NIELS KREBS OVESEN

GEOTEKNISK EKSEMPELSAMLING

UDGIVET SOM MANUSKRIPT AF
DANMARKS INGENIØRAKADEMI
BYGNINGSAFDELINGEN KBH. 1965

Bind 3

NIELS KREBS OVESEN

GEOTEKNISK EKSEMPELSAMLING

UDGIVET SOM MANUSKRIPT AF
DANMARKS INGENIØRAKADEMI
BYGNINGSAFDELINGEN KBH. 1965

Bind 3

INDHOLDSFORTEGNELSE

EKSEMPEL 10. 1: Lodret, centralt belastet stribefundament på ler.

GIVET

Et stribefundament af grovbeton skal placeres på en lokalitet med følgende bundforhold:

JOF er i kote + 8, 0.

Overalt under kote + 8, 0: Ler med $c_u = 8,5 \; t/m^2$ $(\varphi = 0)$,

$\gamma_m = 2,0 \; t/m^3$ og $h_c = 8 \; m$

GVS står i kote + 4, 0.

Belastningen er lodret og centralt virkende: $G = 10 \; t/m$ og $P = 20 \; t/m$.

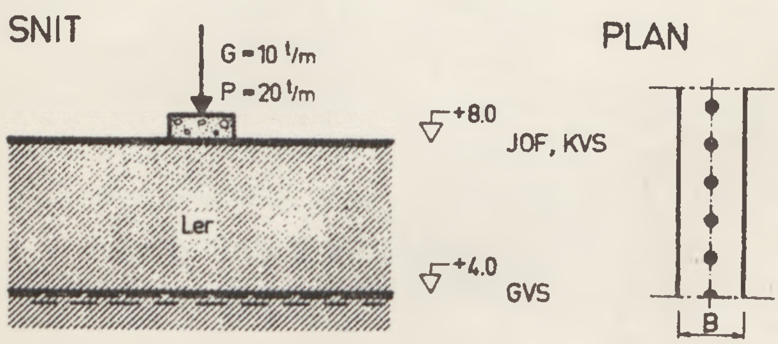
Fundamentets højde er: $h = 0,6 \; m$.

FUK placeres i kote + 8, 0.

ØNSKES

Find den for bæreevnen nødvendige bredde B af fundamentet.

LØSNING



Figur 10. 1 A: Snit og plan af fundament.

Forudsætninger

Bæreevnen på ler bestemmes af $b_n = c_{un} N_c^o s_c^o d_c^o i_c^o + \bar{q}$

Nominelle værdier

$$G_n + P_n = f_g \cdot G + f_p \cdot P = 1,0 \cdot 10 + 1,5 \cdot 20 = 40,0 \; t/m$$

$$c_{un} = \frac{c_u}{f_c} = \frac{8,5}{1,75} = 4,86 \; t/m^2$$

$$\bar{q} = 0$$

Bæreevnefaktorer

$N_c^o = 5,14$

Af $\bar{B} = B$, $\bar{L} \sim \infty$, $\bar{D} = 0$ og $H_n = 0$ fås:

$$s_c^o = 1 + 0,2 \frac{\bar{B}}{\bar{L}} = 1,00$$

$$d_c^o = 1 + 0,35 \frac{\bar{D}}{\bar{B}} = 1,00$$

$$i_c^o = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{1 - \frac{H_n}{\bar{A}c_n}} = 1,00$$

Dimensionering

Bæreevnen er:

$$b_n = c_{un} N_c^o s_c^o d_c^o i_c^o + \bar{q} = 4,86 \cdot 5,14 \cdot 1,00 \cdot 1,00 \cdot 1,00 + 0 = 25,0 \text{ t/m}^2.$$

Skønnes indledningsvis $B = 2,00$ m bliver fundamentets egenvægt:

$G_f = h \cdot B \cdot \gamma_b = 0,6 \cdot 2,00 \cdot 2,3 = 2,8$ t/m

Den nominelle belastning på fundamentsfladen bliver:

$V_n = G_n + P_n + f_g \cdot G_f = 40,0 + 1,0 \cdot 2,8 = 42,8$ t/m

Bæreevnekriteriet giver, idet $\bar{A} = B \cdot 1$:

$$\frac{V_n}{\bar{A}} = \frac{42,8}{B \cdot 1} \leq b_n = 25,0 \text{ t/m}^2$$

$$B \geq \frac{42,8}{25,0} = 1,71 \text{ m}$$

På grundlag af ovenstående gennemregning skønnes:

$B = 1,70$ m, hvoraf fås:

$$G_f = h \cdot B \cdot \gamma_b = 0,6 \cdot 1,70 \cdot 2,3 = 2,3 \text{ t/m}$$

$$V_n = G_n + P_n + f_g \cdot G_f = 40,0 + 1,0 \cdot 2,3 = 42,3 \text{ t/m}$$

$$\bar{A} = B \cdot 1 = 1,70 \text{ m}^2/\text{m}$$

Af $\frac{V_n}{\bar{A}} = \frac{42,3}{1,70} = 24,9 \text{ t/m}^2 < b_n = 25,0 \text{ t/m}^2$ ses, at bæreevnekriteriet er opfyldt.

KONKLUSION

Bredden $B = 1,70$ m giver tilstrækkelig bæreevne.

EKSEMPEL 10.2: Lodret, centralt belastet stribefundament på ler med fyld.

GIVET

Et stribefundament af grovbeton skal placeres på en lokalitet med følgende bundforhold:

JOF er i kote + 11,0.

Fra kote + 11,0 til kote + 9,0: Fyld med $c_u = 0$, $\varphi = 0$, $\gamma = 1,5\ t/m^3$ og $h_c = 0$.

Under kote + 9,0 : Ler med $c_u = 8,5\ t/m^2$ ($\varphi = 0$), $\gamma_m = 2,0\ t/m^3$ og $h_c = 8$ m.

GVS står i kote + 7,0.

Belastningen er lodret og centralt virkende: $G = 7\ t/m$ og $P = 10\ t/m$.

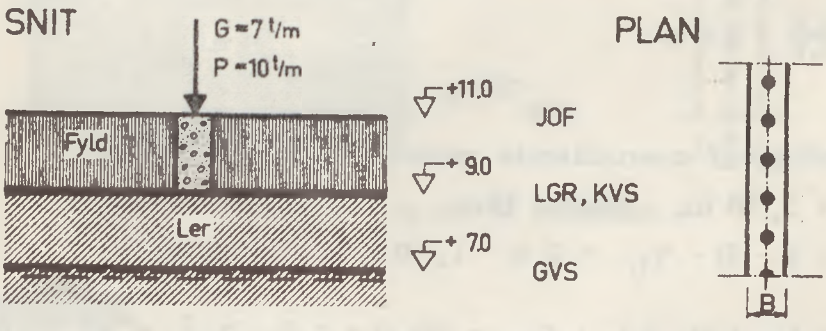
Fundamentets højde er: $h = 2,0$ m.

FUK placeres i kote + 9,0.

ØNSKES

Find den for bæreevnen nødvendige bredde B af fundamentet.

LØSNING



Figur 10.2 A: Snit og plan af fundament.

Forudsætninger

Bæreevnen på ler bestemmes af $b_n = c_{un} N_c^o s_c^o d_c^o i_c^o + \bar{q}$

Nominelle værdier

$$G_n + P_n = f_g \cdot G + f_p \cdot P = 1,0 \cdot 7 + 1,5 \cdot 10 = 22\ t/m$$

$$c_{un} = \frac{c_u}{f_c} = \frac{8,5}{1,75} = 4,86\ t/m^2$$

$\bar{q} \quad = \gamma h = 1,5 \cdot 2,0 = 3,0 \text{ t/m}^2$

Bæreevnefaktorer

$N_c^o \quad = 5,14$

Af $\bar{B} = B$, $L \sim \infty$, $\bar{D} = 0$ ($c_{dynd} < c_{ler}$) og $H_n = 0$ fås:

$$s_c^o = 1 + 0,2 \frac{\bar{B}}{\bar{L}} = 1,00$$

$$d_c^o = 1 + 0,35 \frac{\bar{D}}{\bar{B}} = 1,00$$

$$i_c^o = \frac{1}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{1 - \frac{H_n}{\bar{A}c_n}} = 1,00$$

Dimensionering

Bæreevnen er:

$$b_n = c_{un} N_c^o s_c^o d_c^o i_c^o + \bar{q} = 4,86 \cdot 5,14 \cdot 1,00 \cdot 1,00 \cdot 1,00 + 3,0$$
$$= 28,0 \text{ t/m}^2$$

Skønnes indledningsvis $B = 1,00$ m bliver fundamentets egenvægt:

$G_f = h \cdot B \cdot \gamma_b = 2,0 \cdot 1,00 \cdot 2,3 = 4,6$ t/m

Den nominelle belastning på fundamentsfladen bliver:

$V_n = G_n + P_n + f_g \cdot G_f = 22 + 1,0 \cdot 4,6 = 26,6$ t/m

Bæreevnekriteriet giver, idet $\bar{A} = B \cdot 1$:

$$\frac{V_n}{\bar{A}} = \frac{26,6}{B \cdot 1} \leqq b_n = 28,0 \text{ t/m}^2$$

$$B \geqq \frac{26,6}{28,0} = 0,95 \text{ m}$$

På grundlag af ovenstående gennemregning skønnes:

$B \quad = 0,95$ m, hvoraf fås:

$G_f \quad = hB\gamma_b = 0,95 \cdot 2,0 \cdot 2,3 = 4,4$ t/m

$V_n \quad = G_n + P_n + f_g \cdot G_f = 22 + 1,0 \cdot 4,4 = 26,4$ t/m

$\bar{A} \quad = B \cdot 1 = 0,95 \text{ m}^2/\text{m}$

Af $\dfrac{V_n}{\bar{A}} = \dfrac{26,4}{0,95} = 27,8 \text{ t/m}^2 < b_n = 28,0 \text{ t/m}^2$ ses, at bæreevne-kriteriet er opfyldt.

KONKLUSION

Bredden $B = 0,95$ m giver tilstrækkelig bæreevne.

EKSEMPEL 10. 3: Lodret, centralt belastet enkeltfundament i ler.

GIVET

Et enkeltfundament af grovbeton skal placeres på en lokalitet med følgende bundforhold:

JOF er i kote + 10, 0.

Overalt under kote + 10, 0: Ler med $c_u = 8,5\ t/m^2$ ($\varphi = 0$),

$\gamma_m = 2,0\ t/m^3$ og $h_c = 8$ m.

GVS står i kote + 4, 0.

Belastningen er lodret og centralt virkende: $G = 100$ t og $P = 200$ t.

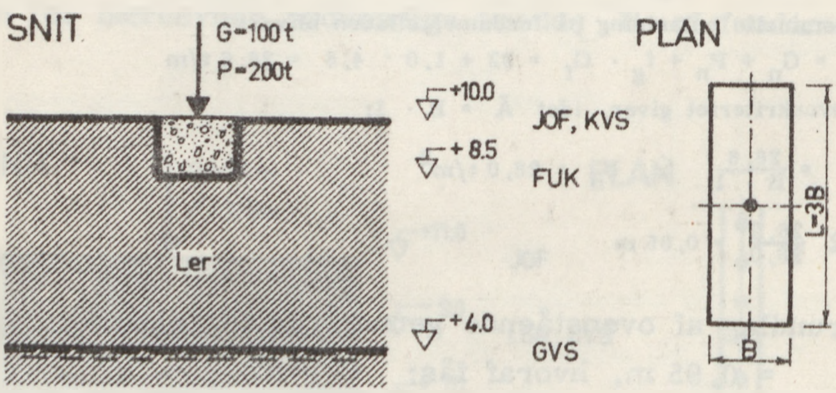
Fundamentets dimensioner er: $L = 3B$ og $h = 1,5$ m.

FUK placeres i kote + 8, 5.

ØNSKES

Find de for bæreevnen nødvendige dimensioner $B \cdot L$ af fundamentet.

LØSNING



Figur 10. 3 A: Snit og plan af fundament.

Forudsætninger

Bæreevnen på ler bestemmes af $b_n = c_{un} N_c^o s_c^o d_c^o i_c^o + \bar{q}$

Nominelle værdier

$$G_n + P_n = f_g \cdot G + f_p \cdot P = 1,0 \cdot 100 + 1,5 \cdot 200 = 400\ t$$

$$c_{un} = \frac{c_u}{f_c} = \frac{8,5}{1,75} = 4,86\ t/m^2$$

$$\bar{q} = \gamma \cdot h = 2,0 \cdot 1,5 = 3,0\ t/m^2$$

Bæreevnefaktorer

$N_c^o = 5,14$

Af $\bar{B} = B$, $\bar{L} = L = 3B$, $\bar{D} = 1,5$ m og $H_n = 0$ fås:

$$s_c^o = 1 + 0,2\,\frac{\bar{B}}{\bar{L}} = 1 + 0,2 \cdot \frac{1}{3} = 1,07$$

$$d_c^o = 1 + 0,35\,\frac{\bar{D}}{\bar{B}} = 1 + 0,35\,\frac{1,5}{B} \quad (1,00 \leq d_c^o \leq 1,35)$$

$$i_c^o = \frac{1}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{1 - \frac{H_n}{\bar{A}c_n}} = 1,00$$

Dimensionering

Skønnes indledningsvis $d_c^o = 1,2$ bliver bæreevnen:

$$b_n = c_{un} N_c^o s_c^o i_c^o d_c^o + \bar{q} = 4,86 \cdot 5,14 \cdot 1,07 \cdot 1,2 \cdot 1,00 + 3,0$$

$$= 32,1 + 3,0 = 35,1 \text{ t/m}^2$$

Bæreevnekriteriet giver derefter, idet $\bar{A} = \bar{B} \cdot \bar{L} = 3B^2$, og der ses bort fra fundamentets egenvægt:

$$\frac{V_n}{\bar{A}} = \frac{400}{3B^2} \leq b_n = 35,1 \text{ t/m}^2$$

$$B \geq \sqrt{\frac{400}{3 \cdot 35,1}} = 1,95 \text{ m}$$

På grundlag af ovenstående gennemregning skønnes:

$B = 2,10$ m, hvoraf fås:

$L = 3B = 3 \cdot 2,10 = 6,30$ m

Fundamentets egenvægt bliver:

$$G_f = BLh\gamma_b = 2,10 \cdot 6,30 \cdot 1,5 \cdot 2,3 = 46 \text{ t}$$

Den nominelle belastning på fundamentsfladen findes:

$$V_n = G_n + P_n + f_g \cdot G_f = 400 + 1,0 \cdot 46 = 446 \text{ t}$$

Bæreevnen findes:

$$d_c^o = 1 + 0,35\,\frac{1,5}{2,1} = 1,25$$

$$b_n = c_{un} N_c^o s_c^o i_c^o d_c^o + \bar{q} = 4,86 \cdot 5,14 \cdot 1,07 \cdot 1,00 \cdot 1,25 + 3,0$$

$$= 36,4 \text{ t/m}^2$$

Af $\dfrac{V_n}{\bar{A}} = \dfrac{446}{2,10 \cdot 6,30} = 33,7 \text{ t/m}^2 < b_n = 36,4 \text{ t/m}^2$ ses, at bæreevnekriteriet er opfyldt.

KONKLUSION

Dimensionerne $B \cdot L = 2,10 \cdot 6,30 \text{ m}^2$ giver tilstrækkelig bæreevne.

EKSEMPEL 10. 4: Lodret, ekscentrisk belastet enkeltfundament i ler.

GIVET

Et enkeltfundament af grovbeton skal placeres på en lokalitet med følgende bundforhold:

JOF er i kote + 7, 5.

Overalt under kote + 7, 5: Ler med $c_u = 8,5\ t/m^2$ $(\varphi = 0)$,

$\gamma_m = 2,0\ t/m^3$ og $h_c = 8\ m$.

GVS står i kote + 1, 5.

Belastningen er lodret: G = 100 t og P = 200 t.

Angrebspunktets afstand fra fundamentets midtpunkt er 0, 5 m på den korte led og 1, 0 m på den lange led.

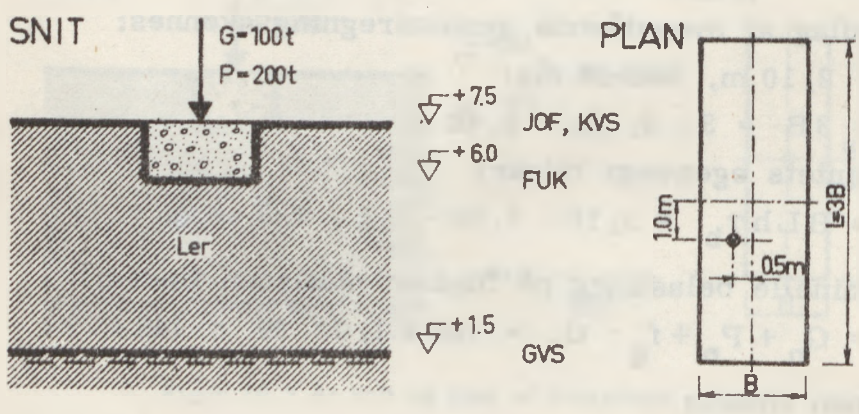
Fundamentets dimensioner er: L = 3 B og h = 1, 5 m.

FUK placeres i kote + 6, 0.

ØNSKES

Find de for bæreevnen nødvendige dimensioner B · L af fundamentet.

LØSNING



Figur 10. 4 A: Snit og plan af fundament.

Forudsætninger

Bæreevnen på ler bestemmes af $b_n = c_{un} N_c^o s_c^o d_c^o i_c^o + \bar{q}$

Nominelle værdier

$$G_n + P_n = f_g \cdot G + f_p \cdot P = 1,0 \cdot 100 + 1,5 \cdot 200 = 400\ t$$

$$c_{un} = \frac{c_u}{f_c} = \frac{8,5}{1,75} = 4,86\ t/m^2$$

$$\bar{q} = \gamma h = 2{,}0 \cdot 1{,}5 = 3{,}0\ \text{t/m}^2$$

Bæreevnefaktorer

$$N_c^o = 5{,}14$$

Af $\bar{D} = 1{,}5$ m og $H_n = 0$ fås:

$$s_c^o = 1 + 0{,}2\ \frac{\bar{B}}{\bar{L}} \qquad (1{,}00 \leqq s_c^o \leqq 1{,}20)$$

$$d_c^o = 1 + 0{,}35\ \frac{\bar{D}}{\bar{B}} = 1 + 0{,}35\ \frac{1{,}5}{\bar{B}} \qquad (1{,}00 \leqq d_c^o \leqq 1{,}35)$$

$$i_c^o = \frac{1}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{1 - \frac{H_n}{\bar{A}c_n}} = 1{,}00$$

Dimensionering

Skønnes indledningsvis $s_c^o = 1{,}0$ og $d_c^o = 1{,}2$ bliver bæreevnen:

$$b_n = c_{un} N_c^o s_c^o d_c^o i_c^o + \bar{q} = 4{,}86 \cdot 5{,}14 \cdot 1{,}0 \cdot 1{,}2 \cdot 1{,}00 + 3{,}0$$

$$= 30{,}0 + 3{,}0 = 33{,}0\ \text{t/m}^2$$

Bæreevnekriteriet giver, idet der ses bort fra fundamentets egenvægt:

$$\frac{V_n}{\bar{A}} = \frac{400}{(B - 2 \cdot 0{,}5)(3B - 2 \cdot 1{,}0)} \leq b_n = 33{,}0\ \text{t/m}^2$$

$$B \geq 2{,}85\ \text{m}$$

På grundlag af ovenstående gennemregning skønnes:

$B = 2{,}80$ m, hvoraf fås:

$L = 3\,B = 3 \cdot 2{,}80 = 8{,}40$ m

Fundamentets egenvægt bliver:

$$G_f = B\,L\,h\,\gamma_b = 2{,}80 \cdot 8{,}40 \cdot 1{,}5 \cdot 2{,}3 = 81\ \text{t}$$

Den nominelle belastning på fundamentsfladen findes:

$$V_n = G_n + P_n + f_g \cdot G_f = 400 + 1{,}0 \cdot 81 = 481\ \text{t}$$

Det effektive areal findes:

$$e_B = \frac{M_B}{V_n} = \frac{400 \cdot 0{,}5}{481} = 0{,}42\ \text{m}$$

$$e_L = \frac{M_L}{V_n} = \frac{400 \cdot 1{,}0}{481} = 0{,}83\ \text{m}$$

$$\bar{B} = B - 2\,e_B = 2{,}80 - 2 \cdot 0{,}42 = 1{,}96\ \text{m}$$

$$\bar{L} = L - 2\,e_B = 8,40 - 2 \cdot 0,83 = 6,74 \text{ m}$$

$$\bar{A} = \bar{B} \cdot \bar{L} = 1,96 \cdot 6,74 = 13,2 \text{ m}^2$$

Bæreevnen findes:

$$s_c^o = 1 + 0,2\,\frac{\bar{B}}{\bar{L}} = 1 + 0,2\,\frac{1,96}{6,74} = 1,06$$

$$d_c^o = 1 + 0,35\,\frac{\bar{D}}{\bar{B}} = 1 + 0,35\,\frac{1,5}{1,96} = 1,27$$

$$b_n = c_{un} N_c^o s_c^o d_c^o i_c^o + \bar{q}$$

$$= 4,86 \cdot 5,14 \cdot 1,06 \cdot 1,27 \cdot 1,00 + 3,0 = 36,6 \text{ t/m}^2$$

Af $\frac{V_n}{\bar{A}} = \frac{481}{13,2} = 36,4 \text{ t/m}^2 < b_n = 36,6 \text{ t/m}^2$ ses, at bæreevnekriteriet er opfyldt.

<u>KONKLUSION</u>

Dimensionerne $B \cdot L = 2,80 \cdot 8,40 \text{ m}^2$ giver tilstrækkelig bæreevne.

EKSEMPEL 10. 5: Skråt, centralt belastet enkeltfundament i ler.

GIVET

Et enkeltfundament af grovbeton skal placeres på en lokalitet med følgende bundforhold:

JOF og GVS er i kote + 2, 0.

Overalt under kote + 2, 0: Ler med $c_u = 8,5\ t/m^2$ ($\varphi = 0$),

$\gamma_m = 2,0\ t/m^3$ og $h_c = 8\ m$.

Belastningskomposanterne i JOF er:

Lodret : $G = 30\ t$ og $P = 60\ t$, som begge er centralt virkende.

Vandret: $H(P) = 16\ t$, som danner en vinkel på 30^o med længdeaksen.

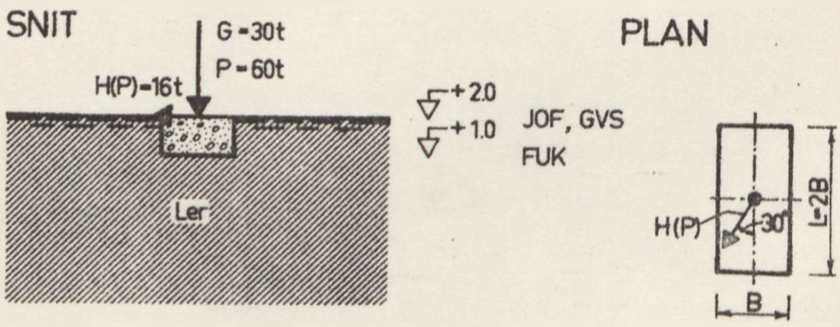
Fundamentets dimensioner er: $L = 2B$ og $h = 1,0\ m$.

FUK placeres i kote + 1, 0.

ØNSKES

Find de for bæreevnen nødvendige dimensioner $B \cdot L$ af fundamentet.

LØSNING



Figur 10. 5 A: Snit og plan af fundament.

Forudsætninger

Bæreevnen på ler bestemmes af $b_n = c_{un} N_c^o s_c^o d_c^o i_c^o + \bar{q}$,

idet kriteriet, for at glidestabilitet er tilstede, samtidig kræver $H_n \leqq \bar{A} c_{un}$.

Nominelle værdier

$$G_n + P_n = f_g \cdot G + f_p \cdot P = 1,0 \cdot 30 + 1,5 \cdot 60 = 120\ t$$

$$H_n = f_p \cdot H(P) = 1,5 \cdot 16 = 24\ t$$

$$c_{un} = \frac{c_u}{f_c} = \frac{8,5}{1,75} = 4,86 \text{ t/m}^2$$

$$\bar{q} = \gamma'_m \cdot h = 1,0 \cdot 1,0 = 1,0 \text{ t/m}^2$$

Bæreevnefaktorer

$$N_c^o = 5,14$$

$$s_c^o = 1 + 0,2 \frac{\bar{B}}{\bar{L}} \qquad (1,00 \leqq s_c^o \leqq 1,20)$$

$$d_c^o = 1 + 0,35 \frac{\bar{D}}{\bar{B}} \qquad (1,00 \leqq d_c^o \leqq 1,35)$$

$$i_c^o = \frac{1}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{1 - \frac{H_n}{\bar{A}c_{un}}} \qquad (0,50 \leqq i_c^o \leqq 1,00)$$

Dimensionering

Skønnes indledningsvis $s_c^o = 1,0$, $d_c^o = 1,2$ og $i_c^o = 0,9$ bliver bæreevnen:

$$b_n = c_{un} N_c^o s_c^o d_c^o i_c^o + \bar{q} = 4,86 \cdot 5,14 \cdot 1,0 \cdot 1,2 \cdot 0,9 + 1,0 = 28,0 \text{ t/m}^2$$

Bæreevnekriteriet giver, idet der skønnes $\bar{A} = \bar{B} \cdot \bar{L} = 2\bar{B}^2$, og der ses bort fra fundamentets egenvægt:

$$\frac{V_n}{\bar{A}} = \frac{120}{2\bar{B}^2} \leqq b_n = 28,0 \text{ t/m}^2$$

$$\bar{B} \geqq 1,46 \text{ m}$$

Glidestabilitetskriteriet giver med samme skøn som ovenfor:

$$H_n = 24 \text{ t} \leqq \bar{A} c_{un} = 2\bar{B}^2 \cdot 4,86$$

$$\bar{B} \geqq 1,57 \text{ m}$$

På grundlag heraf skønnes:

$B = 1,70$ m, hvoraf fås:

$L = 2B = 3,40$ m

Fundamentets egenvægt bliver:

$$G_f = B \cdot L \cdot h \cdot \gamma'_b = 1,70 \cdot 3,40 \cdot 1,0 \cdot 1,3 = 7,5 \text{ t}$$

Den nominelle lodrette belastning på fundamentsfladen findes:

$$V_n = G_n + P_n + f_g \cdot G_f = 120 + 7,5 = 127,5 \text{ t}$$

Det effektive areal findes:

$$e_B = \frac{M_B}{V_n} = \frac{24,0 \cos 60^o \cdot 1,0}{127,5} = 0,094 \text{ m}$$

$$e_L = \frac{M_L}{V_n} = \frac{24,0 \cos 30^o \cdot 1,0}{127,5} = 0,163 \text{ m}$$

$$\bar{B} = B - 2e_B = 1,70 - 2 \cdot 0,094 = 1,51 \text{ m}$$

$$\bar{L} = L - 2e_L = 3,40 - 2 \cdot 0,163 = 3,07\ m$$

$$\bar{A} = \bar{B} \cdot \bar{L} = 4,64\ m^2$$

Betragtes glidestabiliteten fås:

$$\frac{H_n}{\bar{A}c_{un}} = \frac{24}{4,64 \cdot 4,86} = 1,06 > 1,00$$ dvs. fundamentet er ikke glidestabilt.

På grundlag af ovenstående gennemregninger skønnes:

$B = 1,90$ m, hvoraf fås:

$$L = 2\,B = 2 \cdot 1,90 = 3,80\ m$$

$$G_f = B\,L\,h\,\gamma'_b = 1,90 \cdot 3,80 \cdot 1,0 \cdot 1,3 = 9,4\ t$$

$$V_n = G_n + P_n + f_g \cdot G_f = 120 + 1,0 \cdot 9,4 = 129,4\ t$$

$$e_B = \frac{M_B}{V_n} = \frac{24,0 \cos 60^o \cdot 1,0}{129,4} = 0,093\ m$$

$$e_L = \frac{M_L}{V_n} = \frac{24,0 \cos 30^o \cdot 1,0}{129,4} = 0,161\ m$$

$$\bar{B} = B - 2e_B = 1,90 - 2 \cdot 0,093 = 1,71\ m$$

$$\bar{L} = L - 2e_L = 3,80 - 2 \cdot 0,161 = 3,48\ m$$

$$\bar{A} = \bar{B} \cdot \bar{L} = 1,71 \cdot 3,48 = 5,95\ m^2$$

Glidestabilitetskriteriet giver:

$$\frac{H_n}{\bar{A}c_{un}} = \frac{24}{5,95 \cdot 4,86} = 0,83 < 1,00$$

Bæreevnen findes:

$$s_c^o = 1 + 0,2\,\frac{\bar{B}}{\bar{L}} = 1 + 0,2\,\frac{1,71}{3,48} = 1,10$$

$$d_c^o = 1 + 0,35\,\frac{\bar{D}}{\bar{B}} = 1 + 0,35\,\frac{1,0}{1,71} = 1,20$$

$$i_c^o = \frac{1}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{1 - \frac{H_n}{\bar{A}c_{un}}} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{1 - \frac{24}{5,95 \cdot 4,86}} = 0,71$$

$$b_n = c_{un} N_c^o s_c^o d_c^o i_c^o + \bar{q}$$

$$= 4,86 \cdot 5,14 \cdot 1,10 \cdot 1,20 \cdot 0,71 + 1,0 = 24,4\ t/m^2$$

Bæreevnekriteriet giver:

$$\frac{V_n}{\bar{A}} = \frac{129,4}{5,95} = 21,8\ t/m^2 < b_n = 24,4\ t/m^2$$

Kriterierne for bæreevne og glidestabilitet er således begge opfyldt.

KONKLUSION

Dimensionerne $B \cdot L = 1,90 \cdot 3,80\ m^2$ giver tilstrækkelig bæreevne.

EKSEMPEL 10. 6: Skråt, centralt belastet enkeltfundament i ler med fyld.

GIVET

En enkeltfundament af grovbeton skal placeres på en lokalitet med følgende bundforhold:

JOF er i kote + 4, 0.

Overalt under kote + 4, 0: Ler med $c_u = 8{,}5\ t/m^2$ ($\varphi = 0$),

$\gamma_m = 2{,}0\ t/m^3$ og $h_c = 8$ m.

GVS står i kote 0, 0.

Efter placeringen af fundamentet udgraves på den ene langside til kote + 2, 0, og der fyldes op med sand ($\gamma = 1{,}6\ t/m^3$) til kote + 3, 0.

Belastningen er skrå og centralt virkende: G = 25 t/m, P = 50 t/m og H (P) = 4 t/m.

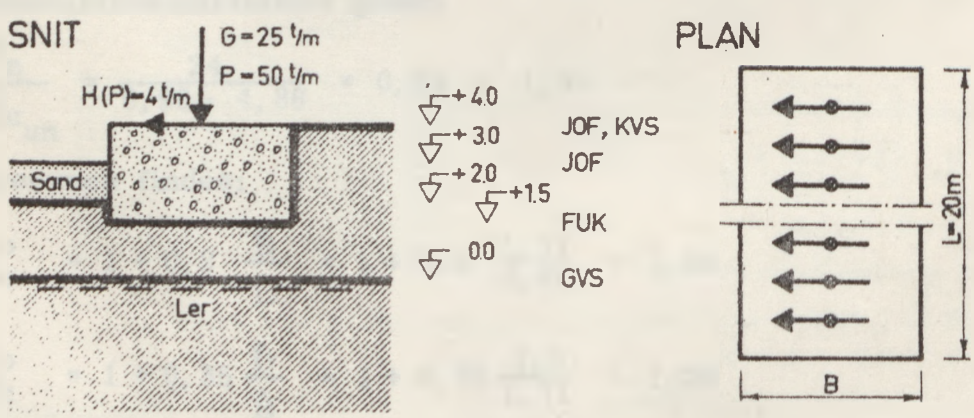
Fundamentets dimensioner er: L = 20 m og h = 2, 5 m.

FUK placeres i kote + 1, 5.

ØNSKES

Find den for bæreevnen nødvendige bredde B af fundamentet.

LØSNING



Figur 10. 6 A: Snit og plan af fundament.

Forudsætninger

Bæreevnen på ler bestemmes af $b_n = c_{un} N_c^o s_c^o d_c^o i_c^o + \bar{q}$,

idet kriteriet, for at glidestabilitet er til stede, samtidig kræver $H_n \leqq \bar{A} c_{un}$

Nominelle værdier

$$G_n + P_n = f_g \cdot G + f_p \cdot P = 1,0 \cdot 25 + 1,5 \cdot 50 = 100\ t/m$$

$$H_n = f_p \cdot H(P) = 1,5 \cdot 4 = 6\ t/m$$

$$c_{un} = \frac{c_u}{f_c} = \frac{8,5}{1,75} = 4,86\ t/m^2$$

$$\bar{q}_{min} = \sum \gamma h = 1,6 \cdot 1,0 + 2,0 \cdot 0,5 = 2,6\ t/m^2$$

Bæreevnefaktorer

$$N_c^o = 5,14$$

$$s_c^o = 1 + 0,2\,\frac{\bar{B}}{\bar{L}} \qquad (1,00 \leqq s_c^o \leqq 1,20)$$

$$d_c^o = 1 + 0,35\,\frac{\bar{D}}{\bar{B}} \qquad (1,00 \leqq d_c^0 \leqq 1,35)$$

$$i_c^o = \frac{1}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{1 - \frac{H_n}{\bar{A}c_{un}}} \qquad (0,50 \leqq i_c^o \leqq 1,00)$$

Dimensionering

Skønnes indledningsvis $s_c^o = 1,0$, $d_c^o = 1,05$ og $i_c^o = 0,9$ bliver bæreevnen:

$$b_n = c_{un} N_c^o s_c^o d_c^o i_c^o + \bar{q} = 4,86 \cdot 5,14 \cdot 1,0 \cdot 1,05 \cdot 0,9 + 2,6$$

$$= 23,6 + 2,6 = 26,2\ t/m^2$$

Bæreevnekriteriet giver, idet $\bar{A} = \bar{B} \cdot 1$, og der ses bort fra fundamentets egenvægt:

$$\frac{V_n}{\bar{A}} = \frac{100}{\bar{B} \cdot 1} \leq b_n = 26,2\ t/m^2$$

$$\bar{B} \geq \frac{100}{26,2} = 3,82\ m$$

På grundlag heraf skønnes:

$$B = 4,50\ m$$

Fundamentets egenvægt bliver:

$$G_f = B \cdot h \cdot \gamma_b = 4,5 \cdot 2,5 \cdot 2,3 = 25,9\ t/m$$

Den nominelle lodrette belastning på fundamentsfladen findes:

$$V_n = G_n + P_n + f_g \cdot G_f = 100 + 1,0 \cdot 25,9 = 125,9\ t/m$$

Det effektive areal findes:

$$e_B = \frac{H_n \cdot h}{V_n} = \frac{6 \cdot 2,5}{125,9} = 0,119\ m$$

$\bar{B} = B - 2e_B = 4,50 - 2 \cdot 0,119 = 4,26 \text{ m}$

$\bar{A} = \bar{B} \cdot 1 = 4,26 \text{ m}^2/\text{m}$

Bæreevnen findes:

$$s_c^o = 1 + 0,2 \frac{\bar{B}}{\bar{L}} = 1 + 0,2 \frac{4,26}{20} = 1,04$$

$$d_c^o = 1 + 0,35 \frac{\bar{D}}{\bar{B}} = 1 + 0,35 \frac{0,5}{4,26} = 1,04$$

$$i_c^o = \frac{1}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{1 - \frac{H_n}{\bar{A}c_{un}}} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{1 - \frac{6}{4,26 \cdot 4,86}} = 0,92$$

$$b_n = c_{un} N_c^o s_c^o d_c^o i_c^o + \bar{q} = 4,86 \cdot 5,14 \cdot 1,04 \cdot 1,04 \cdot 0,92 + 2,6 = 27,5 \text{ t/m}^2$$

Af $\frac{\bar{V}_n}{\bar{A}} = \frac{125,9}{4,26} = 29,6 \text{ t/m}^2 \leq b_n = 27,5 \text{ t/m}^2$ ses, at fundamentets bredde er skønnet for lille.

På grundlag af ovenstående gennemregninger skønnes:

$B = 4,80$ m, hvoraf fås:

$$G_f = B h \gamma_b = 4,8 \cdot 2,5 \cdot 2,3 = 27,6 \text{ t/m}$$

$$V_n = G_n + P_n + f_g \cdot G_f = 100 + 1,0 \cdot 27,6 = 127,6 \text{ t/m}$$

$$e_B = \frac{H_n \cdot h}{V_n} = \frac{6 \cdot 2,5}{127,6} = 0,118 \text{ m}$$

$$\bar{B} = B - 2e_B = 4,80 - 2 \cdot 0,118 = 4,56 \text{ m}$$

$$\bar{A} = \bar{B} \cdot 1 = 4,56 \text{ m}^2/\text{m}$$

Bæreevnen findes:

$$s_c^o = 1 + 0,2 \frac{\bar{B}}{\bar{L}} = 1 + 0,2 \frac{4,56}{20} = 1,05$$

$$d_c^o = 1 + 0,35 \frac{\bar{D}}{\bar{B}} = 1 + 0,35 \frac{0,5}{4,56} = 1,04$$

$$i_c^o = \frac{1}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{1 - \frac{H_n}{\bar{A}c_{un}}} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{1 - \frac{6}{4,56 \cdot 4,86}} = 0,93$$

$$b_n = c_{un} N_c^o s_c^o d_c^o i_c^o + \bar{q} = 4,86 \cdot 5,14 \cdot 1,05 \cdot 1,04 \cdot 0,93 + 2,6$$

$$= 28,0 \text{ t/m}^2$$

Bæreevnekriteriet giver:

$$\frac{V_n}{\bar{A}} = \frac{127,6}{4,56} = 28,0 \text{ t/m}^2 = b_n = 28,0 \text{ t/m}^2$$

Glidestabilitetskriteriet giver:

$$\frac{H_n}{\bar{A}c_{un}} = \frac{6}{4,56 \cdot 4,86} = 0,27 < 1$$

Kriterierne for bæreevne og glidestabilitet er således begge opfyldt.

KONKLUSION

Bredden B = 4,80 m giver tilstrækkelig bæreevne.

EKSEMPEL 10, 7: Lodret, centralt belastet stribefundament i sand.

GIVET

Et stribefundament skal placeres på en lokalitet med følgende bundforhold:

JOF er i kote + 3, 0.

Fra kote + 3, 0 til kote + 0, 8: Fyld med $\gamma = 1,5\ t/m^3$.

Under kote + 0, 8 : Sand med $\varphi = 36^o$ ($c = 0$), $\gamma_d = 1,7\ t/m^3$, $\gamma_m = 2,0\ t/m^3$ og $h_c = 0$.

GVS står i kote 0, 0.

Belastningen, som virker lodret og centralt er i kote + 0, 8:
$G = 30\ t/m$ og $P = 60\ t/m$.

Fundamentets højde er: $h = 0,8$ m.

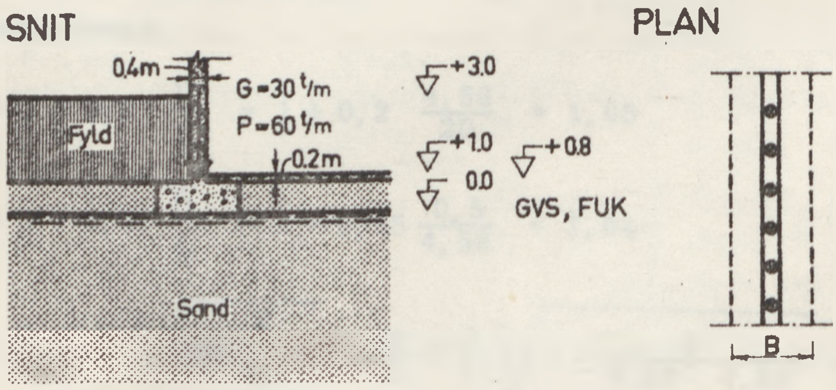
FUK placeres i kote 0, 0.

Fundamentet bærer en 0, 4 m tyk betonvæg på hvis ene side, der er udgravet til kote + 0, 8 og udstøbt et 0, 2 m tykt betongulv.

ØNSKES

Find den for bæreevnen nødvendige bredde B af fundamentet.

LØSNING



Figur 10. 7 A: Snit og plan af fundament.

Forudsætninger

Bæreevnen på sand bestemmes af $b_n = \frac{1}{2}\bar{\gamma}\bar{B}N_\gamma s_\gamma i_\gamma + \bar{q}N_q s_q d_q i_q$

Nominelle værdier

$$G_n + P_n = f_g \cdot G + f_p \cdot P = 1,0 \cdot 30 + 1,5 \cdot 60 = 120\ t/m$$

$$\varphi_n = \arctan \frac{\tan \varphi}{f_\varphi} = \arctan \frac{\tan 36^o}{1,25} = 30,2^o$$

$$\bar{q}_{min} = \sum \gamma \cdot h = 1,7 \cdot 0,8 + 2,3 \cdot 0,2 = 1,36 + 0,46 = 1,82 \text{ t/m}^2$$

Bæreevnefaktorer

For $\varphi_n = 30,2^o$ aflæses $N_q = 19$. Herefter fås:

$$N_\gamma = 1,8\,(N_q - 1) \tan \varphi_n = 1,8\,(19 - 1) \tan 30,2^o = 19$$

Af $\bar{B} = B$, $\bar{L} \sim \infty$, $\bar{D} = 0,8$ m og $H_n = 0$ fås:

$$s_\gamma = 1 - 0,4 \frac{\bar{B}}{\bar{L}} = 1,00$$

$$s_q = 1 + 0,2 \frac{\bar{B}}{\bar{L}} = 1,00$$

$$i_q = \left[1 - \frac{H_n}{V_n + \bar{A} c_{un} \cot \varphi_n}\right]^2 = 1,00$$

$$i_\gamma = i_q^{\,2} = 1,00$$

$$d_q = 1 + 0,35 \frac{\bar{D}}{\bar{B}} = 1 + 0,35 \frac{0,8}{B} \qquad (1,00 \leq d_q \leq 1,35)$$

Dimensionering

Skønnes indledningsvis $d_q = 1,15$ bliver bæreevnen:

$$b_n = \frac{1}{2} \bar{\gamma} \bar{B} N_\gamma s_\gamma i_\gamma + \bar{q} N_q s_q d_q i_q =$$

$$= \frac{1}{2} \cdot 1,0 \cdot \bar{B} \cdot 19 \cdot 1,00 \cdot 1,00 + 1,82 \cdot 19 \cdot 1,00 \cdot 1,15 \cdot 1,00 = 9,5\bar{B} + 39,8$$

Bæreevnekriteriet giver, idet der ses bort fra fundamentets egenvægt:

$$\frac{V_n}{\bar{A}} = \frac{120}{\bar{B} \cdot 1} \leq b_n = 9,5\,\bar{B} + 39,8$$

$$\bar{B} \geq 2,03$$

På grundlag heraf skønnes:

$$B = 2,10 \text{ m}$$

Fundamentets egenvægt, hvori medregnes vægt af fyld og betongulv over fundamentet, bliver:

$$G_f = \sum B \cdot h \cdot \gamma = 2,10 \cdot 0,8 \cdot 2,3 + 0,85 \cdot 2,2 \cdot 1,5 + 0,85 \cdot 0,2 \cdot 2,3$$

$$= 3,86 + 2,81 + 0,39 = 7,1 \text{ t/m}$$

Den nominelle belastning på fundamentsfladen findes:

$$V_n = G_n + P_n + f_g \cdot G_f = 120 + 1,0 \cdot 7,1 = 127,1 \text{ t/m}$$

Ekscentriciteten findes:

$$e_B = \frac{M_B}{V_n} = \frac{(2,81 - 0,39) \cdot 0,63}{127,1} = 0,01 \text{ m}$$

Da ekscentriciteten er lille i forhold til fundamentsbredden, og da kraftresultaterne desuden falder til den side, hvor det største q - led optræder, sættes:

$$\bar{B} = B$$

Bæreevnen findes:

$$d_q = 1 + 0,35 \frac{\bar{D}}{\bar{B}} = 1 + 0,35 \frac{0,8}{2,10} = 1,13$$

$$b_n = \frac{1}{2} \bar{\gamma} \bar{B} N_\gamma s_\gamma i_\gamma + \bar{q} N_q s_q d_q i_q =$$

$$= \frac{1}{2} \cdot 1,0 \cdot 2,10 \cdot 19 \cdot 1,00 \cdot 1,00 + 1,82 \cdot 19 \cdot 1,00 \cdot 1,13 \cdot 1,00 = 59,1 \text{ t/m}^2$$

Af $\frac{V_n}{\bar{A}} = \frac{127,1}{2,10} = 60,6 \text{ t/m}^2 > b_n = 59,1 \text{ t/m}^2$ ses, at fundamentets bredde er skønnet for lille.

På grundlag af ovenstående gennemregninger skønnes:

$$B = 2,20 \text{ m}, \text{ hvoraf fås:}$$

$$G_f = 2,20 \cdot 0,8 \cdot 2,3 + 0,90 \cdot 2,2 \cdot 1,5 + 0,90 \cdot 0,2 \cdot 2,3$$

$$= 7,4 \text{ t/m}$$

$$V_n = G_n + P_n + f_g \cdot G_f = 120 + 1,0 \cdot 7,4 = 127,4 \text{ t/m}$$

$$d_q = 1 + 0,35 \frac{\bar{D}}{\bar{B}} = 1 + 0,35 \frac{0,8}{2,20} = 1,13$$

$$b_n = \frac{1}{2} \cdot \bar{\gamma} \bar{B} N_\gamma s_\gamma i_\gamma + \bar{q} N_q s_q d_q i_q$$

$$= \frac{1}{2} \cdot 1,0 \cdot 2,20 \cdot 19 \cdot 1,00 \cdot 1,00 + 1,82 \cdot 19 \cdot 1,00 \cdot 1,13 \cdot 1,0$$

$$= 60,0 \text{ t/m}^2$$

Af $\frac{V_n}{\bar{A}} = \frac{127,4}{2,20} = 57,9 \text{ t/m}^2 < b_n = 60,0 \text{ t/m}^2$ ses, at bæreevnekriteriet er opfyldt.

KONKLUSION

Bredden $B = 2,20$ m giver tilstrækkelig bæreevne.

EKSEMPEL 10. 8: Støttemur med lodrette sider i sand med vandrette overflader.

GIVET

En indfatning for en skibsfartkanal skal udformes som en massiv grovbetonstøttemur med rektangulært tværsnit. Konstruktionens karakteristika er:

Jordoverfladen	: kote + 2, 0
Kanalens bund	: kote - 8, 0
Støttemurens underside	: kote - 10, 0

Jorden består på begge sider af konstruktionen og til stor dybde. af sand med $\varphi = 34{,}^{o}7$ (c = 0), $h_c = 0$, $\gamma = 1{,}8\ t/m^3$ og $\gamma_m = 2{,}0\ t/m^3$.

Vandspejlet i kanalen og grundvandspejlet i jorden bag ved konstruktionen står til stadighed i kote 0, 0.

ØNSKES

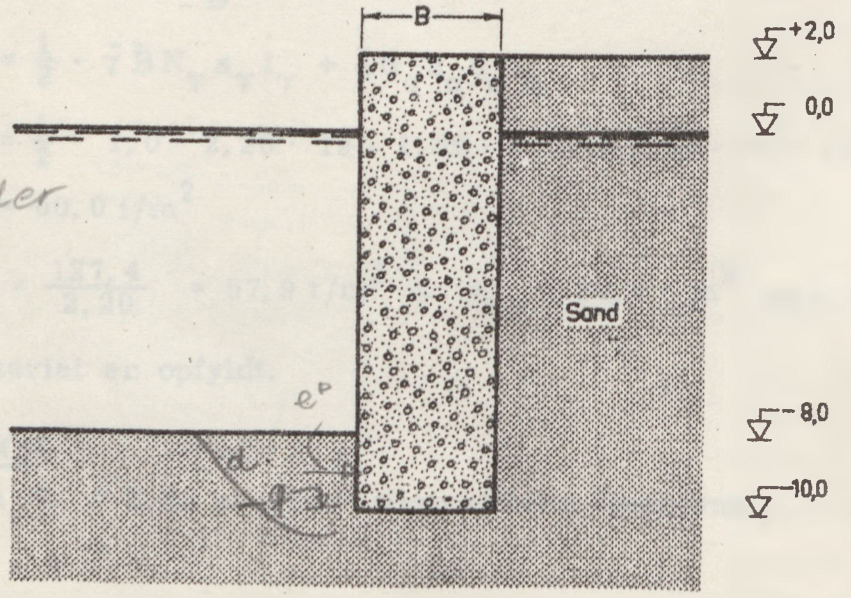
Bestem støttemurens nødvendige bredde B.

LØSNING

Der medtages

$q\ e^p \alpha$ eller

$q\ d\ \alpha$



Figur 10. 8 A: Støttemur i sand.

Forudsætninger

Problemet betragtes som plant.

Jordtrykket på begge sider af konstruktionen beregnes efter de for zonebrud gældende principper, idet muren i brudtilstanden forudsættes at dreje sig om et punkt under grundfladen.

Støttemuren regnes ru,
Bæreevnen af jorden under støttemuren beregnes af:

$$b_n = \frac{1}{2}\tilde{\gamma}\bar{B}N_\gamma s_\gamma i_\gamma + \bar{q}N_q s_q d_q i_q$$

idet kriteriet, for at glidestabilitet er tilstede, samtidig kræver $H_n < V_n \tan \varphi_n$.

<u>Nominelle værdier</u>

$$\varphi_n = \arctan \frac{\tan \varphi}{f_\varphi} = \arctan \frac{\tan 34{,}7^\circ}{1{,}2} = 30{,}0^\circ$$ 2 friktions-vinkler

$N_\gamma = 18{,}3$ og $N_q = 18{,}6$ for $\varphi_n = 30{,}0^\circ$

$$s_\gamma = 1 - 0{,}4\frac{\bar{B}}{\bar{L}} = 1{,}00 \quad \text{idet } \bar{L} \sim \infty$$

$$s_q = 1 + 0{,}2\frac{\bar{B}}{\bar{L}} = 1{,}00 \quad \text{idet } \bar{L} \sim \infty$$

$$i_q = [1 - \frac{H_n}{V_n}]^2$$

$$i_\gamma = i_q^2$$

Dybdefaktoren d_q sættes lig 1,o, idet der medregnes passivt jordtryk på murens forside.

<u>Jordtryk</u>

Det aktive normaljordtryk på murens bagside findes:

$K_\gamma = 0{,}27$

I kote + 2,0 :	$e =$	0 t/m^2
I kote 0,0 :	$e = 1{,}8 \cdot 2{,}0 \cdot 0{,}27$	= 0,97 t/m^2
I kote - 10,0 :	$e = 0{,}97 + 1{,}0 \cdot 10{,}0 \cdot 0{,}27$	= 3,67 t/m^2

Det aktive tangentialjordtryk på murens bagside findes:

I kote + 2,0 :	$f =$	0 t/m^2
I kote 0,0 :	$f = 0{,}97 \cdot \tan(-30{,}0^\circ)$	=- 0,56 t/m^2
I kote - 10,0 :	$f = 3{,}67 \cdot \tan(-30{,}0^\circ)$	=- 2,12 t/m^2

Det passive normaljordtryk på murens forside findes:

$K_\gamma = 5{,}7$

I kote - 8,0 :	$e =$	0 t/m^2
I kote - 10,0 :	$e = 1{,}0 \cdot 2{,}0 \cdot 5{,}7$	= 11,40 t/m^2

Det passive tangentialjordtryk på murens forside findes:

I kote $-8{,}0$: f = $0 \ \mathrm{t/m^2}$

I kote $-10{,}0$: $f = 11{,}40 \cdot \tan(30{,}0^{\circ})$ $= 6{,}61 \ \mathrm{t/m^2}$

De totale jordtryk bliver:

Aktivt jordtryk på bagsiden:

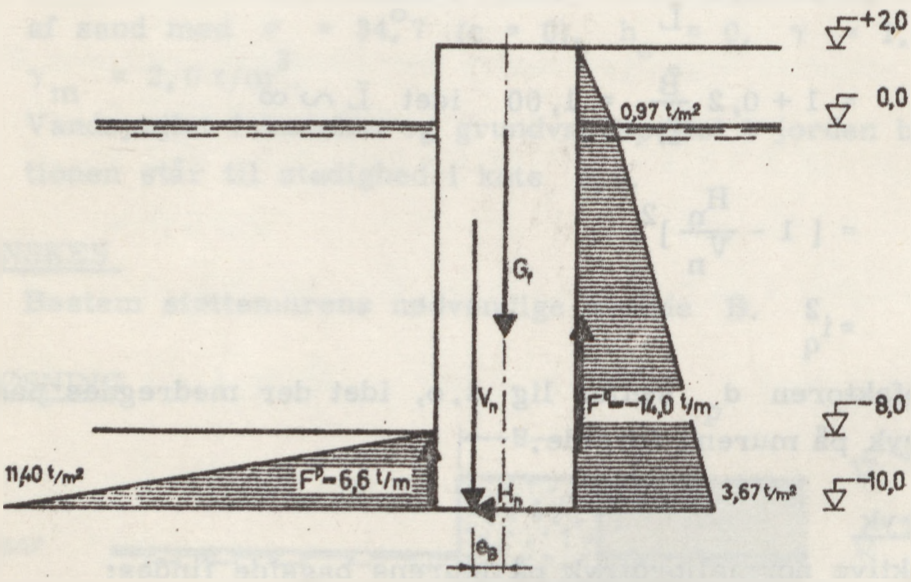
$$E^a = \frac{1}{2}(0+0{,}97)\,2{,}0 + \frac{1}{2}(0{,}97+3{,}67)\,10{,}0 = 24{,}2 \ \mathrm{t/m}$$

$$F^a = \frac{1}{2}(0-0{,}56)\,2{,}0 + \frac{1}{2}(-0{,}56-2{,}12)\,10{,}0 = -14{,}0 \ \mathrm{t/m}$$

Passivt jordtryk på forsiden:

$$E^p = \frac{1}{2}(0+11{,}40)\,2{,}0 = 11{,}4 \ \mathrm{t/m}$$

$$F^p = \frac{1}{2}(0+6{,}61)\,2{,}0 = 6{,}6 \ \mathrm{t/m}$$



Figur 10. 8 B: Kræfter på støttemur.

<u>Gennemregning med en skønnet bredde B = 3, 60 m</u>

Støttemurens egenvægt bliver:

$$G_f = B \sum h\gamma_b = B\,(2{,}0 \cdot 2{,}3 + 10{,}0 \cdot 1{,}3)$$

$$= B \cdot 17{,}6 = 3{,}60 \cdot 17{,}6 = 63{,}4 \ \mathrm{t/m}$$

Ved lodret og vandret projektion fås den nominelle belastning på fundamentsfladen:

$$V_n = f_g\,G_f - F_a - F_p = 1{,}0 \cdot 63{,}4 - (-14{,}0) - 6{,}6 = 70{,}8 \ \mathrm{t/m}$$

$$H_n = E^a - E^p = 24{,}2 - 11{,}4 = 12{,}8 \ \mathrm{t/m}$$

At glidestabilitetskriteriet er opfyldt ses af at:

$$H_n = 12{,}8 \ \mathrm{t/m} < V_n \tan \varphi_n = 70{,}8 \cdot \tan 30^{\circ} = 40{,}9 \ \mathrm{t/m}$$

Ved moment om midtpunktet af fundamentsfladen fås:

$$M_n = E^a z^a - E^p z^p + F^a \frac{B}{2} - F^p \frac{B}{2}$$

$$= \frac{1}{2} \cdot 10,0 \cdot 3,67 \cdot \frac{1}{3} \cdot 10,0 + \frac{1}{2} \cdot 10,0 \cdot 0,97 \frac{2}{3} \cdot 10,0$$

$$+ \frac{1}{2} \cdot 2,0 \cdot 0,97 \left(\frac{1}{3} \cdot 2,0 + 10,0\right) - \frac{1}{2} \cdot 2,0 \cdot 11,40 \cdot \frac{1}{3} \cdot 2,0$$

$$- 14,0 \cdot \frac{B}{2} - 6,6 \cdot \frac{B}{2} = 96,2 - 10,3\ B$$

$$= 96,2 - 10,3 \cdot 3,60 = 59,1 \text{ tm/m}$$

Ekscentriciteten findes:

$$e_B = \frac{M_n}{V_n} = \frac{59,1}{70,8} = 0,84 \text{ m}$$

Det effektive areal findes:

$$\bar{B} = B - 2e_B = 3,60 - 2 \cdot 0,84 = 1,92 \text{ m}$$

$$\bar{A} = \bar{B} \cdot 1 = 1,92 \text{ m}^2/\text{m}$$

Hældningsfaktorerne i bæreevneformlen findes:

$$i_q = \left[1 - \frac{H_n}{V_n}\right]^2 = \left[1 - \frac{12,8}{70,8}\right]^2 = 0,67$$

$$i_\gamma = i_q^2 = 0,67^2 = 0,45$$

Bæreevnen findes:

$$b_n = \frac{1}{2} \bar{\gamma} \bar{B} N_\gamma s_\gamma i_\gamma + \bar{q} N_q s_q d_q i_q$$

$$= \frac{1}{2} \cdot 1,0 \cdot 1,92 \cdot 18,3 \cdot 1,00 \cdot 0,45 + 2,0 \cdot 1,0 \cdot 18,6 \cdot 1,00 \cdot 1,00 \cdot 0,67$$

$$= 32,8 \text{ t/m}^2$$

Af $\frac{V_n}{\bar{A}} = \frac{70,8}{1,92} = 36,9 \text{ t/m}^2 > b_n = 32,8 \text{ t/m}^2$ ses,

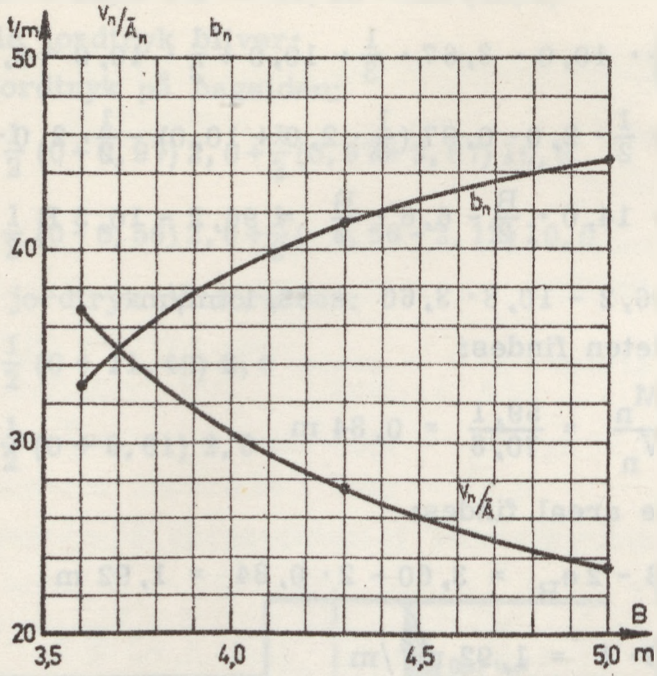
at bæreevnekriteriet ikke er opfyldt.

Dimensionering

Der er foretaget ialt tre gennemregninger med forskellige skønnede bredder, men kun beregningerne svarende til den sidste gennemregning er medtaget. De tre gennemregninger har givet følgende resultater:

Gennemregning nr.		1	2	3
Murens skønnede bredde	(m)	5,00	4,30	3,60
Belastning $V_n/\bar{A}$	(t/m^2)	23,4	27,4	36,9
Bæreevne b_n	(t/m^2)	44,6	41,3	32,8

På grundlag af disse resultater findes ved grafisk interpolation, således som vist på figur 10. 8 C, det endelige resultat $B = 3,70$ m.



Figur 10. 8 C: Bestemmelse af støttemurens nødvendige bredde.

KONKLUSION

Støttemurens nødvendige bredde er $B = 3,70$ m.

EKSEMPEL 10.9: Støttemur med lodrette sider i sand og ler med vandrette overflader.

GIVET

En kajindfatning skal udformes som en massiv grovbetonstøttemur med rektangulært tværsnit.

Konstruktionens karakteristika er:

Kajplanet	: kote + 2,0
Havnebassinets bund	: kote - 8,0
Støttemurens underside	: kote -10,0.

Jorden består af:

Over kote - 4,0 : Sand med $\varphi = 34{,}7^\circ$ ($c = 0$), $h_c = 0$, $\gamma = 1{,}8\ t/m^3$ og $\gamma_m = 2{,}0\ t/m^3$.

Under kote - 4,0 : Ler med $c = 12{,}0\ t/m^2$ ($\varphi = 0$) og $\gamma_m = 2{,}1\ t/m^3$.

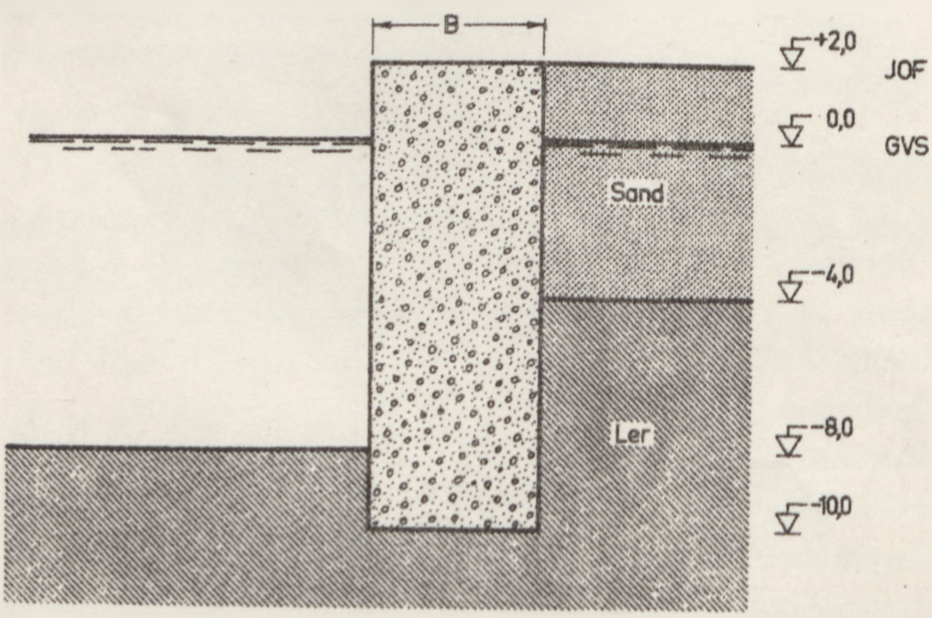
Vandspejlet i havnen og grundvandspejlet i jorden bag ved konstruktionen står til stadighed i kote 0,0.

På jordoverfladen og på støttemurens overside kan virke en lodret belastning $p = 2{,}0\ t/m^2$.

ØNSKES

Bestem støttemurens nødvendige bredde B.

LØSNING



Figur 10.9 A: Støttemur i sand og ler.

Forudsætninger

Problemet betragtes som plant.

Jordtrykket på begge sider af konstruktionen beregnes efter de for zonebrud gældende principper, idet muren i brudtilstanden forudsættes at dreje sig om et punkt under grundfladen.

Støttemuren regnes ru i sandet og glat i leret.

Bæreevnen af jorden under støttemuren beregnes af

$$b_n = c_{un} N_c^o s_c^o d_c^o i_c^o + \bar{q}$$

idet kriteriet, for at glidestabilitet er tilstede, samtidig kræver $H_n < \bar{A} c_{un}$.

Nominelle værdier

$$p_n = f_p p = 1,5 \cdot 2,0 = 3,0 \text{ t/m}^2$$

$$\varphi_n = \arctan \frac{\tan \varphi}{f_\varphi} = \arctan \frac{\tan 34{,}^o7}{1,2} = 30{,}^o0$$

$$c_{un} = \frac{c_u}{f_c} = \frac{12,0}{1,5} = 8,0 \text{ t/m}^2$$

$$N_c^o = 5,14$$

$$s_c^o = 1 + 0,2 \frac{\bar{B}}{\bar{L}} = 1,00 \qquad \text{idet } \bar{L} \sim \infty$$

$$i_c^o = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{1 - \frac{H_n}{\bar{A} c_{un}}}$$

Dybdefaktoren d_c^o sættes lig 1,0, idet der medregnes passivt jordtryk på murens forside.

Jordtryk

Det aktive normaljordtryk på støttemurens bagside findes:

Sand (φ_n = 30,°0): K_γ = 0,27 og K_p = 0,28

I kote + 2,0 :	$e = 3,0 \cdot 0,28$	$= 0,84 \text{ t/m}^2$
I kote 0,0 :	$e = 0,84 + 1,8 \cdot 2,0 \cdot 0,27$	$= 1,81 \text{ t/m}^2$
I kote - 4,0 :	$e = 1,81 + 1,0 \cdot 4,0 \cdot 0,27$	$= 2,89 \text{ t/m}^2$

Ler (φ = 0): K_γ = 1,0, K_p = 1,0 og K_c = - 2,0.

I kote - 4,0 :	$e = (1,8 \cdot 2,0 + 1,0 \cdot 4,0)1,0 + 3,0 \cdot 1,0 - 8,0 \cdot 2.0$	$= -10,20 \text{ t/m}^2$
I kote - 10,0 :	$e = -10,20 + 1,10 \cdot 6,0 \cdot 1,0$	$= -3,60 \text{ t/m}^2$

Da de negative jordtryk vil virke til gunst for konstruktionens stabilitet, regnes under kote - 4,0 med e = 0.

Det aktive tangentialjordtryk på støttemurens bagside findes:

I kote + 2,0 : $f = 0,84 \cdot \tan(-30{,}0°)$ $= -0,48$ t/m^2

I kote 0,0 : $f = 1,81 \cdot \tan(-30{,}0°)$ $= -1,04$ t/m^2

I kote - 4,0 : $f = 2,89 \cdot \tan(-30{,}0°)$ $= -1,67$ t/m^2

I leret under kote - 4,0 er $f = 0$.

Det passive normaljordtryk på støttemurens forside:

Ler ($\varphi = 0$): $K_\gamma = 1,0$ og $K_c = 2,0$.

Trykordinaterne findes:

I kote - 8,0 : $e = 8,0 \cdot 2,0$ $= 16,00$ t/m^2

I kote - 10,0 : $e = 1,10 \cdot 2,0 \cdot 1,0 + 8,0 \cdot 2,0$ $= 18,20$ t/m^2

Det passive tangentialjordtryk på støttemurens forside er $f = 0$.

De totale jordtryk bliver:

Aktivt jordtryk på bagsiden:

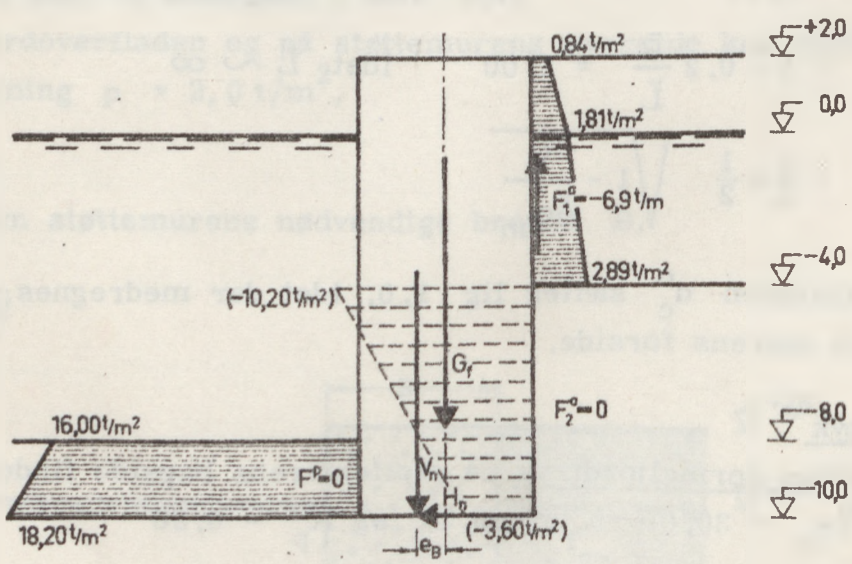
$$E^a = \frac{1}{2}(0,84 + 1,81)\,2,0 + \frac{1}{2}(1,81 + 2,89)\,4,0 = 12,1 \text{ t/m}$$

$$F^a = \frac{1}{2}(-0,48 - 1,04)\,2,0 + \frac{1}{2}(-1,04 - 1,67)\,4,0 = -6,9 \text{ t/m}$$

Passivt jordtryk på forsiden:

$$E^p = \frac{1}{2}(16,00 + 18,20)\,2,0 = 34,2 \text{ t/m}$$

$$F^p = 0 \text{ t/m}$$



Figur 10.9 B: Kræfter på støttemur.

Gennemregning med en skønnet bredde $B = 5,00$ m

Støttemurens egenvægt bliver:

$$G_f = B \sum h\gamma_b = B\,(2,0 \cdot 2,3 + 10,0 \cdot 1,3) = B \cdot 17,6$$

$$= 5,00 \cdot 17,6 = 88,0 \text{ t/m}$$

Idet den bevægelige belastning som farligste tilfælde kun medregnes på overfladen af støttemurens yderste halvdel, fås ved lodret og vandret projektion den nominelle belastning på fundamentsfladen:

$$V_n = p_n \frac{B}{2} + f_g G_f - F^a - F^p$$

$$= 3,0 \cdot \frac{5,00}{2} + 1,0 \cdot 88,0 - (-6,9) - 0 = 102,4 \text{ t/m}$$

$$H_n = E^p - E^a = 34,2 - 12,1 = 22,1 \text{ t/m}$$

Ved momentet om midtpunktet af fundamentsfladen fås:

$$M_n = p_n \frac{B}{2} \frac{B}{4} + E^a z^a - E^p z^p + F^a \frac{B}{2} - F^p \frac{B}{2}$$

$$= 3,0 \cdot \frac{B}{2} \cdot \frac{B}{4} + \frac{1}{2} \cdot 4,0 \cdot 2,89 \left(\frac{1}{3} \cdot 4,0 + 6,0\right)$$

$$+ \frac{1}{2} \cdot 4,0 \cdot 1,81 \left(\frac{2}{3} \cdot 4,0 + 6,0\right) + \frac{1}{2} \cdot 2,0 \cdot 1,81 \left(\frac{1}{3} \cdot 2,0 + 10,0\right)$$

$$+ \frac{1}{2} \cdot 2,0 \cdot 0,84 \left(\frac{2}{3} \cdot 2,0 + 10,0\right) - \frac{1}{2} \cdot 2,0 \cdot 18,20 \cdot \frac{1}{3} \cdot 2,0$$

$$- \frac{1}{2} \cdot 2,0 \cdot 16,00 \cdot \frac{2}{3} \cdot 2,0 - 6,9 \cdot \frac{B}{2}$$

$$= 0,375 \cdot B^2 - 3,45 \cdot B + 69,2$$

$$= 0,375 \cdot 5,00^2 - 3,45 \cdot 5,00 + 69,2 = 61,3 \text{ tm/m}$$

Ekscentriciteten findes:

$$e_B = \frac{M_n}{V_n} = \frac{61,3}{102,4} = 0,60 \text{ m}$$

Det effektive areal bliver:

$$\bar{B} = B - 2e_B = 5,00 - 2 \cdot 0,60 = 3,80 \text{ m}$$

$$\bar{A} = \bar{B} \cdot 1 = 3,80 \text{ m}^2/\text{m}$$

At glidestabilitetskriteriet er opfyldt ses af at:

$$H_n = 22,1 \text{ t/m} < \bar{A} c_{un} = 3,80 \cdot 8,0 = 30,4 \text{ t/m}$$

Hældningsfaktoren i bæreevneformlen findes:

$$i_c^o = \frac{1}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{1 - \frac{H_n}{\bar{A} c_{un}}} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{1 - \frac{22,1}{3,80 \cdot 8,0}} = 0,76$$

Bæreevnen findes:

$$b_n = c_{un} N_c^o s_c^o d_c^o i_c^o + \bar{q} = 8,0 \cdot 5,14 \cdot 1,00 \cdot 1,00 \cdot 0,76 + 2,0 \cdot 1,10$$

$$= 33,3 \text{ t/m}^2$$

Af $\frac{V_n}{\bar{A}} = \frac{102,4}{3,80} = 27,0 \text{ t/m}^2 < b_n = 33,3 \text{ t/m}^2$ ses, at bæreevnekriteriet er rigeligt opfyldt.

<u>Gennemregning med en skønnet bredde $B = 4,40$ m</u>

Støttemurens egenvægt bliver:

$$G_f = B \cdot 17,6 = 4,40 \cdot 17,6 = 77,5 \text{ t/m}$$

Den nominelle belastning på fundamentsfladen findes:

$$V_n = p_n \cdot \frac{B}{2} + f_g G_f - F^a - F^p = 3,0 \cdot \frac{4,40}{2} + 1,0 \cdot 77,5 - (-6,9) - 0$$
$$= 91,0 \text{ t/m}$$

$$H_n = E^p - E^a = 34,2 - 12,1 = 22,1 \text{ t/m}$$

Ekscentriciteten findes:

$$M_n = 0,375 \cdot B^2 - 3,45 \cdot B + 69,2$$
$$= 0,375 \cdot 4,40^2 - 3,45 \cdot 4,40 + 69,2 = 61,1 \text{ tm/m}$$

$$e_B = \frac{M_n}{V_n} = \frac{61,1}{91,0} = 0,67 \text{ m}$$

Det effektive areal findes:

$$\bar{B} = B - 2e_B = 4,40 - 2 \cdot 0,67 = 3,06 \text{ m}$$

$$\bar{A} = \bar{B} \cdot 1 = 3,06 \text{ m}^2/\text{m}$$

At glidestabilitetskriteriet er opfyldt ses af at:

$$H_n = 22,1 \text{ t/m} < \bar{A}c_{un} = 3,06 \cdot 8,0 = 24,5 \text{ t/m}$$

Hældningsfaktoren findes:

$$i_c^o = \frac{1}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{1 - \frac{H_n}{\bar{A}c_{un}}} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{1 - \frac{22,1}{3,06 \cdot 8,0}} = 0,67$$

Bæreevnen findes:

$$b_n = c_{un} N_c^o s_c^o d_c^o i_c^o + \bar{q} = 8,0 \cdot 5,14 \cdot 1,00 \cdot 1,00 \cdot 0,67 + 2,0 \cdot 1,10$$
$$= 29,7 \text{ t/m}^2$$

$$\frac{V_n}{\bar{A}} = \frac{91,0}{3,06} = 29,7 \text{ t/m}^2 \leqq b_n = 29,7 \text{ t/m}^2$$

Glidestabilitets- og bæreevnekriteriet er således begge opfyldt.

KONKLUSION

Støttemurens nødvendige bredde er $B = 4,40$ m.

EKSEMPEL 10. 10: Støttemur med skrå sider i sand og ler.

GIVET

I forbindelse med en vejgennemskæring skal udføres en grovbeton-støttemur.

Konstruktionens karakteristika er:

Støttemurens overside : kote + 8, 0

Støttemurens underside : kote - 2, 0

Såvel over- som undersiden er vandret, mens både for- og bagsiden danner en vinkel på 10° med lodret.

JOF hæver sig fra bagkanten af støttemurens overside til stor afstand under en vinkel på 15° med vandret.

Foran støttemuren er JOF vandret i kote 0, 0.

Jorden består på begge sider af konstruktionen af:

Over kote - 2, 0 : Sand med $\varphi = 34^{\circ}\!,7$ ($c = 0$), $h_c = 0$ og $\gamma = 1,8\ t/m^3$

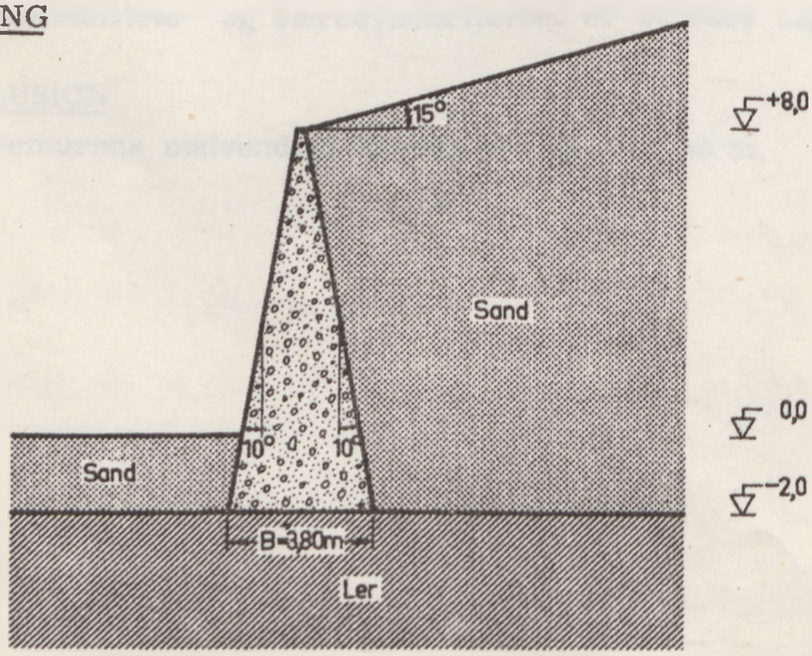
Under kote - 2, 0 : Ler med ($\varphi = 0$), $h_c = 80$ m, $c_u = 12,0\ t/m^2$ og $\gamma_m = 2,1\ t/m^3$.

GVS står i stor dybde under funderingsniveau.

ØNSKES

Undersøg om støttemuren er tilstrækkelig stabil med bredden $B = 3,80$ m ved undersiden.

LØSNING



Figur 10. 10 A: Støttemur med skrå sider.

Forudsætninger

Problemet betragtes som plant.

Jordtrykket på støttemurens bagside beregnes efter Culmanns metode.

Jordtrykket på støttemurens forside beregnes efter de for zonebrud gældende formler således som angivet af Brinch Hansen.

Støttemuren regnes ru på såvel for- som bagsiden.

Bæreevnen af jorden under støttemuren beregnes af:

$$b_n = c_{un} N_c^o s_c^o d_c^o i_c^o + \bar{q}$$

idet kriteriet, for at glidestabilitet er tilstede, samtidig kræver

$$H_n < \bar{A} c_{un}$$

Normaljordtrykkets resultant forudsættes på såvel støttemurens for- som bagside at virke i nederste tredjedelspunkt af væggen.

Nominelle værdier

$$\varphi_n = \arctan \frac{\tan \varphi}{f_\varphi} = \arctan \frac{\tan 34{,}7^o}{1{,}2} = 30{,}0^o$$

$$c_{un} = \frac{c_u}{f_c} = \frac{12{,}0}{1{,}5} = 8{,}0 \text{ t/m}^2$$

$$N_c^o = 5{,}14$$

$$s_c^o = 1 - 0{,}4 \frac{\bar{B}}{\bar{L}} = 1{,}00 \quad \text{idet } \bar{L} \sim \infty$$

$$d_c^o = 1 + 0{,}35 \frac{\bar{D}}{\bar{B}} = 1{,}00 \quad \text{idet } \bar{D} = 0.$$

$$i_c^o = \frac{1}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{1 - \frac{H_n}{\bar{A} c_{un}}}$$

Jordtryk

Det aktive jordtryk på støttemurens bagside findes ved grafisk konstruktion efter Culmanns metode, således som vist på figur 10.10B.

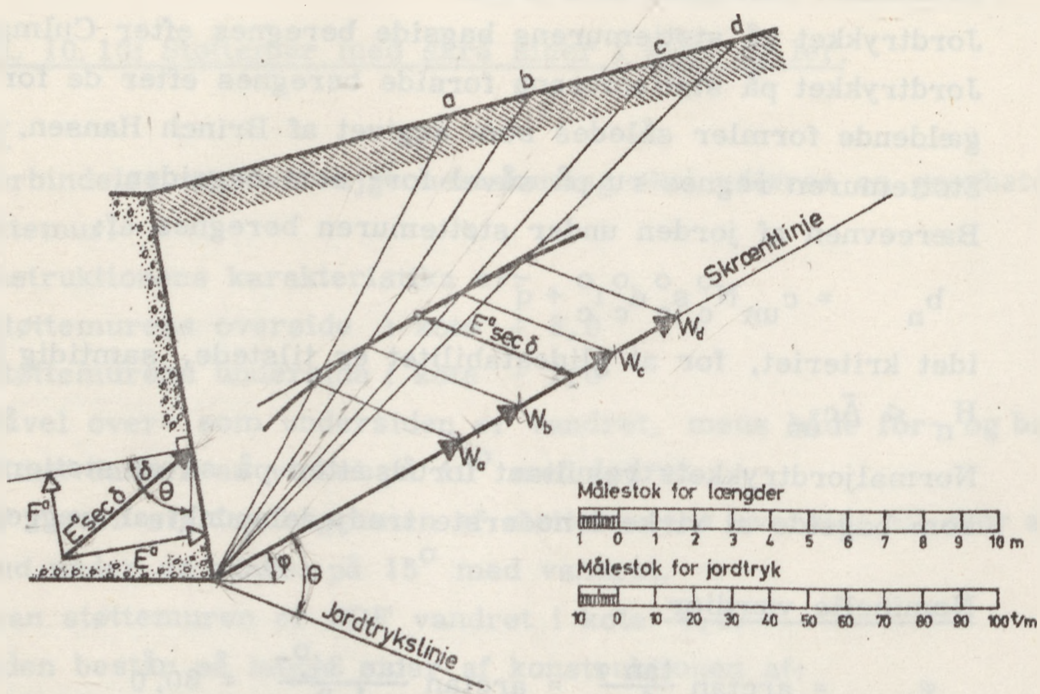
Vægten af de på figuren viste jordlegemer er:

$$W_a = \frac{1}{2} \cdot 6{,}1 \cdot 13{,}7 \cdot 1{,}8 = 75{,}2 \text{ t/m}$$

$$W_b = \frac{1}{2} \cdot 6{,}9 \cdot 15{,}1 \cdot 1{,}8 = 93{,}8 \text{ t/m}$$

$$W_c = \frac{1}{2} \cdot 7{,}7 \cdot 17{,}6 \cdot 1{,}8 = 122{,}0 \text{ t/m}$$

$$W_d = \frac{1}{2} \cdot 8{,}1 \cdot 19{,}3 \cdot 1{,}8 = 140{,}5 \text{ t/m}$$



Figur 10.10 B: Bestemmelse af aktivt jordtryk.

Af figuren findes jordtrykket $E^a \sec \delta = 44,0$ t/m, hvoraf fås det totale aktive jordtryk på støttemurens bagside:

$$E^a = E^a \sec \delta \cdot \cos \delta = 44,0 \cos 30^\circ,0 = 38,1 \text{ t/m}$$

$$F^a = -E^a \sec \delta \cdot \sin \delta = -44,0 \sin 30^\circ,0 = -22,0 \text{ t/m}$$

Det passive normaljordtryk på støttemurens forside findes af formlerne:

$$e = \bar{\gamma} d K_\gamma$$

$$K_\gamma = [K_p + 0,007 (e^{9 \sin\delta} - 1)] \cos (\beta - \Theta), \quad \text{idet}$$

$$K_p = \frac{\cos \delta_n \sin (v_o + \varphi_n) \cos (v_1 - \Theta)}{\sin (v_o - \beta) \cos (v_1 + \varphi_n + \delta_n - \Theta)} \cdot e^{2 (v_o - v_1) \tan \varphi_n}$$

Den i udtrykket for K_p indgående vinkel v_o findes af formlen:

$$c_n \sin\beta \sin (2 v_o + \varphi_n - \beta) + (p_n \tan \varphi_n + c_n \cos\beta) \cos (2 v_o + \varphi_n - \beta)$$
$$+ p_n \sec \varphi_n \sin\beta = 0$$

Da $c_n = 0$ fås:

$$\cos (2 v_o + \varphi_n - \beta) = - \frac{\sin\beta}{\sin \varphi_n}$$

Med $\varphi_n = 30^\circ,0$ og $\beta = 0^\circ$ fås:

$$\cos (2 v_o + 30^\circ,0 - 0) = 0; \quad v_o = 30^\circ,0$$

Den i udtrykket for K_p indgående vinkel v_1 findes af formlen:

$$\cos(2v_1 + \varphi_n + \delta_n - 2\Theta) = \frac{\sin \delta_n}{\sin \varphi_n}$$

Med $\varphi_n = 30{,}^{\circ}0$, $\delta_n = 30{,}^{\circ}0$ og $\Theta = 10{,}^{\circ}0$ fås:

$$\cos(2v_1 + 30{,}^{\circ}0 + 30{,}^{\circ}0 - 2 \cdot 10{,}^{\circ}0) = 1 \;; \quad v_1 = -20{,}^{\circ}0$$

Jordtrykskoefficienterne findes:

$$K_p = \frac{\cos 30{,}^{\circ}0 \cdot \sin(30{,}^{\circ}0 + 30{,}^{\circ}0)\cos(-30{,}^{\circ}0 - 10{,}^{\circ}0)}{\sin(30{,}^{\circ}0 - 0)\cos(-20{,}^{\circ}0 + 30{,}^{\circ}0 + 30{,}^{\circ}0 - 10{,}^{\circ}0)}$$

$$\cdot\, e^{2\,(30,0 + 20,0)\frac{\pi}{180}\tan 30{,}^{\circ}0} = 4,07$$

$$K_\gamma = [\,4,07 + 0,007\,(e^{9 \sin 30{,}^{\circ}0} - 1)]\cos(0 - 10{,}^{\circ}0) = 4,63$$

Herefter fås:

I kote $0,0$: $e =$ $0\ t/m^2$

I kote $-2,0$: $e = \bar{\gamma}\, d\, K_\gamma = 1,8 \cdot 2,0 \cdot 4,63$ $= 16,7\ t/m^2$

Det <u>passive tangentialjordtryk</u> på støttemurens forside findes:

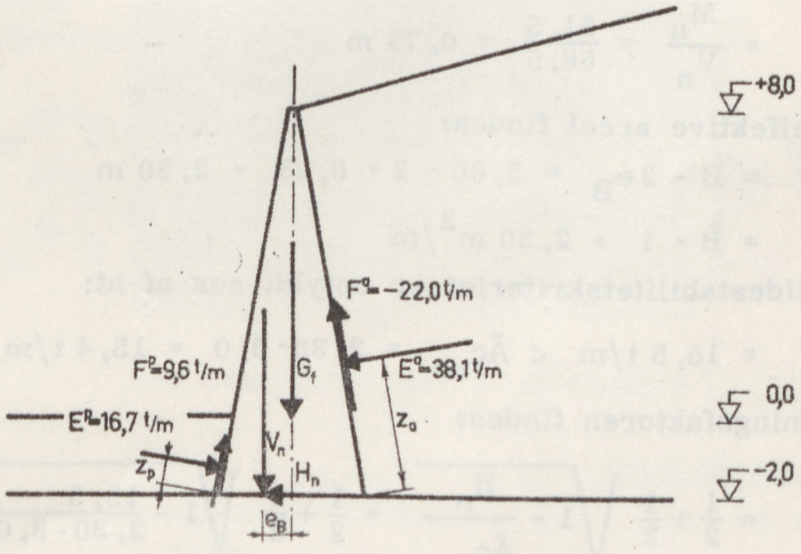
I kote $0,0$: $f = 0\ t/m^2$

I kote $-2,0$: $f = e \tan\delta = 16,7 \cdot \tan 30{,}^{\circ}0$ $= 9,6\ t/m^2$

Det <u>totale passive jordtryk</u> på støttemurens forside bliver:

$$E^p = \frac{1}{2} \cdot 16,7 \cdot 2,0 = 16,7\ t/m$$

$$F^p = \frac{1}{2} \cdot 9,6 \cdot 2,0 = 9,6\ t/m$$



Figur 10.10 C: Kræfter på støttemur.

Bæreevneberegning

Støttemurens egenvægt bliver:

$$G_f = (B - h \tan \Theta)\, h \gamma_b = (3,80 - 10,0 \tan 10^o)\, 10,0 \cdot 2,3$$

$$= 46,9 \text{ t/m}$$

Den nominelle belastning på fundamentsfladen findes ved lodret og vandret projektion:

$$V_n = f_g G_f + E^a \sin\Theta - F^a \cos\Theta + E^p \sin\Theta - F^p \cos\Theta$$

$$= 1,0 \cdot 46,9 + 38,1 \sin 10^o + 22,0 \cos 10^o + 16,7 \sin 10^o$$

$$- 9,6 \cos 10^o = 68,6 \text{ t/m}$$

$$H_n = E^a \cos\Theta + F^a \sin\Theta - E^p \cos\Theta - F^p \sin\Theta$$

$$= 38,1 \cos 10^o - 22,0 \sin 10^o - 16,7 \cos 10^o - 9,6 \sin 10^o$$

$$= 15,5 \text{ t/m}$$

Ved moment om midtpunktet af fundamentsfladen findes:

$$M_n = E^a \left(\frac{z_a}{\cos\Theta} - \frac{B}{2}\sin\Theta\right) + F^a \frac{B}{2}\cos\Theta - E^p \left(\frac{z_p}{\cos\Theta} - \frac{B}{2}\sin\Theta\right)$$

$$- F^p \frac{B}{2}\cos\Theta$$

$$= 38,1 \left(\frac{10,0}{3 \cos 10^o} - \frac{3,80}{2}\sin 10^o\right) - 22,0 \frac{3,80}{2} \cos 10^o$$

$$- 16,7 \left(\frac{2,0}{3 \cos 10^o} - \frac{3,80}{2}\sin 10^o\right) - 9,6 \frac{3,80}{2} \cos 10^o$$

$$= 51,5 \text{ tm/m}$$

Ekscentriciteten findes:

$$e_B = \frac{M_n}{V_n} = \frac{51,5}{68,6} = 0,75 \text{ m}$$

Det effektive areal findes:

$$\bar{B} = B - 2 e_B = 3,80 - 2 \cdot 0,75 = 2,30 \text{ m}$$

$$\bar{A} = \bar{B} \cdot 1 = 2,30 \text{ m}^2\text{/m}$$

At glidestabilitetskriteriet er opfyldt ses af at:

$$H_n = 15,5 \text{ t/m} < \bar{A} c_{un} = 2,30 \cdot 8,0 = 18,4 \text{ t/m}$$

Hældningsfaktoren findes:

$$i_c^o = \frac{1}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{1 - \frac{H_n}{\bar{A} c_{un}}} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{1 - \frac{15,5}{2,30 \cdot 8,0}} = 0,70$$

Bæreevnen findes:

$$b_n = c_{un} N_c^o s_c^o d_c^o i_c^o + \bar{q}$$

$$= 8{,}0 \cdot 5{,}14 \cdot 1{,}00 \cdot 1{,}00 \cdot 0{,}70 + 2{,}0 \cdot 1{,}8 = 32{,}4 \text{ t/m}^2$$

Af $\frac{V_n}{\bar{A}} = \frac{68{,}6}{2{,}30} = 29{,}8 \text{ t/m}^2 < b_n = 32{,}4 \text{ t/m}^2$ ses, at bæreevnekriteriet er opfyldt.

KONKLUSION

Støttemuren er tilstrækkelig stabil med bredden B = 3,80 m ved undersiden.

EKSEMPEL 11.1: Pæle med spidsen i sand.

GIVET

Et bygværk skal funderes på en lokalitet med følgende bundforhold:

JOF er i kote + 4,0.

Fra kote + 4,0 til kote - 3,0: Fyld med $c = \varphi = 0$ og $\gamma = 1,5\ t/m^3$.

Under kote - 3,0 : Sand med $\varphi = 35^o$ $(c = 0)$, $h_c = 0$ og $\gamma = 1,8\ t/m^3$

GVS står i kote - 6,0.

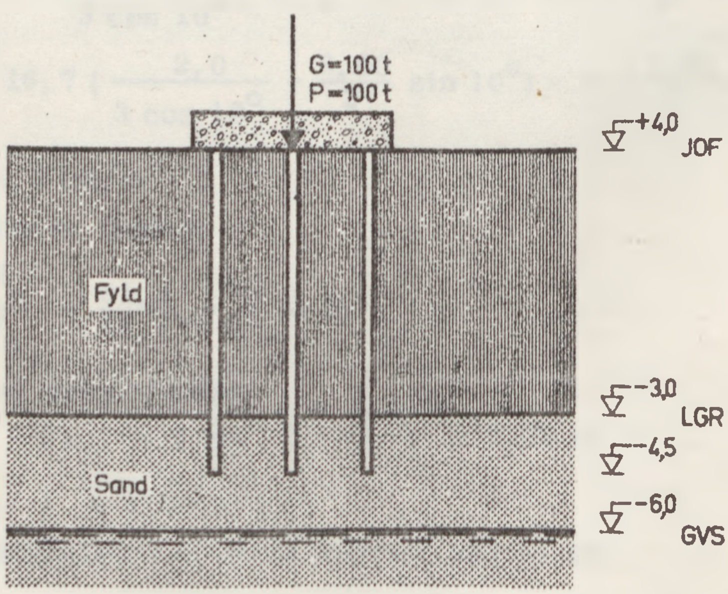
Bygværkets belastning, som virker lodret, er: G = 150 t og P = 100 t.

Bygværket skal funderes på lodrette jernbetonpæle med tværsnitsarealet: $A = 25 \cdot 25\ cm^2$; pælene rammes til kote - 4,5.

ØNSKES

Find det nødvendige antal pæle.

LØSNING



Figur 11.1 A: Pæle med spidsen i sand.

Forudsætninger

For en pæl i sand forudsættes bidragene til bæreevnen at kunne beregnes i henhold til følgende formler:

Spidsmodstanden : $Q_p = 2\,N_q\,\bar{q}_p\,A_p$

Overflademodstanden: $Q_m = 0,6\,\bar{q}_m\,A_m$

Pælene forudsættes at virke som enkeltpæle.

Nominelle værdier

$$G + f_p \cdot P = 150 + 1{,}5 \cdot 100 = 300\ t$$

$$\varphi_n = \text{Arctan}\ \frac{\tan\varphi}{f_\varphi} = \text{Arctan}\ \frac{\tan 35^o}{1{,}25} = 29{,}^o2$$

$$N_q = 17{,}0 \quad \text{for} \quad \varphi_n = 29{,}^o2$$

$$Q_m = \frac{0{,}6}{f_a}\ \bar{q}_m A_m = \frac{0{,}6}{2{,}0}\ \bar{q}_m A_m = 0{,}3\ \bar{q}_m A_m$$

$$\bar{q}_p = \sum \bar{\gamma} d = 1{,}5 \cdot 7{,}0 + 1{,}8 \cdot 1{,}5 = 13{,}2\ t/m^2$$

$$\bar{q}_m = \sum \bar{\gamma} d = 1{,}5 \cdot 7{,}0 + 1{,}8 \cdot 0{,}75 = 11{,}9\ t/m^2$$

Dimensionering

Den nominelle spidsmodstand bliver:

$$Q_p = 2 N_q\ \bar{q}_p A_p = 2 \cdot 17{,}0 \cdot 13{,}2 \cdot 0{,}25^2 = 28{,}0\ t$$

Den nominelle overflademodstand bliver:

$$Q_m = 0{,}3\ \bar{q}_m A_m = 0{,}3 \cdot 11{,}9 \cdot 0{,}25 \cdot 4 \cdot 1{,}5 = 5{,}4\ t$$

Den samlede nominelle bæreevne pr. pæl bliver herefter:

$$Q = Q_p + Q_m = 28{,}0 + 5{,}4 = 33{,}4\ t$$

Det nødvendige antal pæle bliver:

$$N = \frac{G + f_p \cdot P}{Q} = \frac{300}{33{,}4} = 8{,}98 \sim 9$$

KONKLUSION

Det nødvendige antal pæle er 9.

EKSEMPEL 11.2: Pæle i ler.

GIVET

Et byggeværk skal funderes på en lokalitet med følgende bundforhold:

JOF er i kote 0,0.

Under kote 0,0: Ler med $c_u = 12\ t/m^2$ ($\varphi = 0$) og

$\gamma_m = 2,1\ t/m^3$

GVS står i kote 0,0.

Bygværkets belastning, som virker lodret, er: $G = 50\ t$ og $P = 100\ t$.

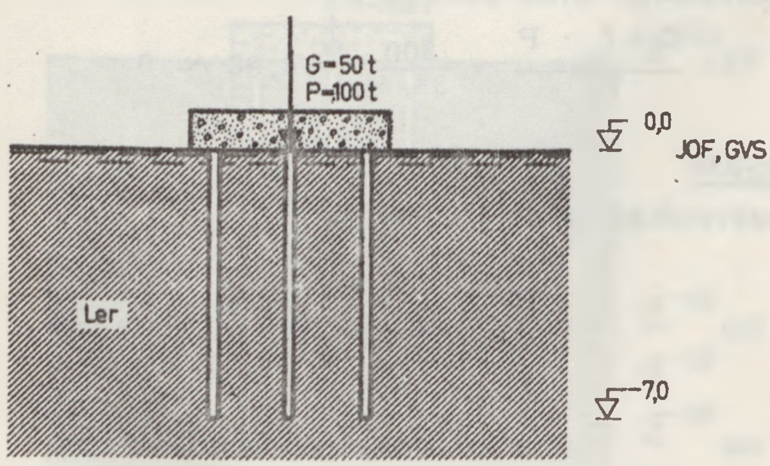
Bygværket skal funderes på lodrette jernbetonpæle med tværsnitsarealet: $A = 25 \cdot 25\ cm^2$; pælene rammes til kote $-7,0$.

Leret forudsættes fuld konsolideret og der regnes med regenerationsfaktoren $r = 0,8$.

ØNSKES

Find det nødvendige antal pæle.

LØSNING



Figur 11.2 A: Pæle i ler.

Forudsætninger

For en pæl i ler forudsættes bidragene til bæreevnen at kunne beregnes efter følgende formler:

Spidsmodstanden : $Q_p = 9\ c_u A_p$

Overflademodstanden: $Q_m = m\,s\,r\,c_u A_m$

Pælene forudsættes at virke som enkeltpæle.

Nominelle værdier

$$G + f_p \cdot P = 50 + 1,5 \cdot 100 = 200\ t$$

$$c_{un} = \frac{c_u}{f_c} = \frac{12,0}{2,0} = 6,0\ t/m^2$$

Da pælene er prismatiske jernbetonpæle sættes $s = m = 1,0.$

Dimensionering

Den nominelle spidsmodstand bliver:

$$Q_p = 9\, c_{un}\, A_p = 9 \cdot 6,0 \cdot 0,25^2 = 3,4\ t$$

Den nominelle overflademodstand bliver:

$$Q_m = m\, s\, r\, c_{un}\, A_m = 1,0 \cdot 1,0 \cdot 0,8 \cdot 6,0 \cdot 0,25 \cdot 4 \cdot 7,0 = 33,6\ t$$

Den samlede nominelle bæreevne pr. pæl bliver herefter:

$$Q = Q_p + Q_m = 3,4 + 33,6 = 37,0\ t$$

Det nødvendige antal pæle bliver:

$$N = \frac{G + f_p \cdot P}{Q} = \frac{200}{37} = 5,4 \sim 6$$

KONKLUSION

Det nødvendige antal pæle er 6.

EKSEMPEL 11.3: Pæle med negativ overflademodstand.

GIVET

Et bygværk skal funderes på en lokalitet med følgende bundforhold:

JOF er i kote + 6,0.

Fra kote + 6,0 til kote + 4,0: Sandfyld med $\varphi = 28^o$ ($c = 0$), $h_c = 0$ og $\gamma = 1,7\ t/m^3$

Fra kote + 4,0 til kote - 2,0: Ler med $c_u = 12\ t/m^2$ ($\varphi = 0$), $\gamma_m = 2,1\ t/m^3$, $h_c = 10$ m og $K = 1000\ t/m^2$

Under kote - 2,0 : Sand med $\varphi = 35^o$ ($c = 0$) og $\gamma_m = 2,0\ t/m^3$

GVS står i kote 0,0.

Bygværkets belastning, som virker lodret, er: $G = 100$ t og $P = 200$ t.

Bygværkets grundflade, som har dimensionerne $B \cdot L = 10 \cdot 10\ m^2$, er beliggende i kote + 6,0.

Bygværket skal funderes på lodrette jernbetonpæle med tværsnitsarealet $A = 25 \cdot 25\ cm^2$; pælene rammes til kote - 3,5.

Pælefunderingen forudsættes etableret samtidig med sandfyldens udlægning.

For leret regnes med regenerationsfaktoren $r = 0,8$.

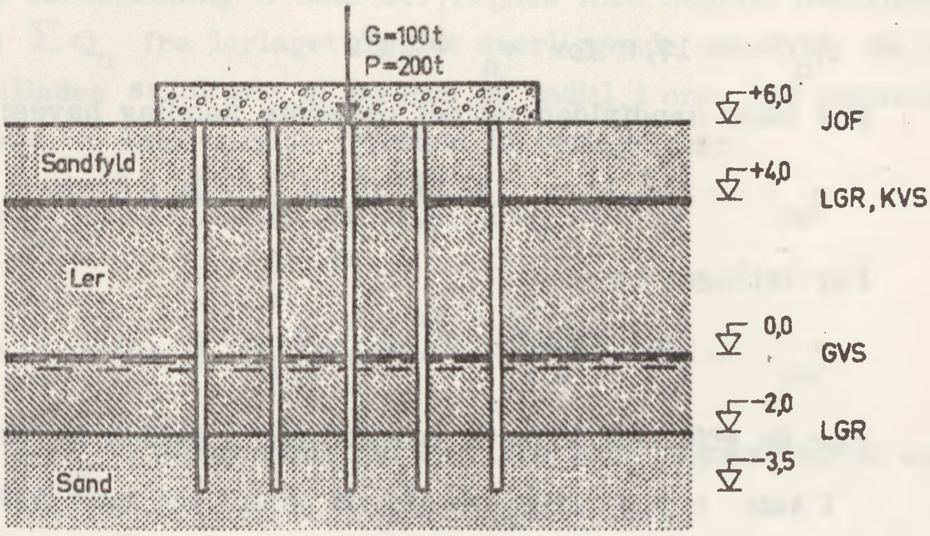
ØNSKES

Find det nødvendige antal pæle under forudsætning af:

A. At det pælefunderede bygværk tåler sætninger af indtil 5 cm's størrelse.

B. At det kun tåler sætninger af indtil 1 cm's størrelse.

LØSNING GENERELT



Figur 11.3 A: Pæle med negativ overflademodstand.

Forudsætninger

Bidragene til pælenes bæreevne forudsættes at kunne beregnes efter følgende formler:

Spidsmodstanden i sand : $Q_p = 2 N_q \bar{q}_p A_p$

Overflademodstanden i sand : $Q_m = 0,6 \bar{q}_m A_m$

Overflademodstanden i ler : $Q_m = m s r c_u A_m$

Pælene forudsættes at virke som enkeltpæle.

Lerlagets konsolidering

Ved sandfyldens udlægning forøges de effektive spændinger i lerlaget med:

$$\Delta\bar{\sigma} = \bar{\gamma} d = 1,7 \cdot 2,0 = 3,4 \text{ t/m}^2$$

Herved vil lerlaget opnå konsolideringssætningen:

$$\delta_c = \frac{\Delta\bar{\sigma}}{K} \cdot z = \frac{3,4}{1000} \cdot 6,0 = 0,02 \text{ m}$$

LØSNING A

Under forudsætning A kan alle lag regnes bærende, da der kan tillades sætninger af pælene på indtil 5 cm.

Nominelle værdier

$$G + f_p \cdot P = 100 + 1,5 \cdot 200 = 400 \text{ t}$$

For det nederste sandlag haves:

$$\varphi_n = \text{Arctan}\ \frac{\tan\varphi}{f_\varphi} = \text{Arctan}\ \frac{\tan 35^\circ}{1,25} = 29{,}^\circ 2$$

$$N_q = 17,0 \text{ for } \varphi_n = 29{,}^\circ 2$$

For både sandfylden og det nederste sandlag haves:

$$Q_m = \frac{0,6}{f_a}\bar{q}_m A_m = \frac{0,6}{2,0}\bar{q}_m A_m = 0,3\,\bar{q}_m A_m$$

For lerlaget haves:

$$c_{un} = \frac{c_u}{f_c} = \frac{12,0}{2,0} = 6,0\ t/m^2$$

For de effektive lodrette spændinger i jorden haves:

I kote + 5,0 : $\bar{q}_m = \sum\bar{\gamma}d = 1,7\cdot 1,0 = 1,7\ t/m^2$

I kote − 2,75 : $\bar{q}_m = \sum\bar{\gamma}d + h_c\gamma_w$

$$= (1,7\cdot 2,0 + 1,1\cdot 6,0 + 1,0\cdot 0,75) + 4,0\cdot 1,0 = 14,75\ t/m^2$$

I kote − 3,5 : $\bar{q}_p = \sum\bar{\gamma}d + h_c\gamma_w$

$$= (1,7\cdot 2,0 + 1,1\cdot 6,0 + 1,0\cdot 1,5) + 4,0\cdot 1,0 = 15,5\ t/m^2$$

Da pælene er prismatiske jernbetonpæle sættes $s = m = 1,0$.

Dimensionering

Den nominelle spidsmodstand i sandet bliver:

$$Q_p = 2N_q\bar{q}_p A_p = 2\cdot 17,0\cdot 15,5\cdot 0,25^2 = 32,9\ t$$

Den nominelle overflademodstand bliver:

I sandfylden : $Q_m = 0,3\bar{q}_m A_m = 0,3\cdot 1,7\cdot 0,25\cdot 4\cdot 2,0 = 1,0\ t$

I lerlaget : $Q_m = m\,s\,r\,c_{un} A_m = 1,0\cdot 1,0\cdot 0,8\cdot 6,0\cdot 0,25\cdot 4\cdot 6,0 = 28,8\ t$

I sandlaget : $Q_m = 0,3\bar{q}_m A_m = 0,3\cdot 14,75\cdot 0,25\cdot 4\cdot 1,5 = 6,7\ t$

Den samlede nominelle bæreevne pr. pæl bliver herefter:

$$Q = Q_p + \sum Q_m = 32,9 + (1,0 + 28,8 + 6,7) = 69,4\ t$$

Det nødvendige antal pæle bliver:

$$N = \frac{G + f_p\cdot P}{Q} = \frac{400}{69,4} = 5,8 \sim 6$$

KONKLUSION A

Det nødvendige antal pæle er 6.

LØSNING B

Under forudsætning B skal der regnes med negativ overflademodstand $\sum Q_n$ fra lerlaget og det overliggende sandfyld, da der kun kan tillades sætninger af pælene på indtil 1 cm. Det nødvendige antal pæle N skal opfylde følgende to betingelser:

$$G + f_p \cdot P \leqq \frac{Q_p + \sum Q_m + \sum Q_n}{f_a} N$$

$$G + f_p \cdot P + \sum Q_n \cdot N \leqq \frac{Q_p + \sum Q_m}{f_a} N,$$

hvor $\sum Q_n$ i sidstnævnte formel ikke skal regnes større end den effektive vægt (pr. pæl) af opfyldningen.

Q_p, Q_m og Q_n er i ovenstående formler aktuelle værdier.

Aktuelle værdier

For det nederste sandlag haves:

$\varphi = 35^o$ og svarende hertil $N_q = 33,5$.

For både sandfylden og det nederste sandlag haves:

$Q_n \ (= Q_m) = 0,6 \, \bar{q}_m A_m$

For lerlaget haves:

$c_u = 12,0 \ t/m^2$ samt $s = m = 1,0$

For de lodrette effektive spændinger i jorden haves samme værdier som under løsning A.

Partialkoefficienter

$f_a = 2,0$

$f_p = 1,5$

Aktuelle bæreevnebidrag

Den aktuelle spidsmodstand i sandet bliver:

$Q_p = 2 N_q \bar{q}_p A_p = 2 \cdot 33,5 \cdot 15,5 \cdot 0,25^2 = 64,9 \ t$

Den aktuelle overflademodstand bliver:

I sandfylden: $Q_n = 0,6 \bar{q}_m A_m = 0,6 \cdot 1,7 \cdot 0,25 \cdot 4 \cdot 2,0 = 2,0 \ t$

I lerlaget : $Q_n = m s r c_u A_m$

$= 1,0 \cdot 1,0 \cdot 0,8 \cdot 6,0 \cdot 0,25 \cdot 4 \cdot 6,0 = 57,6 \ t$

I sandlaget : $Q_m = 0,6 \bar{q}_m A_m = 0,6 \cdot 14,75 \cdot 0,25 \cdot 4 \cdot 1,5 = 13,4 \ t$

Dimensionering

1. betingelse giver:

$$N = \frac{G + f_p \cdot P}{Q_p + \sum Q_m + \sum Q_n} f_a = \frac{100 + 1,5 \cdot 200}{64,9 + 13,4 + (2,0 + 57,6)} 2,0$$

$$= 5,8 \sim 6$$

Den effektive vægt af opfyldningen indenfor bygværkets grundflade er er:

$$A \cdot \Delta \bar{\sigma} = 10 \cdot 10 \cdot 3,4 = 340,0 \text{ t}$$

Den negative overflademodstand pr. pæl er:

$$\sum Q_n = 2,0 + 57,6 = 59,6 \text{ t}$$

Da 1. betingelse har givet, at det nødvendige pæleantal er mindst 6, og da den negative overflademodstand på 6 pæle udgør $6 \cdot 59,6 = 357,6$ t, som er større end den effektive vægt af opfyldningen indenfor bygværkets grundflade, skal man for størrelsen $\sum Q_n N$ i 2. betingelse indsætte værdien 340,0 t svarende til den effektive vægt af opfyldningen indenfor bygværkets grundflade.

2. betingelse giver herefter:

$$N = \frac{G + f_p \cdot P + A \cdot \Delta \bar{\sigma}}{Q_p + \sum Q_m} f_a = \frac{100 + 1,5 \cdot 200 + 340}{64,9 + 13,4} 2,0$$

$$= 12,4 \sim 13$$

KONKLUSION B

Det nødvendige antal pæle er 13.

EKSEMPEL 12.1: Pæleværk med 3 pælerækker.

GIVET

På en lokalitet, hvor JOF er i kote + 2,0, skal opføres et pæleværk med følgende karakteristika:

Overbygningens bredde	:	4,5 m
Overbygningens længde	:	100 m
Underside af overbygning	:	kote 0,0

Pæleværket har tre pælerækker med numrene 1, 2 og 3 regnet fra venstre. Pælerækkernes hældninger og afstand l fra overbygningens venstre sidelinie er:

Pælerække 1:	hældning 3 : 1	$l_1 = 1,0$ m
Pælerække 2:	hældning 3 : 1	$l_2 = 2,0$ m
Pælerække 3:	lodret	$l_3 = 3,5$ m

Pælerække 1 og 2 skærer hinanden i et punkt beliggende over overbygningens underside.

De nominelle belastninger på overbygningen er: $V_n = 60,0$ t/m (incl. overbygningens egenvægt) og $H_n = 5,0$ t/m (mod højre). De angivne kræfter virker i midtpunktet af overbygningens underside.

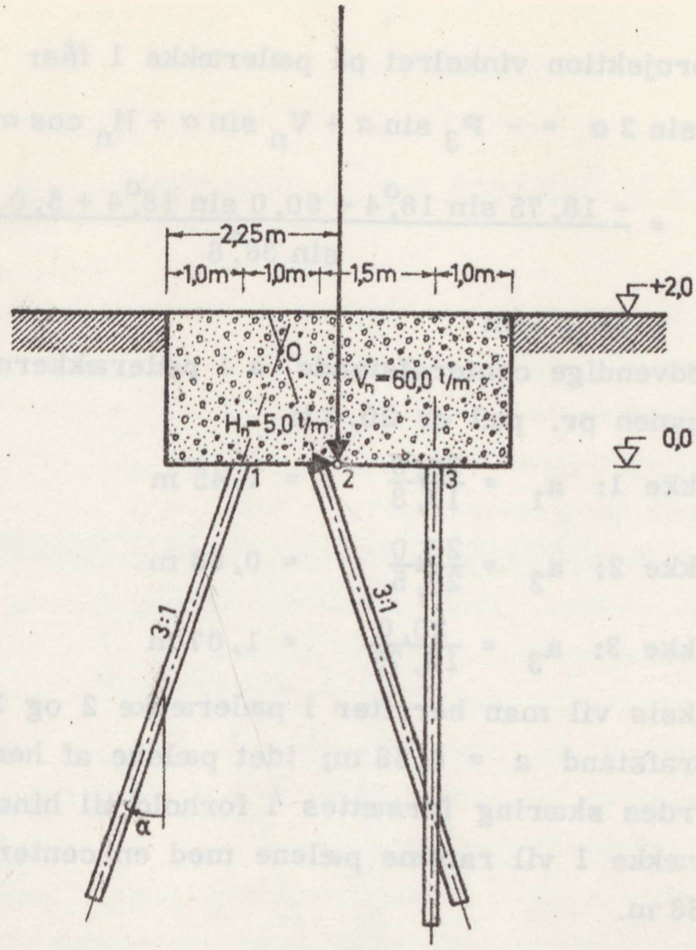
Pælene, som er af jernbeton, har tværsnitsarealet 20 x 20 cm^2 og længden 6 m. Ved prøvebelastning er pælenes nominelle bæreevne bestemt til 20,0 t for tryk og 5,0 t for træk.

Problemet kan betragtes som plant.

ØNSKES

Bestem de nødvendige centerafstande a mellem pælene i de tre pælerækker.

LØSNING



Figur 12.1 A: Pæleværk med 3 pælerækker.

Forudsætninger

Pælene forudsættes at virke som enkeltpæle.
Pælene forudsættes kun at kunne optage aksialkræfter.
Elastiske og plastiske bevægelser i og af overbygningen forudsættes ikke at medføre drejning af pæleretningerne.

Beregninger

Pæleværket er statisk bestemt, hvorfor pælekræfterne kan findes umiddelbart ved hjælp af de tre statiske ligevægtsligninger.
Ved moment om skæringspunktet O mellem pælerække 1 og 2 fås:

$$P_3 \cdot 2{,}0 = V_n \cdot 0{,}75 - H_n \cdot 1{,}5$$

$$P_3 = \frac{60 \cdot 0{,}75 - 5{,}0 \cdot 1{,}5}{2{,}0} = 18{,}75 \text{ t/m}$$

Ved projektion vinkelret på pælerække 2 fås:

$$P_1 \sin 2\alpha = - P_3 \sin\alpha + V_n \sin\alpha - H_n \cos\alpha$$

Idet $\operatorname{tg}\alpha = \frac{1}{3}$ og følgelig $\alpha = 18{,}^{\circ}4$ fås:

$$P_1 = \frac{-18{,}75 \sin 18{,}^{\circ}4 + 60{,}0 \sin 18{,}^{\circ}4 - 5{,}0 \cos 18{,}^{\circ}4}{\sin 36{,}^{\circ}8}$$

$$= 13{,}8 \text{ t/m}$$

Ved projektion vinkelret på pælerække 1 fås:

$$P_2 \sin 2\alpha = - P_3 \sin\alpha + V_n \sin\alpha + H_n \cos\alpha$$

$$P_2 = \frac{-18,75 \sin 18{,}^{\circ}4 + 60,0 \sin 18{,}^{\circ}4 + 5,0 \cos 18{,}^{\circ}4}{\sin 36{,}^{\circ}8}$$

$$= 29,5 \text{ t/m}$$

De nødvendige centerafstande a i pælerækkerne bliver, idet trykbæreevnen pr. pæl er 20,0 t:

Række 1: $a_1 = \frac{20,0}{13,8} = 1,45$ m

Række 2: $a_2 = \frac{20,0}{29,5} = 0,68$ m

Række 3: $a_3 = \frac{20,0}{18,75} = 1,07$ m

I praksis vil man herefter i pælerække 2 og 3 ramme pælene med centerafstand a = 0,68 m; idet pælene af hensyn til pæleaksernes indbyrdes skæring forsættes i forhold til hinanden, medens man i pælerække 1 vil ramme pælene med en centerafstand a = 2 · 0,68 = 1,36 m.

KONKLUSION

De nødvendige centerafstande mellem pælene for pælerække 1, 2 og 3 er henholdsvis $a_1 = 1,36$ m, $a_2 = 0,68$ m og $a_3 = 0,68$ m.

EKSEMPEL 12.2: Pæleværk med 4 pælerækker.

GIVET

På en lokalitet, hvor JOF er i kote + 2,0, skal opføres et pæleværk med følgende karakteristika:

Overbygningens bredde : 4,5 m
Overbygningens længde : 100 m
Underside af overbygning : kote 0,0

Pæleværket har fire pælerækker med numrene 1, 2, 3 og 4 regnet fra venstre. Pælerækkernes hældninger og afstand l fra overbygningens venstre sidelinie er:

Pælerække 1:	hældning 3 : 1	$l_1 = 1,0$ m
Pælerække 2:	hældning 3 : 1	$l_2 = 1,5$ m
Pælerække 3:	hældning 3 : 1	$l_3 = 2,5$ m
Pælerække 4:	lodret	$l_4 = 3,5$ m

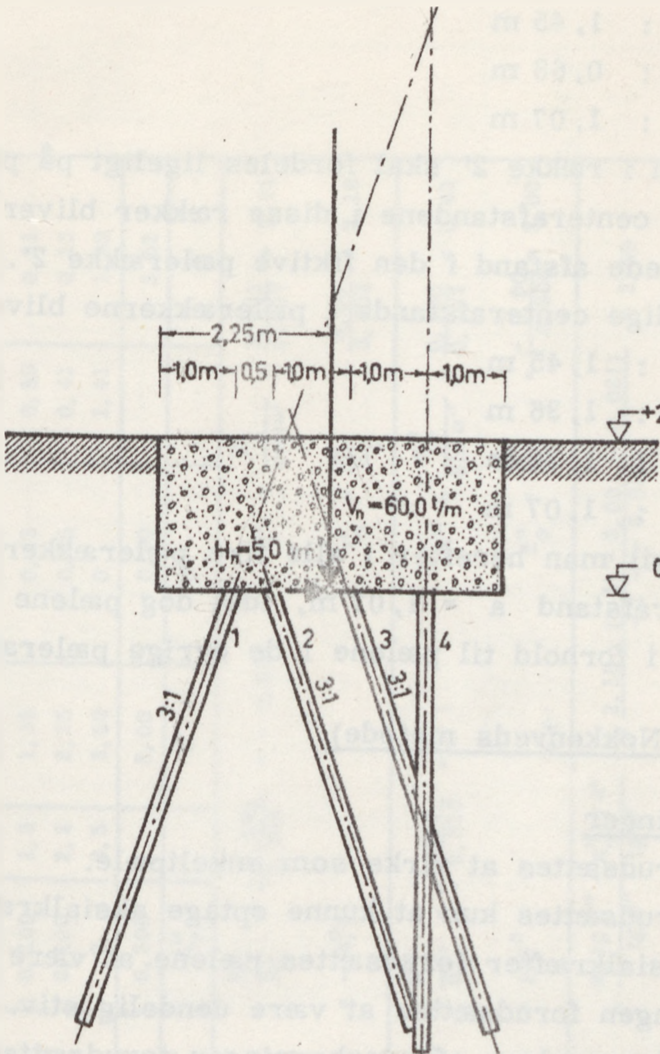
Pælerække 2 og 3 er parallelle og skærer begge pælerække 1 i punkter, som er beliggende over overbygningens underside.
De nominelle belastninger på overbygningen er $V_n = 60,0$ t/m (incl. overbygningens egenvægt) og $H_n = 5,0$ t/m (mod højre). De angivne kræfter virker i midtpunktet af overbygningens underside.
Pælene, som er af jernbeton, har tværsnitsarealet 20 x 20 cm^2 og længden 6 m. Ved prøvebelastning er pælenes nominelle bæreevne bestemt til 20,0 t for tryk og 5,0 t for træk.
Problemet kan betragtes som plant.

ØNSKES

Bestem de nødvendige centerafstande a mellem pælene i de fire pælerækker ved anvendelse af:

A. Culmans metode
B. Nøkkentveds metode
C. Vandepittes metode

TEGNING



Figur 12. 2 A: Pæleværk med 4 pælerækker.

LØSNING A (Culmans metode)

Forudsætninger

Pælene forudsættes at virke som enkeltpæle.
Pælene forudsættes kun at kunne optage aksialkræfter.
Pæle i samme retning forudsættes at bære samme kraft.
Elastiske og plastiske bevægelser i og af overbygningen forudsættes ikke at medføre drejning af pæleretningerne.

Beregninger

Pæleværket indeholder pæle med tre forskellige retninger. Det reduceres til et statisk bestemt pæleværk ved at erstatte pælerækkerne 2 og 3 med en pælerække 2' beliggende i tyngdepunktslinien for rækkerne 2 og 3.

Pæleværket er derefter identisk med det i eksempel 12. 1 beregnede statisk bestemte pæleværk. De nødvendige centerafstande i pælerækkerne blev i eksempel 12.1 fundet til:

Række 1 : 1,45 m
Række 2' : 0,68 m
Række 4 : 1,07 m

Pælekraften i række 2' skal fordeles ligeligt på pælerækkerne 2 og 3, hvorfor centerafstandene i disse rækker bliver den dobbelte af den beregnede afstand i den fiktive pælerække 2'.

De nødvendige centerafstande i pælerækkerne bliver således:

Række 1 : 1,45 m
Række 2 : 1,36 m
Række 3 : 1,36 m
Række 4 : 1,07 m

I praksis vil man herefter i alle fire pælerækker ramme pælene med centerafstand a = 1,07 m, idet dog pælene i pælerække 4 fortsættes i forhold til pælene i de øvrige pælerækker.

LØSNING B (Nøkkentveds metode)

Forudsætninger

Pælene forudsættes at virke som enkeltpæle.
Pælene forudsættes kun at kunne optage aksialkræfter.
M.h.t. aksialkræfter forudsættes pælene at være ideal-elastiske.
Overbygningen forudsættes at være uendelig stiv.
Elastiske bevægelser af overbygningen forudsættes ikke at medføre drejning af pæleretningerne.

Beregninger

Beregningerne vedrørende pæleværket er foretaget i nedenstående to skemaer:

I det første skema er pæleværkets karakteristiske kræfter beregnet, og i det sidste skema er selve pælekræfterne beregnet.

Den i beregningerne indgående konstant C, der er et mål for pælenes elastiske deformationer, sættes lig 1, da pælene er ens.

Den ydre påvirkning P er ved beregningerne i det sidste skema opløst i to komposanter R_1 og R_2 parallel med henholdsvis R' og R''. Idet P meget nær er parallel med R' findes:

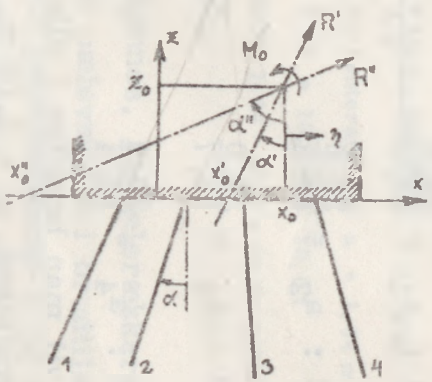
$$R_1 = 60,2 \text{ t/m} \quad \text{og} \quad R_2 = 0 \text{ t/m}$$

Endvidere er her den ydre påvirknings moment om drejningspunktet fundet på følgende måde:

Pæleværkets karakteristiske kræfter:

Pæl nr.	α^o	cos α	sin α	C	C $\cos^2\alpha$	C sin α cos α	C $\sin^2\alpha$	x	C x $\cos^2\alpha$	C x sin α cos α	$\eta = x - x_o$	C $\eta^2 \cos^2\alpha$
1	18,4	0,949	0,316	1	0,901	0,300	0,100	1,0	0,90	0,30	- 1,09	1,07
2	- 18,4	0,949	- 0,316	1	0,901	- 0,300	0,100	1,5	1,35	- 0,45	- 0,59	0,31
3	- 18,4	0,949	- 0,316	1	0,901	- 0,300	0,100	2,5	2,25	- 0,75	0,41	0,15
4	0	1	0	1	1	0	0	3,5	3,50	0	1,41	1,99
Sum					3,703	- 0,300	0,300		8,00	- 0,90		3,52
					R'_1	$R'_v = R''_1$	R''_v		S'	S''		Γ

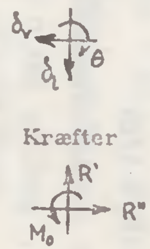
NOTATIONER



FORTEGN

Deformationer

Kræfter



$$\operatorname{tg}\alpha' = \frac{R'_v}{R'_1} = \frac{-0,300}{3,703} = -0,081 \qquad R' = \frac{R'_1}{\cos\alpha'} = \frac{3,703}{0,997} = 3,71$$

$$\alpha' = -4{,}6^\circ \qquad x'_o = \frac{S'}{R'_1} = \frac{8,00}{3,703} = 2,16$$

$$\operatorname{tg}\alpha'' = \frac{R''_v}{R''_1} = \frac{0,300}{-0,300} = -1 \qquad R'' = \frac{R''_v}{\sin\alpha''} = \frac{0,300}{0,707} = 0,43$$

$$\alpha'' = 135^\circ \qquad x''_o = \frac{S''}{R''_1} = \frac{-0,90}{-0,300} = 3,00$$

$$x_o = \frac{x'_o \operatorname{tg}\alpha'' - x''_o \operatorname{tg}\alpha'}{\operatorname{tg}\alpha'' - \operatorname{tg}\alpha'} = \frac{2,16 \cdot (-1) - 3,00 \cdot (-0,081)}{-1-(-0,081)} = 2,09$$

$$z_o = \frac{x'_o - x''_o}{\operatorname{tg}\alpha'' - \operatorname{tg}\alpha'} = \frac{2,16 - 3,00}{-1-(-0,081)} = 0,91$$

$$I = \Gamma - z_o^2 \cdot R''_v = 3,52 - 0,91^2 \cdot 0,300 = 3,28$$

Bestemmelse af pælekræfter:

$\delta_1 = -\frac{R_1}{R'}$	$R_1 = -60{,}2$		$\delta_1 = 16{,}3$	
$\delta_v = -\frac{R_2}{R''}$	$R_2 \sim 0$		$\delta_v = 0$	
$\theta = -\frac{M}{I}$	$M = -5{,}0$		$\theta = 1{,}5$	
Pæl nr.:	1	2	3	4
$P' = \delta_1 C \cos\alpha$	15,5	15,5	15,5	16,3
$P'' = \delta_v C \sin\alpha$	0	0	0	0
$P_1 = \theta C \eta \cos\alpha$	- 1,6	- 0,8	0,6	2,1
$P_2 = \theta C z_o \sin\alpha$	0,4	- 0,4	- 0,4	0
P t/m	14,3	14,3	15,7	18,4

Påvirkning: $V_n = 60{,}0$ t/m, arm: $2{,}25 - x_o = 2{,}25 - 2{,}09 = 0{,}16$ m

Påvirkning: $H_n = 5{,}0$ t/m, arm: $z_o = 0{,}91$ m

Moment : $- V_n \cdot 0{,}16 + H_n \cdot 0{,}91$

$= -60{,}0 \cdot 0{,}16 + 5{,}0 \cdot 0{,}91 = -5{,}0$ tm/m

Beregningerne har givet følgende pælekræfter:

Række 1 : 14,3 t/m

Række 2 : 14,3 t/m

Række 3 : 15,7 t/m

Række 4 : 18,4 t/m

De nødvendige centerafstande i pælerækkerne bliver herefter, idet bæreevnen pr. pæl er 20,0 t:

Række 1 : $a_1 = \frac{20{,}0}{14{,}3} = 1{,}38$ m

Række 2 : $a_2 = \frac{20{,}0}{14{,}3} = 1{,}38$ m

Række 3 : $a_3 = \frac{20{,}0}{15{,}7} = 1{,}27$ m

Række 4 : $a_4 = \frac{20{,}0}{18{,}4} = 1{,}09$ m

I praksis vil man herefter i alle fire pælerækker ramme pælene med centerafstand $a = 1{,}09$ m, idet dog pælene i pælerække 4 forsættes i forhold til pælene i de øvrige pælerækker.

LØSNING C (Vanderpittes metode)

Forudsætninger

Pælene forudsættes at virke som enkeltpæle.
Pælene forudsættes kun at kunne optage aksialkræfter.
M.h.t. aksialkræfter forudsættes pælene at være ideal-plastiske.
Overbygningen forudsættes at være uendelig stiv.
Plastiske bevægelser af overbygningen forudsættes ikke at medføre drejning af pæleretningerne.

Beregninger

Da pæleværket indeholder $n = 4$ pælerækker er der $1 + 2 + \ldots + (n - 1) = 1 + 2 + 3 = 6$ kinematisk mulige brudmåder svarende til 6 mulige omdrejningspunkter i den nominelle brudtilstand.
Blandt de 6 kinematisk mulige brudmåder skal man ved forsøg finde den brudmåde, der tillige er statisk mulig.

Indledningsvis skønnes, at pælerækkerne 2 og 3 er i brud, d.v.s. man skønner, at pæleværket i brudtilstanden drejer sig om skæringspunktet mellem pælerækkerne 1 og 4.
Idet a betegner centerafstanden mellem pælene i rækkerne 2 og 3, giver ligevægtsligningerne:

Projektion på vandret:

$$P_1 \sin\alpha = (P_2 + P_3) \sin\alpha - H_n \cdot a$$

$$P_1 = \frac{2 \cdot 20,0 \cdot 0,316 - 5,0\,a}{0,316} = 40,0 - 15,8\,a$$

Projektion på lodret:

$$P_1 \cos\alpha + P_4 = V_n\, a - (P_2 + P_3) \cos\alpha$$

$$P_1 \cdot 0,949 + P_4 = 60,0\,a - 2 \cdot 20,0 \cdot 0,949 = 60,0\,a - 40,0$$

Moment om skæringspunktet mellem pælerække 1 og 4:

$$P_2 z_2 + P_3 z_3 = a\,(V_n z_V + H_n z_H)$$

Idet skråpælenes vinkel med lodret er $\alpha = 18{,}^{\circ}4$ fås heraf:

$$a = \frac{20,0 \cdot 13,5 \cdot \sin 18{,}^{\circ}4 + 20,0 \cdot 10,5 \cdot \sin 18{,}^{\circ}4}{60,0 \cdot 1,25 + 5,0 \cdot 7,5} = 1,34\ \text{m}$$

Pælekræfterne P_1 og P_4 svarende til en centerafstand $a = 1,34$ m findes:

$$P_1 = 40,0 - 15,8a = 40,0 - 15,8 \cdot 1,34 = 18,8\ \text{t} < 20,0\ \text{t}$$

$$P_4 = 60,0a - 40,0 - P_1 \cdot 0,949 = 60,0 \cdot 1,34 - 40,0 - 18,8 \cdot 0,949 = 22,7\ \text{t} > 20,0\ \text{t}$$

Brudmåden er således ikke statisk mulig.

På grundlag af ovenstående skønnes, at pælerækkerne 3 og 4 er i brud, d.v.s. man skønner, at pæleværket i brudtilstanden drejer sig om skæringspunktet mellem pælerækkerne 1 og 2.
Idet a betegner centerafstanden mellem pælene i rækkerne 3 og 4, giver ligevægtsligningerne:

Projektion vinkelret på pælerække 2's retning:

$$P_1 \sin 2\alpha = a V_n \sin\alpha - a H_n \cos\alpha - P_4 \sin\alpha$$

$$P_1 = \frac{a \cdot 60,0 \cdot 0,316 - a \cdot 5,0 \cdot 0,949 - 20,0 \cdot 0,316}{0,599}$$

$$= 23,7\,a - 10,5$$

Projektion vinkelret på pælerække 1's retning:

$$P_2 \sin 2\alpha = a V_n \sin\alpha + a H_n \cos\alpha - P_3 \sin 2\alpha - P_4 \sin\alpha$$

$$P_2 = \frac{a \cdot 60,0 \cdot 0,316 + a \cdot 5,0 \cdot 0,949 - 20,0 \cdot 0,599 - 20,0 \cdot 0,316}{0,599}$$

$$= 39,5\,a - 30,6$$

Moment om skæringspunkt mellem pælerække 1 og 2:

$$P_3 z_3 + P_4 z_4 = a\,(V_n z_V + H_n z_H)$$

Idet skråpælenes vinkel med lodret er $\alpha = 18{,}^{\circ}4$ fås heraf:

$$a = \frac{20,0 \cdot 1,0 \cos 18{,}^{\circ}4 + 20,0 \cdot 2,25}{60,0 \cdot 1,0 - 5,0 \cdot 0,75} = 1,14 \text{ m}$$

Pælekræfterne P_1 og P_2 svarende til en centerafstand $a = 1,14$ m findes:

$$P_1 = 23,7\,a - 10,5 = 23,7 \cdot 1,14 - 10,5 = 16,5 \text{ t} < 20,0 \text{ t}$$

$$P_2 = 39,5\,a - 30,6 = 39,5 \cdot 1,14 - 30,6 = 14,4 \text{ t} < 20,0 \text{ t}$$

Den skønnede brudmåde er således både kinetisk og statisk mulig.
De nødvendige centerafstande i pælerækkerne bliver:

Række 1 : $\frac{20,0}{6,5} \cdot 1,14 = 1,38$ m

Række 2 : $\frac{20,0}{4,4} \cdot 1,14 = 1,58$ m

Række 3 : $= 1,14$ m

Række 4 : $= 1,14$ m

I praksis vil man herefter i alle fire pælerækker ramme pælene med centerafstand $a = 1,14$ m, idet dog pælene i pælerække 4 forsættes i forhold til pælene i de øvrige pælerækker.

KONKLUSION

De nødvendige centerafstande i pælerækkerne er for de tre gennemregnede beregningsmetoder angivet i nedenstående tabel:

A. Culmans metode : $a = 1,07$ m

B. Nøkkenveds metode : $a = 1,09$ m

C. Vandepittes metode : $a = 1,14$ m

EKSEMPEL 12. 3: Pæleværk med 8 pælerækker.

GIVET

På en lokalitet, hvor JOF er i kote + 2,0, skal opføres et pæleværk med følgende karakteristika:

Overbygningens bredde	: 6,0 m
Overbygningens længde	: 100 m
Underside af overbygningen	: kote 0,0.

Pæleværket har otte pælerækker med numrene 1 til 8 regnet fra venstre. Pælerækkernes hældninger og afstand a fra overbygningens venstre sidelinie er:

Pælerække 1	: hældning 3 : 1	a = 1,0 m
Pælerække 2	: hældning 3 : 1	a = 2,0 m
Pælerække 3	: lodret	a = 2,0 m
Pælerække 4	: lodret	a = 3,0 m
Pælerække 5	: lodret	a = 4,0 m
Pælerække 6	: hældning 3 : 1	a = 3,0 m
Pælerække 7	: hældning 3 : 1	a = 4,0 m
Pælerække 8	: hældning 3 : 1	a = 5,0 m

Både pælerække 1, 2, 6, 7 og 8 skærer pælerække 3 i punkter beliggende over overbygningens underside.

De nominelle belastninger på overbygningen er: V_n = 125,0 t/m (incl. overbygningens egenvægt) og H_n = 15 t/m (virkende mod højre). De angivne belastninger virker i et punkt beliggende 3,25 m fra overbygningens venstre sidelinie i kote 0,0.

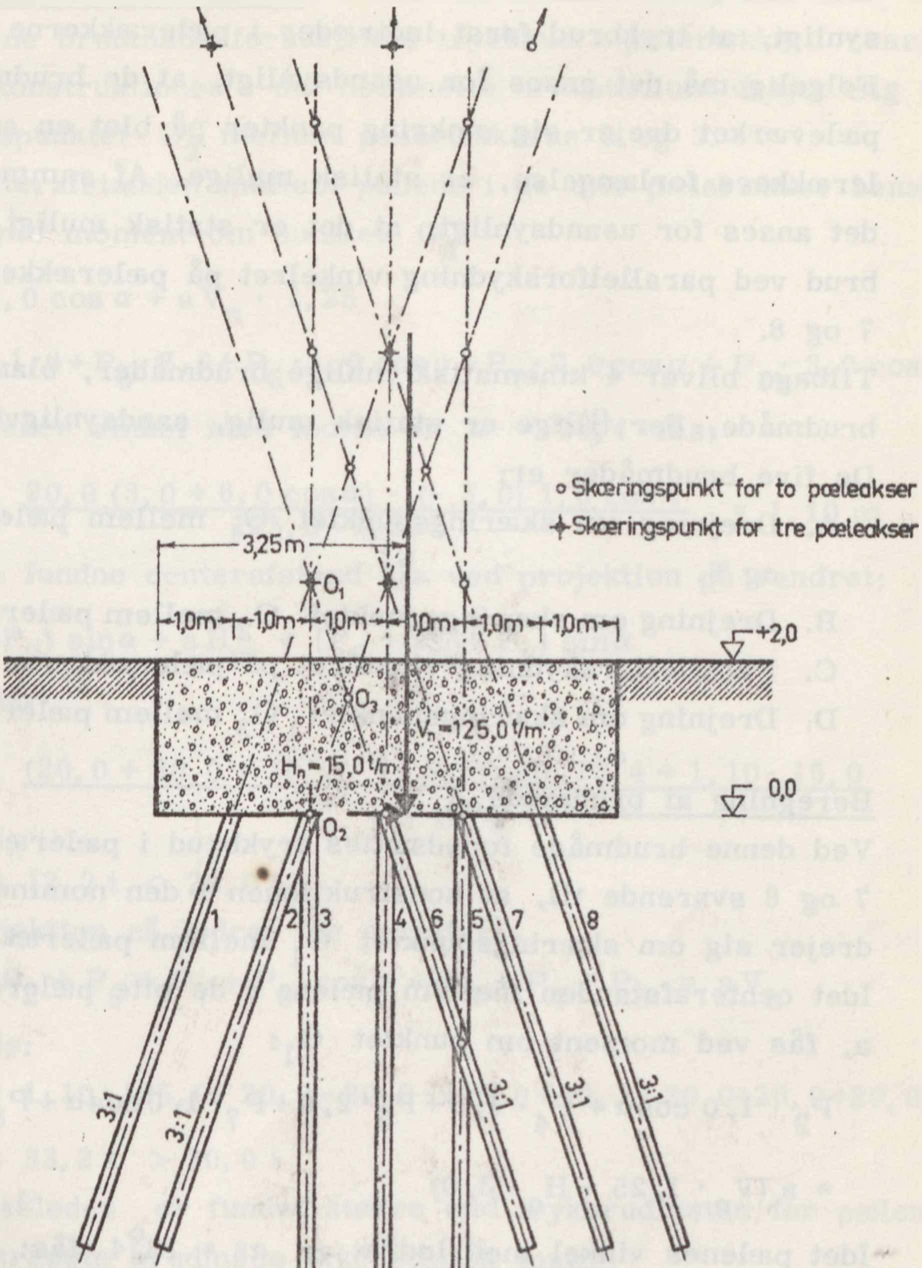
Pælene, som er af jernbeton, har tværsnitsarealet $20 \cdot 20$ cm^2 og længden 6 m. Ved prøvebelastning er pælenes nominelle bæreevne bestemt til 20,0 t for tryk og 5,0 for træk.

ØNSKES

Bestem de nødvendige centerafstande mellem pælene i de otte pælerækker.

LØSNING

Et pæleværk med n = 8 pælerækker har generelt 1 + 2 + 3 +.... + (n - 1) = 28 kinematisk mulige brudmåder svarende til 28 mulige omdrejningspunkter i den nominelle brudtilstand.



Figur 12. 3 A: Pæleværk med 8 pælerækker.

Af ovenstående figur fremgår det, at der for det foreliggende pæleværk i 5 tilfælde er tre pælerækker, der skærer hinanden i samme punkt. Antallet af mulige omdrejningspunkter vil følgelig reduceres med 5 · 2 = 10, således at der for det foreliggende pæleværk er ialt 28 - 10 = 18 kinematisk mulige brudmåder. Af disse 18 kinematisk mulige brudmåder svarer de 15 til drejning omkring et punkt, medens de 3 svarer til parallelforskydning vinkelret på en pæleretning.

Blandt de 18 kinematisk mulige brudmåder skal man ved forsøg finde den brudmåde, der tillige er statisk mulig.

Med den givne belastnings placering og retning synes det sandsynligt, at trykbrud først indtræder i pælerækkerne 4, 5, 7 og 8. Følgelig må det anses for usandsynligt, at de brudmåder, hvor pæleværket drejer sig omkring punkter på blot en af disse 4 pælerækkers forlængelse, er statisk mulige. Af samme årsag må det anses for usandsynligt, at det er statisk muligt, at der sker brud ved parallelforskydning vinkelret på pælerække 4 og 5 samt 7 og 8.

Tilbage bliver 4 kinematisk mulige brudmåder, blandt hvilke den brudmåde, der tillige er statisk mulig, sandsynligvis skal findes. De fire brudmåder er:

A. Drejning om skæringspunktet O_1 mellem pælerækkerne 1, 3 og 6.

B. Drejning om skæringspunktet O_2 mellem pælerækkerne 2 og 3.

C. Parallelforskydning vinkelret på pælerækkerne 1 og 2.

D. Drejning om skæringspunktet O_3 mellem pælerækkerne 2 og 6.

Beregning af brudmåde A

Ved denne brudmåde forudsættes trykbrud i pælerækkerne 2, 4, 5, 7 og 8 svarende til, at konstruktionen i den nominelle brudtilstand drejer sig om skæringspunktet O_1 mellem pælerækkerne 1, 3 og 6. Idet centerafstanden mellem pælene i de otte pælerækker benævnes a, fås ved moment om punktet O_1:

$$P_2 \cdot 1,0 \cos\alpha + P_4 \cdot 1,0 + P_5 \cdot 2,0 + P_7 \cdot 1,0 \cos\alpha + P_8 \cdot 2,0 \cos\alpha$$

$$= a\,(V_n \cdot 1,25 - H_n \cdot 3,0)$$

Idet pælenes vinkel med lodret er $\alpha = 18{,}^{\circ}4$ fås:

$$a = \frac{20,0\,(3,0 + 4,0 \cos\alpha)}{1,25 \cdot 1,25 - 15,0 \cdot 3,0} = 1,23 \text{ m}$$

Med den fundne centerafstand fås ved projektion på vandret:

$$(P_1 + P_2)\sin\alpha + a H_n = (P_6 + P_7 + P_8)\sin\alpha$$

Heraf fås:

$$(P_1 + 20,0)\sin 18{,}^{\circ}4 + 1,23 \cdot 15,0 = (P_6 + 20,0 + 20,0)\sin 18{,}^{\circ}4$$

eller:

$$P_1 + 38,2 = P_6$$

Da både P_1 og P_6 skal antage værdier i intervallet mellem - 5 t og + 20,0 t, kan denne ligning ikke opfyldes og den undersøgte brudmåde er følgelig ikke statisk mulig.

Beregning af brudmåde B

Ved denne brudmåde forudsættes trykbrud i pælerække 1 svarende til, at konstruktionen i det nominelle brudstadium drejer sig om skæringspunktet O_2 mellem pælerækkerne 2 og 3.

Idet centerafstanden mellem pælene i de otte pælerækker benævnes a, fås ved moment om punktet O_2:

$$P_1 \cdot 1,0 \cos\alpha + a V_n \cdot 1,25$$

$$= P_4 \cdot 1,0 + P_5 \cdot 2,0 + P_6 \cdot 1,0 \cos\alpha + P_7 \cdot 2,0 \cos\alpha + P_8 \cdot 3,0 \cos\alpha$$

Idet pælenes vinkel med lodret er $\alpha = 18{,}^{\circ}4$ fås:

$$a = \frac{20,0\,(3,0 + 6,0 \cos\alpha) - (-5,0)\,1,0 \cos\alpha}{125,0 \cdot 1,25} = 1,10 \text{ m}$$

Med den fundne centerafstand fås ved projektion på vandret:

$$(P_1 + P_2) \sin\alpha + a H_n = (P_6 + P_7 + P_8) \sin\alpha$$

Heraf fås:

$$P_2 = \frac{(20,0 + 20,0 + 20,0 - (-5,0)) \sin 18{,}^{\circ}4 + 1,10 \cdot 15,0}{\sin 18{,}^{\circ}4}$$

$$= 12,7 \text{ t} < 20,0 \text{ t}$$

Ved projektion på lodret fås derefter:

$$(P_1 + P_2 + P_6 + P_7 + P_8) \cos\alpha + P_3 + P_4 + P_5 = a V_n$$

Heraf fås:

$$P_3 = 1,10 \cdot 125,0 - 20,0 - 20,0 - (-5,0 + 12,7 + 20,0 + 20,0 + 20,0) \cos 18{,}^{\circ}4$$

$$= 33,2 \text{ t} > 20,0 \text{ t}$$

Da P_3 således er fundet større end trykbrudlasten for pælene, er den undersøgte brudmåde ikke statisk mulig.

Beregning af brudmåde C

Ved denne brudmåde forudsættes trykbrud i pælerækkerne 3, 4, 5, 6, 7 og 8 svarende til, at konstruktionen i det nominelle brudstadium parallelforskyder sig vinkelret på pælerækkerne 1 og 2.

Idet centerafstanden mellem pælene i de 8 pælerækker benævnes a, fås ved projektion vinkelret på pælerækkerne 1 og 2:

$$a\,(H_n \cos\alpha + V_n \sin\alpha) = (P_3 + P_4 + P_5) \sin\alpha + (P_6 + P_7 + P_8) \sin 2\alpha$$

Heraf fås:

$$a = \frac{(20,0 + 20,0 + 20,0) \sin 18{,}^{\circ}4 + (20,0 + 20,0 + 20,0) \sin 36{,}^{\circ}8}{15,0 \cos 18{,}^{\circ}4 + 125,0 \sin 18{,}^{\circ}4}$$

$$= 1,02 \text{ m}$$

Med den fundne centerafstand fås ved moment om punktet O_1:

$$P_1 \cdot 1{,}0 \cos\alpha + aV_n \cdot 1{,}25$$

$$= P_4 \cdot 1{,}0 + P_5 \cdot 2{,}0 + P_6 \cdot 1{,}0 \cos\alpha + P_7 \cdot 2{,}0 \cos\alpha + P_8 \cdot 3{,}0 \cos\alpha$$

Heraf fås:

$$P_1 = \frac{20{,}0\,(3{,}0 + 6{,}0 \cos 18{,}^{\circ}4) - 1{,}02 \cdot 125{,}0 \cdot 1{,}25}{1{,}0 \cos 18{,}^{\circ}4}$$

$$= 14{,}8\text{ t} < 20{,}0\text{ t}$$

Ved projektion på lodret fås derefter:

$$(P_1 + P_2 + P_6 + P_7 + P_8) \cos\alpha + P_3 + P_4 + P_5 = aV_n$$

Heraf fås:

$$P_2 = \frac{1{,}02 \cdot 125{,}0 - 20{,}0 - 20{,}0 - 20{,}0 - (14{,}8 + 20{,}0 + 20{,}0 + 20{,}0) \cos 18{,}^{0}4}{\cos 18{,}^{\circ}4}$$

$$= -3{,}5\text{ t} > -5{,}0\text{ t}$$

Da både pælekraften P_1 og pælekraften P_2 således antager værdier mellem trykbrudlasten og trækbrudlasten, er den undersøgte brudmåde både kinematisk og statisk mulig.

En undersøgelse af brudmåde D er følgelig overflødig.

KONKLUSION

Den nødvendige centerafstand mellem pælene i de 8 pælerækker er $a = 1{,}02$ m.