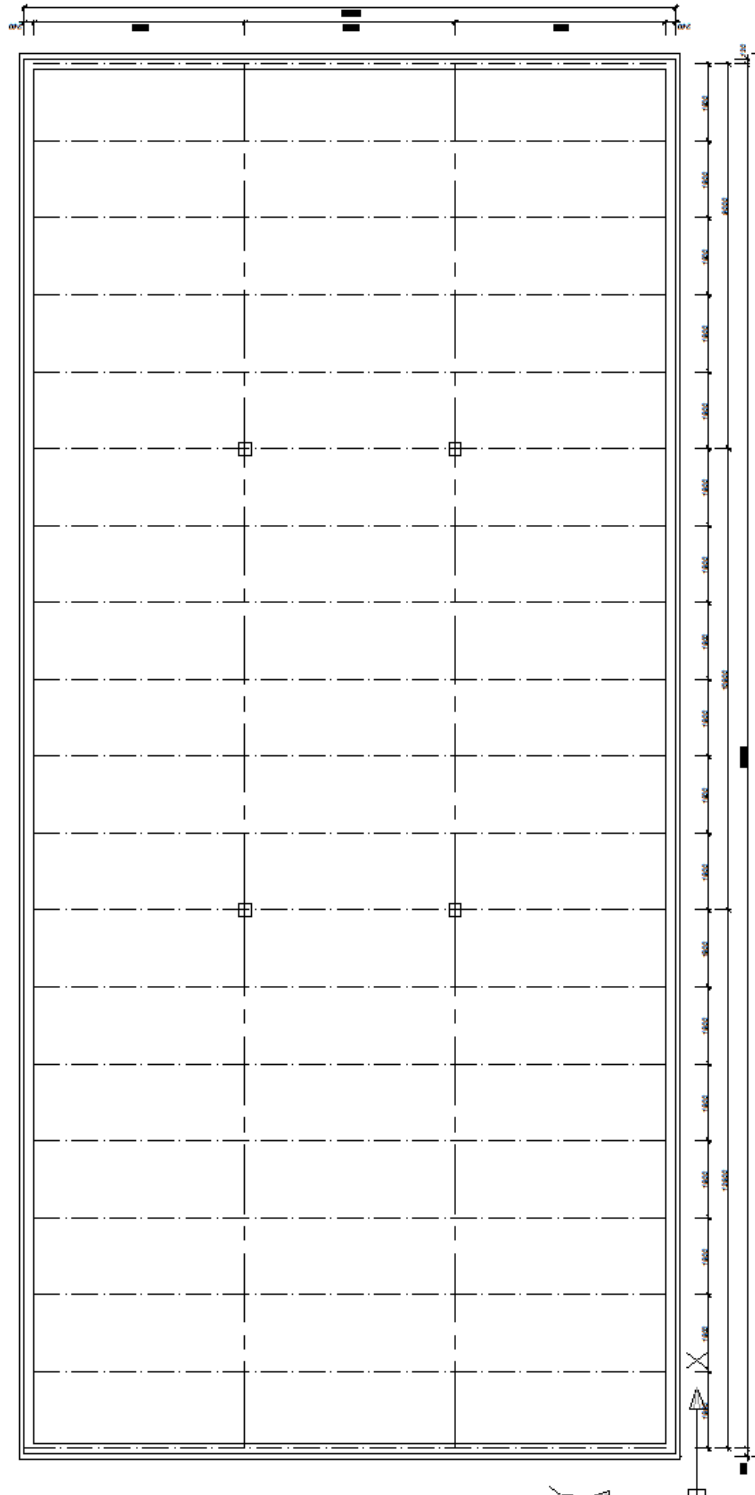


***Przykład obliczeniowy stropu stalowego belkowego wg PN-EN 1993-1-1.***

Strop w budynku o kategorii użytkowej D2. Elementy stropu ze stali S275.

Geometria stropu:



*Rysunek 1: Schemat stropu.*

Dobór grubości płyty żelbetowej

$$d \geq \frac{l_{eff}}{35} = \frac{180}{35} = 5,14 \text{ cm}$$

Przyjęto płytę o grubości  $h = 10,0 \text{ cm}$

Rozwiązanie konstrukcyjno – materiałowe stropu

*Obciążenia stałe powierzchniowe:*

<i>rodzaj</i>	<i>Obciążenie charakterystyczne [kN/m<sup>2</sup>]</i>	<i>Współczynnik obciążenia <math>\gamma_G</math></i>	<i>Obciążenie obliczeniowe [kN/m<sup>2</sup>]</i>
posadzka betonowa 0,03·21,0	0,63	1,35	0,82
izolacja	0,05	1,35	0,06
styropian – 4cm 0,04·0,45	0,018	1,35	0,022
izolacja	0,05	1,35	0,06
płyta żelbetowa 0,1·25,0	2,5	1,35	2,75
<b>RAZEM:</b>	<b>3,25</b>	-	<b>4,39</b>

*Obciążenie zmienne użytkowe powierzchniowe:*

<i>Rodzaj</i>	<i>Obciążenie charakterystyczne [kN/m<sup>2</sup>]</i>	<i>Współczynnik obciążenia <math>\gamma_Q</math></i>	<i>Obciążenie obliczeniowe [kN/m<sup>2</sup>]</i>
Obciążenie zmienne użytkowe	5,0	1,5	7,5

Współczynniki kombinacyjne obciążeń zmiennych stropu o kategorii użytkowania *D2*

$$\psi_0 = 0,7 \quad , \quad \psi_1 = 0,7 \quad , \quad \psi_2 = 0,6 \quad .$$

Parametry mechaniczne stali S275

$$f_y = 275 \frac{N}{mm^2}, \quad f_u = 430 \frac{N}{mm^2}, \quad E = 210000 \frac{N}{mm^2}, \quad G = 81000 \frac{N}{mm^2}$$

Częściowe współczynniki bezpieczeństwa

$$\gamma_{M0} = 1,0, \quad \gamma_{M1} = 1,0, \quad \gamma_{M2} = \min \left\{ \begin{array}{l} 1,1 \\ 0,9 \frac{f_u}{f_y} \end{array} \right\} = \min \left\{ \begin{array}{l} 1,1 \\ 0,9 \frac{430}{275} = 1,41 \end{array} \right\} = 1,1$$

### **Poz.1 Belka stropowa**

Zestawienie obciążeń belki stropowej

Szerokość pasa obciążającego belkę

$$a_1 = 1,8 \text{ m}$$

Obciążenia stałe charakterystyczne (bez ciężaru własnego belki stropowej)

$$G_{bk} = G_k a_1 = 3,25 \cdot 1,8 = 5,85 \frac{kN}{m}$$

Obciążenie użytkowe charakterystyczne

$$Q_{bk} = Q_k a_1 = 5,0 \cdot 1,8 = 9,0 \frac{kN}{m}$$

Kombinacje obciążeń w stanie granicznym nośności (STR) w trwałej sytuacji obliczeniowej

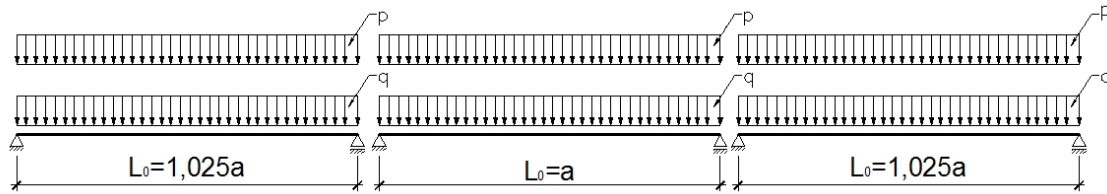
$$q_d = \max \left\{ \begin{array}{l} \gamma_G G_{bk} + \gamma_Q \psi_0 Q_{bk} = 1,35 \cdot 5,85 + 1,5 \cdot 0,7 \cdot 9,0 = 17,35 \\ \xi_G \gamma_G G_{kb} + \gamma_Q Q_{kb} = 0,85 \cdot 1,35 \cdot 5,85 + 1,5 \cdot 9,0 = 20,21 \end{array} \right\} = 20,21 \frac{kN}{m}$$

Kombinacja charakterystyczna dla stanu granicznego użytkowości (ULS)

$$q_k = G_{kb} + Q_{kb} = 5,85 + 9,0 = 14,85 \frac{kN}{m}$$

### Schemat statyczny belki

Do obliczeń przyjęty został schemat statyczny szeregu belek swobodnie podpartych.



Rysunek 2: Schemat statyczny belek stropowych.

Rozpiętości obliczeniowe belek skrajnych

$$L_0 = 1,025 a = 1,025 \cdot 500 = 513 \text{ cm} .$$

Rozpiętość obliczeniowa belek środkowych

$$L_0 = 500,0 \text{ cm} .$$

Określenie maksymalnego momentu zginającego

$$M_{Ed} = \frac{q_d L_0^2}{8} = \frac{20,21 \cdot 5,13^2}{8} = 66,4 \text{ kNm} = 66,4 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

Oszacowanie przekroju poprzecznego belki

Z warunku stanu granicznego nośności

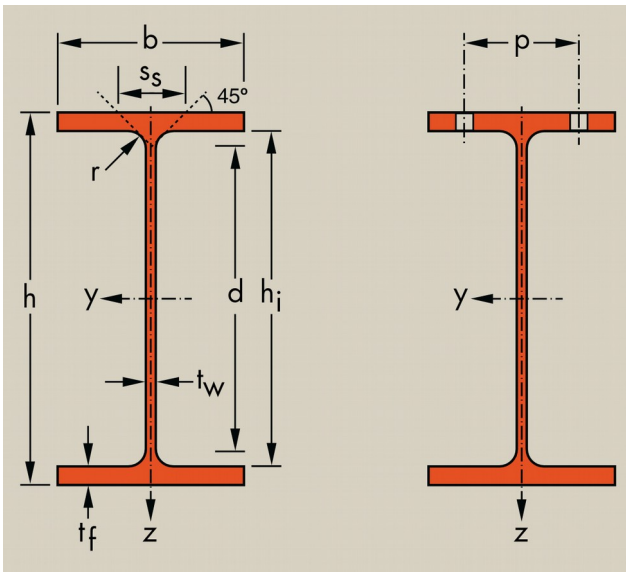
$$W_{y, min} = \frac{M_{Ed} \gamma_{M0}}{f_y} = \frac{66,4 \cdot 10^6 \cdot 1,0}{275} = 241 \cdot 10^3 \text{ mm}^3 .$$

Z warunku stanu granicznego użytkowości

$$J_{y, min} = \frac{5}{384} \frac{q_k L_0^3}{E} 250 = \frac{5}{384} \frac{14,85 \cdot 5130^3}{210000} 250 = 3098 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

Przyjęto do sprawdzenia kształtownik IPE 240 .

Geometria przyjętego przekroju



Rysunek 3: Ogólne wymiary kształtownika IPE.

$$h = 240 \text{ mm}$$

$$b_f = 120 \text{ mm}$$

$$t_f = 9,8 \text{ mm}$$

$$t_w = 6,2 \text{ mm}$$

$$r = 15,0 \text{ mm}$$

masa kształtownika:  $m = 30,7 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$

Ciężar kształtownika:  $g_k = 0,307 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

$$A = 39,1 \cdot 10^2 \text{ mm}^2$$

$$J_y = 3892 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

$$W_{el,y} = 324 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

$$W_{pl,y} = 367 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

Kombinacje obciążeń w stanie granicznym nośności (STR) w trwałej sytuacji obliczeniowej (uwzględniające ciężar własny belki stropowej)

$$q_d = \max \left\{ \begin{array}{l} \gamma_G (G_{bk} + g_k) + \gamma_Q \psi_0 Q_{bk} = 1,35(5,85 + 0,307) + 1,5 \cdot 0,7 \cdot 9,0 = 17,76 \\ \xi_G \gamma_G (G_{kb} + g_k) + \gamma_Q Q_{kb} = 0,85 \cdot 1,35(5,85 + 0,307) + 1,5 \cdot 9,0 = 20,57 \end{array} \right\} = 20,57 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Sprawdzenie warunku dotyczącego rozpiętości obliczeniowej belki skrajnej

$$L_0 = 513 \text{ cm} > L + 0,5 h = 500 + 0,5 \cdot 24,0 = 512 \text{ cm}$$

Siły wewnętrzne miarodajne do sprawdzenia warunków nośności

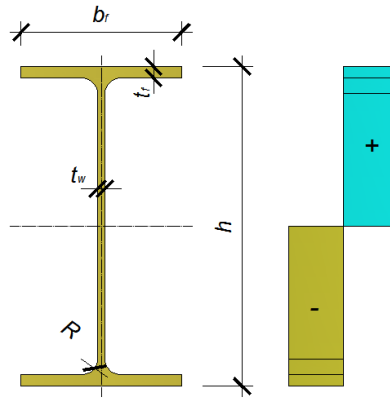
$$M_{Ed} = \frac{q_d L_0^2}{8} = \frac{20,57 \cdot 5,13^2}{8} = 67,5 \text{ kNm} = 67,5 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

$$V_{Ed} = \frac{q_d L_0}{2} = \frac{20,57 \cdot 5,13}{2} = 52,7 \text{ kN} = 52,7 \cdot 10^3 \text{ N}$$

Sprawdzenie obliczeniowej nośności przy jednokierunkowym zginaniu

Określenie klasy przekroju przy jednokierunkowym zginaniu

Rozkład naprężeń normalnych w stanie pełnego uplastycznienia przekroju



Rysunek 4: Rozkład naprężeń normalnych przy zginaniu.

- środnik

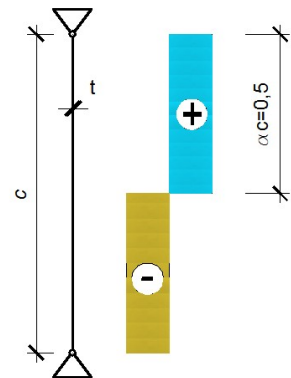
smukłość ścianki środnika:

$$\frac{c}{t} = \frac{h - 2 \cdot (t_f + r)}{t_w} = \frac{240 - 2 \cdot (9,8 + 15,0)}{6,2} = 30,71$$

graniczny warunek smukłości

$$\max\left(\frac{c}{t}\right) = 72 \cdot \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 72 \cdot \sqrt{\frac{235}{275}} = 66,56$$

$$\frac{c}{t} = 30,71 < \max\left(\frac{c}{t}\right) = 66,56 \Rightarrow \text{klasa 1}$$



- półka

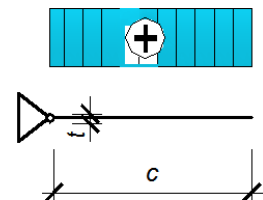
smukłość ścianki półki:

$$\frac{c}{t} = \frac{0,5 \cdot (b_f - t_w) - r}{t_f} = \frac{0,5 \cdot (120 - 6,2) - 15,0}{9,8} = 4,28$$

graniczny warunek smukłości

$$\max\left(\frac{c}{t}\right) = 9 \cdot \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 9 \cdot \sqrt{\frac{235}{275}} = 8,32$$

$$\frac{c}{t} = 4,28 < \max\left(\frac{c}{t}\right) = 8,32 \Rightarrow \text{klasa 1}$$



Przekrój spełnia warunki klasy 1.

Obliczeniowa nośność przekroju klasy 1 przy jednokierunkowym zginaniu

$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl,y} f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{367 \cdot 10^3 \cdot 275}{1,0} = 101 \cdot 10^6 \text{ N mm} = 101 \text{ kNm}$$

Warunek nośności

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} = \frac{67,5}{101,0} = 0,67 < 1$$

Warunek nośności został spełniony.

#### Określenie nośności belki na zwichrzenie

Biorąc pod uwagę przyjęty schemat statyczny belki oraz jej połączenie z żelbetową płytą można uznać, że pas ściskany jest odpowiednio stężony.

Można pominąć sprawdzenie nośności belki na zwichrzenie.

#### Określenie nośności obliczeniowej przekroju na ścinanie

Sprawdzenie stateczności nieuzębrowanego środka

Z uwagi na  $f_y = 235 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} < f_y = 460 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$  przyjęta została wartość współczynnika

$$\eta = 1,2$$

$$h_w = h - 2t_f = 240 - 2 \cdot 9,8 = 220,4 \text{ mm}$$

$$\frac{h_w}{t_w} = 35,55 < \frac{72}{\eta} \epsilon = \frac{72}{1,2} \cdot 0,92 = 55,46$$

Stateczność środka jest zachowana.

Pole przekroju czynnego przy ścinaniu dwuteownika walcowanego prostopadle do osi y-y

$$\begin{aligned} A_v &= A - 2b_f t_f + (t_w + 2r) t_f = 39,1 \cdot 10^2 - 2 \cdot 120 \cdot 9,8 + (6,2 + 2 \cdot 15) 9,8 = \\ &= 19,13 \cdot 10^2 \text{ mm}^2 > \eta h_w t_w = 1,2 \cdot 220,4 \cdot 6,2 = 16,4 \cdot 10^2 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Nośność plastyczna przy ścinaniu przy braku skręcania

$$V_{c,Rd} = V_{pl,Rd} = \frac{A_v \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{M0}} = \frac{19,13 \cdot 10^2 \frac{275}{\sqrt{3}}}{1,0} = 303,7 \cdot 10^3 \text{ N} = 303,7 \text{ kN}$$

Warunek nośności

$$\frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} = \frac{52,7}{303,7} = 0,17 < 1$$

Warunek nośności został spełniony.

Sprawdzenie możliwości interakcji momentu zginającego i siły poprzecznej

Z uwagi na:

$$\frac{h_w}{t_w} = 35,55 < \frac{72}{\eta} \epsilon = \frac{72}{1,2} 0,92 = 55,46$$

oraz

$$V_{Ed} = 52,7 \text{ kN} < 0,5 V_{pl,Rd} = 0,5 \cdot 303,7 = 151,85 \text{ kN}$$

nie ma potrzeby określania nośności interakcyjnej.

Sprawdzenie warunku stanu granicznego użytkowości

Kombinacja charakterystyczna z uwzględnieniem ciężaru własnego belki stropowej

$$q_k = (G_{kb} + g_k) + Q_{kb} = 5,85 + 0,307 + 9,0 = 15,16 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Maksymalne ugięcie belki

$$w = \frac{5}{384} \frac{q_k L_0^4}{E J_y} = \frac{5}{384} \frac{15,16 \cdot 5130^4}{210000 \cdot 3892 \cdot 10^4} = 16,7 \text{ mm}$$

Dopuszczalne ugięcie belki stropowej

$$w_{lim} = \frac{L_0}{250} = \frac{5130}{250} = 20,5 \text{ mm}$$

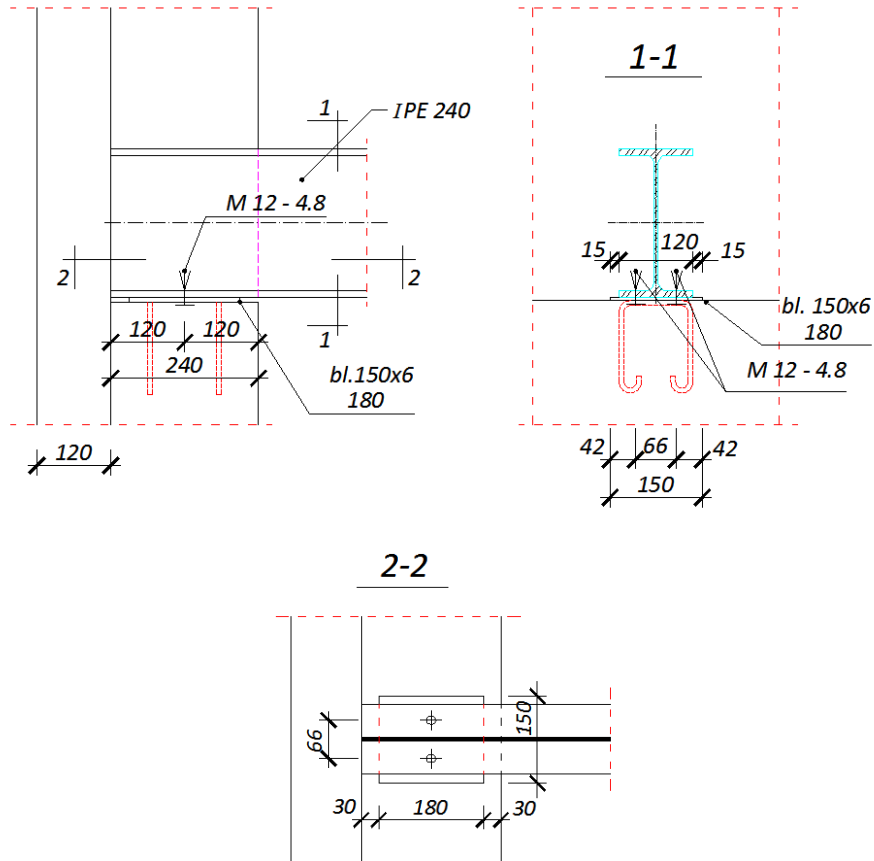
$$w = 16,7 \text{ mm} < w_{lim} = 20,5 \text{ mm}$$

Warunek ugięcia został spełniony.



Zaprojektowanie oparcia na ścianie

Przyjęte zostało oparcie belki na marce stalowej zakotwionej w wieńcu żelbetowym szerokości 24 cm, wykonanym z betonu C16/20.



Rysunek 5: Schemat oparcia belki na ścianie zewnętrznej.

Parametry wytrzymałościowe betonu C16/20

$$f_{ck} = 16 \text{ MPa}$$

Częściowy współczynnik bezpieczeństwa dla betonu

$$\gamma_C = 1,4$$

Obliczeniowa wytrzymałość betonu

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_C} = \frac{16}{1,4} = 11,4 \text{ MPa}$$

Przyjęto wymiary marki stalowej w rzucie

$$a \times b = 180 \times 150 \text{ mm} \quad .$$

Długość oparcia belki na płytce

$$l_1 = 180 \text{ mm} > l_{\min} = 150 \text{ mm}$$

Sprawdzenie docisku w belce – model plastyczny.

Przyjęto grubość podkładki stalowej (marki)  $t_p = 6 \text{ mm}$  .

Długość oparcia wynosi  $l_{\text{eff}} = 180 \text{ mm}$  .

Sumaryczna grubość pasa belki i podkładki

$$t = t_f + t_p = 9,8 + 6 = 15,8 \text{ mm}$$

Wysięg maksymalny strefy docisku

$$c = t \sqrt{\frac{f_y}{3 f_{jd} \gamma_{M0}}} = 15,8 \sqrt{\frac{275}{3 \cdot 11,4 \cdot 1,0}} = 44,7 \text{ mm} \quad .$$

Szerokość strefy docisku

$$b_{\text{eff}} = t_w + 2c = 6,2 + 2 \cdot 44,7 = 95,6 \text{ mm}$$

Obliczeniowa nośność przy docisku króćca teowego do betonu

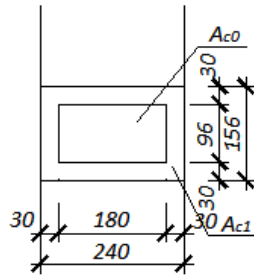
$$F_{C, Rd} = f_{jd} b_{\text{eff}} l_{\text{eff}} = 11,4 \cdot 95,6 \cdot 180 = 196,9 \cdot 10^3 \text{ N} = 196,9 \text{ kN} \quad .$$

Warunek nośności

$$\frac{F_{Ed}}{F_{C, Rd}} = \frac{52,7}{196,9} = 0,27 < 1,0$$

Nośność jest zapewniona.

Sprawdzenie warunków miejscowego docisku w wieńcu żelbetowym

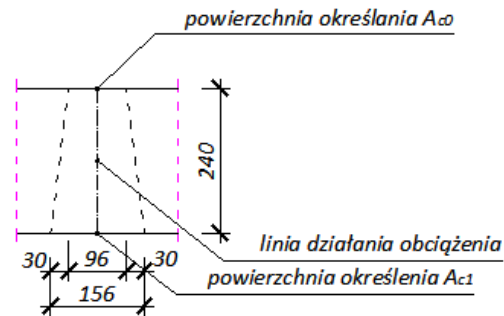


Rysunek 6: Schemat pól docisku i rozdziału.

Pole docisku bezpośredniego

$$A_{c0} = b_{eff} l_{eff} = 95,6 \cdot 180 = 172,3 \cdot 10^2 \text{ mm}^2$$

Pole rozdziału obciążenia



Rysunek 7: Schemat tworzenia pola rozdziału obciążenia.

$$A_{c1} = b_1 l_1 = 155,6 \cdot 240 = 373,7 \cdot 10^2 \text{ mm}^2$$

Nośność obliczeniowa przy docisku bezpośrednim

$$F_{Rdu} = A_{c0} f_{cd} \sqrt{\frac{A_{c1}}{A_{c0}}} = 172,3 \cdot 10^2 \cdot 11,4 \sqrt{\frac{373,7 \cdot 10^2}{172,3 \cdot 10^2}} = 289,9 \cdot 10^3 \text{ N} = 289,9 \text{ kN} < < 3 f_{cd} A_{c0} = 3 \cdot 11,4 \cdot 172,3 \cdot 10^2 = 590,6 \cdot 10^3 \text{ N} = 590,6 \text{ kN}$$

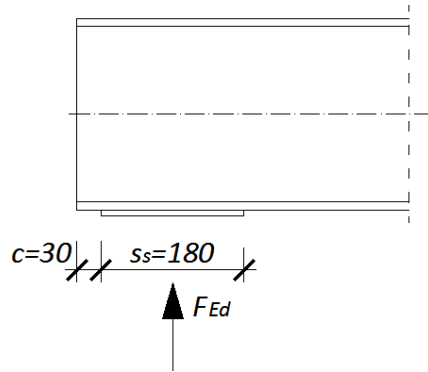
Warunek nośności

$$\frac{F_{Ed}}{F_{Rdu}} = \frac{52,7}{289,9} = 0,18 < 1,0$$

Warunek nośności został spełniony.

Sprawdzenie nośności belki w strefie podporowej – wg PN-EN 1993-1-5 pkt 6.

Został przyjęty następujący schemat obliczeniowy nośności



Rysunek 8: Schemat obliczeniowy sprawdzenia nośności łożyska.

Długość części wspornikowej belki  $c = 30 \text{ mm}$  .

Rzeczywista szerokość oddziaływania siły skupionej  $s_s = 180 \text{ mm}$  .

Współczynnik zależny przypadku obciążenia skupionego

$$k_F = 2 + 6 \left( \frac{s_s + c}{h_w} \right) = 2 + 6 \left( \frac{30 + 180}{220,4} \right) = 7,72 > 6$$

Przyjęto:  $k_F = 6$  .

Krytyczna wartość siły skupionej

$$F_{cr} = 0,9 k_F E \frac{t_w^3}{h_w} = 0,9 \cdot 6 \cdot 210000 \frac{6,2^3}{220,4} = 1226 \cdot 10^3 \text{ N} = 1226 \text{ kN} .$$

Określenie efektywnej szerokości docisku  $l_y$

Współczynniki

$$m_1 = \frac{f_{yf} b_f}{f_{yw} t_w} = \frac{275 \cdot 120}{275 \cdot 6,2} = 19,35$$

Zakładamy smukłość względną łożyska  $\bar{\lambda}_F > 0,5$

$$m_2 = 0,02 \left( \frac{h_w}{t_f} \right)^2 = 0,02 \left( \frac{220,4}{9,8} \right)^2 = 10,12$$

$$l_e = \frac{k_F E t_w^2}{2 f_{yw} h_w} = \frac{6 \cdot 210000 \cdot 6,2^2}{2 \cdot 275 \cdot 220,4} = 399 \text{ mm} > s_s + c = 180 + 30 = 210 \text{ mm}$$

Przyjęto:  $l_e = 210 \text{ mm}$

$$l_y = \min \left\{ \begin{array}{l} l_e + t_f \sqrt{\frac{m_1}{2} + \left(\frac{l_e}{t_f}\right)^2} + m_2 = 210 + 9,8 \sqrt{\frac{19,35}{2} + \left(\frac{210}{9,8}\right)^2} + 10,12 = 424 \text{ mm} \\ l_e + t_f \sqrt{m_1 + m_2} = 210 + 9,8 \sqrt{19,35 + 10,12} = 263 \text{ mm} \end{array} \right\} = 263 \text{ mm}$$

Smukłość względna łożyska przy docisku

$$\bar{\lambda}_F = \sqrt{\frac{l_y t_w f_y}{F_{cr}}} = \sqrt{\frac{263 \cdot 6,2 \cdot 275}{1226 \cdot 10^3}} = 0,6 > 0,5$$

Współczynnik redukcyjny

$$\chi_F = \frac{0,5}{\bar{\lambda}_F} = \frac{0,5}{0,6} = 0,83 < 1,0$$

Efektywny wymiar łożyska

$$L_{eff} = \chi_F l_y = 0,83 \cdot 263 = 217 \text{ mm}$$

Sprawdzenie warunku nośności

$$\eta_2 = \frac{F_{Ed}}{\frac{f_{yw} L_{eff} t_w}{\gamma_{M1}}} = \frac{52,7 \cdot 10^3}{\frac{275 \cdot 217 \cdot 6,2}{1,0}} = 0,14 < 1$$

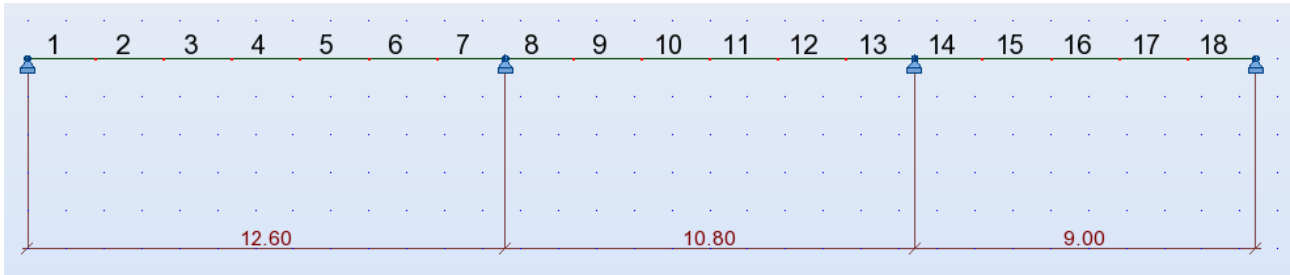
Łożysko spełnia warunki nośności przy obciążeniu skupionym.

## Poz.2 Podciąg blachownicowy

Schemat statyczny podciągu – belką ciągłą trójprzęsłowa

Rozpiętości obliczeniowe przęseł:

$$l_{01}=12,6 \text{ m} , \quad l_{12}=10,8 \text{ m} \quad l_{23}=9,0 \text{ m}$$



Rysunek 9: Schemat statyczny projektowanego podciągu.

### Zestawienie obciążeń

Charakterystyczne obciążenia stałe przekazywane przez belki stropowe w rozstawie

$$a_1=1,8 \text{ m} .$$

Obciążenie charakterystyczne stałe na belce łącznie z jej ciężarem własnym

$$G_{bk} + g_k = 5,85 + 0,307 = 6,157 \frac{kN}{m} .$$

Sumaryczne obciążenie przekazane na podciąg

$$P_G = \frac{1}{2} (G_{bk} + g_k) (l_{01} + l_{02}) = \frac{1}{2} 6,157 (5,13 + 5,0) = 31,17 \text{ kN} .$$

Charakterystyczne obciążenia użytkowe przekazywane przez belki stropowe

w rozstawie  $a_1=1,8 \text{ m}$  .

Obciążenie charakterystyczne użytkowe na belce

$$Q_{bk} = 9,0 \frac{kN}{m} .$$

Sumaryczne obciążenie przekazane na podciąg

$$P_Q = \frac{1}{2} Q_{bk} (l_{01} + l_{02}) = \frac{1}{2} 9,0 (5,13 + 5,0) = 45,56 \text{ kN} .$$

Szacunkowy ciężar własny przęseł podciągu

Przęsło 01 –  $l_{01}=12,8\text{ m}$

$$g_{01}=0,85(700+100l_{01})=0,85(700+100\cdot 12,8)=1,67\cdot 10^3\frac{\text{N}}{\text{m}}=1,67\frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Przęsło 12 –  $l_{12}=10,8\text{ m}$

$$g_{12}=0,85(700+100l_{12})=0,85(700+100\cdot 10,8)=1,51\cdot 10^3\frac{\text{N}}{\text{m}}=1,51\frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Przęsło 23 –  $l_{23}=9,0\text{ m}$

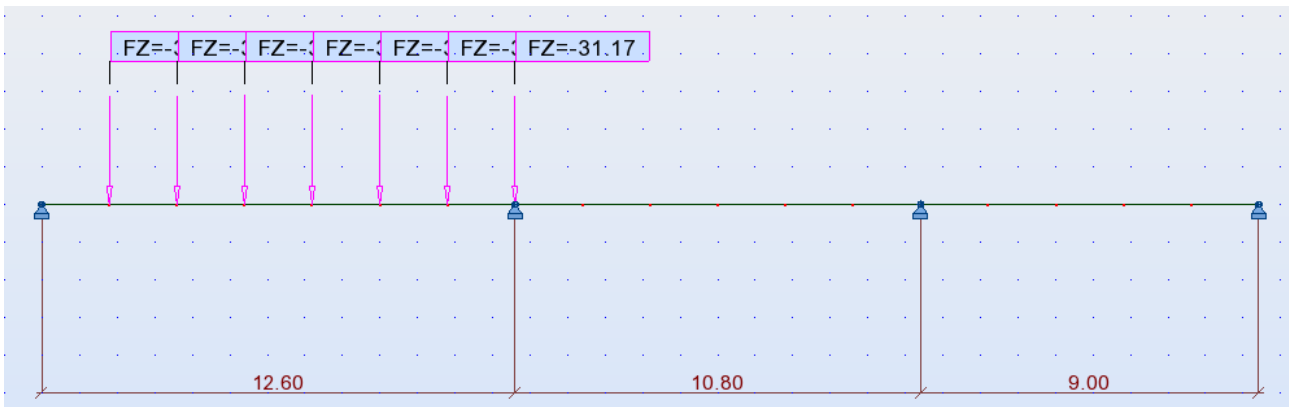
$$g_{12}=0,85(700+100l_{23})=0,85(700+100\cdot 9,0)=1,36\cdot 10^3\frac{\text{N}}{\text{m}}=1,36\frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Określenie miarodajnej kombinacji obciążeń w stanie granicznym nośności

$$\max \left\{ \begin{array}{l} \gamma_G P_G + \gamma_Q \psi_0 P_Q = 1,35 \cdot 31,17 + 1,5 \cdot 0,7 \cdot 45,56 = 89,92 \text{ kN} \\ \xi_G \gamma_G P_G + \gamma_Q P_Q = 0,85 \cdot 1,35 \cdot 31,17 + 1,5 \cdot 45,56 = 104,11 \text{ kN} \end{array} \right\} = 104,11 \text{ kN}$$

Zestawienie grup obciążeń wraz z wartościami częściowych współczynników bezpieczeństwa.

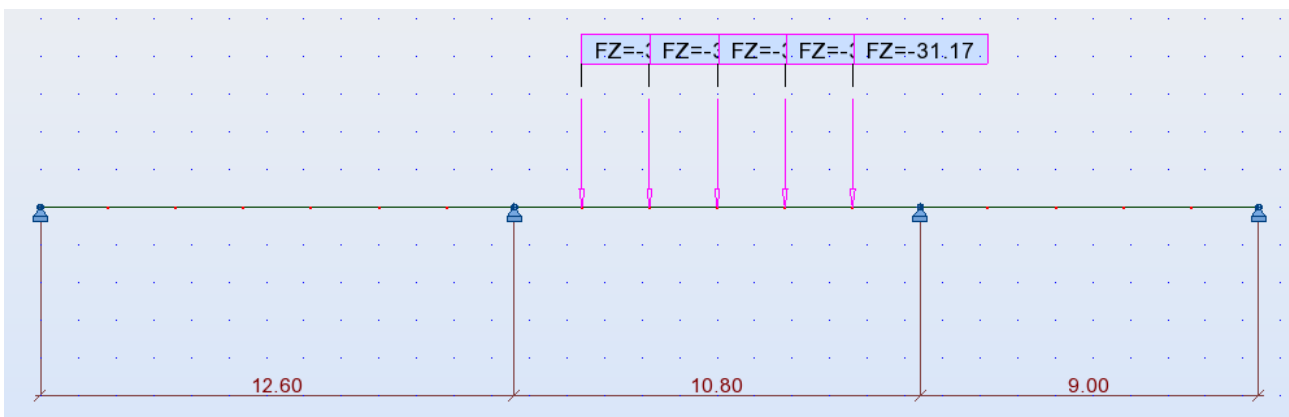
Grupa 1 – obciążenie stałe z belek stropowych w przęśle 01  $\gamma_{Gmax}=1,15$  ,  
 $\gamma_{Gmin}=1,0$



Rysunek 10: Grupa 1 obciążeń podciągu.

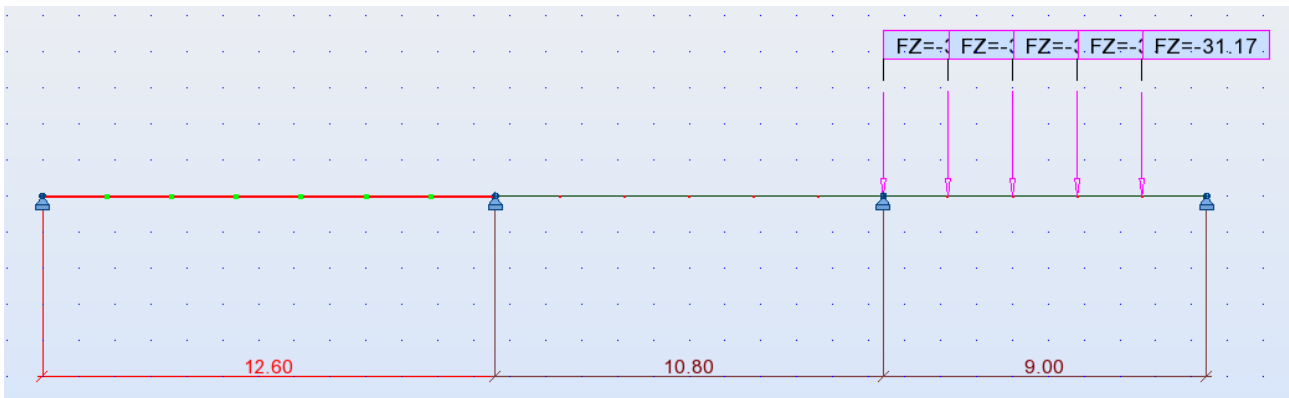
Grupa 2 – obciążenie stałe z belek stropowych w przęśle 12  $\gamma_{Gmax}=1,15$  ,  
 $\gamma_{Gmin}=1,0$

*Strop belkowy.*



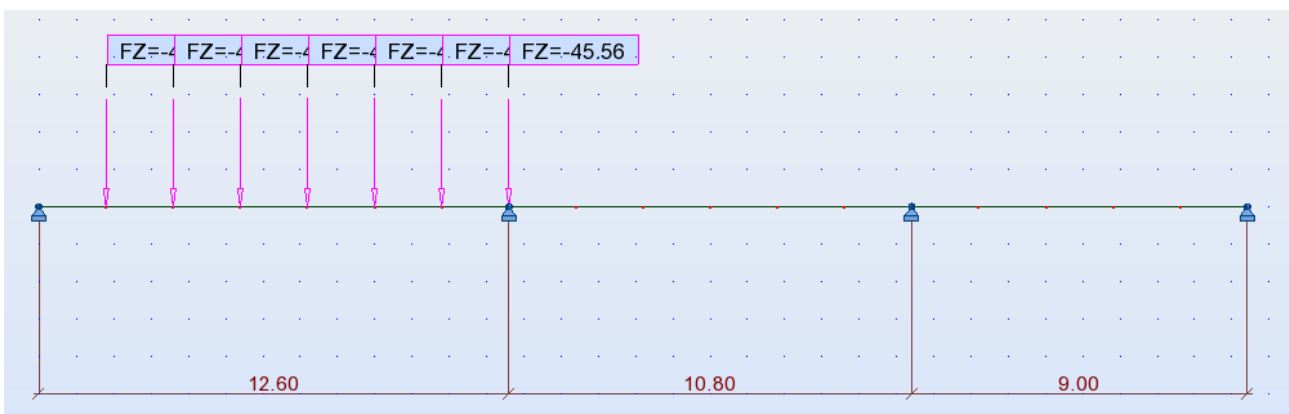
Rysunek 11: Grupa 2 obciążeń podciągu.

Grupa 3 – obciążenie stałe z belek stropowych w przęśle 23  $\gamma_{Gmax}=1,15$  ,  
 $\gamma_{Gmin}=1,0$



Rysunek 12: Grupa 3 obciążeń podciągu.

Grupa 4 – obciążenie użytkowe z belek stropowych w przęśle 01  $\gamma_Q=1,5$

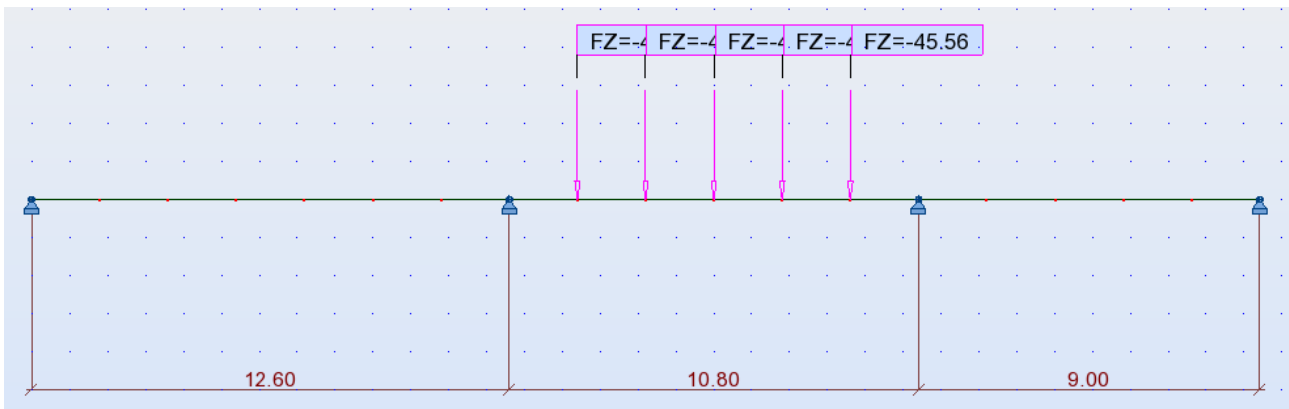


Rysunek 13: Grupa 4 obciążeń podciągu.

Grupa 5 – obciążenie użytkowe z belek stropowych w przęśle 12  $\gamma_Q=1,5$

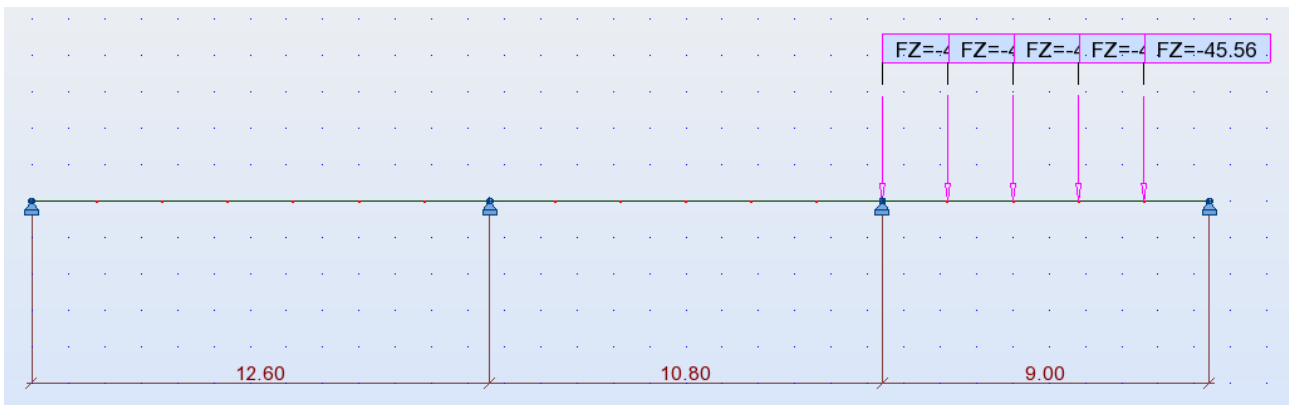


**Strop belkowy.**



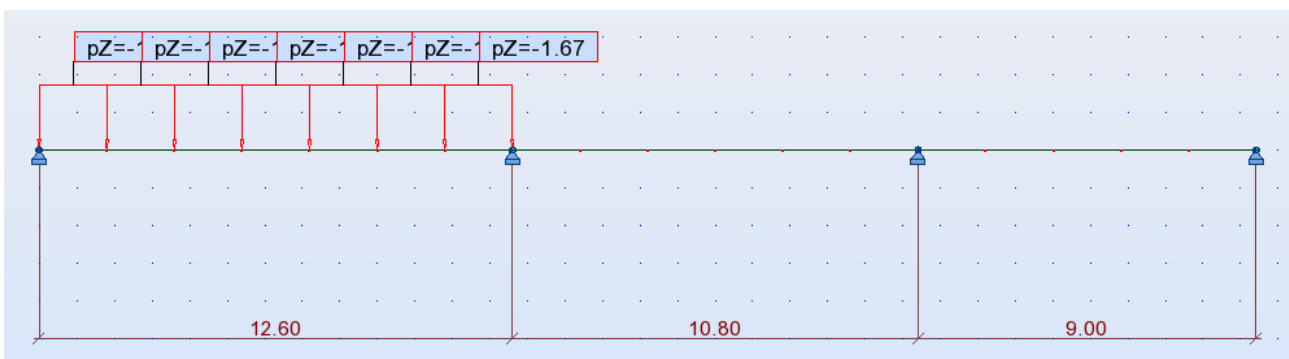
Rysunek 14: Grupa 5 obciążeń podciągu.

Grupa 6 – obciążenie użytkowe z belek stropowych w przęśle 23  $\gamma_Q = 1,5$



Rysunek 15: Grupa 6 obciążeń podciągu.

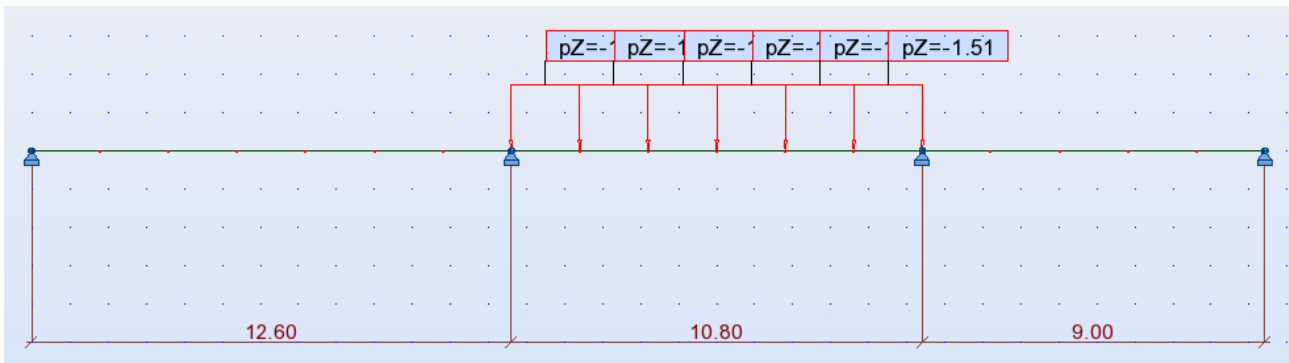
Grupa 7 – obciążenie szacunkowym ciężarem własnym przęśla 01  $\gamma_{Gmax} = 1,15$  ,  
 $\gamma_{Gmin} = 1,0$



Rysunek 16: Grupa 7 obciążeń podciągu.

Grupa 8 – obciążenie szacunkowym ciężarem własnym przęśla 12  $\gamma_{Gmax} = 1,15$  ,

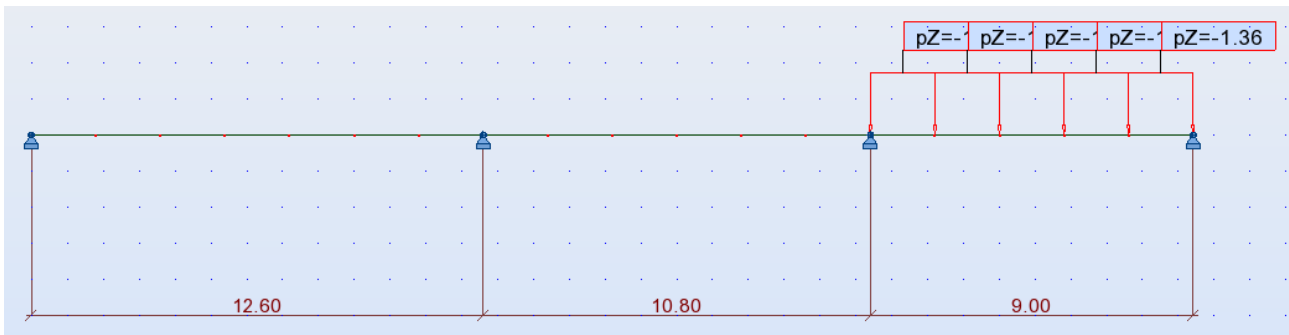
$$\gamma_{Gmin} = 1,0$$



Rysunek 17: Grupa 8 obciążeń podciągu.

Grupa 9 – obciążenie szacunkowym ciężarem własnym przęsła 12  $\gamma_{Gmax} = 1,15$  ,

$$\gamma_{Gmin} = 1,0$$



Rysunek 18: Grupa 9 obciążeń podciągu.

Określenie minimalnych sztywności przęseł na podstawie przybliżonego warunku ugięcia

Zastępcze obciążenia przęseł

$$g_z = \frac{P_G}{a_1} = \frac{31,17}{1,8} = 17,32 \frac{kN}{m}$$

$$q_z = \frac{P_Q}{a_1} = \frac{45,56}{1,8} = 25,31 \frac{kN}{m}$$

Przęsło 01

$$\begin{aligned} EJ_{01} &= \frac{5}{384} [0,5(g_z + g_{01}) + 0,75 p_z] l_{01}^3 350 = \\ &= \frac{5}{384} [0,5(17,32 + 1,67) + 0,75 \cdot 25,31] 12,6^3 \cdot 350 = 259592,5 \text{ kNm}^2 = \\ &= 259592,5 \cdot 10^9 \text{ N mm}^2 \end{aligned}$$

Przęsło 02

$$\begin{aligned} EJ_{12} &= \frac{5}{384} [0,2(g_z + g_{01}) + 0,6 p_z] l_{12}^3 350 = \\ &= \frac{5}{384} [0,2(17,32 + 1,51) + 0,6 \cdot 25,31] 10,8^3 \cdot 350 = 108809,2 \text{ kNm}^2 = \\ &= 108809,2 \cdot 10^9 \text{ N mm}^2 \end{aligned}$$

Przęsło 03

$$\begin{aligned} EJ_{01} &= \frac{5}{384} [0,5(g_z + g_{01}) + 0,75 p_z] l_{23}^3 350 = \\ &= \frac{5}{384} [0,5(17,32 + 1,36) + 0,75 \cdot 25,31] 9,0^3 \cdot 350 = 94095,4 \text{ kNm}^2 = \\ &= 94095,4 \cdot 10^9 \text{ N mm}^2 \end{aligned}$$

Modelowanie zmiennej sztywności w pierwszych obliczeniach statycznych

Określenie przekrojów prostokątnych, przy  $b = 200 \text{ mm}$

Przęsło 01

$$\text{Moment bezwładności } J_{y01} = \frac{EJ_{01}}{E} = \frac{259592,5 \cdot 10^9}{2,1 \cdot 10^5} = 123615 \cdot 10^4 \text{ mm}^4 \cdot$$

Wysokość przekroju

$$h_{01} = \sqrt[3]{\frac{12 J_{y01}}{b}} = \sqrt[3]{\frac{12 \cdot 123615 \cdot 10^4}{200}} = 420 \text{ mm}$$

Przęsło 12

$$\text{Moment bezwładności } J_{y12} = \frac{EJ_{12}}{E} = \frac{108809,2 \cdot 10^9}{2,1 \cdot 10^5} = 51813,9 \cdot 10^4 \text{ mm}^4 \cdot$$

Wysokość przekroju

$$h_{12} = \sqrt[3]{\frac{12 J_{y12}}{b}} = \sqrt[3]{\frac{12 \cdot 51813,9 \cdot 10^4}{200}} = 314 \text{ mm}$$

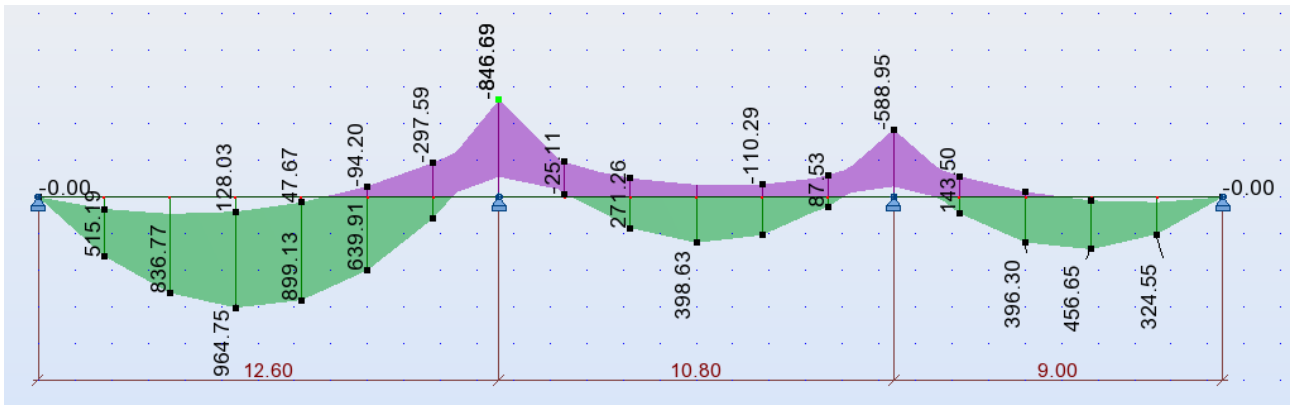
Przęsło 23

$$\text{Moment bezwładności } J_{y23} = \frac{EJ_{23}}{E} = \frac{94095,4 \cdot 10^9}{2,1 \cdot 10^5} = 44807,3 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

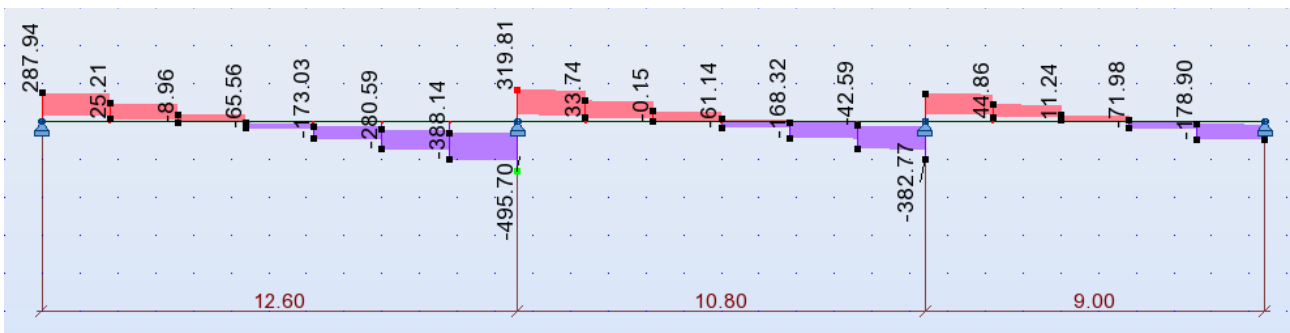
Wysokość przekroju

$$h_{23} = \sqrt[3]{\frac{12 J_{y23}}{b}} = \sqrt[3]{\frac{12 \cdot 44807,3 \cdot 10^4}{200}} = 300 \text{ mm}$$

Wyniki obliczeń statycznych



Rysunek 19: Obwiednia momentów zginających.



Rysunek 20: Obwiednia sił poprzecznych.

Wymiarowanie przekrojów przęsłowych

Przyjęte zostało rozwiązanie polegające na zastosowaniu stałych parametrów środnika. Zostaną one wyznaczone na podstawie największego momentu zginającego w podciągu.

$$M_{max} = 964,75 \text{ kNm} \quad \text{– przęsło 01}$$

Orientacyjna wysokość blachownicy

$$h = \left( \frac{l}{12} \div \frac{l}{20} \right) l_{01} = \left( \frac{l}{12} \div \frac{l}{20} \right) 12,6 = 1,05 \div 0,63 \text{ m}$$

Wstępnie założono wysokość  $h = 850 \text{ mm}$  .

Orientacyjna grubość środnika

$$t_w = 7 + 3h = 7 + 3 \cdot 0,85 = 9,55 \text{ mm}$$

Przyjęto  $t_w = 9 \text{ mm}$

Wymagany wskaźnik wytrzymałości

$$W_y = \frac{M_{max}}{f_y} = \frac{964,75 \cdot 10^6}{275} = 3508 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

Wysokość środnika

$$h_w = 1,2 \sqrt{\frac{W_y}{t_w}} = 1,2 \sqrt{\frac{3508 \cdot 10^3}{9,0}} = 749 \text{ mm}$$

Ostatecznie przyjęto środnik o wymiarach  $t_w \times h_w = 6 \times 900 \text{ mm}$  .

Określenie klasy środnika przy zginaniu (przy założonej grubości spoin pachwinowych łączących pasy ze środnikiem  $a = 4 \text{ mm}$  )

$$\frac{c}{t} = \frac{h_w - 2\sqrt{2}a}{t_w} = \frac{900 - 2\sqrt{2} \cdot 4}{6} = \frac{888,7}{6} = 148,1 > 124 \varepsilon = 124 \cdot 0,92 = 114,6$$

Środnik spełnia warunki przekrojów klasy 4

Określenie parametrów pasów przekrojów blachownicy w poszczególnych przęsłach podciągu

**Przęsło 01** –  $M_{01} = 964,75 \text{ kNm} = 964,75 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$

Wymagane pole przekroju pasa

$$A_f = \frac{M_{01}}{h_w f_y} - \frac{h_w t_w}{6} = \frac{964,75 \cdot 10^6}{900 \cdot 275} - \frac{900 \cdot 6}{6} = 29,97 \cdot 10^2 \text{ mm}^2$$

Szerokość pasa

$$b_f = \left(\frac{1}{4} \div \frac{1}{5}\right) h_w = \left(\frac{1}{4} \div \frac{1}{5}\right) 900 = 225 \div 180 \text{ mm}$$

Przyjęto:  $b_f = 200 \text{ mm}$

Minimalna grubość pasa

$$t_f = \frac{A_f}{b_f} = \frac{29,97 \cdot 10^2}{200} = 14,99 \text{ mm} .$$

Ostatecznie przyjęto pasy  $b_f \times t_f = 200 \times 16 \text{ mm}$

**Przęsło 12** –  $M_{12} = 398,63 \text{ kNm} = 398,63 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$

Wymagane pole przekroju pasa

$$A_f = \frac{M_{12}}{h_w f_y} - \frac{h_w t_w}{6} = \frac{398,63 \cdot 10^6}{900 \cdot 275} - \frac{900 \cdot 6}{6} = 7,10 \cdot 10^2 \text{ mm}^2$$

Szerokość pasa

$$b_f = \left(\frac{1}{4} \div \frac{1}{5}\right) h_w = \left(\frac{1}{4} \div \frac{1}{5}\right) 900 = 225 \div 180 \text{ mm}$$

Przyjęto:  $b_f = 160 \text{ mm}$

Minimalna grubość pasa

$$t_f = \frac{A_f}{b_f} = \frac{7,10 \cdot 10^2}{160} = 4,44 \text{ mm} .$$

Ostatecznie przyjęto pasy  $b_f \times t_f = 160 \times 6 \text{ mm}$

**Przęsło 23** –  $M_{23} = 456,65 \text{ kNm} = 456,65 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$

Wymagane pole przekroju pasa

$$A_f = \frac{M_{23}}{h_w f_y} - \frac{h_w t_w}{6} = \frac{456,65 \cdot 10^6}{900 \cdot 275} - \frac{900 \cdot 6}{6} = 9,45 \cdot 10^2 \text{ mm}^2$$

Szerokość pasa

$$b_f = \left(\frac{1}{4} \div \frac{1}{5}\right) h_w = \left(\frac{1}{4} \div \frac{1}{5}\right) 900 = 225 \div 180 \text{ mm}$$

Przyjęto:  $b_f = 160 \text{ mm}$

Minimalna grubość pasa

$$t_f = \frac{A_f}{b_f} = \frac{9,45 \cdot 10^2}{160} = 5,9 \text{ mm}$$

Ostatecznie przyjęto pasy  $b_f \times t_f = 160 \times 8 \text{ mm}$

Zestawienie przyjętych przekrojów poprzecznych

Przęsło 01	Przęsło 12	Przęsło 23

Sprawdzenie czy zaprojektowane przekroje odpowiadają warunkom minimalnej sztywności.

Przęsło 01

Główny centralny moment bezwładności

$$J_y = \frac{b_f(2t_f + h_w)^3}{12} - \frac{(b_f - t_w)h_w^3}{12} = \frac{200(2 \cdot 16 + 900)^3}{12} - \frac{(200 - 6)900^3}{12} = 170712,6 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

Sztywność przekroju

$$E J_y = 2,1 \cdot 10^5 \cdot 170712,6 \cdot 10^4 = 358496 \cdot 10^9 \text{ N mm}^2$$

$$E J_y = 358496 \cdot 10^9 \text{ N mm}^2 > E J_{y01} = 259592,5 \cdot 10^9 \text{ Nmm}^2$$



Przęsło 12

Główny centralny moment bezwładności

$$J_y = \frac{b_f(2t_f+h_w)^3}{12} - \frac{(b_f-t_w)h_w^3}{12} = \frac{160(2 \cdot 6+900)^3}{12} - \frac{(160-6)900^3}{12} = 75851 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

Sztywność przekroju

$$E J_y = 2,1 \cdot 10^5 \cdot 75851 \cdot 10^4 = 159286 \cdot 10^9 \text{ N mm}^2$$

$$E J_y = 159286 \cdot 10^9 \text{ N mm}^2 > E J_{y12} = 108809,2 \cdot 10^9 \text{ Nmm}^2$$

Przęsło 23

Główny centralny moment bezwładności

$$J_y = \frac{b_f(2t_f+h_w)^3}{12} - \frac{(b_f-t_w)h_w^3}{12} = \frac{160(2 \cdot 8+900)^3}{12} - \frac{(160-6)900^3}{12} = 89217 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

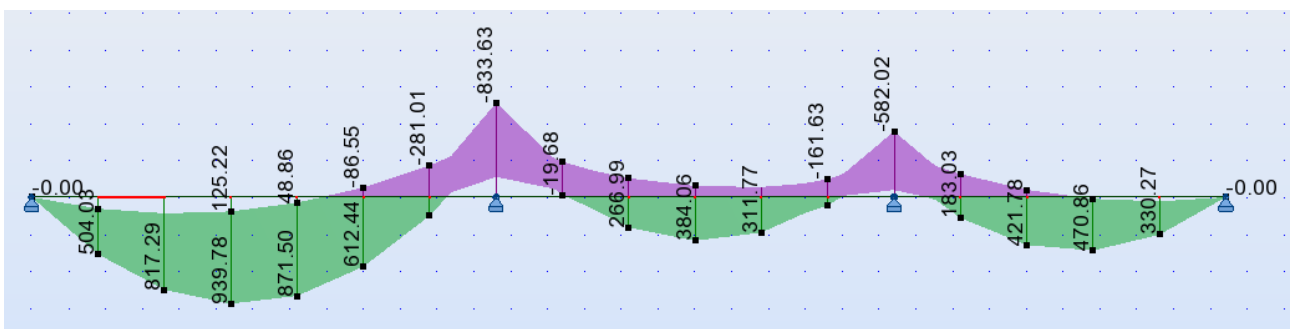
Sztywność przekroju

$$E J_y = 2,1 \cdot 10^5 \cdot 89217 \cdot 10^4 = 187355,8 \cdot 10^9 \text{ N mm}^2$$

$$E J_y = 187355,8 \cdot 10^9 \text{ N mm}^2 > E J_{y23} = 94095,4 \cdot 10^9 \text{ Nmm}^2$$

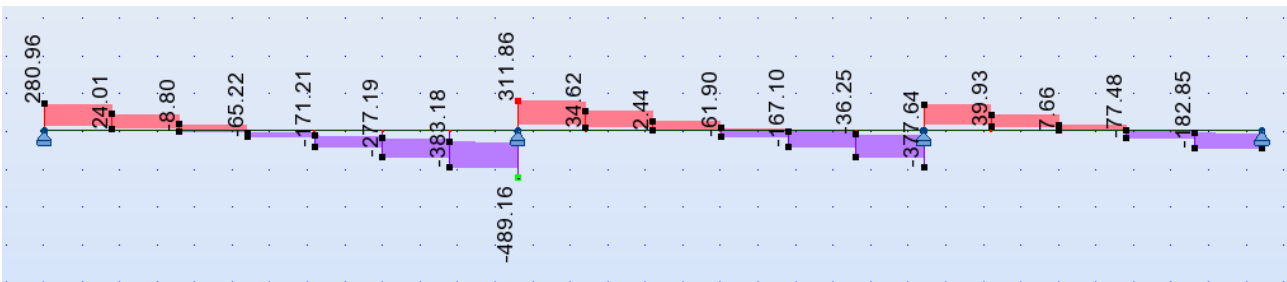
Obliczenia statyczne uwzględniające sztywności zaprojektowanych przekrojów dwuteowych.

**UWAGA:** Obciążenie ciężarem własnym jest określone przez program.



Rysunek 21: Obwiednia momentów zginających.

## Strop belkowy.

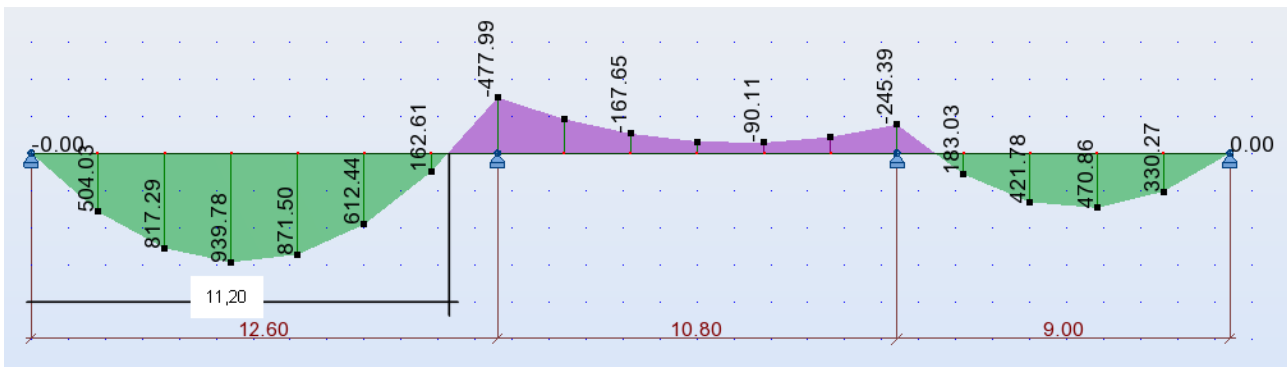


Rysunek 22: Obwiednia sił poprzecznych.

## Sprawdzenie wpływu efektu szerokiego pasa

### Przęsło 01

Odległość między miejscami zerowymi momentu zginającego – kombinacja obciążeń największego momentu przęsłowego



Rysunek 23: Kombinacja maksymalnego momentu zginającego w przęśle 1 - odległość między miejscami zerowymi.

$$L_e = 11,20 \text{ m} \quad \text{– odczytane z programu}$$

Przybliżona wartość odczytana z normy PN-EN 1993-1-5 (dla porównania).

$$L_e = 0,85 l_{01} = 0,85 \cdot 12,6 = 10,7 \text{ m}$$

Szerokość wspornikowej części pasa

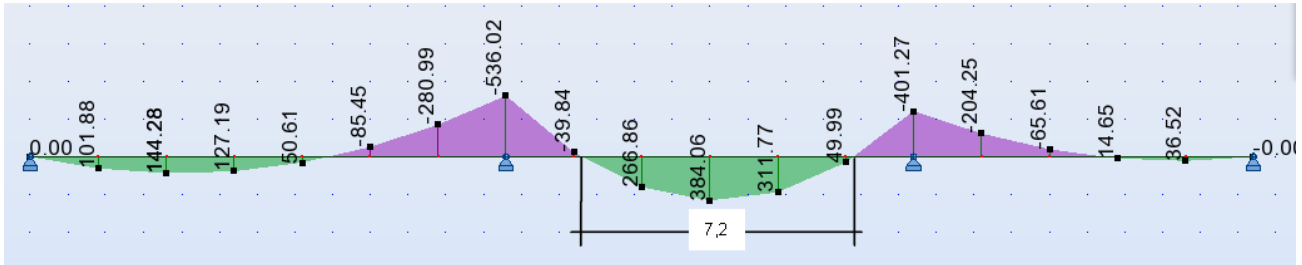
$$b_0 = 0,5(b_f - t_w) = 0,5(200 - 6) = 97 \text{ mm}$$

$$b_0 = 97 \text{ mm} < \frac{L_e}{50} = \frac{11200}{50} = 224 \text{ mm}$$

Efekt szerokiego pasa nie występuje.

## Przęsło 12

Odległość między miejscami zerowymi momentu zginającego – kombinacja obciążeń największego momentu przęsłowego



Rysunek 24: Kombinacja maksymalnego momentu w przęśle 2 - odległość między miejscami zerowymi momentów.

$$L_e = 7,20 \text{ m} \quad \text{– odczytane z programu}$$

Przybliżona wartość odczytana z normy PN-EN 1993-1-5 (dla porównania).

$$L_e = 0,7 l_{01} = 0,7 \cdot 10,8 = 7,56 \text{ m}$$

Szerokość wspornikowej części pasa

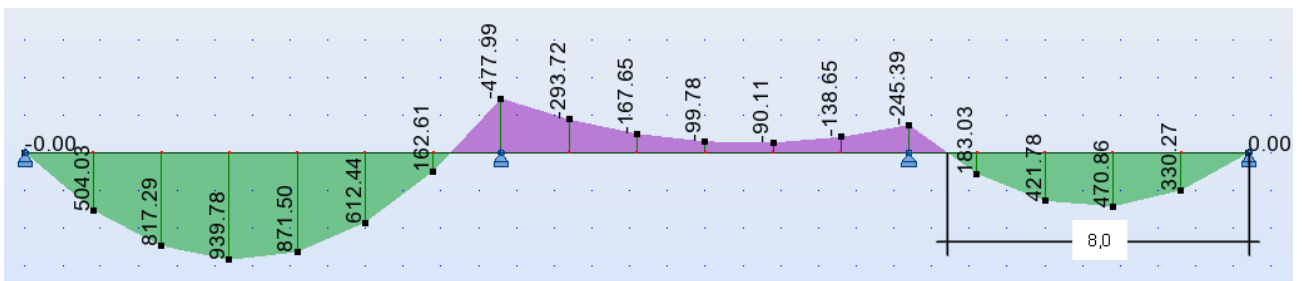
$$b_0 = 0,5 (b_f - t_w) = 0,5 (160 - 6) = 87 \text{ mm}$$

$$b_0 = 87 \text{ mm} < \frac{L_e}{50} = \frac{7200}{50} = 144 \text{ mm}$$

Efekt szerokiego pasa nie występuje.

## Przęsło 23

Odległość między miejscami zerowymi momentu zginającego – kombinacja obciążeń największego momentu przęsłowego



Rysunek 25: Kombinacja maksymalnego momentu w przęśle 3 - odległość między zerami momentów zginających.

$L_e = 8,0 \text{ m}$  – odczytane z programu

Przybliżona wartość odczytana z normy PN-EN 1993-1-5 (dla porównania).

$$L_e = 0,85 l_{01} = 0,85 \cdot 9,0 = 7,65 \text{ m}$$

Szerokość wspornikowej części pasa

$$b_0 = 0,5(b_f - t_w) = 0,5(160 - 6) = 87 \text{ mm}$$

$$b_0 = 87 \text{ mm} < \frac{L_e}{50} = \frac{8000}{50} = 160 \text{ mm}$$

Efekt szerokiego pasa nie występuje.

### Sprawdzenie obliczeniowej nośności przekroju na zginanie

#### **Przęsło 01**

$$M_{Ed} = 939,78 \text{ kNm} = 939,78 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

Parametry przekroju

$$b_f = 200 \text{ mm} \quad , \quad t_f = 16 \text{ mm} \quad , \quad h_w = 900 \text{ mm} \quad , \quad t_w = 6 \text{ mm}$$

Wstępny dobór grubości spoin łączących pasy ze środkiem

$$t_1 = 6 \text{ mm} \quad , \quad t_2 = 16 \text{ mm}$$

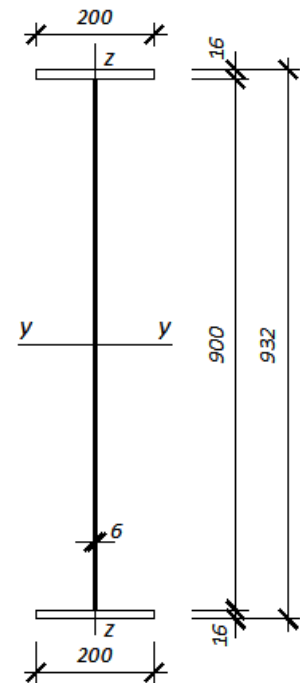
$$0,2t_2 = 0,2 \cdot 16 = 3,2 \text{ mm} \leq a \leq 0,7t_1 = 0,7 \cdot 6 = 4,2 \text{ mm}$$

Przyjęto  $a = 4 \text{ mm}$  .

Geometria przekroju poprzecznego

Pole przekroju poprzecznego

$$A = 2 \cdot 200 \cdot 16 + 900 \cdot 6 = 118 \cdot 10^2 \text{ mm}^2$$



Główne centralne momenty bezwładności

$$J_y = \frac{b_f(2t_f + h_w)^3}{12} - \frac{(b_f - t_w)h_w^3}{12} = \frac{200(2 \cdot 16 + 900)^3}{12} - \frac{(200 - 6)900^3}{12} = 170712,6 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

$$J_z = 2 \frac{t_f b_f^3}{12} + \frac{h_w t_w^3}{12} = 2 \frac{16 \cdot 200^3}{12} + \frac{900 \cdot 6^3}{12} = 2135,0 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

Wskaźnik wytrzymałości

$$W_{el,y} = \frac{J_y}{0,5 h_w + t_f} = \frac{170712,6 \cdot 10^4}{0,5 \cdot 900 + 16} = 3663,4 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

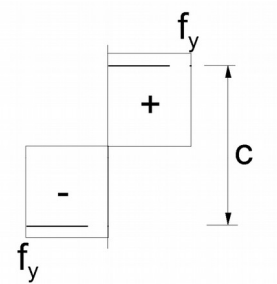
Określenie klasy przekroju przy zginaniu

środek

$$\frac{c}{t} = \frac{h_w - 2\sqrt{2}a}{t_w} = \frac{900 - 2\sqrt{2} \cdot 4}{6} = \frac{888,7}{6} = 148,1$$

$$\frac{c}{t} = 148,1 > \left(\frac{c}{t}\right)_{max} = 124 \varepsilon = 124 \cdot 0,92 = 114,6$$

Ścianka klasy 4.



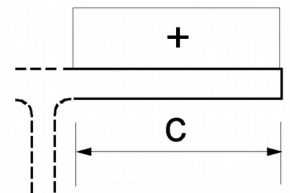
pas

$$\frac{c}{t} = \frac{0,5(b_f - t_w) - \sqrt{2}a}{t_f} = \frac{0,5(200 - 6)\sqrt{2} \cdot 4}{16} = \frac{91,3}{16} = 5,71$$

$$\frac{c}{t} = 5,71 < \left(\frac{c}{t}\right)_{max} = 9 \varepsilon = 9 \cdot 0,92 = 8,32$$

Ścianka klasy 1.

Przekrój spełnia wymagania przekrojów klasy 4.



Określenie efektywnych cech przekroju poprzecznego

Rozkład naprężeń normalnych w stanie sprężystym

$$\sigma_1 = \frac{M_{Ed}}{J_y} \frac{h_w}{2} \quad \text{- naprężenie ściskające}$$

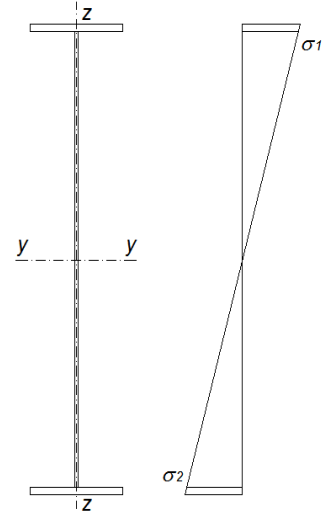
$$\sigma_2 = -\frac{M_{Ed}}{J_y} \frac{h_w}{2} \quad \text{- naprężenie rozciągające}$$

Relacja naprężeń brzegowych w środku

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = -1$$

Parametr niestateczności, przy  $\psi = -1$

$$k_\sigma = 23,9$$



Względna smukłość płytowa panelu środknika

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\frac{c}{t}}{28,4 \varepsilon \sqrt{k_\sigma}} = \frac{148,1}{28,4 \cdot 0,92 \sqrt{23,9}} = 1,154 > 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055 \psi} = \dots$$

$$= 0,5 + \sqrt{0,085 + 0,055 \cdot 1} = 0,874$$

Współczynnik redukcyjny uwzględniający niestateczność ścianki przęsłowej

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{1,154 - 0,055(3 - 1)}{1,154^2} = 0,784 \leq 1,0$$

Szerokości współpracujące ściskanej części środknika

$$b_{eff} = \rho b_c = \rho \frac{c}{1 - \psi} = 0,784 \frac{888,7}{1 + 1} = 348 \text{ mm}$$

$$b_{e1} = 0,4 b_{eff} = 0,4 \cdot 348 = 139 \text{ mm}$$

$$b_{e2} = 0,6 b_{eff} = 0,6 \cdot 348 = 209 \text{ mm}$$

Ostateczne wartości szerokości współpracujących środknika, uwzględniające strefę rozciąganą oraz spoiny łączące pasy ze środknikiem.

$$b_{ew1} = b_{e1} + \sqrt{2} a = 139 + \sqrt{2} \cdot 4 = 145 \text{ mm}$$

$$b_{ew2} = c - \frac{c}{1-\psi} + \sqrt{2}a + b_{e2} = 888,7 - \frac{888,7}{1+1} + \sqrt{2} \cdot 4 + 209 = 659 \text{ mm}$$

Szerokość środka ulegająca wyboczeniu lokalnemu

$$b_{ww} = h_w - (b_{ew1} + b_{ew2}) = 900 - (145 + 659) = 96 \text{ mm}$$

Cechy geometryczne przekroju efektywnego

$$A_{eff} = 2 \cdot 200 \cdot 16 + 6 \cdot 145 + 6 \cdot 659 = 112,2 \cdot 10^2 \text{ mm}^2$$

Położenie osi głównej centralnej

$$S_{xx} = 0,5 \cdot 200 \cdot 16^2 + 200 \cdot 16 (0,5 \cdot 16 + 900 + 16) + 145 \cdot 6 (16 + 900 - 0,5 \cdot 145) + 659 \cdot 6 (0,5 \cdot 659 + 16) = 5083 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

$$y_{eff,d} = \frac{S_{xx}}{A_{eff}} = \frac{5083 \cdot 10^3}{112,2 \cdot 10^2} = 453 \text{ mm}$$

$$y_{eff,g} = 932 - 453 = 479 \text{ mm}$$

Główny centralny moment bezwładności

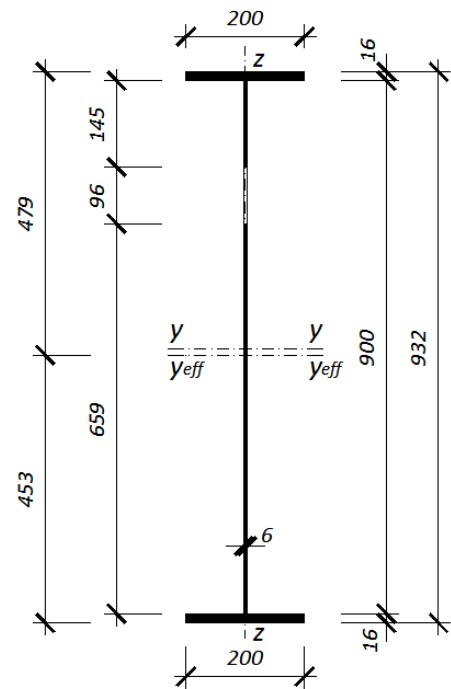
$$J_{y,eff} = \frac{200 \cdot 16^3}{12} + 200 \cdot 16 (453 - 0,5 \cdot 16)^2 + \frac{6 \cdot 659^3}{12} + 6 \cdot 659 (453 - 0,5 \cdot 659 - 16)^2 + \frac{6 \cdot 145^3}{12} + 6 \cdot 145 (479 - 0,5 \cdot 145 - 16)^2 + \frac{200 \cdot 16^3}{12} + 200 \cdot 16 (479 - 0,5 \cdot 16)^2 = 166673,8 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

Wskaźniki wytrzymałości

$$W_{y,effg} = \frac{J_{y,eff}}{y_{eff,g}} = \frac{166673,8 \cdot 10^4}{479} = 3478 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

$$W_{y,effd} = \frac{J_{y,eff}}{y_{eff,d}} = \frac{166673,8 \cdot 10^4}{453} = 3681 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

$$W_{y,eff,min} = \min(W_{y,effd}; W_{y,effg}) = \min(3478 \cdot 10^3; 3681 \cdot 10^3) = 3478 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$



Obliczeniowa nośność przekroju

$$M_{c,Rd} = W_{y,eff,min} \frac{f_{yk}}{\gamma_{M0}} = 3478 \cdot 10^3 \frac{275}{1,0} = 956,6 \cdot 10^6 \text{ Nmm} = 956,6 \text{ kNm}$$

Warunek obliczeniowej nośności przekroju

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} = \frac{939,78}{956,6} = 0,98 < 1,0$$

Warunek nośności został spełniony.

Sprawdzenie stateczności pasów przy smukłym środniku

Z uwagi na uwzględnianie nośności sprężystej przyjęto współczynnik  $k = 0,55$  .

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{900}{6} = 150,0 < k \frac{E}{f_y} \sqrt{\frac{A_w}{A_{fc}}} = 0,55 \frac{210000}{275} \sqrt{\frac{900 \cdot 6}{200 \cdot 16}} = 545,6$$

Pas ściskany nie ulegnie wyboczeniu w płaszczyźnie środnika.

Z uwagi na  $\rho = 0,784 > \rho_{lim} = 0,5$  wpływu niestateczności ścianek nie trzeba uwzględniać w analizie globalnej (statycznej).



**Przęsło 12**

$$M_{Ed} = 384,06 \text{ kNm} = 384,4 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

Parametry przekroju

$$b_f = 160 \text{ mm} \quad , \quad t_f = 6 \text{ mm} \quad , \quad h_w = 900 \text{ mm} \quad , \quad t_w = 6 \text{ mm}$$

Wstępny dobór grubości spoin łączących pasy ze środkiem

$$t_1 = 6 \text{ mm} \quad , \quad t_2 = 6 \text{ mm}$$

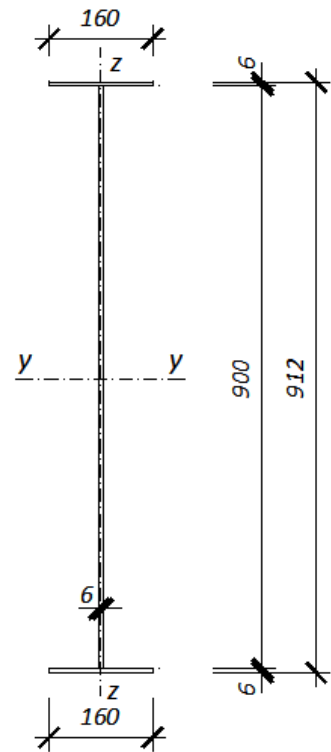
$$0,2t_2 = 0,2 \cdot 6 = 1,2 \text{ mm} \leq a \leq 0,7t_1 = 0,7 \cdot 6 = 4,2 \text{ mm}$$

Przyjęto  $a = 4 \text{ mm}$  .

Geometria przekroju poprzecznego

Pole przekroju poprzecznego

$$A = 2 \cdot 160 \cdot 6 + 900 \cdot 6 = 73,2 \cdot 10^2 \text{ mm}^2$$



Główne centralne momenty bezwładności

$$J_y = \frac{b_f(2t_f + h_w)^3}{12} - \frac{(b_f - t_w)h_w^3}{12} = \frac{160(2 \cdot 6 + 900)^3}{12} - \frac{(160 - 6)900^3}{12} = 75851 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

$$J_z = 2 \frac{t_f b_f^3}{12} + \frac{h_w t_w^3}{12} = 2 \frac{6 \cdot 160^3}{12} + \frac{900 \cdot 6^3}{12} = 411,2 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

Wskaźnik wytrzymałości

$$W_{el,y} = \frac{J_y}{0,5 h_w + t_f} = \frac{75851 \cdot 10^4}{0,5 \cdot 900 + 6} = 1663 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

Określenie klasy przekroju przy zginaniu

średnik

$$\frac{c}{t} = \frac{h_w - 2\sqrt{2}a}{t_w} = \frac{900 - 2\sqrt{2} \cdot 4}{6} = \frac{888,7}{6} = 148,1$$

$$\frac{c}{t} = 148,1 > \left(\frac{c}{t}\right)_{max} = 124 \varepsilon = 124 \cdot 0,92 = 114,6$$

Ścianka klasy 4.

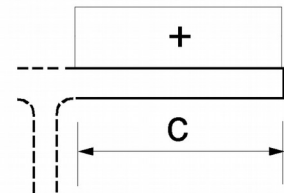
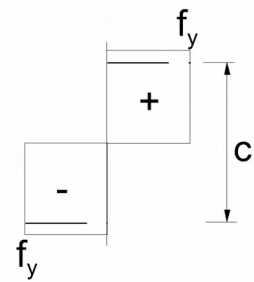
pas

$$\frac{c}{t} = \frac{0,5(b_f - t_w) - \sqrt{2}a}{t_f} = \frac{0,5(160 - 6)\sqrt{2} \cdot 4}{6} = \frac{71,3}{6} = 11,9$$

$$\frac{c}{t} = 11,9 < \left(\frac{c}{t}\right)_{max} = 14 \varepsilon = 14 \cdot 0,92 = 12,94$$

Ścianka klasy 3.

Przekrój spełnia wymagania przekrojów klasy 4.



Określenie efektywnych cech przekroju poprzecznego

Rozkład naprężeń normalnych w stanie sprężystym

$$\sigma_1 = \frac{M_{Ed}}{J_y} \frac{h_w}{2} \quad \text{- naprężenie ściskające}$$

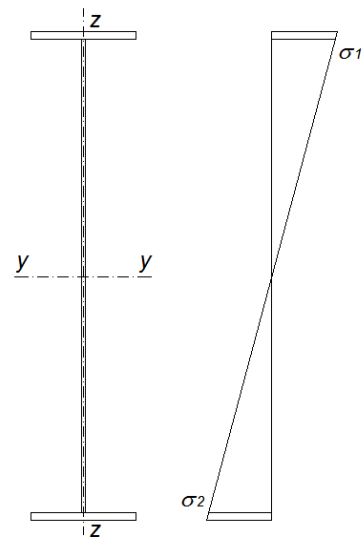
$$\sigma_2 = -\frac{M_{Ed}}{J_y} \frac{h_w}{2} \quad \text{- naprężenie rozciągające}$$

Relacja naprężeń brzegowych w środku

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = -1$$

Parametr niestateczności, przy  $\psi = -1$  wynosi

$$k_\sigma = 23,9$$



Względna smukłość płytowa panelu środkowego

$$\begin{aligned} \bar{\lambda}_p &= \frac{\frac{c}{t}}{28,4 \varepsilon \sqrt{k_\sigma}} = \frac{148,1}{28,4 \cdot 0,92 \sqrt{23,9}} = 1,154 > 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055 \psi} = \dots \\ &= 0,5 + \sqrt{0,085 + 0,055 \cdot 1} = 0,874 \end{aligned}$$

Współczynnik redukcyjny uwzględniający niestateczność ścianki przęsłowej

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{1,154 - 0,055(3 - 1)}{1,154^2} = 0,784 \leq 1,0$$

Szerokości współpracujące ściskanej części środnika

$$b_{eff} = \rho b_c = \rho \frac{c}{1 - \psi} = 0,784 \frac{888,7}{1 + 1} = 348 \text{ mm}$$

$$b_{e1} = 0,4 b_{eff} = 0,4 \cdot 348 = 139 \text{ mm}$$

$$b_{e2} = 0,6 b_{eff} = 0,6 \cdot 348 = 209 \text{ mm}$$

Ostateczne wartości szerokości współpracujących środnika, uwzględniające strefę rozciąganą oraz spoiny łączące pasy ze środnikiem.

$$b_{ew1} = b_{e1} + \sqrt{2} a = 139 + \sqrt{2} \cdot 4 = 145 \text{ mm}$$

$$b_{ew2} = c - \frac{c}{1 - \psi} + \sqrt{2} a + b_{e2} = 888,7 - \frac{888,7}{1 + 1} + \sqrt{2} \cdot 4 + 209 = 659 \text{ mm}$$

Szerokość środnika ulegająca wyboczeniu lokalnemu

$$b_{ww} = h_w - (b_{ew1} + b_{ew2}) = 900 - (145 + 659) = 96 \text{ mm}$$

Cechy geometryczne przekroju efektywnego

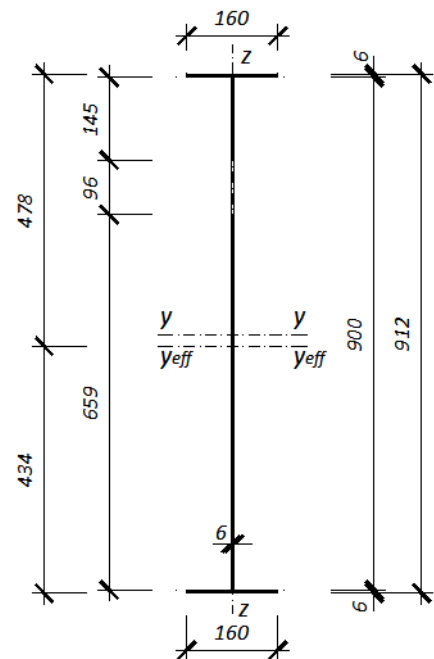
$$A_{eff} = 2 \cdot 160 \cdot 6 + 6 \cdot 145 + 6 \cdot 659 = 67,4 \cdot 10^2 \text{ mm}^2$$

Położenie osi głównej centralnej

$$S_{xx} = 0,5 \cdot 160 \cdot 6^2 + 160 \cdot 6(0,5 \cdot 6 + 900 + 6) + 145 \cdot 6(6 + 900 - 0,5 \cdot 145) + 659 \cdot 6(0,5 \cdot 659 + 6) = 2926,7 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

$$y_{eff,d} = \frac{S_{xx}}{A_{eff}} = \frac{2926,7 \cdot 10^3}{67,4 \cdot 10^2} = 434 \text{ mm}$$

$$y_{eff,g} = 912 - 434 = 478 \text{ mm}$$



Główny centralny moment bezwładności

$$\begin{aligned}
 J_{y,eff} &= \frac{160 \cdot 6^3}{12} + 160 \cdot 6 (434 - 0,5 \cdot 6)^2 + \\
 &+ \frac{6 \cdot 659^3}{12} + 6 \cdot 659 (434 - 0,5 \cdot 659 - 6)^2 + \\
 &+ \frac{6 \cdot 145^3}{12} + 6 \cdot 145 (478 - 0,5 \cdot 145 - 6)^2 + \\
 &+ \frac{160 \cdot 6^3}{12} + 160 \cdot 6 (478 - 0,5 \cdot 6)^2 = \\
 &= 71671 \cdot 10^4 \text{ mm}^4
 \end{aligned}$$

Wskaźniki wytrzymałości

$$W_{y,effg} = \frac{J_{y,eff}}{y_{eff,g}} = \frac{71671 \cdot 10^4}{478} = 1499 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

$$W_{y,effd} = \frac{J_{y,eff}}{y_{eff,d}} = \frac{71671 \cdot 10^4}{434} = 1651 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

$$W_{y,eff,min} = \min(W_{y,effd}; W_{y,effg}) = \min(1499 \cdot 10^3; 1651 \cdot 10^3) = 1499 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

Obliczeniowa nośność przekroju

$$M_{c,Rd} = W_{y,eff,min} \frac{f_{yk}}{\gamma_{M0}} = 1499 \cdot 10^3 \frac{275}{1,0} = 412,3 \cdot 10^6 \text{ Nmm} = 412,3 \text{ kNm}$$

Warunek obliczeniowej nośności przekroju – przęsło 12

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} = \frac{384,06}{412,3} = 0,93 < 1,0$$

Warunek nośności został spełniony.

Sprawdzenie stateczności pasów przy smukłym środniku

Z uwagi na uwzględnianie nośności sprężystej przyjęto współczynnik  $k = 0,55$  .

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{900}{6} = 150,0 < k \frac{E}{f_y} \sqrt{\frac{A_w}{A_{fc}}} = 0,55 \frac{210000}{275} \sqrt{\frac{900 \cdot 6}{160 \cdot 6}} = 996,1$$

Pas ściskany nie ulegnie wyboczeniu w płaszczyźnie środnika.

Z uwagi na  $\rho = 0,784 > \rho_{lim} = 0,5$  wpływu niestateczności ścianek nie trzeba uwzględniać w analizie globalnej (statycznej).

### Przęsło 23

$$M_{Ed} = 470,86 \text{ kNm} = 470,86 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

Parametry przekroju

$$b_f = 160 \text{ mm} \quad , \quad t_f = 8 \text{ mm} \quad , \quad h_w = 900 \text{ mm} \quad , \quad t_w = 6 \text{ mm}$$

Wstępny dobór grubości spoin łączących pasy ze środkiem

$$t_1 = 6 \text{ mm} \quad , \quad t_2 = 6 \text{ mm}$$

$$0,2t_2 = 0,2 \cdot 6 = 1,2 \text{ mm} \leq a \leq 0,7t_1 = 0,7 \cdot 6 = 4,2 \text{ mm}$$

Przyjęto  $a = 4 \text{ mm}$  .

Geometria przekroju poprzecznego

Pole przekroju poprzecznego

$$A = 2 \cdot 160 \cdot 8 + 900 \cdot 6 = 79,6 \cdot 10^2 \text{ mm}^2$$

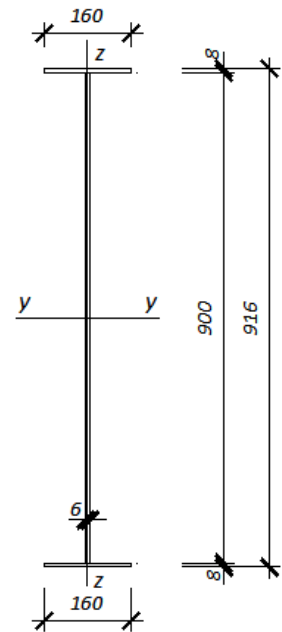
Główne centralne momenty bezwładności

$$J_y = \frac{b_f(2t_f + h_w)^3}{12} - \frac{(b_f - t_w)h_w^3}{12} = \frac{160(2 \cdot 8 + 900)^3}{12} - \frac{(160 - 6)900^3}{12} = 89217 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

$$J_z = 2 \frac{t_f b_f^3}{12} + \frac{h_w t_w^3}{12} = 2 \frac{8 \cdot 160^3}{12} + \frac{900 \cdot 6^3}{12} = 548 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

Wskaźnik wytrzymałości

$$W_{el,y} = \frac{J_y}{0,5 h_w + t_f} = \frac{89217 \cdot 10^4}{0,5 \cdot 900 + 8} = 1948 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$



Określenie klasy przekroju przy zginaniu

środek

$$\frac{c}{t} = \frac{h_w - 2\sqrt{2}a}{t_w} = \frac{900 - 2\sqrt{2} \cdot 4}{6} = \frac{888,7}{6} = 148,1$$

$$\frac{c}{t} = 148,1 > \left(\frac{c}{t}\right)_{max} = 124 \varepsilon = 124 \cdot 0,92 = 114,6$$

Ścianka klasy 4.

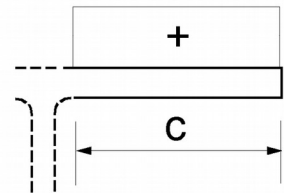
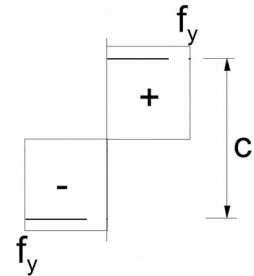
pas

$$\frac{c}{t} = \frac{0,5(b_f - t_w) - \sqrt{2}a}{t_f} = \frac{0,5(160 - 6)\sqrt{2} \cdot 4}{8} = \frac{71,3}{8} = 8,92$$

$$\frac{c}{t} = 8,92 < \left(\frac{c}{t}\right)_{max} = 10 \varepsilon = 10 \cdot 0,92 = 9,24$$

Ścianka klasy 2.

Przekrój spełnia wymagania przekrojów klasy 4.



Określenie efektywnych cech przekroju poprzecznego

Rozkład naprężeń normalnych w stanie sprężystym

$$\sigma_1 = \frac{M_{Ed}}{J_y} \frac{h_w}{2} \quad \text{- naprężenie ściskające}$$

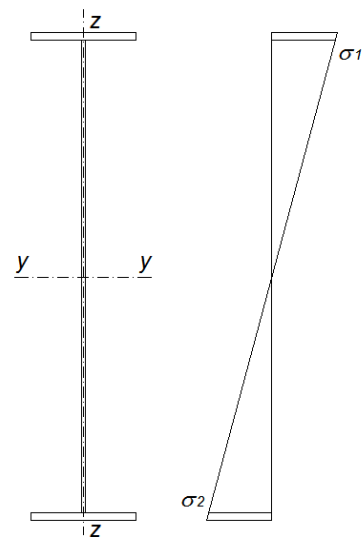
$$\sigma_2 = -\frac{M_{Ed}}{J_y} \frac{h_w}{2} \quad \text{- naprężenie rozciągające}$$

Relacja naprężeń brzegowych w środku

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = -1$$

Parametr niestateczności, przy  $\psi = -1$

$$k_\sigma = 23,9$$



Względna smukłość płytowa panelu środника

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\frac{c}{t}}{28,4 \varepsilon \sqrt{k_\sigma}} = \frac{148,1}{28,4 \cdot 0,92 \sqrt{23,9}} = 1,154 > 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055 \psi} = \dots$$
$$= 0,5 + \sqrt{0,085 + 0,055 \cdot 1} = 0,874$$

Współczynnik redukcyjny uwzględniający niestateczność ścianki przeszłowej

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{1,154 - 0,055(3 - 1)}{1,154^2} = 0,784 \leq 1,0 \quad .$$

Szerokości współpracujące ściskanej części środnika

$$b_{eff} = \rho b_c = \rho \frac{c}{1 - \psi} = 0,784 \frac{888,7}{1 + 1} = 348 \text{ mm}$$

$$b_{e1} = 0,4 b_{eff} = 0,4 \cdot 348 = 139 \text{ mm}$$

$$b_{e2} = 0,6 b_{eff} = 0,6 \cdot 348 = 209 \text{ mm}$$

Ostateczne wartości szerokości współpracujących środnika, uwzględniające strefę rozciąganą oraz spoiny łączące pasy ze środnikiem.

$$b_{ew1} = b_{e1} + \sqrt{2} a = 139 + \sqrt{2} \cdot 4 = 145 \text{ mm}$$

$$b_{ew2} = c - \frac{c}{1 - \psi} + \sqrt{2} a + b_{e2} = 888,7 - \frac{888,7}{1 + 1} + \sqrt{2} \cdot 4 + 209 = 659 \text{ mm}$$

Szerokość środnika ulegająca wyboczeniu lokalnemu

$$b_{ww} = h_w - (b_{ew1} + b_{ew2}) = 900 - (145 + 659) = 96 \text{ mm}$$

Cechy geometryczne przekroju efektywnego

$$A_{eff} = 2 \cdot 160 \cdot 8 + 6 \cdot 145 + 6 \cdot 659 = 73,8 \cdot 10^2 \text{ mm}^2$$

Położenie osi głównej centralnej

$$S_{xx} = 0,5 \cdot 160 \cdot 8^2 + 160 \cdot 8 (0,5 \cdot 8 + 900 + 8) + 145 \cdot 6 (8 + 900 - 0,5 \cdot 145) + 659 \cdot 6 (0,5 \cdot 659 + 8) = 3234 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

$$y_{eff,d} = \frac{S_{xx}}{A_{eff}} = \frac{3234 \cdot 10^3}{73,8 \cdot 10^2} = 438 \text{ mm}$$

$$y_{eff,g} = 916 - 438 = 478 \text{ mm}$$

Główny centralny moment bezwładności

$$J_{y,eff} = \frac{160 \cdot 8^3}{12} + 160 \cdot 8 (438 - 0,5 \cdot 8)^2 + \frac{6 \cdot 659^3}{12} + 6 \cdot 659 (438 - 0,5 \cdot 659 - 8)^2 + \frac{6 \cdot 145^3}{12} + 6 \cdot 145 (478 - 0,5 \cdot 145 - 8)^2 + \frac{160 \cdot 8^3}{12} + 160 \cdot 8 (478 - 0,5 \cdot 8)^2 = 85071 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

Wskaźniki wytrzymałości

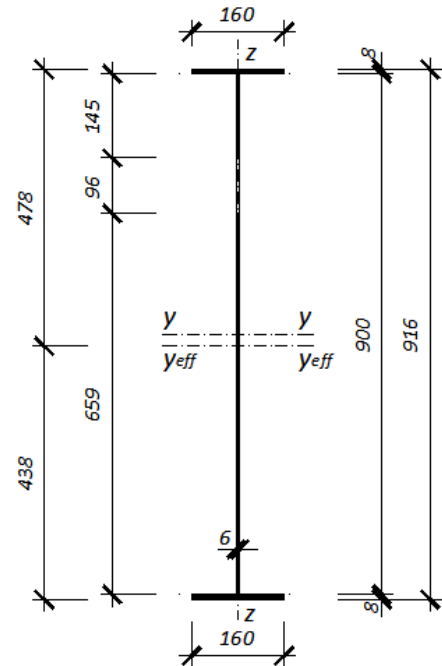
$$W_{y,effg} = \frac{J_{y,eff}}{y_{eff,g}} = \frac{85071 \cdot 10^4}{478} = 1779 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

$$W_{y,effd} = \frac{J_{y,eff}}{y_{eff,d}} = \frac{85071 \cdot 10^4}{438} = 1942 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

$$W_{y,eff,min} = \min(W_{y,effd}; W_{y,effg}) = \min(1779 \cdot 10^3; 1942 \cdot 10^3) = 1779 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

Obliczeniowa nośność przekroju

$$M_{c,Rd} = W_{y,eff,min} \frac{f_{yk}}{\gamma_{M0}} = 1779 \cdot 10^3 \frac{275}{1,0} = 489,4 \cdot 10^6 \text{ Nmm} = 489,4 \text{ kNm}$$





Warunek obliczeniowej nośności przekroju – przeszło 23

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} = \frac{470,86}{489,4} = 0,96 < 1,0$$

Warunek nośności został spełniony.

Sprawdzenie stateczności pasów przy smukłym środniku

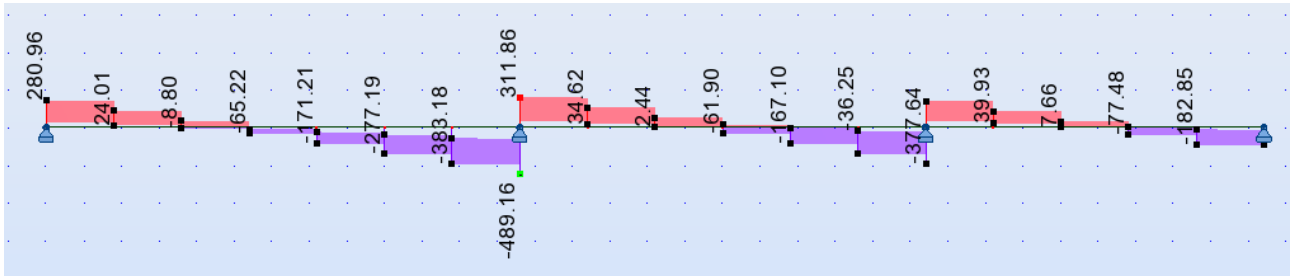
Z uwagi na uwzględnianie nośności sprężystej przyjęto współczynnik  $k = 0,55$ .

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{900}{6} = 150,0 < k \frac{E}{f_y} \sqrt{\frac{A_w}{A_{fc}}} = 0,55 \frac{210000}{275} \sqrt{\frac{900 \cdot 6}{160 \cdot 8}} = 862,7$$

Pas ściskany nie ulegnie wyboczeniu w płaszczyźnie środnika.

Z uwagi na  $\rho = 0,899 > \rho_{lim} = 0,5$  wpływu niestateczności ścianek nie trzeba uwzględniać w analizie globalnej (statycznej).

### Sprawdzenie nośności na ścinanie



Rysunek 26: Obwiednia sił poprzecznych w podciągu.

Maksymalna siła poprzeczna w podciągu

$$V_{Ed,max} = 489,16 \text{ kN} \quad \text{- lewa strona podpory 1.}$$

Przyjęcie układu żeber poprzecznych

Przyjęto żebra podporowe i pośrednie jako sztywne. Rozstaw żeber poprzecznych  $a = 1800 \text{ mm}$  (w miejscach belek stropowych). Założono brak żeber podłużnych środnika.

### Określenie nośności na ścinanie podciągu w strefie podpory 1

Minimalny parametr niestateczności środnika przy ścinaniu

Wobec braku żeber podłużnych przyjęto  $k_{\tau sl} = 0$

$$\frac{a}{h_w} = \frac{1800}{900} = 2 > 1,0$$

$$k_{\tau} = 5,34 + 4,00 \left( \frac{h_w}{a} \right)^2 = 5,34 + 4,00 \left( \frac{900}{1800} \right)^2 = 6,34$$

Sprawdzenie warunku stateczności uźebrowanego środnika

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{900}{6} = 150,0 > \frac{31}{\eta} \varepsilon \sqrt{k_{\tau}} = \frac{31}{1,2} 0,92 \cdot \sqrt{6,34} = 60,13$$

Środnik traci stateczność, powinien zostać uźebrowany przynajmniej na podporach belki.

Smukłość płytowa środnika

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{37,4 t_w \varepsilon \sqrt{k_{\tau}}} = \frac{900}{37,4 \cdot 6 \cdot 0,92 \sqrt{6,34}} = 1,723 > 1,08$$

Współczynnik niestateczności środnika przy ścinaniu

$$\chi_w = \frac{1,37}{0,7 + \bar{\lambda}_w} = \frac{1,37}{0,7 + 1,723} = 0,565$$

Udział środnika w nośności obliczeniowej przy ścinaniu

$$V_{bw, Rd} = \frac{\chi_w f_y h_w t_w}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} = \frac{0,565 \cdot 275 \cdot 900 \cdot 6}{\sqrt{3} \cdot 1,0} = 484,7 \cdot 10^3 \text{ N} = 484,7 \text{ kN}$$

Udział pasów w nośności obliczeniowej przy ścinaniu.

Określenie obliczeniowej nośności pasów przekroju

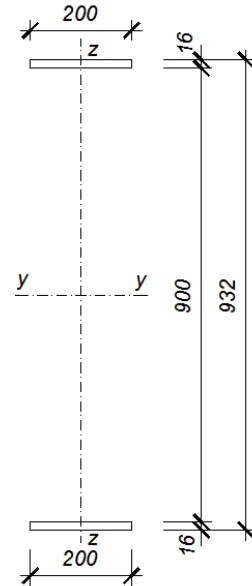
Moment bezwładności pasów

$$J_{fy} = 2 \left[ \frac{200 \cdot 16^3}{12} + 200 \cdot 16 \left( \frac{900 + 16}{2} \right)^2 \right] =$$

$$= 134262,6 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

Wskaźnik wytrzymałości przekroju zbudowanego z efektywnych części pasów

$$W_{fy} = \frac{J_{fy}}{\frac{h_w}{2} + t_f} = \frac{134262,6 \cdot 10^4}{\frac{900}{2} + 16} = 2881,2 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$



Obliczeniowa nośność pasów

$$M_{f,Rd} = \frac{W_{fy} f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{2881,2 \cdot 10^3 \cdot 275}{1,0} = 792,3 \cdot 10^6 \text{ N mm} = 792,3 \text{ kNm}$$

Obliczeniowy moment zginający na podporze 1

$$M_{Ed} = 834,3 \text{ kNm}$$

Z uwagi na  $M_{Ed} = 834,3 \text{ kNm} > M_{f,Rd} = 792,3 \text{ kNm}$  nośność pasów jest całkowicie wykorzystana. Z tego względu udział pasów w nośności na ścinanie zostaje pominięty.

Obliczeniowa nośność przekroju na ścinanie

$$V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} + V_{bf,Rd} = 484,7 + 0 = 484,7 \text{ kN} < V_{b,Rd,max} = \frac{\eta f_y h_w t_w}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} =$$

$$= \frac{1,2 \cdot 275 \cdot 900 \cdot 6}{\sqrt{3} \cdot 1,0} = 1028,8 \cdot 10^3 \text{ N} = 1028,8 \text{ kN}$$

Sprawdzenie warunku nośności

$$\eta_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{b,Rd}} = \frac{489,16}{484,7} = 1,01 > 1,0$$

Warunek nośności nie jest zachowany.

Zwiększenie nośności na ścinanie można uzyskać przez dodatkowe usztywnienie środnika żebrzem poprzecznym w połowie odległości między belkami stropowymi.

W takim przypadku rozstaw żeber wyniesie  $a = 900 \text{ mm}$ .

Minimalny parametr niestateczności środnika przy ścinaniu

Wobec braku żeber podłużnych przyjęto  $k_{\tau sl} = 0$

$$\frac{a}{h_w} = \frac{900}{900} = 1,0 = 1,0$$

$$k_{\tau} = 5,34 + 4,00 \left( \frac{h_w}{a} \right)^2 = 5,34 + 4,00 \left( \frac{900}{900} \right)^2 = 9,34$$

Sprawdzenie warunku stateczności uźebrowanego środnika

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{900}{6} = 150,0 > \frac{31}{\eta} \varepsilon \sqrt{k_{\tau}} = \frac{31}{1,2} 0,92 \cdot \sqrt{9,34} = 72,98$$

Środnik traci stateczność, powinien zostać uźebrowany przynajmniej na podporach belki.

Smukłość płytowa środnika

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{37,4 t_w \varepsilon \sqrt{k_{\tau}}} = \frac{900}{37,4 \cdot 6 \cdot 0,92 \sqrt{9,34}} = 1,42 > 1,08$$

Współczynnik niestateczności środnika przy ścinaniu

$$\chi_w = \frac{1,37}{0,7 + \bar{\lambda}_w} = \frac{1,37}{0,7 + 1,42} = 0,646$$

Udział środnika w nośności obliczeniowej przy ścinaniu

$$V_{bw,Rd} = \frac{\chi_w f_y h_w t_w}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} = \frac{0,646 \cdot 275 \cdot 900 \cdot 6}{\sqrt{3} \cdot 1,0} = 484,7 \cdot 10^3 \text{ N} = 554,15 \text{ kN}$$

We wcześniejszych obliczeniach wykazano, że udział pasów w nośności na ścinanie należy pominąć.

Obliczeniowa nośność przekroju na ścinanie

$$\begin{aligned} V_{b,Rd} &= V_{bw,Rd} + V_{bf,Rd} = 554,15 + 0 = 554,15 \text{ kN} < V_{b,Rd,max} = \frac{\eta f_y h_w t_w}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} = \\ &= \frac{1,2 \cdot 275 \cdot 900 \cdot 6}{\sqrt{3} \cdot 1,0} = 1028,8 \cdot 10^3 \text{ N} = 1028,8 \text{ kN} \end{aligned}$$

Sprawdzenie warunku nośności

$$\eta_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{b,Rd}} = \frac{489,16}{554,15} = 0,88 < 1,0$$

Warunek nośności jest zachowany.

### ***Określenie nośności na ścinanie podciągu w strefie podpory 0***

Siła poprzeczna na podporze 0:  $V_{Ed} = 280,96 \text{ kN}$  .

Przekrój poprzeczny podciągu jak w przęśle 01.

Rozstaw żeber poprzecznych  $a = 1800 \text{ mm}$

Minimalny parametr niestateczności środnika przy ścinaniu

Wobec braku żeber podłużnych przyjęto  $k_{\tau sl} = 0$

$$\frac{a}{h_w} = \frac{1800}{900} = 2 > 1,0$$

$$k_{\tau} = 5,34 + 4,00 \left( \frac{h_w}{a} \right)^2 = 5,34 + 4,00 \left( \frac{900}{1800} \right)^2 = 6,34$$

Sprawdzenie warunku stateczności uźebrowanego środnika

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{900}{6} = 150,0 > \frac{31}{\eta} \varepsilon \sqrt{k_{\tau}} = \frac{31}{1,2} 0,92 \cdot \sqrt{6,34} = 60,13$$

Środnik traci stateczność, powinien zostać uźebrowany przynajmniej na podporach belki.

Smukłość płytowa środnika

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{37,4 t_w \varepsilon \sqrt{k_\tau}} = \frac{900}{37,4 \cdot 6 \cdot 0,92 \sqrt{6,34}} = 1,723 > 1,08$$

Współczynnik niestateczności środnika przy ścinaniu

$$\chi_w = \frac{1,37}{0,7 + \bar{\lambda}_w} = \frac{1,37}{0,7 + 1,723} = 0,565$$

Udział środnika w nośności obliczeniowej przy ścinaniu

$$V_{bw, Rd} = \frac{\chi_w f_y h_w t_w}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} = \frac{0,565 \cdot 275 \cdot 900 \cdot 6}{\sqrt{3} \cdot 1,0} = 484,7 \cdot 10^3 \text{ N} = 484,7 \text{ kN}$$

Udział pasów w nośności obliczeniowej przy ścinaniu.

Określenie obliczeniowej nośności pasów przekroju

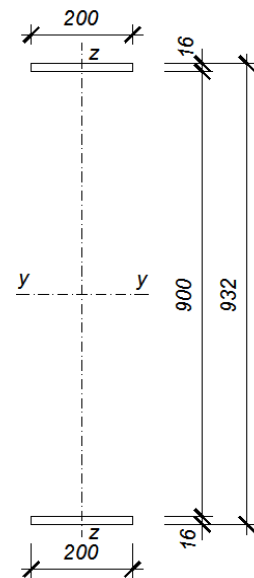
Moment bezwładności pasów

$$J_{fy} = 2 \left[ \frac{200 \cdot 16^3}{12} + 200 \cdot 16 \left( \frac{900 + 16}{2} \right)^2 \right] = 134262,6 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

Wskaźnik wytrzymałości przekroju zbudowanego

z efektywnych części pasów

$$W_{fy} = \frac{J_{fy}}{\frac{h_w}{2} + t_f} = \frac{134262,6 \cdot 10^4}{\frac{900}{2} + 16} = 2881,2 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$



Obliczeniowa nośność pasów

$$M_{f, Rd} = \frac{W_{fy} f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{2881,2 \cdot 10^3 \cdot 275}{1,0} = 792,3 \cdot 10^6 \text{ N mm} = 792,3 \text{ kNm}$$

Obliczeniowy moment zginający na podporze 1

$$M_{Ed} = 0,0 \text{ kNm}$$

Z uwagi na  $M_{Ed} = 0,0 \text{ kNm} < M_{f, Rd} = 792,3 \text{ kNm}$  określa się udział pasów

w przenoszeniu ścinania.

$$c = a \left( 0,25 + \frac{1,6 b_f t_f^2 f_y}{t_w h_w^2 f_y} \right) = 1800 \left( 0,25 + \frac{1,6 \cdot 200 \cdot 16^2 \cdot 275}{6 \cdot 900^2 \cdot 275} \right) = 480 \text{ mm}$$

$$V_{bf, Rd} = \frac{b_f t_f^2 f_y}{c \gamma_{M1}} \left[ 1 - \left( \frac{M_{Ed}}{M_{f, Rd}} \right)^2 \right] = \frac{200 \cdot 16^2 \cdot 275}{480 \cdot 1,0} \left[ 1 - \left( \frac{0}{792,3} \right)^2 \right] = 29,3 \cdot 10^3 \text{ N} = 29,3 \text{ kN}$$

Obliczeniowa nośność przekroju na ścinanie

$$V_{b, Rd} = V_{bw, Rd} + V_{bf, Rd} = 484,7 + 29,3 = 514,0 \text{ kN} < V_{b, Rd, max} = \frac{\eta f_y h_w t_w}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} =$$

$$= \frac{1,2 \cdot 275 \cdot 900 \cdot 6}{\sqrt{3} \cdot 1,0} = 1028,8 \cdot 10^3 \text{ N} = 1028,8 \text{ kN}$$

Sprawdzenie warunku nośności

$$\eta_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{b, Rd}} = \frac{280,96}{514,0} = 0,58 < 1,0$$

Warunek nośności jest zachowany.

### **Określenie nośności na ścinanie podciągu w strefie podpory 3**

Siła poprzeczna na podporze 3:  $V_{Ed} = 184,12 \text{ kN}$  .

Przekrój poprzeczny podciągu jak w przęśle 23.

Rozstaw żeber poprzecznych  $a = 1800 \text{ mm}$

Minimalny parametr niestateczności środniczka przy ścinaniu

Wobec braku żeber podłużnych przyjęto  $k_{\tau sl} = 0$

$$\frac{a}{h_w} = \frac{1800}{900} = 2 > 1,0$$

$$k_{\tau} = 5,34 + 4,00 \left( \frac{h_w}{a} \right)^2 = 5,34 + 4,00 \left( \frac{900}{1800} \right)^2 = 6,34$$

Sprawdzenie warunku stateczności uźebrowanego środniczka

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{900}{6} = 150,0 > \frac{31}{\eta} \varepsilon \sqrt{k_\tau} = \frac{31}{1,2} \cdot 0,92 \cdot \sqrt{6,34} = 60,13$$

Środek traci stateczność, powinien zostać uźbrowany przynajmniej na podporach belki.

Smukłość płytowa środka

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{37,4 t_w \varepsilon \sqrt{k_\tau}} = \frac{900}{37,4 \cdot 6 \cdot 0,92 \sqrt{6,34}} = 1,723 > 1,08$$

Współczynnik niestateczności środka przy ścinaniu

$$\chi_w = \frac{1,37}{0,7 + \bar{\lambda}_w} = \frac{1,37}{0,7 + 1,723} = 0,565$$

Udział środka w nośności obliczeniowej przy ścinaniu

$$V_{bw, Rd} = \frac{\chi_w f_y h_w t_w}{\sqrt{3} \gamma_{MI}} = \frac{0,565 \cdot 275 \cdot 900 \cdot 6}{\sqrt{3} \cdot 1,0} = 484,7 \cdot 10^3 \text{ N} = 484,7 \text{ kN}$$

Udział pasów w nośności obliczeniowej przy ścinaniu.

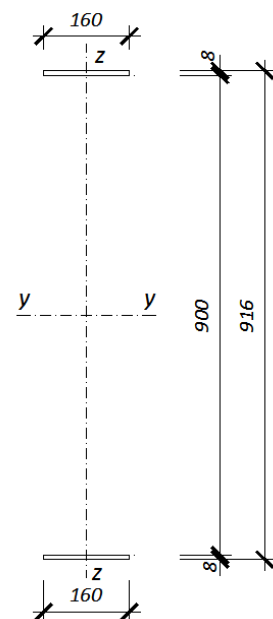
Określenie obliczeniowej nośności pasów przekroju

Moment bezwładności pasów

$$J_{fy} = 2 \left[ \frac{160 \cdot 8^3}{12} + 160 \cdot 8 \left( \frac{900 + 8}{2} \right)^2 \right] = 52767 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

Wskaźnik wytrzymałości przekroju zbudowanego z efektywnych części pasów

$$W_{fy} = \frac{J_{fy}}{\frac{h_w}{2} + t_f} = \frac{52767 \cdot 10^4}{\frac{900}{2} + 8} = 1152 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$





Obliczeniowa nośność pasów

$$M_{f,Rd} = \frac{W_{fy} f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{1152 \cdot 10^3 \cdot 275}{1,0} = 316,8 \cdot 10^6 \text{ N mm} = 316,8 \text{ kNm}$$

Obliczeniowy moment zginający na podporze 3

$$M_{Ed} = 0,0 \text{ kNm} .$$

Z uwagi na  $M_{Ed} = 0,0 \text{ kNm} < M_{f,Rd} = 316,8 \text{ kNm}$  określa się udział pasów w przenoszeniu ścinania.

$$c = a \left( 0,25 + \frac{1,6 b_f t_f^2 f_y}{t_w h_w^2 f_y} \right) = 1800 \left( 0,25 + \frac{1,6 \cdot 160 \cdot 8^2 \cdot 275}{6 \cdot 900^2 \cdot 275} \right) = 456 \text{ mm}$$

$$V_{bf,Rd} = \frac{b_f t_f^2 f_y}{c \gamma_{M1}} \left[ 1 - \left( \frac{M_{Ed}}{M_{f,Rd}} \right)^2 \right] = \frac{160 \cdot 8^2 \cdot 275}{456 \cdot 1,0} \left[ 1 - \left( \frac{0}{316,8} \right)^2 \right] = 6,2 \cdot 10^3 \text{ N} = 6,2 \text{ kN}$$

Obliczeniowa nośność przekroju na ścinanie

$$\begin{aligned} V_{b,Rd} &= V_{bw,Rd} + V_{bf,Rd} = 484,7 + 6,2 = 490,9 \text{ kN} < V_{b,Rd,max} = \frac{\eta f_y h_w t_w}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} = \\ &= \frac{1,2 \cdot 275 \cdot 900 \cdot 6}{\sqrt{3} \cdot 1,0} = 1028,8 \cdot 10^3 \text{ N} = 1028,8 \text{ kN} \end{aligned}$$

Sprawdzenie warunku nośności

$$\eta_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{b,Rd}} = \frac{184,12}{490,9} = 0,38 < 1,0$$

Warunek nośności jest zachowany.

### Wymiarowanie przekroju podporowego (podpora 1)

Siły wewnętrzne na podporze

$$M_{Ed} = 833,63 \text{ kNm} \quad , \quad V_{Ed} = 489,16 \text{ kN} \quad .$$

Dobór pasów przekroju

$$A_f \geq \frac{M_{Ed}}{h_w f_y} - \frac{h_w t_w}{6} \left[ 1 - \left( \frac{V_{Ed}}{V_{b,Rd}} \right)^2 \right] = \frac{833,6}{900 \cdot 275} - \frac{900 \cdot 6}{6} \left[ 1 - \left( \frac{489,16}{554,15} \right)^2 \right] = 31,69 \cdot 10^2 \text{ mm}^2$$

Szerokość pasa

$$b_f = \left( \frac{1}{4} \div \frac{1}{5} \right) h_w = \left( \frac{1}{4} \div \frac{1}{5} \right) 900 = 225 \div 180 \text{ mm}$$

Przyjęto:  $b_f = 200 \text{ mm}$

Minimalna grubość pasa

$$t_f = \frac{A_f}{b_f} = \frac{31,69 \cdot 10^2}{200} = 15,8 \text{ mm} \quad .$$

Ostatecznie przyjęto pasy  $b_f \times t_f = 200 \times 16 \text{ mm}$

Przyjęte wymiary odpowiadają parametrom przekroju przęsła 01.

Sprawdzenie efektu szerokiego pasa dla strefy podporowej

Wartość odczytana z normy PN-EN 1993-1-5

$$L_e = 0,25 (l_{01} + l_{12}) = 0,25 (12,6 + 11,0) = 5,85 \text{ m}$$

Szerokość wspornikowej części pasa

$$b_0 = 0,5 (b_f - t_w) = 0,5 (200 - 6) = 97 \text{ mm}$$

$$b_0 = 97 \text{ mm} < \frac{L_e}{50} = \frac{5850}{50} = 117 \text{ mm}$$

Efekt szerokiego pasa nie występuje.

Sprawdzenie nośności przyjętego przekroju

$$M_{Ed} = 833,63 \text{ kNm} = 833,63 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

Parametry przekroju

$$b_f = 200 \text{ mm} , \quad t_f = 16 \text{ mm} , \quad h_w = 900 \text{ mm} , \quad t_w = 6 \text{ mm}$$

Wstępny dobór grubości spoin łączących pasy ze środkiem

$$t_1 = 6 \text{ mm} , \quad t_2 = 16 \text{ mm}$$

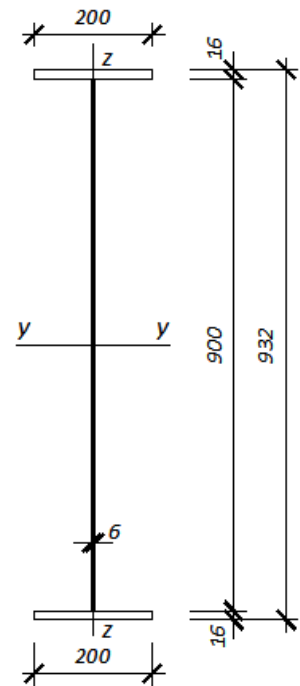
$$0,2t_2 = 0,2 \cdot 16 = 3,2 \text{ mm} \leq a \leq 0,7t_1 = 0,7 \cdot 6 = 4,2 \text{ mm}$$

Przyjęto  $a = 4 \text{ mm}$  .

Geometria przekroju poprzecznego

Pole przekroju poprzecznego

$$A = 2 \cdot 200 \cdot 16 + 900 \cdot 6 = 118 \cdot 10^2 \text{ mm}^2$$



Główne centralne momenty bezwładności

$$J_y = \frac{b_f(2t_f + h_w)^3}{12} - \frac{(b_f - t_w)h_w^3}{12} = \frac{200(2 \cdot 16 + 900)^3}{12} - \frac{(200 - 6)900^3}{12} = 170712,6 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

$$J_z = 2 \frac{t_f b_f^3}{12} + \frac{h_w t_w^3}{12} = 2 \frac{16 \cdot 200^3}{12} + \frac{900 \cdot 6^3}{12} = 2135,0 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

Wskaźnik wytrzymałości

$$W_{el,y} = \frac{J_y}{0,5 h_w + t_f} = \frac{170712,6 \cdot 10^4}{0,5 \cdot 900 + 16} = 3663,4 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

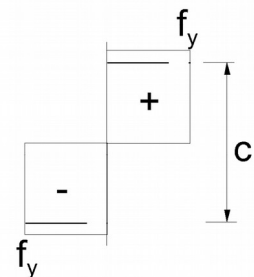
Określenie klasy przekroju przy zginaniu

środek

$$\frac{c}{t} = \frac{h_w - 2\sqrt{2}a}{t_w} = \frac{900 - 2\sqrt{2} \cdot 4}{6} = \frac{888,7}{6} = 148,1$$

$$\frac{c}{t} = 148,1 > \left(\frac{c}{t}\right)_{max} = 124 \varepsilon = 124 \cdot 0,92 = 114,6$$

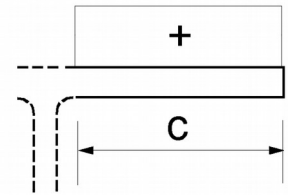
Ścianka klasy 4.



pas

$$\frac{c}{t} = \frac{0,5(b_f - t_w) - \sqrt{2}a}{t_f} = \frac{0,5(200 - 6)\sqrt{2} \cdot 4}{16} = \frac{91,3}{16} = 5,71$$

$$\frac{c}{t} = 5,71 < \left(\frac{c}{t}\right)_{max} = 9 \varepsilon = 9 \cdot 0,92 = 8,32$$



Ścianka klasy 1.

Przekrój spełnia wymagania przekrojów klasy 4.

Określenie efektywnych cech przekroju poprzecznego

Rozkład naprężeń normalnych w stanie sprężystym

$$\sigma_1 = \frac{M_{Ed}}{J_y} \frac{h_w}{2} \quad \text{- naprężenie ściskające}$$

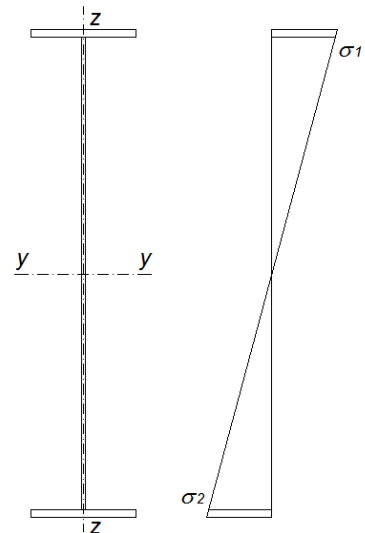
$$\sigma_2 = -\frac{M_{Ed}}{J_y} \frac{h_w}{2} \quad \text{- naprężenie rozciągające}$$

Relacja naprężeń brzegowych w środku

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = -1$$

Parametr niestateczności, przy  $\psi = -1$

$$k_\sigma = 23,9$$



Względna smukłość płytowa panelu środkowego

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\frac{c}{t}}{28,4 \varepsilon \sqrt{k_\sigma}} = \frac{148,1}{28,4 \cdot 0,92 \sqrt{23,9}} = 1,154 > 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055 \psi} = \dots$$

$$= 0,5 + \sqrt{0,085 + 0,055 \cdot 1} = 0,874$$

Współczynnik redukcyjny uwzględniający niestateczność ścianki przęsłowej

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{1,154 - 0,055(3 - 1)}{1,154^2} = 0,784 \leq 1,0$$

Szerokości współpracujące ściskanej części środnika

$$b_{eff} = \rho b_c = \rho \frac{c}{1-\psi} = 0,784 \frac{888,7}{1+1} = 348 \text{ mm}$$

$$b_{e1} = 0,4 b_{eff} = 0,4 \cdot 348 = 139 \text{ mm}$$

$$b_{e2} = 0,6 b_{eff} = 0,6 \cdot 348 = 209 \text{ mm}$$

Ostateczne wartości szerokości współpracujących środnika, uwzględniające strefę rozciąganą oraz spoiny łączące pasy ze środnikiem.

$$b_{ew1} = b_{e1} + \sqrt{2} a = 139 + \sqrt{2} \cdot 4 = 145 \text{ mm}$$

$$b_{ew2} = c - \frac{c}{1-\psi} + \sqrt{2} a + b_{e2} = 888,7 - \frac{888,7}{1+1} + \sqrt{2} \cdot 4 + 209 = 659 \text{ mm}$$

Szerokość środnika ulegająca wyboczeniu lokalnemu

$$b_{ww} = h_w - (b_{ew1} + b_{ew2}) = 900 - (145 + 659) = 96 \text{ mm}$$

Cechy geometryczne przekroju efektywnego

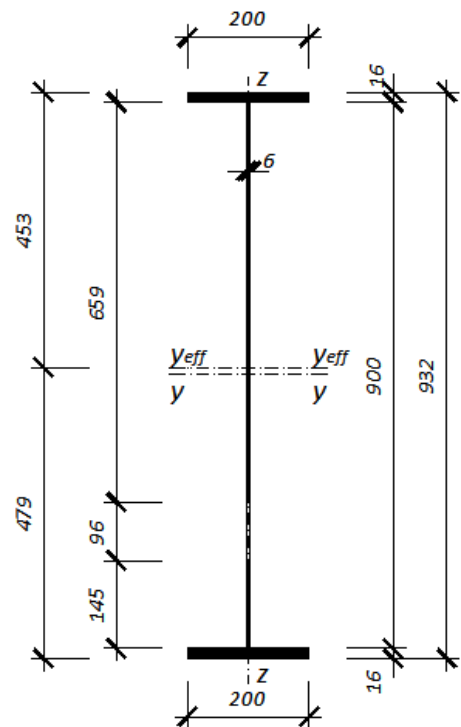
$$A_{eff} = 2 \cdot 200 \cdot 16 + 6 \cdot 145 + 6 \cdot 659 = 112,2 \cdot 10^2 \text{ mm}^2$$

Położenie osi głównej centralnej

$$S_{xx} = 0,5 \cdot 200 \cdot 16^2 + 200 \cdot 16 (0,5 \cdot 16 + 900 + 16) + 145 \cdot 6 (16 + 900 - 0,5 \cdot 145) + 659 \cdot 6 (0,5 \cdot 659 + 16) = 5083 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

$$y_{eff,g} = \frac{S_{xx}}{A_{eff}} = \frac{5083 \cdot 10^3}{112,2 \cdot 10^2} = 453 \text{ mm}$$

$$y_{eff,d} = 932 - 453 = 479 \text{ mm}$$



Główny centralny moment bezwładności

$$\begin{aligned}
 J_{y,eff} &= \frac{200 \cdot 16^3}{12} + 200 \cdot 16 (453 - 0,5 \cdot 16)^2 + \\
 &+ \frac{6 \cdot 659^3}{12} + 6 \cdot 659 (453 - 0,5 \cdot 659 - 16)^2 + \\
 &+ \frac{6 \cdot 145^3}{12} + 6 \cdot 145 (479 - 0,5 \cdot 145 - 16)^2 + \\
 &+ \frac{200 \cdot 16^3}{12} + 200 \cdot 16 (479 - 0,5 \cdot 16)^2 = \\
 &= 166673,8 \cdot 10^4 \text{ mm}^4
 \end{aligned}$$

Wskaźniki wytrzymałości

$$W_{y,effg} = \frac{J_{y,eff}}{y_{eff,g}} = \frac{166673,8 \cdot 10^4}{479} = 3478 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

$$W_{y,effd} = \frac{J_{y,eff}}{y_{eff,d}} = \frac{166673,8 \cdot 10^4}{453} = 3681 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

$$W_{y,eff,min} = \min(W_{y,effd}; W_{y,effg}) = \min(3478 \cdot 10^3; 3681 \cdot 10^3) = 3478 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

Obliczeniowa nośność przekroju

$$M_{c,Rd} = W_{y,eff,min} \frac{f_{yk}}{\gamma_{M0}} = 3478 \cdot 10^3 \frac{275}{1,0} = 956,6 \cdot 10^6 \text{ Nmm} = 956,6 \text{ kNm}$$

Warunek obliczeniowej nośności przekroju

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} = \frac{833,63}{956,6} = 0,87 < 1,0$$

Warunek nośności został spełniony.

Sprawdzenie stateczności pasów przy smukłym środniku

Z uwagi na uwzględnianie nośności sprężystej przyjęto współczynnik  $k = 0,55$ .

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{900}{6} = 150,0 < k \frac{E}{f_y} \sqrt{\frac{A_w}{A_{fc}}} = 0,55 \frac{210000}{275} \sqrt{\frac{900 \cdot 6}{200 \cdot 16}} = 545,6$$

Pas ściskany nie ulegnie wyboczeniu w płaszczyźnie środnika.

Z uwagi na  $\rho = 0,784 > \rho_{lim} = 0,5$  wpływu niestateczności ścianek nie trzeba uwzględniać w analizie globalnej (statycznej).

Sprawdzenie interakcyjnego warunku nośności, w przypadku działania momentu zginającego i siły poprzecznej, przekrój znajduje się w odległości 450 mm od osi podpory.

Siły wewnętrzne

$$M_{Edl} = 661,0 \text{ kNm} \quad , \quad V_{Edl} = 384,9 \text{ kN}$$

Warunek nośności przy ścinaniu

$$\bar{\eta}_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{bw,Rd}} = \frac{384,9}{484,7} = 0,79 > 0,5$$

W przypadku, gdy  $\bar{\eta}_3 > 0,5$  wymagana jest redukcja nośności obliczeniowej przekroju ze względu na ścinanie przy obciążeniu momentem zginającym.

Plastyczna nośność na zginanie przekroju zbudowanego z efektywnych części pasów oraz w pełni efektywnego środka.

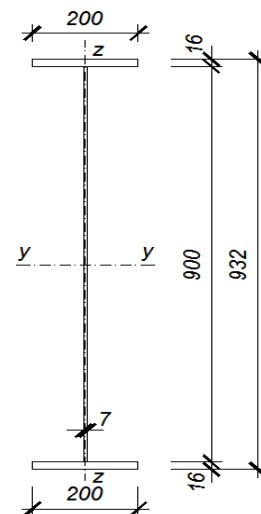
Plastyczny wskaźnik wytrzymałości przekroju podporowego

$$W_{pl,y} = 2 \left[ 200 \cdot 16 \left( 450 + \frac{16}{2} \right) + 0,5 \cdot 6 \cdot 450^2 \right] =$$

$$= 4146 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

$$M_{pl,Rd} = W_{pl,y} \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 4146 \cdot 10^3 \frac{275}{1,0} =$$

$$= 1140 \cdot 10^6 \text{ Nmm} = 1140 \text{ kNm}$$



Obliczeniowa nośność przekroju zbudowanego wyłącznie z efektywnych części pasów.

Wartość dokładna, ustalona przy określaniu udziału pasów w nośności na ścinanie

$$M_{f,Rd} = 792,3 \text{ kNm} \quad .$$

Wartość przybliżona

$$M_{f,Rd} = b_f t_f \frac{f_y}{\gamma_{M0}} (h_w + t_f) = \frac{200 \cdot 16 \cdot 275}{1,0} (900 + 16) = 806,1 \cdot 10^6 \text{ Nmm} = 806,1 \text{ kNm}$$

Interakcyjne warunki nośności

$$\bar{\eta}_1 = \frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}} = \frac{661,0}{1140} = 0,58 < \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}} = \frac{792,3}{1140} = 0,70$$

Przyjęto do sprawdzenia  $\bar{\eta}_1 = \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}} = 0,70$

$$\bar{\eta}_1 + \left(1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}}\right) (2\bar{\eta}_3 - 1)^2 = 0,70 + \left(1 - \frac{792,3}{1140}\right) (2 \cdot 0,79 - 1)^2 = 0,69 < 1,0$$

Warunek nośności został spełniony.

### **Wymiarowanie przekroju podporowego (podpora 2)**

Siły wewnętrzne na podporze

$$M_{Ed} = 582,5 \text{ kNm} \quad , \quad V_{Ed} = 273,8 \text{ kN} \quad .$$

Dobór pasów przekroju

$$A_f \geq \frac{M_{Ed}}{h_w f_y} - \frac{h_w t_w}{6} \left[1 - \left(\frac{V_{Ed}}{V_{b,Rd}}\right)^2\right] = \frac{582,5}{900 \cdot 275} - \frac{900 \cdot 6}{6} \left[1 - \left(\frac{273,8}{484,7}\right)^2\right] = 17,4 \cdot 10^2 \text{ mm}^2$$

Szerokość pasa

$$b_f = \left(\frac{1}{4} \div \frac{1}{5}\right) h_w = \left(\frac{1}{4} \div \frac{1}{5}\right) 900 = 225 \div 180 \text{ mm}$$

Przyjęto:  $b_f = 160 \text{ mm}$  (jak w przęsłach 12 i 23)



Minimalna grubość pasa

$$t_f = \frac{A_f}{b_f} = \frac{17,4 \cdot 10^2}{160} = 10,9 \text{ mm} .$$

Ostatecznie przyjęto pasy  $b_f \times t_f = 160 \times 12 \text{ mm} .$

Sprawdzenie efektu szerokiego pasa dla strefy podporowej 2

Wartość odczytana z normy PN-EN 1993-1-5

$$L_e = 0,25 (l_{12} + l_{23}) = 0,25 (11,0 + 9,0) = 4,95 \text{ m}$$

Szerokość wspornikowej części pasa

$$b_0 = 0,5 (b_f - t_w) = 0,5 (160 - 6) = 77 \text{ mm}$$

$$b_0 = 77 \text{ mm} < \frac{L_e}{50} = \frac{4950}{50} = 99 \text{ mm}$$

Efekt szerokiego pasa nie występuje.

Sprawdzenie nośności przyjętego przekroju

$$M_{Ed} = 582,0 \text{ kNm} = 582,0 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

Parametry przekroju

$$b_f = 160 \text{ mm} , \quad t_f = 12 \text{ mm} , \quad h_w = 900 \text{ mm} , \quad t_w = 6 \text{ mm}$$

Wstępny dobór grubości spoin łączących pasy ze środkiem

$$t_1 = 6 \text{ mm} , \quad t_2 = 12 \text{ mm}$$

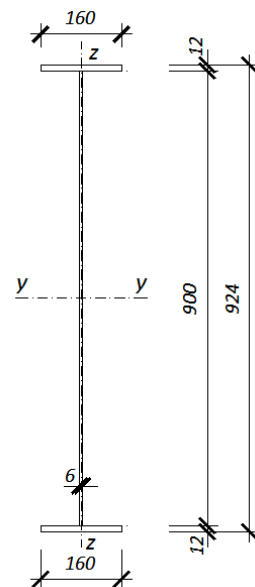
$$0,2 t_2 = 0,2 \cdot 12 = 2,4 \text{ mm} \leq a \leq 0,7 t_1 = 0,7 \cdot 6 = 4,2 \text{ mm}$$

Przyjęto  $a = 4 \text{ mm} .$

Geometria przekroju poprzecznego

Pole przekroju poprzecznego

$$6A = 2 \cdot 180 \cdot 12 + 900 \cdot 6 = 92,4 \cdot 10^2 \text{ mm}^2$$



Główne centralne momenty bezwładności

$$J_y = \frac{b_f(2t_f+h_w)^3}{12} - \frac{(b_f-t_w)h_w^3}{12} = \frac{160(2 \cdot 12+900)^3}{12} - \frac{(160-6)900^3}{12} = 116302 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

$$J_z = 2 \frac{t_f b_f^3}{12} + \frac{h_w t_w^3}{12} = 2 \frac{12 \cdot 160^3}{12} + \frac{900 \cdot 6^3}{12} = 821 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

Wskaźnik wytrzymałości

$$W_{el,y} = \frac{J_y}{0,5 h_w + t_f} = \frac{116302 \cdot 10^4}{0,5 \cdot 900 + 12} = 2517 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

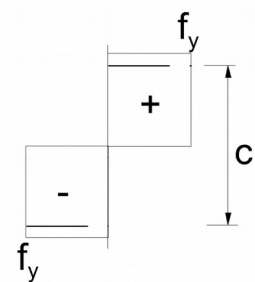
Określenie klasy przekroju przy zginaniu

środek

$$\frac{c}{t} = \frac{h_w - 2\sqrt{2}a}{t_w} = \frac{900 - 2\sqrt{2} \cdot 4}{6} = \frac{888,7}{6} = 148,1$$

$$\frac{c}{t} = 148,1 > \left(\frac{c}{t}\right)_{max} = 124 \varepsilon = 124 \cdot 0,92 = 114,6$$

Ścianka klasy 4.



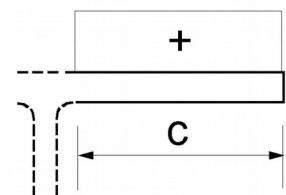
pas

$$\frac{c}{t} = \frac{0,5(b_f - t_w) - \sqrt{2}a}{t_f} = \frac{0,5(160 - 6)\sqrt{2} \cdot 4}{12} = \frac{71,3}{12} = 5,94$$

$$\frac{c}{t} = 5,94 < \left(\frac{c}{t}\right)_{max} = 10 \varepsilon = 10 \cdot 0,92 = 9,24$$

Ścianka klasy 1.

Przekrój spełnia wymagania przekrojów klasy 4.



Określenie efektywnych cech przekroju poprzecznego

Rozkład naprężeń normalnych w stanie sprężystym

$$\sigma_1 = \frac{M_{Ed}}{J_y} \frac{h_w}{2} \quad \text{- naprężenie ściskające}$$

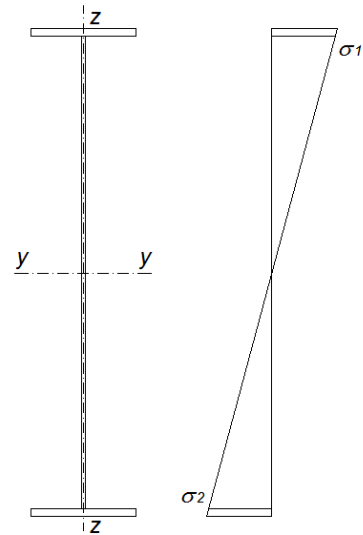
$$\sigma_2 = -\frac{M_{Ed}}{J_y} \frac{h_w}{2} \quad \text{- naprężenie rozciągające}$$

Relacja naprężeń brzegowych w środku

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = -1$$

Parametr niestateczności, przy  $\psi = -1$

$$k_\sigma = 23,9$$



Względna smukłość płytowa panelu środknika

$$\begin{aligned} \bar{\lambda}_p &= \frac{c}{t} = \frac{148,1}{28,4 \varepsilon \sqrt{k_\sigma}} = \frac{148,1}{28,4 \cdot 0,92 \sqrt{23,9}} = 1,154 > 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055 \psi} = \dots \\ &= 0,5 + \sqrt{0,085 + 0,055 \cdot 1} = 0,874 \end{aligned}$$

Współczynnik redukcyjny uwzględniający niestateczność ścianki przęsłowej

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{1,154 - 0,055(3 - 1)}{1,154^2} = 0,784 \leq 1,0$$

Szerokości współpracujące ściskanej części środknika

$$b_{eff} = \rho b_c = \rho \frac{c}{1 - \psi} = 0,784 \frac{888,7}{1 + 1} = 348 \text{ mm}$$

$$b_{e1} = 0,4 b_{eff} = 0,4 \cdot 348 = 139 \text{ mm}$$

$$b_{e2} = 0,6 b_{eff} = 0,6 \cdot 348 = 209 \text{ mm}$$

Ostateczne wartości szerokości współpracujących środknika, uwzględniające strefę rozciąganą oraz spoiny łączące pasy ze środknikiem.

$$b_{ew1} = b_{e1} + \sqrt{2} a = 139 + \sqrt{2} \cdot 4 = 145 \text{ mm}$$

$$b_{ew2} = c - \frac{c}{1-\psi} + \sqrt{2}a + b_{e2} = 888,7 - \frac{888,7}{1+1} + \sqrt{2} \cdot 4 + 209 = 659 \text{ mm}$$

Szerokość środka ulegająca wyboczeniu lokalnemu

$$b_{ww} = h_w - (b_{ew1} + b_{ew2}) = 900 - (145 + 659) = 96 \text{ mm}$$

Cechy geometryczne przekroju efektywnego

$$A_{eff} = 2 \cdot 160 \cdot 12 + 6 \cdot 145 + 6 \cdot 659 = 86,6 \cdot 10^2 \text{ mm}^2$$

Położenie osi głównej centralnej

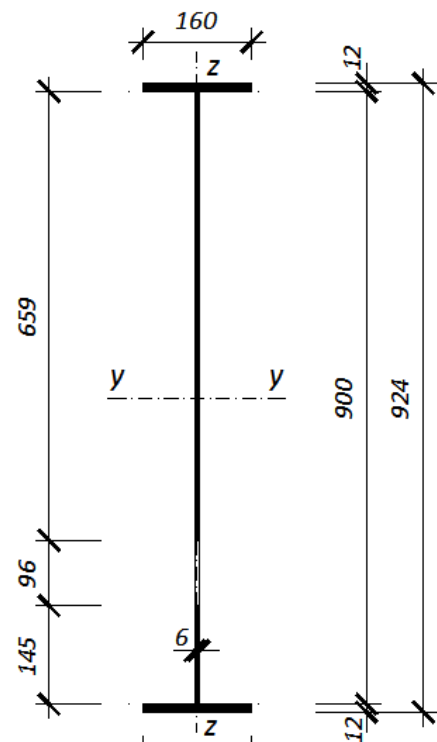
$$S_{xx} = 0,5 \cdot 160 \cdot 12^2 + 160 \cdot 12 (0,5 \cdot 12 + 900 + 12) + 145 \cdot 6 (12 + 900 - 0,5 \cdot 145) + 659 \cdot 6 (0,5 \cdot 659 + 12) = 3855 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

$$y_{eff,d} = \frac{S_{xx}}{A_{eff}} = \frac{3855 \cdot 10^3}{86,6 \cdot 10^2} = 445 \text{ mm}$$

$$y_{eff,g} = 924 - 445 = 479 \text{ mm}$$

Główny centralny moment bezwładności

$$J_{y,eff} = \frac{160 \cdot 12^3}{12} + 160 \cdot 12 (445 - 0,5 \cdot 12)^2 + \frac{6 \cdot 659^3}{12} + 6 \cdot 659 (445 - 0,5 \cdot 659 - 12)^2 + \frac{6 \cdot 145^3}{12} + 6 \cdot 145 (479 - 0,5 \cdot 145 - 12)^2 + \frac{160 \cdot 12^3}{12} + 160 \cdot 12 (479 - 0,5 \cdot 12)^2 = 112200 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$



Wskaźniki wytrzymałości

$$W_{y,effg} = \frac{J_{y,eff}}{y_{eff,g}} = \frac{112200 \cdot 10^4}{479} = 2342 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

$$W_{y,effd} = \frac{J_{y,eff}}{y_{eff,d}} = \frac{112200 \cdot 10^4}{445} = 2522 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

$$W_{y,eff,min} = \min(W_{y,effd}; W_{y,effg}) = \min(2342 \cdot 10^3; 2522 \cdot 10^3) = 2342 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

Obliczeniowa nośność przekroju

$$M_{c,Rd} = W_{y,eff,min} \frac{f_{yk}}{\gamma_{M0}} = 2342 \cdot 10^3 \frac{275}{1,0} = 644,0 \cdot 10^6 \text{ Nmm} = 644,0 \text{ kNm}$$

Warunek obliczeniowej nośności przekroju

$$\eta_1 = \frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} = \frac{582,0}{644,0} = 0,90 < 1,0$$

Warunek nośności został spełniony.

Sprawdzenie stateczności pasów przy smukłym środniku

Z uwagi na uwzględnianie nośności sprężystej przyjęto współczynnik  $k = 0,55$ .

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{900}{6} = 150,0 < k \frac{E}{f_y} \sqrt{\frac{A_w}{A_{fc}}} = 0,55 \frac{210000}{275} \sqrt{\frac{900 \cdot 6}{160 \cdot 12}} = 704,4$$

Pas ściskany nie ulegnie wyboczeniu w płaszczyźnie środnika.

Z uwagi na  $\rho = 0,784 > \rho_{lim} = 0,5$  wpływu niestateczności ścianek nie trzeba uwzględniać w analizie globalnej (statycznej).

Sprawdzenie interakcyjnego warunku nośności, w przypadku działania momentu zginającego i siły poprzecznej, przekrój znajduje się w odległości 450 mm od osi podpory.

Siły wewnętrzne

$$M_{Ed1} = 459,4 \text{ kNm} \quad , \quad V_{Ed1} = 273,5 \text{ kN}$$

Warunek nośności przy ścinaniu

$$\bar{\eta}_3 = \frac{V_{Ed1}}{V_{bw,Rd}} = \frac{273,5}{484,7} = 0,56 > 0,5$$

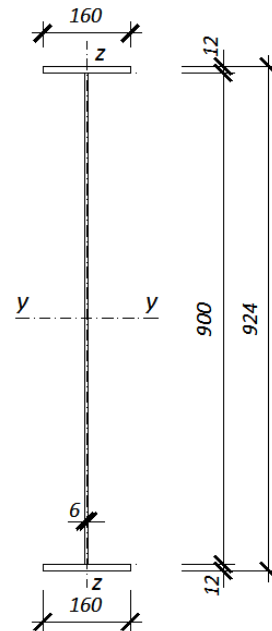
W przypadku, gdy  $\bar{\eta}_3 > 0,5$  wymagana jest redukcja nośności obliczeniowej przekroju ze względu na ścinanie przy obciążeniu momentem zginającym.

Plastyczna nośność na zginanie przekroju zbudowanego z efektywnych części pasów oraz w pełni efektywnego środka.

Plastyczny wskaźnik wytrzymałości przekroju podporowego

$$W_{pl,y} = 2 \left[ 160 \cdot 12 \left( 450 + \frac{12}{2} \right) + 0,5 \cdot 6 \cdot 450^2 \right] = 2966 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

$$M_{pl,Rd} = W_{pl,y} \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 2966 \cdot 10^3 \frac{275}{1,0} = 815,7 \cdot 10^6 \text{ Nmm} = 815,7 \text{ kNm}$$



Obliczeniowa nośność przekroju zbudowanego wyłącznie z efektywnych części pasów.

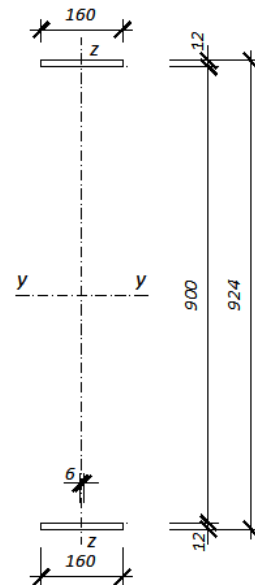
Wartość dokładna

Moment bezwładności

$$J_{fy} = 2 \left[ \frac{160 \cdot 12^3}{12} + 160 \cdot 12 \left( 462 - 0,5 \cdot 12 \right)^2 \right] = 79852 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

Wskaźnik wytrzymałości

$$W_{fy} = \frac{79852 \cdot 10^4}{462} = 1728 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$



Obliczeniowa nośność pasów

$$M_{f,Rd} = W_{fy} \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 1728 \cdot 10^3 \frac{275}{1,0} = 475,3 \cdot 10^6 \text{ Nmm} = 475,3 \text{ kNm}$$

Wartość przybliżona

$$M_{f,Rd} = b_f t_f \frac{f_y}{\gamma_{M0}} (h_w + t_f) = \frac{160 \cdot 12 \cdot 275}{1,0} (900 + 12) = 481,5 \cdot 10^6 \text{ Nmm} = 481,5 \text{ kNm}$$

Interakcyjne warunki nośności

$$\bar{\eta}_1 = \frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}} = \frac{459,4}{815,7} = 0,56 < \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}} = \frac{475,3}{815,7} = 0,58$$

Przyjęto do sprawdzenia  $\bar{\eta}_1 = \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}} = 0,58$

$$\bar{\eta}_1 + \left(1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}}\right) (2\bar{\eta}_3 - 1)^2 = 0,58 + \left(1 - \frac{475,3}{815,7}\right) (2 \cdot 0,56 - 1)^2 = 0,57 < 1,0$$

Warunek nośności został spełniony.

### Określenie miejsc zmiany przekroju

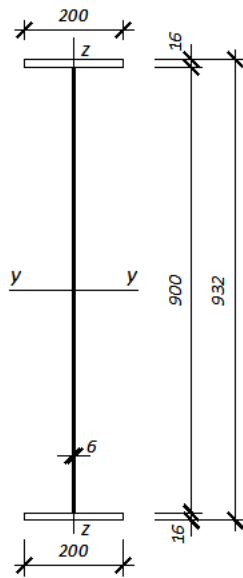
Z uwagi na to, że przekrój przęśła 01 i podpory 1 są takie same, miejsce zmiany przekroju nie występuje.

Zmiana przekroju podporowego 1 na przekrój przęśła 12

Obliczeniowa nośność przekroju

podpory 1

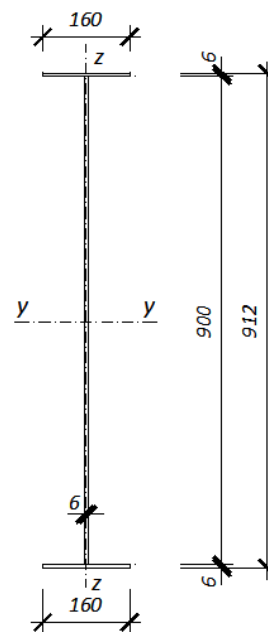
$$M_{c,Rd} = 956,6 \text{ kNm}$$



Obliczeniowa nośność przekroju

przęśła 12

$$M_{c,Rd} = 412,3 \text{ kNm}$$



Odczytany z obwiedni moment zginający  $M_{Ed} = 412,3 \text{ kNm}$  występuje w odległości 1,355 m na prawo od podpory 1.

Przyjęto miejsce zmiany przekroju w odległości 1,7 m na prawo od podpory 1.

Maksymalny moment zginający w miejscu zmiany przekroju  $M_{Ed,zm} = 326,0 \text{ kNm}$ .

Towarzyszająca siła poprzeczna w miejscu zmiany przekroju  $V_{Ed,zm} = 124,2 \text{ kN}$ .

Maksymalna siła poprzeczna w miejscu zmiany przekroju  $V_{Ed,max} = 252,7 \text{ kN}$ .

Towarzyszący moment zginający  $M_{Ed} = 45,1 \text{ kNm}$



Warunki nośności (sprawdzone dla wartości maksymalnych sił wewnętrznych)

$$\eta_1 = \frac{M_{Ed, zm}}{M_{c, Rd}} = \frac{326,0}{412,3} = 0,79 < 1,0 \quad ,$$

$$\bar{\eta}_3 = \frac{V_{Ed, max}}{V_{bw, Rd}} = \frac{252,7}{484,7} = 0,52 < 1,0 \quad .$$

Z uwagi na to, że  $\bar{\eta}_3 > 0,5$  należy sprawdzić, dla mniejszego z łączonych przekrojów, warunki nośności interakcyjnej.

Plastyczna nośność na zginanie przekroju zbudowanego z efektywnych części pasów oraz w pełni efektywnego środka.

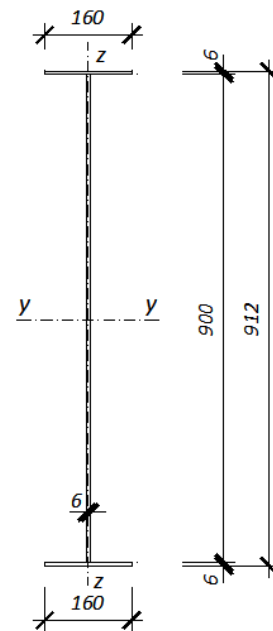
Plastyczny wskaźnik wytrzymałości przekroju podporowego

$$W_{pl, y} = 2 \left[ 160 \cdot 6 \left( 450 + \frac{6}{2} \right) + 0,5 \cdot 6 \cdot 450^2 \right] =$$

$$= 2085 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

$$M_{pl, Rd} = W_{pl, y} \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 2085 \cdot 10^3 \frac{275}{1,0} =$$

$$= 573,3 \cdot 10^6 \text{ Nmm} = 573,3 \text{ kNm}$$



Obliczeniowa nośność przekroju zbudowanego wyłącznie z efektywnych części pasów.

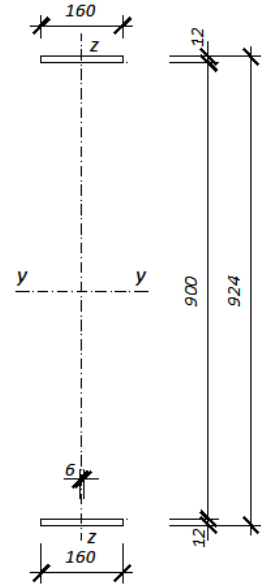
Wartość dokładna

Moment bezwładności

$$J_{fy} = 2 \left[ \frac{160 \cdot 6^3}{12} + 160 \cdot 6 (456 - 0,5 \cdot 6)^2 \right] = 39401 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

Wskaźnik wytrzymałości

$$W_{fy} = \frac{39401 \cdot 10^4}{456} = 864,0 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$



Obliczeniowa nośność pasów

$$M_{f,Rd} = W_{fy} \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 864,0 \cdot 10^3 \frac{275}{1,0} = 237,6 \cdot 10^6 \text{ Nmm} = 237,6 \text{ kNm}$$

Wartość przybliżona

$$M_{f,Rd} = b_f t_f \frac{f_y}{\gamma_{M0}} (h_w + t_f) = \frac{160 \cdot 6 \cdot 275}{1,0} (900 + 6) = 239,2 \cdot 10^6 \text{ Nmm} = 239,2 \text{ kNm}$$

Interakcyjne warunki nośności

$$\bar{\eta}_1 = \frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}} = \frac{45,1}{573,3} = 0,078 < \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}} = \frac{237,6}{573,3} = 0,41$$

Przyjęto do sprawdzenia  $\bar{\eta}_1 = \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}} = 0,41$

$$\bar{\eta}_1 + \left( 1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}} \right) (2\bar{\eta}_3 - 1)^2 = 0,41 + \left( 1 - \frac{237,6}{573,3} \right) (2 \cdot 0,52 - 1)^2 = 0,42 < 1,0$$

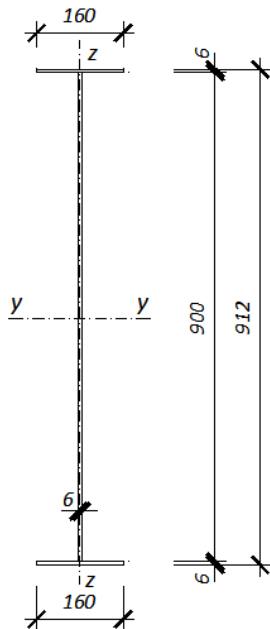
Warunek nośności został spełniony.

Zmiana przekroju przęśla 12 na przekrój podpory 2

Obliczeniowa nośność przekroju

przęsła 12

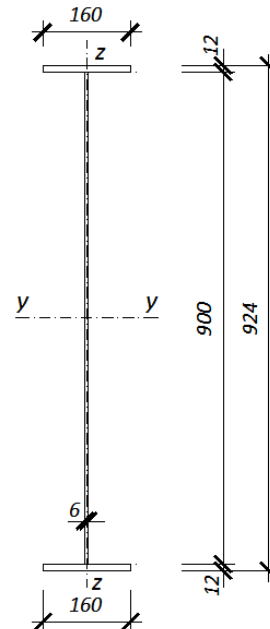
$$M_{c,Rd} = 412,3 \text{ kNm}$$



Obliczeniowa nośność przekroju

podpory 2

$$M_{c,Rd} = 644,0 \text{ kNm}$$



Odczytany z obwiedni moment zginający  $M_{Ed} = 412,3 \text{ kNm}$  występuje w odległości około 0,625 m na lewo od podpory 2.

Przyjęto miejsce zmiany przekroju w odległości 1,7 m na lewo od podpory 2.

Maksymalny moment zginający w miejscu zmiany przekroju  $M_{Ed,zm} = 171,3 \text{ kNm}$ .

Towarzysząca siła poprzeczna w miejscu zmiany przekroju  $V_{Ed,zm} = 94,4 \text{ kN}$ .

Maksymalna siła poprzeczna w miejscu zmiany przekroju  $V_{Ed,max} = 214,5 \text{ kN}$ .

Towarzyszący moment zginający  $M_{Ed} = 51,6 \text{ kNm}$

Warunki nośności (sprawdzone dla wartości maksymalnych sił wewnętrznych)

$$\eta_1 = \frac{M_{Ed,zm}}{M_{c,Rd}} = \frac{171,3}{412,3} = 0,42 < 1,0$$

$$\bar{\eta}_3 = \frac{V_{Ed,max}}{V_{bw,Rd}} = \frac{214,5}{484,7} = 0,44 < 1,0$$

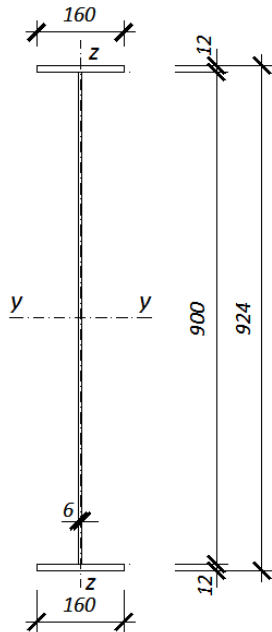
Z uwagi na to, że  $\bar{\eta}_3 \leq 0,5$  nie ma potrzeby sprawdzania nośności interakcyjnej.

Zmiana przekroju podpory 2 na przekrój przęsła 23

Obliczeniowa nośność przekroju

podpory 2

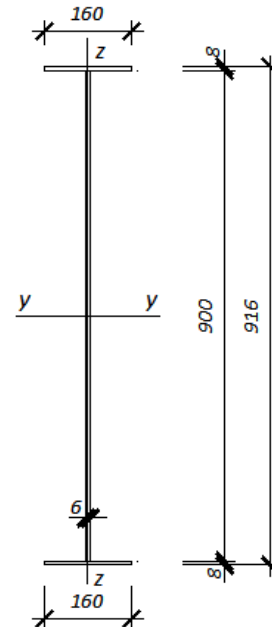
$$M_{c,Rd} = 644,0 \text{ kNm}$$



Obliczeniowa nośność przekroju

przęsła 23

$$M_{c,Rd} = 489,4 \text{ kNm}$$



Odczytany z obwiedni moment zginający  $M_{Ed} = 489,4 \text{ kNm}$  występuje w odległości 0,34 m na prawo od podpory 2.

Przyjęto miejsce zmiany przekroju w odległości 1,7 m na prawo od podpory 2.

Maksymalny moment zginający w miejscu zmiany przekroju  $M_{Ed,zm} = 215,5 \text{ kNm}$ .

Towarzysząca siła poprzeczna w miejscu zmiany przekroju  $V_{Ed,zm} = 108,6 \text{ kN}$ .

Maksymalna siła poprzeczna w miejscu zmiany przekroju  $V_{Ed,max} = 237,6 \text{ kN}$ .

Towarzyszący moment zginający  $M_{Ed} = 159,3 \text{ kNm}$

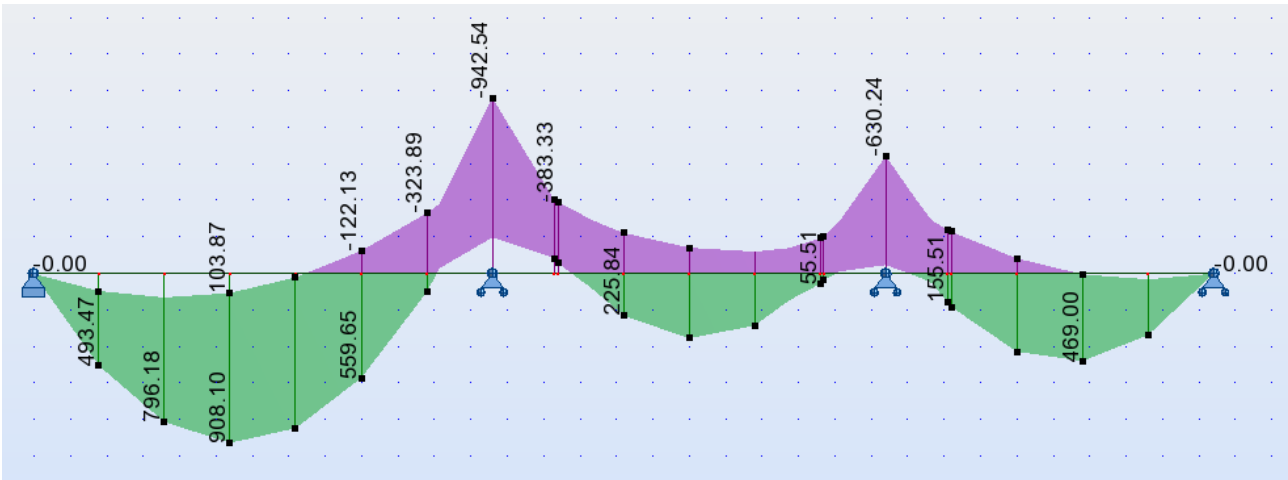
Warunki nośności (sprawdzone dla wartości maksymalnych sił wewnętrznych)

$$\eta_1 = \frac{M_{Ed,zm}}{M_{c,Rd}} = \frac{215,5}{489,4} = 0,44 < 1,0 \quad ,$$

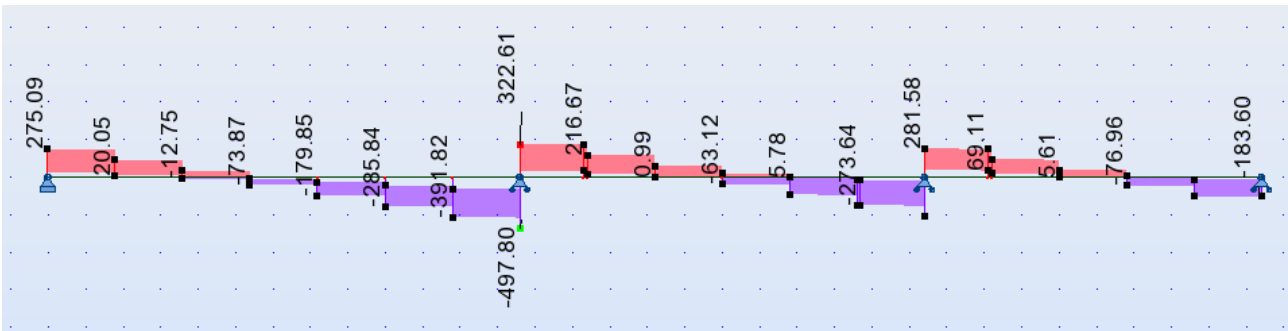
$$\bar{\eta}_3 = \frac{V_{Ed,max}}{V_{bw,Rd}} = \frac{237,6}{484,7} = 0,49 < 1,0 \quad .$$

Z uwagi na to, że  $\bar{\eta}_3 \leq 0,5$  nie ma potrzeby sprawdzania nośności interakcyjnej.

Obliczenia statyczne uwzględniające wpływ przekrojów podporowych



Rysunek 27: Obwiednia momentów zginających.



Rysunek 28: Obwiednia sił poprzecznych.

**Sprawdzenie nośności przyjętych wcześniej przekrojów poprzecznych (przęsłowych i podporowych)**

Miejsce sprawdzenia nośności	Moment zginający $M_{Ed}$	Warunki nośności
Podpora 0	$V_{Ed} = 275,1 \text{ kN}$	$\frac{V_{Ed}}{V_{b,Rd}} = \frac{275,1}{514,1} = 0,53 < 1,0$
Przęsło 01	$M_{Ed} = 908,1 \text{ kNm}$	$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} = \frac{908,1}{956,6} = 0,95 < 1,0$
Podpora 1	$M_{Ed} = 942,54 \text{ kNm}$ $V_{Ed} = 497,8 \text{ kN}$	$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} = \frac{942,54}{956,6} = 0,98 < 1,0$ $\frac{V_{Ed}}{V_{b,Rd}} = \frac{497,8}{554,15} = 0,90 < 1,0$

**Strop belkowy.**

<b>Miejsce sprawdzenia nośności</b>	<b>Moment zginający <math>M_{Ed}</math></b>	<b>Warunki nośności</b>
	<p style="text-align: center;"><i>Sily w odległości 0,45 m na prawo od podpory</i></p> <p style="text-align: center;"><math>M_{Ed1} = 798,6 \text{ kNm}</math> <math>V_{Ed1} = 322,15 \text{ kN}</math></p>	$\eta_3 = \frac{V_{Ed1}}{V_{b,Rd}} = \frac{322,15}{554,15} = 0,58 > 0,5$ $\bar{\eta}_1 = \frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}} = \frac{798,6}{1140} = 0,70 < \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}} = \frac{792,3}{1140} = 0,69$ $\bar{\eta}_1 + \left(1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}}\right) (2\bar{\eta}_3 - 1)^2 =$ $= 0,70 + \left(1 - \frac{792,3}{1140}\right) (2 \cdot 0,58 - 1)^2 = 0,71 < 1,0$
<p style="text-align: center;"><i>Miejsce zmiany przekroju</i></p>	<p style="text-align: center;"><math>M_{Ed,max} = 395,6 \text{ kN}</math> <math>V_{Ed} = 328,84 \text{ kN}</math></p>	$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} = \frac{395,6}{412,3} = 0,96 < 1,0$ $\frac{V_{Ed}}{V_{b,Rd}} = \frac{328,84}{554,15} = 0,59 < 1,0$ $\bar{\eta}_1 = \frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}} = \frac{395,6}{704,1} = 0,56 > \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}} = \frac{314,3}{704,1} = 0,47$ $\bar{\eta}_1 + \left(1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}}\right) (2\bar{\eta}_3 - 1)^2 =$ $= 0,56 + \left(1 - \frac{314,3}{704,1}\right) (2 \cdot 0,59 - 1)^2 = 0,58 < 1$
<p style="text-align: center;"><i>Przęsło 12</i></p>	<p style="text-align: center;"><math>M_{Ed} = 395,6 \text{ kNm}</math></p>	$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} = \frac{395,6}{412,3} = 0,96 < 1$
<p style="text-align: center;"><i>Miejsce zmiany przekroju</i></p>	<p style="text-align: center;"><math>M_{Ed} = 163,9 \text{ kNm}</math> <math>V_{Ed,max} = 273,6 \text{ kN}</math></p>	$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} = \frac{163,9}{412,3} = 0,40 < 1,0$ $\frac{V_{Ed}}{V_{b,Rd}} = \frac{273,6}{484,7} = 0,56 < 1$

**Strop belkowy.**

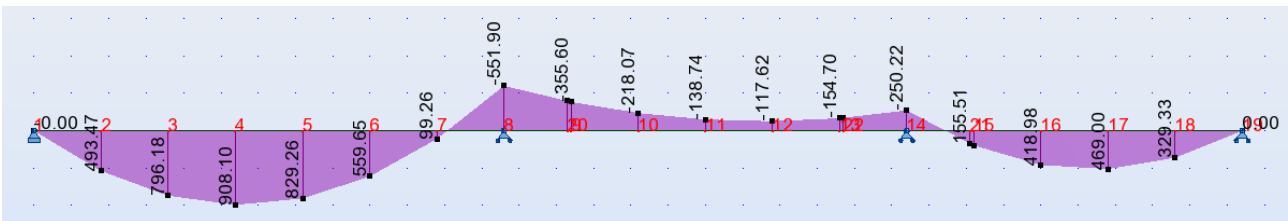
<b>Miejsce sprawdzenia nośności</b>	<b>Moment zginający</b> $M_{Ed}$	<b>Warunki nośności</b>
		$\bar{\eta}_1 = \frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}} = \frac{163,9}{573,3} = 0,29 < \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}} = \frac{237,6}{573,3} = 0,41$ $\bar{\eta}_1 + \left(1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}}\right) (2\bar{\eta}_3 - 1)^2 =$ $= 0,41 + \left(1 - \frac{237,6}{573,3}\right) (2 \cdot 0,56 - 1)^2 = 0,42 < 1,0$
<b>Podpora 2</b>	$M_{Ed} = 630,24 \text{ kNm}$ $V_{Ed} = 281,6 \text{ kN}$  <i>Sily w odległości</i> <i>0,45 m na prawo od podpory</i>  $M_{Ed1} = 504,6 \text{ kNm}$ $V_{Ed1} = 281,2 \text{ kN}$	$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} = \frac{630,24}{644,0} = 0,98 < 1,0$ $\frac{V_{Ed}}{V_{b,Rd}} = \frac{281,6}{484,7} = 0,58 < 1,0$ $\eta_3 = \frac{V_{Ed1}}{V_{b,Rd}} = \frac{281,2}{484,7} = 0,58 > 0,5$ $\bar{\eta}_1 = \frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}} = \frac{504,6}{815,7} = 0,62 > \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}} = \frac{475,3}{815,7} = 0,58$ $\bar{\eta}_1 + \left(1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}}\right) (2\bar{\eta}_3 - 1)^2 =$ $= 0,62 + \left(1 - \frac{475,3}{815,7}\right) (2 \cdot 0,58 - 1)^2 = 0,63 < 1,0$
<b>Miejsce zmiany przekroju</b>	$M_{Ed} = 152,7 \text{ kNm}$ $V_{Ed} = 280,2 \text{ kN}$	$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} = \frac{152,7}{489,4} = 0,31 < 1,0$ $\frac{V_{Ed}}{V_{b,Rd}} = \frac{280,2}{484,7} = 0,58 < 1,0$ $\bar{\eta}_1 = \frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}} = \frac{152,7}{653,7} = 0,23 < \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}} = \frac{316,8}{653,7} = 0,49$

**Strop belkowy.**

<b>Miejsce sprawdzenia nośności</b>	<b>Moment zginający <math>M_{Ed}</math></b>	<b>Warunki nośności</b>
		$\bar{\eta}_1 + \left(1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}}\right) (2\bar{\eta}_3 - 1)^2 =$ $= 0,49 + \left(1 - \frac{280,2}{653,7}\right) (2 \cdot 0,56 - 1)^2 = 0,50 < 1,0$
<i>Przęsło 23</i>	$M_{Ed} = 469,0 \text{ kNm}$	$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} = \frac{469,0}{489,4} = 0,96 < 1,0$
<i>Podpora 3</i>	$V_{Ed} = 183,6 \text{ kN}$	$\frac{V_{Ed}}{V_{b,Rd}} = \frac{183,6}{490,9} = 0,37 < 1,0$

**Sprawdzenie stateczności ogólnej blachownicy – metoda uproszczona**

Przęsło 01



Rysunek 29: Kombinacja maksymalnego momentu przęsłowego - wykres.

Długość wyboczeniowa przy zwichrzeniu –  $L_c = 1800 \text{ mm}$

Momenty zginające na końcach umownej belki (do sprawdzenia zwichrzenia)

$$M_1 = 908,1 \text{ kNm} \quad , \quad M_2 = 829,3 \text{ kNm}$$

Stosunek momentów brzegowych

$$\psi = \frac{M_2}{M_1} = \frac{829,3}{908,1} = 0,913$$

Współczynnik poprawkowy

$$k_c = \frac{1}{1,33 - 0,33\psi} = \frac{1}{1,33 - 0,33 \cdot 0,913} = 0,97$$

Smukłość porównawcza

$$\lambda_1 = 93,9 \varepsilon = 93,9 \cdot 0,92 = 86,8$$



Smukłość graniczna pasa zastępczego

$$\bar{\lambda}_{c,0} = 0,4$$

Geometria przekroju pasa zastępczego

Pole przekroju efektywnej części pasa ściskanego

$$A_{eff,f} = 200 \cdot 16 = 32,0 \cdot 10^2 \text{ mm}^2$$

Pole przekroju efektywnej części ściskanej środnika

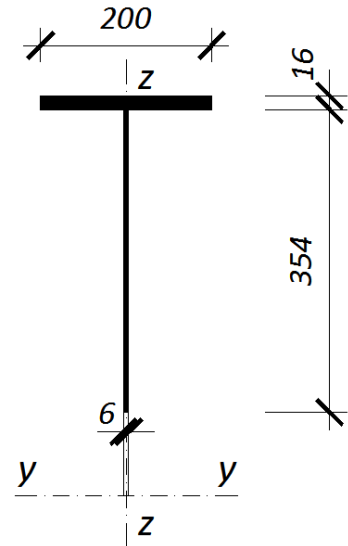
$$A_{eff,w,c} = t_w (b_{eff} + a \sqrt{2}) = 6 (348 + 4 \sqrt{2}) = 21,25 \cdot 10^2 \text{ mm}^2$$

Moment bezwładności współpracującej części pasa ściskanego

$$J_{eff,f,z} = \frac{16 \cdot 200^3}{12} = 1066,7 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

Promień bezwładności przekroju zastępczego

$$i_{f,z} = \sqrt{\frac{1066,7 \cdot 10^4}{32,0 \cdot 10^2 + \frac{1}{3} 21,25 \cdot 10^2}} = 52 \text{ mm}$$



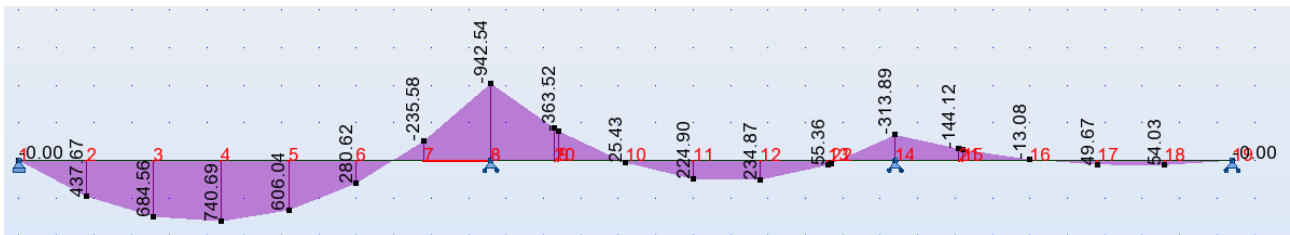
Sprawdzenie warunku

$$\bar{\lambda}_f = \frac{k_c L_c}{i_{f,z} \lambda_1} = \frac{0,97 \cdot 1800}{52 \cdot 86,8} = 0,386 < \bar{\lambda}_{c,0} \frac{M_{c,Rd}}{M_{Ed}} = 0,4 \frac{956,6}{908,1} = 0,421$$

Warunek został spełniony. Element nie jest narażony na zwichrzenie.

## Podpora 1

Rozkład momentów zginających



Rysunek 30: Kombinacja maksymalnego momentu podporowego - podpora 1.

Strefa podpory 1 w kierunku przęsła 01

Długość wyboczeniowa przy zwichrzeniu –  $L_c = 3600 \text{ mm}$  (od podpory do pierwszej belki dochodzącej do strefy ściskanej)

Momenty zginające na końcach umownej belki (do sprawdzenia zwichrzenia)

$$M_1 = 942,54 \text{ kNm} \quad , \quad M_2 = -280,62 \text{ kNm}$$

Stosunek momentów brzegowych

$$\psi = \frac{M_2}{M_1} = \frac{-280,62}{942,54} = -0,30$$

Współczynnik poprawkowy

$$k_c = \frac{1}{1,33 - 0,33\psi} = \frac{1}{1,33 + 0,33 \cdot 0,30} = 0,70$$

Smukłość porównawcza

$$\lambda_1 = 93,9 \quad \varepsilon = 93,9 \cdot 0,92 = 86,8$$

Smukłość graniczna pasa zastępczego

$$\bar{\lambda}_{c,0} = 0,4$$

Geometria przekroju pasa zastępczego

Pole przekroju efektywnych części pasa ściskanego

$$A_{eff,f} = 200 \cdot 16 = 32,0 \cdot 10^2 \text{ mm}^2$$

Pole przekroju efektywnej części ściskanej środnika

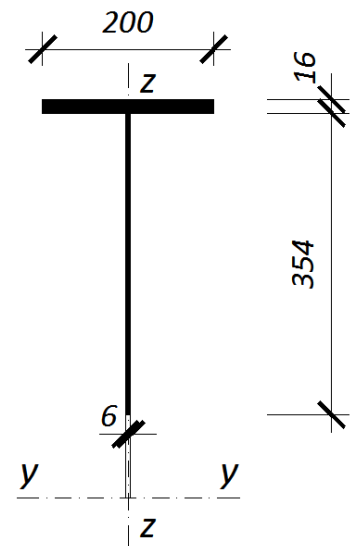
$$A_{eff,w,c} = t_w (b_{eff} + a\sqrt{2}) = 6 (348 + 4\sqrt{2}) = 21,25 \cdot 10^2 \text{ mm}^2$$

Moment bezwładności współpracującej części pasa ściskanego

$$J_{eff,f,z} = \frac{16 \cdot 200^3}{12} = 1066,7 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

Promień bezwładności przekroju zastępczego

$$i_{f,z} = \sqrt{\frac{1066,7 \cdot 10^4}{32,0 \cdot 10^2 + \frac{1}{3} 21,25 \cdot 10^2}} = 52 \text{ mm}$$



Sprawdzenie warunku

$$\bar{\lambda}_f = \frac{k_c L_c}{i_{f,z} \lambda_1} = \frac{0,70 \cdot 3600}{52 \cdot 86,8} = 0,556 > \bar{\lambda}_{c,0} \frac{M_{c,Rd}}{M_{Ed}} = 0,4 \frac{956,6}{942,54} = 0,406$$

Warunek nie został spełniony. Element jest narażony na zwichrzenie.

Określenie nośności na zwichrzenie

Współczynnik zwichrzenia – przypadek ogólny

Parametr imperfekcji przy zwichrzeniu – krzywa zwichrzenia  $c$

$$\alpha_{LT} = 0,49$$

Smukłość względna przy zwichrzeniu

$$\bar{\lambda}_{LT} = \bar{\lambda}_f = 0,556$$

Parametr krzywej zwichrzenia

$$\%iFI_{LT} = 0,5 \left[ 1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right] = 0,5 \left[ 1 + 0,49 (0,556 - 0,2) + 0,556^2 \right] = 0,742$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} = \frac{1}{0,742 + \sqrt{0,742^2 - 0,556^2}} = 0,811$$

Współczynnik uwzględniający przybliżony charakter metody pasa zastępczego

$$k_{II} = 1,1$$

Obliczeniowa nośność przekroju przy zwichrzeniu

$$M_{b,Rd} = k_{II} \chi_{LT} M_{c,Rd} = 1,1 \cdot 0,811 \cdot 956,6 = 853,6 \text{ kNm}$$

Sprawdzenie warunku nośności

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} = \frac{942,54}{853,6} = 1,1 > 1,0$$

Warunek nie został spełniony.

W związku z brakiem nośności przy zginaniu ze zwichrzeniem należy pod pierwszą belką, licząc od podpory 1 w lewo, wykonać zastrzały, co pozwoli traktować te belkę jako stężenie.

Po wprowadzeniu zastrzału pod pierwszą belką z lewej strony podpory 1,

sprawdzenia na zwichrzenie strefy podporowej dokonuje się przy długości wyboczeniowej

$$L_c = 1800 \text{ mm} \quad (\text{od podpory do belki z zastrzałem})$$

Momenty zginające na końcach umownej belki (do sprawdzenia zwichrzenia)

$$M_1 = 942,54 \text{ kNm} \quad , \quad M_2 = 235,6 \text{ kNm} \quad .$$

Stosunek momentów brzegowych

$$\psi = \frac{M_2}{M_1} = \frac{235,6}{942,54} = 0,25$$

Współczynnik poprawkowy

$$k_c = \frac{1}{1,33 - 0,33\psi} = \frac{1}{1,33 - 0,33 \cdot 0,25} = 0,802$$

Pozostałe wielkości jak poprzednio.

Sprawdzenie warunku

$$\bar{\lambda}_f = \frac{k_c L_c}{i_{f,z} \lambda_1} = \frac{0,802 \cdot 1800}{52,0 \cdot 86,8} = 0,318 < \bar{\lambda}_{c,0} \frac{M_{c,Rd}}{M_{Ed}} = 0,4 \frac{956,6}{942,54} = 0,406$$

Warunek został spełniony. Element nie jest narażony na zwichrzenie.

Strefa pomiędzy pierwszą belką a belką znajdującą się w strefie ściskanej

$$L_c = 1800 \text{ mm}$$

Momenty zginające na końcach umownej belki (do sprawdzenia zwichrzenia)

$$M_1 = -280,6 \text{ kNm} \quad , \quad M_2 = 235,6 \text{ kNm} \quad .$$

Stosunek momentów brzegowych

$$\psi = \frac{M_2}{M_1} = \frac{235,6}{-280,6} = -0,84$$

Współczynnik poprawkowy

$$k_c = \frac{1}{1,33 - 0,33\psi} = \frac{1}{1,33 + 0,33 \cdot 0,84} = 0,622$$

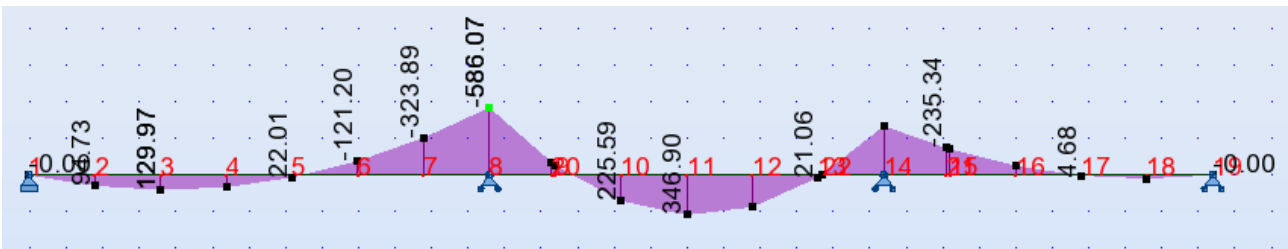
Pozostałe wielkości jak poprzednio.

Sprawdzenie warunku

$$\bar{\lambda}_f = \frac{k_c L_c}{i_{f,z} \lambda_1} = \frac{0,622 \cdot 1800}{52,0 \cdot 86,8} = 0,247 < \bar{\lambda}_{c,0} \frac{M_{c,Rd}}{M_{Ed}} = 0,4 \frac{956,6}{280,6} = 1,364$$

Warunek został spełniony. Element nie jest narażony na zwichrzenie.

## Przęsło 12



Rysunek 31: Kombinacja maksymalnego momentu w przęśle środkowym.

Długość wyboczeniowa przy zwichrzeniu –  $L_c = 1800 \text{ mm}$  .

Momenty zginające na końcach umownej belki (do sprawdzenia zwichrzenia)

$$M_1 = 346,9 \text{ kNm} \quad , \quad M_2 = 278,7 \text{ kNm} \quad .$$

Stosunek momentów brzegowych

$$\psi = \frac{M_2}{M_1} = \frac{278,7}{346,9} = 0,803$$

Współczynnik poprawkowy

$$k_c = \frac{1}{1,33 - 0,33 \psi} = \frac{1}{1,33 - 0,33 \cdot 0,803} = 0,94$$

Smukłość porównawcza

$$\lambda_1 = 93,9 \varepsilon = 93,9 \cdot 0,92 = 86,8$$

Smukłość graniczna pasa zastępczego

$$\bar{\lambda}_{c,0} = 0,4$$

Geometria przekroju pasa zastępczego

Pole przekroju efektywnych części pasa ściskanego

$$A_{eff,f} = 160 \cdot 6 = 9,6 \cdot 10^2 \text{ mm}^2$$

Pole przekroju efektywnej części ściskanej środnika

$$A_{eff,w,c} = t_w (b_{eff} + a \sqrt{2}) = 6 (348 + 4 \sqrt{2}) = 21,23 \cdot 10^2 \text{ mm}^2$$

Moment bezwładności współpracującej części pasa ściskanego

$$J_{eff,f,z} = \frac{6 \cdot 160^3}{12} = 204,8 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

Promień bezwładności przekroju zastępczego

$$i_{f,z} = \sqrt{\frac{204,8 \cdot 10^4}{9,6 \cdot 10^2 + \frac{1}{3} 21,23 \cdot 10^2}} = 35,0 \text{ mm}$$

Sprawdzenie warunku

$$\bar{\lambda}_f = \frac{k_c L_c}{i_{f,z} \lambda_1} = \frac{0,94 \cdot 1800}{35,0 \cdot 86,8} = 0,556 > \bar{\lambda}_{c,0} \frac{M_{c,Rd}}{M_{Ed}} = 0,4 \frac{412,3}{346,9} = 0,475$$

Warunek nie został spełniony. Element jest narażony na zwichrzenie. Wymagane jest sprawdzenie nośności na zwichrzenie.

Współczynnik zwichrzenia – przypadek ogólny

Parametr imperfekcji przy zwichrzeniu – krzywa zwichrzenia  $c$

$$\alpha_{LT} = 0,49$$

Smukłość względna przy zwichrzeniu

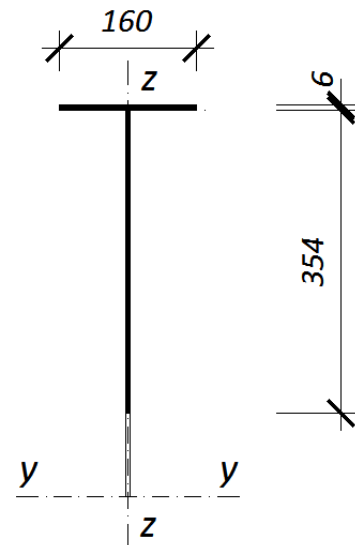
$$\bar{\lambda}_{LT} = \bar{\lambda}_f = 0,556$$

Parametr krzywej zwichrzenia

$$\Phi_{LT} = 0,5 \left[ 1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right] = 0,5 \left[ 1 + 0,49 (0,556 - 0,2) + 0,556^2 \right] = 0,742$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} = \frac{1}{0,742 + \sqrt{0,742^2 - 0,556^2}} = 0,811$$

Współczynnik uwzględniający przybliżony charakter metody pasa zastępczego



$$k_{ll} = 1,1$$

Obliczeniowa nośność przekroju przy zwichrzeniu

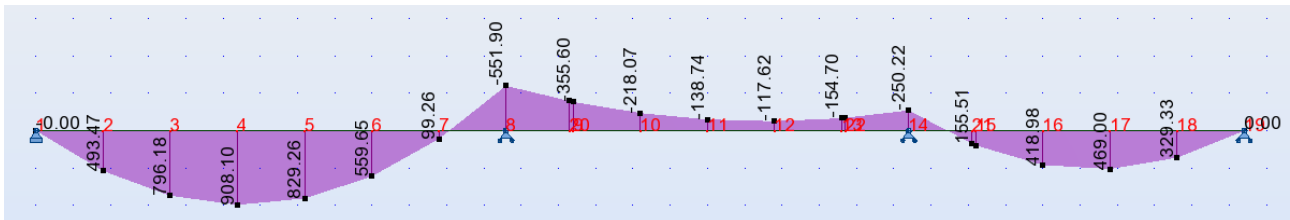
$$M_{b,Rd} = k_{ll} \chi_{LT} M_{c,Rd} = 1,1 \cdot 0,811 \cdot 412,3 = 367,9 \text{ kNm}$$

Sprawdzenie warunku nośności

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} = \frac{346,9}{367,9} = 0,94 < 1,0$$

Warunek nie został spełniony.

Rozkład momentu zginającego – kombinacja obciążeń dająca rozciąganie górą przęsła



Rysunek 32: Rozkład ujemnych momentów przęsła środkowego.

Przyjęto rozmieszczenie zastrzałów pod 1, 2, 4, 5 belką stropową. Sprawdzeniu podlega odcinek między 1 i 2 belką stropową w przęśle. Długość między stężeniami

$$L_c = 1800 \text{ mm}$$

Momenty zginające na końcach umownej belki (do sprawdzenia zwichrzenia)

$$M_1 = 355,6 \text{ kNm} \quad , \quad M_2 = 218,1 \text{ kNm}$$

Stosunek momentów brzegowych

$$\psi = \frac{M_2}{M_1} = \frac{218,1}{355,6} = 0,613$$

Współczynnik poprawkowy

$$k_c = \frac{1}{1,33 - 0,33 \psi} = \frac{1}{1,33 - 0,33 \cdot 0,613} = 0,89$$

Smukłość porównawcza

$$\lambda_1 = 93,9 \varepsilon = 93,9 \cdot 0,92 = 86,8$$

Smukłość graniczna pasa zastępczego

$$\bar{\lambda}_{c,0} = 0,4$$

Parametry przekroju zastępczego pasa jak poprzednio.

Sprawdzenie warunku

$$\bar{\lambda}_f = \frac{k_c L_c}{i_{f,z} \lambda_1} = \frac{0,89 \cdot 1800}{35,0 \cdot 86,8} = 0,525 > \bar{\lambda}_{c,0} \frac{M_{c,Rd}}{M_{Ed}} = 0,4 \frac{412,3}{355,6} = 0,464$$

Warunek nie został spełniony. Element jest narażony na zwichrzenie.

Określenie nośności na zwichrzenie

Współczynnik zwichrzenia – przypadek ogólny

Parametr imperfekcji przy zwichrzeniu – krzywa zwichrzenia  $c$

$$\alpha_{LT} = 0,49$$

Smukłość względna przy zwichrzeniu

$$\bar{\lambda}_{LT} = \bar{\lambda}_f = 0,525$$

$$\Phi_{LT} = 0,5 \left[ 1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right] = 0,5 \left[ 1 + 0,49 (0,525 - 0,2) + 0,525^2 \right] = 0,717$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} = \frac{1}{0,717 + \sqrt{0,717^2 - 0,525^2}} = 0,829$$

Współczynnik uwzględniający przybliżony charakter metody pasa zastępczego

$$k_{ll} = 1,1$$

Obliczeniowa nośność przekroju przy zwichrzeniu

$$M_{b,Rd} = k_{ll} \chi_{LT} M_{c,Rd} = 1,1 \cdot 0,829 \cdot 412,3 = 376,03 \text{ kNm}$$

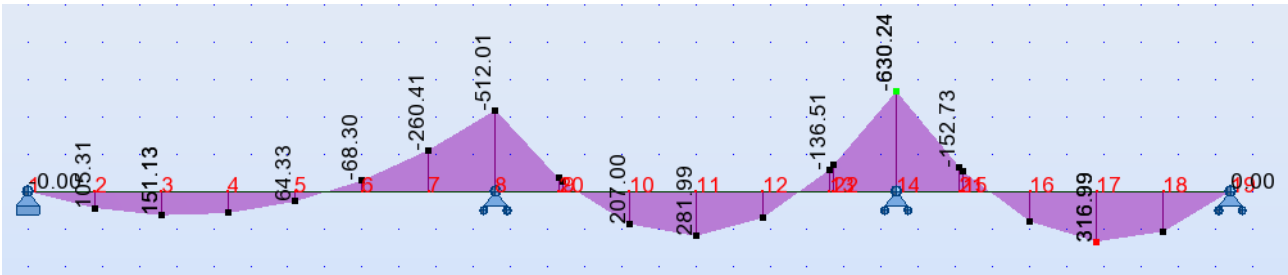
Sprawdzenie warunku nośności

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} = \frac{355,6}{376,03} = 0,95 < 1,0$$

Warunek został spełniony.



## Podpora 2



Rysunek 33: Kombinacja maksymalnego momentu podporowego 2.

Przyjęto zastrzał pod pierwszą belką na prawo od podpory. Biorąc pod uwagę wcześniej rozmieszczone zastrzały, maksymalna długość wyboczeniowa w strefie podpory wynosi  $L_c = 1800 \text{ mm}$ .

Momenty zginające na końcach umownej belki (do sprawdzenia zwichrzenia)

$$M_1 = 630,24 \text{ kNm} \quad , \quad M_2 = 152,7 \text{ kNm} \quad .$$

Stosunek momentów brzegowych

$$\psi = \frac{M_2}{M_1} = \frac{152,7}{630,24} = 0,242$$

Współczynnik poprawkowy

$$k_c = \frac{1}{1,33 - 0,33\psi} = \frac{1}{1,33 - 0,33 \cdot 0,242} = 0,8$$

Smukłość porównawcza

$$\lambda_1 = 93,9 \varepsilon = 93,9 \cdot 0,92 = 86,8$$

Smukłość graniczna pasa zastępczego

$$\bar{\lambda}_{c,0} = 0,4$$

Geometria przekroju pasa zastępczego

Pole przekroju efektywnych części pasa ściskanego

$$A_{eff,f} = 160 \cdot 12 = 19,2 \cdot 10^2 \text{ mm}^2$$

Pole przekroju efektywnej części ściskanej środnika

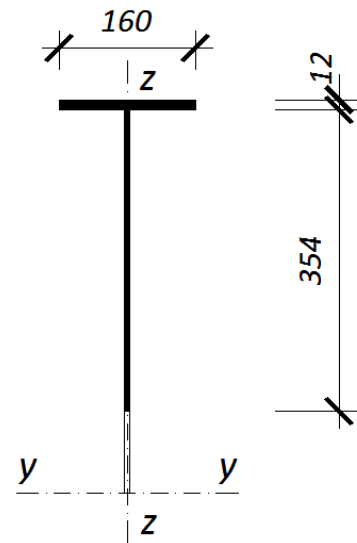
$$A_{eff,w,c} = t_w (b_{eff} + a \sqrt{2}) = 6 (348 + 4 \sqrt{2}) = 21,25 \cdot 10^2 \text{ mm}^2$$

Moment bezwładności współpracującej części pasa ściskanego

$$J_{eff,f,z} = \frac{12 \cdot 160^3}{12} = 409,6 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

Promień bezwładności przekroju zastępczego

$$i_{f,z} = \sqrt{\frac{409,6 \cdot 10^4}{16,0 \cdot 12^2 + \frac{1}{3} 21,25 \cdot 10^2}} = 39,0 \text{ mm}$$



Sprawdzenie warunku

$$\bar{\lambda}_f = \frac{k_c L_c}{i_{f,z} \lambda_1} = \frac{0,8 \cdot 1800}{39,0 \cdot 86,8} = 0,42 > \bar{\lambda}_{c,0} \frac{M_{c,Rd}}{M_{Ed}} = 0,4 \frac{644,0}{630,24} = 0,41$$

Warunek nie został spełniony. Element jest narażony na zwichrzenie.

Określenie nośności na zwichrzenie

Współczynnik zwichrzenia – przypadek ogólny

Parametr imperfekcji przy zwichrzeniu – krzywa zwichrzenia c

$$\alpha_{LT} = 0,49$$

Smukłość względna przy zwichrzeniu

$$\bar{\lambda}_{LT} = \bar{\lambda}_f = 0,42$$

$$\Phi_{LT} = 0,5 \left[ 1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right] = 0,5 \left[ 1 + 0,49 (0,42 - 0,2) + 0,42^2 \right] = 0,642$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} = \frac{1}{0,642 + \sqrt{0,642^2 - 0,42^2}} = 0,89$$

Współczynnik uwzględniający przybliżony charakter metody pasa zastępczego

$$k_{ll} = 1,1$$

Obliczeniowa nośność przekroju przy zwichrzeniu

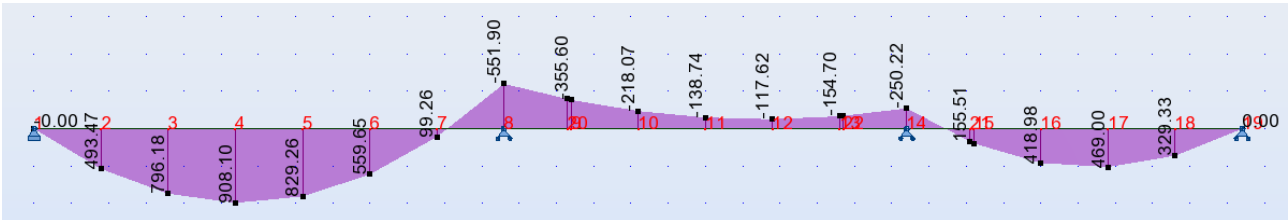
$$M_{b,Rd} = k_{ll} \chi_{LT} M_{c,Rd} = 1,1 \cdot 0,89 \cdot 644,0 = 630,5 \text{ kNm}$$

Sprawdzenie warunku nośności

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} = \frac{630,24}{630,5} = 1,0$$

Warunek został spełniony.

### Przęsło 23



Rysunek 34: Kombinacja maksymalnego momentu przęsłowego 23.

Długość wyboczeniowa przy zwichrzeniu –  $L_c = 1800 \text{ mm}$

Momenty zginające na końcach umownej belki (do sprawdzenia zwichrzenia)

$$M_1 = 469,0 \text{ kNm} \quad , \quad M_2 = 419,0 \text{ kNm}$$

Stosunek momentów brzegowych

$$\psi = \frac{M_2}{M_1} = \frac{419,0}{469,0} = 0,893$$

Współczynnik poprawkowy

$$k_c = \frac{1}{1,33 - 0,33\psi} = \frac{1}{1,33 - 0,33 \cdot 0,893} = 0,966$$

Smukłość porównawcza

$$\lambda_1 = 93,9 \varepsilon = 93,9 \cdot 0,92 = 86,8$$

Smukłość graniczna pasa zastępczego

$$\bar{\lambda}_{c,0} = 0,4$$

Geometria przekroju pasa zastępczego

Pole przekroju efektywnych części pasa ściskanego

$$A_{eff,f} = 160 \cdot 8 = 12,8 \cdot 10^2 \text{ mm}^2$$

Pole przekroju efektywnej części ściskanej środnika

$$A_{eff,w,c} = t_w (b_{eff} + a \sqrt{2}) = 6 (348 + 4 \sqrt{2}) = 21,25 \cdot 10^2 \text{ mm}^2$$

Moment bezwładności współpracującej części pasa ściskanego

$$J_{eff,f,z} = \frac{8 \cdot 160^3}{12} = 273,1 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

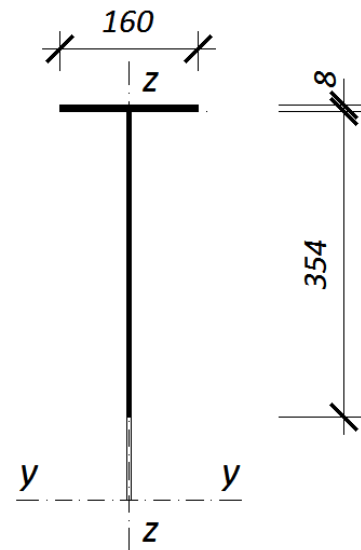
Promień bezwładności przekroju zastępczego

$$i_{f,z} = \sqrt{\frac{273,1 \cdot 10^4}{12,8 \cdot 10^2 + \frac{1}{3} 21,25 \cdot 10^2}} = 37,0 \text{ mm}$$

Sprawdzenie warunku

$$\bar{\lambda}_f = \frac{k_c L_c}{i_{f,z} \lambda_1} = \frac{0,966 \cdot 1800}{37,0 \cdot 86,8} = 0,54 > \bar{\lambda}_{c,0} \frac{M_{c,Rd}}{M_{Ed}} = 0,4 \frac{489,4}{469,0} = 0,42$$

Warunek nie został spełniony. Element jest narażony na zwichrzenie.



Określenie nośności na zwichrzenie

Współczynnik zwichrzenia – przypadek ogólny

Parametr imperfekcji przy zwichrzeniu – krzywa zwichrzenia c

$$\alpha_{LT} = 0,49$$

Smukłość względna przy zwichrzeniu

$$\bar{\lambda}_{LT} = \bar{\lambda}_f = 0,54$$

$$\Phi_{LT} = 0,5 \left[ 1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right] = 0,5 \left[ 1 + 0,49 (0,54 - 0,2) + 0,54^2 \right] = 0,729$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} = \frac{1}{0,729 + \sqrt{0,729^2 - 0,54^2}} = 0,82$$

$$k_{ll} = 1,1$$

Obliczeniowa nośność przekroju przy zwichrzeniu

$$M_{b,Rd} = k_{ll} \chi_{LT} M_{c,Rd} = 1,1 \cdot 0,82 \cdot 489,4 = 441,5 \text{ kNm}$$

Sprawdzenie warunku nośności

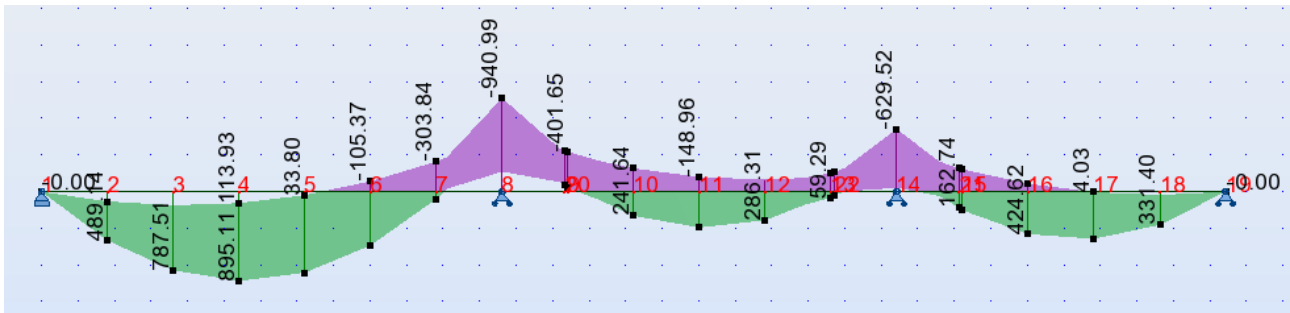
$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} = \frac{469,0}{441,5} = 1,06 > 1,0$$

Warunek nie został spełniony.

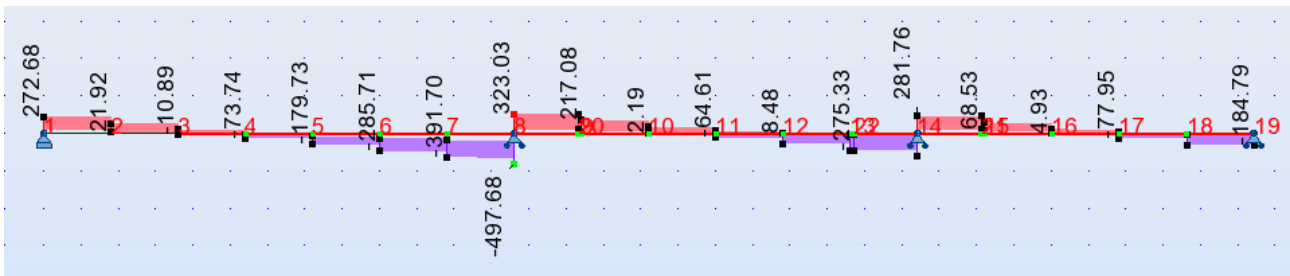
### KOMENTARZ:

Biorąc pod uwagę przekroczenie nośności na zwichrzenie ( o kilka procent) w przęśle środkowym 12 na podporze 2 i w przęśle skrajnym 23 zwiększone zostały grubości pasów. Układ miejsc zmian przekroju oraz umiejscowienie zastrzałów pozostaje niezmienny.

Wyniki obliczeń statycznych z nowo zaprojektowanymi przekrojami.

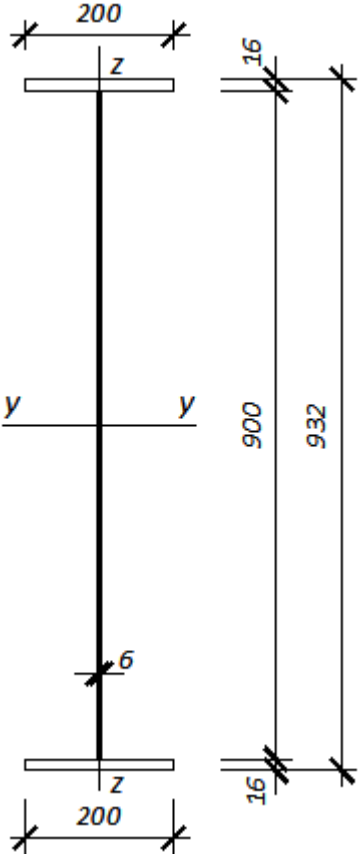


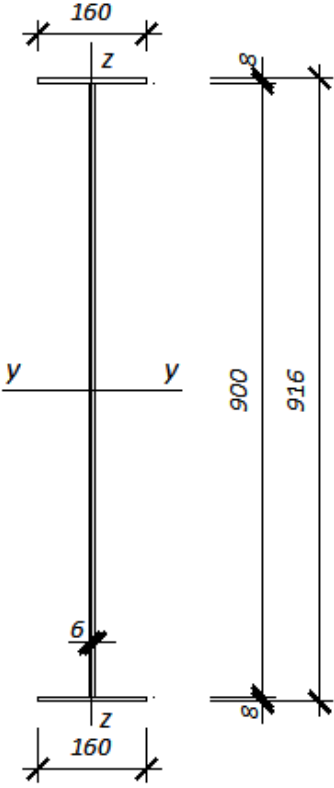
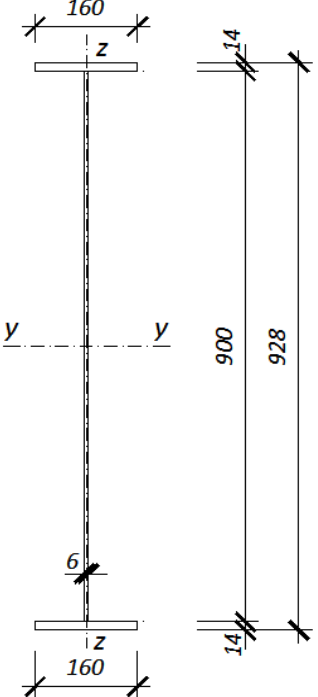
Rysunek 35: Obwiednia momentów zginających.

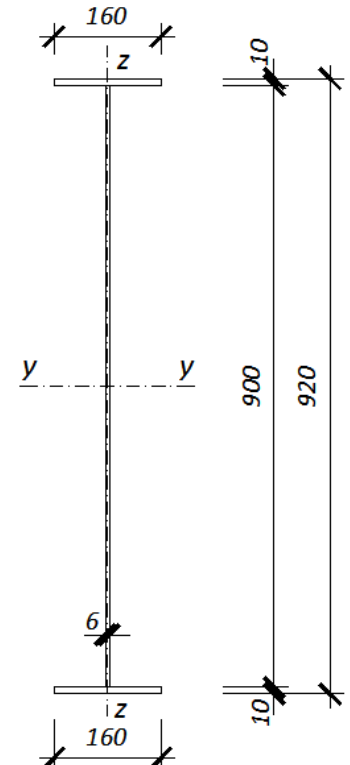


Rysunek 36: Obwiednia sił poprzecznych.

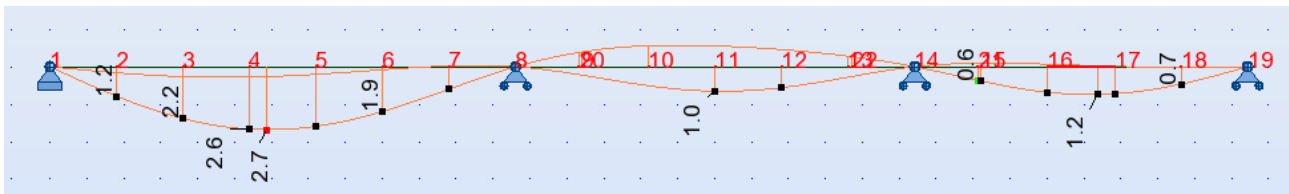
Warunki nośności dla nowej konfiguracji przekrojów poprzecznych

Warunki nośności	Przekrój poprzeczny
<p>Podpora 0</p> $\frac{V_{Ed}}{V_{b,Rd}} = \frac{272,7}{514,1} = 0,52 < 1,0$ <p>Przęsło 01</p> $\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} = \frac{895,11}{956,6} = 0,94 < 1,0$ <p>Element nie wrażliwy na zwichrzenie.</p> <p>Podpora 1</p> $\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} = \frac{941,0}{956,6} = 0,98 < 1,0$ $\frac{V_{Ed}}{V_{b,Rd}} = \frac{497,7}{554,15} = 0,90 < 1,0$ <p>Warunek interakcyjny</p> $\frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}} = \frac{797,0}{1140} = 0,70 < \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}} = \frac{792,3}{1140} = 0,70$ $\eta_1 + \left(1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}}\right) \left(2 \frac{V_{Ed}}{V_{bw,Rd}} - 1\right) =$ $= 0,70 + \left(1 - \frac{792,3}{1140}\right) \left(2 \frac{322,6}{554,15} - 1\right) = 0,71 < 1,0$ <p>Element niewrażliwy na zwichrzenie.</p>	

Warunki nośności	Przekrój poprzeczny
<p style="text-align: center;">Przęsło 12</p> $\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} = \frac{358,7}{489,4} = 0,73 < 1,0$ $\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} = \frac{358,7}{456,1} = 0,79 < 1,0$	
<p style="text-align: center;">Podpora 2</p> $\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} = \frac{629,52}{721,6} = 0,87 < 1,0$ $\frac{V_{Ed}}{V_{b,Rd}} = \frac{380,92}{484,7} = 0,78 < 1,0$ <p style="text-align: center;">Warunek interakcyjny</p> $\frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}} = \frac{502,54}{897,2} = 0,56 < \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}} = \frac{554,6}{897,2} = 0,62$ $\eta_1 + \left(1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}}\right) \left(2 \frac{V_{Ed}}{V_{bw,Rd}} - 1\right) =$ $= 0,62 + \left(1 - \frac{554,6}{897,2}\right) \left(2 \frac{281,4}{484,7} - 1\right) = 0,63 < 1,0$ <p style="text-align: center;">Element niewrażliwy na zwichrzenie.</p>	

Warunki nośności	Przekrój poprzeczny
<p style="text-align: center;">Przęsło 23</p> $\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} = \frac{472,94}{566,6} = 0,83 < 1,0$ $\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} = \frac{472,94}{517,8} = 0,91 < 1,0$ <p style="text-align: center;">Podpora 3</p> $\frac{V_{Ed}}{V_{b,Rd}} = \frac{184,8}{494,3} = 0,37 < 1,0$	

### Sprawdzenie stanu granicznego użytkowności



Rysunek 37: Obwiednia ugięć podciągu.

Maksymalne ugięcie w przęśle 01

$$w_{max} = 27,0 \text{ mm} < w_{lim} = \frac{l_{01}}{350} = \frac{12600}{350} = 36 \text{ mm}$$

Maksymalne ugięcie w przęśle 23

$$w_{max} = 12,0 \text{ mm} < w_{lim} = \frac{l_{23}}{350} = \frac{9000}{350} = 25,7 \text{ mm}$$

Maksymalne uniesienie przęsła środkowego

$$w_{max} = 9,0 \text{ mm} < w_{lim} = \frac{l_{12}}{350} = \frac{10000}{350} = 28,6 \text{ mm}$$



Maksymalne ugięcie przęsła środkowego

$$w_{max} = 10,0 \text{ mm} < w_{lim} = \frac{l_{12}}{350} = \frac{10000}{350} = 28,6 \text{ mm}$$

Warunki stanu granicznego użyteczności zostały spełnione dla każdego z przęseł podciągu.

## Wymiarowanie żeber poprzecznych

### Podpora 0

Reakcja podporowa  $R_0 = 271,0 \text{ kN}$

Przyjęto rozwiązanie w postaci obustronnego żebra z blach.

Parametry przekroju belki na podporze 0

$$b_f = 200 \text{ mm} , \quad t_f = 16 \text{ mm} , \quad h_w = 900 \text{ mm} , \quad t_w = 6 \text{ mm}$$

Wstępny dobór parametrów skrzydeł żebra

$$b_{s,max} = 0,5(b_f - t_w) = 0,5(200 - 6) = 97,0 \text{ mm}$$

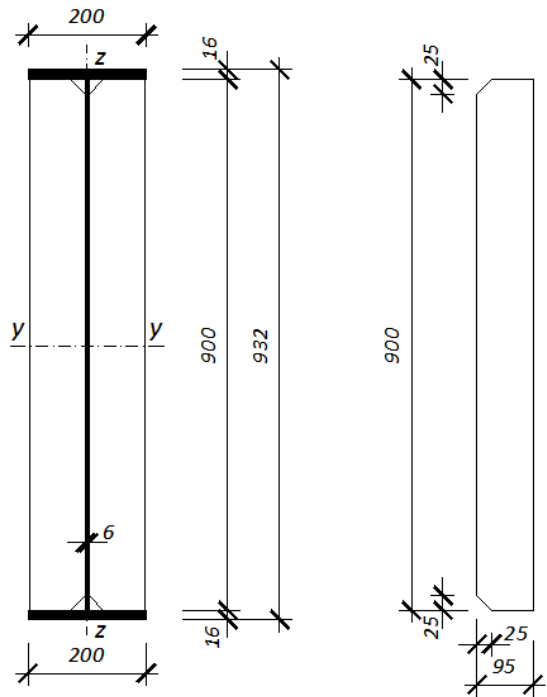
$$b_s = \frac{h_w}{30} + 50 = \frac{900}{30} + 50 = 80 \text{ mm}$$

Przyjęto skrzydło żebra o szerokości

$$b_s = 95 \text{ mm} .$$

Minimalna grubość skrzydła żebra

$$t_{s,min} = \frac{b_s}{14 \varepsilon} = \frac{95}{14 \cdot 0,92} = 7,3 \text{ mm}$$



Grubość żebra z uwagi na docisk do pasa belki

Zakłada się wykonanie podcięć w żebrze o przyprostokątnej  $c_s = 25 \text{ mm}$  .

$$t_{s,min} = \frac{R_0}{2(b_s - c_s) f_y} = \frac{271,3 \cdot 10^3}{2(95 - 25) 275} = 7,04 \text{ mm}$$

Przyjęto żebro o wymiarach

$$b_s = 95 \text{ mm} , \quad t_s = 10 \text{ mm} .$$

Ustalenie cech geometrycznych żebra

Maksymalna szerokość współpracująca średnika

$$15 \varepsilon t_w = 15 \cdot 0,92 \cdot 6 = 83,2 \text{ mm}$$

Przyjęto przedłużenie belki poza oś podparcia wynoszące

$$l_s = 120 \text{ mm} > 15 \varepsilon t_w = 83,2 \text{ mm} .$$

Pole efektywne przekroju żebra

$$A_s = 2 b_s t_s + (30 \varepsilon t_w + t_s) t_w = 2 \cdot 95 \cdot 10 + (30 \cdot 0,92 \cdot 6 + 10) 6 = 29,58 \cdot 10^2 \text{ mm}^2$$

Moment bezwładności żebra

$$J_s = 2 \left[ \frac{t_s b_s^3}{12} + b_s t_s \left( \frac{b_s + t_w}{2} \right)^2 \right] + \frac{(30 \varepsilon t_w + t_s) t_w^3}{12} = 2 \left[ \frac{10 \cdot 95^3}{12} + 95 \cdot 10 \left( \frac{95 + 6}{2} \right)^2 \right] + \frac{(30 \cdot 0,92 \cdot 6 + 10) 6^3}{12} = 627,8 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

Promień bezwładności

$$i_s = \sqrt{\frac{J_s}{A_s}} = \sqrt{\frac{627,8 \cdot 10^4}{29,58 \cdot 10^2}} = 46 \text{ mm}$$

Sprawdzenie typu żebra - rozstaw żeber w strefie podpory 0 -  $a = 1800 \text{ mm}$  .

$$\frac{a}{h_w} = \frac{1800}{900} = 2 > \sqrt{2}$$

$$J_{s, \min} = 0,75 h_w t_w^3 = 0,75 \cdot 900^3 6^3 = 14,6 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

$$J_s = 627,8 \cdot 10^4 \text{ mm}^4 > J_{s, \min} = 14,6 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

Żebro można traktować jako sztywne.

Sprawdzenie stateczności żebra przy wyboczeniu skrętnym

Moment bezwładności skrzydła żebra przy skręcaniu swobodnym

$$J_T = \frac{1}{3} b_s t_s^3 = \frac{1}{3} 95 \cdot 10^3 = 3,2 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

Biegunowy moment bezwładności skrzydła żebra

$$J_p = \frac{t_s b_s^3}{3} + \frac{b_s t_s^3}{12} = \frac{10 \cdot 95^3}{12} + \frac{95 \cdot 10^3}{12} = 286,6 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

Sprawdzenie warunku stateczności

$$\frac{J_T}{J_p} = \frac{3,2 \cdot 10^4}{286,6 \cdot 10^4} = 0,011 > 5,3 \frac{f_y}{E} = 5,3 \frac{275}{210000} = 0,007$$

Warunek stateczności żebra jest spełniony. Żebro nie jest narażone na wyboczenie skrętne.

Sprawdzenie żebra na ściskanie

Klasa przekroju żebra

$$\frac{b_s}{t_s} = \frac{95}{10} = 9,5 < 14 \varepsilon = 14 \cdot 0,92 = 12,9 \quad \text{– klasa 3}$$

Obliczeniowa nośność przekroju żebra przy osiowym ścisaniu

$$N_{c,Rd} = A_s \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 29,58 \cdot 10^2 \frac{275}{1,0} = 813,6 \cdot 10^3 \text{ N} = 813,6 \text{ kN}$$

Sprawdzenie warunku nośności przekroju

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} = \frac{271,0}{813,6} = 0,33 < 1,0$$

Warunek nośności został spełniony.

Sprawdzenie nośności żebra na wyboczenie

Przyjęto sztywne stężenie pasów w kierunku bocznym.

Długość wyboczeniowa żebra wynosi

$$L_{cr} = 0,75 h_w = 0,75 \cdot 900 = 675 \text{ mm}$$

Smukłość porównawcza

$$\lambda_1 = 93,9 \varepsilon = 93,9 \cdot 0,92 = 86,8$$

Smukłość względna żebra

$$\bar{\lambda} = \frac{L_{cr}}{i_s} \frac{1}{\lambda_1} = \frac{675}{46} \frac{1}{86,8} = 0,169 < 0,2$$

Żebro nie jest wrażliwe na wyboczenie. Warunek stateczności żebra sprowadza się do warunku nośności przekroju.

Sprawdzenie nośności żebra na docisk

Pole docisku

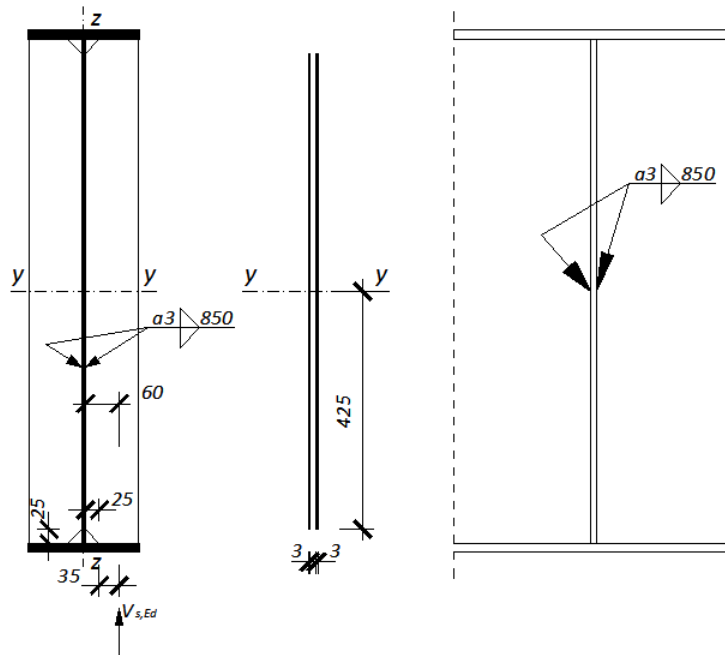
$$A_d = 2(b_s - c_s)t_s = 2(95 - 25)10 = 14,0 \cdot 10^2 \text{ mm}^2$$

Sprawdzenie naprężeń

$$\sigma_d = \frac{N_{Ed}}{A_d} = \frac{271,0 \cdot 10^3}{14,0 \cdot 10^2} = 193,6 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} < f_y = 275 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Warunek został spełniony.

Sprawdzenie nośności spoin łączących żebro ze środnikiem podciągu.



Rysunek 38: Schemat obliczeniowy połączenia żebra ze środnikiem.

Siła w skrzydle żebra poprzecznego

$$V_{s,Ed} = \frac{N_{Ed}}{2} = \frac{271,0}{2} = 135,5 \text{ kN}$$

Mimośród działania siły względem płaszczyzny styku żebra ze środnikiem

$$e_v = \frac{b_s + c_s}{2} = \frac{95 + 25}{2} = 60 \text{ mm}$$

Dobór grubości spoin łączących pasy ze środkiem

$$t_1 = 6 \text{ mm} \quad , \quad t_2 = 10 \text{ mm}$$

$$0,2t_2 = 0,2 \cdot 10 = 2,0 \text{ mm} \leq a \leq 0,7t_1 = 0,7 \cdot 6 = 4,2 \text{ mm}$$

Przyjęto  $a_w = 3 \text{ mm}$  .

Długość spoin łączących żebro ze środkiem podciągu

$$l_w = h_w - 2c = 900 - 2 \cdot 25 = 850 \text{ mm}$$

Współczynnik redukcyny z uwagi na długość spoiny

$$\beta_{Lw} = 1,1 - \frac{l_w}{17} = 1,1 - \frac{0,85}{17} = 1,05 > 1,0$$

Przyjęto:  $\beta_{Lw} = 1,0$

Współczynnik korelacji dla stali S275 wynosi  $\beta_w = 0,85$  .

Warunek nośności spoin

$$\begin{aligned} \sqrt{2\sigma^2 + 3\tau_{\parallel}^2} &= \sqrt{2 \left( \frac{3V_{s,Ed}(b+c)}{2a_w l_w^2} \right)^2 + 3 \left( \frac{V_{s,Ed}}{2a_w l_w} \right)^2} = \\ &= \sqrt{2 \left( \frac{2 \cdot 135,5 \cdot 10^3 (95+25)}{2 \cdot 3 \cdot 830^2} \right)^2 + 3 \left( \frac{135,5 \cdot 10^3}{2 \cdot 3 \cdot 830} \right)^2} = 36,5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} < \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} \beta_{Lw,2} = \\ &= \frac{430}{0,85 \cdot 1,25} = 404,7 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \end{aligned}$$

### **Podpora 1**

Reakcja podporowa  $R_0 = 818,5 \text{ kN}$

Przyjęto rozwiązanie w postaci obustronnego żebra z blach.

Parametry przekroju belki na podporze 1

$$b_f = 200 \text{ mm} \quad , \quad t_f = 16 \text{ mm} \quad , \quad h_w = 900 \text{ mm} \quad , \quad t_w = 6 \text{ mm}$$

Wstępny dobór parametrów skrzydeł żebra

$$b_{s,max} = 0,5(b_f - t_w) = 0,5(200 - 6) = 97 \text{ mm}$$

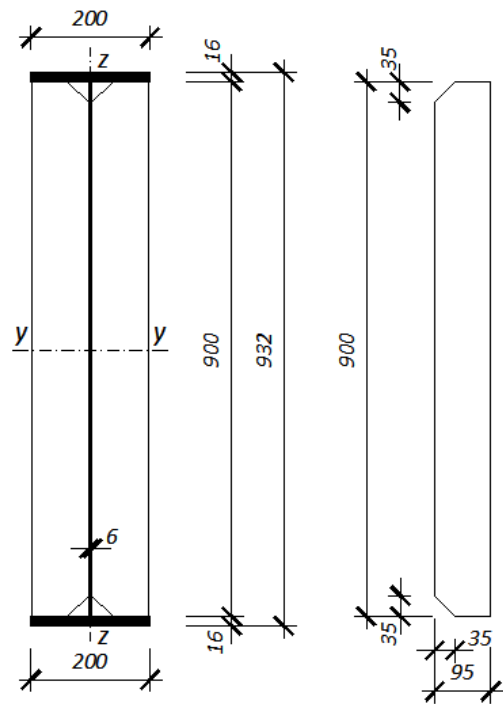
$$b_s = \frac{h_w}{30} + 50 = \frac{900}{30} + 50 = 80 \text{ mm}$$

Przyjęto skrzydło żebra o szerokości

$$b_s = 95 \text{ mm}$$

Minimalna grubość skrzydła żebra

$$t_{s,min} = \frac{b_s}{14 \varepsilon} = \frac{95}{14 \cdot 0,92} = 7,3 \text{ mm}$$



Grubość żebra z uwagi na docisk do pasa belki

Zakłada się wykonanie podcięć w żebrze o przyprostokątnej  $c_s = 35 \text{ mm}$

$$t_{s,min} = \frac{R_0}{2(b_s - c_s) f_y} = \frac{818,5 \cdot 10^3}{2(95 - 35) 275} = 24,8 \text{ mm}$$

Przyjęto żebro o wymiarach

$$b_s = 95 \text{ mm}, \quad t_s = 26 \text{ mm}$$

Ustalenie cech geometrycznych żebra

Maksymalna szerokość współpracująca środnika

$$15 \varepsilon t_w = 15 \cdot 0,92 \cdot 6 = 83,2 \text{ mm}$$

Pole efektywne przekroju żebra

$$A_s = 2 b_s t_s + (30 \varepsilon t_w + t_s) t_w = 2 \cdot 95 \cdot 26 + (30 \cdot 0,92 \cdot 6 + 26) 7 = 60,9 \cdot 10^2 \text{ mm}^2$$

Moment bezwładności żebra

$$J_s = 2 \left[ \frac{t_s b_s^3}{12} + b_s t_s \left( \frac{b_s + t_w}{2} \right)^2 \right] + \frac{(30 \varepsilon t_w + t_s) t_w^3}{12} = 2 \left[ \frac{26 \cdot 95^3}{12} + 95 \cdot 26 \left( \frac{95 + 6}{2} \right)^2 \right] + \frac{(30 \cdot 0,92 \cdot 6 + 10) 6^3}{12} = 1631,7 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

Promień bezwładności

$$i_s = \sqrt{\frac{J_s}{A_s}} = \sqrt{\frac{1631,7 \cdot 10^4}{60,9 \cdot 10^2}} = 52 \text{ mm}$$

Sprawdzenie typu żebra - rozstaw żeber w strefie podpory 1 -  $a = 1800 \text{ mm}$  .

$$\frac{a}{h_w} = \frac{1800}{900} = 2 > \sqrt{2}$$

$$J_{s, \min} = 0,75 h_w t_w^3 = 0,75 \cdot 900 \cdot 6^3 = 14,6 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

$$J_s = 1631,7 \cdot 10^4 \text{ mm}^4 > J_{s, \min} = 14,6 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

Żebro można traktować jako sztywne.

Sprawdzenie stateczności żebra przy wyboczeniu skrętnym

Moment bezwładności skrzydła żebra przy skręcaniu swobodnym

$$J_T = \frac{1}{3} b_s t_s^3 = \frac{1}{3} 95 \cdot 26^3 = 55,7 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

Biegunowy moment bezwładności skrzydła żebra

$$J_p = \frac{t_s b_s^3}{3} + \frac{b_s t_s^3}{12} = \frac{26 \cdot 95^3}{12} + \frac{95 \cdot 26^3}{12} = 757,0 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

Sprawdzenie warunku stateczności

$$\frac{J_T}{J_p} = \frac{55,7 \cdot 10^4}{757,0 \cdot 10^4} = 0,074 > 5,3 \frac{f_y}{E} = 5,3 \frac{275}{210000} = 0,007$$

Warunek stateczności żebra jest spełniony. Żebro nie jest narażone na wyboczenie skrętne.



Sprawdzenie żebra na ściskanie

Klasa przekroju żebra

$$\frac{b_s}{t_s} = \frac{95}{26} = 3,65 < 9 \varepsilon = 9 \cdot 0,92 = 8,28 \quad \text{– klasa 1}$$

Obliczeniowa nośność przekroju żebra przy osiowym ściskaniu

$$N_{c,Rd} = A_s \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 60,9 \cdot 10^2 \frac{275}{1,0} = 1676 \cdot 10^3 \text{ N} = 1676 \text{ kN}$$

Sprawdzenie warunku nośności przekroju

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} = \frac{818,5}{1676} = 0,49 < 1,0$$

Warunek nośności został spełniony.

Sprawdzenie nośności żebra na wyboczenie

Przyjęto sztywne stężenie pasów w kierunku bocznym.

Długość wyboczeniowa żebra wynosi

$$L_{cr} = 0,75 h_w = 0,75 \cdot 900 = 675 \text{ mm}$$

Smukłość porównawcza

$$\lambda_1 = 93,9 \varepsilon = 93,9 \cdot 0,92 = 86,8$$

Smukłość względna żebra

$$\bar{\lambda} = \frac{L_{cr}}{i_s} \frac{1}{\lambda_1} = \frac{675}{52} \frac{1}{86,8} = 0,15 < 0,2$$

Żebro nie jest wrażliwe na wyboczenie. Warunek stateczności żebra sprowadza się do warunku nośności przekroju.

Sprawdzenie nośności żebra na docisk

Pole docisku

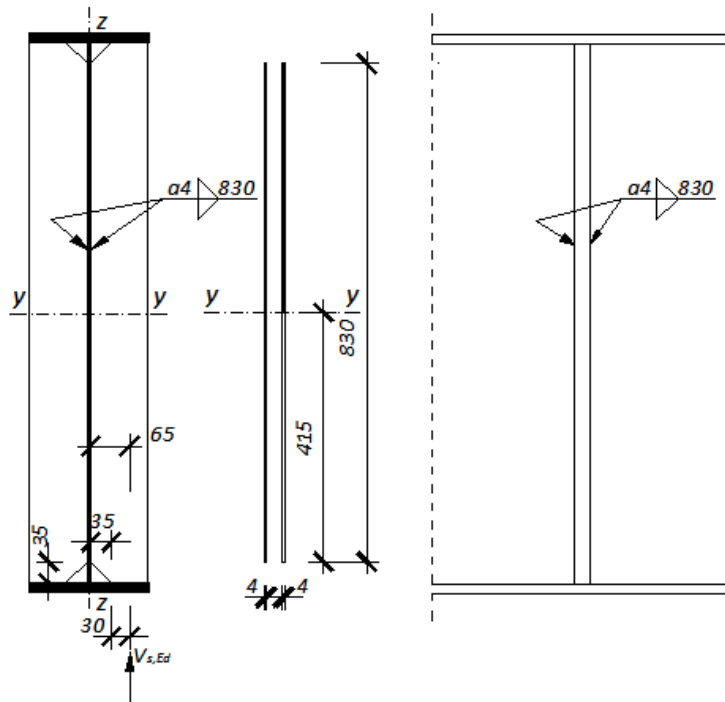
$$A_d = 2(b_s - c_s)t_s = 2(95 - 35)26 = 31,2 \cdot 10^2 \text{ mm}^2$$

Sprawdzenie naprężeń

$$\sigma_d = \frac{N_{Ed}}{A_d} = \frac{818,5 \cdot 10^3}{31,2 \cdot 10^2} = 262,3 \frac{N}{mm^2} < f_y = 275 \frac{N}{mm^2}$$

Warunek został spełniony.

Sprawdzenie nośności spoin łączących żebro ze środnikiem podciągu.



Rysunek 39: Schemat połączenia żebra ze środnikiem.

Siła w skrzydle żebra poprzecznego

$$V_{s,Ed} = \frac{N_{Ed}}{2} = \frac{818,5}{2} = 409,25 \text{ kN}$$

Mimośród działania siły względem płaszczyzny styku żebra ze środnikiem

$$e_v = \frac{b_s + c}{2} = \frac{95 + 35}{2} = 65 \text{ mm}$$

Dobór grubości spoin łączących pasy ze środnikiem

$$t_1 = 6 \text{ mm} \quad , \quad t_2 = 26 \text{ mm}$$

$$0,2 t_2 = 0,2 \cdot 26 = 5,2 \text{ mm} \leq a \leq 0,7 t_1 = 0,7 \cdot 6 = 4,2 \text{ mm}$$

Przyjęto  $a_w = 4 \text{ mm}$  .

Długość spoin łączących żebro ze środkiem podciągu

$$l_w = h_w - 2c = 900 - 2 \cdot 35 = 830 \text{ mm}$$

Współczynnik redukcyjny z uwagi na długość spoiny

$$\beta_{Lw} = 1,1 - \frac{l_w}{17} = 1,1 - \frac{0,83}{17} = 1,05 > 1,0$$

Przyjęto:  $\beta_{Lw} = 1,0$

Współczynnik korelacji dla stali S275 wynosi  $\beta_w = 0,85$  .

Warunek nośności spoin

$$\begin{aligned} \sqrt{2\sigma^2 + 3\tau_{\parallel}^2} &= \sqrt{2 \left( \frac{3V_{s,Ed}(b+c)}{2a_w l_w^2} \right)^2 + 3 \left( \frac{V_{s,Ed}}{2a_w l_w} \right)^2} = \\ &= \sqrt{2 \left( \frac{2 \cdot 409,25 \cdot 10^3 (95+35)}{2 \cdot 4 \cdot 830^2} \right)^2 + 3 \left( \frac{409,25 \cdot 10^3}{2 \cdot 4 \cdot 830} \right)^2} = 114,3 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} < \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} \beta_{Lw,2} = \\ &= \frac{430}{0,85 \cdot 1,25} = 404,7 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \end{aligned}$$

## **Podpora 2**

Reakcja podporowa  $R_0 = 661,5 \text{ kN}$

Przyjęto rozwiązanie w postaci obustronnego żebra z blach.

Parametry przekroju belki na podporze 2

$$b_f = 160 \text{ mm} \quad , \quad t_f = 14 \text{ mm} \quad , \quad h_w = 900 \text{ mm} \quad , \quad t_w = 6 \text{ mm}$$

Wstępny dobór parametrów skrzydeł żebra

$$b_{s,max} = 0,5(b_f - t_w) = 0,5(160 - 6) = 77 \text{ mm}$$

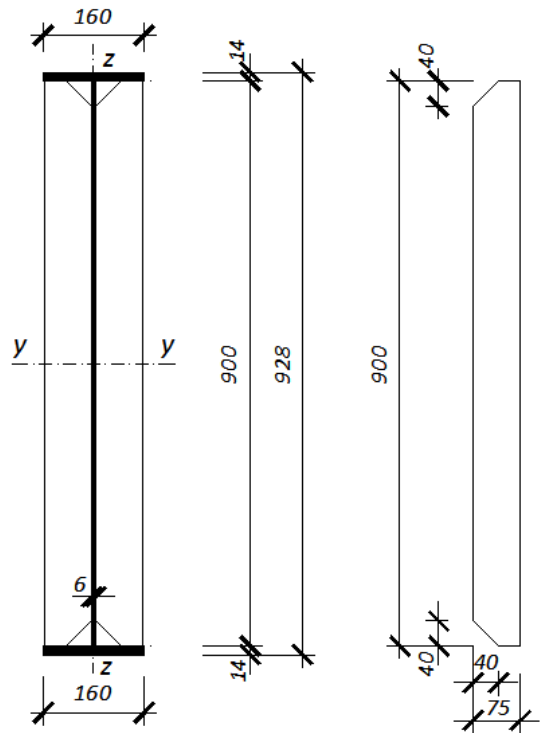
$$b_s = \frac{h_w}{30} + 50 = \frac{900}{30} + 50 = 80 \text{ mm}$$

Przyjęto skrzydło żebra o szerokości

$$b_s = 75 \text{ mm}$$

Minimalna grubość skrzydła żebra

$$t_{s,min} = \frac{b_s}{14 \varepsilon} = \frac{75}{14 \cdot 0,92} = 5,8 \text{ mm}$$



Grubość żebra z uwagi na docisk do pasa belki

Zakłada się wykonanie podcięć w żebrze o przyprostokątnej  $c_s = 40 \text{ mm}$

$$t_{s,min} = \frac{R_0}{2(b_s - c_s) f_y} = \frac{661,5 \cdot 10^3}{2(75 - 40) 275} = 34,4 \text{ mm}$$

Przyjęto żebro o wymiarach

$$b_s = 75 \text{ mm}, \quad t_s = 36 \text{ mm}$$

Ustalenie cech geometrycznych żebra

Maksymalna szerokość współpracująca średnika

$$15 \varepsilon t_w = 15 \cdot 0,92 \cdot 6 = 83,2 \text{ mm}$$

Pole efektywne przekroju żebra

$$A_s = 2 b_s t_s + (30 \varepsilon t_w + t_s) t_w = 2 \cdot 75 \cdot 36 + (30 \cdot 0,92 \cdot 6 + 10) 6 = 66,14 \cdot 10^2 \text{ mm}^2$$

Moment bezwładności żebra

$$J_s = 2 \left[ \frac{t_s b_s^3}{12} + b_s t_s \left( \frac{b_s + t_w}{2} \right)^2 \right] + \frac{(30 \varepsilon t_w + t_s) t_w^3}{12} = 2 \left[ \frac{36 \cdot 75^3}{12} + 75 \cdot 36 \left( \frac{75 + 6}{2} \right)^2 \right] + \frac{(30 \cdot 0,92 \cdot 6 + 10) 6^3}{12} = 1139,2 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

Promień bezwładności

$$i_s = \sqrt{\frac{J_s}{A_s}} = \sqrt{\frac{1139,2 \cdot 10^4}{66,14 \cdot 10^2}} = 42 \text{ mm}$$

Sprawdzenie typu żebra - rozstaw żeber w strefie podpory 1 -  $a = 1800 \text{ mm}$  .

$$\frac{a}{h_w} = \frac{1800}{900} = 2 > \sqrt{2}$$

$$J_{s, \min} = 0,75 h_w t_w^3 = 0,75 \cdot 900 \cdot 6^3 = 14,6 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

$$J_s = 1139,2 \cdot 10^4 \text{ mm}^4 > J_{s, \min} = 14,6 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

Żebro można traktować jako sztywne.

Sprawdzenie stateczności żebra przy wyboczeniu skrętnym

Moment bezwładności skrzydła żebra przy skręcaniu swobodnym

$$J_T = \frac{1}{3} b_s t_s^3 = \frac{1}{3} 75 \cdot 36^3 = 116,6 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

Biegunowy moment bezwładności skrzydła żebra

$$J_p = \frac{t_s b_s^3}{3} + \frac{b_s t_s^3}{12} = \frac{36 \cdot 75^3}{12} + \frac{75 \cdot 36^3}{12} = 535,4 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

Sprawdzenie warunku stateczności

$$\frac{J_T}{J_p} = \frac{116,6 \cdot 10^4}{535,4 \cdot 10^4} = 0,218 > 5,3 \frac{f_y}{E} = 5,3 \frac{275}{210000} = 0,007$$

Warunek stateczności żebra jest spełniony. Żebro nie jest narażone na wyboczenie skrętne.

Sprawdzenie żebra na ściskanie

Klasa przekroju żebra

$$\frac{b_s}{t_s} = \frac{75}{36} = 2,08 < 9 \varepsilon = 9 \cdot 0,92 = 8,28 \quad \text{– klasa 1}$$

Obliczeniowa nośność przekroju żebra przy osiowym ściskaniu

$$N_{c,Rd} = A_s \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 66,14 \cdot 10^2 \frac{275}{1,0} = 1819 \cdot 10^3 \text{ N} = 1819,0 \text{ kN}$$

Sprawdzenie warunku nośności przekroju

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} = \frac{661,5}{1819,0} = 0,36 < 1,0$$

Warunek nośności został spełniony.

Sprawdzenie nośności żebra na wyboczenie

Przyjęto sztywne stężenie pasów w kierunku bocznym.

Długość wyboczeniowa żebra wynosi

$$L_{cr} = 0,75 h_w = 0,75 \cdot 900 = 675 \text{ mm}$$

Smukłość porównawcza

$$\lambda_1 = 93,9 \varepsilon = 93,9 \cdot 0,92 = 86,8$$

Smukłość względna żebra

$$\bar{\lambda} = \frac{L_{cr}}{i_s} \frac{1}{\lambda_1} = \frac{675}{42} \frac{1}{86,8} = 0,187 < 0,2$$

Żebro nie jest wrażliwe na wyboczenie. Warunek stateczności żebra sprowadza się do warunku nośności przekroju.

Sprawdzenie nośności żebra na docisk

Pole docisku

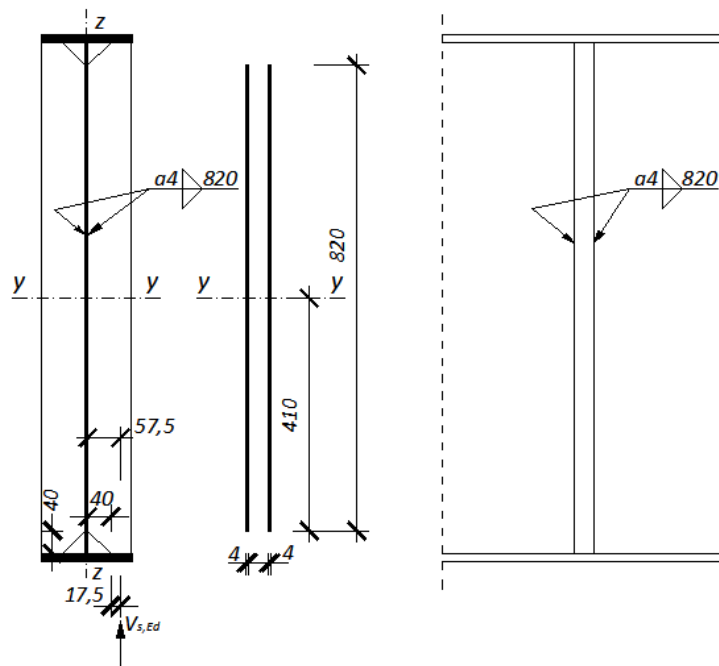
$$A_d = 2(b_s - c_s)t_s = 2(75 - 40)36 = 25,2 \cdot 10^2 \text{ mm}^2$$

Sprawdzenie naprężeń

$$\sigma_d = \frac{N_{Ed}}{A_d} = \frac{661,5 \cdot 10^3}{25,2 \cdot 10^2} = 262,6 \frac{N}{mm^2} < f_y = 275 \frac{N}{mm^2}$$

Warunek został spełniony.

Sprawdzenie nośności spoin łączących żebro ze środnikiem podciągu.



Rysunek 40: Schemat połączenia żebra ze środnikiem.

Siła w skrzydle żebra poprzecznego

$$V_{s,Ed} = \frac{N_{Ed}}{2} = \frac{661,5}{2} = 330,75 \text{ kN}$$

Mimośród działania siły względem płaszczyzny styku żebra ze środnikiem

$$e_v = \frac{b_s + c}{2} = \frac{75 + 45}{2} = 57,5 \text{ mm}$$

Dobór grubości spoin łączących pasy ze środnikiem

$$t_1 = 6 \text{ mm} \quad , \quad t_2 = 36 \text{ mm}$$

$$0,2t_2 = 0,2 \cdot 36 = 7,2 \text{ mm} \leq a \leq 0,7t_1 = 0,7 \cdot 6 = 4,2 \text{ mm}$$

Przyjęto  $a_w = 4 \text{ mm}$  .

Długość spoin łączących żebro ze środkiem podciągu

$$l_w = h_w - 2c = 900 - 2 \cdot 40 = 820 \text{ mm}$$

Współczynnik redukcyjny z uwagi na długość spoiny

$$\beta_{Lw} = 1,1 - \frac{l_w}{17} = 1,1 - \frac{0,82}{17} = 1,05 > 1,0$$

Przyjęto:  $\beta_{Lw} = 1,0$

Współczynnik korelacji dla stali S275 wynosi  $\beta_w = 0,85$  .

Warunek nośności spoin

$$\begin{aligned} \sqrt{2\sigma^2 + 3\tau_{\parallel}^2} &= \sqrt{2 \left( \frac{3 V_{s, Ed} (b+c)}{2 a_w l_w^2} \right)^2 + 3 \left( \frac{V_{s, Ed}}{2 a_w l_w} \right)^2} = \\ &= \sqrt{2 \left( \frac{2 \cdot 330,75 \cdot 10^3 (75+40)}{2 \cdot 4 \cdot 820^2} \right)^2 + 3 \left( \frac{330,75 \cdot 10^3}{2 \cdot 4 \cdot 820} \right)^2} = 92,3 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} < \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} \beta_{Lw,2} = \\ &= \frac{430}{0,85 \cdot 1,25} = 404,7 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \end{aligned}$$

### **Podpora 3**

Reakcja podporowa  $R_0 = 183,7 \text{ kN}$

Przyjęto rozwiązanie w postaci obustronnego żebra z blach.

Parametry przekroju belki na podporze 3

$$b_f = 160 \text{ mm} \quad , \quad t_f = 10 \text{ mm} \quad , \quad h_w = 900 \text{ mm} \quad , \quad t_w = 6 \text{ mm}$$



Wstępny dobór parametrów skrzydeł żebra

$$b_{s,max} = 0,5(b_f - t_w) = 0,5(160 - 6) = 77 \text{ mm}$$

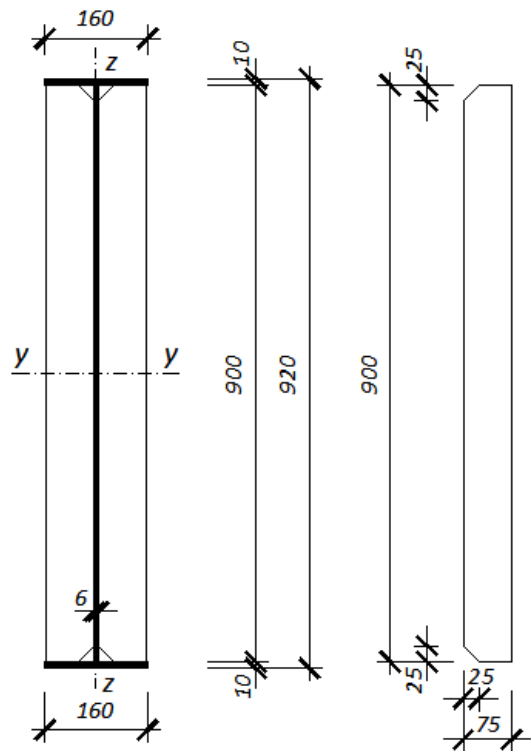
$$b_s = \frac{h_w}{30} + 50 = \frac{900}{30} + 50 = 80 \text{ mm}$$

Przyjęto skrzydło żebra o szerokości

$$b_s = 75 \text{ mm}$$

Minimalna grubość skrzydła żebra

$$t_{s,min} = \frac{b_s}{14 \varepsilon} = \frac{75}{14 \cdot 0,92} = 6,7 \text{ mm}$$



Grubość żebra z uwagi na docisk do pasa belki

Zakłada się wykonanie podcięć w żebrze o przyprostokątnej  $c_s = 25 \text{ mm}$ .

$$t_{s,min} = \frac{R_0}{2(b_s - c_s) f_y} = \frac{183,7 \cdot 10^3}{2(75 - 25) 275} = 6,7 \text{ mm}$$

Przyjęto żebro o wymiarach

$$b_s = 75 \text{ mm}, \quad t_s = 8 \text{ mm}$$

Ustalenie cech geometrycznych żebra

Maksymalna szerokość współpracująca środnika

$$15 \varepsilon t_w = 15 \cdot 0,92 \cdot 6 = 83,2 \text{ mm}$$

Pole efektywne przekroju żebra

$$A_s = 2 b_s t_s + (30 \varepsilon t_w + t_s) t_w = 2 \cdot 75 \cdot 8 + (30 \cdot 0,92 \cdot 6 + 8) 6 = 22,46 \cdot 10^2 \text{ mm}^2$$

Moment bezwładności żebra

$$J_s = 2 \left[ \frac{t_s b_s^3}{12} + b_s t_s \left( \frac{b_s + t_w}{2} \right)^2 \right] + \frac{(30 \varepsilon t_w + t_s) t_w^3}{12} = 2 \left[ \frac{8 \cdot 75^3}{12} + 75 \cdot 8 \left( \frac{75 + 6}{2} \right)^2 \right] + \frac{(30 \cdot 0,92 \cdot 6 + 8) 6^3}{12} = 253,4 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

Promień bezwładności

$$i_s = \sqrt{\frac{J_s}{A_s}} = \sqrt{\frac{253,4 \cdot 10^4}{22,46 \cdot 10^2}} = 33 \text{ mm}$$

Sprawdzenie typu żebra - rozstaw zeber w strefie podpory 1 -  $a = 1800 \text{ mm}$  .

$$\frac{a}{h_w} = \frac{1800}{900} = 2 > \sqrt{2}$$

$$J_{s, \min} = 0,75 h_w t_w^3 = 0,75 \cdot 900 \cdot 6^3 = 14,6 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

$$J_s = 253,4 \cdot 10^4 \text{ mm}^4 > J_{s, \min} = 14,6 \cdot 10^4 \text{ mm}^2$$

Żebro można traktować jako sztywne.

Sprawdzenie stateczności żebra przy wyboczeniu skrętnym

Moment bezwładności skrzydła żebra przy skręcaniu swobodnym

$$J_T = \frac{1}{3} b_s t_s^3 = \frac{1}{3} 75 \cdot 8^3 = 1,28 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

Biegunowy moment bezwładności skrzydła żebra

$$J_p = \frac{t_s b_s^3}{3} + \frac{b_s t_s^3}{12} = \frac{8 \cdot 75^3}{12} + \frac{75 \cdot 8^3}{12} = 112,8 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

Sprawdzenie warunku stateczności

$$\frac{J_T}{J_p} = \frac{1,28 \cdot 10^4}{112,8 \cdot 10^4} = 0,011 > 5,3 \frac{f_y}{E} = 5,3 \frac{275}{210000} = 0,007$$

Warunek stateczności żebra jest spełniony. Żebro nie jest narażone na wyboczenie skrętne.

Sprawdzenie żebra na ściskanie

Klasa przekroju żebra

$$\frac{b_s}{t_s} = \frac{75}{8} = 9,37 < 10 \varepsilon = 10 \cdot 0,92 = 9,24 \quad \text{– klasa 2}$$

Obliczeniowa nośność przekroju żebra przy osiowym ściskaniu

$$N_{c,Rd} = A_s \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 22,46 \cdot 10^2 \frac{275}{1,0} = 617,8 \cdot 10^3 \text{ N} = 617,8 \text{ kN}$$

Sprawdzenie warunku nośności przekroju

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} = \frac{183,7}{617,8} = 0,30 < 1,0$$

Warunek nośności został spełniony.

Sprawdzenie nośności żebra na wyboczenie

Przyjęto sztywne stężenie pasów w kierunku bocznym.

Długość wyboczeniowa żebra wynosi

$$L_{cr} = 0,75 h_w = 0,75 \cdot 900 = 675 \text{ mm}$$

Smukłość porównawcza

$$\lambda_1 = 93,9 \varepsilon = 93,9 \cdot 0,92 = 86,8$$

Smukłość względna żebra

$$\bar{\lambda} = \frac{L_{cr}}{i_s} \frac{1}{\lambda_1} = \frac{675}{33} \frac{1}{86,8} = 0,232 > 0,2$$

Żebro jest wrażliwe na wyboczenie.

Określenie nośności żebra na wyboczenie

Współczynnik wyboczenia określony według krzywej wyboczeniowej c.

Parametr imperfekcji  $\alpha = 0,49$  .

Parametr krzywej wyboczenia

$$\Phi = 0,5 \left[ 1 + \alpha (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2 \right] = 0,5 \left[ 1 + 0,49 (0,232 - 0,2) + 0,232^2 \right] = 0,535$$

$$\chi = \frac{l}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{l}{0,535 + \sqrt{0,535^2 - 0,232^2}} = 0,984$$

Nośność żebra na wyboczenie

$$N_{b,Rd} = \chi A_s \frac{f_y}{\gamma_{M1}} = 0,984 \cdot 22,46 \cdot 10^2 \frac{275}{1,0} = 607,8 \cdot 10^3 \text{ N} = 607,8 \text{ kN}$$

Sprawdzenie warunku nośności

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} = \frac{183,7}{607,8} = 0,3 < 1,0$$

Warunek jest zachowany.

Sprawdzenie nośności żebra na docisk

Pole docisku

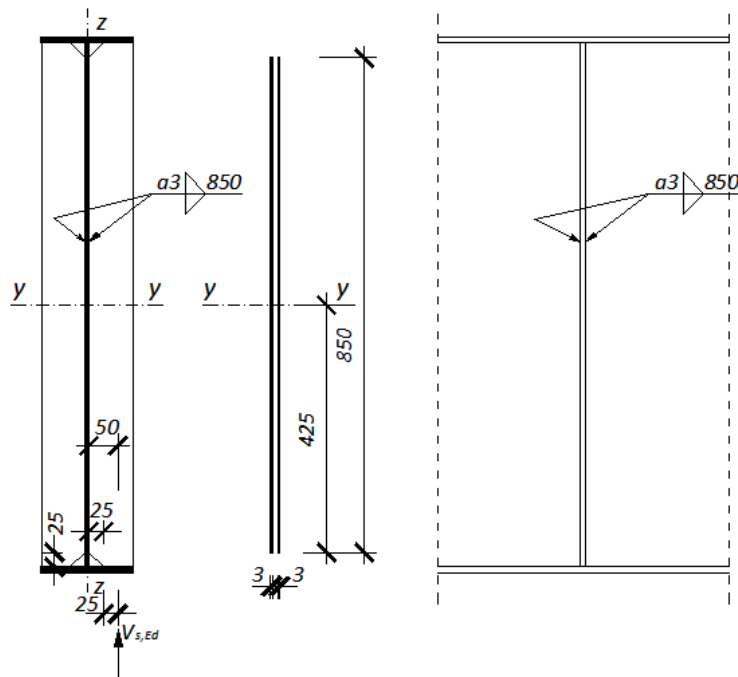
$$A_d = 2(b_s - c_s)t_s = 2(75 - 25)10 = 8,0 \cdot 10^2 \text{ mm}^2$$

Sprawdzenie naprężeń

$$\sigma_d = \frac{N_{Ed}}{A_d} = \frac{183,7 \cdot 10^3}{8,0 \cdot 10^2} = 229,6 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} < f_y = 275 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Warunek został spełniony.

Sprawdzenie nośności spoin łączących żebro ze środnikiem podciągu.



Rysunek 41: Schemat połączenia żebra ze środnikiem.

Siła w skrzydle żebra poprzecznego

$$V_{s,Ed} = \frac{N_{Ed}}{2} = \frac{183,7}{2} = 91,85 \text{ kN}$$

Mimośród działania siły względem płaszczyzny styku żebra ze środnikiem

$$e_v = \frac{b_s + c}{2} = \frac{75 + 25}{2} = 50 \text{ mm}$$

Dobór grubości spoin łączących pasy ze środnikiem

$$t_1 = 6 \text{ mm} \quad , \quad t_2 = 8 \text{ mm}$$

$$0,2t_2 = 0,2 \cdot 8 = 1,6 \text{ mm} \leq a \leq 0,7t_1 = 0,7 \cdot 6 = 4,2 \text{ mm}$$

Przyjęto  $a_w = 3 \text{ mm}$  .

Długość spoin łączących żebro ze środnikiem podciągu

$$l_w = h_w - 2c = 900 - 2 \cdot 25 = 850 \text{ mm}$$

Współczynnik redukcyjny z uwagi na długość spoiny

$$\beta_{Lw} = 1,1 - \frac{l_w}{17} = 1,1 - \frac{0,85}{17} = 1,05 > 1,0$$

Przyjęto:  $\beta_{Lw} = 1,0$

Współczynnik korelacji dla stali S275 wynosi  $\beta_w = 0,85$ .

Warunek nośności spoin

$$\begin{aligned} \sqrt{2\sigma^2 + 3\tau_{\parallel}^2} &= \sqrt{2 \left( \frac{3V_{s,Ed}(b+c)}{2a_w l_w^2} \right)^2 + 3 \left( \frac{V_{s,Ed}}{2a_w l_w} \right)^2} = \\ &= \sqrt{2 \left( \frac{2 \cdot 91,85 \cdot 10^3 (75+25)}{2 \cdot 3 \cdot 850^2} \right)^2 + 3 \left( \frac{91,85 \cdot 10^3}{2 \cdot 3 \cdot 850} \right)^2} = 32,5 \frac{N}{mm^2} < \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} \beta_{Lw,2} = \\ &= \frac{430}{0,85 \cdot 1,25} = 404,7 \frac{N}{mm^2} \end{aligned}$$

### **Żebra pośrednie**

Wymiarowaniu podlega żebro pod belkę stropową umieszczone w przekroju blachownicy o pasach szerokości  $b_f = 200 \text{ mm}$ .

Największa siła poprzeczna występująca w środku na odcinku występowania żebier pośrednich

$$V_{Ed} = 390,2 \text{ kN}$$

Rozstaw żebier  $a = 1800 \text{ mm}$ .

Smukłość względna płytowa środka  $\bar{\lambda}_w = 1,723$ .

Obciążenie żebra wynikające z działającej siły poprzecznej

$$N_{s,v} = V_{Ed} - \frac{1}{\bar{\lambda}_w^2} \frac{f_y h_w t_w}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} = 390,2 \cdot 10^3 - \frac{1}{1,423^2} \frac{275 \cdot 900 \cdot 6}{\sqrt{3} \cdot 1,0} = 101,4 \cdot 10^3 \text{ N} = 101,4 \text{ kN}$$

Obliczeniowa wartość siły przekazanej przez belki stropowe (zawieszane na obu skrzydłach żebra pośredniego)

$$F_{Ed} = 105,4 \text{ kN}$$

Siła podłużna w żebrze

$$N_{Ed} = F_{Ed} + N_{s,v} = 105,4 + 101,4 = 206,8 \text{ kN}$$

Wstępny dobór parametrów skrzydeł żebra

$$b_{s,max} = 0,5(b_f - t_w) = 0,5(200 - 6) = 97 \text{ mm}$$

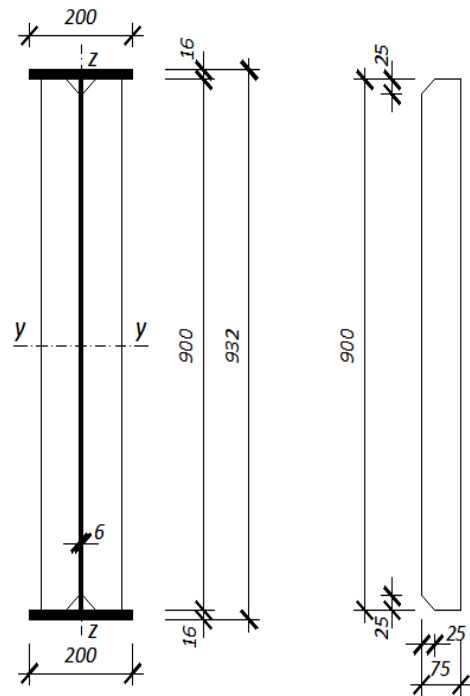
$$b_s = \frac{h_w}{30} + 50 = \frac{900}{30} + 50 = 80 \text{ mm}$$

Przyjęto skrzydło żebra o szerokości

$$b_s = 75 \text{ mm}$$

Minimalna grubość skrzydła żebra

$$t_{s,min} = \frac{b_s}{14 \varepsilon} = \frac{75}{14 \cdot 0,92} = 5,8 \text{ mm}$$



Przyjęto żebro o wymiarach:

$$b_s = 75 \text{ mm}, \quad t_s = 8 \text{ mm}$$

Ustalenie cech geometrycznych żebra

Maksymalna szerokość współpracująca środnika

$$15 \varepsilon t_w = 15 \cdot 0,92 \cdot 6 = 83,2 \text{ mm}$$

Pole efektywne przekroju żebra

$$A_s = 2 b_s t_s + (30 \varepsilon t_w + t_s) t_w = 2 \cdot 75 \cdot 8 + (30 \cdot 0,92 \cdot 6 + 8) 6 = 22,46 \cdot 10^2 \text{ mm}^2$$

Moment bezwładności żebra

$$J_s = 2 \left[ \frac{t_s b_s^3}{12} + b_s t_s \left( \frac{b_s + t_w}{2} \right)^2 \right] + \frac{(30 \varepsilon t_w + t_s) t_w^3}{12} = 2 \left[ \frac{8 \cdot 75^3}{12} + 75 \cdot 8 \left( \frac{75 + 6}{2} \right)^2 \right] + \frac{(30 \cdot 0,92 \cdot 6 + 8) 6^3}{12} = 253,4 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

Promień bezwładności

$$i_s = \sqrt{\frac{J_s}{A_s}} = \sqrt{\frac{253,4 \cdot 10^4}{22,46 \cdot 10^2}} = 33 \text{ mm}$$

Sprawdzenie typu żebra - rozstaw zeber w strefie podpory 1 -  $a = 1800 \text{ mm}$  .

$$\frac{a}{h_w} = \frac{1800}{900} = 2 > \sqrt{2}$$

$$J_{s, \min} = 0,75 h_w t_w^3 = 0,75 \cdot 900 \cdot 6^3 = 14,6 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

$$J_s = 253,4 \cdot 10^4 \text{ mm}^4 > J_{s, \min} = 14,6 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

Żebro można traktować jako sztywne.

Sprawdzenie stateczności żebra przy wyboczeniu skrętnym

Moment bezwładności skrzydła żebra przy skręcaniu swobodnym

$$J_T = \frac{1}{3} b_s t_s^3 = \frac{1}{3} 75 \cdot 8^3 = 1,28 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

Biegunowy moment bezwładności skrzydła żebra

$$J_p = \frac{t_s b_s^3}{3} + \frac{b_s t_s^3}{12} = \frac{8 \cdot 75^3}{12} + \frac{75 \cdot 8^3}{12} = 112,8 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

Sprawdzenie warunku stateczności

$$\frac{J_T}{J_p} = \frac{1,28 \cdot 10^4}{112,8 \cdot 10^4} = 0,011 > 5,3 \frac{f_y}{E} = 5,3 \frac{275}{210000} = 0,007$$

Warunek stateczności żebra jest spełniony. Żebro nie jest narażone na wyboczenie skrętne.

Sprawdzenie żebra na ściskanie



Klasa przekroju żebra

$$\frac{b_s}{t_s} = \frac{75}{8} = 9,37 < 10 \varepsilon = 10 \cdot 0,92 = 9,24 \quad - \text{klasa 2}$$

Obliczeniowa nośność przekroju żebra przy osiowym ściskaniu

$$N_{c,Rd} = A_s \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 22,46 \cdot 10^2 \frac{275}{1,0} = 617,8 \cdot 10^3 \text{ N} = 617,8 \text{ kN}$$

Sprawdzenie warunku nośności przekroju

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} = \frac{206,8}{617,8} = 0,34 < 1,0$$

Warunek nośności został spełniony.

Sprawdzenie nośności żebra na wyboczenie

Przyjęto sztywne stężenie pasów w kierunku bocznym.

Długość wyboczeniowa żebra wynosi

$$L_{cr} = 0,75 h_w = 0,75 \cdot 900 = 675 \text{ mm}$$

Smukłość porównawcza

$$\lambda_1 = 93,9 \varepsilon = 93,9 \cdot 0,92 = 86,8$$

Smukłość względna żebra

$$\bar{\lambda} = \frac{L_{cr}}{i_s} \frac{1}{\lambda_1} = \frac{675}{33} \frac{1}{86,8} = 0,232 > 0,2$$

Żebro jest wrażliwe na wyboczenie.

Określenie nośności żebra na wyboczenie

Współczynnik wyboczenia określony według krzywej wyboczeniowej c.

Parametr imperfekcji  $\alpha = 0,49$  .

Parametr krzywej wyboczenia

$$\Phi = 0,5 \left[ 1 + \alpha (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2 \right] = 0,5 \left[ 1 + 0,49 (0,232 - 0,2) + 0,232^2 \right] = 0,535$$

$$\chi = \frac{l}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{l}{0,535 + \sqrt{0,535^2 - 0,232^2}} = 0,984$$

Nośność żebra na wyboczenie

$$N_{b,Rd} = \chi A_s \frac{f_y}{\gamma_{M1}} = 0,984 \cdot 22,46 \cdot 10^2 \frac{275}{1,0} = 607,8 \cdot 10^3 \text{ N} = 607,8 \text{ kN}$$

Sprawdzenie warunku nośności

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} = \frac{206,8}{607,8} = 0,34 < 1,0$$

Warunek jest zachowany.

Sprawdzenie nośności żebra na docisk

Pole docisku

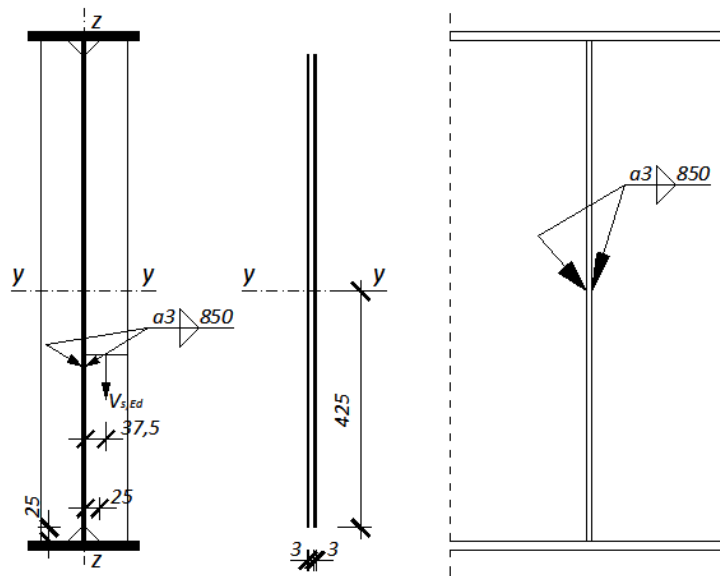
$$A_d = 2(b_s - c_s)t_s = 2(75 - 25)10 = 8,0 \cdot 10^2 \text{ mm}^2$$

Sprawdzenie naprężeń

$$\sigma_d = \frac{N_{Ed}}{A_d} = \frac{183,7 \cdot 10^3}{8,0 \cdot 10^2} = 229,6 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} < f_y = 275 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Warunek został spełniony.

Sprawdzenie nośności spoin łączących żebro pośrednie z łożyskiem.



Rysunek 42: Schemat połączenia żebra pośredniego ze łożyskiem.

Siła w skrzydle żebra poprzecznego

$$V_{s,Ed} = \frac{N_{Ed}}{2} = \frac{206,8}{2} = 103,4 \text{ kN}$$

Mimośród działania siły względem płaszczyzny styku żebra ze łożyskiem

$$e_v = \frac{b_s}{2} = \frac{75}{2} = 37,5 \text{ mm}$$

Dobór grubości spoin łączących pasy ze łożyskiem

$$t_1 = 6 \text{ mm} \quad , \quad t_2 = 8 \text{ mm}$$

$$0,2t_2 = 0,2 \cdot 8 = 1,6 \text{ mm} \leq a \leq 0,7t_1 = 0,7 \cdot 6 = 4,2 \text{ mm}$$

Przyjęto  $a_w = 3 \text{ mm}$  .

Długość spoin łączących żebro ze łożyskiem podciągu

$$l_w = h_w - 2c = 900 - 2 \cdot 25 = 850 \text{ mm}$$

Współczynnik redukcyjny z uwagi na długość spoiny

$$\beta_{Lw} = 1,1 - \frac{l_w}{17} = 1,1 - \frac{0,85}{17} = 1,05 > 1,0$$

Przyjęto:  $\beta_{Lw} = 1,0$

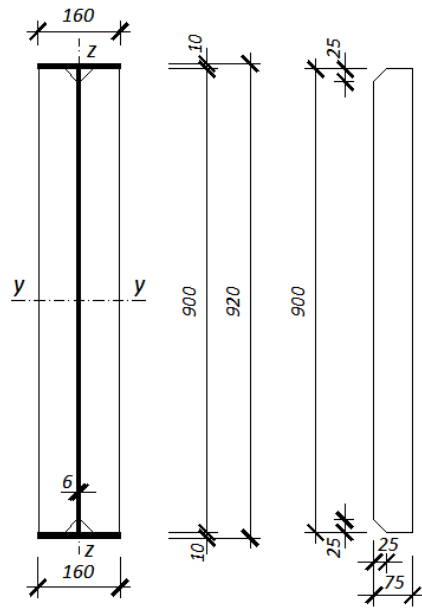
Współczynnik korelacji dla stali S275 wynosi  $\beta_w = 0,85$  .

Warunek nośności spoin

$$\begin{aligned}\sqrt{2\sigma^2 + 3\tau_{\parallel}^2} &= \sqrt{2\left(\frac{3V_{s,Ed}b}{2a_w l_w^2}\right)^2 + 3\left(\frac{V_{s,Ed}}{2a_w l_w}\right)^2} = \\ &= \sqrt{2\left(\frac{2 \cdot 103,4 \cdot 10^3 \cdot 75}{2 \cdot 3 \cdot 850^2}\right)^2 + 3\left(\frac{103,4 \cdot 10^3}{2 \cdot 3 \cdot 850}\right)^2} = 35,9 \frac{N}{mm^2} < \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} \beta_{Lw,2} = \\ &= \frac{430}{0,85 \cdot 1,25} = 404,7 \frac{N}{mm^2}\end{aligned}$$

**UWAGA:**

Zaprojektowane żebro pośrednie może zostać zastosowane na odcinku podciągu z pasami o szerokości  $b_f = 160 \text{ mm}$  . Biorąc pod uwagę, że występuje stały rozstaw belek stropowych  $a = 1800 \text{ mm}$  a siły poprzeczne nie przekraczają  $V_{Ed} = 390,2 \text{ kN}$  nie jest wymagane sprawdzenie żeber na tym odcinku.



Rysunek 43: Żebra pośrednie w przekroju blachownicy o pasach szerokości 160 mm.

### Wymiarowanie połączenia pasa ze środkiem.

#### Spoiny w przekroju przęsła 01 i podpory 1

Parametry przekroju poprzecznego

$$b_f = 200 \text{ mm} , \quad t_f = 16 \text{ mm} , \quad h_w = 900 \text{ mm} , \quad t_w = 6 \text{ mm} .$$

Przyjęto połączenie ciągłymi, obustronnymi spoinami pachwinowymi.

Grubość spoiny łączącej pas ze środkiem – dobrana wcześniej

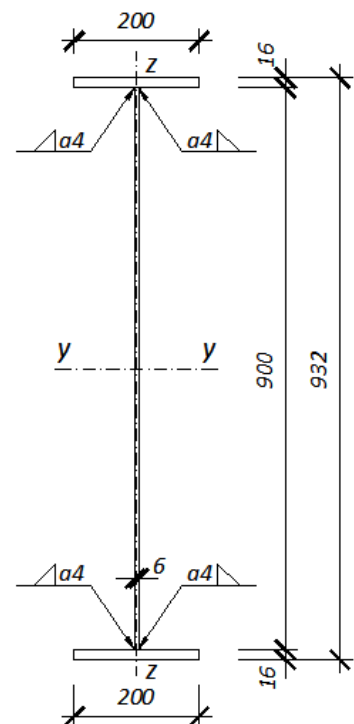
$$a = 4 \text{ mm} .$$

Największa siła poprzeczna na odcinku występowania przekroju

$$V_{Ed} = 392,1 \text{ kN} .$$

Moment statyczny pasa względem osi obojętnej:

$$S_y = b_f t_f \left( \frac{h_w + t_f}{2} \right) = 200 \cdot 16 \left( \frac{900 + 16}{2} \right) = 1465,6 \cdot 10^3 \text{ mm}^3 .$$



Główny centralny moment bezwładności

$$J_y = 170721,6 \cdot 10^4 \text{ mm}^4 .$$

Współczynnik korelacji dla stali S275

$$\beta_w = 0,85 .$$

Sprawdzenie nośności spoin

$$\tau_{\parallel} = \frac{V_{Ed} S_y}{2 J_y a} = \frac{392,1 \cdot 10^3 \cdot 1465,6 \cdot 10^3}{2 \cdot 170712,6 \cdot 10^4 \cdot 4} = 42,1 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} < \frac{\frac{f_u}{\sqrt{3}}}{\beta_w \gamma_{M2}} = \frac{\frac{430}{\sqrt{3}}}{0,85 \cdot 1,25} = 233,6 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Nośność spoin jest zapewniona.

### Spoiny w przekroju przęśła 12

Parametry przekroju poprzecznego

$$b_f = 160 \text{ mm} , \quad t_f = 8 \text{ mm} , \quad h_w = 900 \text{ mm} , \quad t_w = 6 \text{ mm} .$$

Przyjęto połączenie ciągłymi, obustronnymi spoinami pachwinowymi.

Grubość spoiny łączącej pas ze środnikiem – dobrana wcześniej

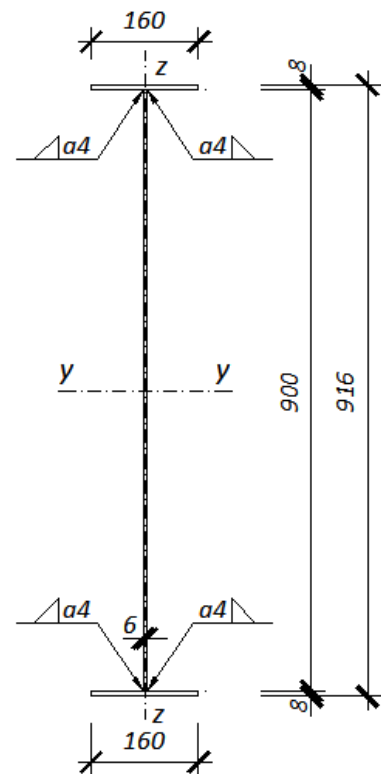
$$a = 4 \text{ mm} .$$

Największa siła poprzeczna na odcinku występowania przekroju

$$V_{Ed} = 320,5 \text{ kN} .$$

Moment statyczny pasa względem osi obojętnej:

$$S_y = b_f t_f \left( \frac{h_w + t_f}{2} \right) = 160 \cdot 8 \left( \frac{900 + 8}{2} \right) = 581,1 \cdot 10^3 \text{ mm}^3 .$$



Główny centralny moment bezwładności

$$J_y = 89217,1 \cdot 10^4 \text{ mm}^4 .$$

Współczynnik korelacji dla stali S275

$$\beta_w = 0,85 .$$

Sprawdzenie nośności spoin

$$\tau_{\parallel} = \frac{V_{Ed} S_y}{2 J_y a} = \frac{320,5 \cdot 10^3 \cdot 581,1 \cdot 10^3}{2 \cdot 89217,1 \cdot 10^4 \cdot 4} = 26,1 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} < \frac{f_u}{\sqrt{3}} = \frac{430}{\sqrt{3}} = 247,2 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} < \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} = \frac{430}{0,85 \cdot 1,25} = 403,5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Nośność spoin jest zapewniona.

### Spoiny w przekroju podpory 2

Parametry przekroju poprzecznego

$$b_f = 160 \text{ mm} , \quad t_f = 14 \text{ mm} , \quad h_w = 900 \text{ mm} , \quad t_w = 6 \text{ mm} .$$

Przyjęto połączenie ciągłymi, obustronnymi spoinami pachwinowymi.

Grubość spoiny łączącej pas ze środnikiem – dobrana wcześniej

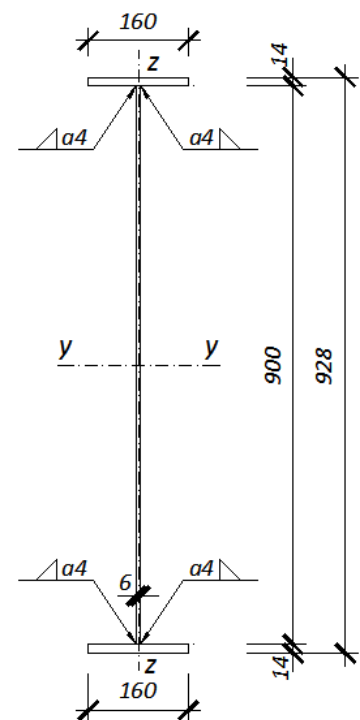
$$a = 4 \text{ mm} .$$

Największa siła poprzeczna na odcinku występowania przekroju

$$V_{Ed} = 280,5 \text{ kN} .$$

Moment statyczny pasa względem osi obojętnej:

$$S_y = b_f t_f \left( \frac{h_w + t_f}{2} \right) = 160 \cdot 14 \left( \frac{900 + 14}{2} \right) = 1023,7 \cdot 10^3 \text{ mm}^3 .$$



Główny centralny moment bezwładności

$$J_y = 130021,7 \cdot 10^4 \text{ mm}^4 .$$

Współczynnik korelacji dla stali S275

$$\beta_w = 0,85 .$$

Sprawdzenie nośności spoin

$$\tau_{\parallel} = \frac{V_{Ed} S_y}{2 J_y a} = \frac{280,5 \cdot 10^3 \cdot 1023,7 \cdot 10^3}{2 \cdot 130021,7 \cdot 10^4 \cdot 4} = 27,6 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} < \frac{\frac{f_u}{\sqrt{3}}}{\beta_w \gamma_{M2}} = \frac{\frac{430}{\sqrt{3}}}{0,85 \cdot 1,25} = 233,6 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Nośność spoin jest zapewniona.

### Spoiny w przekroju przęśła 23

Parametry przekroju poprzecznego

$$b_f = 160 \text{ mm} , \quad t_f = 10 \text{ mm} , \quad h_w = 900 \text{ mm} , \quad t_w = 6 \text{ mm} .$$

Przyjęto połączenie ciągłymi, obustronnymi spoinami pachwinowymi.

Grubość spoiny łączącej pas ze środnikiem – dobrana wcześniej

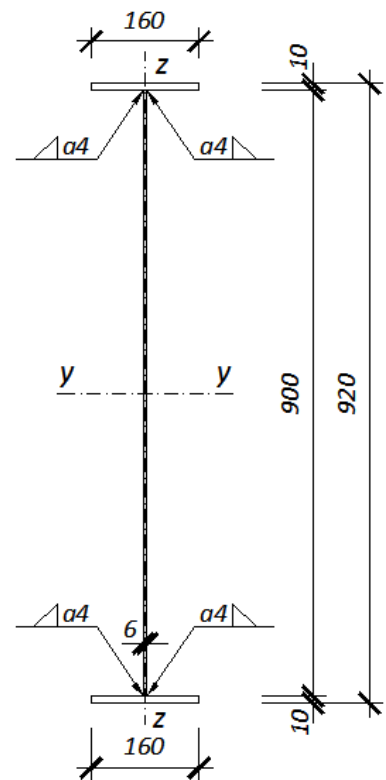
$$a = 4 \text{ mm} .$$

Największa siła poprzeczna na odcinku występowania przekroju

$$V_{Ed} = 279,0 \text{ kN} .$$

Moment statyczny pasa względem osi obojętnej:

$$S_y = b_f t_f \left( \frac{h_w + t_f}{2} \right) = 160 \cdot 10 \left( \frac{900 + 10}{2} \right) = 728,0 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$





Główny centralny moment bezwładności

$$J_y = 102701,0 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

Współczynnik korelacji dla stali S275

$$\beta_w = 0,85$$

Sprawdzenie nośności spoin

$$\tau_{\parallel} = \frac{V_{Ed} S_y}{2 J_y \alpha} = \frac{279,0 \cdot 10^3 \cdot 728,0 \cdot 10^3}{2 \cdot 102701,0 \cdot 10^4 \cdot 4} = 24,7 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} < \frac{\frac{f_u}{\sqrt{3}}}{\beta_w \gamma_{M2}} = \frac{\frac{430}{\sqrt{3}}}{0,85 \cdot 1,25} = 233,6 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Nośność spoin jest zapewniona.

### Wymiarowanie połączenia belki stropowej z podciągami

Projektowaniu podlega połączenie przegubowe skrajnej belki stropowej z podciągami

o pasach  $b_f = 200 \text{ mm}$  i  $t_f = 16 \text{ mm}$  i środniku  $h_w = 900 \text{ mm}$   $t_w = 6 \text{ mm}$ .

Obliczeniowa siła obciążająca połączenie – maksymalna obliczeniowa reakcja belki (równa sile poprzecznej)

$$F_{Ed} = 52,7 \cdot 10^3 \text{ N} = 52,7 \text{ kN}$$

Przyjęto połączenie kategorii A.

Dobór śrub w połączeniu

Przyjęto śruby M16 klasy 4.6 o następujących parametrach.

$$f_{yb} = 240 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}, \quad f_{ub} = \frac{400 \text{ N}}{\text{mm}^2}$$

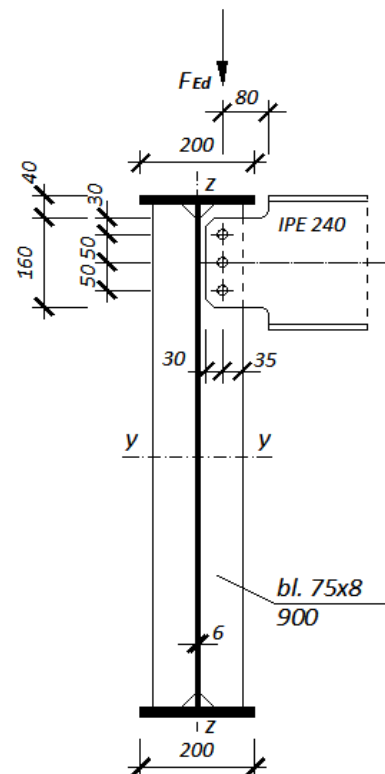
$$A = 2,011 \cdot 10^2 \text{ mm}^2, \quad A_s = 1,61 \cdot 10^2 \text{ mm}^2$$

Prześwit w otworze  $\Delta = 2 \text{ mm}$

Nominalna średnica otworów okrągłych

$$d_0 = d + \Delta = 16 + 2 = 18 \text{ mm}$$

Belka mocowana do żebra o wymiarach  $b_s \times t_s = 75 \times 8 \text{ mm}$ .



Belka stropowa – IPE 240 o grubości środnika  $t_{wb}=6,2\text{ mm}$  .

Częściowy współczynnik bezpieczeństwa przy określaniu nośności łączników

$$\gamma_{M2}=1,25 \text{ .}$$

Rozmieszczenie śrub w złączy

Przyjęto rozmieszczenie śrub jak na powyższym rysunku.

Sprawdzenie warunków rozmieszczenia śrub w złączy

$$t = \min(t_s; t_{wb}) = \min(8\text{ mm}; 6,2\text{ mm}) = 6,2\text{ mm} \text{ .}$$

$$e_{1,\min} = 1,2 d_0 = 1,2 \cdot 18 = 21,6\text{ mm} < e_1 = 30\text{ mm} < e_{1,\max} = 4t + 40\text{ mm} = 4 \cdot 6,2 + 40\text{ mm} = 64,8\text{ mm}$$

$$e_{2,\min} = 1,2 d_0 = 1,2 \cdot 18 = 21,6\text{ mm} < e_2 = 30\text{ mm} < e_{2,\max} = 4t + 40\text{ mm} = 4 \cdot 6,2 + 40\text{ mm} = 64,8\text{ mm}$$

$$p_{1,\min} = 2,2 d_0 = 2,2 \cdot 18 = 39,6\text{ mm} < p_1 = 50\text{ mm} < p_{1,\max} = \min(14t = 14 \cdot 6,2 = 86,8\text{ mm}; 200\text{ mm}) = 86,8\text{ mm}$$

$$p_{2,\min} = 2,4 d_0 = 2,2 \cdot 18 = 43,2\text{ mm} < p_2 = 0\text{ mm} < p_{2,\max} = \min(14t = 14 \cdot 6,2 = 86,8\text{ mm}; 200\text{ mm}) = 86,8\text{ mm}$$

Określenie obliczeniowej nośności złącza

Obliczeniowa nośność śruby na ścinanie w połączeniu jednociełym

Przyjęto, że płaszczyzna ścinania nie przechodzi przez gwintowaną część śruby,

$$\alpha_v = 0,6 \text{ .}$$

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v f_{ub} A}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 \cdot 400 \cdot 2,011 \cdot 10^2}{1,25} = 38,6 \cdot 10^3\text{ N} = 38,6\text{ kN}$$

Obliczeniowa nośność śrub na docisk do środnika belki stropowej (mniejsza grubość w porównaniu z grubością zębra poprzecznego)

Śruby skrajne (w kierunku działania obciążenia)

$$\alpha_b = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{e_1}{3 d_0} = \frac{30}{3 \cdot 18} = 0,556 \\ \frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{400}{430} = 0,93 \\ 1,0 \end{array} \right\} = 0,556$$

$$k_1 = \min \left\{ \begin{array}{l} 2,8 \frac{e_2}{d_0} - 1,7 = 2,8 \frac{30}{18} - 1,7 = 2,97 \\ 1,4 \frac{p_2}{d_0} - 1,7 = 1,4 \frac{0}{18} - 1,7 = \text{niemiarodajne} \\ 2,5 \end{array} \right\} = 2,5$$

$$F_{b,Rd,s} = \frac{k_1 \alpha_d f_u d t}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 \cdot 0,556 \cdot 430 \cdot 16 \cdot 6,2}{1,25} = 47,4 \cdot 10^3 \text{ N} = 47,4 \text{ kN}$$

Śruba pośrednia

$$\alpha_b = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{p_1}{3 d_0} - \frac{1}{4} = \frac{50}{3 \cdot 18} - \frac{1}{4} = 0,676 \\ \frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{400}{430} = 0,93 \\ 1,0 \end{array} \right\} = 0,676$$

$k_1 = 2,5$  (śruba skrajna w kierunku prostopadłym)

$$F_{b,Rd,p} = \frac{k_1 \alpha_d f_u d t}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 \cdot 0,676 \cdot 430 \cdot 16 \cdot 6,2}{1,25} = 57,6 \cdot 10^3 \text{ N} = 57,6 \text{ kN}$$

Minimalna nośność śruby

$$F_{Rd,min} = \min(F_{v,Rd}; F_{b,Rd,s}; F_{b,Rd,p}) = \min(38,6; 47,4; 57,6) = 38,6 \text{ kN}$$

Nośność złącza

$$F_{Rd} = n F_{Rd,min} = 3 \cdot 38,6 = 115,8 \cdot 10^3 \text{ N} = 115,8 \text{ kN}$$

Warunek nośności złącza

$$\frac{F_{Ed}}{F_{Rd}} = \frac{52,7 \cdot 10^3}{115,8 \cdot 10^3} = 0,45 < 1,0$$

Nośność złącza jest zachowana.

Sprawdzenie nośności przekroju osłabionego otworami (rozerwanie blokowe)

Pole przekroju netto części ścinanej

$$A_{v,net} = (e_1 + 2 p_1) t - 2,5 d_0 t = (30 + 2 \cdot 50) 6,2 - 2,5 \cdot 18 \cdot 6,2 = 5,27 \cdot 10^2 \text{ mm}^2$$

Pole przekroju netto części rozciąganej

$$A_{t,net} = e_2 t - 0,5 d_0 t = 30 \cdot 6,2 - 0,5 \cdot 18 \cdot 6,2 = 1,30 \cdot 10^2 \text{ mm}^2$$

Nośność przekroju osłabionego otworami

$$\begin{aligned} V_{eff1,net} &= A_{v,net} \frac{f_y}{\sqrt{3} \gamma_{M0}} + A_{t,net} \frac{f_u}{\gamma_{M2}} = 5,27 \cdot 10^2 \frac{275}{\sqrt{3} \cdot 1,0} + 1,30 \cdot 10^2 \frac{430}{1,1} = \\ &= 134,6 \cdot 10^3 \text{ N} = 134,6 \text{ kN} \end{aligned}$$

Warunek nośności

$$\frac{F_{Ed}}{V_{eff1,net}} = \frac{52,7 \cdot 10^3}{134,6 \cdot 10^3} = 0,39 < 1,0$$

Nośność jest zachowana.

Sprawdzenie nośności przekroju osłabionego belki stropowej

Wymiary przekroju osłabionego

$$h_{nb} = 160 \text{ mm} \quad , \quad t_{wb} = 6,2 \text{ mm}$$

Odległość między osią otworów a końcem osłabienia belki

$$e_F = 80,0 \text{ mm} \quad .$$

Moment zginający w przekroju

$$M_{Ed} = F_{Ed} e_F = 52,7 \cdot 10^3 \cdot 80,0 = 4,216 \cdot 10^6 \text{ Nmm} \quad .$$

Siła poprzeczna w przekroju

$$V_{Ed} = F_{Ed} = 52,7 \cdot 10^3 \text{ N} \quad .$$

Wskaźnik wytrzymałości przekroju

$$W_{nb} = \frac{t_{wb} h_{nb}^2}{6} = \frac{6,2 \cdot 160^2}{6} = 26,45 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

Obliczeniowa nośność przekroju na zginanie

$$M_{c,Rd} = W_{nb} \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 26,45 \cdot 10^3 \frac{275}{1,0} = 7,275 \cdot 10^6 \text{ Nmm} \quad .$$

Obliczeniowa nośność przekroju na ścinanie

$$V_{c,Rd} = t_{wb} h_{nb} \frac{f_y}{\sqrt{3} \gamma_{M0}} = 6,2 \cdot 160 \frac{275}{\sqrt{3} \cdot 1,0} = 157,5 \cdot 10^3 \text{ N}$$

Warunki nośności

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} = \frac{4,216 \cdot 10^6}{7,275 \cdot 10^6} = 0,58 < 1,0$$

$$\frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} = \frac{52,7 \cdot 10^3}{157,5 \cdot 10^3} = 0,335 < 1,0$$

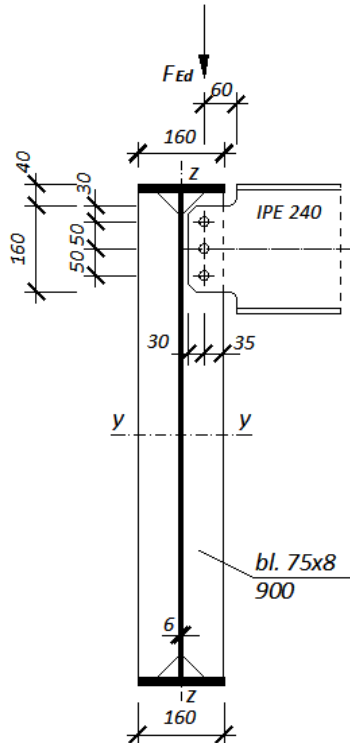
Sprawdzenie wpływu siły poprzecznej na nośność na zginanie

$$V_{Ed} = 52,7 \cdot 10^3 \text{ N} < 0,5 V_{c,Rd} = 0,5 \cdot 157,5 \cdot 10^3 = 78,75 \cdot 10^3 \text{ N}$$

Siły poprzecznej nie ma wpływu na nośność przy zginaniu.

Warunki nośności zostały spełnione.

W przypadku pasów o szerokości  $b_f = 160 \text{ mm}$  rozwiązanie połączenia belki stropowej z podciągami zostało zaprezentowane na poniższym rysunku.

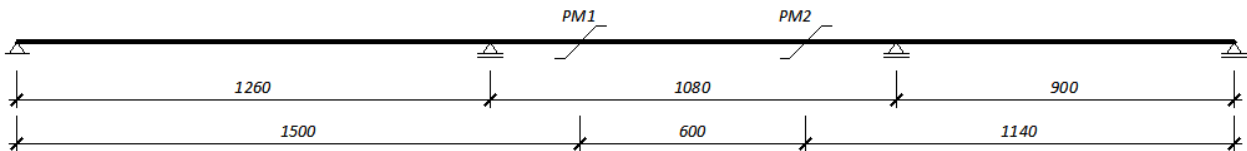


Rysunek 44: Połączenie belki stropowej z podciągami o pasach szerokości 160mm.

### Połączenia montażowe

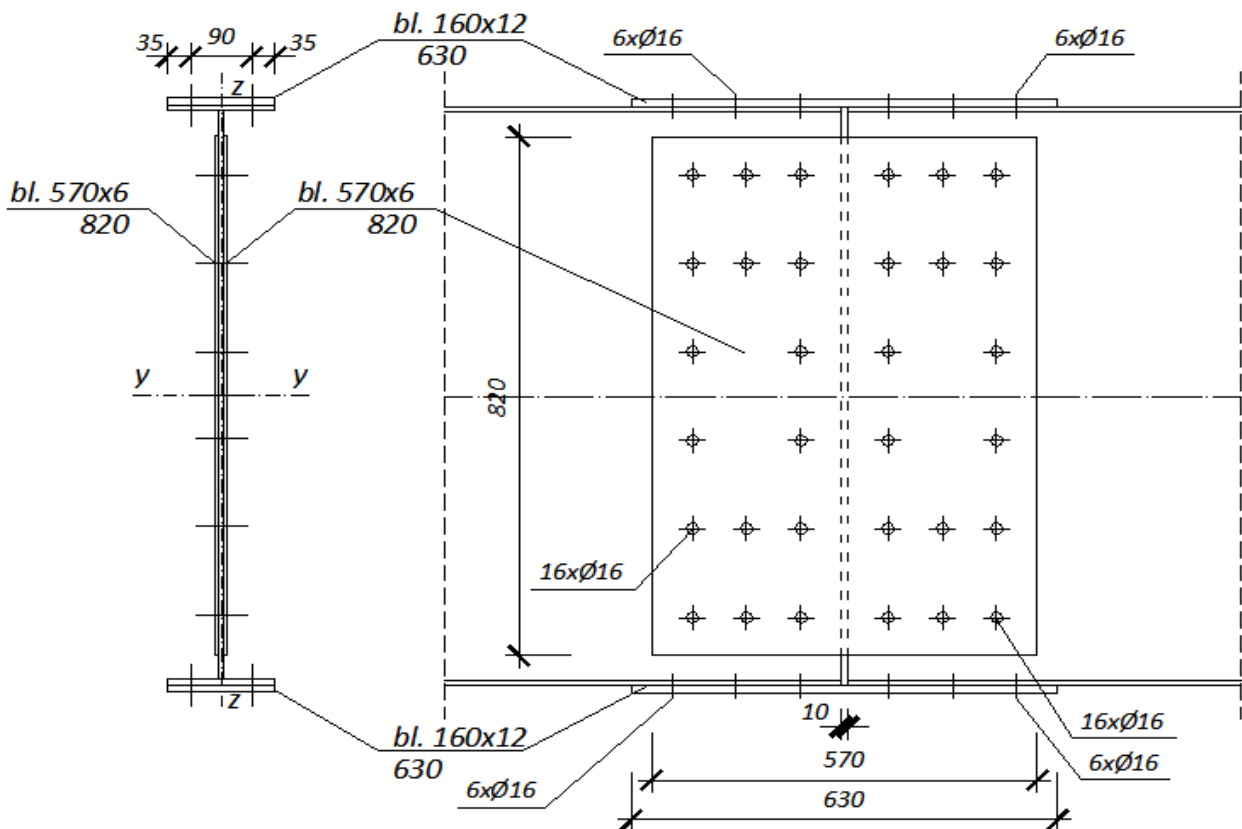
Określenie położenia połączeń montażowych

Przyjęto rozmieszczenie styków montażowych jak na poniższym schemacie.



### Wymiarowanie styku PM1

Przyjęto styk śrubowy zakładkowy, schemat na poniższym rysunku.



Rysunek 45: Styk montażowy PM1 - schemat ogólny.

Siły wewnętrzne działające w miejscu rozcięcia belki

$$M_{Ed1} = 338,4 \text{ kNm} = 338,4 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

$$V_{Ed1} = 104,8 \text{ kN} = 104,8 \cdot 10^3 \text{ N}$$

Maksymalne siły na podporze 1

$$M_{Ed2} = 939,1 \text{ kNm} = 939,1 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

$$V_{Ed2} = 322,3 \text{ kN} = 322,3 \cdot 10^3 \text{ N}$$

Siły do wymiarowania połączenia

$$M_{Ed} = \max(M_{Ed1}; 0,4 M_{Ed2}) = \max(338,4; 0,4 \cdot 939,1 = 375,6) = 375,6 \text{ kNm} = \\ = 375,6 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

$$V_{Ed} = \max(V_{Ed1}, 0,4 V_{Ed2}) = \max(104,8; 0,4 \cdot 322,3 = 128,9) = 128,9 \text{ kN} = 128,9 \cdot 10^3 \text{ N}$$

Parametry przekroju podciągu w miejscu styku

$$h_w = 900 \text{ mm} \quad , \quad t_w = 6 \text{ mm} \quad , \quad b_f = 160 \text{ mm} \quad , \quad t_f = 8 \text{ mm}$$

$$J_y = 89217,1 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

$$J_w = \frac{t_w h_w^3}{12} = \frac{6 \cdot 900^3}{12} = 36450 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

$$J_f = J_y - J_w = 89217,1 \cdot 10^4 - 36450 \cdot 10^4 = 52767,1 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

Parametry przyjętych łączników śrubowych – M16 klasy 5.6

$$d = 16 \text{ mm} \quad , \quad \Delta = 2 \text{ mm} \quad , \quad A = 2,011 \cdot 10^2 \text{ mm}^2 \quad , \quad A_s = 1,61 \cdot 10^2 \text{ mm}^2$$

Parametry mechaniczne:

$$f_{yb} = 300 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad , \quad f_{ub} = 500 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Średnica normalnych otworów okrągłych

$$d_o = d + \Delta = 16 + 2 = 18 \text{ mm}$$

Częściowy współczynnik bezpieczeństwa w obliczeniach nośności łączników

$$\gamma_{M2} = 1,25 \quad .$$

Rozdział momentu zginającego na pasy i środek.

Moment zginający w środku

$$M_{w,Ed} = M_{Ed} \frac{J_w}{J_y} = 375,6 \cdot 10^6 \frac{36450 \cdot 10^4}{89217,1 \cdot 10^4} = 153,5 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

Moment zginający w pasach

$$M_{f,Ed} = M_{Ed} - M_{w,Ed} = 375,6 \cdot 10^6 - 153,5 \cdot 10^6 = 222,1 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

Przyjęcie przekroju nakładek w pasie i przykładek w środku

Nakładki pasów

Przyjęto nakładki o wymiarach w przekroju:

$$b_N \times t_N = 160 \times 12 \text{ mm}$$

Pole przekroju nakładek

$$A_N = b_N t_N = 160 \cdot 12 = 19,2 \cdot 10^2 \text{ mm}^2 > A_f = b_f t_f = 160 \cdot 8 = 12,8 \cdot 10^2 \text{ mm}^2$$

Moment bezwładności nakładek pasów względem osi głównej centralnej przekroju

$$J_N = 2 \left[ \frac{b_N t_N^3}{12} + b_N t_N \left( \frac{h_w + t_f + t_N}{2} \right)^2 \right] = 2 \left[ \frac{160 \cdot 12^3}{12} + 160 \cdot 12 \left( \frac{900 + 8 + 12}{2} \right)^2 \right] = 81259 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

Przykładki środka

Przyjęto obustronnie przykładki o wymiarach:

$$t_P \times h_P = 6 \times 820 \text{ mm}$$

Moment bezwładności przykładek

$$J_P = 2 \frac{t_P h_P^3}{12} = 2 \frac{6 \cdot 820^3}{12} = 55136,8 \cdot 10^4 \text{ mm}^4 > J_w = 36450 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

Relacja momentów bezwładności

$$\frac{J_N}{J_P} = \frac{81259 \cdot 10^4}{55136,8 \cdot 10^4} = 1,47 \approx \frac{J_f}{J_w} = \frac{52767,1 \cdot 10^4}{36450 \cdot 10^4} = 1,45$$

**Połączenie pasa rozciąganego.**

Siła osiowa na krawędzi pasa

$$N_{f,Ed} = \frac{M_{f,Ed}}{h_w + 2 t_f} = \frac{222,1 \cdot 10^6}{900 + 2 \cdot 8} = 242,5 \cdot 10^3 \text{ N} = 242,5 \text{ kN}$$



Obliczeniowa nośność śruby w połączeniu jednociętym

Przyjęto, że płaszczyzna ścinania nie przechodzi przez gwintowaną część śruby,

$$\alpha_v = 0,6$$

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v f_{ub} A}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 \cdot 500 \cdot 2,011 \cdot 10^2}{1,25} = 48,3 \cdot 10^3 \text{ N} = 48,3 \text{ kN}$$

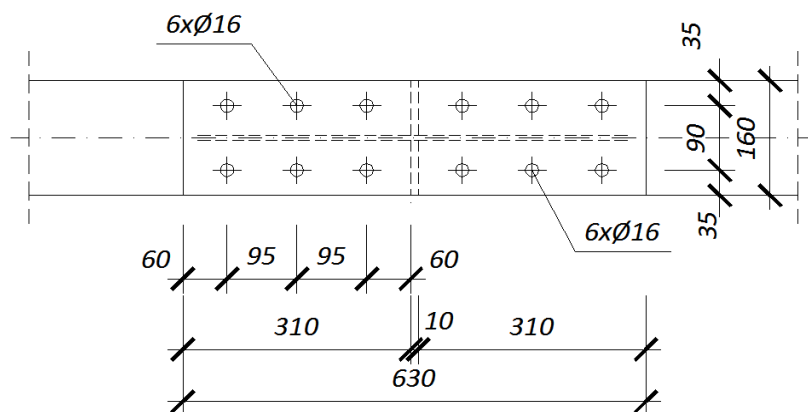
Szacunkowa liczba łączników (na podstawie nośności śruby na ścinanie)

$$n > \frac{N_{f,Ed}}{F_{v,Rd}} = \frac{242,5 \cdot 10^3}{48,3 \cdot 10^3} = 5,03$$

Przyjęto: 6 śrub M16 klasy 5.6 po jednej stronie złącza.

Rozmieszczenie śrub w połączeniu pasów

Przyjęto rozmieszczenie śrub jak na rysunku.



*Rysunek 46: Schemat rozmieszczenia łączników w pasach.*

Sprawdzenie warunków ograniczających rozstawy

$$e_1 = 60 \text{ mm} > e_{1,min} = 1,2 d_0 = 1,2 \cdot 18 = 21,6 \text{ mm}$$

$$e_2 = 35 \text{ mm} > e_{2,min} = 1,2 d_0 = 1,2 \cdot 18 = 21,6 \text{ mm}$$

$$p_1 = 95 \text{ mm} > p_{1,min} = 2,2 d_0 = 2,2 \cdot 18 = 39,6 \text{ mm}$$

$$p_2 = 90 \text{ mm} > p_{2,min} = 2,4 d_0 = 2,4 \cdot 18 = 43,2 \text{ mm}$$

Odległość między skrajnymi łącznikami (po jednej stronie złącza, w kierunku

działania obciążenia)

$$L_j = 2 p_1 = 2 \cdot 95 = 190 \text{ mm} < 15 d = 15 \cdot 16 = 240 \text{ mm}$$

$$\beta_{L,f} = 1,0$$

Obliczeniowe nośności śrub na docisk

Śruby skrajne (w kierunku obciążenia)

$$k_1 = \min \left\{ \begin{array}{l} 2,8 \frac{e_2}{d_0} - 1,7 = 2,8 \frac{35}{18} - 1,7 = 3,74 \\ 1,4 \frac{p_2}{d_0} - 1,7 = 1,4 \frac{90}{18} - 1,7 = 5,3 \\ 2,5 \end{array} \right\} = 2,5$$

$$\alpha_b = \min \left\{ \begin{array}{l} \alpha_d = \frac{e_1}{3 d_0} = \frac{60}{3 \cdot 18} = 1,11 \\ \frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{500}{430} = 1,41 \\ 1,0 \end{array} \right\} = 1,0$$

$$F_{b,Rd1} = \frac{k_1 \alpha_b f_u d t}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 \cdot 1,0 \cdot 430 \cdot 16 \cdot 8}{1,25} = 110,1 \cdot 10^3 \text{ N} = 110,1 \text{ kN}$$

Śruby pośrednie (w kierunku obciążenia)

$$k_1 = \min \left\{ \begin{array}{l} 2,8 \frac{e_2}{d_0} - 1,7 = 2,8 \frac{35}{18} - 1,7 = 3,74 \\ 1,4 \frac{p_2}{d_0} - 1,7 = 1,4 \frac{90}{18} - 1,7 = 5,3 \\ 2,5 \end{array} \right\} = 2,5$$

$$\alpha_b = \min \left\{ \begin{array}{l} \alpha_d = \frac{p_1}{3 d_0} - \frac{1}{4} = \frac{95}{3 \cdot 18} - \frac{1}{4} = 1,51 \\ \frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{500}{430} = 1,41 \\ 1,0 \end{array} \right\} = 1,0$$

$$F_{b,Rd21} = \frac{k_1 \alpha_b f_u d t}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 \cdot 1,0 \cdot 430 \cdot 16 \cdot 8}{1,25} = 110,1 \cdot 10^3 \text{ N} = 110,1 \text{ kN}$$

Określenie nośności złącza

$$F_{Rd,1} = \min(F_{v,Rd}; F_{b,Rd1}; F_{b,Rd2}) = \min(48,3 \cdot 10^3; 110,1 \cdot 10^3; 110,1 \cdot 10^3) = 48,3 \cdot 10^3 \text{ N}$$

$$F_{Rd} = n F_{Rd1} = 6 \cdot 48,3 \cdot 10^3 = 289,8 \cdot 10^3 \text{ N}$$

Warunek nośności

$$\frac{N_{f,Ed}}{F_{Rd}} = \frac{242,5 \cdot 10^3}{289,8 \cdot 10^3} = 0,84 < 1,0$$

Nośność złącza jest zapewniona.

Sprawdzenie nośności pasa

Nośność plastyczna przekroju brutto pasa

$$N_{pl,Rd} = A_f \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 160 \cdot 8 \frac{275}{1,0} = 352,0 \cdot 10^3 \text{ N} = 352,0 \text{ kN}$$

Warunek nośności

$$\frac{N_{f,Ed}}{N_{pl,Rd}} = \frac{242,5 \cdot 10^3}{352,0 \cdot 10^3} = 0,69 < 1,0$$

Warunek nośności został spełniony.

Nośność na zerwanie przekroju netto pasa

$$A_{t,net} = b_f t_f - 2 d_0 t_f = 160 \cdot 8 - 2 \cdot 18 \cdot 8 = 9,92 \cdot 10^2 \text{ mm}^2$$

$$N_{u,Rd} = 0,9 A_{t,net} \frac{f_u}{\gamma_{M2}} = 0,9 \cdot 9,92 \cdot 10^2 \frac{430}{1,1} = 349,0 \cdot 10^3 \text{ N} = 349,0 \text{ kN}$$

Warunek nośności

$$\frac{N_{f,Ed}}{N_{u,Rd}} = \frac{242,5 \cdot 10^3}{349,0 \cdot 10^3} = 0,70 < 1,0$$

Warunek nośności został spełniony.

Sprawdzenie nośności nakładek

Z uwagi na większe pole przekroju nakładki oraz zbliżoną relację momentów bezwładności przyjęto spełnienie warunków nośności nakładek.

### Połączenie środnika

Przyjęcie liczby łączników w środniku

Przyjęto do sprawdzenia  $n=16$  śrub w rozmieszczeniu, jak na poniższym rysunku.

Sprawdzenie warunków ograniczających rozstawy

$$e_1 = 60 \text{ mm} > e_{1, \min} = 1,2 d_0 = 1,2 \cdot 18 = 21,6 \text{ mm}$$

$$e_2 = 60 \text{ mm} > e_{2, \min} = 1,2 d_0 = 1,2 \cdot 18 = 21,6 \text{ mm}$$

$$p_1 = 140 \text{ mm} > p_{1, \min} = 2,2 d_0 = 2,2 \cdot 18 = 39,6 \text{ mm}$$

$$p_2 = 80 \text{ mm} > p_{2, \min} = 2,4 d_0 = 2,4 \cdot 18 = 43,2 \text{ mm}$$

Obliczeniowa nośność śruby na ścinanie w połączeniu dwuczętym

Przyjęto, że płaszczyzna ścinania nie przechodzi przez gwintowaną część śruby.

$$\alpha_v = 0,6$$

$$F_{v, Rd} = 2 \frac{\alpha_v f_{ub} A}{\gamma_{M2}} = 2 \frac{0,6 \cdot 500 \cdot 2,011 \cdot 10^2}{1,25} = 96,6 \cdot 10^3 \text{ N} = 96,6 \text{ kN}$$

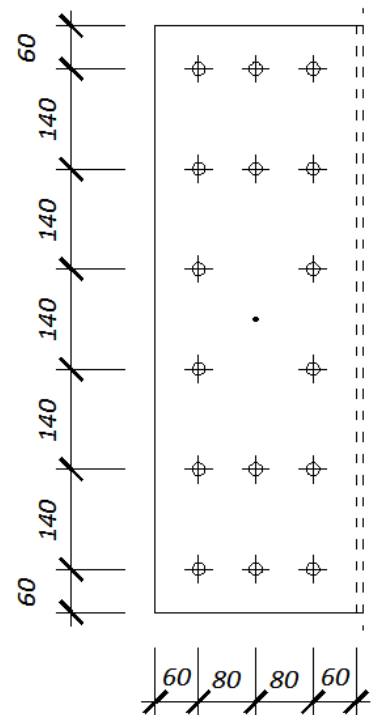
Obliczeniowa nośność śruby na docisk

Minimalna grubość poddana dociskowi w jednym kierunku

$$t = \min(t_w; 2 t_p) = \min(6; 2 \cdot 8 = 16 \text{ mm}) = 6 \text{ mm}$$

Kierunek pionowy

$$k_1 = \min \left( \begin{array}{l} 2,8 \frac{e_2}{d_0} - 1,7 = 2,8 \frac{60}{18} - 1,7 = 7,63 \\ 1,4 \frac{p_2}{d_0} - 1,7 = 1,4 \frac{80}{18} - 1,7 = 4,52 \\ 2,5 \end{array} \right) = 2,5$$



$$\alpha_b = \min \left\{ \begin{array}{l} \alpha_d = \frac{e_1}{3d_0} = \frac{60}{3 \cdot 18} = 1,11 \\ \frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{500}{430} = 1,41 \\ 1,0 \end{array} \right\} = 1,0$$

$$F_{bv, Rd} = \frac{k_1 \alpha_b f_u d t}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 \cdot 1,0 \cdot 430 \cdot 16 \cdot 6}{1,25} = 82,6 \cdot 10^3 \text{ N} = 82,6 \text{ kN}$$

Kierunek poziomy

$$k_1 = \min \left\{ \begin{array}{l} 2,8 \frac{e_1}{d_0} - 1,7 = 2,8 \frac{60}{18} - 1,7 = 7,63 \\ 1,4 \frac{p_1}{d_0} - 1,7 = 1,4 \frac{80}{18} - 1,7 = 4,52 \\ 2,5 \end{array} \right\} = 2,5$$

$$\alpha_b = \min \left\{ \begin{array}{l} \alpha_d = \frac{e_2}{3d_0} = \frac{60}{3 \cdot 18} = 1,11 \\ \frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{500}{430} = 1,41 \\ 1,0 \end{array} \right\} = 1,0$$

$$F_{bh, Rd} = \frac{k_1 \alpha_b f_u d t}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 \cdot 1,0 \cdot 430 \cdot 16 \cdot 6}{1,25} = 82,6 \cdot 10^3 \text{ N} = 82,6 \text{ kN}$$

Współczynniki redukcyjne z uwagi na długość złącza

Kierunek poziomy

$$L_{jh} = 2 p_1 = 2 \cdot 80 = 160 \text{ mm} < 15 d = 15 \cdot 16 = 240 \text{ mm}$$

$$\beta_{hLf} = 1,0$$

Kierunek pionowy

$$L_{jv} = h_p - 2 e_1 = 820 - 2 \cdot 60 = 700 \text{ mm} > 15 d = 15 \cdot 16 = 240 \text{ mm}$$

$$\beta_{vLf} = 1 - \frac{L_{jv} - 15 d}{200 d} = 1 - \frac{700 - 15 \cdot 16}{200 \cdot 16} = 0,856 < 1,0$$

Sprawdzenie nośności złącza – sprawdzenie nośności najbardziej wyciężonego łącznika.

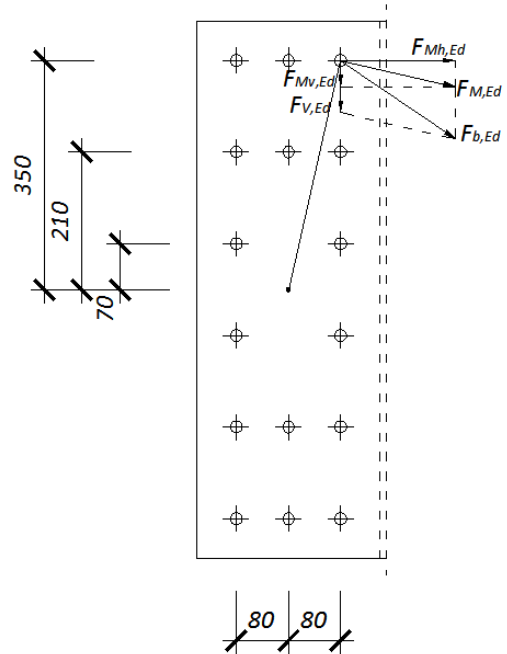
Składowe obciążenia w śrubie

Siła pochodząca od siły poprzecznej w środku

$$F_{V,Ed} = \frac{V_{Ed}}{n} = \frac{128,9 \cdot 10^3}{16} = 8,1 \cdot 10^3 \text{ N}$$

Moment zginający w środku ciężkości łączników

$$M_{0,Ed} = M_{w,Ed} + V_{Ed} \left( e_2 + \frac{p_2}{2} \right) = 153,5 \cdot 10^6 + 128,9 \cdot 10^3 \left( 60 + \frac{2 \cdot 80}{2} \right) = 171,5 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$



Odległości śrub od środka ciężkości grupy łączników

$$x_{11} = -80 \text{ mm} \quad , \quad z_{11} = 70 \text{ mm} \quad ,$$

$$x_{21} = -80 \text{ mm} \quad , \quad z_{21} = 210 \text{ mm} \quad ,$$

$$x_{31} = -80 \text{ mm} \quad , \quad z_{31} = 350 \text{ mm} \quad ,$$

$$x_{22} = 0 \text{ mm} \quad , \quad z_{22} = 210 \text{ mm} \quad ,$$

$$x_{32} = 0 \text{ mm} \quad , \quad z_{32} = 350 \text{ mm} \quad ,$$

$$x_{13} = 80 \text{ mm} \quad , \quad z_{13} = 70 \text{ mm} \quad ,$$

$$x_{23} = 80 \text{ mm} \quad , \quad z_{23} = 210 \text{ mm}$$

$$x_{33} = 80 \text{ mm} \quad , \quad z_{33} = 350 \text{ mm}$$

Sumy kwadratów odległości

$$\sum x_i^2 = 6 x_{i1}^2 + 4 x_{i2}^2 + 6 x_{i3}^2 = 6 \cdot (-80)^2 + 4 \cdot 0^2 + 6 \cdot 80^2 = 768 \cdot 10^2 \text{ mm}^2$$

$$\sum z_i^2 = 4 z_{i1}^2 + 6 z_{i2}^2 + 6 z_{i3}^2 = 4 \cdot 70^2 + 6 \cdot 210^2 + 6 \cdot 350^2 = 10192 \cdot 10^2 \text{ mm}^2$$

Składowe siły od momentu zginającego w najbardziej wyężonej śrubie

$$x_{max} = x_{33} = 80 \text{ mm}$$

$$z_{max} = z_{33} = 350 \text{ mm}$$

$$F_{Mv,Ed} = M_{0,Ed} \frac{x_{max}}{\sum x_i^2 + \sum z_i^2} = 171,5 \cdot 10^6 \frac{80}{768 \cdot 10^2 + 10192 \cdot 10^2} = 12,5 \cdot 10^3 \text{ N}$$

$$F_{Mh,Ed} = M_{0,Ed} \frac{z_{max}}{\sum x_i^2 + \sum z_i^2} = 171,5 \cdot 10^6 \frac{350}{768 \cdot 10^2 + 10192 \cdot 10^2} = 54,8 \cdot 10^3 \text{ N}$$

Sprawdzenie nośności

z uwagi na ścinanie śrub – zwiększenie siły na kierunku pionowym (długość złącza)

$$F_{V,Ed,red} = \frac{F_{V,Ed} + F_{Mv,Ed}}{\beta_{vLf}} = \frac{8,1 \cdot 10^3 + 12,5 \cdot 10^3}{0,856} = 24,0 \cdot 10^3 \text{ N}$$

$$F_{H,Ed} = F_{Mh,Ed} = 54,8 \cdot 10^3 \text{ N}$$

$$F_{Ed} = \sqrt{F_{V,Ed,red}^2 + F_{H,Ed}^2} = \sqrt{(24,0 \cdot 10^3)^2 + (54,8 \cdot 10^3)^2} = 59,8 \cdot 10^3 \text{ N}$$

Warunek nośności

$$\frac{F_{Ed}}{F_{v,Rd}} = \frac{59,8 \cdot 10^3}{96,6 \cdot 10^3} = 0,62 < 1,0$$

z uwagi na docisk śruby

$$F_{V,Ed} = F_{V,Ed} + F_{Mv,Ed} = 8,1 \cdot 10^3 + 12,5 \cdot 10^3 = 20,6 \cdot 10^3 \text{ N}$$

$$F_{H,Ed} = F_{Mh,Ed} = 54,8 \cdot 10^3 \text{ N}$$

$$F_{Ed} = \sqrt{F_{V,Ed}^2 + F_{H,Ed}^2} = \sqrt{(20,8 \cdot 10^3)^2 + (54,8 \cdot 10^3)^2} = 58,5 \cdot 10^3 \text{ N}$$

Warunek nośności

$$\frac{F_{Ed}}{F_{b,Rd}} = \frac{58,5 \cdot 10^3}{82,6 \cdot 10^3} = 0,71 < 1,0$$

Nośność złącza jest wystarczająca.

Sprawdzenie nośności osłabionego przekroju środka

Nośność na ścinanie przekroju brutto

$$V_{pl,Rd} = h_w t_w \frac{f_y}{\sqrt{3} \gamma_{M0}} = 900 \cdot 6 \frac{275}{\sqrt{3} \cdot 1,0} = 857,4 \cdot 10^3 \text{ N}$$

Warunek nośności

$$\frac{V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} = \frac{128,9 \cdot 10^3}{857,4 \cdot 10^3} = 0,15 < 1,0$$

Nośność na ścinanie przekroju osłabionego otworami

Pole przekroju netto środka

$$A_{v,net} = h_w t_w - 6 d_o t_w = 900 \cdot 6 - 6 \cdot 18 \cdot 6 = 47,5 \cdot 10^2 \text{ mm}^2$$

$$V_{u,Rd} = A_{v,net} \frac{f_u}{\sqrt{3} \gamma_{M0}} = 47,5 \cdot 10^2 \frac{430}{\sqrt{3} \cdot 1,0} = 1072,0 \cdot 10^3 \text{ N}$$

Warunek nośności

$$\frac{V_{Ed}}{V_{u,Rd}} = \frac{128,9 \cdot 10^3}{1072,0 \cdot 10^3} = 0,12 < 1,0$$

Nośność na zginanie

Moment zginający na krawędzi przykładek

$$\begin{aligned} M_{k,Ed} &= M_{w,Ed} + V_{Ed} (2 e_2 + 2 p_2) = 153,5 \cdot 10^6 + 128,9 \cdot 10^3 (2 \cdot 60 + 2 \cdot 80) = \\ &= 189,6 \cdot 10^6 \text{ Nmm} \end{aligned}$$

Moment zginający w przekroju osłabionym najbardziej oddalonym od miejsca rozcięcia

$$M_{net,Ed} = M_{w,Ed} + V_{Ed} (e_2 + 2 p_2) = 153,5 \cdot 10^6 + 128,9 \cdot 10^3 (60 + 2 \cdot 80) = 181,8 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

Nośność sprężysta środka

$$M_{el,Rd} = \frac{t_w h_w^2}{6} \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{6 \cdot 900^2}{6} \frac{275}{1,0} = 222,8 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$



Warunek nośności

$$\frac{M_{k,Ed}}{M_{el,Rd}} = \frac{189,6 \cdot 10^6}{222,8 \cdot 10^6} = 0,85 < 1,0$$

Sprawdzenie dotyczące pominięcia wpływu otworów znajdujących się w strefie rozciąganej

Pole przekroju brutto części rozciąganej środnika

$$A_t = 0,5 h_w t_w = 0,5 \cdot 900 \cdot 6 = 27,0 \cdot 10^2 \text{ mm}^2$$

$$A_{t,net} = A_t - 3 d_0 t_w = 27,0 \cdot 10^2 - 3 \cdot 18 \cdot 6 = 23,8 \cdot 10^2 \text{ mm}^2$$

$$0,9 \frac{A_{t,net} f_u}{\gamma_{M2}} = 0,9 \frac{23,8 \cdot 10^2 \cdot 430}{1,1} = 835,9 \cdot 10^3 \text{ N} > \frac{A_t f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{27,0 \cdot 10^2 \cdot 275}{1,0} = 742,5 \cdot 10^3 \text{ N}$$

W obliczeniach nośności nie trzeba uwzględniać osłabienia otworami w rozciąganej części środnika.

Sprawdzenie nośności przyładek

Z uwagi na większy moment bezwładności przyładek i relację momentów bezwładności warunki nośności przyładek uważa się za spełnione.

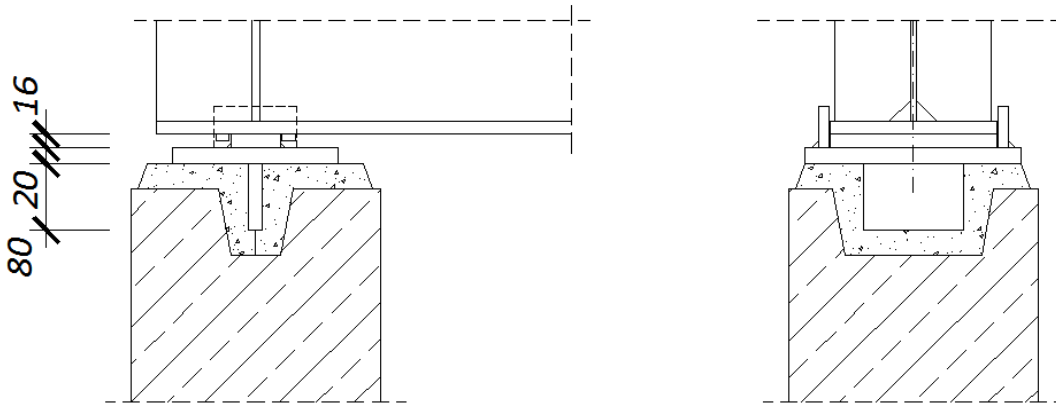
### ***Oparcie podciągu na podporze skrajnej***

Projektowane jest oparcie na podporze 0. Podporę stanowi żelbetowy słup żelbetowy

o przekroju  $b \times h = 30 \times 30 \text{ cm}$  z betonu C16/20 o  $f_{cd} = 11,4 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ .

Maksymalna reakcja podporowa  $V_{Ed} = 291,0 \cdot 10^3 \text{ N}$ .

Przyjęto rozwiązanie oparcia jak na poniższym schemacie.



### Blacha pozioma

Przyjęto wymiary w rzucie  $B \times L = 200 \times 260 \text{ mm}$ .

### Sprawdzenie nosności na docisk betonu słupa.

Pole docisku

$$A_{c0} = B L = 200 \cdot 260 = 520 \cdot 10^2 \text{ mm}^2 .$$

Pole rozdziału obciążenia (ograniczone wymiarami przekroju słupa)

$$A_{c1} = b h = 300 \cdot 300 = 900 \cdot 10^2 \text{ mm}^2 .$$

Nośność na docisk

$$N_{Rd} = A_{c0} f_{cd} \sqrt{\frac{A_{c1}}{A_{c0}}} = 900 \cdot 10^2 \cdot 11,4 \sqrt{\frac{900 \cdot 10^2}{520 \cdot 10^2}} = 781,8 \cdot 10^3 \text{ N} < 3 f_{cd} A_{c0} = \\ = 3 \cdot 11,4 \cdot 520 \cdot 10^2 = 1783 \cdot 10^3 \text{ N} = 1783 \text{ kN}$$

Warunek nośności:

$$\frac{V_{Ed}}{N_{Rd}} = \frac{271,0 \cdot 10^3}{781,8 \cdot 10^3} = 0,35 < 1,0$$

Nośność jest zapewniona.

Płytki centrująca

Przyjęto płaską płytkę centrującą o wymiarach w rzucie:

$$b_{pc} \times l_{pc} = 60 \times 200 \text{ mm}$$

### Określenie wymaganej grubości blachy

Minimalna grubość blachy poziomej

Wysięg wspornikowej części blachy poziomej

$$l_{wl} = 0,5 (B - b_{pc}) = 0,5 (200 - 60) = 70 \text{ mm}$$

Naprężenia pod blachą

$$\sigma_1 = \frac{V_{Ed}}{B L} = \frac{271,0 \cdot 10^3}{200 \cdot 260} = 5,21 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$t_{min} = l_{wl} \sqrt{\frac{3 \sigma_1 \gamma_{M0}}{f_y}} = 70 \sqrt{\frac{3 \cdot 5,21 \cdot 1,0}{275}} = 16,7 \text{ mm}$$

Przyjęto blachę poziomą o grubości  $t = 20 \text{ mm}$ .

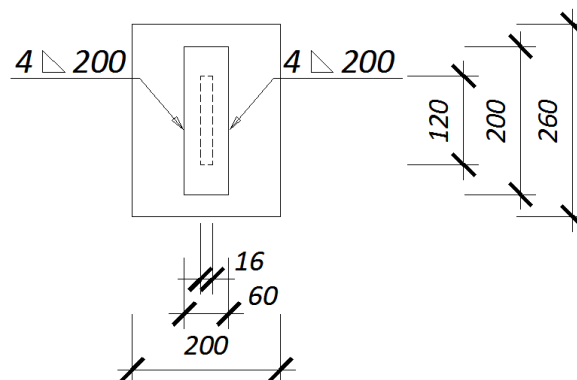
Minimalna sumaryczna grubość blachy poziomej i płytki centrującej

$$t_{min} = 0,5 B \sqrt{\frac{3 \sigma_1 \gamma_{M0}}{f_y}} = 0,5 \cdot 200 \sqrt{\frac{3 \cdot 5,21 \cdot 1,0}{275}} = 23,8 \text{ mm}$$

Przyjęto płytkę centrującą o grubości  $t_{pc} = 16 \text{ mm}$ .

Sumaryczna grubość płytki centrującej i blachy poziomej

$$t_{pc} + t = 16 + 20 = 36 \text{ mm} > t_{min} = 23,8 \text{ mm}$$



Spoiny łączące płytkę centrującą z blachą poziomą

Dobór grubości spoin

$$a \leq 0,7 t = 0,7 \cdot 20 = 14 \text{ mm}$$

Przyjęto spoiny o grubości  $a = 4 \text{ mm}$ , długość spoin  $l_w = 200 \text{ mm}$ .

$$\sigma = \frac{V_{Ed}}{2 a l_w} = \frac{271,0 \cdot 10^3}{2 \cdot 4 \cdot 200} = 169,4 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{\sigma}{\sqrt{2}} = \frac{169,4}{\sqrt{2}} = 119,8 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\tau_{\parallel} = 0 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_{\perp} = 119,8 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} < \frac{0,9 f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 \cdot 430}{1,25} = 309,6 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\begin{aligned} \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} &= \sqrt{119,8^2 + 3(119,8^2 + 0^2)} = 239,5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} < \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} = \frac{430}{0,85 \cdot 1,25} = \\ &= 404,7 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \end{aligned}$$

Nośność spoin jest zapewniona.

### Poz.3 Słup

Projektuje się słup dwugałęziowy z ceowników, wysokość słupa  $L_c=6100\text{ mm}$ . Gałęzie słupa zostaną połączone przewiązkami.

Słup jest przegubowo połączony z belką i fundamentem. Współczynniki długości wyboczeniowej  $k_y=1,0$  oraz  $k_z=1,0$ .

Maksymalna obliczeniowa reakcja podciągu łącznie z przybliżonym jego ciężarem własnym  $N_{Ed}=830,0\text{ kN}$ .

### Wymiarowanie trzonu słupa

Dobór przekroju poprzecznego gałęzi

Minimalne pole przekroju słupa

$$A_{min} = \frac{N_{Ed} \gamma_{M0}}{\chi f_y} = \frac{830,0 \cdot 10^3 \cdot 1,0}{0,6 \cdot 275} = 50,3 \cdot 10^2 \text{ mm}^2$$

Minimalne pole pojedynczej gałęzi

$$A_{ch,min} = 0,5 A_{min} = 0,5 \cdot 50,3 \cdot 10^2 = 25,15 \cdot 10^2 \text{ mm}^2$$

Przyjęto przekrój gałęzi UPN 220.

Parametry przekroju poprzecznego

$$h = 220 \text{ mm}, \quad b_f = 80 \text{ mm}, \quad t_w = 9,5 \text{ mm},$$

$$t_f = 12,5 \text{ mm}, \quad r = 12,5 \text{ mm},$$

$$y_s = 21,4 \text{ mm}$$

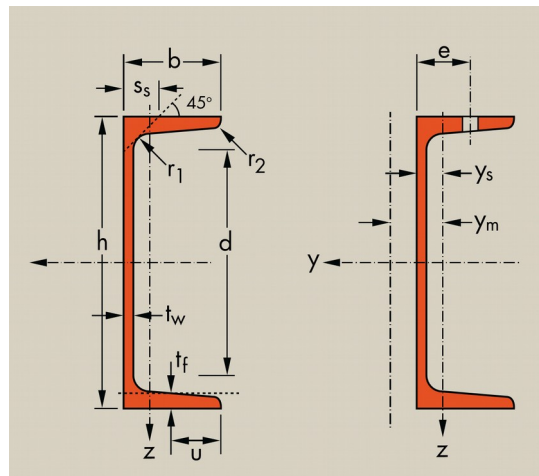
$$A_{ch} = 37,4 \cdot 10^2 \text{ mm}^2,$$

$$J_{y,ch} = 2690 \cdot 10^4 \text{ mm}^4, \quad i_{y,ch} = 84,8 \text{ mm},$$

$$J_{z,ch} = 197 \cdot 10^4 \text{ mm}^4, \quad i_{z,ch} = 23,0 \text{ mm},$$

$$W_{pl,y} = 292 \cdot 10^3 \text{ mm}^3,$$

$$W_{pl,z} = 64,1 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$



Ustalenie osiowego rozstawu gałęzi słupa

$$h_{0,min} = 2 \sqrt{\frac{0,55 J_{y,ch} - J_{z,ch}}{A_{ch}}} = 2 \sqrt{\frac{0,55 \cdot 2690 \cdot 10^4 - 197 \cdot 10^4}{37,4 \cdot 10^2}} = 117 \text{ mm}$$

Prześwit gałęzi przy wyliczonym rozstawie gałęzi

$$d = h_{0,min} - 2 y_s = 117 - 2 \cdot 21,4 = 74,4 \text{ mm} < 80 \text{ mm}$$

Przyjęto prześwit gałęzi wynoszący  $d = 100 \text{ mm}$ .

Osiowy rozstaw gałęzi wynosi:

$$h_0 = d + 2 y_s = 100 + 2 \cdot 21,4 = 142,8 \text{ mm}$$

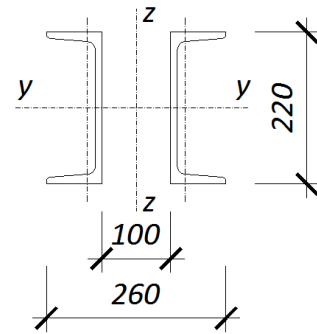
Parametry przekroju trzonu słupa

$$B_s = 2 b_f + d = 2 \cdot 80 + 100 = 260 \text{ mm}$$

$$H_s = h = 220 \text{ mm}$$

Geometria przekroju trzonu

$$A = 2 A_{ch} = 2 \cdot 37,4 \cdot 10^2 = 74,8 \cdot 10^2 \text{ mm}^2$$



Główne centralne momenty bezwładności

$$J_y = 2 J_{y,ch} = 2 \cdot 2930 \cdot 10^4 = 5380 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

$$J_z = 2 \left[ J_{z,ch} + A_{ch} \left( \frac{h_0}{2} \right)^2 \right] = 2 \left[ 197 \cdot 10^4 + 37,4 \cdot 10^2 \left( \frac{142,8}{2} \right)^2 \right] = 4207 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

Promienie bezwładności

$$i_y = i_{y,ch} = 84,8 \text{ mm}$$

$$i_z = \sqrt{\frac{J_z}{A}} = \sqrt{\frac{4207 \cdot 10^4}{74,8 \cdot 10^2}} = 75,0 \text{ mm}$$

Ustalenie rozstawu przewiązek

Liczba płaszczyzn przewiązek  $n = 2$ .

Liczba przedziałów między przewiązkami

Przyjęto  $n_p = 5$ .

Osiowy rozstaw przewiązek.

$$a = \frac{L_c}{n_p} = \frac{6100}{5} = 1220 \text{ mm}$$

Wstępny dobór wymiarów przewiązek pośrednich słupa

Przyjęto:  $t_b = 10 \text{ mm}$  ,  $h_b = 150 \text{ mm}$

Moment bezwładności przewiązek

$$J_b = \frac{t_b h_b^3}{12} = \frac{10 \cdot 150^3}{12} = 281,6 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

Długość przewiązki  $L_p = 190 \text{ mm}$  .

Określenie klasy przekroju trzonu (na podstawie klasy przekroju gałęzi)

Środek

$$\frac{c}{t} = \frac{h - 2(t_f + r)}{t_w} = \frac{220 - 2(12,5 + 12,5)}{9,5} = 17,9 < 33 \varepsilon = 33 \cdot 0,92 = 30,5$$

Klasa 1

Pas

$$\frac{c}{t} = \frac{b_f - (t_w + r)}{t_f} = \frac{80 - (90,5 + 12,5)}{9,5} = 4,6 < 9 \varepsilon = 9 \cdot 0,92 = 8,3$$

Klasa 1.

Przekrój spełnia warunki przekrojów klasy 1 przy osiowym ściskaniu.

Smukłość słupa

$$\lambda = \frac{k_z L_c}{i_z} = \frac{1,0 \cdot 6100}{75,0} = 81,34$$

Wskaźnik efektywności przekroju słupa złożonego dla  $\lambda > 75$

$$\mu = 2 - \frac{\lambda}{75} = 2 - \frac{81,34}{75} = 0,916$$

Zastępczy moment bezwładności słupa złożonego

$$J_{eff} = 0,5 h_0^2 A_{ch} + 2 \mu J_{z, ch} = 0,5 \cdot 142,8^2 \cdot 37,4 \cdot 10^2 + 2 \cdot 0,916 \cdot 197 \cdot 10^4 = 4174 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

Sztywność postaciowa słupa

$$S_v = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{24 E J_{z, ch}}{a^2 \left( 1 + \frac{2 J_{z, ch} h_0}{n J_b a} \right)} = \frac{24 \cdot 210000 \cdot 197 \cdot 10^4}{1220^2 \left( 1 + \frac{2 \cdot 197 \cdot 10^4 \cdot 142,8}{2 \cdot 281,3 \cdot 10^4 \cdot 1220} \right)} = 6165 \cdot 10^3 \text{ N} \\ \frac{2 \pi^2 E J_{z, ch}}{a^2} = \frac{2 \pi^2 \cdot 210000 \cdot 197 \cdot 10^4}{1220^2} = 5487 \cdot 10^3 \text{ N} \end{array} \right\} = 5487 \cdot 10^3 \text{ N}$$

Zastępcza siła krytyczna elementu złożonego

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 E J_{eff}}{(k_z L_c)^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 4174 \cdot 10^4}{(1,0 \cdot 6100)^2} = 2325 \cdot 10^3 \text{ N}$$

Smukłość porównawcza

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} = \pi \sqrt{\frac{210000}{275}} = 86,8$$

Sprawdzenie nośności pojedynczej gałęzi słupa przy wyboczeniu z płaszczyzny przewiązek

Długość wyboczeniowa

$$L_{cr, y} = k_y L_c = 1,0 \cdot 6100 = 6100 \text{ mm}$$

Smukłość względna gałęzi

$$\bar{\lambda}_{y, ch} = \frac{L_{cr, y}}{i_{y, ch}} \frac{1}{\lambda_1} = \frac{6100}{84,8} \frac{1}{86,8} = 0,829$$

Krzywa wyboczeniowa

Zgodnie z PN-EN 1993-1-1 przyjęto krzywą wyboczeniową  $c$ .

Parametr imperfekcji

$$\alpha = 0,49$$



$$\Phi_{y, ch} = 0,5 \left[ 1 + \alpha (\bar{\lambda}_{y, ch} - 0,2) + \bar{\lambda}_{y, ch}^2 \right] = 0,5 \left[ 1 + 0,49 (0,829 - 0,2) + 0,829^2 \right] = 0,997$$

Współczynnik wybożenia

$$\chi_{y, ch} = \frac{1}{\Phi_{y, ch} + \sqrt{\Phi_{y, ch}^2 - \bar{\lambda}_{y, ch}^2}} = \frac{1}{0,997 + \sqrt{0,997^2 - 0,829^2}} = 0,644$$

Nośność na wybożenie pojedynczej gałęzi

$$N_{b, Rd, y, ch} = \chi_{y, ch} A_{ch} \frac{f_y}{\gamma_{M1}} = 0,644 \cdot 37,4 \cdot 10^2 \frac{275}{1,0} = 662,6 \cdot 10^3 \text{ N}$$

Siła normalna w gałęzi

$$N_{ch, Ed} = 0,5 N_{Ed} = 0,5 \cdot 830,0 \cdot 10^3 = 415 \cdot 10^3 \text{ N}$$

Warunek nośności

$$\frac{N_{ch, Ed}}{N_{b, Rd, y, ch}} = \frac{415 \cdot 10^3}{662,6 \cdot 10^3} = 0,63 < 1,0$$

Warunek nośności został spełniony.

Sprawdzenie nośności pojedynczej gałęzi przy wybożeniu w płaszczyźnie przewiązek

Wstępna imperfekcja

$$e_0 = \frac{L_c}{500} = \frac{6100}{500} = 12,2 \text{ mm}$$

Maksymalny obliczeniowy moment zginający uwzględniający efekty drugiego rzędu

$$M_{Ed} = \frac{N_{Ed} e_0}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr}} - \frac{N_{Ed}}{S_v}} = \frac{830 \cdot 10^3 \cdot 12,2}{1 - \frac{830 \cdot 10^3}{2325 \cdot 10^3} - \frac{830 \cdot 10^3}{5487 \cdot 10^3}} = 20,6 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

Obliczeniowa siła osiowa w gałęzi słupa

$$N_{ch, Ed} = 0,5 N_{Ed} + \frac{M_{Ed} h_0 A_{ch}}{2 J_{eff}} = 0,5 \cdot 830,0 \cdot 10^3 + \frac{20,6 \cdot 10^6 \cdot 142,8 \cdot 37,4 \cdot 10^2}{2 \cdot 4174 \cdot 10^4} = 546,7 \cdot 10^3 \text{ N}$$

Siła poprzeczna w słupie

$$V_{Ed} = \pi \frac{M_{Ed}}{L_{cr,y}} = \pi \frac{20,6 \cdot 10^6}{6100} = 10,6 \cdot 10^3 \text{ N} .$$

Siła poprzeczna w pojedynczej gałęzi

$$V_{ch,Ed} = 0,5 V_{Ed} = 0,5 \cdot 10,6 \cdot 10^3 = 5,3 \cdot 10^3 \text{ N} .$$

Moment zginający w gałęzi pochodzący od siły poprzecznej

$$M_{ch,Ed} = \frac{V_{Ed}}{2} \frac{a}{2} = \frac{10,61 \cdot 10^6}{2} \frac{1220}{2} = 3,24 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

Długość wyboczeniowa gałęzi (w osiach przewiązek)

$$L_{cr,z} = a = 1220 \text{ mm}$$

Smukłość względna przy wyboczeniu giętnym

$$\bar{\lambda}_{z,ch} = \frac{L_{cr,z}}{i_{z,ch}} \frac{1}{\lambda_1} = \frac{1220}{23,0} \frac{1}{86,8} = 0,611$$

Krzywa wyboczeniowa

Zgodnie z PN-EN 1993-1-1 przyjęto krzywą wyboczeniową  $c$  .

Parametr imperfekcji

$$\alpha = 0,49$$

$$\Phi_{z,ch} = 0,5 \left[ 1 + \alpha (\bar{\lambda}_{z,ch} - 0,2) + \bar{\lambda}_{z,ch}^2 \right] = 0,5 \left[ 1 + 0,49 (0,611 - 0,2) + 0,611^2 \right] = 0,787$$

Współczynnik wyboczeniowy

$$\chi_{z,ch} = \frac{1}{\Phi_{z,ch} + \sqrt{\Phi_{z,ch}^2 - \bar{\lambda}_{z,ch}^2}} = \frac{1}{0,787 + \sqrt{0,787^2 - 0,611^2}} = 0,779$$

Sprawdzenie interakcji ściskania i zginania w gałęzi słupa

Współczynnik zwichrzenia, przy zginaniu ceownika względem osi mniejszej bezwładności

$$\chi_{LT} = 1,0 .$$

Nośność charakterystyczna przy ściskaniu

$$N_{Rk} = A_{ch} f_y = 37,4 \cdot 10^2 \cdot 275 = 1028 \cdot 10^3 \text{ N}$$

Nośność charakterystyczna przy zginaniu

$$M_{z, Rk, ch} = W_{pl, z} f_y = 64,1 \cdot 10^3 \cdot 275 = 17,63 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

Relacja momentów na końcach segmentu słupa wynosi  $\psi = -1,0$ .

Równoważnik stałego momentu zginającego

$$C_{my} = 0,6 + 0,4\psi = 0,6 - 0,4 \cdot 1,0 = 0,2 < 0,4$$

Przyjęto  $C_{my} = 0,4$  oraz  $C_{mz} = C_{my} = 0,4$

Współczynniki interakcji określone zostały zgodnie z metodą 2 (zalecaną w Załączniku Krajowym)

$$k_{zz} = C_{mz} \left[ 1 + (2\bar{\lambda}_{z, ch} - 0,6) \frac{N_{ch, Ed}}{\chi_{z, ch} \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right] = 0,4 \left[ 1 + (2 \cdot 0,611 - 0,6) \frac{546,7 \cdot 10^3}{0,779 \frac{1028 \cdot 10^3}{1,0}} \right] = 0,57$$

$$k_{zz} = 0,57 < C_{mz} \left[ 1 + 1,4 \frac{N_{ch, Ed}}{\chi_{z, ch} \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right] = 0,4 \left[ 1 + 1,4 \frac{546,7 \cdot 10^3}{0,779 \frac{1028 \cdot 10^3}{1,0}} \right] = 0,782$$

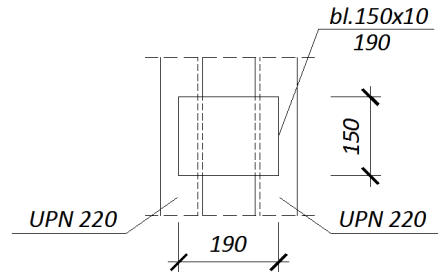
Warunek nośności

$$\frac{N_{ch, Ed}}{\chi_{z, Ed} \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \frac{M_{ch, Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{z, Rk, ch}}{\gamma_{M1}}} = \frac{546,7 \cdot 10^3}{0,779 \frac{1028 \cdot 10^3}{1,0}} + 0,57 \frac{3,24 \cdot 10^6}{1,0 \frac{17,63 \cdot 10^6}{1,0}} = 0,79 < 1$$

Warunek nośności został spełniony.

## Wymiarowanie przewiązek

Schemat przewiązki



Określenie obciążeń przewiązki

Siła poprzeczna w skrajnym przedziale słupa

$$V_{Ed} = 10,6 \cdot 10^3 \text{ N}$$

Moment zginający obciążający przewiązkę

$$M_{p,Ed} = \frac{V_{Ed} a}{2n} = \frac{10,6 \cdot 10^3 \cdot 1220}{2 \cdot 2} = 3,24 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

Siła poprzeczna w przewiązce

$$V_{p,Ed} = \frac{V_{Ed} a}{n h_0} = \frac{106 \cdot 10^3 \cdot 1220}{2 \cdot 142,8} = 45,3 \cdot 10^3 \text{ N}$$

Obliczeniowa nośność na zginanie przewiązki

$$M_{c,Rd} = \frac{t_b h_b^2 f_y}{6 \gamma_{M0}} = \frac{10 \cdot 150^2 \cdot 275}{6 \cdot 1,0} = 10,31 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

Warunek nośności

$$\frac{M_{p,Ed}}{M_{c,Rd}} = \frac{3,24 \cdot 10^6}{10,31 \cdot 10^6} = 0,31 < 1,0$$

Warunek nośności jest spełniony.

Obliczeniowa nośność przewiązki na ścinanie

$$V_{c,Rd} = t_b h_b \frac{f_y}{\sqrt{3} \gamma_{M0}} = 10 \cdot 150 \frac{275}{\sqrt{3} \cdot 1,0} = 238,2 \cdot 10^3 \text{ N}$$

Warunek nośności

$$\frac{V_{p,Ed}}{V_{c,Rd}} = \frac{45,3 \cdot 10^3}{238,2 \cdot 10^3} = 0,19 < 1,0$$

Warunek nośności został spełniony.

Sprawdzenie interakcji momentu i siły poprzecznej

$$V_{p,Ed} = 45,3 \cdot 10^3 \text{ N} < 0,5 V_{c,Rd} = 0,5 \cdot 238,2 \cdot 10^3 = 119,1 \cdot 10^3 \text{ N}$$

Siła poprzeczna nie wpływa na nośność na zginanie.

Przewiązki skrajne

Przyjęto przewiązki skrajne o wysokości  $h_{ps} = 230 \text{ mm} > 1,5 h_b = 1,5 \cdot 150 = 225 \text{ mm}$  .

Grubość przewiązki:  $t_{ps} = 12 \text{ mm}$  .

Długość przewiązki  $l_{ps} = 190 \text{ mm}$  .

### **Wymiarowanie połączenia przewiązki z trzonem słupa**

Wymiarowaniu podlega połączenie spawane przewiązki z trzonem słupa. Przewiązki zostaną połączone z trzonem słupa za pomocą spoin pachwinowych. Schemat połączenia przedstawiony został na poniższym rysunku.

Dobór grubości spoin

$$t_1 = \min(t_b; t_f) = \min(10; 12,5) = 10 \text{ mm}$$

$$t_2 = \max(t_b; t_f) = \max(10; 12,5) = 12,5 \text{ mm}$$

$$0,2 t_2 = 0,2 \cdot 12,5 = 2,5 \text{ mm}$$

$$0,7 t_1 = 0,7 \cdot 10 = 7 \text{ mm}$$

Przyjęto spoiny grubości  $a = 4 \text{ mm}$ .

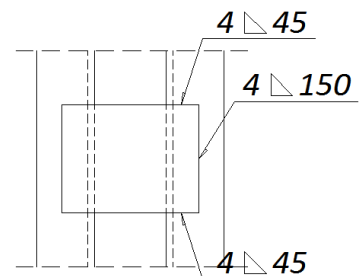
Minimalne długości spoin zgodne z PN-EN 1993-1-8.

$$l_{w,min} = \max \left\{ \begin{array}{l} 6 a = 6 \cdot 4 = 24 \text{ mm} \\ 30 \text{ mm} \end{array} \right\} = 30 \text{ mm}$$

Długości odcinków spoin w połączeniu przewiązki

$$l_{wy} = 45 \text{ mm} > l_{w,min} = 30 \text{ mm}$$

$$l_{wz} = 150 \text{ mm} > l_{w,min} = 30 \text{ mm}$$



Sprawdzenie nośności spoin

Geometria kładu spoin

$$A_w = 2al_{wy} + al_{wz} = 2 \cdot 4 \cdot 45 + 4 \cdot 150 = 9,6 \cdot 10^2 \text{ mm}^2$$

$$S_{I-I} = al_{wz} \frac{l_{wy} + a}{2} = 4 \cdot 150 \frac{45 + 4}{2} = 14,7 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

$$e_y = \frac{S_{I-I}}{A_w} = \frac{14,7 \cdot 10^3}{9,6} \cdot 10^2 = 15,3 \text{ mm}$$

$$J_{wy} = \frac{al_{wz}^3}{12} + 2al_{wy} \left( \frac{l_{wz} + a}{2} \right)^2 = \frac{4 \cdot 150^3}{12} + 2 \cdot 4 \cdot 45 \left( \frac{150 + 4}{2} \right)^2 = 325,9 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

$$J_{wz} = 2 \left( \frac{al_{wy}^3}{12} + al_{wy} e_y^2 \right) + al_{wz} \left( \frac{l_{wy} + a}{2} - e_y \right)^2 = 2 \left( \frac{4 \cdot 45^3}{12} + 4 \cdot 45 \cdot 15,3^2 \right) + 4 \cdot 150 \left( \frac{45 + 4}{2} - 15,3 \right)^2 = 19,6 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

Biegunowy moment bezwładności

$$J_{w0} = J_{wy} + J_{wz} = 325,9 \cdot 10^4 + 19,6 \cdot 10^4 = 345,5 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

Odległość od środka ciężkości kładu spoin do najbardziej wyężonego punktu spoiny

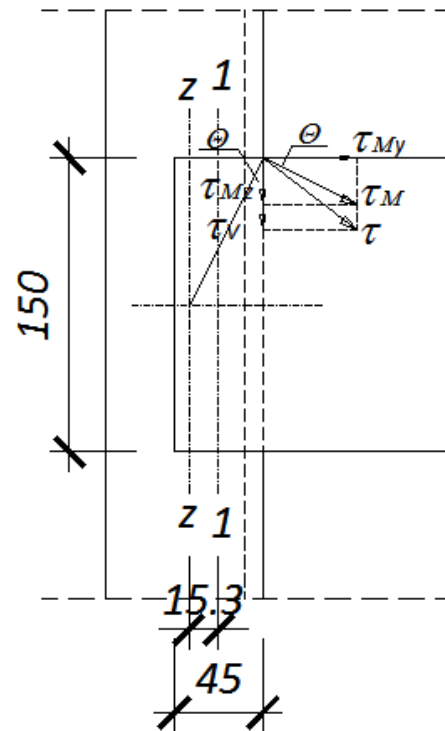
$$r_{max} = \sqrt{\left( \frac{l_{wz}}{2} \right)^2 + \left( \frac{l_{wy}}{2} + e_y \right)^2} = \sqrt{\left( \frac{150}{2} \right)^2 + \left( \frac{45}{2} + 15,3 \right)^2} = 84 \text{ mm}$$

Określenie składowych naprężenia stycznego

Naprężenia od momentu zginającego

$$\tau_M = M_{p, Ed} \frac{r_{max}}{J_0} = 3,24 \cdot 10^6 \frac{84}{345,5 \cdot 10^4} = 78,6 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

$$\tau_{My} = \tau_M \frac{l_{wz}}{2r_{max}} = 78,6 \frac{150}{2 \cdot 84} = 70,2 \frac{N}{\text{mm}^2}$$



$$\tau_{Mz} = \tau_M \frac{l_{wy} + 2e_y}{2r_{max}} = 78,6 \frac{45 + 2 \cdot 15,3}{2 \cdot 84} = 35,4 \frac{N}{mm^2}$$

Naprężenia od siły poprzecznej

$$\tau_V = \frac{V_{p,Ed}}{A_w} = \frac{45,3 \cdot 10^3}{9,6 \cdot 10^2} = 47,2 \frac{N}{mm^2}$$

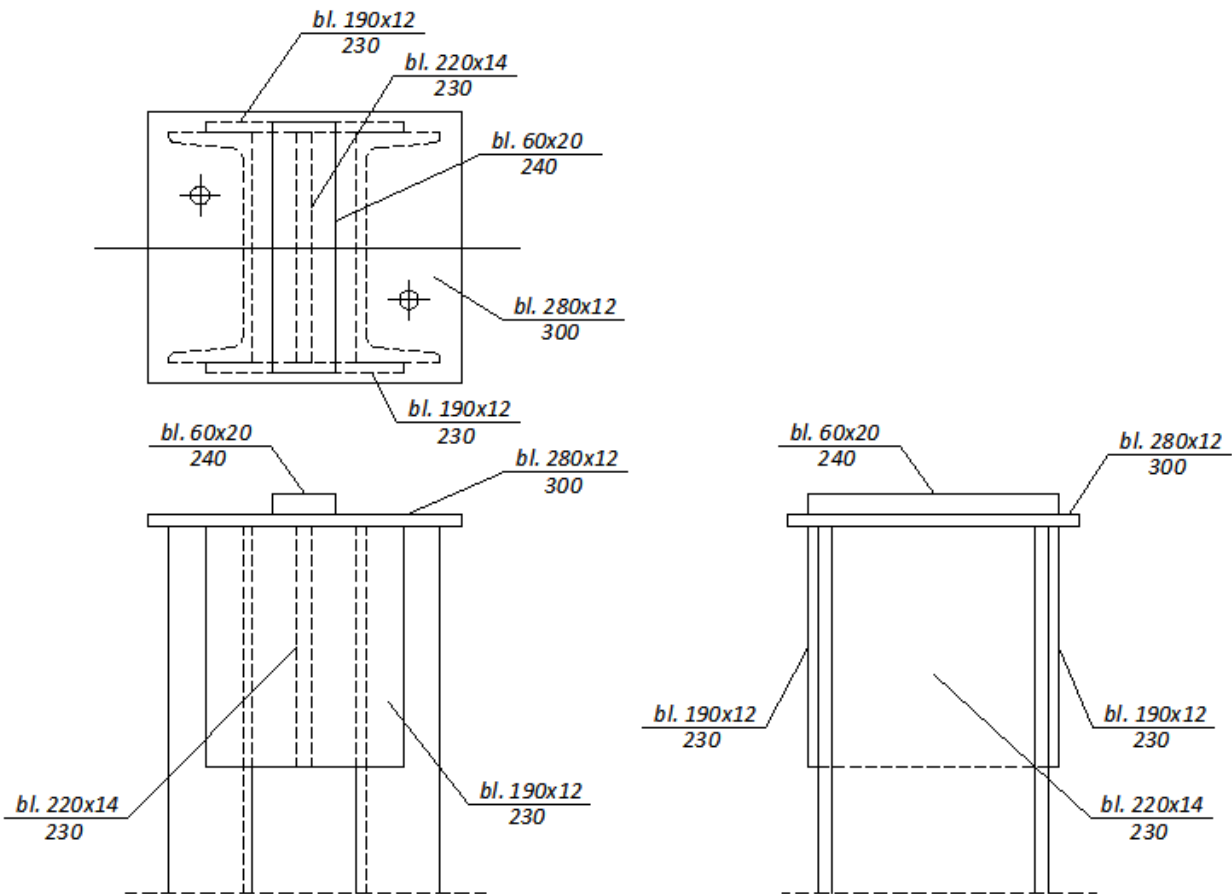
Naprężenie wypadkowe

$$\begin{aligned} \tau &= \sqrt{(\tau_{Mz} + \tau_V)^2 + \tau_{My}^2} = \sqrt{(35,4 + 47,2)^2 + 70,2^2} = 108,4 \frac{N}{mm^2} < \frac{f_y}{\sqrt{3} \beta_w \gamma_{M2}} = \\ &= \frac{275}{\sqrt{3} \cdot 0,85 \cdot 1,25} = 149,4 \frac{N}{mm^2} \end{aligned}$$

Nośność spoin jest zapewniona.

### Wymiarowanie głowicy słupa

Przyjęto rozwiązanie głowicy słupa jak na poniższym rysunku. Składa się ona z płytki centrującej, blachy poziomej oraz pionowego zebra (przepony) umieszczonego centrycznie pod płytką centrującą.



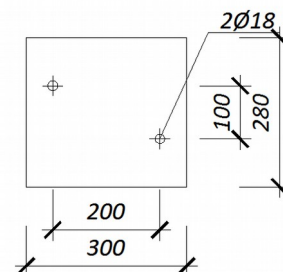
Blacha pozioma

Przyjęto wymiary w rzucie:

$$B_p \times L_p = 300 \times 280 \text{ mm}$$

Grubość blachy poziomej

Przyjęto:  $t_p = 12 \text{ mm}$





Płytki centrująca

Długość płytki centrującej

$$l_{pc} = H_s + 2t_{ps} = 220 + 2 \cdot 10 = 240 \text{ mm} > b_f = 200 \text{ mm}$$

Szerokość płytki centrującej, określona z warunku docisku

$$b_{min} = \frac{N_{Ed}}{l_{pc} f_y} = \frac{830 \cdot 10^3}{240 \cdot 275} = 12,6 \text{ mm}$$

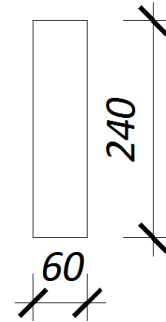
Przyjęto:  $b_{pc} = 60 \text{ mm}$

Naprężenia docisku pod płytką

$$\sigma_d = \frac{N_{Ed}}{b_{pc} l_{pc}} = \frac{830 \cdot 10^3}{60 \cdot 240} = 57,6 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} < f_y = 275 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Grubość płytki centrującej

Przyjęto:  $t_{pc} = 20 \text{ mm}$



Żebro pionowe (przepona)

Długość przepony (równa wysokości trzonu słupa):  $l_{zp} = 220 \text{ mm}$

Wysokość przepony (równa wysokości przewiązek skrajnych):

$$h_{zp} = 230 \text{ mm}$$

Grubość przepony (z warunku docisku):

$$t_{min} = \frac{N_{Ed}}{l_{zp} f_y} = \frac{830 \cdot 10^3}{220 \cdot 275} = 13,7 \text{ mm}$$

Przyjęto:  $t_{zp} = 14 \text{ mm}$

Sprawdzenie nośności na zginanie i ścinanie zastępczego przekroju złożonego z: płytki centrującej, efektywnej części blachy poziomej i przepony

Szerokość efektywna blachy poziomej

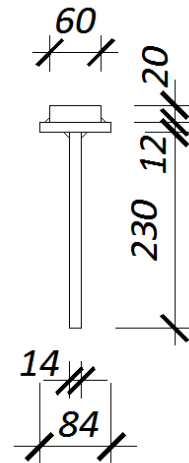
$$b_{p,eff} = b_{pc} + 2t_p = 60 + 2 \cdot 12 = 84 \text{ mm}$$

Geometria przekroju zastępczego

$$A_{pz} = b_{pc} t_{pc} + b_{p,eff} t_p + t_{zp} h_{zp} = 60 \cdot 20 + 84 \cdot 12 + 14 \cdot 230 = 54,3 \cdot 10^2 \text{ mm}^2$$

$$S_{y,pz} = b_{pc} t_{pc} (0,5 t_{pc} + t_p + h_{zp}) + t_p b_{p,eff} (0,5 t_p + h_{zp}) + 0,5 t_{zp} h_{zp}^2 = 60 \cdot 20 (0,5 \cdot 20 + 12 + 230) + 12 \cdot 84 (0,5 \cdot 12 + 230) + 0,5 \cdot 14 \cdot 230^2 = 910,6 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

$$z_{pz} = \frac{S_{y,pz}}{A_{pz}} = \frac{910,6 \cdot 10^3}{54,3 \cdot 10^2} = 168 \text{ mm}$$



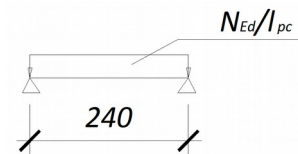
$$J_{y,pz} = \frac{b_{pc} t_{pc}^3}{12} + t_{pc} b_{pc} (0,5 t_{pc} + t_p + h_{zp} - z_{pz})^2 + \frac{b_{p,eff} t_p^3}{12} + b_{p,eff} t_p (0,5 t_p + h_{zp} - z_{pz})^2 + \frac{t_{zp} h_{zp}^3}{12} + t_{zp} h_{zp} (0,5 h_{zp} - z_{pz})^2 = \frac{60 \cdot 20^3}{12} + 60 \cdot 20 (0,5 \cdot 20 + 12 + 230 - 168)^2 + \frac{84 \cdot 12^3}{12} + 84 \cdot 12 (0,5 \cdot 12 + 230 - 168)^2 + \frac{14 \cdot 230^3}{12} + 14 \cdot 230 (0,5 \cdot 230 - 168)^2 = 3642 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

$$W_{el,y,1} = \frac{J_{y,pz}}{z_{pz}} = \frac{3642 \cdot 10^4}{168} = 217,1 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

$$W_{el,y,2} = \frac{J_{y,pz}}{t_{pc} + t_p + h_{zp} - z_{pz}} = \frac{3642 \cdot 10^4}{20 + 12 + 230 - 168} = 386,4 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

Obciążenie umownej belki

$$q_z = \frac{N_{Ed}}{l_{pc}} = \frac{830 \cdot 10^3}{240} = 3,458 \cdot 10^3 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$



Siły wewnętrzne w umownej belce

$$M_{Ed} = \frac{q_z l^2}{8} = \frac{3,458 \cdot 10^3 \cdot 240^2}{8} = 24,9 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

$$V_{Ed} = \frac{q_z l}{2} = \frac{3,458 \cdot 10^3 \cdot 240}{2} = 415 \cdot 10^3 \text{ N}$$

Nośność obliczeniowa na zginanie

$$M_{c,Rd} = W_{el,y,1} \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 217,1 \cdot 10^3 \frac{275}{1,0} = 59,7 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

Warunek nośności

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} = \frac{24,9 \cdot 10^6}{59,7 \cdot 10^6} = 0,42 < 1,0$$

Warunek został spełniony.

Nośność obliczeniowa na ścinanie

$$V_{c,Rd} = t_{zp} \left( h_{zp} - \frac{t_p}{2} \right) \frac{f_y}{\sqrt{3} \gamma_{M0}} = 14 \left( 230 - \frac{12}{2} \right) \frac{275}{\sqrt{3} \cdot 1,0} = 497,9 \cdot 10^3 \text{ N}$$

Warunek nośności

$$\frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} = \frac{415 \cdot 10^3}{497,9 \cdot 10^3} = 0,83 < 1,0$$

Warunek został spełniony.

Sprawdzenie nośności spoin łączących płytkę centrującą z blachą poziomą

Dobór grubości spoin

$$t_2 = \max(t_p; t_{pc}) = \max(12; 20) = 20 \text{ mm}$$

$$t_1 = \min(t_p; t_{pc}) = \min(12; 20) = 12 \text{ mm}$$

$$0,2 t_2 = 0,2 \cdot 20 = 4 \text{ mm}$$

$$0,7 t_1 = 0,7 \cdot 12 = 8,4 \text{ mm}$$

Przyjęto spoiny o grubości  $a = 4 \text{ mm}$ .

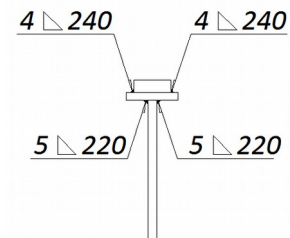
Długość spoiny  $l_w = l_{pc} = 240 \text{ mm} > l_{w,min} = 30 \text{ mm}$

Naprężenia w spoinie od części reakcji podciągu

$$\sigma = \frac{0,25 N_{Ed}}{2 a l_w} = \frac{0,25 \cdot 830 \cdot 10^3}{2 \cdot 4 \cdot 240} = 108,1 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Składowe naprężenia w spoinach

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{\sigma}{\sqrt{2}} = \frac{108,1}{\sqrt{2}} = 76,4 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$



Moment statyczny płytki centrującej względem osi obojętnej w układzie płytka centrująca, efektywna część blachy poziomej, przepona

$$S_{y, pc} = t_{pc} b_{pc} (0,5 t_{pc} + t_p + h_{zp} - z_{pz}) = 20 \cdot 60 (0,5 \cdot 20 + 12 + 230 - 168) = 101,1 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

$$\tau_{\parallel} = \frac{V_{Ed} S_{y, pc}}{2 J_{y, pz} a} = \frac{415 \cdot 10^3 \cdot 101,1 \cdot 10^3}{2 \cdot 3642 \cdot 10^4 \cdot 4} = 144,0 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Warunki nośności spoin

$$\sigma_{\perp} = 76,4 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} < 0,9 \frac{f_u}{\gamma_{M2}} = 0,9 \frac{430}{1,25} = 306,9 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\begin{aligned} \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} &= \sqrt{76,4^2 + 3(76,4^2 + 144,0^2)} = 292,5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} < \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} = \frac{430}{0,85 \cdot 1,25} = \\ &= 404,7 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \end{aligned}$$

Warunki nośności spoin zostały spełnione.

Sprawdzenie nośności spoin łączących przeponę z blachą poziomą

Dobór grubości spoin

$$t_2 = \max(t_p; t_{zp}) = \max(12; 14) = 14 \text{ mm}$$

$$t_1 = \min(t_p; t_{zp}) = \min(12; 14) = 12 \text{ mm}$$

$$0,2 t_2 = 0,2 \cdot 14 = 2,8 \text{ mm}$$

$$0,7 t_1 = 0,7 \cdot 12 = 8,4 \text{ mm}$$

Przyjęto spoiny o grubości  $a = 5 \text{ mm}$ .

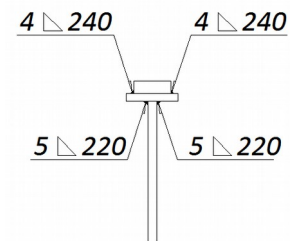
Długość spoiny  $l_w = l_{pc} = 220 \text{ mm} > l_{w, min} = 30 \text{ mm}$

Naprężenia w spoinie od części reakcji podciągu

$$\sigma = \frac{0,25 N_{Ed}}{2 a l_w} = \frac{0,25 \cdot 830 \cdot 10^3}{2 \cdot 5 \cdot 220} = 94,3 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Składowe naprężenia w spoinach

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{\sigma}{\sqrt{2}} = \frac{94,3}{\sqrt{2}} = 66,7 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$



Moment statyczny płytki centrującej i efektywnej części blachy poziomej względem osi obojętnej w układzie płytka centrująca, efektywna część blachy poziomej, przepona

$$S_{y,p} = t_{pc} b_{pc} (0,5 t_{pc} + t_p + h_{zp} - z_{pz}) + t_p b_{p,eff} (0,5 t_p + h_{zp} - z_{pz}) = \\ = 20 \cdot 60 (0,5 \cdot 20 + 12 + 230 - 168) + 12 \cdot 84 (0,5 \cdot 12 + 230 - 168) = 169,9 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

$$\tau_{\parallel} = \frac{V_{Ed} S_{y,p}}{2 J_{y,pz} a} = \frac{415 \cdot 10^3 \cdot 169,9 \cdot 10^3}{2 \cdot 3642 \cdot 10^4 \cdot 5} = 193,6 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

Warunki nośności spoin

$$\sigma_{\perp} = 66,7 \frac{N}{\text{mm}^2} < 0,9 \frac{f_u}{\gamma_{M2}} = 0,9 \frac{430}{1,25} = 306,9 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} = \sqrt{66,7^2 + 3(66,7^2 + 193,6^2)} = 360,8 \frac{N}{\text{mm}^2} < \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} = \frac{430}{0,85 \cdot 1,25} = \\ = 404,7 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

Warunki nośności spoin zostały spełnione.

Sprawdzenie nośności spoin łączących przeponę z blachami pionowymi (przewiązkami skrajnymi)

Dobór grubości spoin

$$t_2 = \max(t_{ps}; t_{zp}) = \max(12; 14) = 14 \text{ mm}$$

$$t_1 = \min(t_{ps}; t_{zp}) = \min(12; 14) = 12 \text{ mm}$$

$$0,2 t_2 = 0,2 \cdot 14 = 2,8 \text{ mm}$$

$$0,7 t_1 = 0,7 \cdot 12 = 8,4 \text{ mm}$$

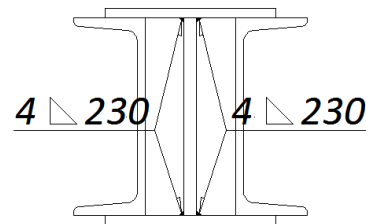
Przyjęto spoiny o grubości  $a = 4 \text{ mm}$ .

Długość spoiny  $l_w = l_{pc} = 230 \text{ mm} > l_{w,min} = 30 \text{ mm}$

Naprężenia w spoinach

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{\sigma}{\sqrt{2}} = \frac{0}{\sqrt{2}} = 0 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

$$\tau_{\parallel} = \frac{V_{Ed}}{2 a l_w} = \frac{415 \cdot 10^3}{2 \cdot 4 \cdot 230} = 225,5 \frac{N}{\text{mm}^2}$$



$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} = \sqrt{0^2 + 3(0^2 + 225,5^2)} = 390,6 \frac{N}{mm^2} < \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} = \frac{430}{0,85 \cdot 1,25} = 404,7 \frac{N}{mm^2}$$

Warunki nośności spoin zostały spełnione.

Sprawdzenie nośności spoin łączących przeponę z blachami pionowymi (przewiązkami skrajnymi)

Dobór grubości spoin

$$t_2 = \max(t_{ps}; t_f) = \max(12; 12,5) = 12,5 \text{ mm}$$

$$t_1 = \min(t_{ps}; t_f) = \min(12; 12,5) = 12 \text{ mm}$$

$$0,2t_2 = 0,2 \cdot 12,5 = 2,5 \text{ mm}$$

$$0,7t_1 = 0,7 \cdot 12 = 8,4 \text{ mm}$$

Przyjęto spoiny o grubości  $a = 4 \text{ mm}$ .

Długość spoiny  $l_w = l_{pc} = 230 \text{ mm} > l_{w,min} = 30 \text{ mm}$

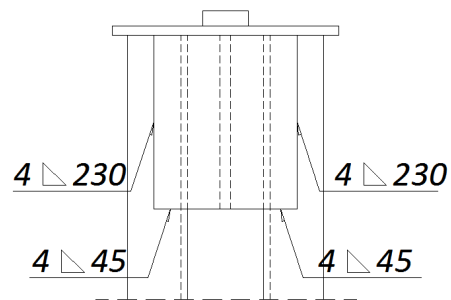
Naprężenia w spoinach (wzięto pod uwagę jedynie pionowe odcinki spoin)

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{\sigma}{\sqrt{2}} = \frac{0}{\sqrt{2}} = 0 \frac{N}{mm^2}$$

$$\tau_{\parallel} = \frac{V_{Ed}}{2al_w} = \frac{415 \cdot 10^3}{2 \cdot 4 \cdot 230} = 225,5 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} = \sqrt{0^2 + 3(0^2 + 225,5^2)} = 390,6 \frac{N}{mm^2} < \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} = \frac{430}{0,85 \cdot 1,25} = 404,7 \frac{N}{mm^2}$$

Warunki nośności spoin zostały spełnione.



Sprawdzenie nośności przewiązki skrajnej na ścinanie

Nośność przewiązki

$$V_{Rd} = t_{ps} \left( h_{ps} - \frac{t_p}{2} \right) \frac{f_y}{\sqrt{3} \gamma_{M0}} = 12 \left( 230 - \frac{12}{2} \right) \frac{275}{\sqrt{3} \cdot 1,0} = 426,8 \cdot 10^3 \text{ N}$$

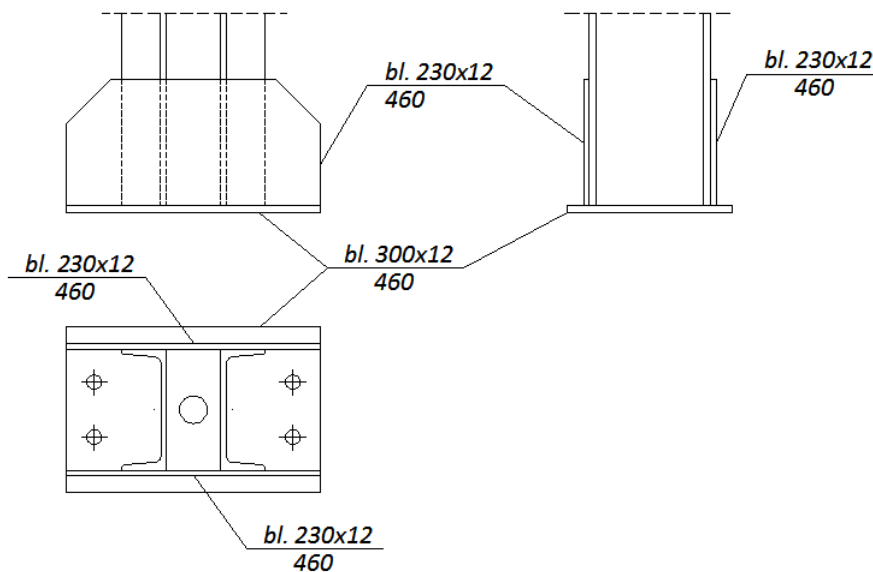
Warunek nośności

$$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd}} = \frac{415 \cdot 10^3}{426,8 \cdot 10^3} = 0,97 < 1,0$$

Warunek został spełniony.

### **Wymiarowanie podstawy słupa**

Przyjęto rozwiązanie składające się z blach trapezowych i blachy poziomej.



Słup oparty jest na stopie fundamentowej wykonanej z betonu C16/20

o  $f_{ck} = 16 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ . Częściowy współczynnik bezpieczeństwa dla betonu wynosi

$$\gamma_C = 1,4$$

Obliczeniowa wytrzymałość betonu na ściskanie

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_C} = \frac{16}{1,4} = 11,4 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Określenie wysokości blach trapezowych z warunku nośności spoin łączących je z trzonem słupa.

Dobór grubości spoin

$$t_2 = \max(t_{ps}; t_f) = \max(12; 12,5) = 12,5 \text{ mm}$$

$$t_1 = \min(t_{ps}; t_f) = \min(12; 12,5) = 12 \text{ mm}$$

$$0,2t_2 = 0,2 \cdot 12,5 = 2,5 \text{ mm}$$

$$0,7t_1 = 0,7 \cdot 12 = 8,4 \text{ mm}$$

Przyjęto spoiny o grubości  $a = 4 \text{ mm}$ .

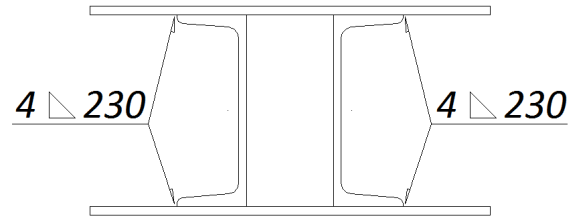
Liczba spoin łączących blachy trapezowe z trzonem słupa

Przyjęto:  $n = 4$ .

Minimalna długość spoin

$$l_{w, \min} = \frac{N_{Ed} \sqrt{3} \beta_w \gamma_{M2}}{n f_u a} = \frac{830 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{3} \cdot 0,85 \cdot 1,25}{4 \cdot 430 \cdot 4} = 222 \text{ mm}$$

Przyjęto wysokość blach trapezowych  $h_{ps} = 230 \text{ mm} > 1,5 h_b = 1,5 \cdot 150 = 225 \text{ mm}$



Określenie wymiarów blachy poziomej

Założono wstępnie wysięg blach trapezowych poza obrys trzonu słupa wynoszący:

$$l_b = 100 \text{ mm}$$

Parametry pomocnicze

$$X_1 = -8 f_{cd} = -8 \cdot 11,4 = -91,43 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$X_2 = 4 B_s f_{cd} + 4 H_s f_{cd} + 8 l_b f_{cd} - 4 t_w f_{cd} = 4 \cdot 260 \cdot 11,4 + 4 \cdot 220 \cdot 11,4 + 8 \cdot 100 \cdot 11,4 + \\ - 4 \cdot 9,5 \cdot 11,4 = 30,65 \cdot 10^3 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

$$X_3 = 2 B_s t_{ps} f_{cd} + 2 H_s t_w f_{cd} + 4 l_b t_{ps} f_{cd} = 2 \cdot 260 \cdot 12 \cdot 11,4 + 2 \cdot 220 \cdot 9,5 \cdot 11,4 + \\ + 4 \cdot 100 \cdot 12 \cdot 11,4 = 173,9 \cdot 10^3 \text{ N}$$



Określony wstępnie wysięg strefy docisku

$$c = \frac{-X_2 - \sqrt{X_2^2 - 4X_1X_3 + 4X_1N_{Ed}}}{2X_1} =$$

$$= \frac{-30,65 \cdot 10^3 - \sqrt{(30,65 \cdot 10^3)^2 + 4 \cdot 91,43 \cdot 173,9 \cdot 10^3 - 4 \cdot 91,43 \cdot 830 \cdot 10^3}}{-2 \cdot 91,43} = 23,0 \text{ mm}$$

Minimalna grubość blachy poziomej

$$t_{p, \min} = \frac{c}{\sqrt{\frac{f_y}{3 f_{cd} \gamma_{M0}}}} = \frac{23,0}{\sqrt{\frac{275}{3 \cdot 11,4 \cdot 1,0}}} = 8,1 \text{ mm}$$

Przyjęto blachę poziomą o grubości  $t_p = 12 \text{ mm}$ .

Maksymalny wysięg strefy docisku dla przyjętej grubości blachy poziomej

$$c = t_p \sqrt{\frac{f_y}{3 f_{cd} \gamma_{M0}}} = 12 \sqrt{\frac{275}{3 \cdot 11,4 \cdot 1,0}} = 34 \text{ mm}$$

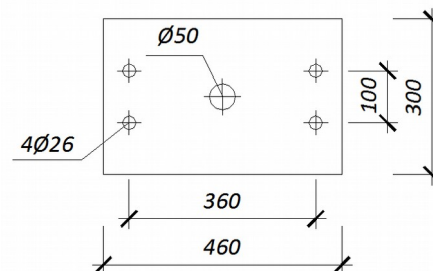
Ostateczne wymiary blachy poziomej

$$B_p = B_s + 2l_b = 260 + 2 \cdot 100 = 460 \text{ mm}$$

$$H_p > H_s + 2c = 220 + 2 \cdot 34 = 288 \text{ mm}$$

Przyjęto:  $H_p = 300 \text{ mm}$

$$B_p \times H_p = 460 \times 300 \text{ mm}$$



Sprawdzenie nośności podstawy

Wymiary króćców teowych

Blachy trapezowe

$$b_{eff,1} = t_{ps} + 2c = 12 + 2 \cdot 34 = 80 \text{ mm}$$

$$l_{eff,1} = B_p = 460 \text{ mm}$$

Środniki trzonu słupa

$$b_{eff,2} = t_w + 2c = 9,5 + 2 \cdot 34 = 77,5 \text{ mm}$$

$$l_{eff,2} = H_s - 2c = 220 - 2 \cdot 34 = 152 \text{ mm}$$

Nośności króćców teowych

$$F_{C,Rd,1} = b_{eff,1} l_{eff,1} f_{cd} = 80 \cdot 460 \cdot 11,4 = 420,6 \cdot 10^3 \text{ N}$$

$$F_{C,Rd,2} = b_{eff,2} l_{eff,2} f_{cd} = 77,5 \cdot 152 \cdot 11,4 = 134,6 \cdot 10^3 \text{ N}$$

Obliczeniowa nośność podstawy

$$N_{Rd} = 2 F_{C,Rd,1} + 2 F_{C,Rd,2} = 2 \cdot 420,6 \cdot 10^3 + 2 \cdot 134,6 \cdot 10^3 = 1110,4 \cdot 10^3 \text{ N}$$

Warunek nośności

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} = \frac{830 \cdot 10^3}{1110,4 \cdot 10^3} = 0,75 < 1,0$$

Warunek nośności został spełniony.

Sprawdzenie nośności przekroju złożonego z blachy trapezowej i efektywnej części blachy poziomej

Efektywna szerokość blachy poziomej

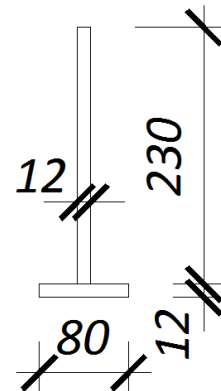
$$b_{eff} = t_{ps} + 2c = 12 + 2 \cdot 34 = 80 \text{ mm}$$

Geometria przekroju zastępczego

$$A_{pz} = b_{eff} t_p + h_{ps} t_{ps} = 80 \cdot 12 + 230 \cdot 12 = 37,2 \cdot 10^2 \text{ mm}^2$$

$$S_{y,pz} = 0,5 b_{eff} t_p^2 + t_{ps} h_{ps} (0,5 h_{ps} + t_p) = 0,5 \cdot 80 \cdot 12^2 + 12 \cdot 230 (0,5 \cdot 230 + 12) = 356,3 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

$$z_{pz} = \frac{S_{y,pz}}{A_{pz}} = \frac{356,3 \cdot 10^3}{37,2 \cdot 10^2} = 96 \text{ mm}$$



$$J_{y,pz} = \frac{b_{eff} t_p^3}{12} + b_{eff} t_p (0,5 t_p - z_{pz})^2 + \frac{t_{ps} h_{ps}^3}{12} + t_{ps} h_{ps} (0,5 h_{ps} + t_p - z_{pz})^2 =$$

$$= \frac{80 \cdot 12^3}{12} + 80 \cdot 12 (0,5 \cdot 12 - 96)^2 + \frac{12 \cdot 230^3}{12} + 12 \cdot 230 (0,5 \cdot 230 + 12 - 96)^2 =$$

$$= 2260,7 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

$$W_{el,y,1} = \frac{J_{y,pz}}{z_{pz}} = \frac{2260,7 \cdot 10^4}{96} = 236 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

$$W_{el,y,2} = \frac{J_{y,pz}}{h_{ps} + t_p - z_{pz}} = \frac{2260,7 \cdot 10^4}{230 + 12 - 96} = 154,6 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

Naprężenia na efektywnym polu docisku

$$\sigma = \frac{N_{Ed}}{2 b_{eff,1} l_{eff,1} + 2 b_{eff,2} l_{eff,2}} = \frac{830 \cdot 10^3}{2 \cdot 80 \cdot 460 + 2 \cdot 77,5 \cdot 152} = 8,54 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Liniowe obciążenie oddziałujące na przekrój zastępczy

$$q_z = \sigma b_{eff} = 8,54 \cdot 80 = 683,4 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

Maksymalne siły wewnętrzne obliczone przy założeniu pracy zastępczego przekroju, jako wspornika o wysięgu  $l_b = 100 \text{ mm}$ .

$$M_{Ed} = q_z \frac{l_b^2}{2} = 683,4 \frac{100^2}{2} = 3,42 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

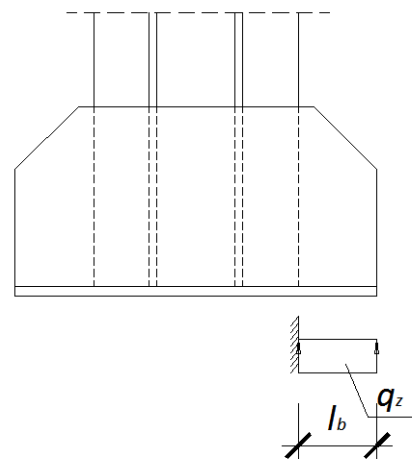
$$V_{Ed} = q_z l_b = 683,4 \cdot 100 = 68,3 \cdot 10^3 \text{ N}$$

Obliczeniowa nośność na zginanie

$$M_{c,Rd} = W_{el,y,2} \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 154,6 \cdot 10^3 \frac{275}{1,0} = 42,5 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

Warunek nośności

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} = \frac{3,42 \cdot 10^6}{42,5 \cdot 10^6} = 0,08 < 1,0$$



Obliczeniowa nośność na ścinanie

$$V_{c,Rd} = t_{ps} \left( h_{ps} - \frac{t_p}{2} \right) \frac{f_y}{\sqrt{3} \gamma_{M0}} = 12 \left( 230 - \frac{12}{2} \right) \frac{275}{\sqrt{3} \cdot 1,0} = 426,8 \cdot 10^3 \text{ N}$$

Warunek nośności

$$\frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} = \frac{68,3 \cdot 10^3}{426,8 \cdot 10^3} = 0,16 < 1,0$$

Warunki nośności zostały spełnione.

Sprawdzenie nośności spoin łączących trzon i blachy trapezowe z blachą poziomą (punkt A)

Dobór grubości spoin:

blachy trapezowe

$$t_2 = \max(t_{ps}; t_p) = \max(12; 12) = 12 \text{ mm}$$

$$t_1 = \min(t_{ps}; t_f) = \min(12; 12) = 12 \text{ mm}$$

$$0,2 t_2 = 0,2 \cdot 12 = 2,4 \text{ mm}$$

$$0,7 t_1 = 0,7 \cdot 12 = 8,4 \text{ mm}$$

Środniki trzonu słupa

$$t_2 = \max(t_w; t_p) = \max(9,5; 12) = 12 \text{ mm}$$

$$t_1 = \min(t_w; t_f) = \min(9,5; 12) = 9,5 \text{ mm}$$

$$0,2 t_2 = 0,2 \cdot 12 = 2,4 \text{ mm}$$

$$0,7 t_1 = 0,7 \cdot 9,5 = 6,65 \text{ mm}$$

Przyjęto wszystkie spoiny o grubości  $a = 4 \text{ mm}$ .

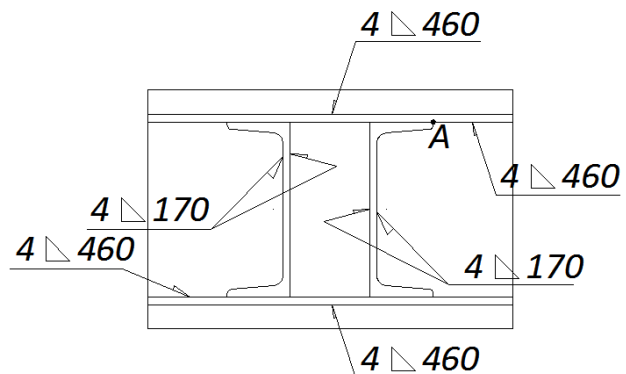
Długości spoin łączących

blachy trapezowe:

$$l_{w1} = B_s = 460 \text{ mm} > l_{w, \min} = 30 \text{ mm}$$

środniki:

$$l_{w2} = H_s - 2(t_f + r) = 220 - 2(12,5 + 12,5) = 170 \text{ mm} > l_{w, \min} = 30 \text{ mm}$$



Naprężenia w spoinach

Moment statyczny efektywnego pola blachy poziomej względem osi obojętnej przekroju zbudowanego z blachy trapezowej i efektywnej części blachy poziomej

$$S_{y,p} = b_{\text{eff}} t_p (z_{pz} - 0,5 t_p) = 94 \cdot 12 (92 - 0,5 \cdot 12) = 80,5 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

$$\tau_{\parallel} = \frac{V_{Ed} S_{y,p}}{2 J_{y,pz} a} = \frac{67,9 \cdot 10^3 \cdot 80,5 \cdot 10^3}{2 \cdot 1989,1 \cdot 10^4 \cdot 4} = 34,3 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Naprężenia normalne

$$\sigma = \frac{N_{Ed}}{2 a l_{w1} + 2 a l_{w2}} = \frac{830 \cdot 10^3}{2 \cdot 4 \cdot 460 + 2 \cdot 4 \cdot 170} = 129,7 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Składowe naprężenia w spoinach

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{\sigma}{\sqrt{2}} = \frac{129,7}{\sqrt{2}} = 91,7 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Warunki nośności spoin

$$\sigma_{\perp} = 91,7 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} < 0,9 \frac{f_u}{\gamma_{M2}} = 0,9 \frac{430}{1,25} = 309,6 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\begin{aligned} \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} &= \sqrt{91,7^2 + 3(91,7^2 + 34,3^2)} = 192,8 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} < \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} = \frac{430}{0,85 \cdot 1,25} = \\ &= 404,7 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \end{aligned}$$

Warunki nośności spoin zostały spełnione.

### **Śruby fundamentowe**

Przyjęto połączenie słupa ze stopą fundamentową za pomocą 4 F 16, w rozstawieniu jak na rysunku blachy poziomej.