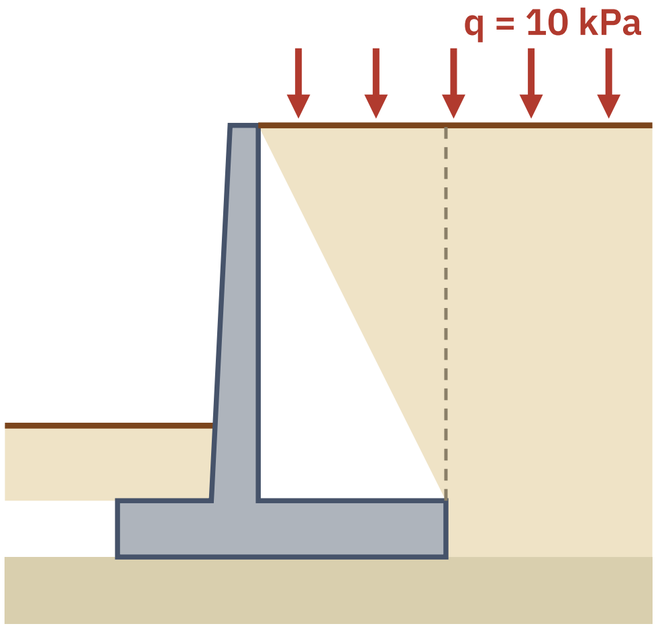
GeoTerva

Geoteknik ders sunumu · İstinat duvarları

Konsol istinat duvarı

Ders anlatımı: betonarme konsol istinat duvarının dış stabilitesi (kayma, devrilme, taşıma gücü) ve gövde, burun, topuk plaklarının kesit tesirleri; topuk bloğu, toprak basıncı, su, deprem, kayma dişi ve hafifletme konsolu; her konuda çözümlü örnek.

- Gövde + taban plağı
- Kayma · devrilme · taşıma gücü
- Gövde, burun, topuk kesit tesirleri
- Kayma dişi · hafifletme konsolu
- Su ve deprem



Giriş

Bu derste neler öğreneceğiz?

- Konsol duvarı: **gövde + taban plağı** (burun L_t, topuk L_h), ağırlığı ve ağırlık merkezini parçalardan bulmayı
- Topuğun üstündeki **zemin bloğunu** ve temelin arka kenarındaki **düşey basınç düzlemini**; aktif itki, sürşarj ve ön pasif direnci
- **Kayma, devrilme, eksantrisite ve taşıma gücü** kontrollerini ve deprem durumunu (Mononobe–Okabe + atalet) okumayı
- **Taban gerilmesinden** burun ve topuk plaklarının, itkiden **gövdenin** kesme ve moment tesirlerini
- **Kayma dişi** ve **hafifletme konsolunun** güvenliği nasıl artırdığını; suyun ve kaldırmanın etkisini
- Başarısız bir kesiti **nasıl revize edeceğini** görmeyi (depremde kayma ve eksantrisite)

DERS AKIŞI

Her konu **üç adımda** işlenir:

1 · **Kuram**: kural nedir, neden öyle?

2 · **Soru**: verilenler ve istenen

3 · **Çözüm**: adım adım, sayılarla

Her şey duvarın 1,00 m boyu başınadır. Örnek: H = 4,0 m gövde, taban plağı 0,60 m, B = 3,5 m betonarme duvar (24 kN/m³), q = 10 kPa.

Gövde, taban plağı ve ayak yapısı

KURAM

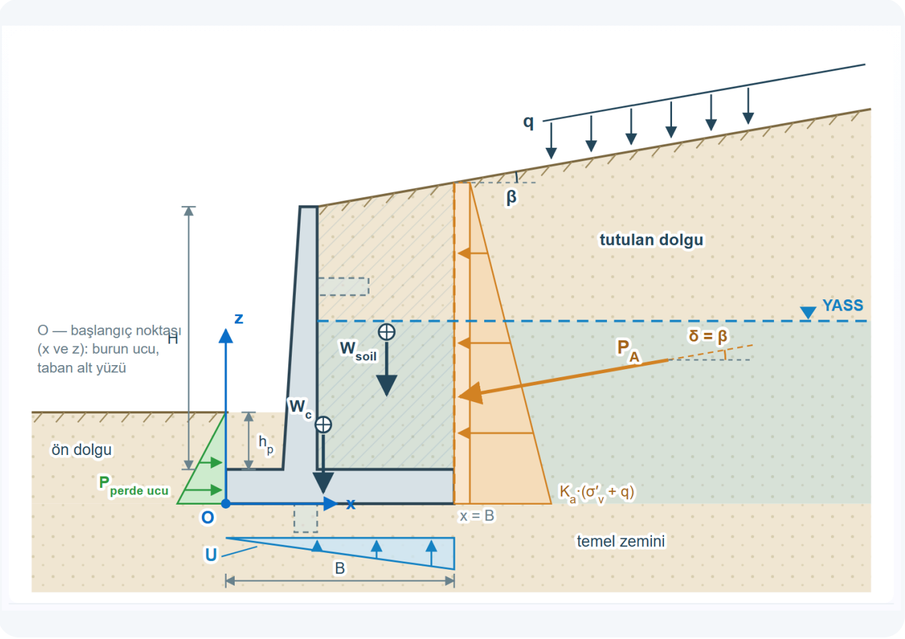
Konsol duvarı kaymaya ve devrilmeye **taban plağının üstündeki zemin ağırlığıyla** da direnir: yalnız duvarın kendi ağırlığı değil, topuğun üstündeki zemin bloğu da tutucudur. Modül:

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

Gövde: yükseklik H; üstte kalınlık t_t, altta t_b (sırtı düşey, önü eğimli); **taban plağı**: kalınlık t_f, burun L_t, topuk L_h; beton 24 kN/m³.

Zemin: kohezyonsuz dolgu (c′ = 0), düz ya da eğimli yüzey, sürşarj q, yeraltı suyu, önde taban plağı üstünde h_p yüksekliğinde dolgu.

Seçenekler: kayma dişi, hafifletme konsolu; **kontroller**: kayma, devrilme, eksantrisite, taşıma gücü; **kesit tesirleri**: gövde, burun, topuk, konsol, diş.



Taban plağı + gövde dikdörtgeni + gövde üçgeni

KURAM

Duvarın ağırlığı üç basit şekle bölünür (alan, ağırlık merkezi bilinen); burna göre momenti tutucudur:

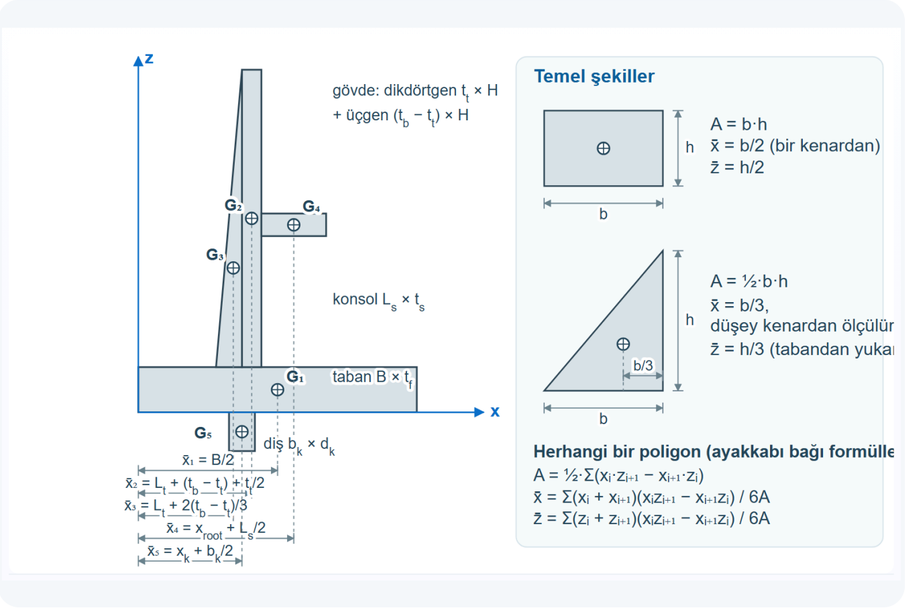
$$W_i = \gamma_c A_i \qquad W_c = \sum W_i \qquad \bar{x}_c = \frac{\sum W_i \bar{x}_i}{W_c} \qquad \bar{z}_c = \frac{\sum W_i \bar{z}_i}{W_c}$$

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

Gövde dikdörtgeni (sırta bitişik): A = t_tH, $\bar{x}$ = L_t + (t_b − t_t) + t_t/2, $\bar{z}$ = t_f + H/2.

Gövde üçgeni (öndeki eğim): A = ½(t_b − t_t)H, $\bar{x}$ = L_t + 2(t_b − t_t)/3, $\bar{z}$ = t_f + H/3.

Kuvvet çizelgesinde duvar tek kalemdir: F_z = −W_c $\bar{x}_c$'de; $\bar{z}_c$ yalnız yatay atalet (deprem) için kullanılır.



Soru

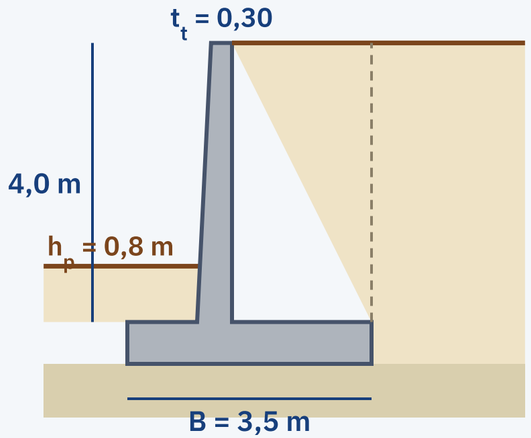
SORU

İSTENEN

Üç parçanın alanı, ağırlığı ve yeri; $\mathbf{W_c}$, $\mathbf{\bar{x}_c}$, $\mathbf{\bar{z}_c}$.

Verilenler

Kesit	$H = 4{,}0$ **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)**
Malzeme	**betonarme:** $\gamma_c = 24\ \mathrm{kN/m^3}$



Çözüm

ÇÖZÜM

1 Parçalar (örn. üçgen: 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)

Parça	A (m²)	$\bar{x}$ (m)	$\bar{z}$ (m)	W = 24A (kN/m)	W·$\bar{x}$	W·$\bar{z}$
Taban plağı	2,100	1,750	0,300	50,40	88,20	15,12
Gövde dikdörtgeni	1,200	1,350	2,600	28,80	38,88	74,88
Gövde üçgeni	0,400	1,133	1,933	9,60	10,88	18,56
Toplam				**88,80**	**137,96**	**108,56**

2 Ağırlık merkezi

$$\bar{x}_c = \frac{137{,}96}{88{,}80} = \mathbf{1{,}554}\ \text{m} \qquad \bar{z}_c = \frac{108{,}56}{88{,}80} = \mathbf{1{,}223}\ \text{m}$$

Duvarın ağırlığı **W_c = 88,80 kN/m**, burundan $\bar{x}_c$ = 1,55 m, tabandan $\bar{z}_c$ = 1,22 m; momenti M = −137,96 kN·m/m (tutucu).

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Duvarla birlikte hareket eden zemin ve basınç düzlemi

KURAM

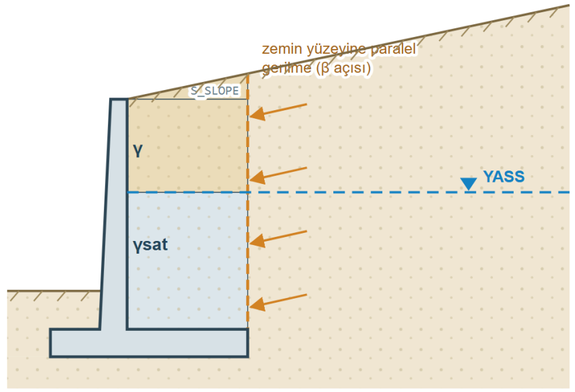
Taban plağının topuğu üstündeki zemin plağa göre kayamaz: duvar hareket ederse **onunla birlikte** gider. Göçme düzlemleri gövdenin sırtından değil **topuğun arka kenarından** başlar. Serbest cisim = duvar + topuk bloğu; dış yüzü x = B'deki **düşey basınç düzlemidir** (zemine karşı zemin: duvar sürtünmesi yok, itki δ = β):

Topuk bloğunun ağırlığı $W_s = \gamma L_h H$ (nemli/doygun bölgelere ayrılır; toplam gerilmeyle çalışıldığından su altında γ_{sat} kullanılır, suyun itkisi ayrı kalem olur).

Önde taban plağı üstündeki dolgu (h_p) plakla hareket eder: düşey yük W_{toe}.

Topuk üstü sürşarj $\mathbf{Q_{heel} = qL_h}$ lehte ama yokken de olabilecek bir yük olduğundan **hiçbir kontrole girmez**; yanal etkisi daima sayılır.

Basınç düzleminin yüksekliği $h = t_f + H$ (yüzeyin yükselmesi dahil).



Soru

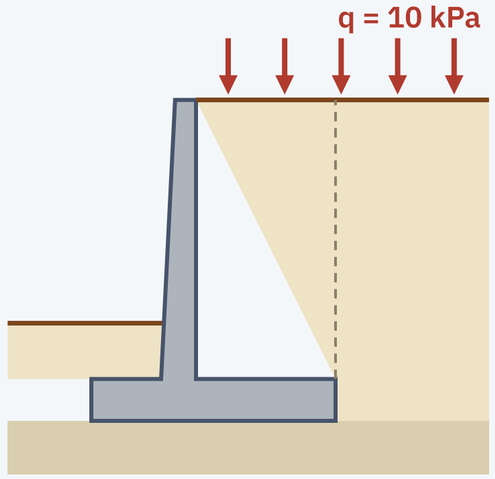
SORU

Verilenler

Duvar	**Örnek 1'deki kesit; ön dolgu yüksekliği $h_p = 0{,}80$ m (taban plağı üstünde)**
Zemin	**kuru dolgu: $\gamma = 18\ \mathrm{kN/m^3}$, $\varphi' = 30^\circ$; yatay yüzey**
Sürşarj	$q = 10$ **kPa**

İSTENEN

Topuk bloğunun **ağırlığı ve yeri**; **ön dolgu**; $\mathbf{Q_{heel}}$; toplam düşey yük N.



Çözüm

ÇÖZÜM

1 Topuk bloğu (L_h × H dikdörtgen, sırtın arkasında)

$$A_s = L_h H = 2{,}00(4{,}0) = 8{,}0\ \text{m}^2 \qquad W_s = 18(8{,}0) = \mathbf{144{,}0}\ \text{kN/m}$$

$$\bar{x}_s = L_t + t_b + \frac{L_h}{2} = 2{,}50\ \text{m} \qquad \bar{z}_s = t_f + \frac{H}{2} = 2{,}60\ \text{m}$$

2 Ön dolgu (yamuk: tabanda L_t = 1,00, üstte $x_{ön}(h_p)$ = 1,04) ve sürşarj

$$A_{toe} = \tfrac{1}{2}(1{,}00 + 1{,}04)(0{,}80) = 0{,}816\ \text{m}^2 \quad W_{toe} = 18(0{,}816) = \mathbf{14{,}69}\ \text{kN/m}\ (\bar{x} = 0{,}510)$$

$$Q_{heel} = qL_h = 10(2{,}00) = \mathbf{20{,}0}\ \text{kN/m}\ (\text{hiçbir kontrole girmez})$$

N = W_c + W_s + W_{toe} = 88,80 + 144,00 + 14,69 = **247,49 kN/m**; Q_{heel} = 20,00 kN/m çizelgede "kullanılmayan" kalemdir.

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Düşey düzlemde itki, sürşarj ve karma pasif

KURAM

Basınç düzlemi h = t_f + H yüksekliğindedir. Dolgu yatay ve δ = β = 0 olduğundan Rankine = Coulomb:

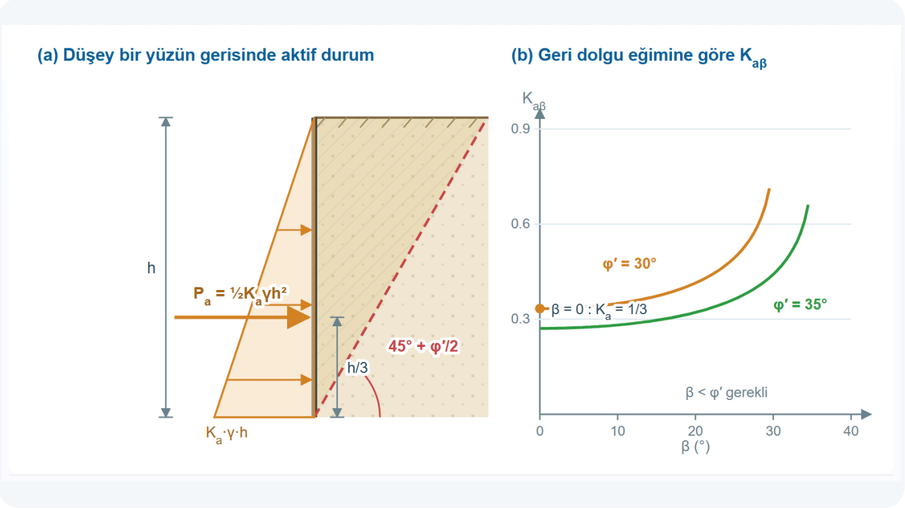
$$K_a = \frac{1-\sin\varphi'}{1+\sin\varphi'} \qquad P_A = \tfrac{1}{2}K_a\gamma h^2\,(h/3) \qquad P_Q = K_a q h\,(h/2)$$

Eğimli dolguda düzlemdeki gerilme yüzeye paraleldir ($K_{a\beta}$), itkinin düşey bileşeni tutucudur. Ön direnç (yalnız kaymada):

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

w = 1/3 varsayılan; ön zemin sökülebiliyorsa h_p = 0 ya da h_{ignore} ile kredi azaltılır; **devrilmede ve taşıma gücünde ön direnç kullanılmaz**.

Ayrıntılar (Rankine/Coulomb eşitliği, K_{mob}, h_{ignore}) Ağırlık istinat duvarı sunumundadır.



Soru

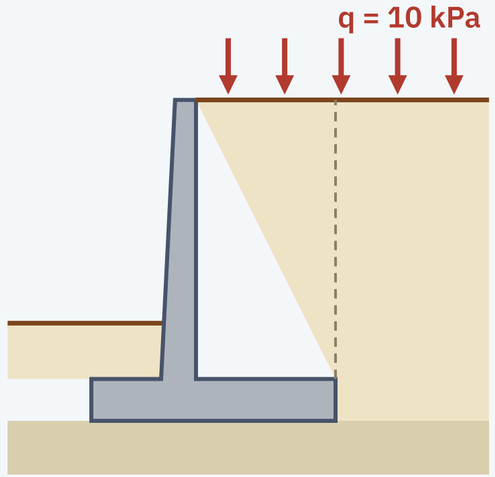
SORU

İSTENEN

P_A, P_Q, P_P ve burna göre devirme momenti.

Verilenler

Duvar ve zemin	**Örnek 1–2'deki duvar: h = t_f + H = 4,60 m;** $\gamma = 18\ \mathrm{kN/m^3},\ \varphi' = 30^\circ$**; yatay yüzey;** $q = 10$ **kPa**
Ön zemin	$D_p = t_f + h_p = 1{,}40$ **m; w = 1/3**



Çözüm

ÇÖZÜM

1 K_a = 0,3333; itkiler (h = 4,60 m)

$$P_A = \tfrac{1}{2} K_a \gamma h^2 = \tfrac{1}{2}(0{,}3333)(18)(21{,}16) = \mathbf{63{,}48}\ \text{kN/m} \quad (z = 1{,}533\ \text{m})$$

$$P_Q = K_a q h = 0{,}3333(10)(4{,}6) = \mathbf{15{,}33}\ \text{kN/m} \quad (z = 2{,}30\ \text{m})$$

2 Ön direnç: K_{mob} = ⅓(3,00) + ⅔(0,50) = 1,333

$$P_P = \tfrac{1}{2}(1{,}333)(18)(1{,}40)^2 = \mathbf{23{,}52}\ \text{kN/m} \quad (z = D_p/3 = 0{,}467\ \text{m})$$

3 Yatay itki ve devirme momenti (burna göre)

$$\Sigma H_{drive} = 63{,}48 + 15{,}33 = \mathbf{78{,}81}\ \text{kN/m}$$

$$M_o = 63{,}48(1{,}533) + 15{,}33(2{,}30) = 97{,}34 + 35{,}27 = \mathbf{132{,}60}\ \text{kN·m/m}$$

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Aynı kuvvet çizelgesinden dört kontrol

KURAM

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

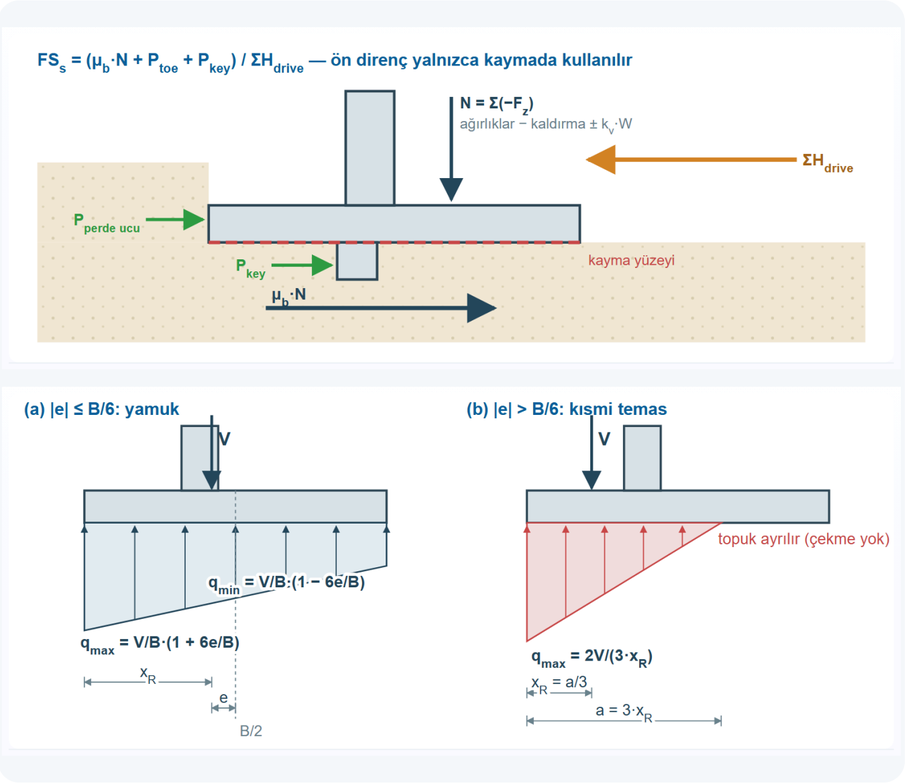
$$|e| \le \frac{B}{6}: \quad q_{max,min} = \frac{V}{B}\left(1 \pm \frac{6e}{B}\right) \qquad |e| > \frac{B}{6}: \quad q_{max} = \frac{2V}{3x_R}$$

Kayma: N efektif normal kuvvettir (Q_{heel} hariç, kaldırma düşülür); $\mu_b = \tan \delta_b$; yapışma yok.

Devrilme: burun (taban plağının ön alt köşesi) etrafında; her kalemin $-zF_x$ ve xF_z parçaları kendi işaretine göre sayılır; ön direnç girmez.

Taşıma gücü: bileşke tabanın orta üçte birinde ($|e| \le B/6$) ise taban tamamen temaslı; değilse zemin çekme alamaz, yalnız $a = 3x_R$ uzunluğu temaslıdır.

Gerekli: statikte $FS_s \ge 1{,}5$, $FS_o \ge 2{,}0$; depremde $\ge 1{,}1$; $q_{max} \le q_{all}$.



Soru

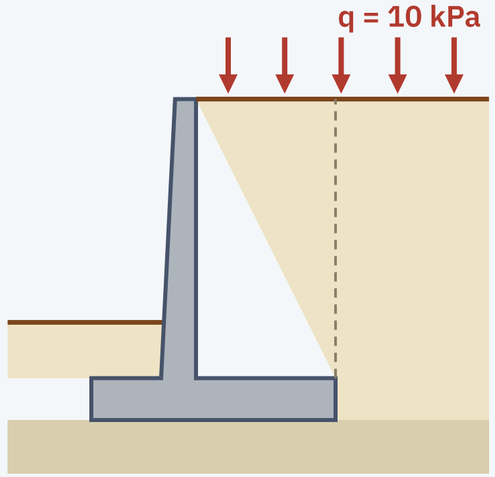
SORU

Verilenler

Duvar ve yükler	**Örnek 1–3'teki duvar:** $B = 3{,}5$ **m;** $W_c = 88{,}8,\ W_s = 144{,}0,\ W_{toe} = 14{,}69$ **kN/m;** $P_A = 63{,}48,\ P_Q = 15{,}33$ **kN/m**
Direnç	$\mu_b = 0{,}55$**;** $P_P = 23{,}52$ **kN/m;** $q_{all} = 200$ **kPa**
Gerekli	$FS_s \geq 1{,}5,\ \ FS_o \geq 2{,}0$**; taban tamamen temaslı**

İSTENEN

FS_s, FS_o, x_R, e, q_{max}, q_{min} ve sonuçlar.



Çözüm (1/3)

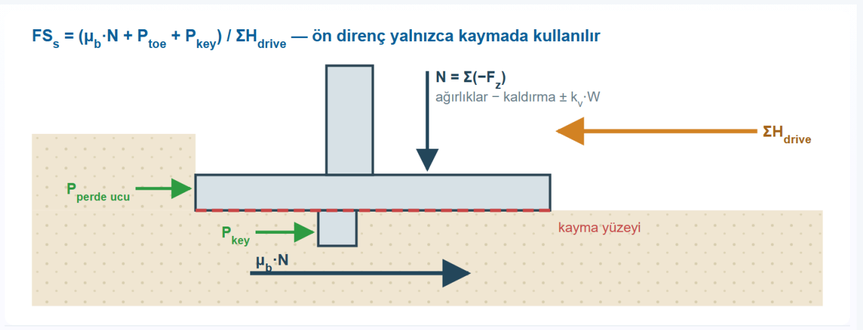
ÇÖZÜM

1 Taban sürtünmesi ($N = W_c + W_s + W_{toe}$)

$$N = 88{,}8 + 144{,}0 + 14{,}69 = \mathbf{247{,}49}\ \mathrm{kN/m}$$

$$\mu_b N = 0{,}55(247{,}49) = 136{,}12\ \mathrm{kN/m}$$

$$FS_s = \frac{136{,}12 + 23{,}52}{78{,}81} = \mathbf{2{,}026}\ \geq 1{,}5\ \checkmark$$



Çözüm (2/3)

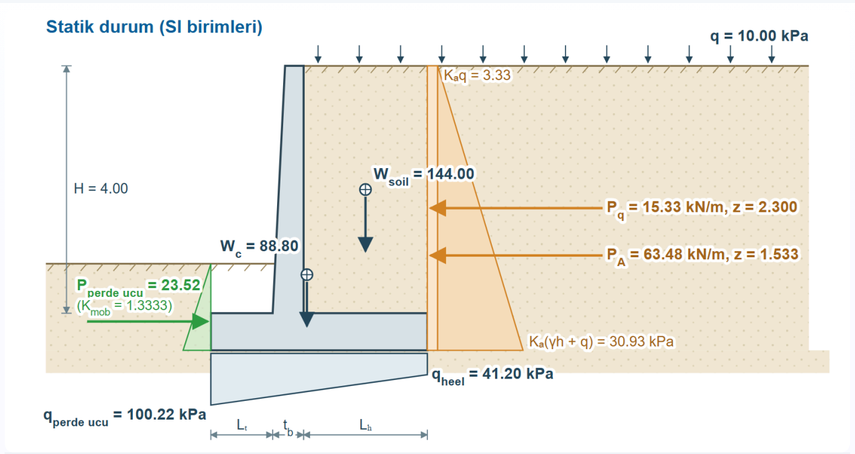
ÇÖZÜM

2 Devirme momenti (itkiler) ve tutma momenti (duvar, topuk bloğu, ön dolgu)

$$M_o = 97{,}34 + 35{,}27 = \mathbf{132{,}60}$$

$$M_r = 137{,}96 + 360{,}00 + 7{,}49 = \mathbf{505{,}45}\ \mathrm{kN\cdot m/m}$$

$$FS_o = \frac{505{,}45}{132{,}60} = \mathbf{3{,}812}\ \geq 2{,}0\ \checkmark$$



Çözüm (3/3)

ÇÖZÜM

3 Bileşkenin yeri ve eksantrisite

$$\Sigma M = M_o - M_r = -372{,}85$$

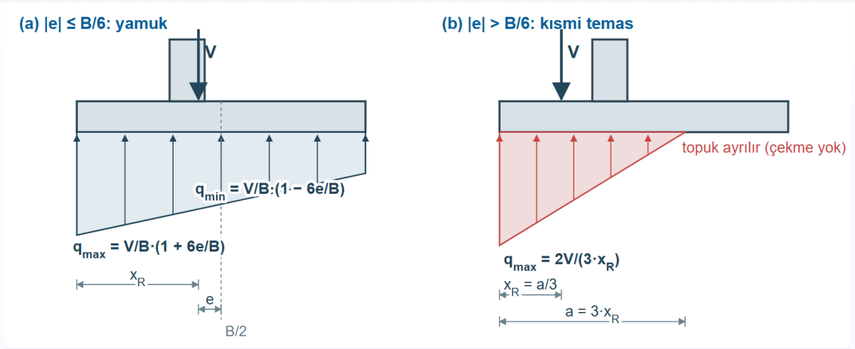
$$x_R = -\frac{\Sigma M}{V} = \frac{372{,}85}{247{,}49} = \mathbf{1{,}5065}\ \text{m}$$

$$e = \frac{B}{2} - x_R = \mathbf{0{,}2435}\ \text{m} \ \le\ \frac{B}{6} = 0{,}583\ \checkmark$$

4 Taban gerilmeleri (tam temas)

$$q_{max} = \frac{247{,}49}{3{,}5}\left(1 + \frac{6(0{,}2435)}{3{,}5}\right) = \mathbf{100{,}22}\ \text{kPa}$$

$$q_{min} = \mathbf{41{,}20}\ \text{kPa}$$



FS_s = **2,03**, FS_o = **3,81**, e = 0,243 m, q_{max} = **100,2 kPa** ≤ 200, q_{min} = 41,2 kPa > 0: **statikte tüm kontroller sağlanır.**

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Mononobe–Okabe itkisi ve ataletin eklenmesi

KURAM

Deprem durumunda statik itki $P_A + P_Q$ yerine **Mononobe–Okabe** itkisi P_{AE} alınır; duvarın, topuk bloğunun ve ön dolgunun ataleti $k_h W$ de ağırlık merkezlerinde öne iter ($k_v > 0$ ise iki yön de çalışılır). Düşey düzlemde, yatay dolguda:

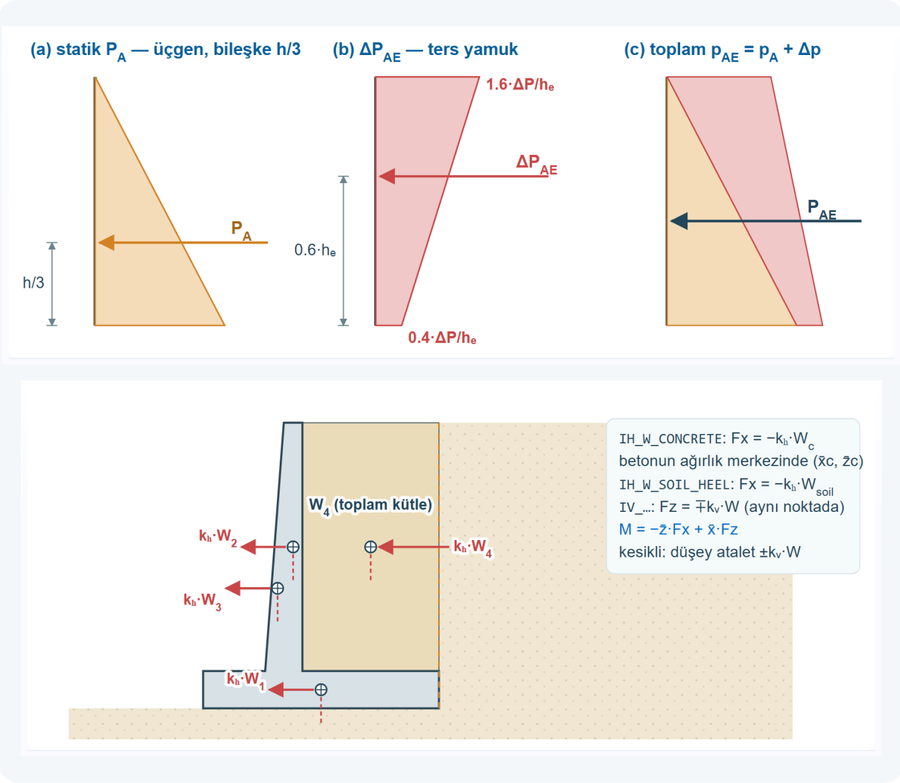
$$\theta = \tan^{-1}\frac{k_h}{1-k_v} \qquad K_{AE} = \frac{\cos^2(\varphi' - \theta)}{\cos^2\theta\left[1+\sqrt{\dfrac{\sin\varphi'\sin(\varphi'-\theta)}{\cos\theta}}\right]^2}$$

$$P_{AE} = \left(\tfrac{1}{2}\gamma h^2 + qh\right) K_{AE} \qquad \Delta P_{AE} = P_{AE} - (P_A + P_Q)\ \ (0{,}6h)$$

ΔP_{AE} ters yamuk olarak dağılır (üstte 1,6ΔP/h, altta 0,4ΔP/h); statik kısım şeklini korur. Su varsa hidrodinamik basınç $(7/12)k_h\gamma_w h_w^2$ eklenir.

Ön pasif kredi $\eta_{p,E}$ ile çarpılır; **varsayılan 0** (kayma güvenliği yalnız taban sürtünmesinden gelir).

Bileşke tabanın orta üçte birinden çıkarsa **kısmi temas** olur ($q_{max} = 2V/(3x_R)$).



Soru

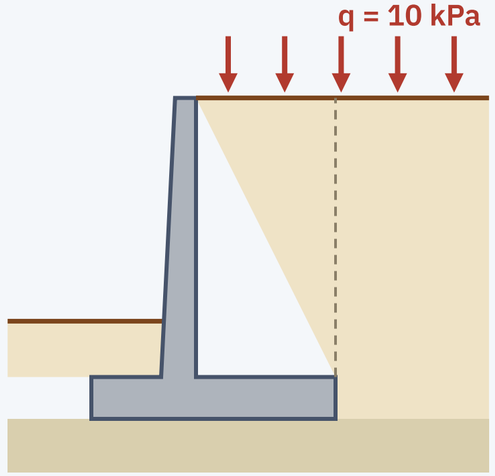
SORU

İSTENEN

K_{AE}, P_{AE}, $\bar{z}$, atalet kuvvetleri; FS_s, FS_o, e, q_{max} ve her kontrolün sonucu.

Verilenler

Duvar ve zemin	**Örnek 1–4'teki duvar (statik FS_s = 2,03; FS_o = 3,81)**
Deprem	$k_h = 0{,}15$, $k_v = 0$; $\eta_{p,E} = 0$; **gerekli** $FS_s,\ FS_o \geq 1{,}1$; **taban tamamen temaslı olmalı (|e| ≤ B/6)**



Çözüm (1/4)

ÇÖZÜM

1 Sismik açı ve katsayı

$$\theta = \tan^{-1} 0{,}15 = 8{,}53^\circ$$

$$\sqrt{\sin 30^\circ \sin(30^\circ - 8{,}53^\circ)/\cos 8{,}53^\circ} = 0{,}4302$$

$$K_{AE} = \frac{\cos^2(21{,}47^\circ)}{\cos^2 8{,}53^\circ (1 + 0{,}4302)^2} = \mathbf{0{,}4329}$$

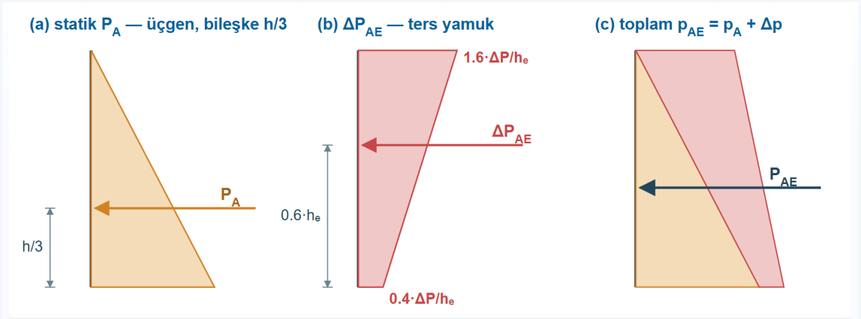
2 Dinamik itki (statik P_A + P_Q = 78,81 kN/m) ve yeri

$$P_{AE} = (190{,}44 + 46{,}0)(0{,}4329) = \mathbf{102{,}36}\ \text{kN/m}$$

$$\Delta P_{AE} = 102{,}36 - 78{,}81 = 23{,}55\ \text{kN/m}\ \ (0{,}6h)$$

$$\bar{z}_{AE} = [63{,}48(1{,}533) + 15{,}33(2{,}30) + 23{,}55(2{,}76)]/102{,}36$$

$$= \mathbf{1{,}930}\ \text{m}$$



Çözüm (2/4)

ÇÖZÜM

3 Atalet kuvvetleri $k_h W$ ve kayma (ön direnç kredisi yok)

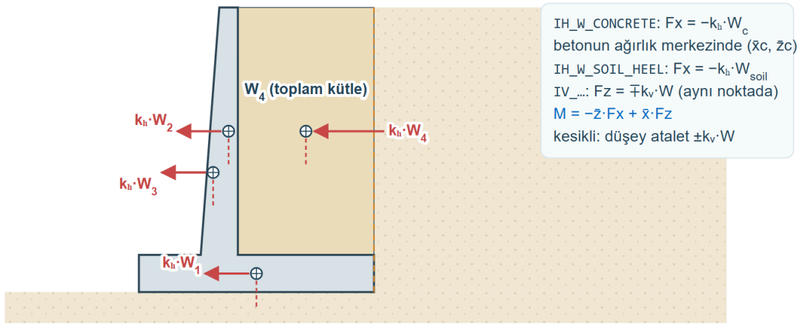
$$IH_c = 0{,}15(88{,}8) = 13{,}32 \;\; (z = 1{,}223\ \text{m})$$

$$IH_s = 0{,}15(144{,}0) = 21{,}60 \;\; (z = 2{,}60\ \text{m})$$

$$IH_{toe} = 0{,}15(14{,}69) = 2{,}20\ \text{kN/m}$$

$$\Sigma H_{drive} = 102{,}36 + 13{,}32 + 21{,}60 + 2{,}20 = 139{,}49$$

$$FS_{s,E} = \frac{\mu_b N}{\Sigma H_{drive}} = \frac{136{,}12}{139{,}49} = \mathbf{0{,}976} \;<\; 1{,}1 \;\; \text{✗}$$



Çözüm (3/4)

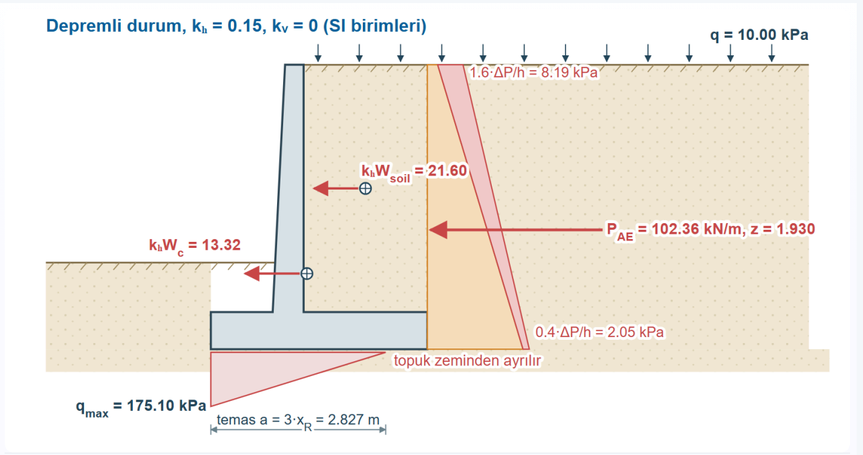
ÇÖZÜM

4 Devrilme (moment kolları: $\bar{z}_{AE}$ = 1,930; z_c = 1,223; 2,60; 1,003 m)

$$M_{o,E} = 197{,}60 + 16{,}28 + 56{,}16 + 2{,}21 = 272{,}26$$

$$FS_{o,E} = \frac{505{,}45}{272{,}26} = \mathbf{1{,}857} \;\geq 1{,}1 \;\checkmark$$

$$x_R = \frac{505{,}45 - 272{,}26}{247{,}5} = 0{,}942 \text{ m}$$



Çözüm (4/4)

ÇÖZÜM

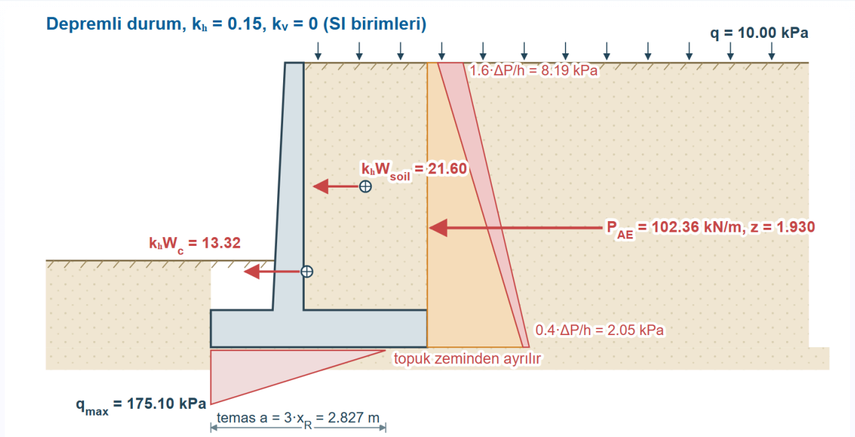
5 Eksantrisite ve kısmi temas

$$e = \frac{B}{2} - x_R = 1{,}750 - 0{,}942 = \mathbf{0{,}808}\ \text{m} \ > \ \frac{B}{6} = 0{,}583 \quad \text{✗}$$

$$a = 3x_R = 2{,}827\ \text{m} \quad \text{(yalnız bu uzunluk temaslı)}$$

$$q_{max} = \frac{2V}{a} = \frac{2(247{,}5)}{2{,}827} = \mathbf{175{,}1}\ \text{kPa} \quad q_{min} = 0$$

Depremde **kayma (FS_s = 0,98 < 1,1)** ve **eksantrisite (e = 0,81 m > B/6)** sağlanmıyor; devrilme (FS_o = 1,86) ve q_{max} = 175,1 kPa yeterli. Kesit **revize edilmeli** (Örnek 6).



Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Soru

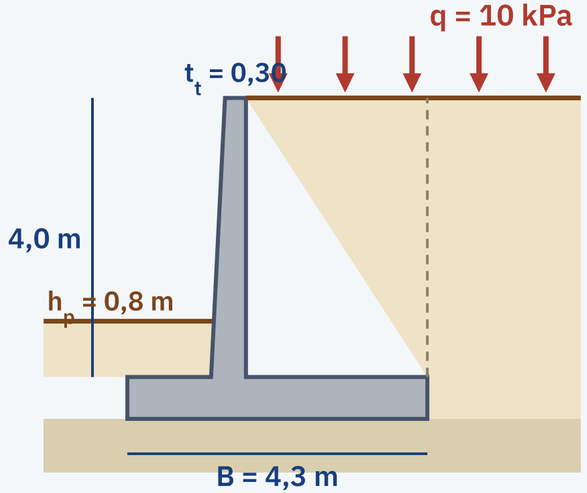
SORU

Verilenler

Sorun	**Örnek 5'te depremde FS_s = 0,98 < 1,1 ve e = 0,81 m > B/6 = 0,58 m**
Önerilen değişiklik	**burun ve topuk uzatılır: $L_t = 1{,}20$ m, $L_h = 2{,}60$ m (B = 4,30 m); diğer ölçüler ve zemin aynı**

İSTENEN

Yeni kesitle statik ve deprem **FS_s**, **FS_o**, **e**, **q_{max}**; kesit yeterli mi?



Çözüm

ÇÖZÜM

1 Aynı yükleme, yeni geometri (modül; B = 4,30 m, W_c = 100,3 kN/m, N = 305,1 kN/m)

	Mevcut (B = 3,5 m)	Revize (B = 4,3 m)	Gerekli
Statik FS_s	2,026	2,427	≥ 1,5
Statik FS_o	3,812	5,753	≥ 2,0
Statik e (m) / q_{max} (kPa)	0,243 / 100,2	0,084 / 79,3	|e| ≤ B/6
Deprem FS_s	0,976 ✗	1,133 ✓	≥ 1,1
Deprem FS_o	1,857	2,630	≥ 1,1
Deprem e (m) / temas	0,808 / kısmi ✗	0,600 / tam ✓ (B/6 = 0,717)	|e| ≤ B/6
Deprem q_{max} (kPa)	175,1	130,4	≤ 200

Burun ve topuğu uzatmak N'yi 247 → 305 kN/m'ye çıkarıp sürtünmeyi artırdı: depremde **FS_s = 1,13 ≥ 1,1**, bileşke orta üçte birin içine girdi (e = 0,60 ≤ B/6 = 0,717): **tüm kontroller sağlanır**. Alternatifler: kayma dişi + $\eta_{p,E}$ (Örnek 9), daha geniş topuk.

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Gövde, burun ve topuk: kritik kesitler

KURAM

Dış stabilite sağlandıktan sonra elemanların **kesit tesirleri** bulunur. **Gövde** sırt basıncıyla yüklenen, tabanında (taban plağı üstünde) ankastre bir konsoldur:

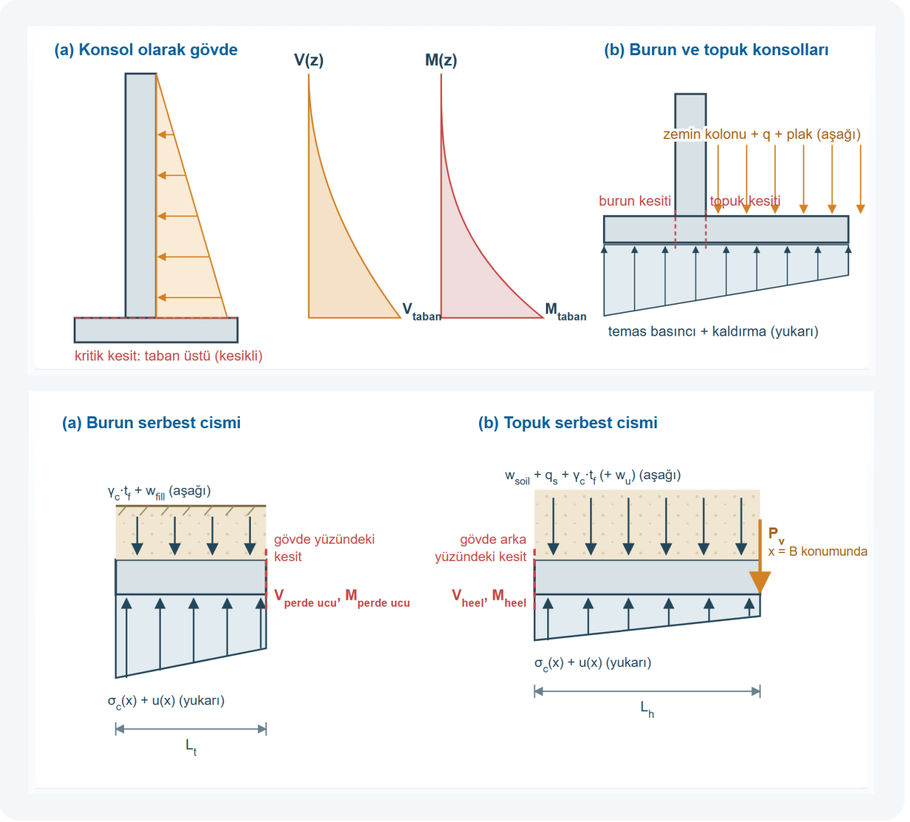
$$V_{st} = K_a\left(\tfrac{1}{2}\gamma H^2 + qH\right) \qquad M_{st} = K_a\left(\frac{\gamma H^3}{6} + \frac{qH^2}{2}\right)$$

Depremde: $V_E = V + \Delta P_{AE,st} + k_h W_{gövde}$, $M_E = M + \Delta P_{AE,st}(0{,}6H) + k_h W_{gövde}\bar{z}$ ($\Delta P_{AE,st} = K_{AE}(½\gamma H^2 + qH) - V_{st}$). **Burun ve topuk** gövde yüzlerinde ankastre plaklardır; yük = taban gerilmesi − plağın ve üstündeki zeminin ağırlığı:

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

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

$w_{toe} = \gamma_c t_f + \gamma h_p$; $w_h = \gamma H + q + \gamma_c t_f$; q_0, q_L, q_a, q_b kritik kesitlerdeki taban gerilmeleridir (doğrusal dağılım).



Soru

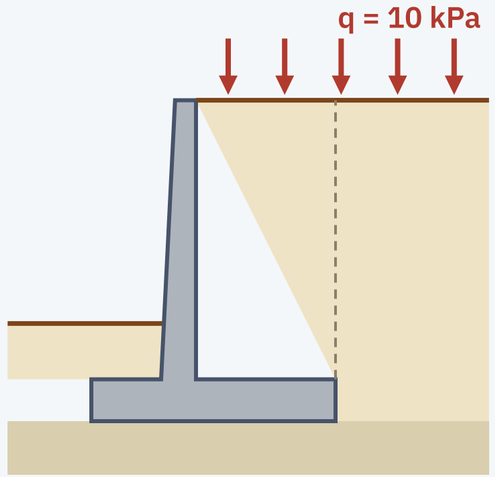
SORU

İSTENEN

Gövde tabanındaki **V** ve **M**: statik ve deprem durumunda.

Verilenler

Duvar ve zemin	**Örnek 1–5'teki duvar:** $H = 4{,}0$ **m;** $\gamma = 18\ \mathrm{kN/m^3}$, $\varphi' = 30^\circ$**;** $q = 10$ **kPa; gövde:** $t_t = 0{,}30$, $t_b = 0{,}50$ **m**
Deprem	$k_h = 0{,}15$ $(K_{AE} = 0{,}4329)$



Çözüm (1/2)

ÇÖZÜM

1 Statik (gövde tabanında, H = 4,0 m)

$$V_{st} = K_a\left(\tfrac{1}{2}\gamma H^2 + qH\right) = 0{,}3333(144 + 40) = \mathbf{61{,}33}\ \mathrm{kN/m}$$

$$M_{st} = K_a\left(\frac{\gamma H^3}{6} + \frac{qH^2}{2}\right) = 0{,}3333(192 + 80) = \mathbf{90{,}67}\ \mathrm{kN\cdot m/m}$$

Çözüm (2/2)

ÇÖZÜM

2 Deprem: sismik artış ve gövdenin ataleti

$$\Delta P_{AE,st} = K_{AE}(184) - V_{st} = 79{,}66 - 61{,}33 = 18{,}33\ \text{kN/m} \quad (0{,}6H = 2{,}40\ \text{m})$$

$$k_h W_{st} = 0{,}15(24)(1{,}2 + 0{,}4) = 5{,}76\ \text{kN/m}; \qquad M_i = 10{,}56\ \text{kN·m/m}$$

3 Toplam deprem tesirleri

$$V_E = 61{,}33 + 18{,}33 + 5{,}76 = \mathbf{85{,}42}\ \text{kN/m}$$

$$M_E = 90{,}67 + 18{,}33(2{,}40) + 10{,}56 = \mathbf{145{,}21}\ \text{kN·m/m}$$

Gövde tabanında statik **V = 61,33 kN/m, M = 90,67 kN·m/m**; deprem **V_E = 85,42, M_E = 145,21** (momentte %60 artış). Betonarme boyutlandırma bu tesirlerle yapılır.

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Soru

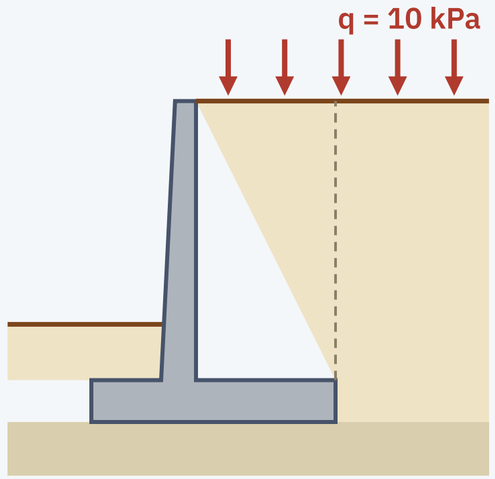
SORU

İSTENEN

Burun ve topuk plaklarının gövde yüzündeki **V** ve **M** değerleri (statik); deprem değerleri.

Verilenler

Taban gerilmeleri (Örnek 4)	$q_{max} = 100{,}22$ **(burun),** $q_{min} = 41{,}20$ **kPa (topuk ucu);** $B = 3{,}5$ **m**
Plak yükleri	$L_t = 1{,}00$**,** $L_h = 2{,}00$ **m,** $t_b = 0{,}50$ **m,** $t_f = 0{,}60$ **m;** $\gamma_c = 24$**; ön dolgu** $h_p = 0{,}8$ **m**



Çözüm (1/2)

ÇÖZÜM

1 Kritik kesitlerde taban gerilmeleri (doğrusal): burunda q_0, gövde yüzünde q_L ve q_a, topuk ucunda q_b

$$q_0 = 100{,}22 \qquad q_L = q_0 + (q_{min} - q_0)\frac{L_t}{B} = 83{,}36$$

$$q_a = q_0 + (q_{min} - q_0)\frac{L_t + t_b}{B} = 74{,}93 \qquad q_b = 41{,}20\ \text{kPa}$$

2 Burun (w_{toe} = 24(0,60) + 18(0,80) = 28,8 kPa)

$$V_{toe} = 1{,}00\frac{100{,}22 + 83{,}36}{2} - 28{,}8(1{,}00) = \mathbf{62{,}99}\ \text{kN/m}$$

$$M_{toe} = \frac{1^2(2\cdot 100{,}22 + 83{,}36)}{6} - \frac{28{,}8(1)^2}{2} = \mathbf{32{,}90}\ \text{kN·m/m}$$

Çözüm (2/2)

ÇÖZÜM

3 Topuk (w_h = 18(4,0) + 10 + 24(0,60) = 96,4 kPa; yük aşağı, taban gerilmesi yukarı)

$$V_{heel} = 96{,}4(2{,}00) - 2{,}00\frac{74{,}93+41{,}20}{2} = \mathbf{76{,}67}\ \mathrm{kN/m}$$

$$M_{heel} = \frac{96{,}4(2)^2}{2} - \frac{2^2(74{,}93+2\cdot 41{,}20)}{6} = \mathbf{87{,}92}\ \mathrm{kN\cdot m/m}$$

Burun: **V = 62,99, M = 32,90**; topuk: **V = 76,67, M = 87,92** (yukarı doğru eğilen burun, aşağı doğru eğilen topuk). Depremde (kısmi temas, modül): burun V = 115,33, M = 62,83; topuk V = 138,28, M = 168,69: **topuk momenti 1,9 kat artar**.

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Basitleştirilmiş kayma dişi yöntemi

KURAM

Taban sürtünmesi yetmezse taban altına, bozulmamış zemine bir **diş** dökülür; dişin ön yüzü önündeki zeminin pasif direncini kayma yüzeyine ekler. Yöntem bilinçli olarak basittir: diş yüzü **karma** basınç $K_{mob}\sigma'_v$ alır, kaymada tam kredilendirilir; diş **kesit tesirleri** ise **brüt tam pasif** diyagramdan bulunur:

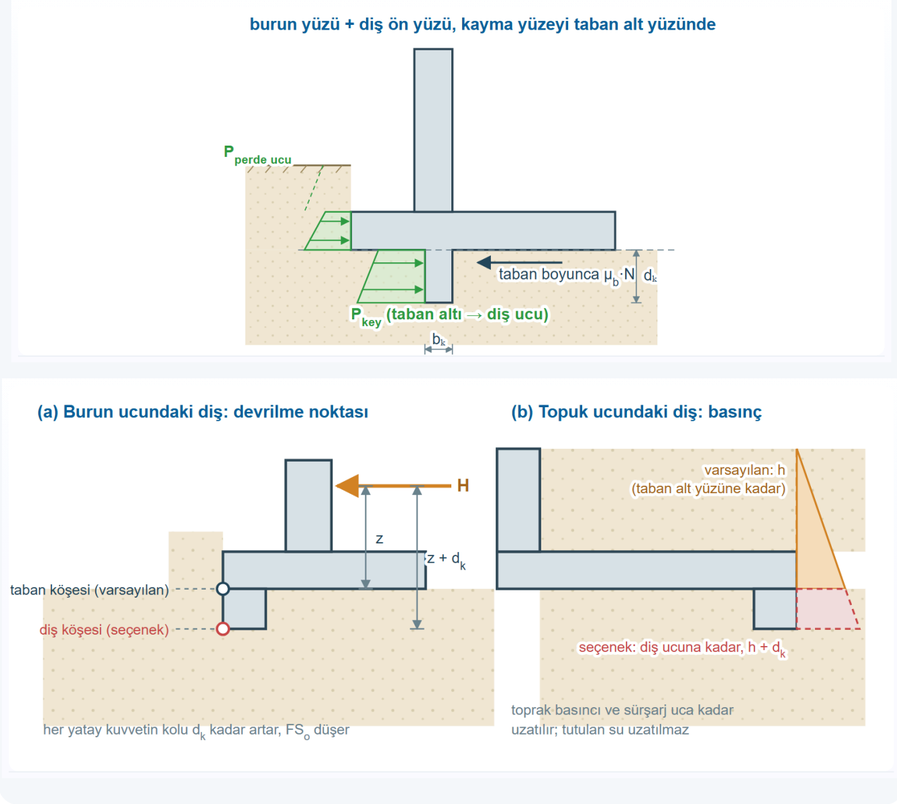
$$P_{key} = \tfrac{1}{2}\left(p_{top} + p_{bot}\right) d_k \quad (p = K_{mob}\sigma'_v) \qquad V_{key} = \tfrac{1}{2}\left(p^g_{top} + p^g_{bot}\right) d_k \quad (p^g = K_p\sigma'_v)$$

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

Diş ağırlığı (N_{eff}'e) hem statikte hem depremde dahildir. Pasif dirençler **yalnızca kaymada** kullanılır; depremde ikisi de $\eta_{p,E}$ ile çarpılır (varsayılan 0, yani kredi yok).

Dönme merkezi: burun kenarındaki dişte devrilme pivotu taban plağının ön alt köşesi (varsayılan) ya da dişin ön alt köşesi seçilebilir; topuk kenarındaki dişte aktif basınç diş ucuna kadar uzatılabilir.

$\Delta FS = P_{key}/\Sigma H_{drive}$ her durumda raporlanır.



Soru

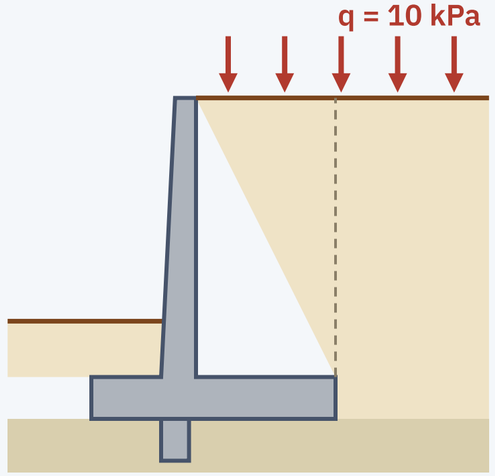
SORU

Verilenler

Duvar	**Örnek 1–5'teki duvar; burun kenarına yakın diş:** $x_k = 1{,}0$ **m,** $b_k = 0{,}40$ **m,** $d_k = 0{,}60$ **m (taban altına)**
Zemin	$\gamma = 18\ \mathrm{kN/m^3},\ \varphi' = 30°$**; ön zemin** $D_f = 1{,}4$ **m (taban altı 2,0 m);** $w = 1/3$ **(**$K_{mob} = 1{,}333$**)**
Deprem	$\eta_{p,E} = 0$ **(varsayılan) ve** $\eta_{p,E} = 0{,}5$

İSTENEN

Diş direnci $\mathbf{P_{key}}$, statik $\mathbf{FS_s}$; dişin kesit tesirleri $\mathbf{V_{key}}$, $\mathbf{M_{key}}$; depremde $\eta_{p,E}$ etkisi.



Çözüm (1/2)

ÇÖZÜM

1 Diş yüzündeki karma basınç ($\sigma'_v = 18\,z$; $z = 1{,}4 \rightarrow 2{,}0$ 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 Statik kayma (diş ağırlığı 5,76 kN/m N'ye girer; toe pasif 23,52 kredilidir)

$$N_{eff} = 253{,}25 \qquad \mu_b N = 139{,}29\ \text{kN/m}$$

$$FS_s = \frac{139{,}29 + 23{,}52 + 24{,}48}{78{,}81} = \mathbf{2{,}376}\ \ (\text{dişsiz } 2{,}066)$$

Çözüm (2/2)

ÇÖZÜM

3 Diş kesit tesirleri: brüt tam pasif (K_p = 3,00): p^g_{top} = 75,6; p^g_{bot} = 108,0 kPa

$$V_{key} = \tfrac{1}{2}(75{,}6 + 108{,}0)(0{,}60) = \mathbf{55{,}08}\ \mathrm{kN/m}$$

$$M_{key} = 45{,}36(0{,}30) + 9{,}72(0{,}40) = \mathbf{17{,}50}\ \mathrm{kN\cdot m/m}$$

Diş statik kayma güvenliğini 2,07 → **2,38** yaptı (ΔFS = 0,31). Depremde $\eta_{p,E}$ = 0 iken diş **kredi sağlamaz**; $\eta_{p,E}$ = 0,5 ile $FS_{s,E}$ 0,98 → **1,16** (≥ 1,1 sağlanır), ama eksantrisite (0,80 m > B/6) sürer: bu yüzden Örnek 6'daki geometri değişikliği daha etkilidir.

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Her iki yanda hidrostatik su, tabanda doğrusal kaldırma

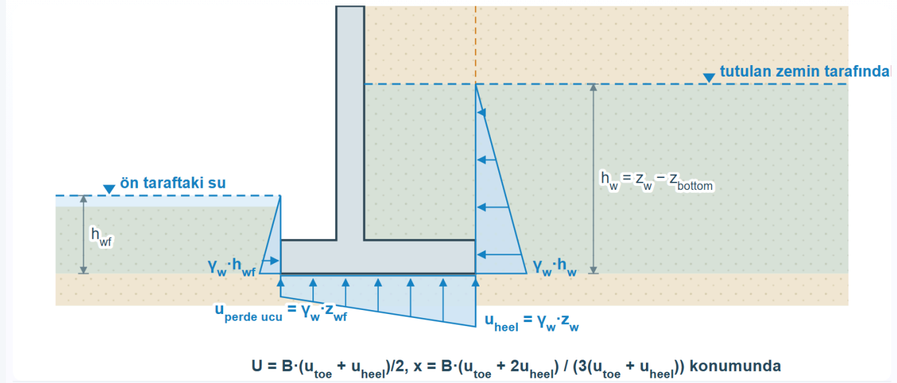
KURAM

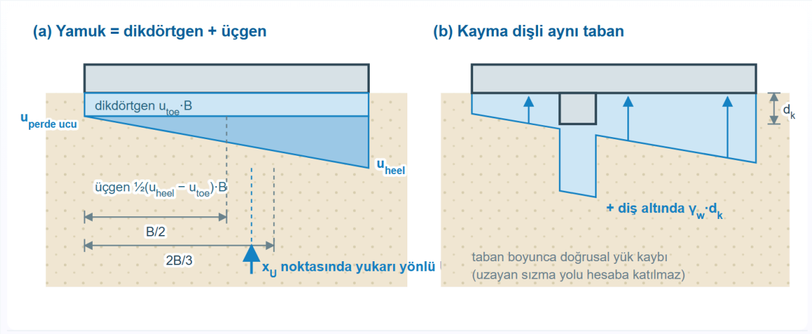
Su basıncı izotroptur ve her yüzeye dik etkir. Serbest cisim üç sınırında suyla çevrilidir: arka basınç düzlemi, duvarın ön yüzü ve taban altı. Her biri kuvvet çizelgesinde ayrı kalemdir; zemin toplam gerilmeyle tartılır (γ_{sat}):

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

Kaldırma yukarı etkir: N'yi (ve sürtünmeyi) azaltır, devirme momenti ekler. Taban altı basınç burundaki ve topuktaki su yükleri arasında doğrusal değişir.

Deprem durumunda serbest boşluk suyunun hidrodinamik basıncı $(7/12)k_h\gamma_W h_W^2$ $(0{,}4h_W)$ ayrıca eklenir.





Soru

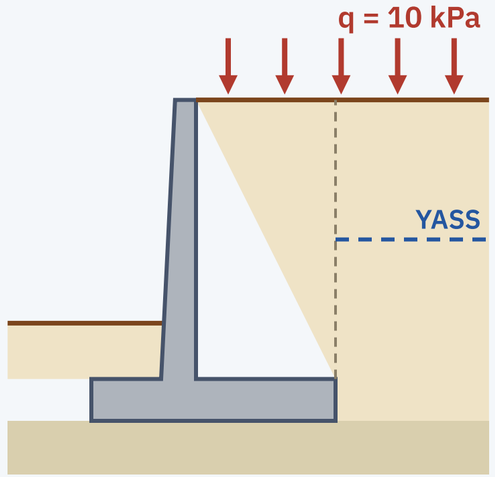
SORU

Verilenler

Duvar ve zemin	**Örnek 1–4'teki duvar ve dolgu ($\gamma = 18,\ \gamma_{sat} = 20\ \mathrm{kN/m^3}$); statik durum**
Su	**dolguda yeraltı su seviyesi duvar tepesinin 2,0 m altında; taban altında doğrusal kaldırma**

İSTENEN

Kuvvet çizelgesi; **FS_s**, **FS_o**, **e**, **q_{max}**; suyun etkisi.



Çözüm (1/2)

ÇÖZÜM

1 Kuvvet çizelgesi (modül; $M = xF_Z - zF_X$, devirme +)

Kalem	F_x (kN/m)	F_z (kN/m)	x (m)	z (m)	M (kN·m/m)
Duvar	0,00	−88,80	1,55	1,22	−137,96
Topuk bloğu (γ_{sat} ile)	0,00	−152,00	2,50	2,55	−380,00
Q_{heel} (kullanılmaz)	0,00	−20,00	2,50	4,60	−50,00
Ön dolgu	0,00	−14,69	0,51	1,00	−7,49
Zemin itkisi P_A	−54,68	0,00	3,50	1,64	89,71
Sürşarj itkisi P_Q	−15,33	0,00	3,50	2,30	35,27
Arka su itkisi	−33,16	0,00	3,50	0,87	28,74
Kaldırma	0,00	44,64	2,33	0,00	104,15
Ön direnç	23,52	0,00	0,00	0,47	−10,98

Çözüm (2/2)

ÇÖZÜM

2 Kontroller

$$N = 210{,}85\ \text{kN/m} \quad FS_s = \frac{116{,}0 + 23{,}5}{103{,}2} = \mathbf{1{,}352} \quad FS_o = \frac{525{,}5}{257{,}9} = \mathbf{2{,}038}$$

$$e = 0{,}481\ \text{m}\ (\leq B/6 = 0{,}583) \qquad q_{max} = 109{,}9\ \text{kPa} \qquad q_{min} = 10{,}6\ \text{kPa}$$

Su kayma güvenliğini 2,03 → **1,35** (< 1,5 ✗), devrilme güvenliğini 3,81 → **2,04**, e'yi 0,243 → 0,481 m değiştirdi; kaldırma N'yi 44,6 kN/m azalttı. **Statik kayma sağlanmıyor**: drenaj, dişli ya da daha geniş taban gerekir.

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Gövdeyi hafifleten konsol plağı

KURAM

Hafifletme konsolu gövdenin sırtından dolguya uzanan betonarme bir plaktır; yüksek duvarlarda (gövde momenti H³ ile büyür) ya da yetersiz duvarı güçlendirmek için kullanılır. Üç etkisi: (1) üstündeki zemini taşır; (2) altındaki gövdeyi **hafifletir**: konsol altında kendi ağırlık basıncı yeniden başlar; (3) duvara ağırlık ekler.

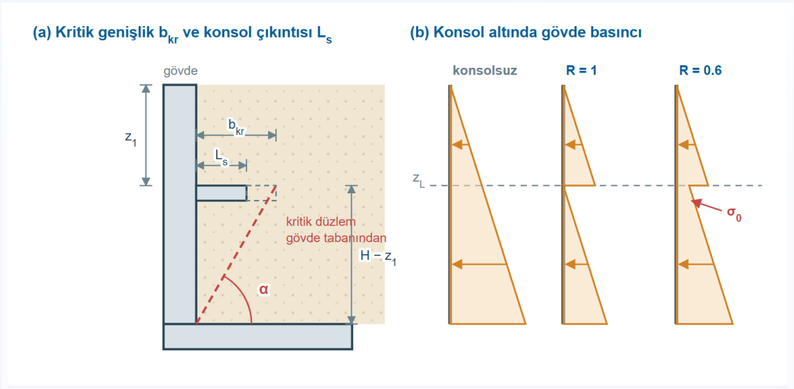
Konsol, ancak ucu gövde sırtının altından yükselen **kritik kayma düzlemine** ulaşırsa tam etkilidir (Rankine, yatay dolgu: α = 45° + φ′/2). Konsolun gereken kritik genişliği ve hafifleme oranı:

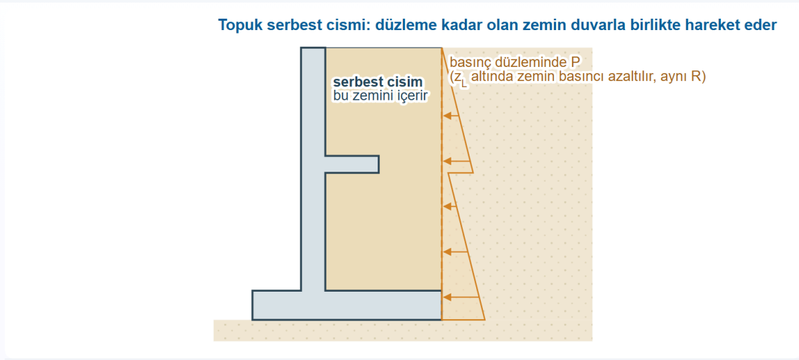
$$b_{kr} = (H - z_1)\,(\cot\alpha - \tan\beta_w) \qquad R = \min\left(\frac{L_s}{b_{kr}}, 1\right)$$

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

R = 1: iki ayrı üçgen (tam hafifleme); R < 1: kısmi hafifleme, konsolsuz ve tam hafiflemeli duvar arasında doğrusal ara değer. Yalnız statik **zemin ağırlığı** basıncı hafifler; sürşarj, su ve deprem artışı hafiflemez.

Konsolun yükünün gövdeye karşı momenti gövdeye kredilendirilmez (tutucu); konsol kendi yükünde ayrı bir konsoldur (M_{root}).





Soru

SORU

Verilenler

Duvar ve zemin	**Örnek 1–4'teki duvar (H = 4,0 m; statik); yatay dolgu,** $\varphi' = 30^\circ$
Konsol	**konsol altı derinliği** $z_1 = 2{,}15$ **m (duvar tepesinden), projeksiyon** $L_s = 1{,}00$ **m, kalınlık** $t_s = 0{,}30$ **m**

İSTENEN

Kritik açı α, kritik genişlik $\mathbf{b_{kr}}$, **R**; gövde tabanında V, M değişimi; dış stabilite.

Çözüm (1/2)

ÇÖZÜM

1 Kritik düzlem ve genişlik (dikey sırt: $\beta_W = 0$)

$$\alpha = 45^\circ + \frac{\varphi'}{2} = 60{,}0^\circ \qquad b_{kr} = (4{,}0 - 2{,}15)\cot 60^\circ = 1{,}068\ \text{m}$$

$$R = \min(1{,}00/1{,}068,\ 1) = \mathbf{0{,}9362}\ \ (\text{kısmi hafifleme})$$

2 Gövde tabanındaki tesirler (konsolsuz → konsollu)

$$V:\ 61{,}33 \rightarrow 38{,}99\ \text{kN/m}\ \ (-\%36{,}4)$$

$$M:\ 90{,}67 \rightarrow 70{,}00\ \text{kN·m/m}\ \ (-\%22{,}8)$$

Çözüm (2/2)

ÇÖZÜM

3 Konsol yükü ve dış stabilite (basınç düzleminde aynı hafifleme)

$$W_{soil} = 43{,}3\ \mathrm{kN/m}, \quad W_{self} = 7{,}2\ \mathrm{kN/m}, \quad M_{root} = 25{,}25\ \mathrm{kN\cdot m/m}$$

$$FS_s:\ 2{,}03 \rightarrow 3{,}26 \qquad FS_o:\ 3{,}81 \rightarrow 5{,}28 \qquad e:\ 0{,}243 \rightarrow 0{,}094\ \mathrm{m}$$

Konsol (L_S = 1,00 m < b_{kr} = 1,07 m: R = 0,94) gövde tabanında kesmeyi %36, momenti %23 azaltır; konsolun yükü ve ağırlığı duvara eklenir: kayma FS 2,03 → 3,26, eksantrisite 0,243 → 0,094 m. Konsol ayrıca kendi kökünde M_{root} = 25,3 kN·m/m için boyutlandırılır.

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Çözümün kapsamı

KURAM

Dış stabilite duvarı tek rijit blok sayar; **kesit tesirleri** (gövde, burun, topuk, konsol, diş) bu modülün verdiği etkilerden elde edilir, betonarme boyutlandırma (donatı, kesme) bu sunumun dışındadır.

Kohezyonsuz dolgu ($c' = 0$); tek tabaka, düz ya da tek eğimli yüzey; su düz ve hidrostatik; sürşarj düzgün yayılı (şerit ve noktasal yanal basınçlar Boussinesq ile eklenir).

Taban sürtünmesi $\mu_b = \tan \delta_b$; yapışma yok. Ön pasif direnç yalnız kaymada, devrilmede ve taşıma gücünde kullanılmaz; depremde $\eta_{p,E}$ ile (varsayılan 0).

Pseudo-statik deprem: Mononobe–Okabe + atalet + hidrodinamik su; $k_v > 0$ ise iki yön de çalışılır.

Hafifletme konsolu ve kayma dişi basitleştirilmiş yöntemlerle modellenir (konsol: kısmi/tam hafifleme, diş: karma pasif); genel stabilite ve oturma kapsam dışıdır.

Özet

Akılda kalacak noktalar

Duvar: taban plağı + gövde; $W_c = \Sigma \gamma_c A_i$; **topuk bloğu** ve ön dolgu duvarla hareket eder; basınç temelin arka kenarındaki düşey düzlemde ($h = t_f + H$); Q_{heel} hiçbir kontrole girmez

Kontroller aynı kuvvet çizelgesinden: $FS_s = (\mu_b N + P_P)/\Sigma H$, $FS_o = \Sigma M_{res}/\Sigma M_{ov}$, x_R, e, $q = V/B(1 \pm 6e/B)$; $|e| > B/6$ ise $q_{max} = 2V/(3x_R)$

Deprem: P_{AE} (Mononobe–Okabe) + ΔP_{AE} 0,6h'de + $k_h W$ ataletleri; örnek duvar depremde **kayma ve eksantrisitede başarısız**, geniş burun/topukla revize edilince sağlanır

Kesit tesirleri: gövde $V = K_a(\tfrac{1}{2}\gamma H^2 + qH)$, $M = K_a(\gamma H^3/6 + qH^2/2)$; burun ve topuk, gövde yüzünde ankastre: taban gerilmesi – plak ve zemin ağırlığı

Kayma dişi: P_{key} karma pasiften (kaymada), V, M brüt K_p'den; depremde $\eta_{p,E}$ ile

Hafifletme konsolu: $b_{kr} = (H - z_1)(\cot \alpha - \tan \beta_w)$, $R = \min(L_s/b_{kr}, 1)$; konsol altında ağırlık basıncı yeniden başlar; su ve sürşarj hafiflemez

Su: γ_{sat} ile ağırlık + ayrı arka su itkisi; kaldırma N'yi azaltır, devirme ekler (örnekte statik kayma sağlanmaz)

Kaynaklar

Modülün dayandığı üç teori ve bu teorilerin kapalı ifadelerinin (Ka, Kp, KAE) sunumunda kılavuzun izlediği kaynak. Bunlardan türetilmeyen her şey bu modülün bir kabulüdür ve metinde bu şekilde belirtilmiştir.

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.

NOT

Sayısal örneklerin tümü modülün kendi hesap motoruyla üretilmiştir; modül aynı değerleri verir. Modül sayfasındaki adım adım örnek de bu duvardır (H = 4 m, q = 10 kPa, k_h = 0,15).

GeoTerva

Çevrim içi geoteknik hesaplar

Teoriden uygulamaya

Kendi duvarınızın gövdesini, taban plağını, dolgusunu, suyunu, deprem katsayılarını, kayma dişini ve konsolunu GeoTerva'da girin; modül kuvvet çizelgesini, kontrolleri ve kesit tesirlerini birlikte verir.

Modülü açın →

Teori sayfası →

Telefonla açın
Örnek modüller kayıt gerektirmez.

Derslerinizde kullanmak isterseniz: info@geoterva.com