

POLITECHNIKA OPOLSKA
WYDZIAŁ BUDOWNICTWA
Katedra Konstrukcji Budowlanych i Inżynierskich

Student.....!
Rok studiów ..1!, semestr ...2.....

Opole, dnia 10.8.13.....

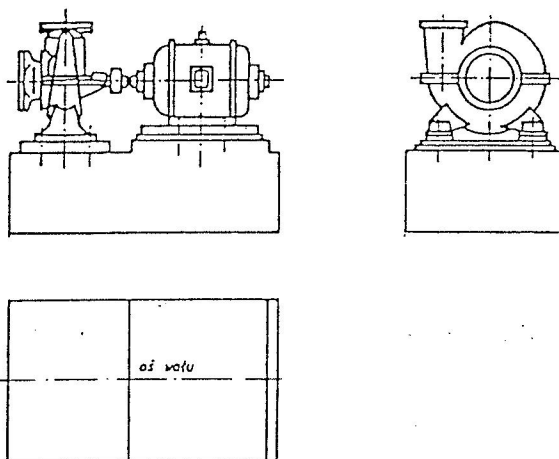
ĆWICZENIE PROJEKTOWE
Z BUDOWLI PRZEMYSŁOWYCH

Temat: Zaprojektować fundament blokowy pod pompę wirową odśrodkową, jednostopniową o układzie poziomym oraz silnik elektryczny sprzęgnięty z wałem pompy.

Dane charakterystyczne maszyn:

- a) pompa wirowa
ciężar pompy $G_p = \dots 27,8 \dots$ kN,
ciężar wirnika wraz z wałem $W_p = \dots 6,8 \dots$ kN,
liczba obrotów $n_m = \dots 950 \dots$ /min;
- b) silnik elektryczny
ciężar silnika $G_s = \dots 15,0 \dots$ kN,
ciężar wirnika $W_s = \dots 11,3 \dots$ kN,
moc silnika $W = \dots 4,30 \dots$ kW,
nominalna prędkość obrotowa $n_m = \dots 950 \dots$ obr/min.

Szkic fundamentu:



Termin oddania pracy:

Prowadzący:

Zakres obliczeń:

1. Opis techniczny
 - 1.1. Założenia do projektu
 - 1.2. Charakterystyka maszyn
2. Geometria fundamentu
 - 2.1. Przyjęcie kształtu i wymiarów fundamentu
 - 2.2. Obliczenie sił dynamicznych
 - 2.3. Określenie położenia środka ciężkości układu
 - 2.4. Obliczenie momentów bezwładności
3. Siły i momenty dynamiczne wywołane pracą maszyn
 - 3.1. Schematy działania sił wzbudzających
 - 3.2. Obliczenie wypadkowych sił i momentów dynamicznych
4. Posadowienie fundamentu
 - 4.1. Stan graniczny nośności podłoża gruntowego
 - 4.2. Cechy sprężyste podłoża gruntowego
5. Częstotliwość drgań własnych fundamentu
 - 5.1. Częstotliwość kątowna drgań
 - 5.2. Sprawdzenie strefy rezonansowej fundamentu
6. Amplitudy drgań wymuszonych fundamentu
 - 6.1. Amplituda drgań wahadłowych – schemat I
 - 6.2. Amplituda drgań wahadłowych – schemat II
 - 6.3. Amplituda drgań wahadłowych – schemat III
 - 6.4. Amplituda drgań wahadłowych – schemat IV
 - 6.5. Amplitudy dopuszczalne drgań wymuszonych
7. Obliczenia zakotwienia w fundamencie
 - 7.1. Przyjęcie rodzaju kotwi i zakotwienia
 - 7.2. Obliczenie zakotwienia
 - 7.3. Sprawdzenie na docisk
8. Konstrukcja fundamentu blokowego
 - 8.1. Zbrojenie fundamentu
 - 8.2. Rysunek konstrukcyjny fundamentu

1. Opis techniczny

1.1 Założenia do projektu

Na fundamencie blokowym, posadowionym bezpośrednio na gruncie ustawiono zespół pompowy. Zespół ten składa się z pompy wirowej odśrodkowej, jednostopniowej o układzie poziomym oraz silnika elektrycznego bezpośrednio sprzęgniętego z wałem pompy.

Do wykonania fundamentu zastosowano beton C25/30 i stal zbrojeniową A-I. Na podstawie badań geotechnicznych stwierdzono, że grunt pod fundamentem stanowią gliny w stanie półzwałym, zaś woda gruntowa znajduje się na poziomie 3,0 m poniżej terenu.

Głębokość przemarzania gruntów wynosi 1,2 m.

1.2 Charakterystyka maszyn ustawionych na fundamencie

Dane charakterystyczne maszyn:

a). Pompa wirowa:

- ciężar pompy $G_p = 27,8 \text{ kN}$,
- ciężar wirnika wraz z wałem $W_p = 6,8 \text{ kN}$,
- liczba obrotów $n_m = 950 \text{ obr/min}$,

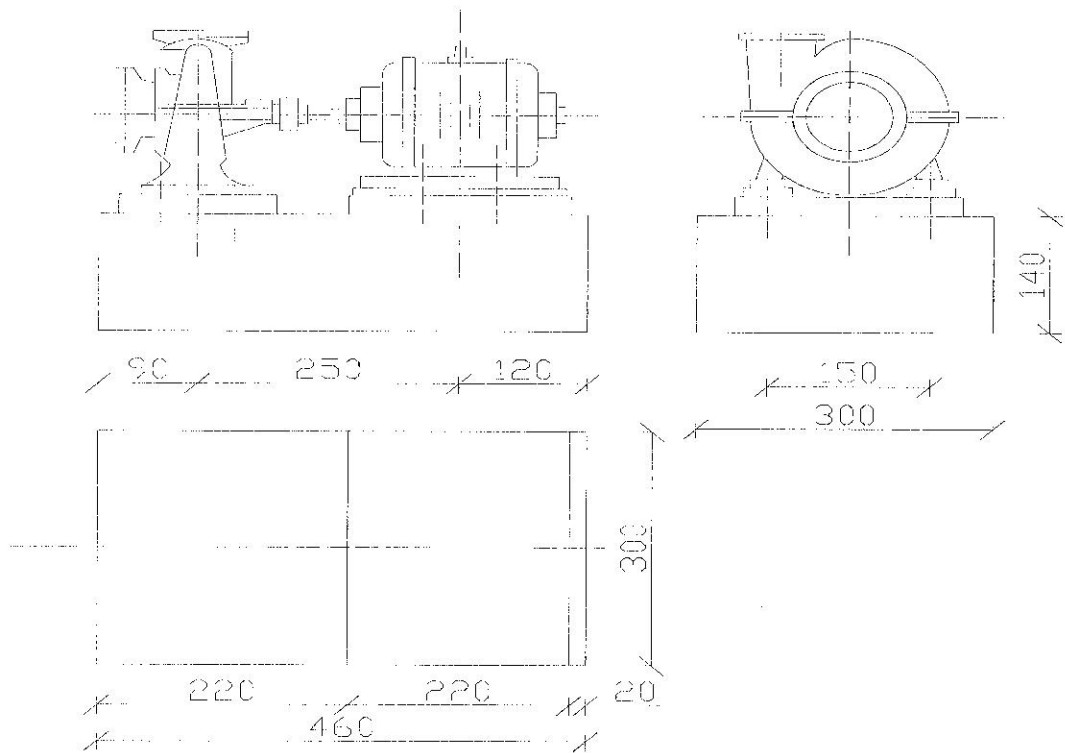
b). Silnik elektryczny:

- ciężar silnika $G_s = 25,0 \text{ kN}$,
- ciężar wirnika $W_s = 11,3 \text{ kN}$,
- moc silnika $W = 430 \text{ kW}$,
- nominalna prędkość obrotowa $n_m = 950 \text{ obr/min}$.

2. Geometria fundamentu

2.1 Przyjęcie kształtu i wymiarów fundamentu

Przyjęto blok fundamentowy o wymiarach w planie 4,6x3,0 [m] i wysokości 1,4 [m], zwiększonej o 25 [cm] w miejscu ustawienia silnika.



Rys.1 Fundament blokowy pod pompą wirową

- Ciężar części fundamentu pod posadzką:

$$G_1 = 2,2 \cdot 3,00 \cdot 0,25 \cdot 25 = 41,25 \text{ kN}$$

- Ciężar bloku fundamentowego poniżej posadzki:

$$G_2 = 3,00 \cdot 4,6 \cdot 1,40 \cdot 25 = 483 \text{ kN}$$

- Ciężar całego fundamentu wynosi:

$$G_f = 41,25 + 483 = 524,25 \text{ kN}$$

2.2 Określenie sił dynamicznych

Dla maszyn obrotowych o $n_m = 950 \text{ obr/min}$ siły dynamiczne oblicza się ze wzoru:

$$P_d = 0,2W_s \text{ [kN]}$$

Charakterystyczne obciążenie dynamiczne

- dla silnika: $P_{ds} = 0,2 \cdot 11,3 = 2,26 \text{ kN}$,

- dla pompy: $P_{dp} = 0,2 \cdot 6,8 = 1,36 \text{ kN}$.

Obciążenie od momentu zwarcia silnika oblicza się ze wzoru:

$$M_z = 9,55 \frac{W}{n_m} \chi \text{ [kN} \cdot \text{m]},$$

Gdzie:

W – moc silnika [kW],

n_m - prędkość obrotowa silnika [obr/min],

χ - współczynnik zależny od rodzaju maszyny; dla maszyn synchronicznych

$$\chi = 8$$

Charakterystyczny moment zwarcia silnika

$$M_z = 9,55 \frac{430}{950} 8 = 34,58 \text{ [kN} \cdot \text{m]}$$

Sprawdzenie stanu granicznego nośności wykonuje się przyjmując obliczeniowe obciążenie dynamiczne obliczane ze wzoru:

$$P_d^{max} = P_d \gamma_f \alpha_z \gamma_n,$$

Gdzie:

α_z - współczynnik zmęzeniowy dla maszyn obrotowych ($\alpha_z = 2$),

γ_f - współczynnik obciążenia wynoszący:

$\gamma_f = 5$ - dla sił wzbudzających,

$\gamma_f = 1,2$ - dla momentu zwarcia,

γ_n - współczynnik konsekwencji zniszczenia dla maszyn IV klasy ($\gamma_n = 1$),

Obliczeniowe obciążenia dynamiczne

- dla silnika:

$$P_{ds}^{max} = 2,26 \cdot 2 \cdot 5 \cdot 1 = 22,6 \text{ kN},$$

$$M_z^{max} = 34,58 \cdot 2 \cdot 1,2 \cdot 1 = 82,99 \text{ kN} \cdot \text{m},$$

- dla pompy:

$$P_{dp}^{max} = 1,36 \cdot 2 \cdot 5 \cdot 1 = 13,6 \text{ kN}$$

2.3 Określenie położenia środka ciężkości układu

Zgodnie z normą, środek ciężkości układu składającego się z fundamentu i maszyny powinien pokrywać się w pionie ze środkiem ciężkości podszwy fundamentu.

Tabela 1 Zestawienie środków ciężkości i momentów statycznych części układu.

Lp.	Element układu	Ciężar elementu G [kN]	Współrzędne środka ciężkości i momenty statyczne mas					
			x [m]	Gx [kNm]	y [m]	Gy [kNm]	z [m]	Gz [kNm]
Maszyna								
1	Pompa	27,8	0,9	25,02	1,5	41,7	2,6	72,28
2	Silnik	25,0	3,4	85,00	1,5	37,5	2,6	65,00
Fundament								
3	Występ pod silnikiem	41,25	3,4	140,25	1,5	61,875	1,525	62,90625
4	Blok fundamentowy	483	2,3	1110,9	1,5	724,5	0,7	338,1
RAZEM		577,05	----	1361,17	----	865,575	----	538,2863

Współrzędne położenia środka ciężkości:

$$x_0 = \frac{1361,17}{577,05} = 2,30 \text{ m}$$

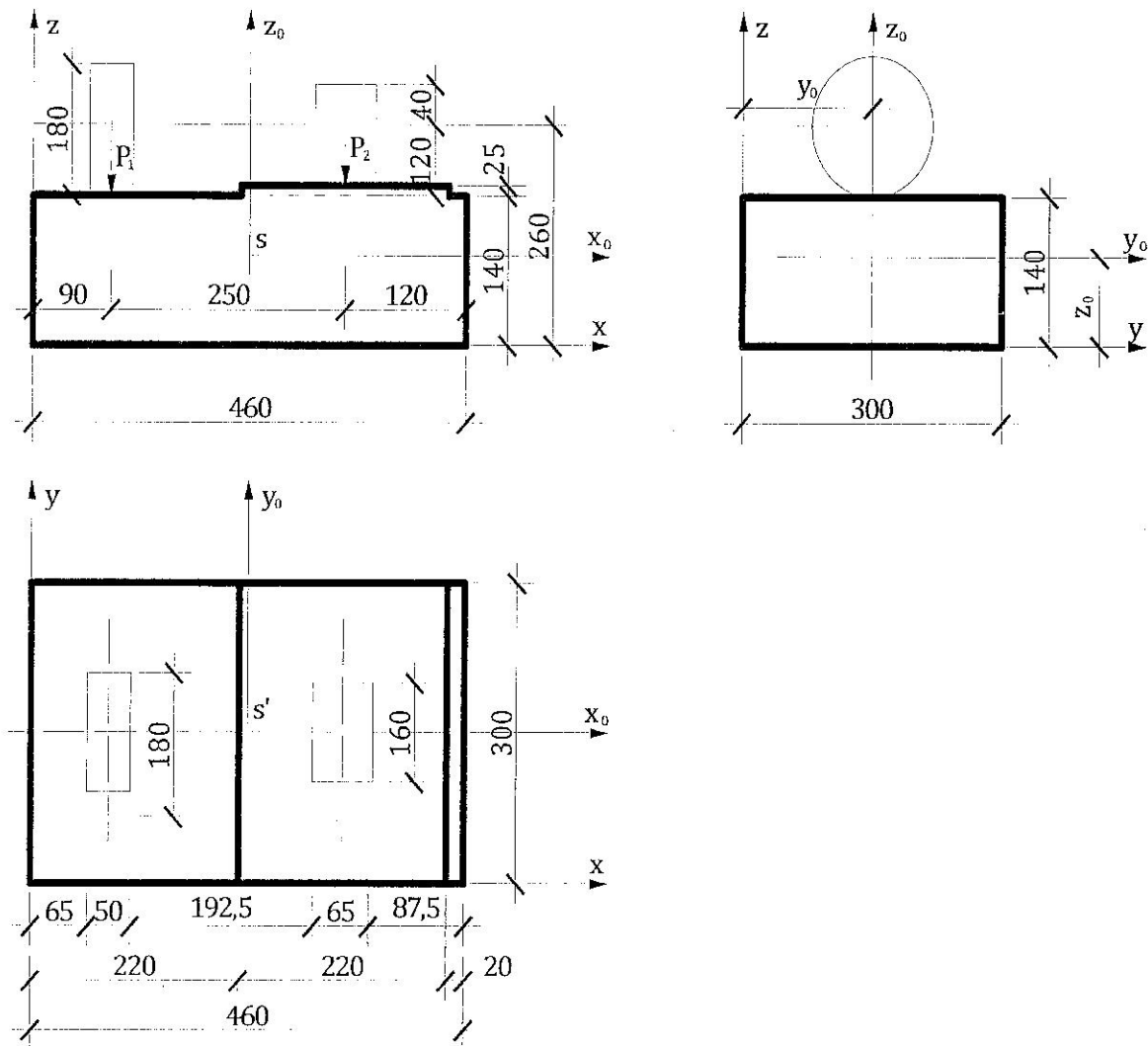
$$y_0 = \frac{865,575}{577,05} = 1,50 \text{ m}$$

$$z_0 = \frac{538,2863}{577,05} = 0,93 \text{ m}$$

Z powyższych obliczeń wynika, że mimośród $e = 2,30 - 460/2 = 0$, zatem układ jest dokładnie wycelowany.

2.4 Obliczenie momentów bezwładności

Poniższy rysunek przedstawia maszynę traktowaną, jako uproszczony układ mas oraz jej ustawienie na fundamencie. Momenty bezwładności jak przyjętego układu obliczono w tabelicy 2.



Rys. 2 Wymiary maszyny oraz przyjęty układ współrzędnych

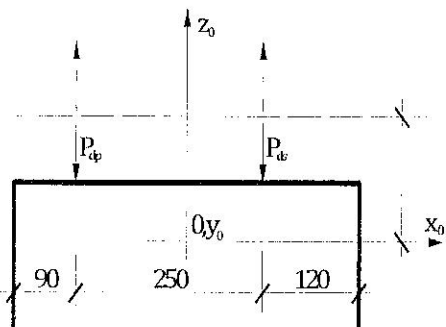
Tabela 2 Zestawienie momentów bezwładności mas układu

Element układu	Momenty bezwładności mas względem		
	Płaszczyzny x_0z_0 [kN·m·s ²]	Płaszczyzny y_0z_0 [kN·m·s ²]	Płaszczyzny x_0y_0 [kN·m·s ²]
Pompa	$\frac{27,8}{9,81} \cdot \left(\frac{1,80^2}{16} + 0 \right)$ = 0,57	$\frac{27,8}{9,81} \cdot \left(\frac{0,50^2}{12} + 1,40^2 \right)$ = 5,61	$\frac{27,8}{9,81} \cdot \left(\frac{1,8^2}{16} + 1,66^2 \right)$ = 8,38
Silnik	$\frac{25,0}{9,81} \cdot \left(\frac{1,60^2}{16} + 0 \right)$ = 0,41	$\frac{25,0}{9,81} \cdot \left(\frac{0,65^2}{12} + 1,10^2 \right)$ = 3,17	$\frac{25,0}{9,81} \cdot \left(\frac{1,60^2}{16} + 1,66^2 \right)$ = 7,43
Blok fundamentowy	$\frac{483}{9,81} \cdot \left(\frac{3,00^2}{12} + 0 \right)$ = 36,9	$\frac{483}{9,81} \cdot \left(\frac{4,6^2}{12} + 0 \right)$ = 86,82	$\frac{483}{9,81} \cdot \left(\frac{1,4^2}{12} + 0,24^2 \right)$ = 10,88
Podstawa pod silnik	$\frac{41,25}{9,81} \cdot \left(\frac{3,00^2}{12} + 0 \right)$ = 3,15	$\frac{41,25}{9,81} \cdot \left(\frac{2,20^2}{12} + 1,10^2 \right)$ = 6,78	$\frac{41,25}{9,81} \cdot \left(\frac{0,25^2}{12} + 0,585^2 \right)$ = 1,46
Razem	$\theta_{x_0z_0} = 41,03$	$\theta_{y_0z_0} = 102,38$	$\theta_{x_0y_0} = 28,15$
	Oś x_0 [kN·m·s ²]	Oś y_0 [kN·m·s ²]	Oś z_0 [kN·m·s ²]
$\theta_{x_0} = \theta_{x_0z_0} + \theta_{x_0y_0} = 41,03 + 28,15 = 69,18$		$\theta_{y_0} = \theta_{y_0z_0} + \theta_{x_0y_0}$ $= 102,38 + 28,15$ $= 130,53$	$\theta_{z_0} = \theta_{x_0z_0} + \theta_{y_0z_0}$ $= 41,03 + 102,38$ $= 143,41$

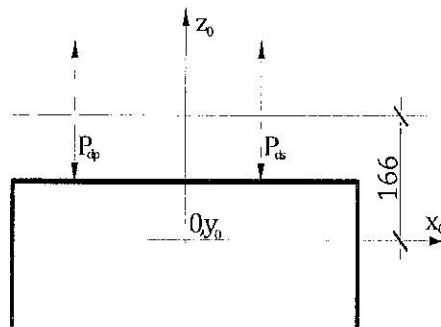
3. Siły i momenty dynamiczne wywołane pracą maszyn

3.1 Schematy działania sił wzbudzających

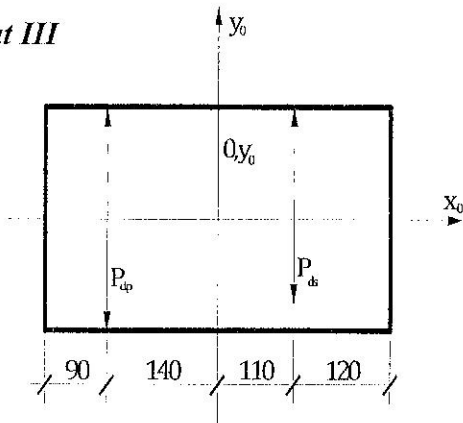
Schemat I



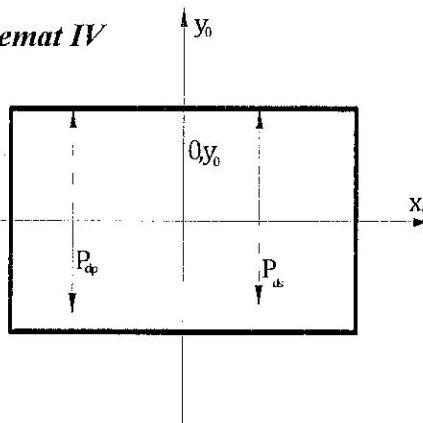
Schemat II



Schemat III



Schemat IV



Rys. 3 Schematy działania sił wzbudzających

3.2 Obliczenie wypadkowych sił i momentów dynamicznych

Tabela 3 Zestawienie sił i momentów wywołanych pracą maszyny

Schemat	P_x [kN]	P_y [kN]	P_z [kN]	M_{0x} [kN·m]	M_{0y} [kN·m]	M_{0z} [kN·m]
I	0	0	$2,26+1,36$ $=3,62$	0	$-1,36 \cdot 1,40 +$ $2,26 \cdot 1,10 = 0,582$	0
II	0	0	$2,26-1,36$ $=0,90$	0	$1,36 \cdot 1,40 +$ $2,26 \cdot 1,10 = 4,39$	0
III	0	3,62	0	$(2,26+1,36) \cdot 1,66$ $=6,01$	0	0,582
IV	0	0,90	0	$(2,26-1,36) \cdot 1,66$ $=1,49$	0	4,39

4. Posadowienie fundamentu

4.1 Stan graniczny nośności podłoża gruntowego

- Średni nacisk wywołany statycznym obciążeniem charakterystycznym wynosi:

$$p = \frac{G}{F} = \frac{577,05}{4,6 \cdot 3,0} = 41,82 \text{ kN/m}^2$$

- Stan graniczny nośności podłoża gruntowego określono według wzorów:

$$q_{rs} \leq m_m \cdot m \cdot q_f$$
$$q_{\max} \leq 1,2 m_m \cdot m \cdot q_f$$

gdzie:

m_m – współczynnik warunków pracy, dla maszyn obrotowych $m_m = 0,8$

m – współczynnik korekcyjny określony przy znaczeniu parametrów geotechnicznych metodą B i granicznych stanach naprężeń $m = 0,9 \cdot 0,9 = 0,81$

Obliczeniowy opór jednostkowy podłoża pod fundamentem wyznaczono na podstawie wzoru:

$$q_f = \left(1 + 0,3 \frac{B}{L}\right) N_c C_u^r + \left(1 + 1,5 \frac{B}{L}\right) N_D D_{\min} \rho_D g + \left(1 - 0,25 \frac{B}{L}\right) N_B B \rho_B^r g$$

Dla gliny piaszczystej w stanie półzwartym:

$$\Phi_u^r = 0,9 \cdot 18^\circ = 16,2$$

$$N_D = 4,34$$

$$N_c = 11,63$$

$$N_B = 0,72$$

$$C_u^r = 0,9 \cdot 4 = 36 \text{ kN/m}^2$$

$$\rho_D = \rho_B^r = 0,9 \cdot 2,25 = 2,03 \text{ t/m}^3$$

$$L = 4,60 \text{ m}$$

$$B = 3,00 \text{ m}$$

$$D_{\min} = 1,40 \text{ m}$$

Po podstawieniu:

$$q_f = \left(1 + 0,3 \frac{3}{4,6}\right) 11,63 \cdot 36 + \left(1 + 1,5 \frac{3}{4,6}\right) 4,34 \cdot 1,4 \cdot 2,03 \cdot 10 + \\ \left(1 - 0,25 \frac{3}{4,6}\right) 0,72 \cdot 3 \cdot 2,03 \cdot 10 = 781,30 \text{ kN/m}^2$$

Średni obliczeniowy nacisk jednostkowy gruntu:

$$q_{rs} = \frac{577,05 \cdot 1,1}{4,6 \cdot 3,0} = 46,00 \text{ kN/m}^2$$

Warunek normowy został spełniony:

$$q_{rs} = 46,00 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} < 0,8 \cdot 0,81 \cdot 781,30 \text{ kN} = 506,28 \text{ kN/m}^2$$

Obliczeniowy opór jednostkowy podłoża jest znacznie większy od obliczeniowego nacisku stąd pominięto sprawdzenie drugiego warunku nośności.

4.2 Cechy sprężyste podłoża gruntowego

- Współczynnik podatności podłoża oblicza się ze wzoru:

$$C_z = C_0 \left[1 + \frac{2(a+b)}{\Delta F}\right] \sqrt{\frac{p}{20}}$$

Gdzie:

C_0 – współczynnik podatności dynamicznej dla glin w stanie półzwartym przyjęto 20000 kN/m^3

$$C_z = 20000 \cdot \left[1 + \frac{2(4,6 + 3,0)}{4,6 \cdot 3,0}\right] \sqrt{\frac{41,82}{20}} = 60775,13 \text{ kN/m}^3$$

Współczynnik $C_x = C_y = 0,7 \cdot C_z = 0,7 \cdot 60775,13 = 42542,59 \text{ kN/m}^3$

- Dla drgań wahadłowych układu:

– W płaszczyźnie xz:

$$C_\phi^{xz} = C_0 \left[1 + \frac{2(a+3b)}{\Delta F}\right] \sqrt{\frac{p}{20}} = 20000 \cdot \left[1 + \frac{2(4,6 + 3 \cdot 3,0)}{4,6 \cdot 3,0}\right] \sqrt{\frac{41,82}{20}} = \\ = 85923,47 \text{ kN/m}^3$$

- W płaszczyźnie y_0z_0

$$C_{\varphi}^{y_0z_0} = C_0 \left[1 + \frac{2(b+3a)}{\Delta F} \right] \sqrt{\frac{P}{20}} = 20000 \cdot \left[1 + \frac{2(3,0 + 3 \cdot 4,6)}{4,6 \cdot 3,0} \right] \sqrt{\frac{41,82}{20}} = 99335,91 \text{ kN/m}^3$$

- Dla drgań skrętnych:

$$C_{\psi} = 1,1 \cdot C_z = 1,1 \cdot 60775,13 = 66852,64 \text{ kN/m}^3$$

- Sztywności podłoża oblicza się według następujących wzorów:

$$K_z = C_z \cdot F = 60775,13 \cdot 4,6 \cdot 3,0 = 838696,79 \text{ kN/m}$$

$$K_x = K_y = C_x \cdot F = 42542,59 \cdot 4,6 \cdot 3,0 = 587087,74 \text{ kN/m}$$

$$K_{\varphi}^{xz} = C^{xz} \cdot J_y = 85923,47 \cdot \frac{3 \cdot 4,6^3}{12} = 2090861,72 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$K_{\varphi}^{yz} = C^{yz} \cdot J_x = 99335,91 \cdot \frac{4,6 \cdot 3^3}{12} = 1028126,67 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$K_{\psi} = C_{\psi} \cdot J_y = 66852,64 \cdot \left(\frac{3 \cdot 4,6^3}{12} + \frac{3^3 \cdot 4,6}{12} \right) = 2318716,97 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

5. Częstotliwość drgań własnych fundamentu

5.1 Częstotliwość kątowa drgań

- Masa układu drgającego:

$$m = \frac{577,05}{9,81} = 58,82 \text{ kN} \cdot \text{s}^2/\text{m}$$

- Częstotliwość kątowa drgań własnych pionowych:

$$\omega_z = \sqrt{\frac{K_z}{m}} = \sqrt{\frac{838696,79}{58,82}} = 119 \text{ s}^{-1}$$

- Częstotliwość kątowa drgań własnych poziomych:

$$\omega_y = \sqrt{\frac{K_y}{m}} = \sqrt{\frac{587087,74}{58,82}} = 100 \text{ s}^{-1}$$

- Częstotliwość kątowa drgań wahadłowych:

- W płaszczyźnie x_0z_0 :

$$\omega_{1,2}^{x,z} = \sqrt{\frac{1}{2U} \left[\omega_{\varphi xz}^2 + \omega_x^2 \mp \sqrt{(\omega_{\varphi xz}^2 + \omega_x^2)^2 - 4 \cdot U \cdot \omega_{\varphi xz}^2 \cdot \omega_x^2} \right]}$$

gdzie:

$$U = \frac{\theta_y}{\theta_y + m \cdot h^2} = \frac{130,53}{130,53 + 58,82 \cdot 0,93^2} = 0,72$$

$$\omega_{\varphi xz}^2 = \frac{K_{\varphi}^{xz} - G_u \cdot h}{\theta_y + m \cdot h^2} = \frac{2090861,72 - 577,05 \cdot 0,93}{130,53 + 58,82 \cdot 0,93^2} = 11523 \text{ s}^{-2}$$

Stąd częstotliwości drgań wahadłowych w płaszczyźnie xz wynoszą:

$$\omega_{1,2}^{x,z} = \sqrt{\frac{1}{2 \cdot 0,72} \left[11523 + 119^2 \mp \sqrt{(11523 + 119^2)^2 - 4 \cdot 0,72 \cdot 11523 \cdot 119^2} \right]}$$

$$= \begin{cases} 91 \text{ s}^{-1} \\ 166 \text{ s}^{-1} \end{cases}$$

– W płaszczyźnie y_0z_0 :

$$U = \frac{69,18}{69,18 + 58,82 \cdot 0,93^2} = 0,59$$

$$\omega_{\varphi xz}^2 = \frac{1028126,67 - 577,05 \cdot 0,93}{69,18 + 58,82 \cdot 0,93^2} = 8559 \text{ s}^{-2}$$

Stąd częstotliwości drgań wahadłowych w płaszczyźnie yz wynoszą:

$$\omega_{1,2}^{y,z} = \sqrt{\frac{1}{2 \cdot 0,59} \left[8559 + 100^2 \mp \sqrt{(8559 + 100^2)^2 - 4 \cdot 0,59 \cdot 8559 \cdot 100^2} \right]}$$

$$= \begin{cases} 75 \text{ s}^{-1} \\ 161 \text{ s}^{-1} \end{cases}$$

- Częstotliwość kątowa drgań skrętnych:

$$\omega_{\psi} = \sqrt{\frac{K_{\psi}}{m}} = \sqrt{\frac{2318716,97}{58,82}} = 199 \text{ s}^{-1}$$

- Częstotliwość kątowa drgań wymuszających:

$$\omega_m = \frac{2 \cdot \pi}{60} n_m = \frac{2 \cdot 3,14}{60} \cdot 950 = 99,43 \text{ s}^{-1}$$

5.2 Sprawdzenie strefy rezonansowej fundamentu

$$\omega_m = 99,43 \text{ s}^{-1} > \omega_{\min} = 75 \text{ s}^{-1}$$

Zaprojektowany fundament znajduje się w strefie po rezonansowej.

6. Amplitudy drgań wymuszonych fundamentu.

Amplitudy drgań wymuszonych obliczono uwzględniając wpływ tłumienia drgań przez podłoże.

-współczynnik tłumienia drgań: $\gamma = \Theta \cdot \omega_m$

Θ - współczynnik charakteryzujący właściwości tłumiące,

Dla gruntów, glin piaszczystych, nienawodnionych: $\Theta = 0,006 \div 0,01$

Przyjęto: $\Theta = 0,008$

ω - prędkość kątowna drgań wymuszonych $\omega_m = 99,43 \text{ [s}^{-1}\text{]}$

$$\gamma = \Theta \cdot \omega_m = 0,008 \cdot 99,43 = 0,795$$

6.1 Amplitudy drgań wahadłowych – schemat I (drgania w płaszczyźnie xz):

$$\eta = \frac{\omega_m}{\omega_{1,2}^{xz}} = \frac{99,43}{91} = 1,09$$

-współczynnik dynamiczny:

$$\nu = \frac{1}{\sqrt{(1-\eta^2)^2 + \gamma^2}} = \frac{1}{\sqrt{(1-1,09^2)^2 + 0,795^2}} = 1,22$$

Amplituda drgań poziomych górnej powierzchni bloku fundamentowego:

$$a_x = \nu \cdot \frac{\sum M_{oy} \cdot h_f}{K_{\varphi}^{xz}} = 1,22 \cdot \frac{0,582 \cdot 1,4}{2090861,72} = 4,75 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 0,475 \mu\text{m}$$

Amplituda drgań pionowych czołowej ściany bloku fundamentowego:

a - odległość środka ciężkości układu od ściany czołowej w rozpatrywanej płaszczyźnie drgań: a = 2,30 m

$$a_z = \nu \cdot \left(\frac{\sum M \cdot a}{K_\phi^{xz}} + \frac{P_z}{K_z} \right) = 1,22 \cdot \left(\frac{0,582 \cdot 2,30}{2090861,72} + \frac{3,62}{838696,79} \right) = 6,05 \cdot 10^{-6} \text{ m} = 6,05 \mu\text{m}$$

6.2 Amplitudy drgań wahadłowych – schemat II:

$$\eta = \frac{\omega_m}{\omega_{1,2}^{xz}} = \frac{99,43}{91} = 1,09$$

-współczynnik dynamiczny:

$$\nu = \frac{1}{\sqrt{(1-\eta^2)^2 + \gamma^2}} = \frac{1}{\sqrt{(1-1,09^2)^2 + 0,795^2}} = 1,22$$

Amplituda drgań poziomych górnej powierzchni bloku fundamentowego:

$$a_x = \nu \cdot \frac{\sum M \cdot h_f}{K_\phi^{xz}} = 1,22 \cdot \frac{4,39 \cdot 1,4}{2090861,72} = 3,59 \cdot 10^{-6} \text{ m} = 3,59 \mu\text{m}$$

Amplituda drgań pionowych czołowej ściany bloku fundamentowego:

a - odległość środka ciężkości układu od ściany czołowej w rozpatrywanej płaszczyźnie drgań, a = 2,30 m

$$a_z = \nu \cdot \left(\frac{\sum M \cdot a}{K_\phi^{xz}} + \frac{P_z}{K_z} \right) = 1,22 \cdot \left(\frac{4,39 \cdot 2,30}{2090861,72} + \frac{0,9}{838696,79} \right) = 7,2 \cdot 10^{-6} \text{ m} = 7,2 \mu\text{m}$$

6.3 Amplitudy drgań wahadłowych – schemat III (drgania w płaszczyźnie yz):

$$\eta = \frac{\omega_m}{\omega_{1,2}^{yz}} = \frac{99,43}{75} = 1,33$$

-współczynnik dynamiczny:

$$\nu = \frac{1}{\sqrt{(1-\eta^2)^2 + \gamma^2}} = \frac{1}{\sqrt{(1-1,33^2)^2 + 0,795^2}} = 0,90$$

Amplituda drgań poziomych:

$$a_y = \nu \cdot \left(\frac{P_y}{K_y} + \frac{Mox \cdot h_f}{K_\phi^{yz}} \right) = 0,90 \cdot \left(\frac{3,62}{587087,74} + \frac{6,01 \cdot 1,4}{1028126,67} \right) = 1,29 \cdot 10^{-6} m = 1,29 \mu m$$

Amplituda drgań pionowych:

$$a_z = \nu \cdot \frac{Mox \cdot a}{K_\phi^{yz}} = 0,9 \cdot \frac{6,01 \cdot 1,5}{1028126,67} = 7,89 \cdot 10^{-6} m = 7,89 \mu m$$

6.4 Amplitudy drgań wahadlowych – schemat IV:

$$\eta = \frac{\omega_m}{\omega_{1,2}} = \frac{99,43}{75} = 1,33$$

-współczynnik dynamiczny:

$$\nu = \frac{1}{\sqrt{(1-\eta^2)^2 + \gamma^2}} = \frac{1}{\sqrt{(1-1,33^2)^2 + 0,795^2}} = 0,90$$

Amplituda drgań poziomych:

$$a_y = \nu \cdot \left(\frac{P_y}{K_y} + \frac{Mox \cdot h_f}{K_\phi^{yz}} \right) = 0,90 \cdot \left(\frac{0,9}{587087,74} + \frac{1,49 \cdot 1,4}{1028126,67} \right) = 3,21 \cdot 10^{-6} m = 3,21 \mu m$$

Amplituda drgań pionowych:

$$a_z = \nu \cdot \frac{Mox \cdot a}{K_\phi^{yz}} = 0,90 \cdot \frac{1,49 \cdot 1,5}{1028126,67} = 1,96 \cdot 10^{-6} m = 1,96 \mu m$$

Zgodnie z normą obliczone amplitudy drgań wymuszonych, określone ze względów użytkowych samej maszyny wynoszą:

- dla drgań pionowych $a_d = 90 \mu m$
- dla drgań poziomych $a_d = 130 \mu m$

Największe obliczone amplitudy drgań wymuszonych spełniają warunki normowe:

$$a_{pion} = 7,89 \mu m < 90 \mu m$$

$$a_{poz} = 3,59 \mu m < 130 \mu m$$

7. Obliczanie zakotwienia w fundamencie

Silnik elektryczny zostanie przytwierdzony do fundamentu 4 kotwami płytkowymi M16 kl. 5.6. Rozstaw śrub $b = 1,65m$. Pompa zostanie przytwierdzona do fundamentu kotwami płytkowymi M16 kl.5.6.

Fundament wykonany z betonu C25/30.

7.1. Przyjęcie rodzaju kotwi i zakotwienia

Przyjęta kotew musi przenieść obliczeniową siłę dynamiczną od silnika:

$$P_{ds}^{\max} = 22,6kN - \text{postała na wskutek uruchamiania silnika}$$

$$M_z^{\max} = 82,99 kN - \text{oraz przenieść ewentualny moment zwarcia silnika.}$$

Zgodnie z danymi technologicznymi silnika rozstaw osiowy śrub kotwiących wynosi

$$b = 1,65m$$

- siła wyrywająca powstała od momentu zwarcia wynosi:

$$N_r = \frac{M_z^{\max}}{b} = \frac{82,99}{1,65} = 50,30kN$$

- obliczeniowa siła jaką musi przenieść połączenie wynosi:

$$N'_r = \max(P_{ds}^{\max} ; F_{Mz}) = \max(22,6; 50,30) = 50,30kN$$

- Wyliczona siła rozkłada się symetrycznie na dwie śruby kotwiące zatem rzeczywista siła rozciągająca śruby kotwiące wynosi:

$$N_r = \frac{N'_r}{n} = \frac{50,3}{2} = 25,15kN$$

7.2. Obliczenie zakotwienia

- Nośność śrub na zerwanie trzpienia.

$$\frac{N_r}{n \cdot S_{Rt}} = \frac{25,15}{40} = 0,63 < 1$$

S_{Rt} – Nośność śruby na zerwanie trzpienia.

Nośność zakotwienia kotwi płytkowej:

$$S_{Ra} = 2 \cdot A_c \cdot f_{cd} = 2 \cdot 0,0016 \cdot 16,7 \cdot 10^3 = 53,44[kN] \quad > N_r / 2 = 12,58 [kN]$$

$$S_{Ra} = 53,44[kN] \leq 0,75 \cdot u \cdot l_a \cdot f_{ctd} = 0,75 \cdot 0,2 \cdot 0,4 \cdot 1,2 \cdot 10^3 = 72[kN]$$

- pole docisku płytki do betonu

$$A_c = a \cdot a = 0,04 \cdot 0,04 = 0,0016 m^2$$

- u – obwód płytki

$$u = 4 \cdot a = 4 \cdot 0,04 = 0,16 m$$

- l_a – długość zakotwienia

$$l_a = 0,4 m$$

- f_{cd}, f_{ctd} – wytrzymałość obliczeniowa betonu

$$f_{cd} = 16,7 MPa$$

$$f_{ctd} = 1,2 MPa$$

7.3 Sprawdzenie na docisk

- Ciężar silnika $G_s = 25,0 kN$
- Ciężar wirnika $W_s = 11,3 kN$
- Siła ściskająca $P = G_s + W_s = 25,0 + 11,3 = 36,3 kN$
- Wymiary płyty – przyjęto $a \times b = 1,7 \times 2,1 m$
- Pole powierzchni płyty $A_c = 1,7 \cdot 2,1 = 3,57 m^2$
- Naprężenia pod płytą od ciężaru silnika:

$$\sigma_c = \frac{P}{A_c} = \frac{36,3}{3,57} = 10,17[kPa]$$

- Moment zginający płytę.

Płyta wspornikowa $M = 0,5 \cdot \sigma_c \cdot c^2 = 0,5 \cdot 10,17 \cdot 0,4^2 = 0,814 kNm$

$$t = \sqrt{\frac{6 \cdot M}{f_d}} = \sqrt{\frac{6 \cdot 0,814}{225 \cdot 10^3}} = 5[mm] \quad \text{Przyjęto: } t = 1 cm$$

Siła ściskająca od obciążenia dynamicznych i statycznych:

$$N_c = P + N_r = 22,6 + 82,99 = 105,59 kN$$

- Nośność połączenia obciążonego siłą podłużną N_c :

$$N_c = 105,59[kN] \leq N_{Rc} = A_c \cdot f_b = 0,11 \cdot 16,7 \cdot 10^3 = 1837[kN]$$

$$A_c = A_{be}$$

A_{be} – efektywne pole docisku, które oblicza się uwzględniając efektywny wymiar (zasięg) strefy docisku c :

$$c = 0,58 \cdot t \cdot \sqrt{\frac{f_d}{f_b}} = 0,58 \cdot 0,001 \cdot \sqrt{\frac{225}{16,7}} = 3cm$$

$$A_{be} = 0,33 \cdot 0,33 = 0,11 m^2$$

7a. Obliczanie zakotwienia w fundamencie – rozwiązanie alternatywne

7.1. Przyjęcie rodzaju kotwi i zakotwienia

Przyjęta kotew musi przenieść obliczeniową siłę dynamiczną od silnika:

$$P_{ds}^{\max} = 22,6kN - \text{postała na wskutek uruchamiania silnika}$$

$$M_z^{\max} = 82,99kN - \text{oraz przenieść ewentualny moment zwarcia silnika.}$$

Zgodnie z danymi technologicznymi silnika rozstaw osiowy śrub kotwiących wynosi $b = 1,65m$

-siła wyrywająca powstała od momentu zwarcia wynosi:

$$F_{Mz} = \frac{M_z^{\max}}{b} = \frac{82,99}{1,65} = 50,30kN$$

-obliczeniowa siła jaką musi przenieść połączenie wynosi:

$$N'_r = \max(P_{ds}^{\max} ; F_{Mz}) = \max(22,6 ; 50,30) = 50,30kN$$

Wyliczona siła rozkłada się symetrycznie na dwie śruby kotwiące zatem rzeczywista siła rozciągająca śruby kotwiące wynosi:

$$N_r = \frac{N'_r}{n} = \frac{50,30}{2} = 25,15kN$$

Do zakotwienia silnika i pompy wirującej przyjęto po 4 kotwie fajkowe ze stali S235 o średnicy 20 mm i parametrach:

- $A_s = 195mm^2$ – przekrój czynny,
- $S_{Ra} = 45kN$ – nośność kotwi na wyrwanie,
- $l_d = 50mm$ – minimalna długość dokręcenia,

7.2. Obliczenie zakotwienia:

-sprawdzenie nośności śruby:

Nośność przyjętej kotwi na rozciąganie wynosi $S_{Ra} = 45kN$. Nośność śruby sprawdza się z zależności:

$$\frac{N_r}{S_{Ra}} = \frac{25,15}{45} = 0,56 < 1 \quad \text{nośność śruby zachowana}$$

-wyznaczenie długości zakotwienia:

Wymaganą długość zakotwienia można wyznaczyć z równania nośności kotwi fundamentowej:

$$S_{Ra} = \pi \cdot d \cdot l_a \cdot f_{bd}$$

gdzie:

f_{bd} – obliczeniowa przyczepność pręta do betonu w strefie zakotwienia; dla betonu C 20/25 i pręta gładkiego kotwi przyjęto zgodnie z tab. 24 PN $f_{bd} = 1,1MPa$

d – średnica pręta kotwi $d = 20mm = 0,020m$

Po przekształceniach otrzymano wzór na obliczanie wymaganej długości zakotwienia gdzie jako maksymalna siłę wrywającą przyjęto: $S_{Ra} = N_r$

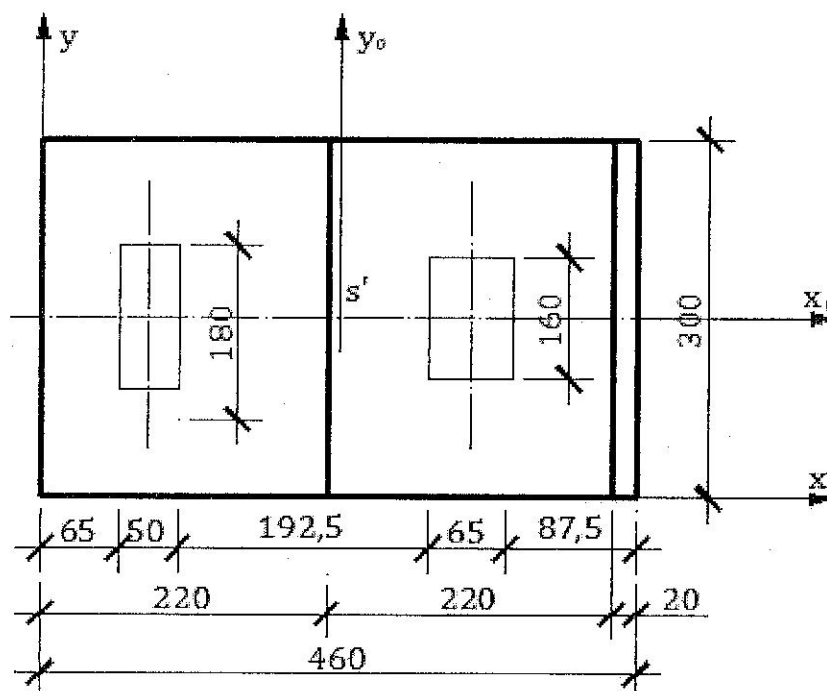
$$l_a = \frac{N_r}{\pi \cdot d \cdot f_{bd}} = \frac{25,15}{3,14 \cdot 0,020 \cdot 1,1 \cdot 10^3} = 0,46m > l_{a,min} = \max \begin{cases} 20 \cdot d = 20 \cdot 0,020 = 0,40m \\ 0,25m \end{cases}$$

Przyjęto ostatecznie długość zakotwienia kotwi fajkowej: $l_a = 0,50m$

7.3. Sprawdzenie na docisk

Przypadek I:

Schemat docisku:



-wytrzymałość konstrukcji niezbrojonej na docisk wyznacza się z zależności:

$$f_{cud} = v_{cu} \cdot f_{cd}^*$$

gdzie:

f_{cd}^* – wytrzymałość obliczeniowa w konstrukcjach betonowych; zgodnie z tab. 2 PN dla betonu C25/30 $f_{cd}^* = 16.7 \text{ MPa}$

$$v_{cu} = \omega_u - \frac{\sigma_{cum}}{f_{cd}^*} \cdot (\omega_u - 1)$$

σ_{cum} – średnie naprężenie ściskające na powierzchni rozdziału poza powierzchnią docisku

$$\sigma_{cum} = 0$$

$$\omega_u = \sqrt{\frac{A_{cl}}{A_{c0}}} < \omega_{u,max} = 2,0$$

- A_{c0} – pole powierzchni docisku,
- A_{c1} – pole powierzchni rozdziału,

-poła powierzchni oraz współczynnik ω_u dla poszczególnych elementów układu:

a) **dla pompy:**

$$A_{c0,p} = 180 \cdot 50 = 9000 \text{ cm}^2$$

$$A_{c1,p} = (50 + 2 \cdot 105) \cdot (180 + 2 \cdot 50) = 72800 \text{ cm}^2$$

$$\omega_{u,p} = \sqrt{\frac{A_{c1,p}}{A_{c0,p}}} = \sqrt{\frac{72800}{9000}} = 2,8 > \omega_{u,\max} = 2,0$$

Przyjęto: $\omega_{u,p} = 2,0$

a) **dla silnika:**

$$A_{c0,s} = 160 \cdot 65 = 10400 \text{ cm}^2$$

$$A_{c1,s} = (65 + 2 \cdot 87,5) \cdot (160 + 2 \cdot 70) = 72000 \text{ cm}^2$$

$$\omega_{u,s} = \sqrt{\frac{A_{c1,s}}{A_{c0,s}}} = \sqrt{\frac{72000}{10400}} = 2,63 > \omega_{u,\max} = 2,0$$

Przyjęto: $\omega_{u,s} = 2,0$

Ponieważ współczynniki ω_u dla pompy i silnika są tej samej wartości toteż nośność na docisk miejscowy pod pompą i silnikiem będzie taki sam a dla:

$$v_{cu} = \omega_u - \frac{\sigma_{cum}}{f_{cd}^*} \cdot (\omega_u - 1) = 2 - \frac{0}{16,7} \cdot (2 - 1) = 2$$

-nośność na docisk miejscowy wynosi:

$$f_{cud} = v_{cu} \cdot f_{cd}^* = 2 \cdot 16,7 = 33,4 \text{ MPa}$$

Sprawdzenie nośności na docisk od ciężaru poszczególnych maszyn zgodnie ze schematem powyżej.

✓ pod pompą:

$$N_{Sd}^p = G_p = 27,8 \text{ kN}$$

-warunek nośności:

$$N_{Sd}^p < N_{Rd}^p = \alpha_u \cdot f_{cud} \cdot A_{c0,p}$$

ponieważ $\sigma_{u,\min} = \sigma_{u,\max}$ zatem $\alpha_u = \frac{1}{3} \cdot \left(2 + \frac{\sigma_{u,\min}}{\sigma_{u,\max}} \right) = \alpha_u = \frac{1}{3} \cdot (2 + 1) = 1$

$$N_{Sd}^p = 27,8 \text{ kN} < N_{Rd}^p = \alpha_u \cdot f_{cud} \cdot A_{c0,p} = 1 \cdot 33,4 \cdot 10^3 \cdot 9000 \cdot 10^{-4} \approx 30060 \text{ kN}$$

✓ pod silnikiem:

$$N_{Sd}^s = G_S = 25,0 \text{ kN}$$

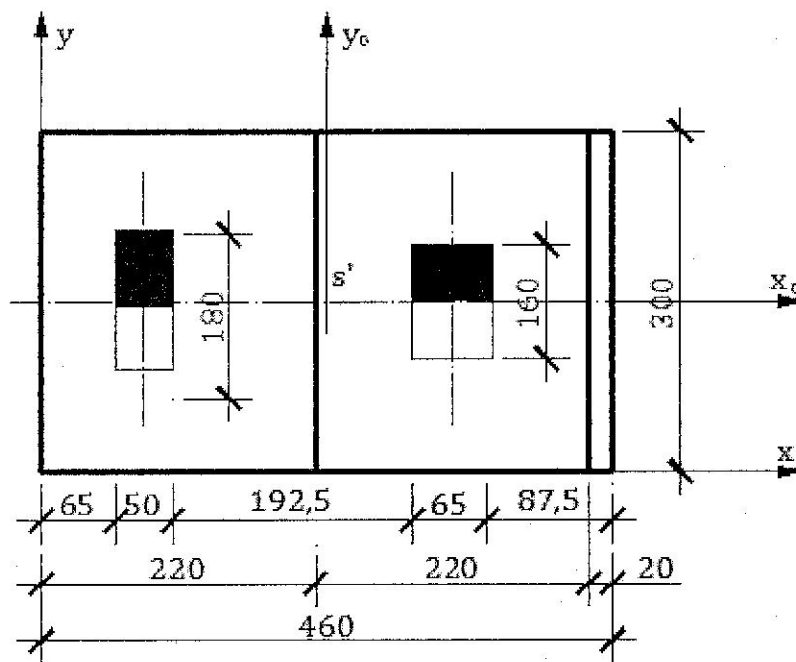
-warunek nośności:

$$N_{Sd}^s < N_{Rd}^s = \alpha_u \cdot f_{cud} \cdot A_{c0,s}$$

$$N_{Sd}^s = 25,0 \text{ kN} < N_{Rd}^s = \alpha_u \cdot f_{cud} \cdot A_{c0,p} = 1 \cdot 33,4 \cdot 10^3 \cdot 10400 \cdot 10^{-4} \approx 34736 \text{ kN}$$

Przypadek II:

Schemat docisku:



-wytrzymałość konstrukcji niezbrojonej na docisk wyznacza się z zależności:

$$f_{cud} = v_{cu} \cdot f_{cd}^*$$

gdzie:

f_{cd}^* – wytrzymałość obliczeniowa w konstrukcjach betonowych; zgodnie z tab. 2 PN dla betonu C25/30 $f_{cd}^* = 16.7 MPa$

$$v_{cu} = \omega_u - \frac{\sigma_{cum}}{f_{cd}^*} \cdot (\omega_u - 1)$$

gdzie:

σ_{cum} – średnie naprężenie ściskające na powierzchni rozdziału poza powierzchnią docisku $\sigma_{cum} = 0$

$$\omega_u = \sqrt{\frac{A_{c1}}{A_{c0}}} < \omega_{u,max} = 2,0$$

- A_{c0} – pole powierzchni docisku,
- A_{c1} – pole powierzchni rozdziału,

Pola powierzchni oraz współczynnik ω_u dla poszczególnych elementów układu:

a) dla pompy:

$$A_{c0,p} = 90 \cdot 50 = 4500 cm^2$$

$$A_{c1,p} = (50 + 2 \cdot 105) \cdot (90 + 2 \cdot 50) = 49400 cm^2$$

$$\omega_{u,p} = \sqrt{\frac{A_{c1,p}}{A_{c0,p}}} = \sqrt{\frac{49400}{4500}} = 3,31 > \omega_{u,max} = 2,0$$

Przyjęto: $\omega_{u,p} = 2,0$

b) dla silnika:

$$A_{c0,s} = 80 \cdot 65 = 5200 cm^2$$

$$A_{c1,s} = (65 + 2 \cdot 87,5) \cdot (80 + 2 \cdot 70) = 52800 cm^2$$

$$\omega_{u,s} = \sqrt{\frac{A_{c1,s}}{A_{c0,s}}} = \sqrt{\frac{52800}{5200}} = 3,19 > \omega_{u,max} = 2,0$$

Przyjęto: $\omega_{u,s} = 2,0$

Ponieważ współczynniki ω_u dla pompy i silnika są tej samej wartości toteż nośność na docisk miejscowy pod pompą i silnikiem będzie taki sam a dla:

$$v_{cu} = \omega_u - \frac{\sigma_{cum}}{f_{cd}^*} \cdot (\omega_u - 1) = 2 - \frac{0}{16,7} \cdot (2 - 1) = 2$$

-nośność na docisk miejscowy wynosi:

$$f_{cud} = v_{cu} \cdot f_{cd}^* = 2 \cdot 16,7 = 33,4 \text{ MPa}$$

Sprawdzenie nośności na docisk od ciężaru poszczególnych maszyn zgodnie ze schematem powyżej.

a) pod pompą:

$$N_{Sd}^p = G_p = 27,8 \text{ kN}$$

-warunek nośności:

$$N_{Sd}^p < N_{Rd}^p = \alpha_u \cdot f_{cud} \cdot A_{c0,p}$$

ponieważ $\sigma_{u,\min} = \sigma_{u,\max}$ zatem $\alpha_u = \frac{1}{3} \cdot \left(2 + \frac{\sigma_{u,\min}}{\sigma_{u,\max}} \right) = \alpha_u = \frac{1}{3} \cdot (2 + 1) = 1$

$$N_{Sd}^p = 27,8 \text{ kN} < N_{Rd}^p = \alpha_u \cdot f_{cud} \cdot A_{c0,p} = 1 \cdot 33,4 \cdot 10^3 \cdot 4500 \cdot 10^{-4} \approx 15030 \text{ kN}$$

b) pod silnikiem:

$$N_{Sd}^s = G_s = 25,0 \text{ kN}$$

-warunek nośności:

$$N_{Sd}^s < N_{Rd}^s = \alpha_u \cdot f_{cud} \cdot A_{c0,s}$$

$$N_{Sd}^s = 25,0 \text{ kN} < N_{Rd}^s = \alpha_u \cdot f_{cud} \cdot A_{c0,s} = 1 \cdot 33,4 \cdot 10^3 \cdot 5200 \cdot 10^{-4} \approx 17368 \text{ kN}$$

8. Konstrukcja fundamentu

8.1. Minimalne zbrojenie z uwagi na skurcz

Maksymalną średnicę zbrojenia określa się z zależności:

$$\varphi_{s,\max} = \frac{3 \cdot 0,15 \cdot f_{cm} \cdot w_{\text{lim}} \cdot E_s}{f_{yk}^2}$$

gdzie:

f_{cm} – średnia wytrzymałość betonu na ściskanie, dla C25/30
 $f_{cm} = f_{ck} + 8 = 25 + 8 = 33 \text{ MPa}$

w_{lim} – maksymalna szerokość rys; przyjęto /

f_{yk} – charakterystyczna granica plastyczności; dla A-I $f_{yk} = 240 \text{ MPa}$

$E_s = 200 \text{ GPa}$

zatem:

$$\varphi_{s,\max} = \frac{3 \cdot 0,15 \cdot 33 \cdot 0,3 \cdot 200 \cdot 1000}{240^2} = 15,47 \text{ mm}$$

Przyjęto grubość strefy rozciąganej wywołanej skurczem: $B = 0,05 \div 0,1 \text{ m} = 0,07 \text{ m}$

-siła rozciągająca zbrojenie w paśmie 1 mb powstała od skurczu betonu, wyznacza się z zależności:

$$F_s = f_{ctm} \cdot H \cdot B$$

dla C25/30 $f_{ctm} = 2,6 \text{ MPa}$ zatem:

$$F_s = 2,6 \cdot 1400 \cdot 0,07 = 254,8 \text{ kN}$$

-wymagane pole przekroju zbrojenia przeciwskurczowego wynosi zatem:

$$A_s = \frac{F_s}{f_{yd}} = \frac{254,8}{210 \cdot 10^3} = 0,0012 \text{ m}^2 / \text{m} = 12,0 \text{ cm}^2 / \text{m}$$

Przyjęto siatkę zbrojeniową STANDARD $\phi 16 - 200 / 200$ o przekroju $A = 12,06 \text{ cm}^2 / \text{m}$

8.2. Przyjęcie zbrojenia fundamentu

Zbrojenie przyjęto zgodnie z PN-80/B-03040 wg 5.4.6.2. dla fundamentów blokowych pod maszyny o wypadkowej sił wzbudzających:

$$P_{d,\max} = 2,26kN > 0,5kN$$

oraz objętości betonu:

$$V_B = 1,4 \cdot 4,6 \cdot 3,0 + 0,2 \cdot 2,2 \cdot 3,0 \approx 20,64m^3 > 20m^3$$

Blok fundamentowy ma być wykonany z betonu klasy C25/30 (zagęszczonego poprzez wibrowanie wstępne) zbrojonego siatkami i prętami ze stali klasy A-I (stal St3S).

Przyjęto zbrojenie konstrukcyjne fundamentu:

- zbrojenie przypowierzchniowe przeciwskurczowe powierzchni bocznych fundamentu, zgodnie z 8.1. przyjęto zbrojenie siatkami STANDARD $\phi 16 - 200/200$;
- zbrojenie powierzchni dolnej i górnej fundamentu zgodnie z normą PN-80/B-03040 (Zaleca stosowanie siatek zbrojeniowych z prętów $\phi 12 \div 16mm$ oraz o oczkach $20 \div 30cm$. Ponieważ przekrój tego zbrojenia jest mniejszy od wymaganego zbrojenia przeciwskurczowego przyjęto zbrojenie jak wyżej dla skurczu);
- zbrojenie studzienek pod kotwie fundamentowe wykonano z prętów $\phi 10mm$, a pręty poziome występują w rozstawie co 12cm.