hielmoment neemt 1.9 keer toe**.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Vereenvoudigde methode met afschuiftand

THEORIE

Als de wrijving over de funderingszool onvoldoende is, wordt onder de zool een **afschuiftand** in de ongeroerde grond gestort; de voorzijde van de tand voegt de passieve weerstand van de grond ervoor toe aan het glijvlak. De methode is bewust eenvoudig: het tandvlak neemt een **gemobiliseerde** druk $K_{mob}\sigma'_v$ op en wordt volledig meegerekend bij glijden; de **inwendige krachten** in de tand worden bepaald uit het **bruto volledig passieve** diagram:

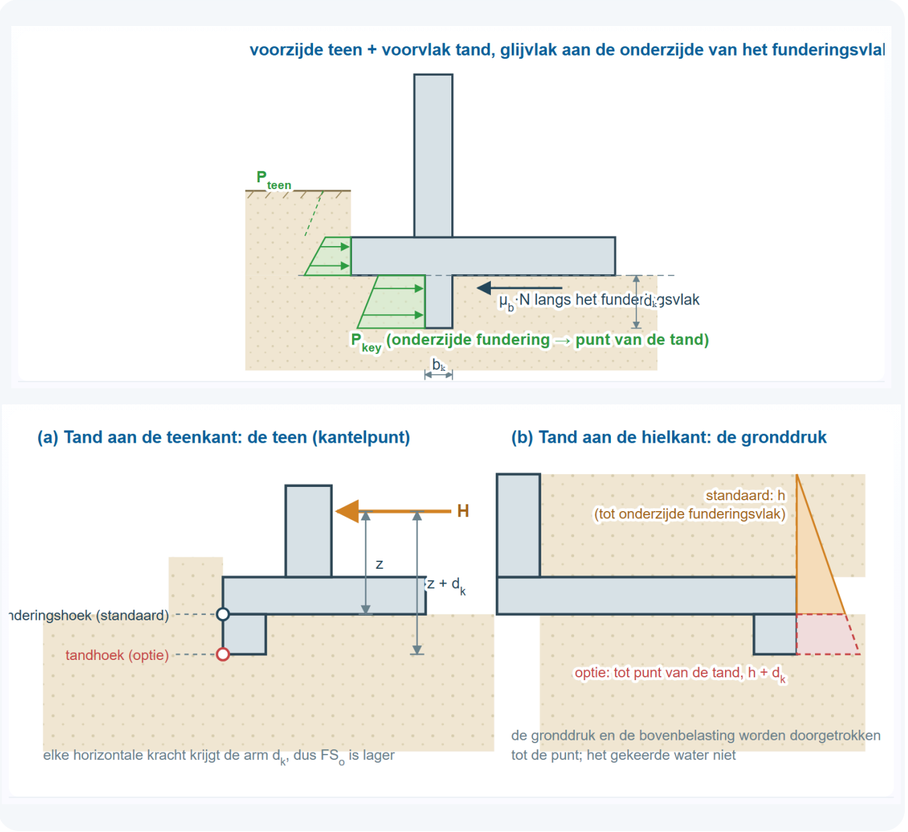
$$P_{key} = \tfrac{1}{2}\left(p_{top} + p_{bot}\right) d_k \quad (p = K_{mob}\sigma'_v) \qquad V_{key} = \tfrac{1}{2}\left(p^g_{top} + p^g_{bot}\right) d_k \quad (p^g = K_p\sigma'_v)$$

$$M_{key} = p^g_{top}\frac{d_k^2}{2} + \left(p^g_{bot} - p^g_{top}\right)\frac{d_k^2}{3}$$

Het hielgewicht (in N_{eff}) is zowel in de statische als in de seismische situatie inbegrepen. Passieve weerstanden worden **alleen bij glijden** gebruikt; bij de aardbeving worden beide met $\eta_{p,E}$ vermenigvuldigd (standaard 0, dus geen bijdrage).

Rotatiepunt: bij een afschuiftand aan de teenrand kan als kantelpunt de voorste onderhoek van de funderingszool (standaard) of de voorste onderhoek van de tand worden gekozen; bij een afschuiftand aan de hielrand kan de actieve druk tot de punt van de tand worden verlengd.

$\Delta FS = P_{key}/\Sigma H_{drive}$ wordt in elk geval gerapporteerd.



Opgave

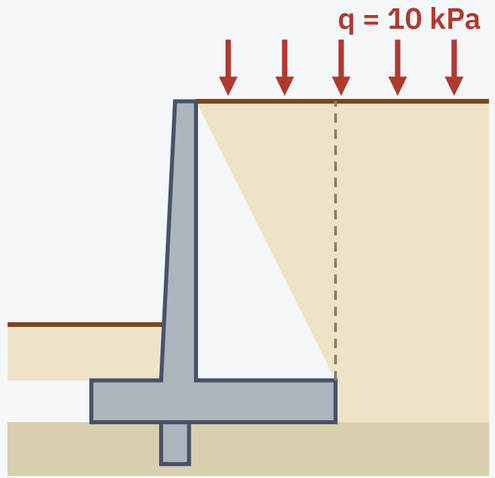
VOORBEELD

Gegeven

Wand	**De wand uit Voorbeeld 1–5; afschuiftand nabij de teen: $x_k = 1.0$ m, $b_k = 0.40$ m, $d_k = 0.60$ m (onder de zool)**
Grond	**$\gamma = 18\ \mathrm{kN/m^3}$, $\varphi' = 30°$; voorgelegen grond $D_f = 1.4$ m (2.0 m onder de bodem); $w = 1/3$ ($K_{mob} = 1.333$)**
Aardbeving	**$\eta_{p,E} = 0$ (standaard) en $\eta_{p,E} = 0.5$**

GEVRAAGD

Weerstand van de afschuiftand **P_{key}**, statische **FS_s**; snedekrachten in de tand **V_{key}**, **M_{key}**; invloed van $\eta_{p,E}$ bij aardbeving.



Oplossing (1/2)

OPLOSSING

1 Gecombineerde druk op het zijvlak van de afschuiftand ($\sigma'_v = 18\,z$; $z = 1.4 \rightarrow 2.0$ m)

$$p_{top} = K_{mob}(25.2) = 33.6 \qquad p_{bot} = K_{mob}(36.0) = 48.0\ \text{kPa}$$

$$P_{key} = \tfrac{1}{2}(33.6 + 48.0)(0.60) = \mathbf{24.48}\ \text{kN/m}$$

2 Statisch glijden (gewicht van de afschuiftand 5.76 kN/m gaat in N; teen passief wordt met 23.52 gecrediteerd)

$$N_{eff} = 253.25 \qquad \mu_b N = 139.29\ \text{kN/m}$$

$$FS_s = \frac{139.29 + 23.52 + 24.48}{78.81} = \mathbf{2.376}\ \ (\text{zonder tanden } 2.066)$$

Oplossing (2/2)

OPLOSSING

3 Dwarskrachtdoorsneden: bruto volledig passief (K_p = 3.00): p^g_{top} = 75.6; p^g_{bot} = 108.0 kPa

$$V_{key} = \tfrac{1}{2}(75.6 + 108.0)(0.60) = \mathbf{55.08}\ \mathrm{kN/m}$$

$$M_{key} = 45.36(0.30) + 9.72(0.40) = \mathbf{17.50}\ \mathrm{kN\cdot m/m}$$

De tand bracht de statische veiligheidsfactor tegen glijden van 2.07 naar **2.38** (ΔFS = 0.31). Bij een aardbeving, met $\eta_{p,E}$ = 0, **levert de tand geen bijdrage**; met $\eta_{p,E}$ = 0.5 gaat $FS_{s,E}$ van 0.98 naar **1.16** (≥ 1.1 wordt voldaan), maar de excentriciteit (0.80 m > B/6) blijft bestaan: daarom is de geometriewijziging in Voorbeeld 6 doeltreffender.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

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

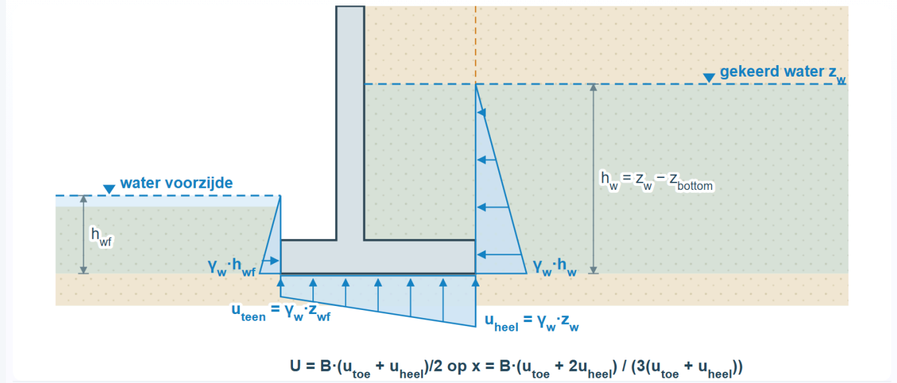
THEORIE

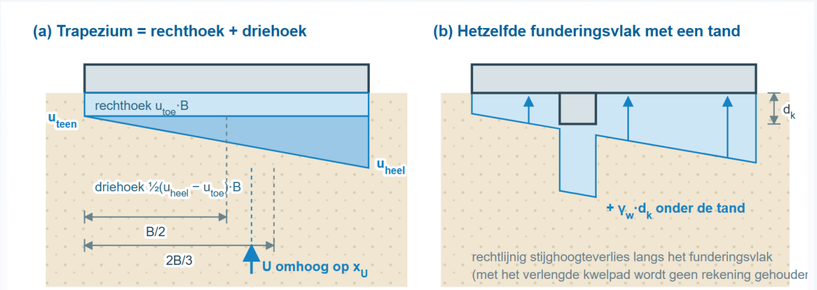
De waterdruk is isotroop en werkt loodrecht op elk oppervlak. Het vrij lichaam wordt op drie grenzen door water omgeven: het drukvlaku aan de achterzijde, de voorzijde van de muur en de onderzijde van de zool. Elk daarvan is een afzonderlijke post in het krachtenoverzicht; de grond wordt met de totale spanning gewogen (γ_{sat}):

$$U_{rear} = \tfrac{1}{2}\gamma_w h_w^2 \;\; (h_w/3) \qquad U = \frac{B(u_{toe} + u_{heel})}{2} \qquad x_U = \frac{B(u_{toe} + 2u_{heel})}{3(u_{toe} + u_{heel})}$$

De opwaartse waterdruk werkt naar boven: hij verlaagt N′ (en daarmee de wrijving) en voegt een kantelmoment toe. De druk onder de zool verloopt lineair tussen de waterbelastingen aan de teen en aan de hiel.

In het aardbevingsgeval wordt bovendien de hydrodynamische druk van het vrije poriënwater $(7/12)k_h\gamma_w h_w^2$ $(0.4h_w)$ opgeteld.





Opgave

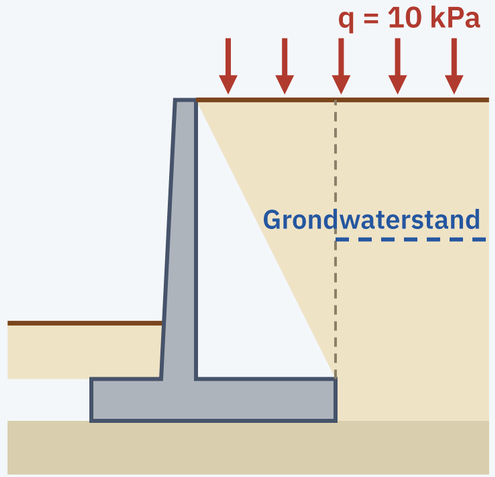
VOORBEELD

Gegeven

Wand en grond	**Keermuur en aanvulling uit Voorbeelden 1–4 ($\gamma = 18,\ \gamma_{sat} = 20\ \mathrm{kN/m^3}$); statische toestand**
Water	**in de ophoging ligt de grondwaterstand 2.0 m onder de wandtop; lineaire opwaartse waterdruk onder de basis**

GEVRAAGD

Krachtenoverzicht; **FS_s**, **FS_o**, **e**, **q_{max}**; invloed van water.



Oplossing (1/2)

OPLOSSING

1 Krachtenoverzicht (module; $M = xF_z - zF_x$, kantelen +)

Item	F_x (kN/m)	F_z (kN/m)	x (m)	z (m)	M (kN·m/m)
Wand	0.00	−88.80	1.55	1.22	−137.96
Hielblok (met γ_{sat})	0.00	−152.00	2.50	2.55	−380.00
Q_{heel} (niet gebruikt)	0.00	−20.00	2.50	4.60	−50.00
Voorgelegen aanvulling	0.00	−14.69	0.51	1.00	−7.49
Grondstuwkracht P_A	−54.68	0.00	3.50	1.64	89.71
Stuwkracht door bovenbelasting P_Q	−15.33	0.00	3.50	2.30	35.27
Waterdruk aan de achterzijde	−33.16	0.00	3.50	0.87	28.74
Opwaartse waterdruk	0.00	44.64	2.33	0.00	104.15
Voorweerstand	23.52	0.00	0.00	0.47	−10.98

Oplossing (2/2)

OPLOSSING

2 Toetsen

$$N = 210.85\ \text{kN/m} \quad FS_s = \frac{116.0 + 23.5}{103.2} = \mathbf{1.352} \quad FS_o = \frac{525.5}{257.9} = \mathbf{2.038}$$

$$e = 0.481\ \text{m}\ (\leq B/6 = 0.583) \qquad q_{max} = 109.9\ \text{kPa} \qquad q_{min} = 10.6\ \text{kPa}$$

De veiligheid tegen glijden veranderde van 2.03 → **1.35** (< 1.5 ✗), de veiligheid tegen kantelen van 3.81 → **2.04**, en e van 0.243 → 0.481 m; de opwaartse waterdruk verlaagde N met 44.6 kN/m. **Aan statisch glijden wordt niet voldaan**: drainage, een afschuiftand of een bredere zool is vereist.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Consoleplaat die de wand verlicht

THEORIE

Het ontlastplateau is een gewapend-betonnen plaat die van de achterzijde van de opgaande wand tot in de aanvulling reikt; het wordt gebruikt bij hoge muren (het moment in de opgaande wand groeit met H^3) of om een ontoereikende muur te versterken. Drie effecten: (1) het draagt de grond erboven; (2) het **ontlast** de opgaande wand eronder: onder het ontlastplateau begint de eigengewichtsdruk opnieuw; (3) het voegt gewicht aan de muur toe.

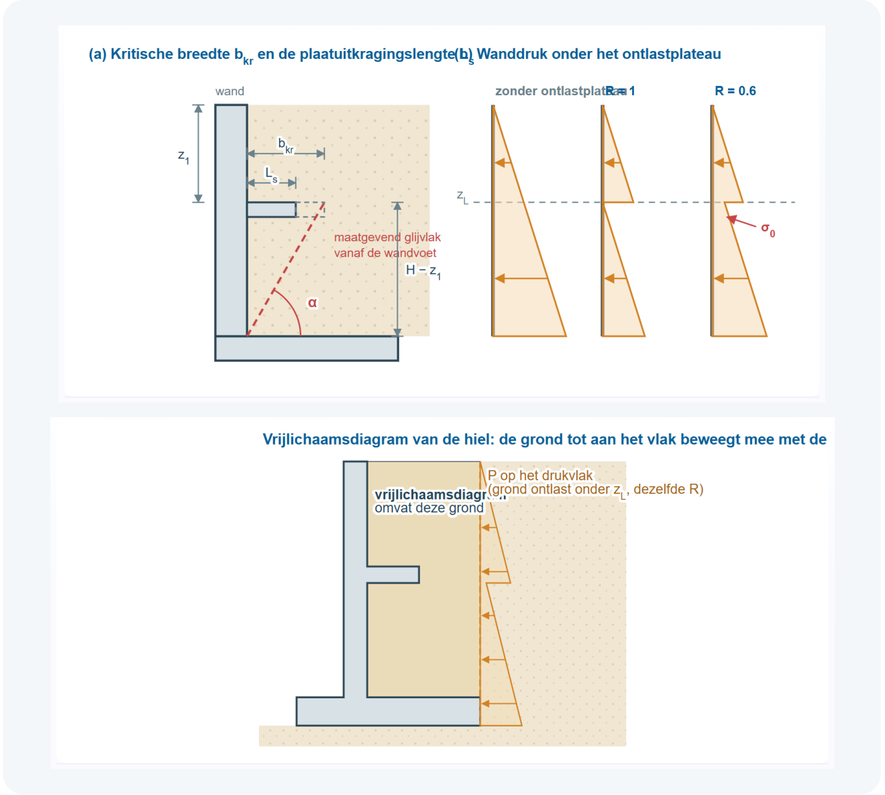
De cantilever is alleen volledig effectief als de punt ervan het **kritieke glijvlak** bereikt dat onder de hiel van de opgaande wand omhoog komt (Rankine, horizontale aanvulling: $\alpha = 45° + \varphi'/2$). De vereiste kritieke breedte van de cantilever en de ontlastingsverhouding:

$$b_{kr} = (H - z_1)\,(\cot\alpha - \tan\beta_w) \qquad R = \min\left(\frac{L_s}{b_{kr}}, 1\right)$$

$$p(z) = K\,[\sigma'_v(z) - R\,\sigma'_v(z_L)] \qquad z > z_L \;\; \text{(onder het ontlastplateau)}$$

R = 1: twee afzonderlijke driehoeken (volledige ontlasting); R < 1: gedeeltelijke ontlasting, lineaire interpolatie tussen een ongeankerde wand en een wand met volledige ontlasting. Alleen de statische druk uit **grondgewicht** wordt ontlast; bovenbelasting, water en de aardbevingstoename worden niet ontlast.

Het moment van de belasting van het ontlastplateau om de opgaande wand wordt niet aan de wand toegerekend (conservatief); het ontlastplateau wordt afzonderlijk als uitkragende plaat onder zijn eigen belasting beschouwd (M_{root}).



Opgave

VOORBEELD

Gegeven

Wand en grond	**De keermuur uit Voorbeeld 1–4 (H = 4.0 m; statisch); horizontale aanvulling, $\varphi' = 30^\circ$**
Ongeankerd	**diepte onder het ontlastplateau $z_1 = 2.15$ m (vanaf de wandtop), uitkraging $L_s = 1.00$ m, dikte $t_s = 0.30$ m**

GEVRAAGD

De kritieke hoek α, de kritieke breedte **b_{kr}**, **R**; de verandering van V en M aan de voet van de opgaande wand; externe stabiliteit.

Oplossing (1/2)

OPLOSSING

1 Maatgevend vlak en breedte (verticale rug: $\beta_w = 0$)

$$\alpha = 45^\circ + \frac{\varphi'}{2} = 60.0^\circ \qquad b_{kr} = (4.0 - 2.15)\cot 60^\circ = 1.068\ \text{m}$$

$$R = \min(1.00/1.068,\ 1) = \mathbf{0.9362}\ \ (\text{gedeeltelijke ontlasting})$$

2 Effecten aan de basis van de opgaande wand (zonder hoekkeermuur → met hoekkeermuur)

$$V:\ 61.33 \rightarrow 38.99\ \text{kN/m}\ \ (-\%36.4)$$

$$M:\ 90.67 \rightarrow 70.00\ \text{kN·m/m}\ \ (-\%22.8)$$

Oplossing (2/2)

OPLOSSING

3 Hoekbelasting en externe stabiliteit (dezelfde ontlasting in het drukvlake)

$$W_{soil} = 43.3\ \mathrm{kN/m}, \quad W_{self} = 7.2\ \mathrm{kN/m}, \quad M_{root} = 25.25\ \mathrm{kN{\cdot}m/m}$$

$$FS_s:\ 2.03 \rightarrow 3.26 \qquad FS_o:\ 3.81 \rightarrow 5.28 \qquad e:\ 0.243 \rightarrow 0.094\ \mathrm{m}$$

Het ontlastplateau (L_s = 1.00 m < b_{kr} = 1.07 m: R = 0.94) verlaagt de dwarskracht aan de voet van de opgaande wand met 36% en het moment met 23%; de belasting en het gewicht van het ontlastplateau worden bij de muur opgeteld: veiligheidsfactor tegen glijden 2.03 → 3.26, excentriciteit 0.243 → 0.094 m. Het ontlastplateau wordt bovendien gedimensioneerd voor M_{root} = 25.3 kN·m/m in zijn eigen aanhechting.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Scope van de oplossing

THEORIE

Macrostabiliteit beschouwt de muur als één star blok; de **snede-inkrachten** (opgaande wand, teen, hiel, hoekkeermuur, afschuiftand) worden verkregen uit de effecten die deze module levert; de gewapend-betonberekening (wapening, afschuiving) valt buiten het bestek van deze presentatie.

Niet-samenhangende aanvulling ($c' = 0$); één laag, horizontaal of enkelvoudig hellend maaiveld; water horizontaal en hydrostatisch; bovenbelasting gelijkmatig verdeeld (strook- en puntvormige horizontale drukken worden via Boussinesq toegevoegd).

Wrijving over de zool $\mu_b = \tan \delta_b$; geen hechting. De passieve weerstand aan de voorzijde wordt alleen bij glijden gebruikt; bij kantelen en draagvermogen wordt deze niet gebruikt; bij aardbeving wordt deze met $\eta_{p,E}$ toegepast (standaard 0).

Pseudostatische aardbeving: Mononobe–Okabe + traagheid + hydrodynamisch water; als $k_v > 0$ worden beide richtingen doorgerekend.

Het ontlastplateau en de afschuiftand worden met vereenvoudigde methoden gemodelleerd (plateau: gedeeltelijke/volledige ontlasting, tand: gecombineerd passief); macrostabiliteit en zetting vallen buiten het bereik.

Samenvatting

Belangrijkste punten

Muur: funderingszool + opgaande wand; $W_c = \Sigma \gamma_c A_i$; het **hielblok** en de aanvulling aan de voorzijde bewegen mee met de muur; de druk grijpt aan op het verticale vlak aan de achterrand van de fundering ($h = t_f + H$); Q_{heel} komt in geen enkele toets voor

Toetsen uit dezelfde krachtenoverzicht: $FS_s = (\mu_b N + P_P)/\Sigma H$, $FS_o = \Sigma M_{res}/\Sigma M_{ov}$, x_R, e, $q = V/B(1 \pm 6e/B)$; als $|e| > B/6$ dan $q_{max} = 2V/(3x_R)$

Aardbeving: P_{AE} (Mononobe–Okabe) + ΔP_{AE} op $0.6h$ + $k_h W$ traagheidskrachten; de voorbeeldmuur **voldoet niet op glijden en excentriciteit** bij de aardbeving, en voldoet wel na herziening met een bredere teen/hiel

Snede-inklemmingen: opgaande wand $V = K_a(\tfrac{1}{2}\gamma H^2 + qH)$, $M = K_a(\gamma H^3/6 + qH^2/2)$; teen en hiel zijn ingeklemd aan het vlak van de opgaande wand: zoolspanning – gewicht van zool en grond

Afschuiftand: P_{key} uit gecombineerd passief (bij glijden), V, M uit bruto K_p; bij aardbeving met $\eta_{p,E}$

Ontlastplateau: $b_{kr} = (H - z_1)(\cot \alpha - \tan \beta_w)$, $R = \min(L_s/b_{kr}, 1)$; onder het plateau begint de gewichtsdruk opnieuw; water en bovenbelasting worden niet ontlast

Water: gewicht met γ_{sat} + afzonderlijke stuwkracht van water aan de achterzijde; opwaartse waterdruk verlaagt N' en voegt kantelmoment toe (in het voorbeeld voldoet het statische glijden niet)

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 rekenvoorbeelden zijn geproduceerd met de eigen berekeningsmotor van de module; de module geeft dezelfde waarden. Het stapsgewijze voorbeeld op de modulepagina is ook deze wand (H = 4 m, q = 10 kPa, k_h = 0.15).

GeoTerva

Online geotechnische berekeningen

Van theorie naar praktijk

Voer de opgaande wand van uw eigen muur, de funderingszool, de aanvulling, het water, de aardbevingscoëfficiënten, de afschuiftand en het ontlastplateau in GeoTerva in; de module geeft het krachtenoverzicht, de toetsen en de snedegrootheden samen.

Module openen →

Theoriepagina →

Openen op de smartphone

Proefmodules vereisen geen registratie.

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