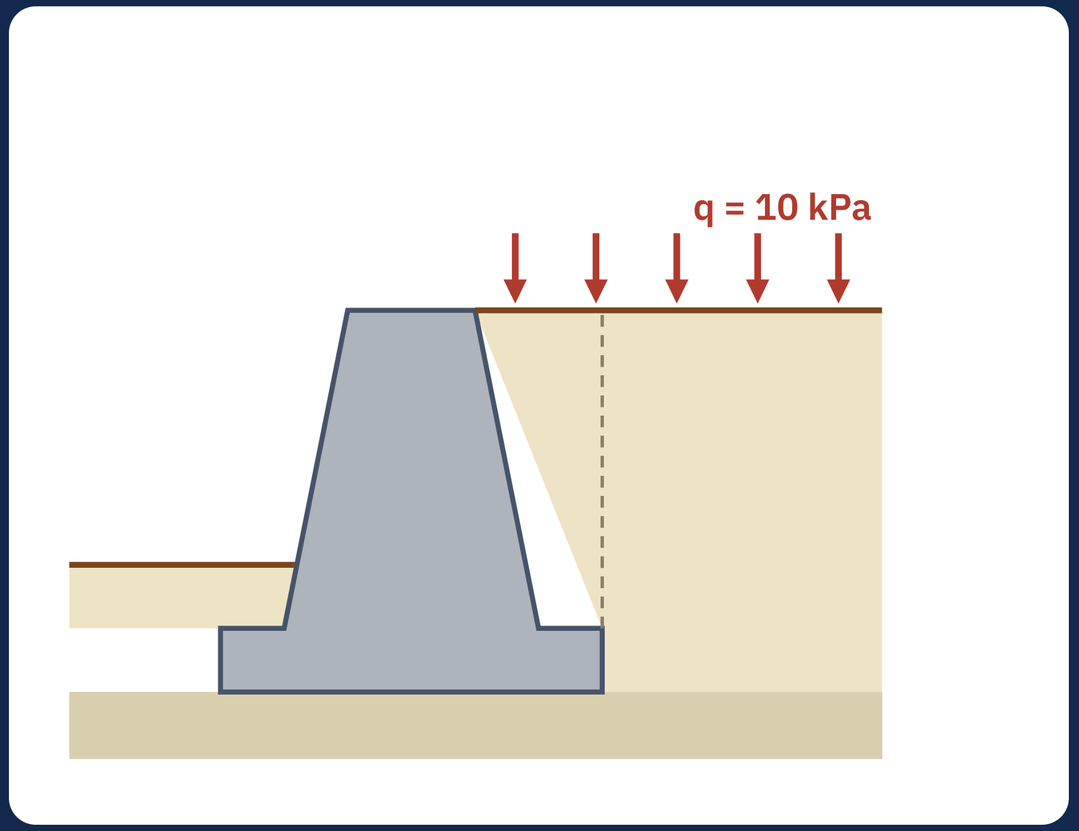
Geoteknik ders sunumu · İstinat duvarları

Ağırlık istinat duvarı

Ders anlatımı: taş ya da beton ağırlık istinat duvarının dış stabilitesi; duvar ve onunla birlikte hareket eden zemin, aktif ve pasif toprak basıncı, su, kaldırma ve deprem; kayma, devrilme ve taşıma gücü kontrolleri; her konuda çözümlü örnek.

- Kayma · devrilme · taşıma gücü
- Rankine · Coulomb · Mononobe–Okabe
- Su ve kaldırma kuvveti
- Depremde atalet
- Kuvvet çizelgesi



Bu derste neler öğreneceğiz?

- Ağırlık duvarının **geometrisini** ve ağırlığını parçalara ayırarak (alan, ağırlık merkezi, moment kolu) hesaplamayı
- Duvarla birlikte hareket eden **zemin bloğunu** ve temelin arka kenarından geçen **düşey basınç düzlemini**
- **Aktif** (Rankine = Coulomb, düşey düzlemde), sürşarj, **pasif ön direnç** (K_{mob}) ve **su + kaldırma** kuvvetlerini
- **Kuvvet çizelgesini** ve tek bir işaret düzenini ($M = x \cdot F_z - z \cdot F_x$) kullanarak **kayma, devrilme ve taşıma gücü** kontrollerini
- Depremde **Mononobe–Okabe** itkisini, sismik artışı ve duvarın ataletini katmayı
- Sonucu okumayı: güvenlik sayıları, eksantrisite, taban gerilmeleri

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 (kN/m, kN·m/m); basınçlar kPa. Örnek duvar: H = 3 m taş duvar (22 kN/m³).

Ne çözülür, nasıl çizilir?

KURAM

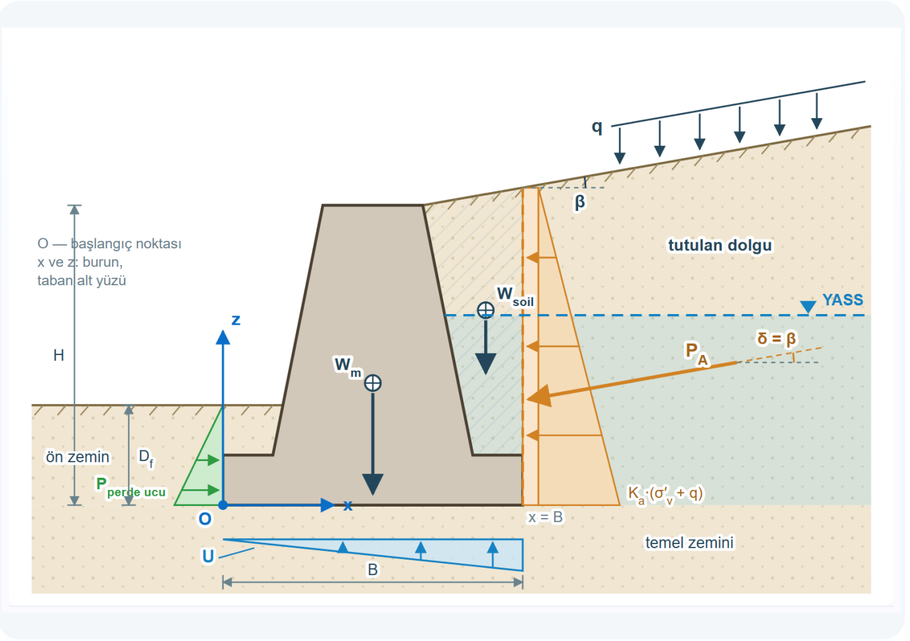
Ağırlık duvarı kaymaya ve devrilmeye **kendi ağırlığıyla** direnir. Modül gövdesi eğimli yamuk, iki yanda basamaklı ayaklı taş ya da kütle beton bir duvarı inceler:

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

Duvar: H toplam yükseklik, W_u üst genişlik, W_{dl}, W_{dr} ön ve arka şev ofsetleri, W_{bl}, W_{br} ayak çıkıntıları, H_{fl}, H_{fr} ayak yükseklikleri; birim ağırlık taşta 22, betonda 24 kN/m³.

Zemin: kohezyonsuz dolgu (c′ = 0), eğimli yüzey β, sürşarj q, yeraltı suyu, önde D_f yüksekliğinde zemin ve su.

Üç kuram: Rankine, Coulomb (statik), Mononobe–Okabe (deprem). **Kontroller**: kayma, devrilme, eksantrisite, taşıma gücü.



Serbest cisim, kuvvet çizelgesi, tek işaret düzeni

KURAM

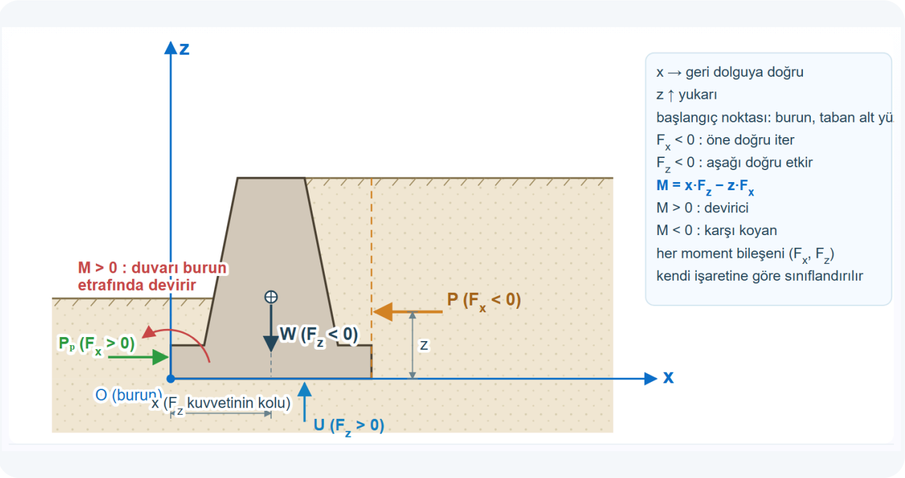
Stabilite bir **denge** problemidir: önce neyin dengede olduğuna ve kuvvetlerin nasıl işaretleneceğine karar verilir. Başlangıç O **burunda** (ön alt köşe), x dolguya, z yukarıdır. Bir kuvvet (F_x, F_z) bileşenleri ve etki noktasıyla yazılır; O'ya göre moment:

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

Ağırlık ($F_z = -W$, $x > 0$) için $M = -xW < 0$: duvarı tutar. Öne doğru itki ($F_x < 0$) için $M = -zF_x > 0$: duvarı devirir. Kaldırma ($F_z > 0$) devirir, ön direnç ($F_x > 0$) tutar.

Hiçbir kuvvet "tutucu" diye önceden sınıflanmaz; her bileşen kendi işaretiyle sayılır (eğik itkinin düşey bileşeni doğru olarak tutucudur).

Serbest cisim = duvar + onunla hareket eden zemin; **kuvvet çizelgesindeki** her kalem üç kontrolce de aynı okunur: hiçbir kuvvet birinde unutulup öbüründe sayılamaz.



Parçalara ayırma, ağırlık merkezleri ve kollar

KURAM

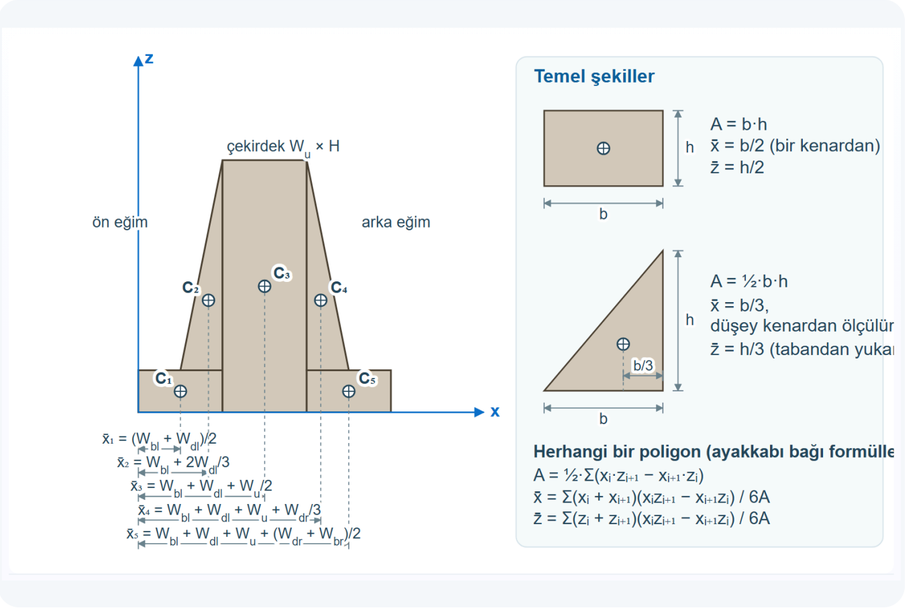
Duvarın ağırlığı ve burna göre momenti iki stabilite kontrolünün de temelidir. Kesit alanı ve ağırlık merkezi bilinen basit şekillere (ön ayak, ön şev, çekirdek, arka şev, arka ayak) bölünür:

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

Kuvvet çizelgesinde duvar tek kalemdir: $F_z = -W_m$, $\bar{x}_m$'de; momenti $M = -W_m\bar{x}_m = -\Sigma M_i$.

Yükseklik $\bar{z}_m$ yalnızca yatay atalet $k_h W_m$ (deprem) için gerekir.

Modül ayrıca tüm kesiti tek çokgen olarak da hesaplar; ikisi 10^{-9} içinde uyuşur.



Soru

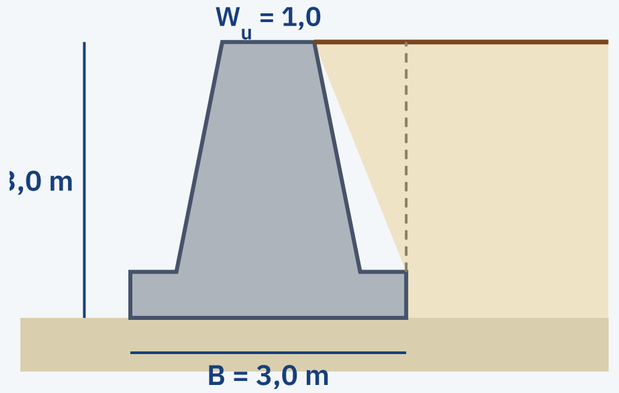
SORU

İSTENEN

Beş parçanın alanı ve ağırlığı; W_m, $\bar{x}_m$, $\bar{z}_m$.

Verilenler

Kesit	$H = 3{,}0$ **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)**
Malzeme	**taş duvar:** $\gamma_m = 22\ \mathrm{kN/m^3}$



Çözüm

ÇÖZÜM

1 Parçalar (örn. ön şev: $A = \tfrac{1}{2}(0{,}5)(3{,}0 - 0{,}5) = 0{,}625$; $\bar{x} = W_{bl} + 2W_{dl}/3 = 0{,}833$; $\bar{z} = H_{fl} + (H - H_{fl})/3 = 1{,}333$)

Parça	A (m²)	x̄ (m)	z̄ (m)	W = 22A (kN/m)	W·x̄	W·z̄
Ön ayak	0,500	0,500	0,250	11,00	5,50	2,75
Ön şev	0,625	0,833	1,333	13,75	11,46	18,33
Gövde (çekirdek)	3,000	1,500	1,500	66,00	99,00	99,00
Arka şev	0,625	2,167	1,333	13,75	29,79	18,33
Arka ayak	0,500	2,500	0,250	11,00	27,50	2,75
Toplam	**5,250**			**115,50**	**173,25**	**141,17**

2 Duvarın ağırlık merkezi

$$\bar{x}_m = \frac{173{,}25}{115{,}50} = \mathbf{1{,}500\ m} \qquad \bar{z}_m = \frac{141{,}17}{115{,}50} = \mathbf{1{,}222\ m}$$

Duvarın ağırlığı **W_m = 115,50 kN/m**, burundan $\bar{x}_m$ = 1,50 m, tabandan $\bar{z}_m$ = 1,22 m; momenti M = −173,25 kN·m/m (tutucu).

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Düşey basınç düzlemi ve zemin bloğu

KURAM

Toprak basıncı neden duvarın arka şevine değil de **temelin arka kenarına** etkir? Arka ayağın üstündeki zemin duvara göre kayamaz: duvar hareket ederse onunla gider. Dolgudaki göçme düzlemleri arka şevden değil **ayağın arka kenarından** başlar. Tutarlı serbest cisim: duvar + bu zemin bloğu; dış yüzündeki **dış basınç düzlemi** x = B'de düşeydir:

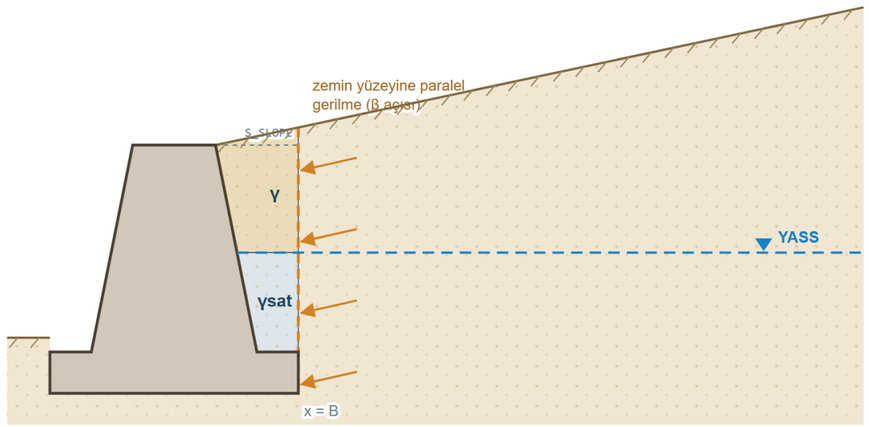
Düzlem, arka kenarın üstündeki yüzeyden taban altına iner; eğimli dolguda yüzeyin yükselmesini de kapsar. Düzlem ile duvarın arkası arasındaki her şey **ağırlıktır**; düzlem zemine karşı zemindir: duvar sürtünmesi sayılmaz, itki δ = β ile etkir.

Önde ayağın üstündeki dolgu da duvarla hareket eder: düşey yük W_{toe}; $D_f = 0$ girilirse ön zemin alınabilir demektir.

Sürşarjın arka ayak üstündeki düşey kısmı (Q_{heel}) lehte ama yokken de olabilecek bir yük sayıldığından **hiçbir kontrole girmez**; yanal etkisi ise daima sayılır.

Toplam gerilmeyle çalışılır: su altındaki zemin γ_{sat} ile tartılır, suyun kendisi ayrı kuvvet olarak (U_{rear}, kaldırma) eklenir; γ′ ve kaldırma birlikte alınmaz.

Temelin arka kenarından geçen düşey düzlem (tüm yöntemler)



Soru

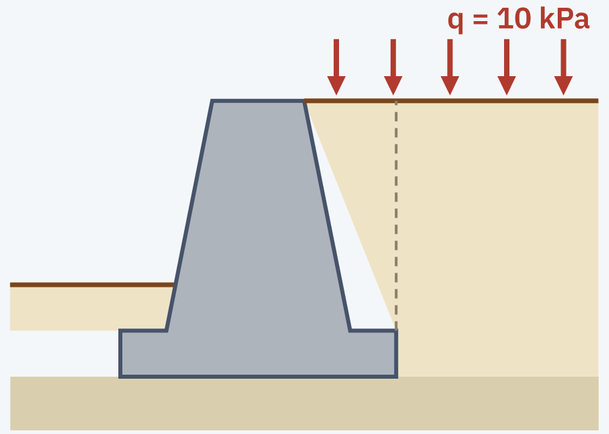
SORU

Verilenler

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

İSTENEN

Duvarla birlikte hareket eden **zemin bloğunun** ağırlığı ve yeri; **ön dolgu**; Q_{heel} neden kontrollere girmez?



Çözüm (1/2)

ÇÖZÜM

1 Arka ayağın üstündeki dikdörtgen + arka şevin yanındaki üçgen (x = B = 3,0 düzlemine kadar)

$$A_r = W_{br}(H - H_{fr}) = 0{,}5(2{,}5) = 1{,}250\ \mathrm{m}^2\ (\bar{x} = 2{,}75,\ \bar{z} = 1{,}75)$$

$$A_t = \tfrac{1}{2} W_{dr}(H - H_{fr}) = 0{,}625\ \mathrm{m}^2\ (\bar{x} = 2{,}333,\ \bar{z} = 2{,}167)$$

$$W_s = \gamma(A_r + A_t) = 18(1{,}875) = \mathbf{33{,}75}\ \mathrm{kN/m}$$

2 Yeri

$$\bar{x}_s = \frac{1{,}250(2{,}75) + 0{,}625(2{,}333)}{1{,}875} = \mathbf{2{,}611}\ \mathrm{m} \qquad \bar{z}_s = \mathbf{1{,}889}\ \mathrm{m}$$

Çözüm (2/2)

ÇÖZÜM

3 Ön dolgu (ayağın üstünde, D_f = 1,0 m) ve sürşarj

$$A_{toe} = \tfrac{1}{2}(0{,}5 + 0{,}60)(0{,}5) = 0{,}275\ \text{m}^2 \quad W_{toe} = 18(0{,}275) = \mathbf{4{,}95}\ \text{kN/m}\ (\bar{x} = 0{,}276)$$

$$Q_{heel} = q(B - x_{BT}) = 10(3 - 2) = \mathbf{10{,}0}\ \text{kN/m}\ (\text{hiçbir kontrole girmez})$$

Toplam düşey yük N = W_m + W_s + W_{toe} = 115,50 + 33,75 + 4,95 = **154,20 kN/m**. Q_{heel} = 10,00 kN/m çizelgede "kullanılmayan" kalemdir.

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Rankine ve Coulomb, düşey düzlemde

KURAM

Dolgu yüzeyi β eğimliyse Rankine'nin yarı sonsuz şev çözümünde düşey düzlemdeki gerilme **yüzeye paraleldir**: $\sigma'_a = K_{a\beta}\sigma'_v$:

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

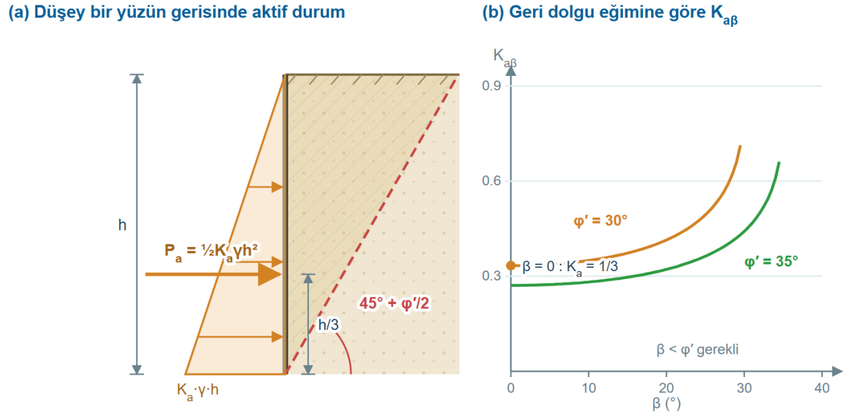
$$P_A = \tfrac{1}{2}K_a\gamma h^2\ \ (h/3) \qquad P_Q = K_a q h\ \ (h/2)$$

Karekök için β < φ′ gerekir; β ≥ φ′ ise şevin kendisi stabil değildir ve hesap engellenir.

Coulomb: düşey düzlemde (α = 90°) ve δ = β için K_a, Rankine $K_{a\beta}$'ya **her β için tam eşittir**; iki yöntem bu düzlemde aynı basıncı verir. h = düzlemin yüksekliği (yüzeyin yükselmesi dahil).

Yatay bileşen P cos β, düşey bileşen P sin β (yükselen şevde aşağı doğru: tutucu).

Sürşarj iki kez hesaplanır (q ile ve q'suz); P_Q farktır.



Soru

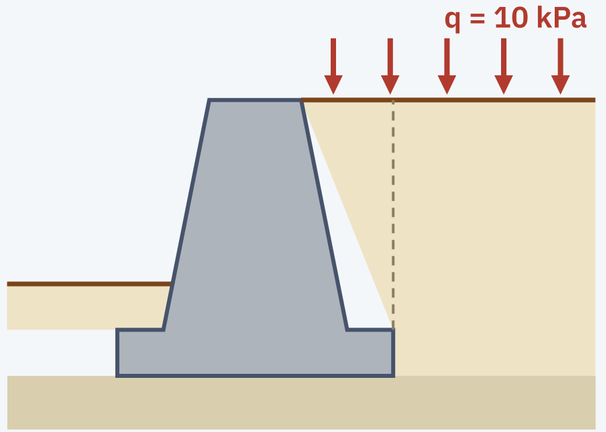
SORU

İSTENEN

K_a, zemin itkisi P_A ve sürşarj itkisi P_Q ile momentleri.

Verilenler

Duvar ve zemin	**Örnek 2'deki duvar ve dolgu:** $h = H = 3{,}0$ **m;** $\gamma = 18\ \mathrm{kN/m^3}$, $\varphi' = 30^\circ$**; yatay yüzey**
Sürşarj	$q = 10$ **kPa**



Çözüm

ÇÖZÜM

1 K_a = (1 − sin30°)/(1 + sin30°) = 0,3333; itkiler (düşey düzlemde, yatay)

$$P_A = \tfrac{1}{2} K_a \gamma h^2 = \tfrac{1}{2}(0{,}3333)(18)(9) = \mathbf{27{,}00}\ \mathrm{kN/m} \quad (z = 1{,}00\ \mathrm{m})$$

$$P_Q = K_a q h = 0{,}3333(10)(3) = \mathbf{10{,}00}\ \mathrm{kN/m} \quad (z = 1{,}50\ \mathrm{m})$$

2 Toplam yatay itki ve devirme momenti (burna göre)

$$\Sigma H_{drive} = 27{,}0 + 10{,}0 = \mathbf{37{,}0}\ \mathrm{kN/m}$$

$$M_o = 27{,}0(1{,}00) + 10{,}0(1{,}50) = 27{,}0 + 15{,}0 = \mathbf{42{,}0}\ \mathrm{kN{\cdot}m/m}$$

Zemin itkisi 27,00, sürşarj itkisi 10,00 kN/m: toplam **37,00 kN/m**, burna göre **42,00 kN·m/m**.

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Soru

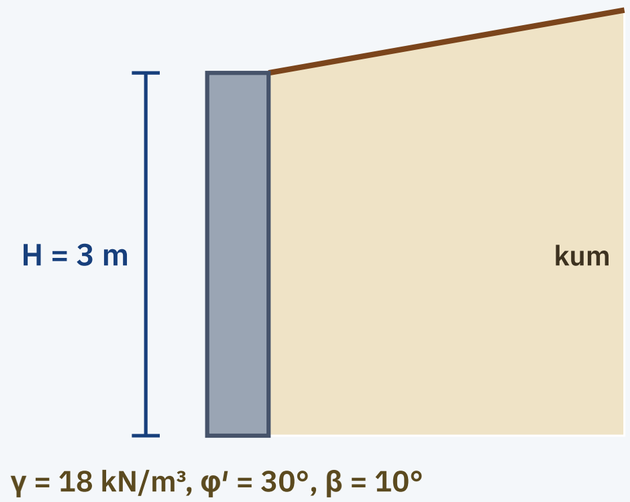
SORU

İSTENEN

$K_{a\beta}$, itki bileşenleri; sonucun yatay dolguya göre değişimi (kayma, devrilme, eksantrisite).

Verilenler

Duvar ve zemin	**Örnek 2'deki duvar; aynı dolgu ama yüzey $\beta = 10^\circ$ yükselen (duvardan uzaklaştıkça)**
Sürşarj	$q = 10$ **kPa**



Çözüm (1/2)

ÇÖZÜM

1 Katsayı $K_{a\beta}$ ($\cos\beta = 0{,}9848$, $\sqrt{\cos^2\beta - \cos^2\varphi'} = 0{,}4689$)

$$K_{a\beta} = \cos\beta\,\frac{\cos\beta - r}{\cos\beta + r} = 0{,}9848\,\frac{0{,}5159}{1{,}4537} = \mathbf{0{,}3495}\ \ (\text{yatayda } 0{,}3333)$$

2 İtkiler (h = düzlemin yüksekliği = H + yüzeyin yükselmesi; engine)

$$P_A:\ F_x = 31{,}25,\ F_z = 5{,}51\ \text{kN/m}\ \ (\text{yatay ve düşey})$$

$$P_Q:\ F_x = 10{,}93,\ F_z = 1{,}93\ \text{kN/m}$$

Çözüm (2/2)

ÇÖZÜM

3 Kontroller (engine)

$$\Sigma F_z = -N = -163{,}23\ \text{kN/m} \quad (\text{zemin bloğu } 35{,}34)$$

$$FS_s = 2{,}412 \qquad FS_o = 5{,}734 \qquad e = 0{,}037\ \text{m} \qquad q_{max} = 58{,}4\ \text{kPa}$$

Yükselen şev itkiyi büyütür ($K_{a\beta}$ 0,333 → 0,350), ama **itkinin düşey bileşeni** ve daha ağır zemin bloğu tutucudur: kayma FS 2,62 → 2,41, devrilme FS 6,26 → 5,73; eksantrisite 0,068 → 0,037 m.

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Sükunet ve pasif arasında karma katsayı

KURAM

Duvarın önündeki zemin (c′ = 0), Rankine pasif ve Jaky sükunet katsayılarının **karması** ile tanımlanır; çünkü tam pasif direnç, işlevli bir duvarın izin vermeyeceği büyüklükte yerdeğiştirme ister:

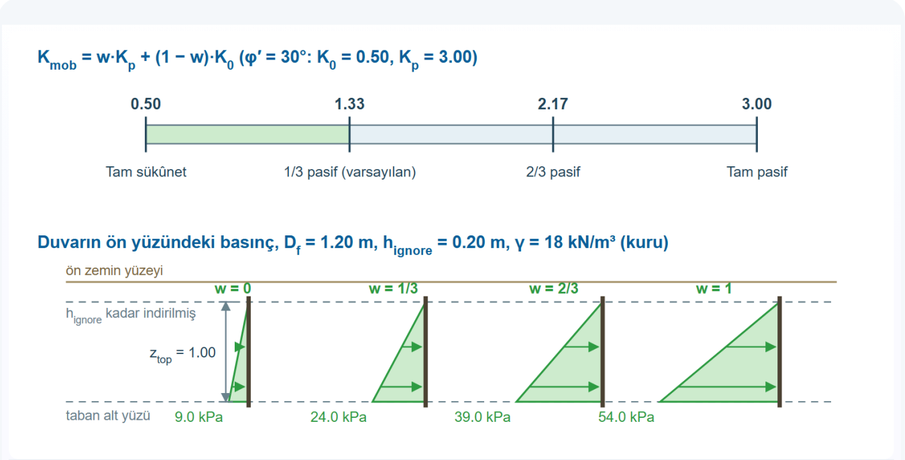
$$K_{mob} = w\,K_p + (1-w)\,K_0 \qquad K_p = \tan^2(45^\circ + \varphi'/2) \qquad K_0 = 1 - \sin\varphi'$$

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

w = 0 tam sükunet, 1/3 (varsayılan), 2/3, 1 tam pasif. Ön zeminin üstteki **h_{ignore}** kalınlığı (kazılabilir, yumuşayabilir) hesaba katılmaz.

Ön direnç yalnız **kaymada** (statik tam, depremde $\eta_{p,E}$ ile) kredilendirilir; **devrilmede ve taşıma gücünde hiç** kullanılmaz.

Ön suyun (h_{wf}) itkisi arkaya doğrudur ve net itkiyi azaltır.



Soru

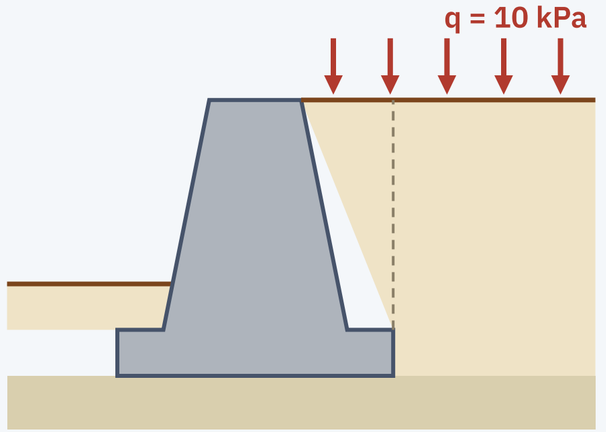
SORU

İSTENEN

K_{mob}, P_P ve kayma güvenlik sayısı FS_s (Örnek 2'deki duvar için).

Verilenler

Ön zemin	$D_f = 1{,}0$ **m;** $\gamma = 18\ \mathrm{kN/m^3}$, $\varphi' = 30^\circ$**;** $h_{ignore} = 0$
Durumlar	**tam sükunet, 1/3, 2/3, tam pasif; ve ön direnç hiç kredilendirilmezse**



Çözüm

ÇÖZÜM

1 K_{mob} ve itki (varsayılan 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 Dört durum ($FS_s = (\mu_b N + P_P)/\Sigma H_{drive} = (84{,}81 + P_P)/37{,}0$)

Durum	w	K_{mob}	P_P (kN/m)	FS_s
Tam sükunet	0	0,500	4,50	2,414
1/3 pasif + 2/3 sükunet (varsayılan)	1/3	1,333	12,00	2,616
2/3 pasif + 1/3 sükunet	2/3	2,167	19,50	2,819
Tam pasif	1	3,000	27,00	3,022
Ön direnç kredilendirilmez	–	–	0	2,292

Ön direncin kredisi FS_s'i 2,29 ile 3,02 arasında değiştirir (varsayılan **2,62**); ön zemin sökülebilirse kredi sıfırlanır: D_f ve h_{ignore} bilinçli seçilmelidir.

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Aynı kuvvet çizelgesinden üç kontrol

KURAM

Kayma: taban sürtünmeyle tutulur; gerekli kesme $\Sigma H_{drive} - \Sigma P_{resist}$, mevcut kesme $\mu_b N$ (yapışma yok; N efektif normal kuvvet, kaldırma dahil). Direnç payda toplanır:

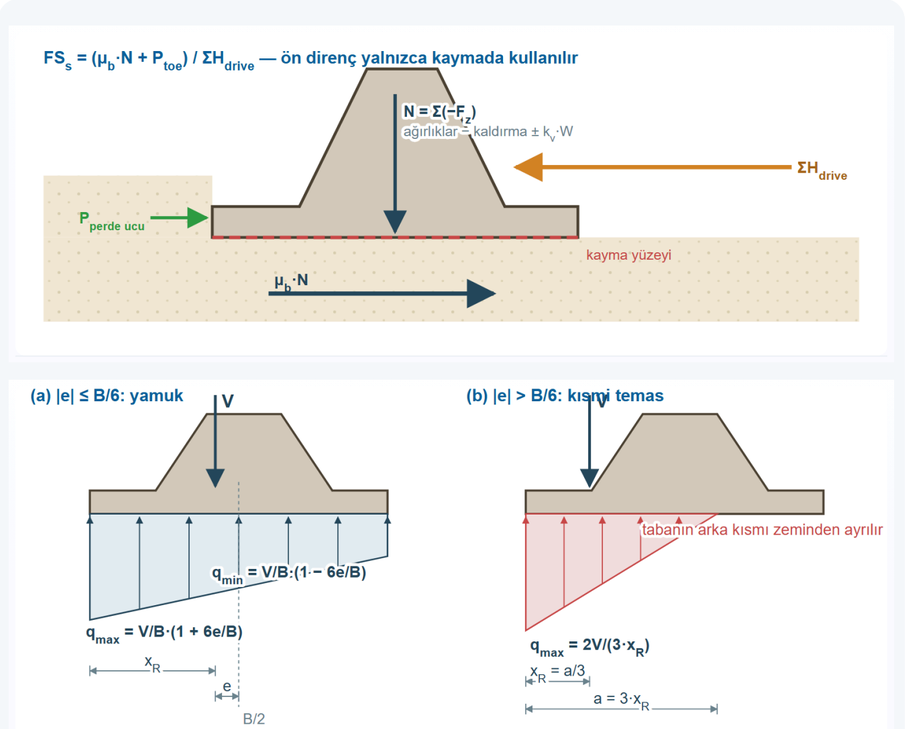
$$FS_s = \frac{\mu_b N + P_{toe}}{\Sigma H_{drive}} \qquad \mu_b = \tan\delta_b$$

Devrilme burun etrafındadır: her kalemin $-zF_x$ ve xF_z parçaları kendi işaretine göre $\Sigma M_{devirme}$ ya da ΣM_{tutma}'ya girer; ön direnç girmez:

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

Taşıma gücü: |e| ≤ B/6 ise taban tamamen temaslıdır; aksi hâlde zemin çekme alamaz, yalnız bir kısmı temaslıdır:

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



Soru

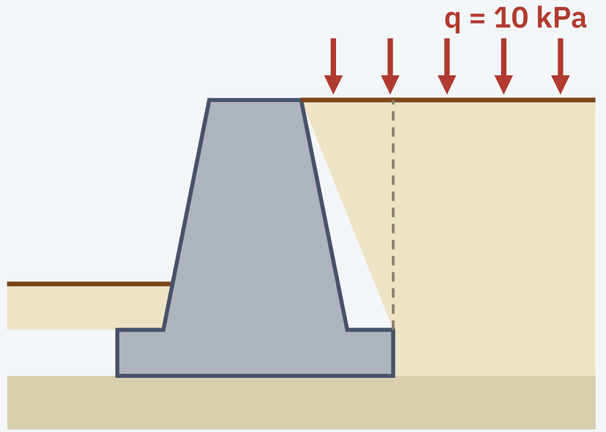
SORU

Verilenler

Duvar ve yükler	**Örnek 1–5'teki duvar:** $B = 3{,}0$ **m;** $W_m = 115{,}5,\ W_s = 33{,}75,\ W_{toe} = 4{,}95\ \mathrm{kN/m}$**;** $P_A = 27{,}0,\ P_Q = 10{,}0\ \mathrm{kN/m}$
Direnç	$\mu_b = 0{,}55$**; ön direnç** $P_P = 12{,}0$ **kN/m (w = 1/3);** $q_{all} = 200$ **kPa**
Gerekli	$FS_s \geq 1{,}5,\ \ FS_o \geq 2{,}0$**; taban tamamen temaslı olmalı**

İSTENEN

FS_s, FS_o, x_R, e, q_{max}, q_{min} ve her kontrolün sonucu.



Çözüm (1/3)

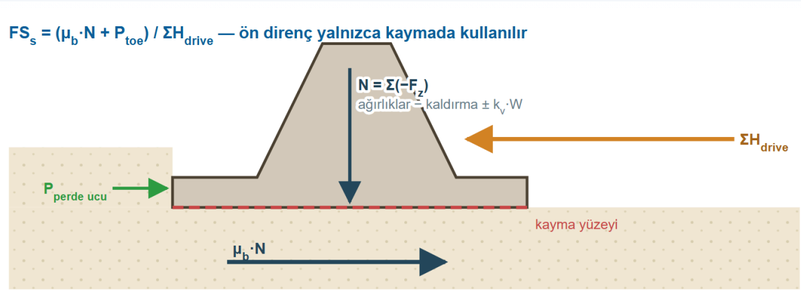
ÇÖZÜM

1 Taban sürtünmesi: N = W_m + W_s + W_{toe} (Q_{heel} hariç)

$$N = 115{,}50 + 33{,}75 + 4{,}95 = \mathbf{154{,}20}\ \text{kN/m}$$

$$\mu_b N = 0{,}55(154{,}20) = 84{,}81\ \text{kN/m}$$

$$FS_s = \frac{84{,}81 + 12{,}0}{37{,}0} = \mathbf{2{,}616}\ \geq 1{,}5\ \checkmark$$



Çözüm (2/3)

ÇÖZÜM

2 Devirme momenti (burna göre; yalnız itkiler)

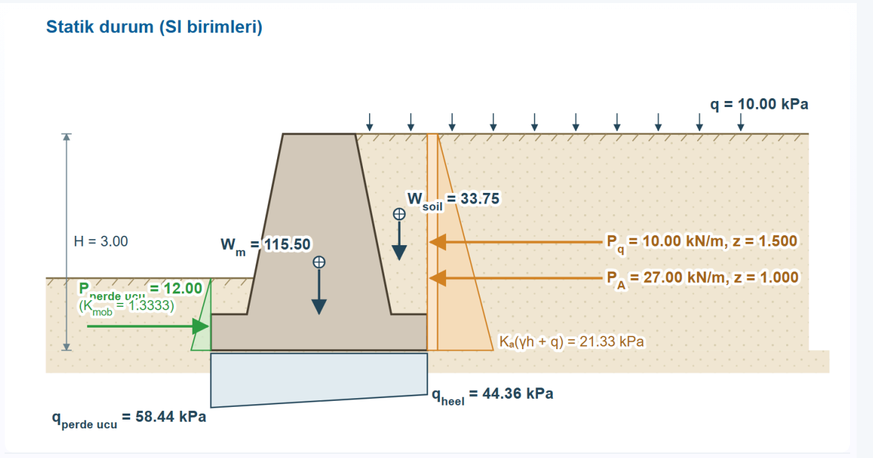
$$M_o = P_A(1{,}00) + P_Q(1{,}50) = 27{,}0 + 15{,}0 = \mathbf{42{,}0}\ \text{kN}\cdot\text{m/m}$$

3 Tutma momenti: duvar + zemin bloğu + ön dolgu

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

$$= 173{,}25 + 88{,}13 + 1{,}36 = \mathbf{262{,}74}$$

$$FS_o = \frac{262{,}74}{42{,}0} = \mathbf{6{,}256}\ \geq 2{,}0\ \checkmark$$



Çözüm (3/3)

ÇÖZÜM

4 Bileşkenin yeri ve eksantrisite

$$\Sigma M = M_o - M_r = 42{,}00 - 262{,}74 = -220{,}74$$

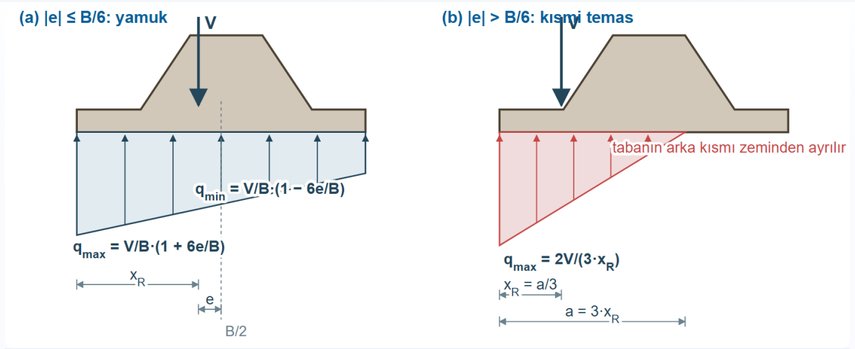
$$x_R = -\frac{\Sigma M}{V} = \frac{220{,}74}{154{,}2} = \mathbf{1{,}4315}\ \text{m}$$

$$e = \frac{B}{2} - x_R = \mathbf{0{,}0685}\ \text{m} \ \le\ \frac{B}{6} = 0{,}500\ \checkmark$$

5 Taban gerilmeleri (tam temas)

$$q_{max} = \frac{154{,}2}{3}\left(1 + \frac{6(0{,}0685)}{3}\right) = \mathbf{58{,}44}\ \text{kPa}$$

$$q_{min} = \mathbf{44{,}36}\ \text{kPa}$$



FS_s = **2,62**, FS_o = **6,26**, e = 0,068 m, q_{max} = **58,4 kPa** ≤ 200, q_{min} = 44,4 kPa > 0: **statik durumda tüm kontroller sağlanır.**

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Her iki yanda hidrostatik su, tabanda doğrusal kaldırma

KURAM

Su basıncı izotroptur ve değdiği her yüzeye dik etkir. Serbest cisim üç sınırında suyla çevrilidir: arka basınç düzlemi, duvarın ön yüzü ve taban alt yüzü. Her biri kuvvet çizelgesinde ayrı kalemdir:

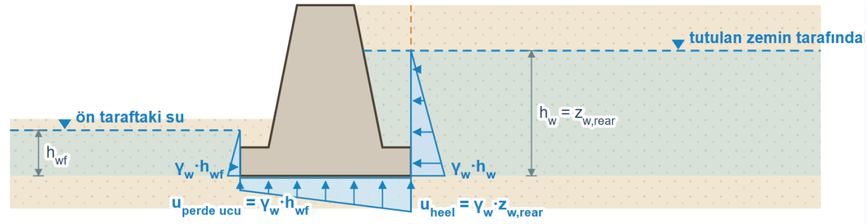
$$U_{rear} = \tfrac{1}{2}\gamma_w h_w^2 \;\; (h_w/3) \qquad U_{front} = \tfrac{1}{2}\gamma_w h_{wf}^2 \;\; (h_{wf}/3,\ \text{arkaya})$$

Taban altındaki boşluk suyu basıncı burundaki yükten arka kenardaki yüke **doğrusal** değişir (düz çizgi yük kaybı):

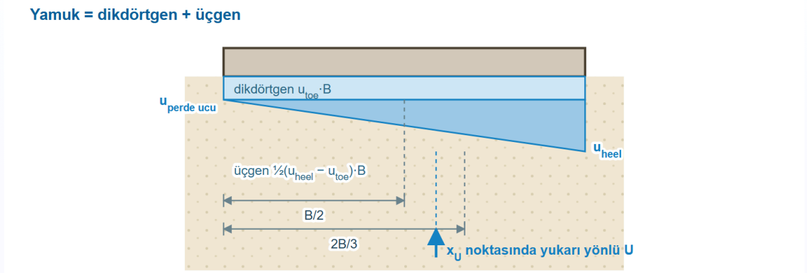
$$U = \frac{B\,(u_{toe} + u_{heel})}{2} \qquad x_U = \frac{B\,(u_{toe} + 2u_{heel})}{3\,(u_{toe} + u_{heel})}$$

Kaldırma yukarı etkir (F_z = +U): N'yi ve dolayısıyla taban sürtünmesini azaltır, devirme momenti $U \cdot x_U$ ekler.

$h_W = H - z_W$ (z_W: yeraltı suyunun duvar tepesinden derinliği); ön su yüksekliği h_{Wf} arkaya doğru etkir ve net itkiyi azaltır. Su düzeyleri farklıysa hidrolik stabilite (sızma) ayrıca düşünülmelidir.



U = B·(u_{toe} + u_{heel})/2, x = B·(u_{toe} + 2u_{heel}) / (3(u_{toe} + u_{heel})) konumunda



Soru

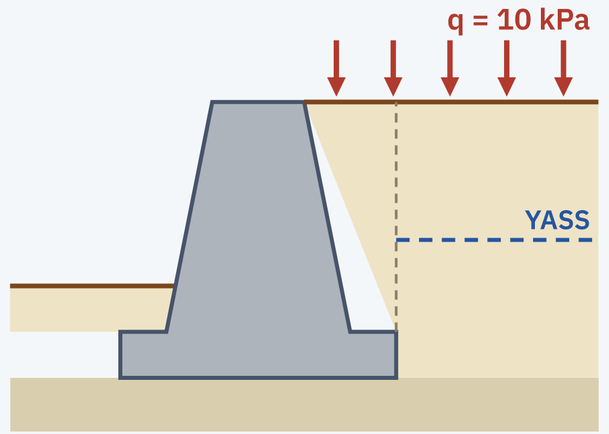
SORU

Verilenler

Duvar ve zemin	**Örnek 1–5'teki duvar ve dolgu ($\gamma = 18,\ \gamma_{sat} = 20\ \mathrm{kN/m^3},\ \varphi' = 30^\circ,\ q = 10$ kPa); statik durum**
Su	**dolguda yeraltı su seviyesi duvar tepesinin 1,5 m altında ($h_w = 1{,}5$ m); önde su yok; taban altında doğrusal kaldırma**

İSTENEN

Zemin itkisinin ve suyun değişimi; **kaldırma** ve **N**; FS_s, FS_o, e, q_{max}.



Çözüm (1/2)

ÇÖZÜM

1 Zemin itkisi (γ üstte, γ′ = 20 − 9,81 = 10,19 altta) ve su itkisi

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

$$= 6{,}75 + 13{,}50 + 3{,}82 = \mathbf{24{,}07}\ \text{kN/m}\ \ (z = 1{,}061\ \text{m})$$

$$U_{rear} = \tfrac{1}{2}(9{,}81)(1{,}5)^2 = \mathbf{11{,}04}\ \text{kN/m}\ \ (z = 0{,}50\ \text{m}) \qquad P_Q = 10{,}0$$

2 Kaldırma (burunda u = 0, arka kenarda u = 9,81·1,5 = 14,72 kPa; üçgen)

$$U = \tfrac{1}{2}(14{,}72)(3{,}0) = \mathbf{22{,}07}\ \text{kN/m}\ (\text{yukarı})\ \ \text{at}\ x_U = \tfrac{2B}{3} = 2{,}00\ \text{m}$$

Çözüm (2/2)

ÇÖZÜM

3 Efektif normal kuvvet ve sürtünme (zemin bloğu γ_{sat} ile: $W_s = 34{,}95$)

$$N = W_m + W_s + W_{toe} - U = 115{,}50 + 34{,}95 + 4{,}95 - 22{,}07 = \mathbf{133{,}33}\ \text{kN/m}$$

$$FS_s = \frac{0{,}55(133{,}33) + 12{,}0}{24{,}07 + 10{,}0 + 11{,}04} = \frac{85{,}33}{45{,}11} = \mathbf{1{,}892}$$

4 Devrilme ve taban

$$M_o = 25{,}54 + 15{,}00 + 5{,}52 + 44{,}14 = 90{,}20\ \ (P_A,\ P_Q,\ U_{rear},\ \text{kaldırma}) \qquad M_r = 265{,}98$$

$$FS_o = \frac{265{,}98}{90{,}20} = \mathbf{2{,}949} \qquad x_R = \frac{175{,}78}{133{,}33} = 1{,}318\ \text{m} \quad e = 0{,}182\ \text{m}$$

$$q_{max} = \mathbf{60{,}58} \qquad q_{min} = \mathbf{28{,}30}\ \text{kPa}$$

Su FS_s'i 2,62 → **1,89**, FS_o'yu 6,26 → **2,95**, q_{min}'i 44,4 → 28,3 kPa'ya düşürdü (kaldırma N'yi 22,1 kN/m azalttı, 44,1 kN·m/m devirme ekledi); kontroller yine sağlanır.

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Mononobe–Okabe itkisi ve duvarın ataleti

KURAM

Pseudo-statik yöntemde her kütleye yatay $k_h mg$ ve düşey $\pm k_v mg$ kuvvet gelir; kritik yön, ataletin öne (itkiyle aynı yöne) itmesidir. Yerçekimi ve atalet birlikte θ kadar dönmüş bir çekim alanı gibidir; Coulomb kaması atalet kuvvetleriyle çözülür (Mononobe–Okabe). Düşey düzlemde, yatay dolguda (δ = β = 0):

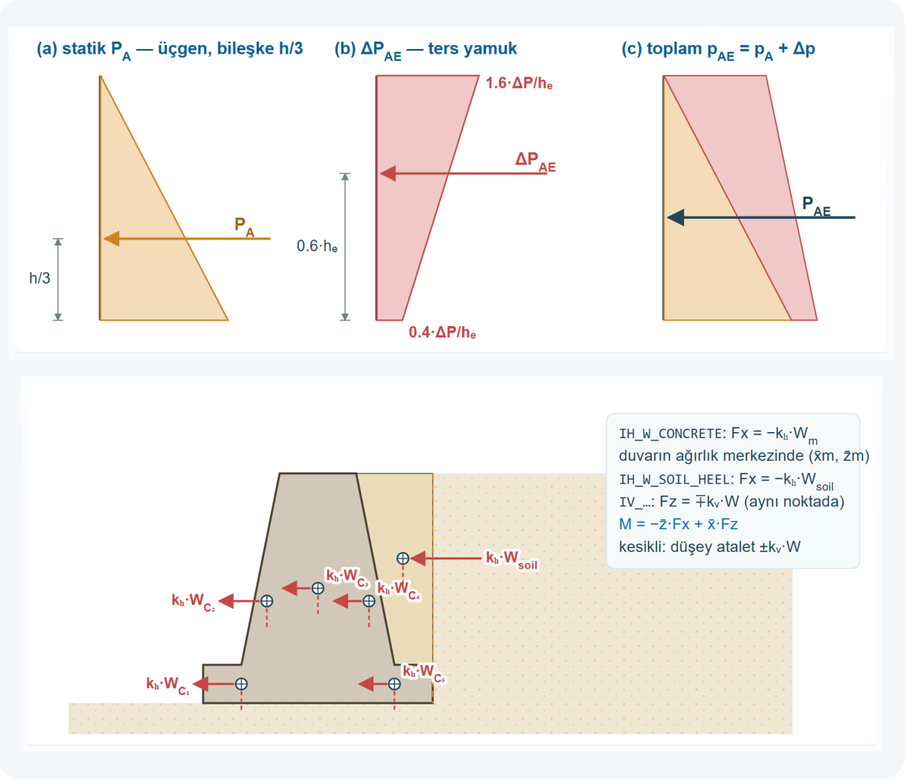
$$\theta = \tan^{-1}\frac{k_h}{1-k_v} \qquad K_{AE} = \frac{\cos^2(\varphi'-\theta)}{\cos^2\theta\left[1+\sqrt{\dfrac{\sin\varphi'\sin(\varphi'-\theta)}{\cos\theta}}\right]^2} \qquad P_{AE} = \left(\tfrac{1}{2}\gamma h^2 + qh\right)K_{AE}$$

φ′ − θ < 0 ise hiçbir kama dengede kalamaz: "çözüm yok", kontroller sağlanmaz sayılır.

Dağılım: P_{AE} büyüklüğü verir, yerini vermez. $\Delta P_{AE} = P_{AE} - P_{A,statik}$ ters yamuk olarak (üstte 1,6ΔP/h, altta 0,4ΔP/h; bileşke **0,6h**); statik kısım statik şeklini korur.

Atalet: duvar, zemin bloğu ve ön dolgu $k_h W$ ağırlık merkezinde öne iter; $k_v > 0$ ise $(1 \pm k_v)$ ile iki durum da çalışılır, en küçük FS esastır. Suyun hidrodinamik basıncı $(7/12)k_h\gamma_w h_w^2$ $(0{,}4h_w)$ eklenir.

Ön pasif direnç depremde $\eta_{p,E}$ ile çarpılır; varsayılan **0** (kredi yok).



Soru

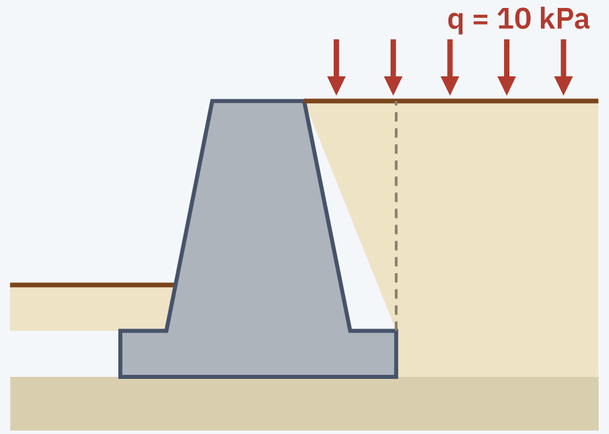
SORU

İSTENEN

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

Verilenler

Duvar ve zemin	**Örnek 1–6'daki duvar ve dolgu (statik FS_s = 2,62; FS_o = 6,26)**
Deprem	$k_h = 0{,}15$, $k_v = 0$**; ön direnç kredisi** $\eta_{p,E} = 0$**; gerekli** $FS_s,\ FS_o \geq 1{,}1$



Çözüm (1/3)

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 ve sismik artış (statik P_A + P_Q = 37,0 kN/m)

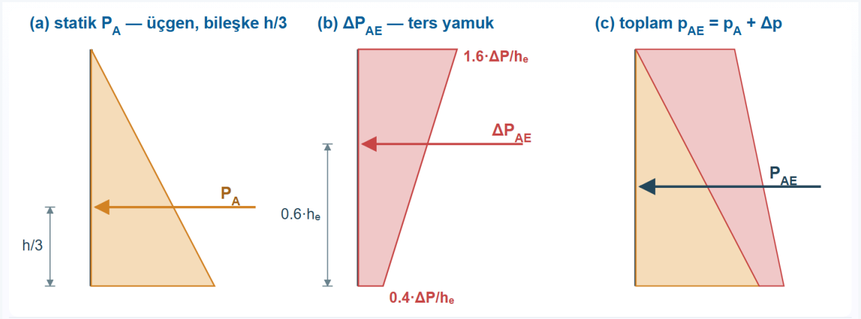
$$P_{AE} = (81+30)(0{,}4329) = \mathbf{48{,}06}\ \text{kN/m}$$

$$\Delta P_{AE} = 48{,}06 - 37{,}0 = \mathbf{11{,}06}\ \text{kN/m}\ \ (0{,}6h)$$

3 Etkime yüksekliği

$$\bar{z}_{AE} = [27{,}0(1{,}00) + 10{,}0(1{,}50) + 11{,}06(1{,}80)]/48{,}06$$

$$= 61{,}90/48{,}06 = \mathbf{1{,}288}\ \text{m}$$



Çözüm (2/3)

ÇÖZÜM

4 Atalet kuvvetleri $k_h W$ (ağırlık merkezlerinde, öne)

$$IH_m = 0{,}15(115{,}50) = 17{,}325 \;\; (z = 1{,}222\ \text{m})$$

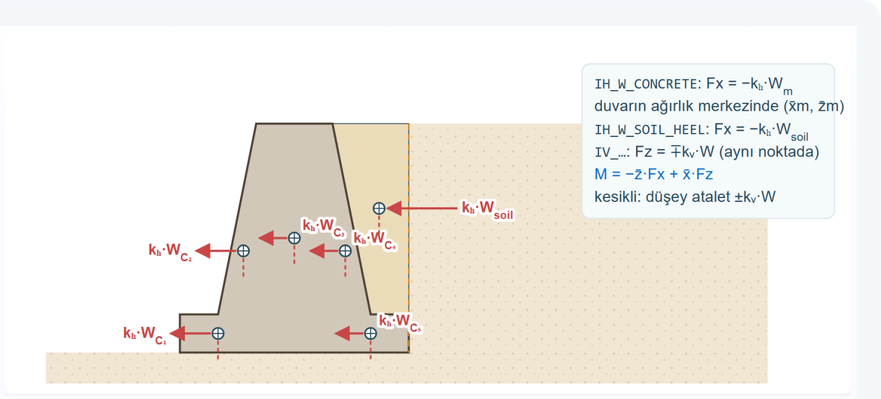
$$IH_s = 0{,}15(33{,}75) = 5{,}062 \;\; (z = 1{,}889\ \text{m})$$

$$IH_{toe} = 0{,}15(4{,}95) = 0{,}743 \;\; (z = 0{,}758\ \text{m})$$

5 Kayma (ön direnç kredisi yok)

$$\Sigma H_{drive} = 48{,}06 + 17{,}32 + 5{,}06 + 0{,}74 = 71{,}19$$

$$FS_{s,E} = \frac{\mu_b N}{\Sigma H_{drive}} = \frac{84{,}81}{71{,}19} = \mathbf{1{,}191} \;\geq 1{,}1 \;\checkmark$$



Çözüm (3/3)

ÇÖZÜM

6 Devrilme ve bileşkenin yeri

$$M_{o,E} = P_{AE}\bar{z} + \Sigma IH\, z = 61{,}90 + 21{,}18 + 9{,}56 + 0{,}56 = 93{,}20$$

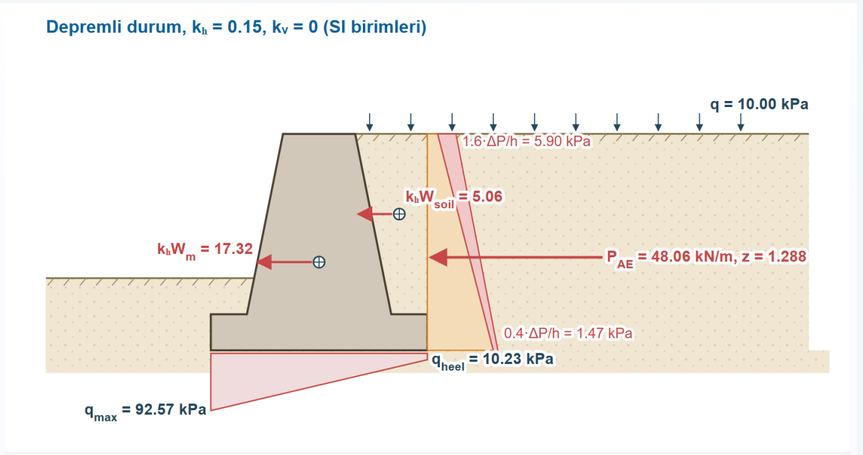
$$FS_{o,E} = \frac{262{,}74}{93{,}20} = \mathbf{2{,}819} \;\geq 1{,}1$$

$$x_R = \frac{262{,}74 - 93{,}20}{154{,}2} = 1{,}099\ \text{m} \qquad e = \mathbf{0{,}401}\ \text{m}$$

7 Taban gerilmeleri (|e| = 0,401 m ≤ B/6 = 0,50 m: tam temas)

$$q_{max} = \frac{154{,}2}{3}\left(1 + \frac{6(0{,}401)}{3}\right) = \mathbf{92{,}57}\ \text{kPa}$$

$$q_{min} = \mathbf{10{,}23}\ \text{kPa}$$



Depremde FS_s = **1,19**, FS_o = **2,82**, e = **0,401 m**, q_{max} = **92,6 kPa**; deprem FS_s'i 2,62 → 1,19, e'yi 0,068 → 0,401 m değiştirdi: **kayma** ve **eksantrisite** yönetici kontrollerdir.

Çözümü GeoTerva'da kontrol edin ↗

Kontrollerin bittiği yer

KURAM

Bu kontroller duvarı temeli üzerinde **tek bir rijit blok** olarak ele alır: duvarın **dış stabilitesi**. Taş ya da kütle beton ağırlık duvarı kendi **içinde** de göçebilir (özellikle yüksek ya da narin kesitte, kuru taş duvarda, zayıf harçta ve depremde); bunların kontrolleri bu modülün verdiği etkilerden yapılır.

Kohezyonsuz dolgu ($c' = 0$); iki zeminli ya da tabakalı dolgu bu modülde yok. Dolgu yüzeyi düz ya da tek eğimli.

Taban sürtünmesi $\mu_b = \tan \delta_b$ (kâgir/beton için genellikle $2/3\varphi'–\varphi'$); yapışma kullanılmaz. Ön pasif direncin tamamı sürtünme payına eklenir, devrilmede ve taşıma gücünde kullanılmaz.

Hesap duvarın 1,00 m boyu başınadır; şerit ve noktasal sürşarj yanal basınçları Boussinesq (rijit duvar) ile eklenir.

Kaydırıcı etkiler (hidrolik stabilite, sızma, genel stabilite, oturma) bu modülün dışındadır.

Özet

Akılda kalacak noktalar

Serbest cisim = duvar + onunla hareket eden zemin; basınç **temelin arka kenarındaki düşey düzlemde** (δ = β); tek işaret: $M = x \cdot F_z - z \cdot F_x$, devirme +

Ağırlık: $W_i = \gamma_m A_i$, $\bar{x} = \Sigma W_i \bar{x}_i / \Sigma W_i$; zemin bloğu ve ön dolgu da duvarla hareket eder; arka ayak üstü sürşarj (Q_{heel}) hiçbir kontrole girmez

Aktif: $P_A = \tfrac{1}{2} K_a \gamma h^2$ (h/3), $P_Q = K_a q h$ (h/2); eğimli dolguda $K_{a\beta}$ (düşey düzlemde Rankine = Coulomb); **pasif**: $K_{mob} = wK_p + (1 - w)K_0$, yalnız kaymada

Kayma $FS_s = (\mu_b N + P_P)/\Sigma H_{drive}$; **devrilme** $FS_o = \Sigma M_{res}/\Sigma M_{ov}$ (burun); **taşıma**: $x_R = -\Sigma M/V$, $e = B/2 - x_R$, $q = V/B(1 \pm 6e/B)$, $|e| > B/6$ ise $q_{max} = 2V/(3x_R)$

Su: γ_{sat} ile ağırlık + U_{rear} ayrı kalem; kaldırma burunda u_{toe} – arkada u_{heel}, doğrusal: N'yi azaltır, devirme ekler

Deprem: $\theta = \tan^{-1} k_h/(1 - k_v)$; $P_{AE} = (\tfrac{1}{2}\gamma h^2 + qh)K_{AE}$; ΔP_{AE} 0,6h'de; $k_h W$ atalet; ön pasif kredi $\eta_{p,E}$ (varsayılan 0)

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 = 3 m taş duvar, q = 10 kPa, k_h = 0,15).

GeoTerva

Çevrim içi geoteknik hesaplar

Teoriden uygulamaya

Kendi duvarınızın kesitini, dolgusunu, sürşarjını, suyunu ve deprem katsayılarını GeoTerva'da girin; modül kuvvet çizelgesini, üç kontrolü ve taban gerilmelerini birlikte verir.

Modülü açın →

Teori sayfası →

Telefonla açın
Örnek modüller kayıt gerektirmez.