

Politechnika Wrocławska

Wrocław, 2016

Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

Katedra Konstrukcji Metalowych

## **Projekt hali stalowej**

Wykonał:

Piotr Kopka

Sprawdzający:

Dr inż. Jacek Dudkiewicz

## 1. Dane

Rozpiętość ramy: 21 m

Wysokość użytkowa:  $h = 11$  m

Rozstaw ram: 6 m

Długość hali: 120 m

Pokrycie hali: blacha trapezowa

Lokalizacja: Krapkowice

Pochylenie dachu: przyjęto  $\alpha = 5^\circ$

## 2. Zestawienie obciążeń

### 2.1. Obciążenie śniegiem (PN-EN 1991-1-3:2005)

Krapkowice → 2 strefa obciążenia śniegiem gruntu →

charakterystyczne obciążenie śniegiem gruntu:  $s_k = 0,9 \frac{kN}{m^2}$

kąt nachylenia połaci dachu:  $\alpha = 5^\circ$

charakterystyczne obciążenie śniegiem dachu:  $s = \mu_i * C_e * C_t * s_k$

współczynnik ekspozycji:  $C_e = 1,0$

współczynnik termiczny:  $C_t = 1,0$

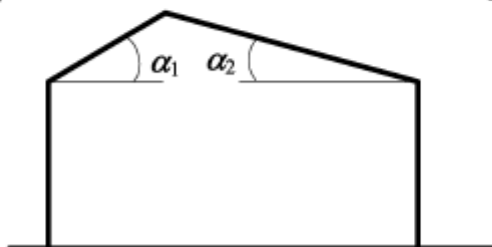
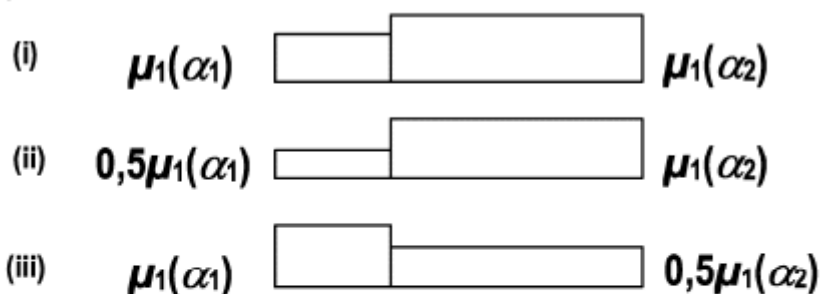
współczynnik kształtu dachu:  $\mu_i = 0,8$  dla  $0^\circ < \alpha < 30^\circ$

$$s = \mu_i * C_e * C_t * s_k = 0,8 * 1,0 * 1,0 * 0,9 \frac{kN}{m^2} = 0,72 \frac{kN}{m^2}$$

Przypadek 1 – równomierne obciążenie śniegiem – na obu połaciach  $s_1 = s = 0,72 \frac{kN}{m^2}$

Przypadek 2 – nierównomierne obciążenie śniegiem – na jednej połaci  $s_1 = s = 0,72 \frac{kN}{m^2}$ , na drugiej  $s_2 = 0,5s = 0,36 \frac{kN}{m^2}$

### Przypadek



## 2.2. Obciążenie wiatrem (PN-EN 1991-1-4:2008)

Krapkowice → 1 strefa wiatrowa

wysokość nad poziomem morza:  $A = 167 \text{ m n.p.m.} < 300 \text{ m n.p.m.}$

kategoria terenu: III

wysokość budynku nad poziomem terenu: założono  $z = \text{wysokość użytkowa} + 0,5 \text{ m} = 11 \text{ m} + 0,5 \text{ m} = 11,5 \text{ m}$

wymiar chropowatości:  $z_0 = 0,3 \text{ m}$

podstawowa bazowa prędkość wiatru:  $v_{b,0} = 22 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

bazowe ciśnienie prędkości wiatru:  $q_{b,0} = 0,30 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$

współczynnik kierunkowy: przyjęto  $C_{dir} = 1,0$

współczynnik sezonowy: przyjęto  $C_{season} = 1,0$

bazowa prędkość wiatru:  $v_b = C_{dir} * C_{season} * v_{b,0} = 1,0 * 1,0 * 22 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 22 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

współczynnik chropowatości:  $c_r(z) = 0,8 * \left(\frac{z}{10}\right)^{0,19} = 0,8 * \left(\frac{11,5}{10}\right)^{0,19} = 0,82$

współczynnik ekspozycji:  $c_e(z) = 1,9 * \left(\frac{z}{10}\right)^{0,26} = 1,9 * \left(\frac{11,5}{10}\right)^{0,26} = 1,97$

średnia prędkość wiatru:  $v_m(z) = c_r(z) * c_0(z) * v_b$

współczynnik orografii: przyjęto  $c_0(z) = 1,0$

$v_m(z) = c_r(z) * c_0(z) * v_b = 0,82 * 1,0 * 22 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 18,04 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Turbulencja wiatru

współczynnik turbulencji: przyjęto  $k_l = 1,0$

intensywność turbulencji

$$I_v(z) = \frac{k_l}{c_0(z) * \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} = \frac{1,0}{1,0 * \ln\left(\frac{11,5}{0,3}\right)} = 0,27$$

Wartość szczytowa ciśnienia prędkości

gęstość powietrza: przyjęto  $\rho = 1,25 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

$$1^\circ q_p(z) = [1 + 7 * I_v(z)] * \frac{1}{2} * \rho * v_m^2(z) = [1 + 7 * 0,27] * \frac{1}{2} * 1,25 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * \left(18,04 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 = 0,588 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

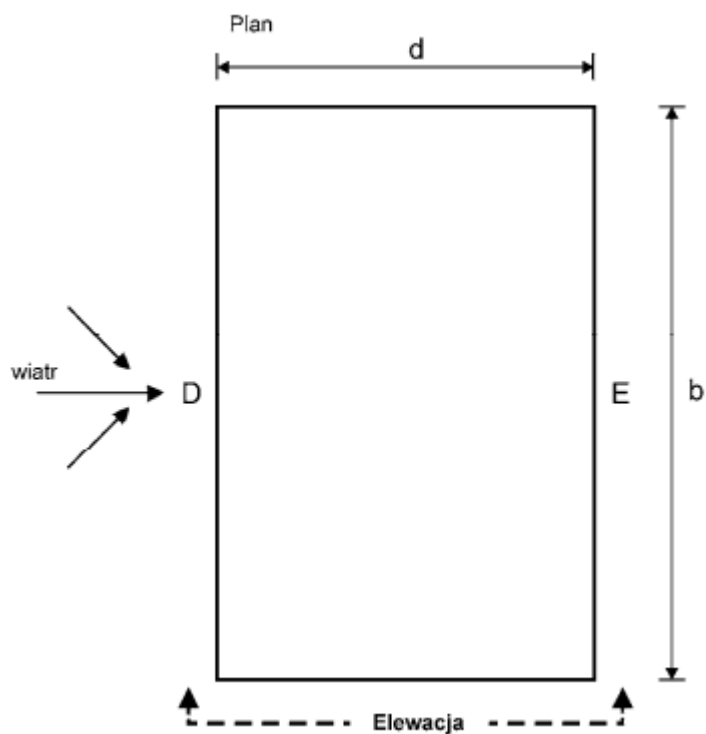
$$2^\circ q_p(z) = c_e(z) * q_b$$

$$\text{wartość bazowa ciśnienia prędkości: } q_b = \frac{1}{2} * \rho * v_b^2 = \frac{1}{2} * 1,25 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * \left(22 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 = 0,303 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

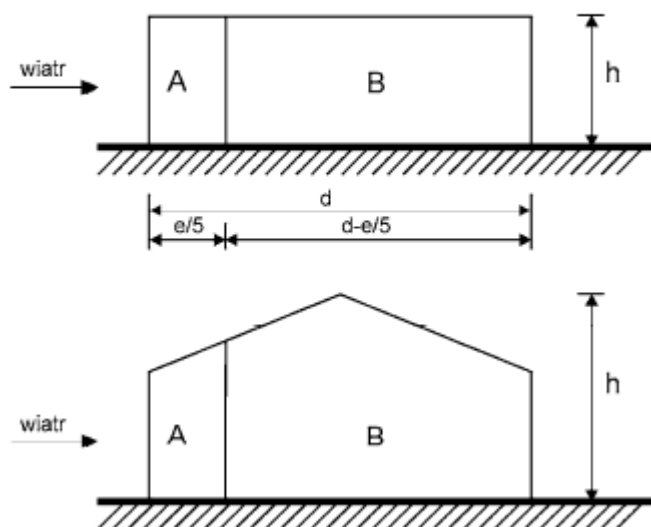
$$q_p(z) = c_e(z) * q_b = 1,97 * 0,303 \frac{kN}{m^2} = 0,597 \frac{kN}{m^2}$$

Ściany pionowe

Wiatr od boku



**Elewacja przy  $e \geq d$**



$$d = 21 \text{ m}$$

$$b = 120 \text{ m}$$

$$h = 11,5 \text{ m}$$

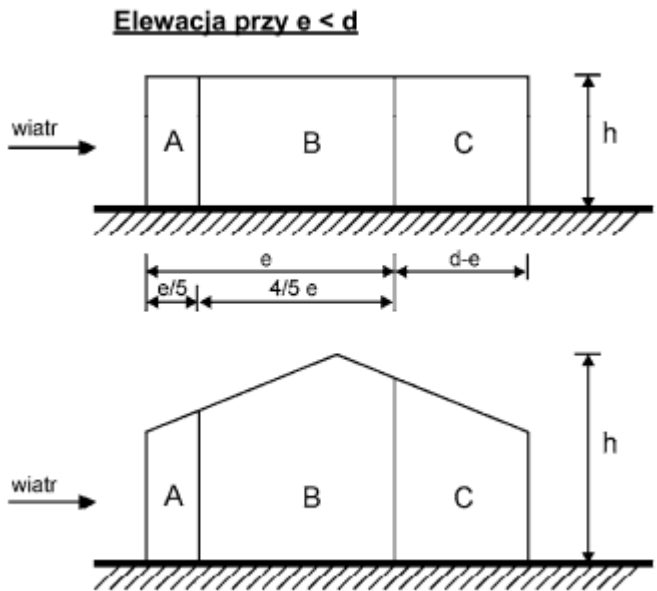
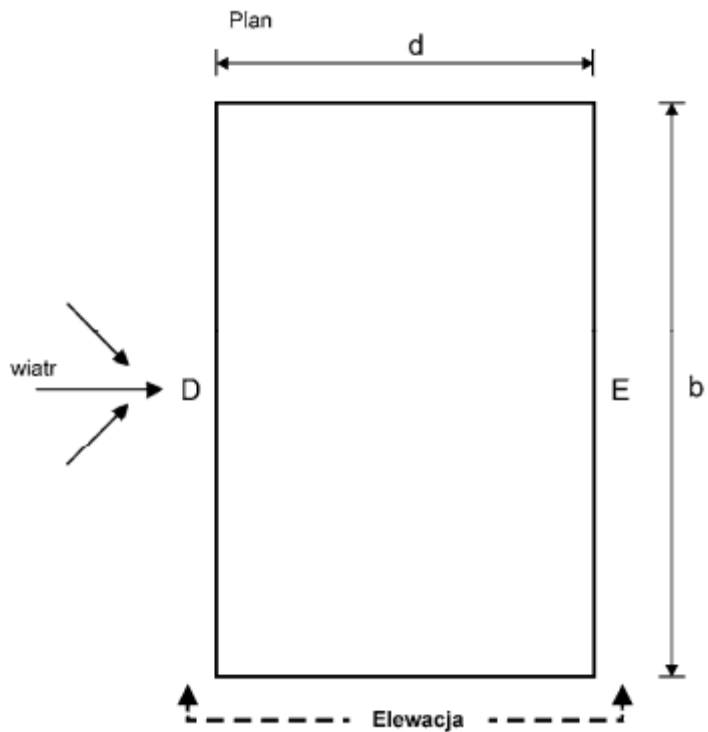
$$e = \min\{b; 2h\} = \min\{120 \text{ m}; 23 \text{ m}\} = 23 \text{ m}$$

$$e > d$$

$$\frac{h}{d} = \frac{11,5}{21} = 0,55$$

Pole	A	B	D	E
$h/d$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,10}$
0,55	-1,2	-0,8	0,74	-0,38

Wiatr od czoła



$$d = 120 \text{ m}$$

$$b = 21 \text{ m}$$

$$h = 11,5 \text{ m}$$

$$e = \min\{b; 2h\} = \min\{21 \text{ m}; 23 \text{ m}\} = 21 \text{ m}$$

$$e < d$$

$$\frac{h}{d} = \frac{11,5}{120} = 0,10$$

Pole	A	B	C	D	E
$h/d$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,10}$
0,55	-1,2	-0,8	-0,5	0,7	-0,3

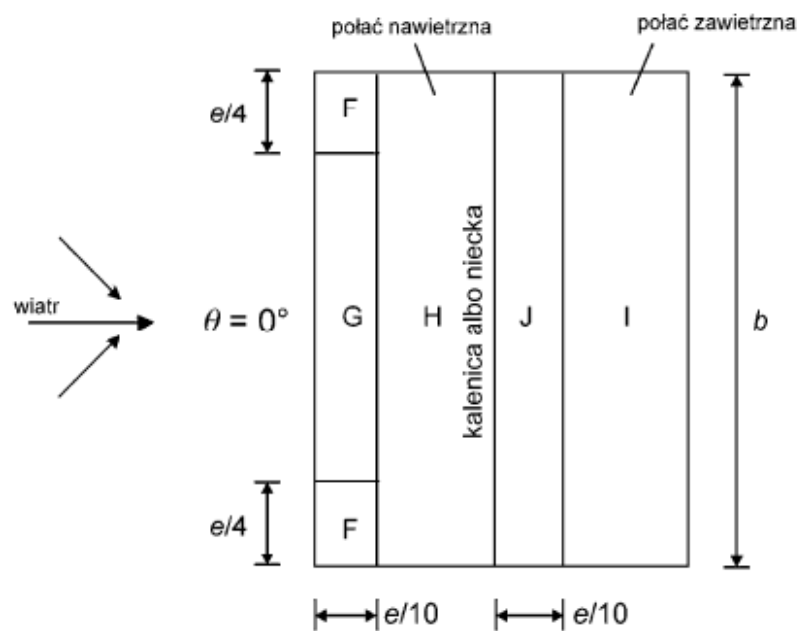
Dach dwuspadowy

Kierunek wiatru  $\theta = 0^\circ$

$b = 120 \text{ m}$

$h = 11,5 \text{ m}$

$e = \min\{b; 2h\} = \min\{120 \text{ m}; 23 \text{ m}\} = 23 \text{ m}$



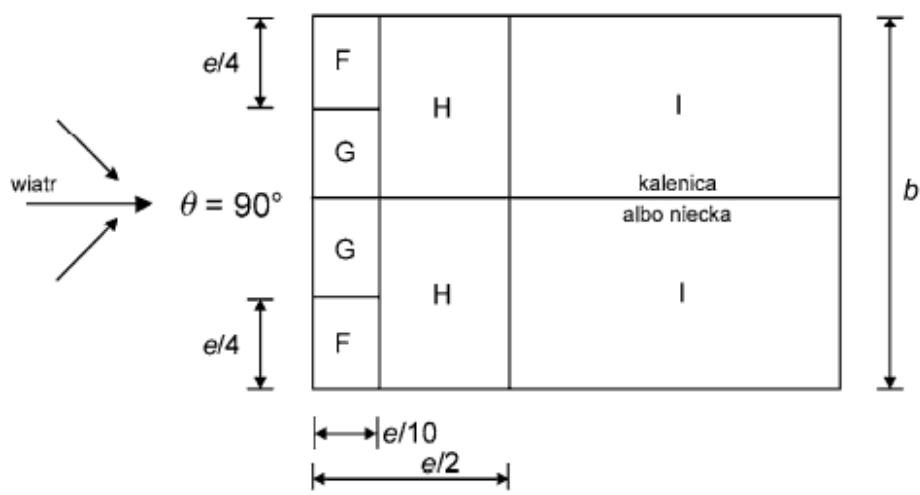
(b) kierunek wiatru  $\theta = 0^\circ$

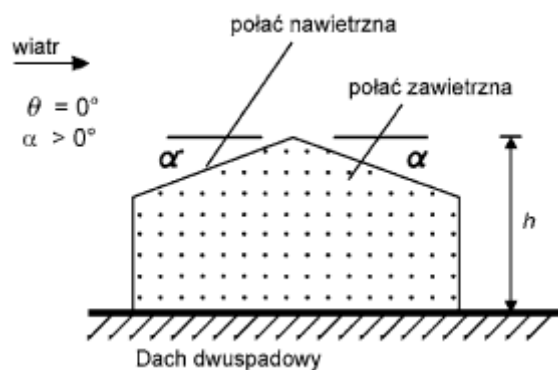
Kierunek wiatru  $\theta = 90^\circ$

$b = 21 \text{ m}$

$h = 11,5 \text{ m}$

$e = \min\{b; 2h\} = \min\{21 \text{ m}; 23 \text{ m}\} = 21 \text{ m}$





Kąt spadku $\alpha$	Pole dla kierunku wiatru $\theta = 0^\circ$				
$\alpha = 5^\circ$	F	G	H	I	J
	$c_{pe,10}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,10}$
	-1,7 (0,0)	-1,2 (0,0)	-0,6 (0,0)	-0,6	-0,6 (0,2)
	Pole dla kierunku wiatru $\theta = 90^\circ$				
	F	G	H	I	
	$c_{pe,10}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,10}$	
	-1,6	-1,3	-0,7	-0,6	

Ciśnienie wiatru  $w_e = q_p(z) * c_{pe,10} = 0,597 \frac{kN}{m^2} * c_{pe,10}$

Ściany – wiatr od boku					
Pole	A	B	C	D	E
$c_{pe,10}$	-1,2	-0,8	-	0,74	-0,38
$w_e [kN/m^2]$	-0,716	-0,478	-	0,442	-0,227
Ściany – wiatr od czoła					
Pole	A	B	C	D	E
$c_{pe,10}$	-1,2	-0,8	-0,5	0,7	-0,3
$w_e [kN/m^2]$	-0,716	-0,478	-0,299	0,418	-0,179
Dach $\theta = 0^\circ$					
Pole	F	G	H	I	J
Wariant I					
$c_{pe,10}$	0	0	0	-0,6	-0,6
$w_e [kN/m^2]$	0	0	0	-0,358	-0,358
Wariant II					
$c_{pe,10}$	-1,7	-1,2	-0,6	-0,6	-0,6
$w_e [kN/m^2]$	-1,015	-0,716	-0,358	-0,358	-0,358
Dach $\theta = 90^\circ$					
Pole	F	G	H	I	-
$c_{pe,10}$	-1,6	-1,3	-0,7	-0,6	-
$w_e [kN/m^2]$	-0,955	-0,776	-0,418	-0,358	-

### 3. Dobór elementów

#### 3.1. Pokrycie dachowe

Założono blachę trapezową Pruszyński T35 o grubości 0,70 mm układaną na pozytyw w układzie trójpłaszczyznowym o ciężarze  $0,063 \text{ kN/m}^2$

Przyjęto układ warstw pokrycia dachu:

1. blacha trapezowa Pruszyński T35 0,70 mm, wysokość profilu 35 mm, ciężar  $0,063 \text{ kN/m}^2$
2. folia paroizolacyjna PE 0,2 mm
3. płyta z wełny mineralnej Rockwool Dachrock Max 200 mm, ciężar  $0,30 \text{ kN/m}^2$
4. folia wiatroizolacyjna
5. 2 x papa termozgrzewalna, ciężar  $2 \times 0,05 \text{ kN/m}^2$

Obciążenie	Obciążenie charakterystyczne k [kN/m²]	$\gamma_F$		Obciążenie obliczeniowe d [kN/m²]	
		>1	≤ 1	>1	≤ 1
Stałe g					
blacha trapezowa Pruszyński T35 0,70 mm	0,063	1,35	1,0	0,09	0,063
płyta z wełny mineralnej Rockwool Dachrock Max 200 mm	0,30	1,35	1,0	0,41	0,30
2 x papa termozgrzewalna	0,10	1,35	1,0	0,14	0,10
razem	0,47	-	-	0,64	0,47
Zmienne q					
śnieg	0,72	1,5	0	1,08	0
wiatr (ssanie)	-1,02	1,5	0	-1,53	0

Maksymalne obciążenie

obliczeniowe (SGN):  $q_d = 0,64 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} + 1,08 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 1,72 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$

charakterystyczne (SGU):  $q_k = 0,47 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} + 0,72 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 1,19 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$

Przyjęto blachę trapezową Pruszyński T35 o grubości 0,70 mm układaną na pozytyw w układzie trójpłaszczyznowym.

dopuszczalne obciążenie SGN przy rozpiętości 1,75 m:  $3,73 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} > 1,72 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$

dopuszczalne obciążenie SGU przy rozpiętości 1,75 m:  $2,06 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} > 1,19 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$



### 3.2. Obudowa ścian

Założono kasety ściennie Pruszyński 500/120 o szerokości 500 mm, wysokości profilu 120 mm i grubości blachy 1,00 mm w układzie jednoprzęsłowym o ciężarze  $0,129 \text{ kN/m}^2$

Przyjęto układ warstw pokrycia ścian:

1. Kasetka ścienna Pruszyński 500/120, ciężar  $0,129 \text{ kN/m}^2$
2. Wełna mineralna wypełniająca Rockwool Stalrock 120 mm, ciężar  $0,0312 \text{ kN/m}^2$
3. Folia wiatroizolacyjna
4. Blacha trapezowa elewacyjna ArcelorMittal ACP 32/207 gr. 0,63 mm, ciężar  $0,057 \text{ kN/m}^2$

Obciążenie	Obciążenie charakterystyczne k [kN/m <sup>2</sup> ]	$\gamma_F$		Obciążenie obliczeniowe d [kN/m <sup>2</sup> ]	
		>1	≤ 1	>1	≤ 1
Zmienne q					
wiatr (ssanie)	0,716	1,5	0	1,07	0
wiatr (parcie)	0,442	1,5	0	0,66	0

Maksymalne obciążenie

obliczeniowe (SGN- parcie):  $q_d = 0,66 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$

obliczeniowe (SGN- ssanie):  $q_d = 1,07 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$

charakterystyczne (SGU- parcie):  $q_k = 0,44 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$

charakterystyczne (SGU- ssanie):  $q_k = 0,72 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$

Przyjęto kasety ściennie Pruszyński 500/120 o szerokości 500 mm, wysokości profilu 120 mm i grubości blachy 1,00 mm w układzie jednoprzęsłowym.

dopuszczalne obciążenie SGN- parcie przy rozpiętości 6 m:  $1,28 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} > 0,66 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$

dopuszczalne obciążenie SGN- ssanie przy rozpiętości 6 m:  $1,59 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} > 1,07 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$

dopuszczalne obciążenie SGU- parcie przy rozpiętości 6 m:  $0,84 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} > 0,44 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$

dopuszczalne obciążenie SGU- ssanie przy rozpiętości 6 m:  $0,88 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} > 0,72 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$

### 3.3. Płatwie

Obciążenie	Obciążenie charakterystyczne k [kN/m <sup>2</sup> ]	$\gamma_F$		Obciążenie obliczeniowe d [kN/m <sup>2</sup> ]	
		>1	≤ 1	>1	≤ 1
Stałe g					
blacha trapezowa Pruszyński T35 0,70 mm	0,063	1,35	1,0	0,09	0,063
plyta z wełny mineralnej Rockwool Dachrock Max 200 mm	0,30	1,35	1,0	0,41	0,30
2 x papa termozgrzewalna	0,10	1,35	1,0	0,14	0,10
razem	0,47	-	-	0,64	0,47
Zmienne q					
śnieg	0,72	1,5	0	1,08	0
wiatr (ssanie)	-1,02	1,5	0	-1,53	0

Maksymalne obciążenie

obliczeniowe (SGN):  $q_d = 0,64 \frac{kN}{m^2} + 1,08 \frac{kN}{m^2} = 1,72 \frac{kN}{m^2}$

charakterystyczne (SGU):  $q_k = 0,47 \frac{kN}{m^2} + 0,72 \frac{kN}{m^2} = 1,19 \frac{kN}{m^2}$

Przyjęto płatwie zetowe zimnogięte Pruszyński BP/Z250x68/60x2,50 w układzie dwuprzęsłowym:

ciężar:  $8,54 \text{ kg/m} = 0,085 \text{ kN/m}$

rozpiętość: 6 m

rozstaw: 1,75 m

wysokość profilu: 250 mm

szerokość półki dolnej: 60 mm

szerokość półki górnej: 68 mm

grubość: 2,50 mm

stal: S350

dopuszczalne obciążenie SGN przy rozstawie 1,75 m:  $2,27 \frac{kN}{m^2} > 1,72 \frac{kN}{m^2}$

dopuszczalne obciążenie SGU przy rozpiętości 1,75 m:  $4,55 \frac{kN}{m^2} > 1,19 \frac{kN}{m^2}$

#### 4. Wstępny dobór przekroju poprzecznego hali

##### Wstępne przyjęcie przekroju poprzecznego rygla dachowego

Przyjęto stal S235

$$h_w = 700 \text{ mm}$$

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

$$b_f = 140 \text{ mm}$$

$$t_f = 24 \text{ mm}$$

$$\text{Ciężar } g = (0,7 \text{ m} * 0,006 \text{ m} + 2 * 0,14 \text{ m} * 0,024 \text{ m}) * 77 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} = 0,84 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Zestawienie obciążeń na rygiel dachowy

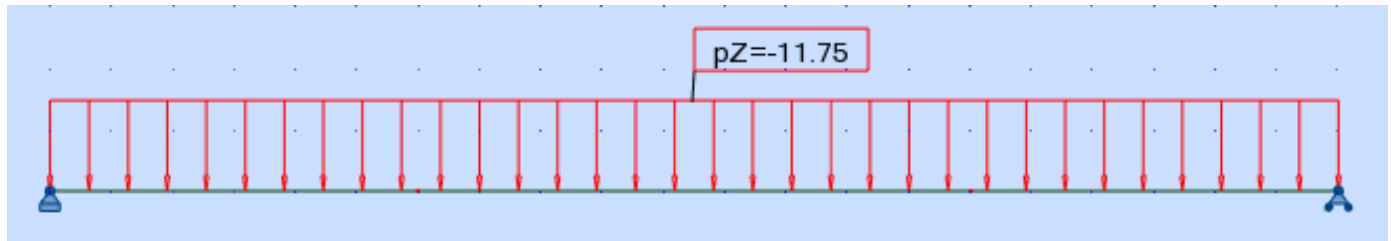
Obciążenie	Obciążenie charakterystyczne k [kN/m]	$\gamma_F$		Obciążenie obliczeniowe d [kN/m]	
		>1	$\leq 1$	>1	$\leq 1$
Stałe g					
rygiel blachownicowy	0,84	1,35	1,0	1,13	0,84
płatwie zimnogięte Pruszyński BP/Z250x68/60x2,5 $0,085 \frac{kN}{m} * 6 m$ $\frac{1}{1,75 m}$	0,29	1,35	1,0	0,39	0,29
blacha trapezowa Pruszyński T35 0,70 mm $0,063 \frac{kN}{m^2} * 6 m$	0,38	1,35	1,0	0,51	0,38
płyta z wełny mineralnej Rockwool Dachrock Max 200 mm $0,30 \frac{kN}{m^2} * 6 m$	1,80	1,35	1,0	2,43	1,80
2 x papa termozgrzewalna $0,10 \frac{kN}{m^2} * 6 m$	0,60	1,35	1,0	0,81	0,60
Razem	3,91	-	-	5,27	3,91
Zmienne q					
Śnieg $0,72 \frac{kN}{m^2} * 6 m$	4,32	1,5	0	6,48	0
wiatr (ssanie) $-1,02 \frac{kN}{m^2} * 6 m$	-6,12	1,5	0	-9,18	0

Maksymalne obciążenie

$$\text{obliczeniowe (SGN): } q_d = 5,27 \frac{\text{kN}}{\text{m}} + 6,48 \frac{\text{kN}}{\text{m}} = 11,75 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

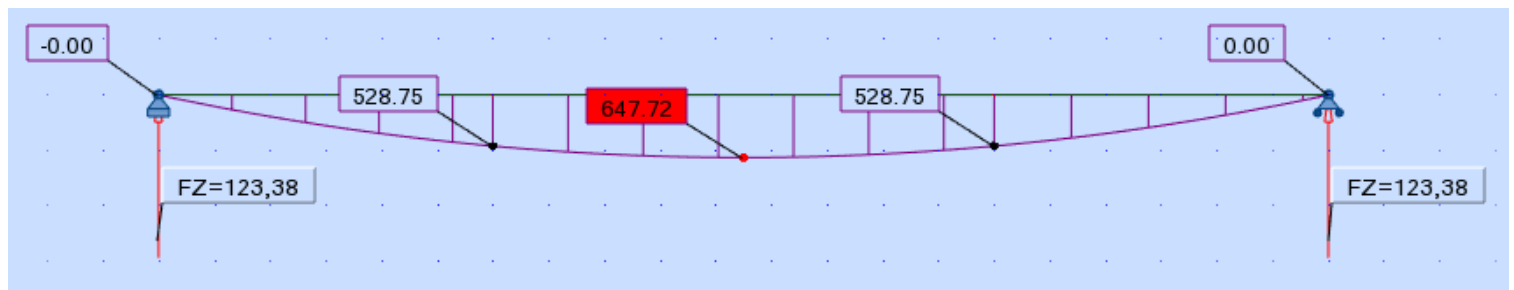
charakterystyczne (SGU):  $q_k = 3,91 \frac{kN}{m} + 4,32 \frac{kN}{m} = 8,23 \frac{kN}{m}$

Schemat I



Długość belki = rozpiętość ramy = 21 m

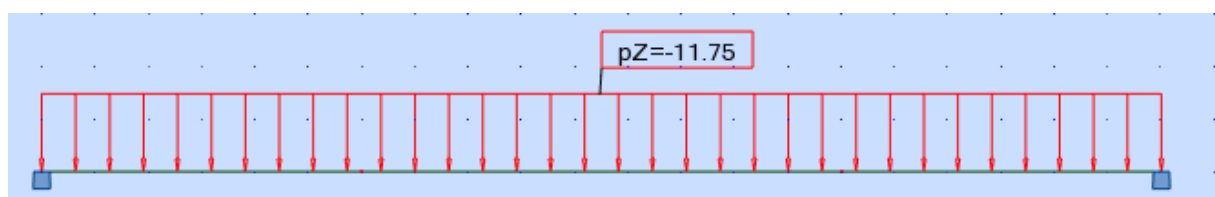
Wykres momentów zginających [kNm]



$M_1^I$  (w połowie rozpiętości) = 647,72 kNm

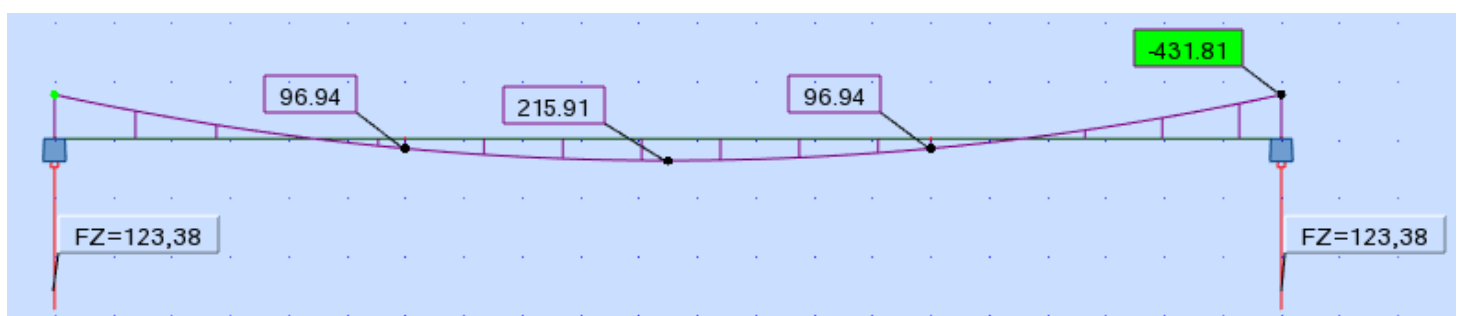
$M_2^I$  (6 m od podpory) = 528,75 kNm

Schemat II



Długość belki = rozpiętość ramy = 21 m

Wykres momentów zginających [kNm]



$$M_1^{II}(\text{w połowie rozpiętości}) = 215,91 \text{ kNm}$$

$$M_2^{II}(6 \text{ m od podpory}) = 96,94 \text{ kNm}$$

$$M_3^{II}(\text{nad podporą}) = 431,81 \text{ kNm}$$

$$M_1 = M_1^{II} + \frac{M_1^I - M_1^{II}}{2} = 215,91 \text{ kNm} + \frac{647,72 \text{ kNm} - 215,91 \text{ kNm}}{2} = 431,82 \text{ kNm}$$

$$W_{1,pot} = \frac{M_1}{f_y} = \frac{431,82 \text{ kNm}}{235000 \text{ kPa}} = 0,001838 \text{ m}^3$$

$$M_2 = M_2^{II} + \frac{M_2^I - M_2^{II}}{2} = 96,94 \text{ kNm} + \frac{528,75 \text{ kNm} - 96,94 \text{ kNm}}{2} = 312,85 \text{ kNm}$$

$$W_{2,pot} = \frac{M_2}{f_y} = \frac{312,85 \text{ kNm}}{235000 \text{ kPa}} = 0,001331 \text{ m}^3$$

$$M_3 = 0,9 * M_3^{II} = 0,9 * 431,81 \text{ kNm} = 388,63 \text{ kNm}$$

$$W_{3,pot} = \frac{M_3}{f_y} = \frac{388,63 \text{ kNm}}{235000 \text{ kPa}} = 0,001654 \text{ m}^3$$

Przyjęto rygiel o zmiennej grubości pasów

Przekrój 1

$$W_{1,pot} = 0,001838 \text{ m}^3$$

$$h_w = 600 \text{ mm}$$

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

$$b_f = 140 \text{ mm}$$

$$t_f = 24 \text{ mm}$$

$$W_1 = 0,002353 \text{ m}^3 > W_{1,pot} = 0,001838 \text{ m}^3$$

$$\frac{c}{t} = \frac{h_w}{t_w} = \frac{600 \text{ mm}}{6 \text{ mm}} = 100 < 124\varepsilon - \text{klasa 3}$$

$$\frac{c}{t} = \frac{\frac{b_f - t_w}{2}}{t_f} = \frac{\frac{140 \text{ mm} - 6 \text{ mm}}{2}}{24 \text{ mm}} \approx 3 < 9\varepsilon - \text{klasa 1}$$

Przekrój jest klasy 3

Przekrój 2

$$W_{2,pot} = 0,001331 \text{ m}^3$$

$$h_w = 600 \text{ mm}$$

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

$$b_f = 140 \text{ mm}$$

$$t_f = 16 \text{ mm}$$

$$W_2 = 0,001687 \text{ m}^3 > W_{2,pot} = 0,001331 \text{ m}^3$$

$$\frac{c}{t} = \frac{h_w}{t_w} = \frac{600 \text{ mm}}{6 \text{ mm}} = 100 < 124\varepsilon - \text{klasa 3}$$

$$\frac{c}{t} = \frac{\frac{b_f - t_w}{2}}{t_f} = \frac{\frac{140 \text{ mm} - 6 \text{ mm}}{2}}{16 \text{ mm}} \approx 4 < 9\varepsilon - \text{klasa 1}$$

Przekrój jest klasy 3

Przekrój 3

$$W_{3,pot} = 0,001654 \text{ m}^3$$

$$h_w = 600 \text{ mm}$$

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

$$b_f = 140 \text{ mm}$$

$$t_f = 20 \text{ mm}$$

$$W_3 = 0,002020 \text{ m}^3 > W_{3,pot} = 0,001654 \text{ m}^3$$

$$\frac{c}{t} = \frac{h_w}{t_w} = \frac{600 \text{ mm}}{6 \text{ mm}} = 100 < 124\varepsilon - \text{klasa 3}$$

$$\frac{c}{t} = \frac{\frac{b_f - t_w}{2}}{t_f} = \frac{\frac{140 \text{ mm} - 6 \text{ mm}}{2}}{20 \text{ mm}} \approx 3 < 9\varepsilon - \text{klasa 1}$$

Przekrój jest klasy 3

### Wstępne przyjęcie przekroju poprzecznego słupa

Przyjęto stal S235

$$h_w = 700 \text{ mm}$$

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

$$b_f = 140 \text{ mm}$$

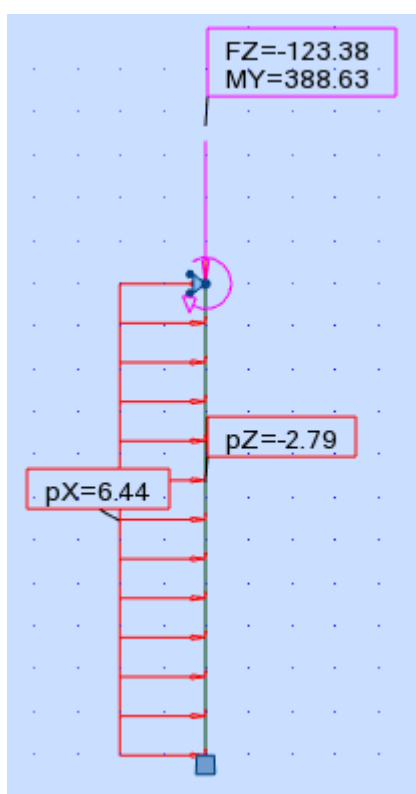
$$t_f = 20 \text{ mm}$$

$$\text{Ciężar } g = (0,7 \text{ m} * 0,006 \text{ m} + 2 * 0,14 \text{ m} * 0,020 \text{ m}) * 77 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} = 0,76 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Zestawienie obciążeń na słup

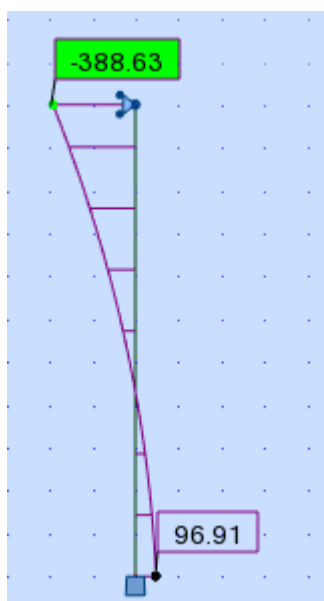
Obciążenie	Obciążenie obliczeniowe
ciężar własny słupa $0,76 \frac{\text{kN}}{\text{m}} * 1,35$	1,03 kN/m
ciężar obudowy ścian $\left(0,129 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} + 0,0312 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} + 0,057 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}\right) * 6 \text{ m} * 1,35$	1,76 kN/m
razem	2,79 kN/m
wiatr (ssanie) $0,716 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * 6 \text{ m} * 1,5$	6,44 kN/m
reakcja z rygla	123,38 kN
moment z rygla	388,63 kNm

Schemat I

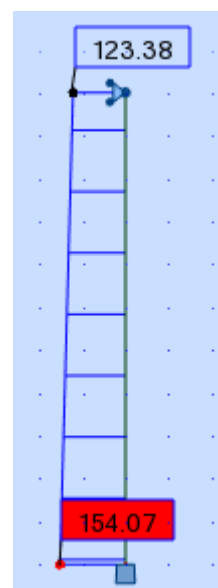


Wysokość słupa = 11 m

Wykres momentów zginających [kNm]



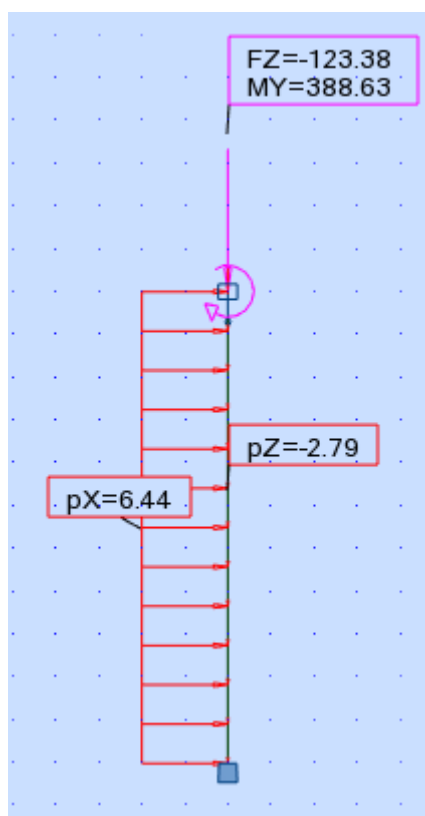
Wykres sił osiowych [kN]



$$M_{\max} = 388,63 \text{ kNm}$$

$$N_{\max} = 154,07 \text{ kN}$$

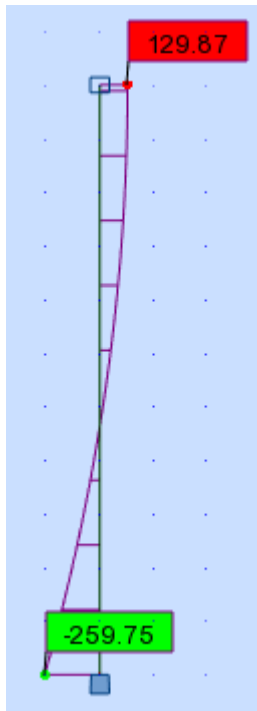
Schemat II



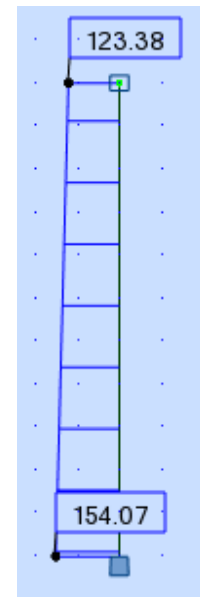
Wysokość słupa = 11 m



Wykres momentów zginających [kNm]



Wykres sił osiowych [kN]



$$M_{\max} = 259,75 \text{ kNm}$$

$$N_{\max} = 154,07 \text{ kN}$$

$$W_{\text{pot}} = \frac{M_{\max}}{f_y} = \frac{388,63 \text{ kNm}}{235000 \text{ kPa}} = 0,001654 \text{ m}^3$$

Przyjęto przekrój

$$W_{\text{pot}} = 0,001654 \text{ m}^3$$

$$h_w = 600 \text{ mm}$$

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

$$b_f = 140 \text{ mm}$$

$$t_f = 20 \text{ mm}$$

$$W = 0,002020 \text{ m}^3 > W_{\text{pot}} = 0,001654 \text{ m}^3$$

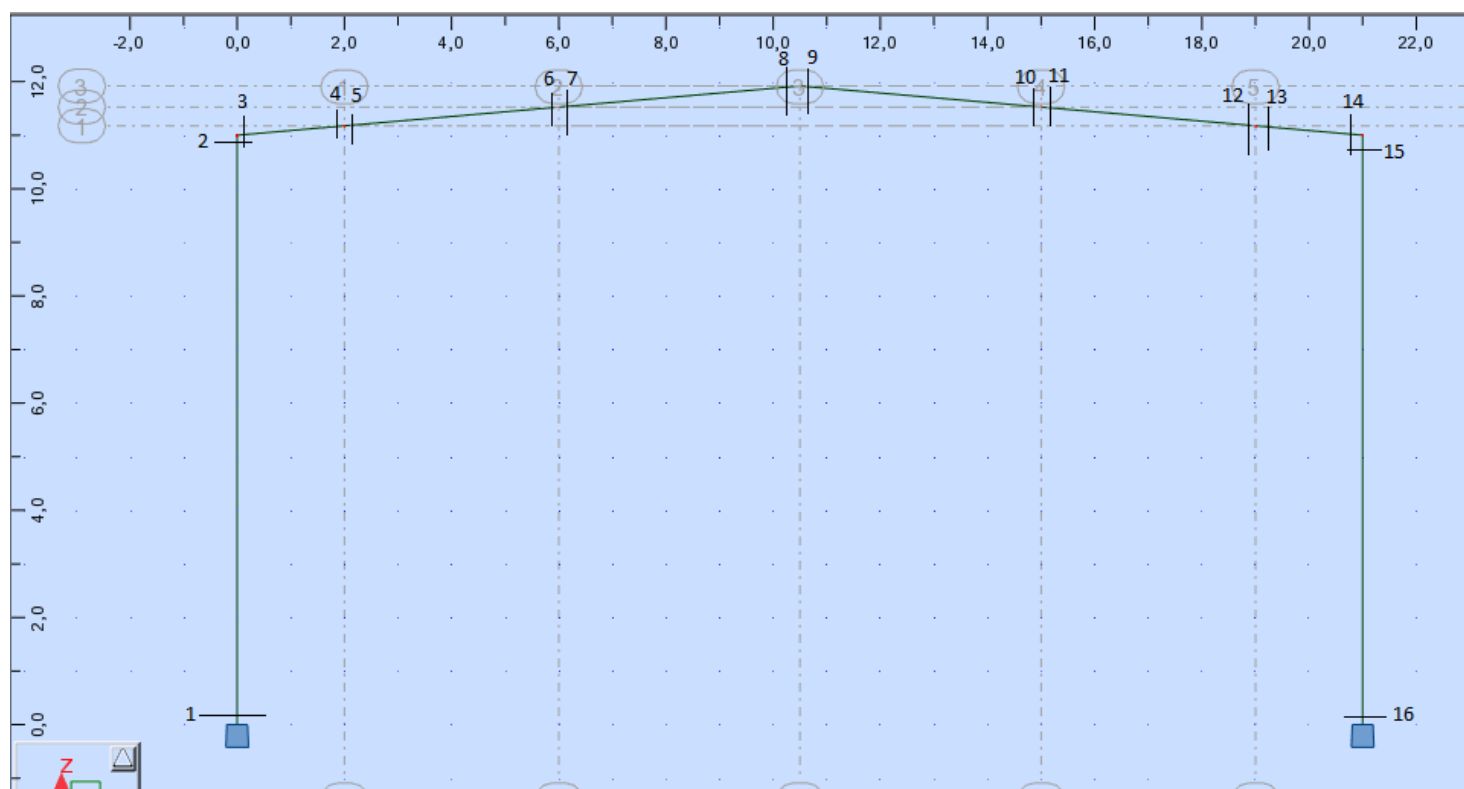
$$\frac{c}{t} = \frac{h_w}{t_w} = \frac{600 \text{ mm}}{6 \text{ mm}} = 100 < 124\varepsilon - \text{klasa 3}$$

$$\frac{c}{t} = \frac{\frac{b_f - t_w}{2}}{t_f} = \frac{\frac{140 \text{ mm} - 6 \text{ mm}}{2}}{20 \text{ mm}} \approx 3 < 9\varepsilon - \text{klasa 1}$$

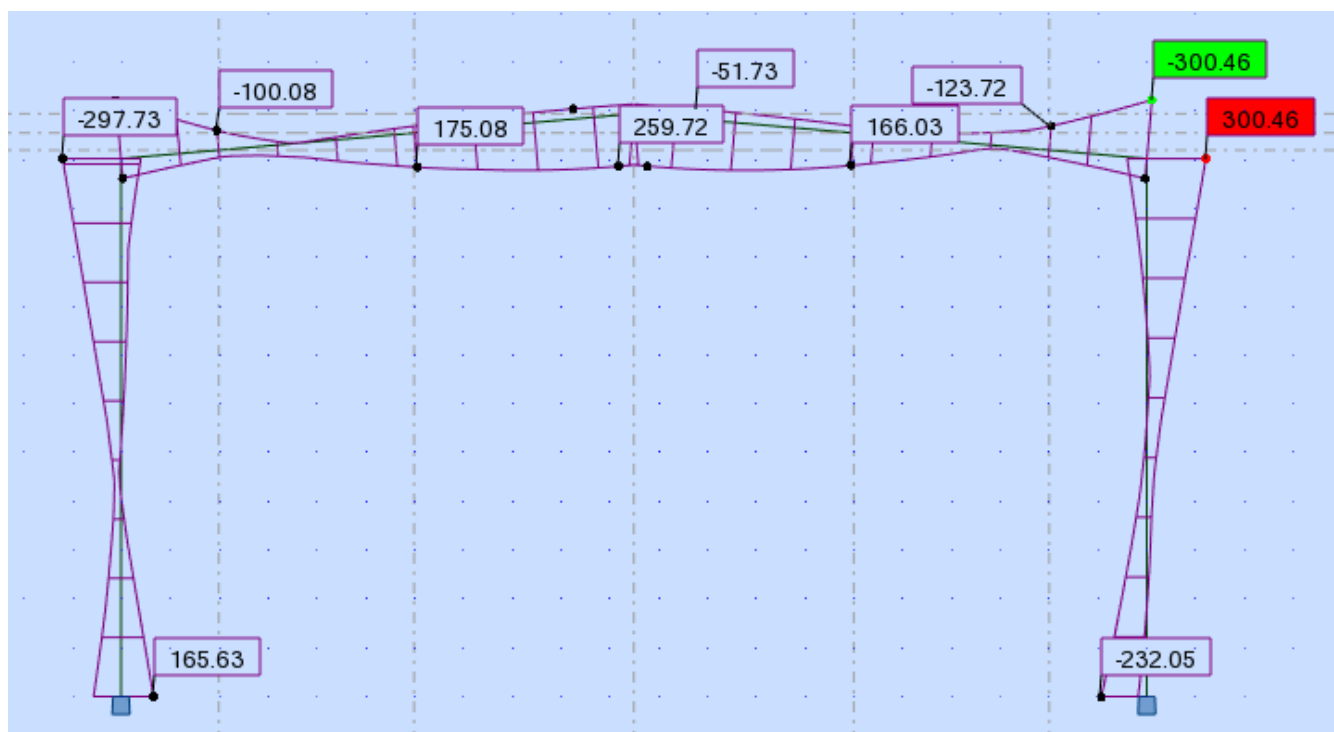
Przekrój jest klasy 3

$$W = 0,002020 \text{ m}^3 > W_{\text{pot}} = 0,001654 \text{ m}^3$$

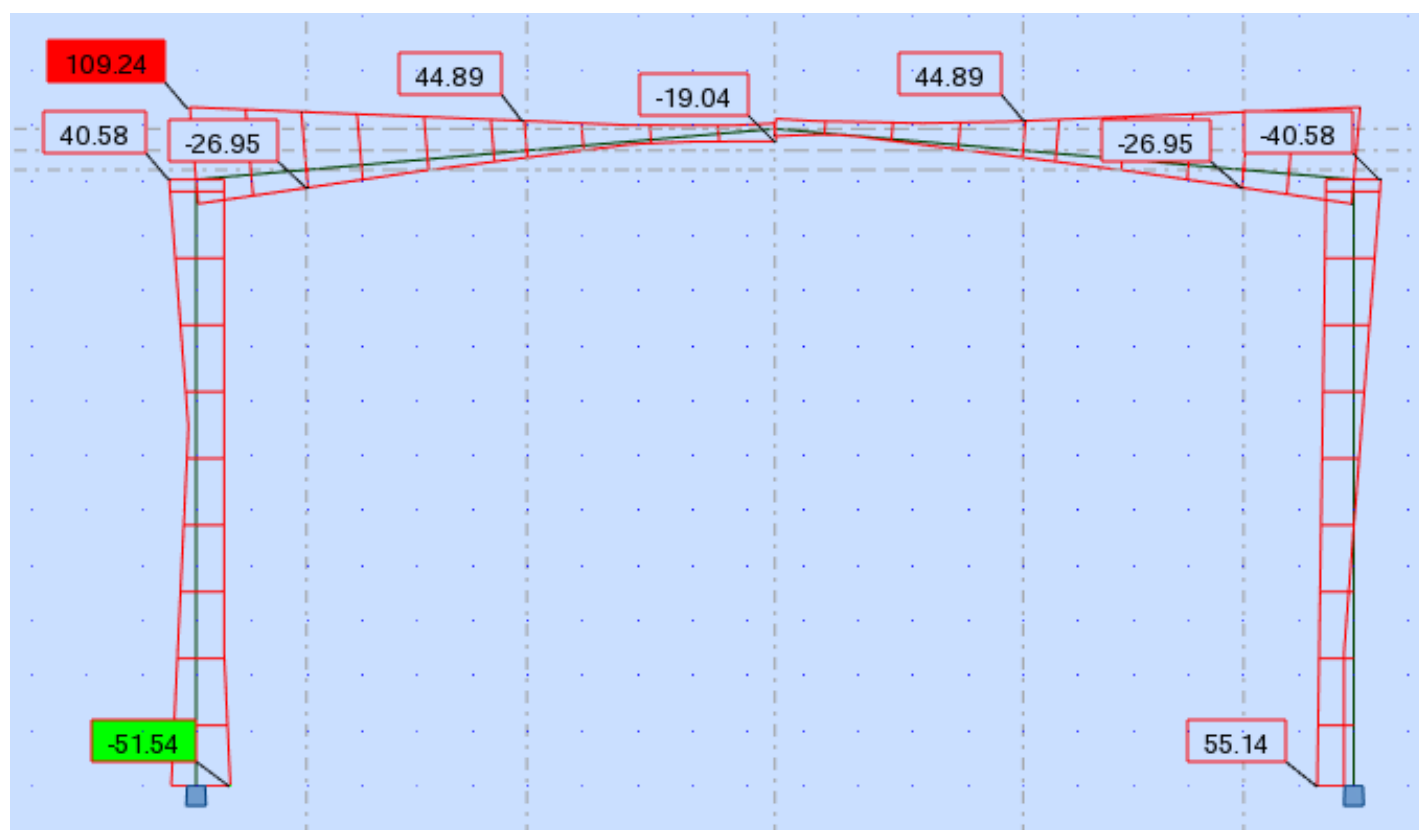
## 5. Wymiarowanie układu poprzecznego hali



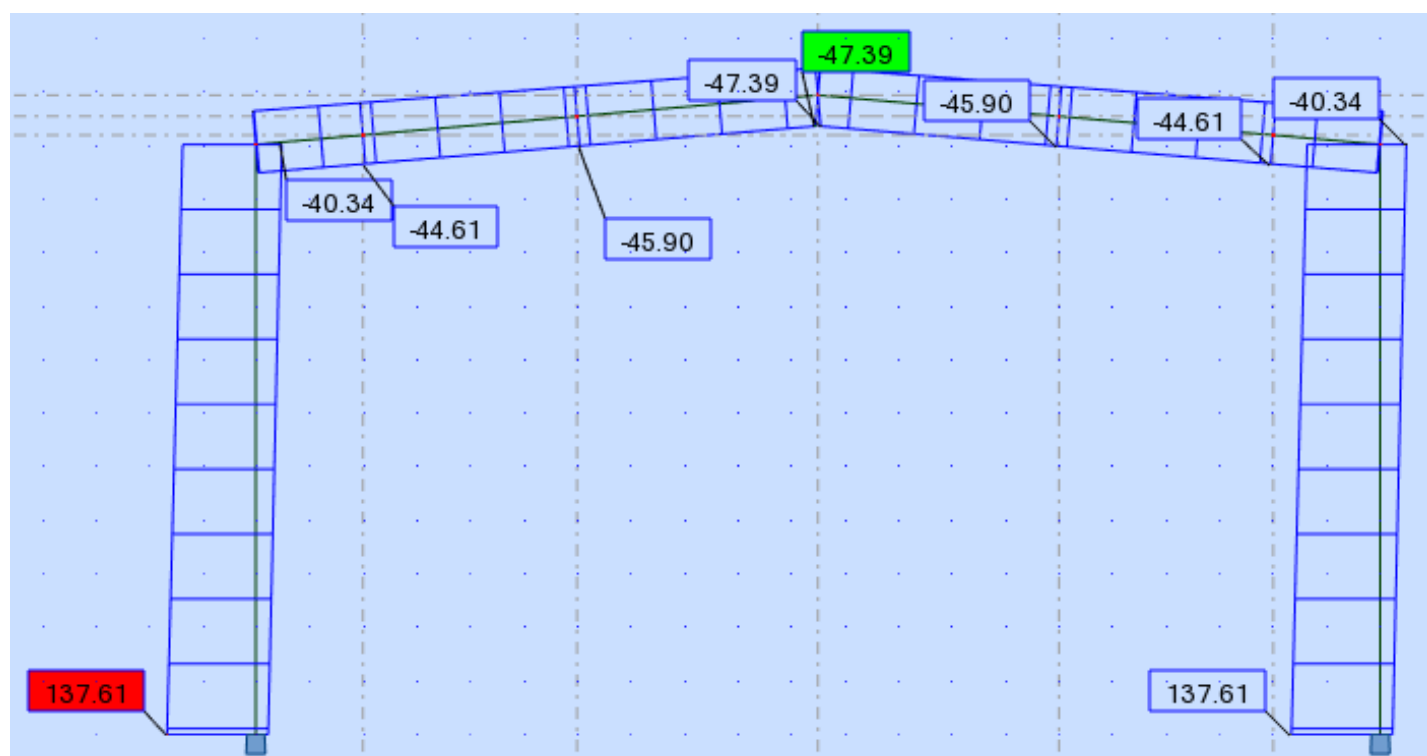
Obwiednia momentów zginających [kNm]



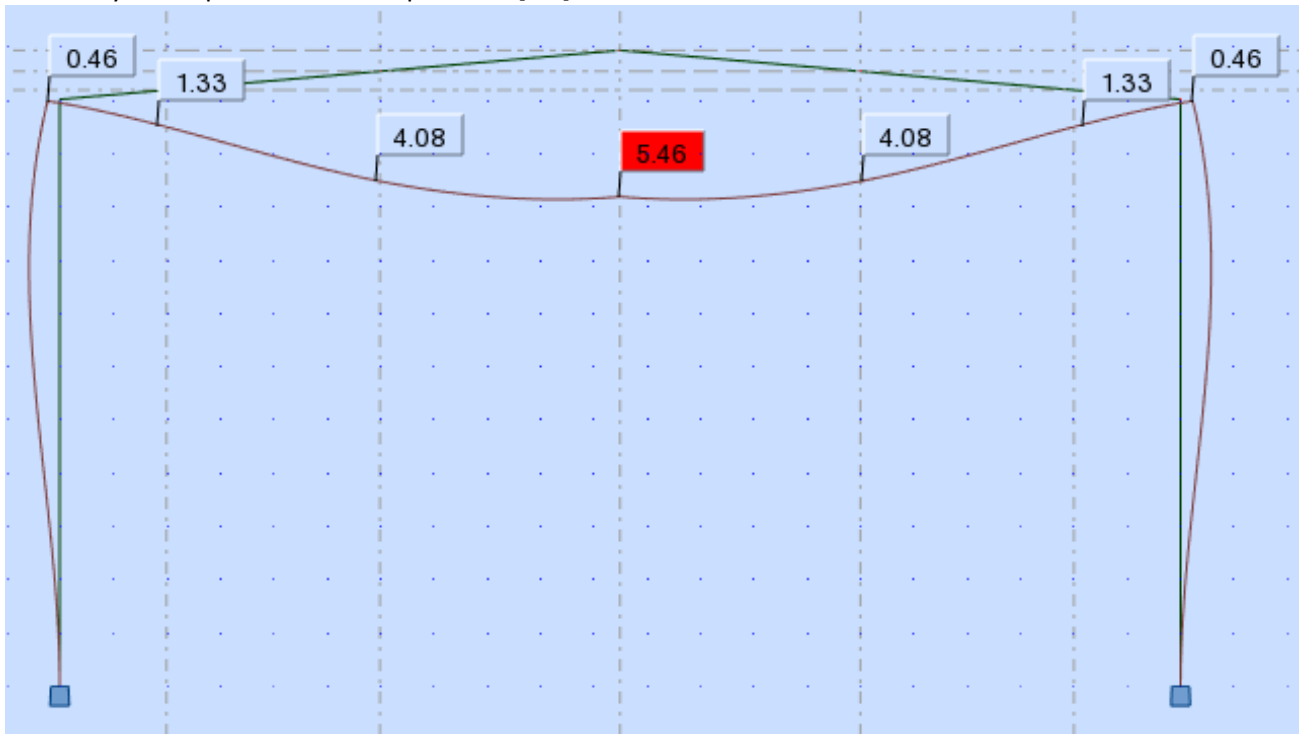
Obwiednia sił tnących [kN]



Obwiednia sił osiowych [kN]



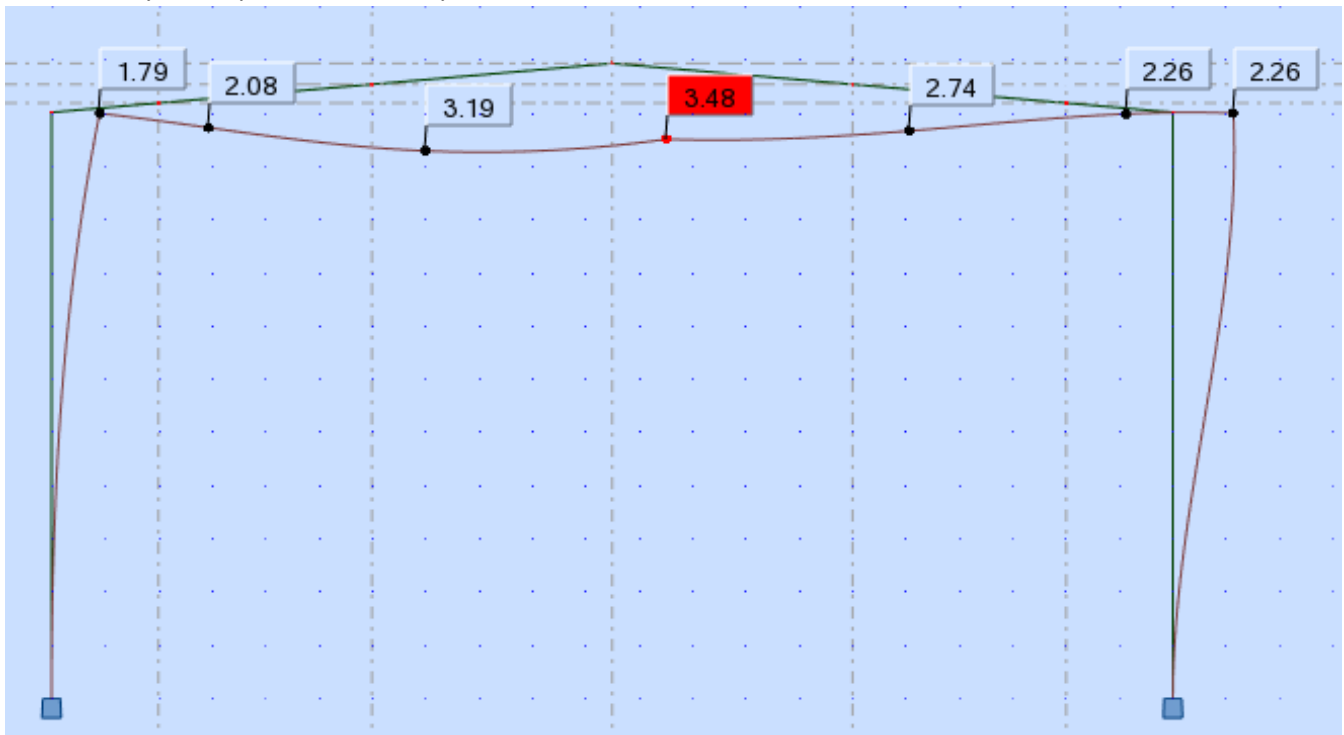
Maksymalne przemieszczenie pionowe [cm]



$$w = 5,46 \text{ cm} < w_{dop} = \frac{L}{350} = \frac{2100 \text{ cm}}{350} = 6 \text{ cm}$$

Warunek spełniony

Maksymalne przemieszczenie poziome [cm]



$$w = 2,26 \text{ cm} < w_{dop} = \frac{h}{150} = \frac{1100 \text{ cm}}{150} = 7,33 \text{ cm}$$

Warunek spełniony

### Kombinacje obciążeń (PN-EN 1990)

6.10a

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} \Psi_{0,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \Psi_{0,i} Q_{k,i}$$

$$\max \gamma_{G,j} = 1,35$$

$$\min \gamma_{G,j} = 1,0$$

6.10b

$$\sum_{j \geq 1} \xi_j \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \Psi_{0,i} Q_{k,i}$$

$$\max \xi_j \gamma_{G,j} = 1,15$$

$$\min \xi_j \gamma_{G,j} = 1,0$$

$$\gamma_Q = 1,5$$

$$\text{śnieg } \Psi_0 = 0,5$$

$$\text{wiatr } \Psi_0 = 0,6$$

		Ciężar własny	Śnieg 1	Śnieg 2	Wiatr 1	Wiatr 2	Wiatr 3	6.10a	6.10b
1	M	57,72	66,26	46,28	-126,33	-131,9	-8,79	127,62	165,77
	N <sub>max</sub>	60,63	45,36	40,02	-8,75	-28,24	-53,21	115,87	137,76
	N <sub>min</sub>	60,63	45,36	40,02	-8,75	-28,24	-53,21	12,74	-19,19
	V	-14,68	-16,85	-12,64	31,62	34,77	-10,46	-38,73	-48,43
2	M	-103,75	-119,12	-92,75	61,26	90,27	136,33	- 229,40	-297,99
	N <sub>max</sub>	39,48	45,36	40,02	-8,75	-28,24	-53,21	87,32	113,44
	N <sub>min</sub>	39,48	45,36	40,02	-8,75	-28,24	-53,21	-8,41	-40,34
	V	-14,68	-16,85	-12,64	2,47	5,62	36,84	-32,46	-42,16
3	M	-103,75	-119,12	-92,75	61,26	90,27	136,33	- 229,40	-297,99
	N <sub>max</sub>	18,07	20,74	16,08	-3,22	-8,06	-41,34	39,95	51,89
	N <sub>min</sub>	18,07	20,74	16,08	-3,22	-8,06	-41,34	-19,14	-43,94
	V	38,05	43,72	38,76	-8,5	-27,64	-49,8	84,16	109,34
4	M	-34,94	-39,98	-23,57	44,19	42,91	47,91	-77,15	-100,15
	N <sub>max</sub>	17,4	19,99	15,33	-3,22	-8,06	-41,34	38,48	50,00
	N <sub>min</sub>	17,4	19,99	15,33	-3,22	-8,06	-41,34	-19,81	-44,61
	V	30,5	35,11	30,15	-8,5	-20,52	-38,29	67,51	87,74
5	M	-34,94	-39,98	-23,57	44,19	42,91	47,91	-77,15	-100,15
	N <sub>max</sub>	17,4	19,99	15,33	-3,22	-8,06	-41,34	38,48	50,00
	N <sub>min</sub>	17,4	19,99	15,33	-3,22	-8,06	-41,34	-19,81	-44,61
	V	30,5	35,11	30,15	-8,5	-20,52	-38,29	67,51	87,74
6	M	57,83	66,44	62,94	10,06	-22,14	-61,81	136,95	175,22
	N <sub>max</sub>	16,11	18,48	13,82	-3,22	-8,06	-41,34	35,61	46,25
	N <sub>min</sub>	16,11	18,48	13,82	-3,22	-8,06	-41,34	-21,10	-45,90
	V	15,73	17,9	12,94	-8,5	-11,88	-17,43	34,66	44,94
7	M	57,83	66,44	62,94	10,06	-22,14	-61,81	136,95	175,22
	N <sub>max</sub>	16,11	18,48	13,82	-3,22	-8,06	-41,34	35,61	46,25
	N <sub>min</sub>	16,11	18,48	13,82	-3,22	-8,06	-41,34	-21,10	-45,90
	V	15,73	17,9	12,94	-8,5	-11,88	-17,43	34,66	44,94
8	M	90,46	103,54	77,66	-28,33	-53,88	-93,02	199,78	259,34
	N <sub>max</sub>	14,63	16,79	12,13	-3,22	-8,06	-41,34	32,34	42,01
	N <sub>min</sub>	14,63	16,79	12,13	-3,22	-8,06	-41,34	-22,58	-47,38
	V	-1,28	-1,47	-6,43	-8,5	-2,17	3,62	-6,55	-11,12
9	M	90,46	103,54	77,66	-28,33	-53,88	-93,02	199,78	259,34
	N <sub>max</sub>	14,63	16,79	13,06	-1,7	-7,56	-41,34	32,34	42,01
	N <sub>min</sub>	14,63	16,79	13,06	-1,7	-7,56	-41,34	-22,58	-47,38
	V	-1,28	-1,47	4,22	8,93	3,54	3,62	-2,83	-3,68

10	M	57,83	66,44	36,71	-46,74	-47,94	-61,81	127,90	166,16
	N <sub>max</sub>	16,11	18,48	13,91	-1,7	-7,56	-41,34	35,61	46,25
	N <sub>min</sub>	16,11	18,48	13,91	-1,7	-7,56	-41,34	-21,10	-45,90
	V	15,73	17,9	13,91	-0,78	-6,17	-17,43	34,66	44,94
11	M	57,83	66,44	36,71	-46,74	-47,94	-61,81	127,90	166,16
	N <sub>max</sub>	16,11	18,48	13,9	-1,7	-7,56	-41,34	35,61	46,25
	N <sub>min</sub>	16,11	18,48	13,9	-1,7	-7,56	-41,34	-21,10	-45,90
	V	15,73	17,9	13,91	-0,78	-6,17	-17,43	34,66	44,94
12	M	-34,94	-39,98	-36,41	-26,27	-5,82	47,91	- 100,80	-123,79
	N <sub>max</sub>	17,4	19,99	14,66	-1,7	-7,56	-41,34	38,48	50,00
	N <sub>min</sub>	17,4	19,99	14,66	-1,7	-7,56	-41,34	-19,81	-44,61
	V	30,5	35,11	22,51	-9,41	-14,81	-38,29	67,51	87,74
13	M	-34,94	-39,98	-36,41	-26,27	-5,82	47,91	- 100,80	-123,79
	N <sub>max</sub>	17,4	19,99	14,66	-1,7	-7,56	-41,34	38,48	50,00
	N <sub>min</sub>	17,4	19,99	14,66	-1,7	-7,56	-41,34	-19,81	-44,61
	V	30,5	35,11	22,51	-9,41	-14,81	-38,29	67,51	87,74
14	M	-103,75	-119,12	-85,92	-3,04	28,24	136,33	- 232,14	-300,73
	N <sub>max</sub>	18,07	20,74	15,03	-1,7	-7,56	-41,34	39,95	51,89
	N <sub>min</sub>	18,07	20,74	15,03	-1,7	-7,56	-41,34	-19,14	-43,94
	V	38,05	43,72	26,82	-13,73	-19,12	-49,8	84,16	109,34
15	M	103,75	119,12	85,92	3,04	-28,24	-136,33	232,14	300,73
	N <sub>max</sub>	39,48	45,36	28,02	-13,83	-19,71	-53,21	87,32	113,44
	N <sub>min</sub>	39,48	45,36	28,02	-13,83	-19,71	-53,21	-8,41	-40,34
	V	14,68	16,85	12,64	-0,49	-5,87	-36,84	32,46	42,16
16	M	-57,72	-66,26	-53,11	-73,8	-45,99	8,79	- 194,04	-232,19
	N <sub>max</sub>	60,63	45,36	28,02	-13,83	-19,71	-53,21	115,87	137,76
	N <sub>min</sub>	60,63	45,36	28,02	-13,83	-19,71	-53,21	12,74	-19,19
	V	14,68	16,85	12,64	14,47	9,09	10,46	45,48	55,18

### 5.1. Wymiarowanie blachownicy

Przyjęto następujące przekroje rygla dachowego

Lp	Odcinek	$h_w$ [mm]	$t_w$ [mm]	$b_f$ [mm]	$t_f$ [mm]	$W_y$ [m <sup>3</sup> ]	$M_{c,Rd}$ [kNm]
1	0 – 2 m	600	6	140	20	0,002020	474,70
2	2 m – 6 m	600	6	140	16	0,001687	396,45
3	6 m – 10,5 m	600	6	140	20	0,002020	474,70

#### Sprawdzenie SGN blachownicy

##### Przekrój 14

Siły wewnętrzne

$$M_{Ed} = 300,46 \text{ kNm}$$

$$V_{Ed} = 109,24 \text{ kN}$$

$$N_{Ed} = 51,89 \text{ kN}$$

Klasa przekroju

$$h_w = 600 \text{ mm}$$

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

$$b_f = 140 \text{ mm}$$

$$t_f = 20 \text{ mm}$$

$$\frac{c}{t} = \frac{h_w}{t_w} = \frac{600 \text{ mm}}{6 \text{ mm}} = 100 < 124\varepsilon - \text{klasa 3}$$

$$\frac{c}{t} = \frac{\frac{b_f - t_w}{2}}{t_f} = \frac{\frac{140 \text{ mm} - 6 \text{ mm}}{2}}{20 \text{ mm}} \approx 3 < 9\varepsilon - \text{klasa 1}$$

Przekrój jest klasy 3

Nośność przekroju przy ściskaniu i jednokierunkowym zginaniu (PN-EN 1993-1-5 4.6)

$$\begin{aligned} \eta_1 &= \frac{N_{Ed}}{\frac{f_y * A}{\gamma_{M0}}} + \frac{M_{Ed}}{\frac{f_y * W_y}{\gamma_{M0}}} \\ &= \frac{51,89 \text{ kN}}{\frac{235000 \text{ kPa} * (0,006 * 0,6 + 2 * 0,14 * 0,02) \text{ m}^2}{1,0}} \\ &\quad + \frac{300,46 \text{ kNm}}{\frac{235000 \text{ kPa} * 0,002020 \text{ m}^3}{1,0}} = 0,66 < 1,0 \end{aligned}$$

Warunek nośności spełniony



Nośność przekroju na ścinanie (PN-EN 1993-1-1 p. 6.2.6., PN-EN 1993-1-5 r. 5)

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{0,6 \text{ m}}{0,006 \text{ m}} = 100 > 72 \frac{\varepsilon}{\eta} = 72 * \frac{1}{1,2} = 60$$

Należy sprawdzić średnik na niestateczność przy ścinaniu

Nośność obliczeniowa przekroju blachownicy przy ścinaniu

$$V_{b,Rd} = V_{b_w,Rd} + V_{bf,Rd} \leq \frac{\eta * f_{yw} * t_w * h_w}{\sqrt{3} * \gamma_{M1}}$$

Udział średnika w nośności obliczeniowej

$$V_{b_w,Rd} = \chi_w * \frac{f_{yw} * t_w * h_w}{\sqrt{3} * \gamma_{M1}}$$

Względna smukłość płytowa

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{86,4 * t_w * \varepsilon} = \frac{0,6 \text{ m}}{86,4 * 0,006 \text{ m} * 1} = 1,16 > 1,08$$

Współczynnik niestateczności przy ścinaniu dla żebra podporowego podatnego

$$\chi_w = \frac{0,83}{\bar{\lambda}_w} = \frac{0,83}{1,16} = 0,72$$

$$V_{b_w,Rd} = \chi_w * \frac{f_{yw} * t_w * h_w}{\sqrt{3} * \gamma_{M1}} = 0,72 * \frac{235000 \text{ kPa} * 0,006 \text{ m} * 0,6 \text{ m}}{\sqrt{3} * 1} = 351,68 \text{ kN}$$

Pominięto udział pasów w przenoszeniu ścinania

$$V_{bf,Rd} = 0$$

$$V_{b,Rd} = V_{b_w,Rd} + V_{bf,Rd} = 351,68 \text{ kN} < \frac{\eta * f_{yw} * t_w * h_w}{\sqrt{3} * \gamma_{M1}} = \frac{1,2 * 235000 \text{ kPa} * 0,006 \text{ m} * 0,6 \text{ m}}{\sqrt{3} * 1} = 586,13 \text{ kN}$$

$$\eta_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{b,Rd}} = \frac{109,24 \text{ kN}}{351,68 \text{ kN}} = 0,31$$

Warunek nośności spełniony

Zginanie ze ścinaniem

$$\eta_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{b,Rd}} = \frac{109,24 \text{ kN}}{351,68 \text{ kN}} = 0,31 < 0,5$$

Wpływ ścinania na nośność przy zginaniu można pominąć

Stateczność pasa przy smukłym środkniku (PN-EN 1993-1-5 r.8)

$$\frac{h_w}{t_w} \leq k * \frac{E}{f_{yf}} \sqrt{\frac{A_w}{A_{fc}}}$$

$$k = 0,55$$

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{0,6 \text{ m}}{0,006 \text{ m}} = 100 < k * \frac{E}{f_{yf}} \sqrt{\frac{A_w}{A_{fc}}} = 0,55 * \frac{210000000 \text{ kPa}}{235000 \text{ kPa}} \sqrt{\frac{0,6 \text{ m} * 0,006 \text{ m}}{0,14 \text{ m} * 0,020 \text{ m}}} = 557,30$$

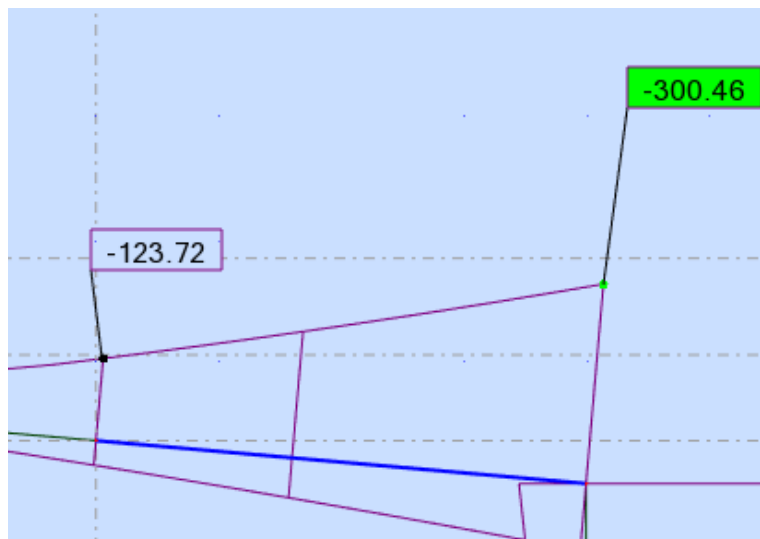
Warunek spełniony


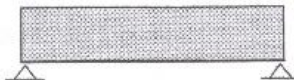
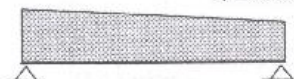
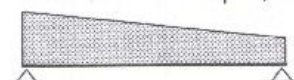


Nośność elementu na zwichrzenie (PN-EN 1991-1-1 p.6.3.2)

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1$$

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} * \frac{W_y * f_y}{\gamma_{M1}}$$

$$M_{cr} = C_1 * \frac{\pi^2 * E * I_z}{(k * l)^2} * \sqrt{\left(\frac{k}{k_\omega}\right)^2 \frac{I_\omega}{I_z} + \frac{(k * l)^2 * G * I_T}{\pi^2 * E * I_z}}$$



Warunki obciążenia i podparcia	Wykres momentów zginających	Wartość $k_z$	Wartości współczynników $C_i$	
			$C_1$	$C_3$
	$\psi=1,00$ 	1,0	1,000	1,000
		0,7	1,000	1,113
		0,5	1,000	1,144
	$\psi=0,75$ 	1,0	1,141	0,998
		0,7	1,270	1,565
		0,5	1,305	2,283
	$\psi=0,50$ 	1,0	1,323	0,992
		0,7	1,473	1,556
		0,5	1,514	2,271
	$\psi=0,25$ 	1,0	1,563	0,977
		0,7	1,739	1,531
		0,5	1,788	2,235
	$\psi=0$ 	1,0	1,879	0,939
		0,7	2,092	1,473
		0,5	2,150	2,150

$$\psi = \frac{M_1}{M_2} = \frac{123,72}{300,46} = 0,41$$

$$C_1 = 1,409$$

$$k = 1,0$$

$$k_\omega = 1,0$$

$$I_z = 0,000009158 \text{ m}^4$$

$$I_\omega = 0,0000008800 \text{ m}^6$$

$$I_t = 0,0000007250 \text{ m}^4$$

$$l = 5,25 \text{ m}$$

$$\begin{aligned}
 M_{cr} &= C_1 * \frac{\pi^2 * E * I_z}{(k * l)^2} * \sqrt{\left(\frac{k}{k_\omega}\right)^2 \frac{I_\omega}{I_z} + \frac{(k * l)^2 * G * I_T}{\pi^2 * E * I_z}} \\
 &= 1,409 * \frac{\pi^2 * 210000000 * 0,000009158}{(1 * 5,25)^2} \\
 &\quad * \sqrt{\left(\frac{1}{1}\right)^2 * \frac{0,0000008800}{0,000009158} + \frac{(1 * 5,25)^2 * 81000000 * 0,0000007250}{\pi^2 * 210000000 * 0,000009158}} \\
 &= 413,23 \text{ kNm}
 \end{aligned}$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y * f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{0,002020 * 235000}{413,23}} = 1,07$$

$$\phi_{LT} = 0,5 * [1 + \alpha_{LT} * (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta * \bar{\lambda}_{LT}^2]$$

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

$$\beta = 0,75$$

$$\frac{h}{b} = \frac{0,640}{0,140} = 4,57 > 2 \text{ - krzywa zwichrzenia d}$$

$$\alpha_{LT} = 0,76$$

$$\phi_{LT} = 0,5 * [1 + \alpha_{LT} * (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta * \bar{\lambda}_{LT}^2] = 0,5 * [1 + 0,76 * (1,07 - 0,4) + 0,75 * 1,07^2] = 1,18$$

$$\chi_{LT} = \min \left\{ \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \beta * \bar{\lambda}_{LT}^2}} \leq 1, \frac{1}{\bar{\lambda}_{LT}^2} \right.$$

$$\chi_{LT1} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \beta * \bar{\lambda}_{LT}^2}} = \frac{1}{1,18 + \sqrt{1,18^2 - 0,75 * 1,07^2}} = 0,52 < 1$$

$$\chi_{LT2} = \frac{1}{\bar{\lambda}_{LT}^2} = \frac{1}{1,07^2} = 0,87$$

$$\chi_{LT} = 0,52$$

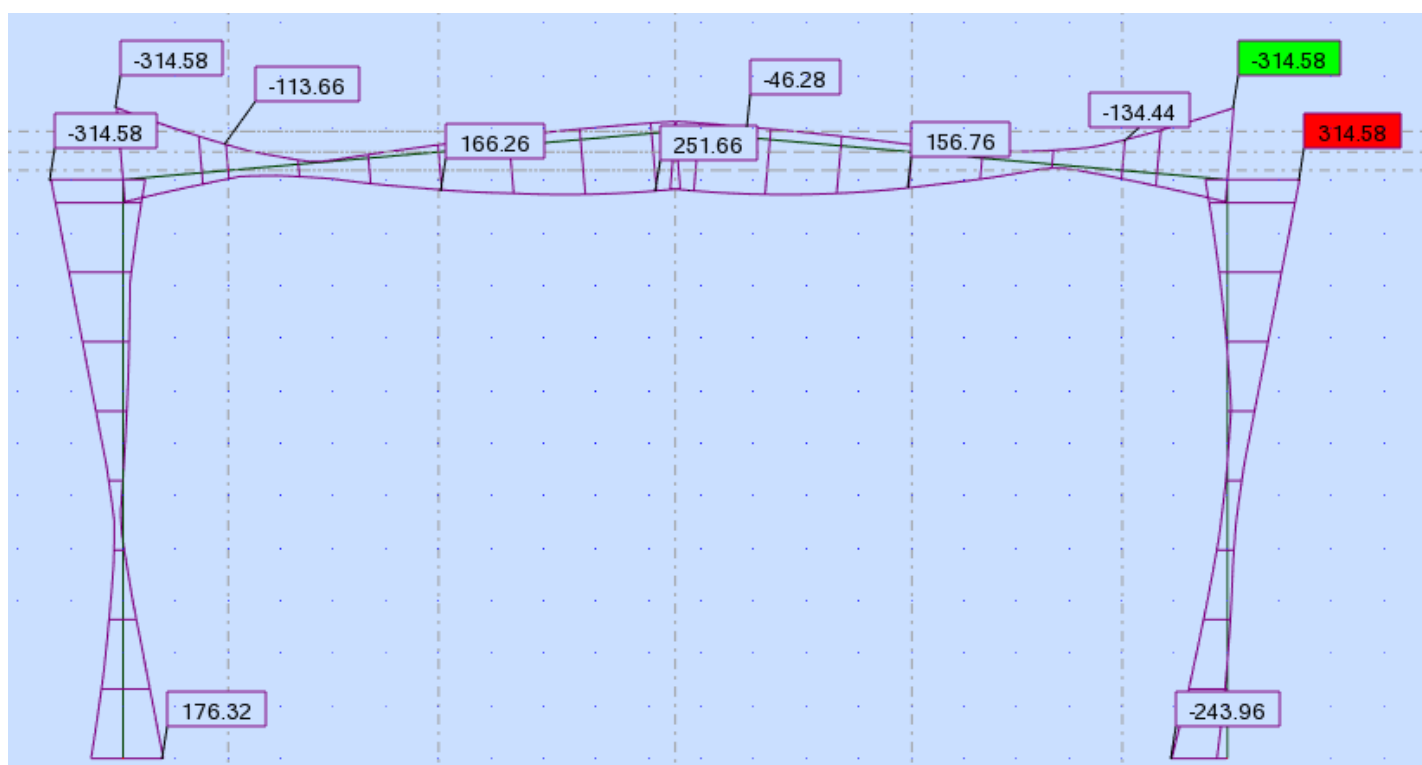
$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} * \frac{W_y * f_y}{\gamma_{M1}} = 0,52 * \frac{0,002020 * 235000}{1} = 246,84 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed} = M_{max} = 93,96 \text{ kNm}$$

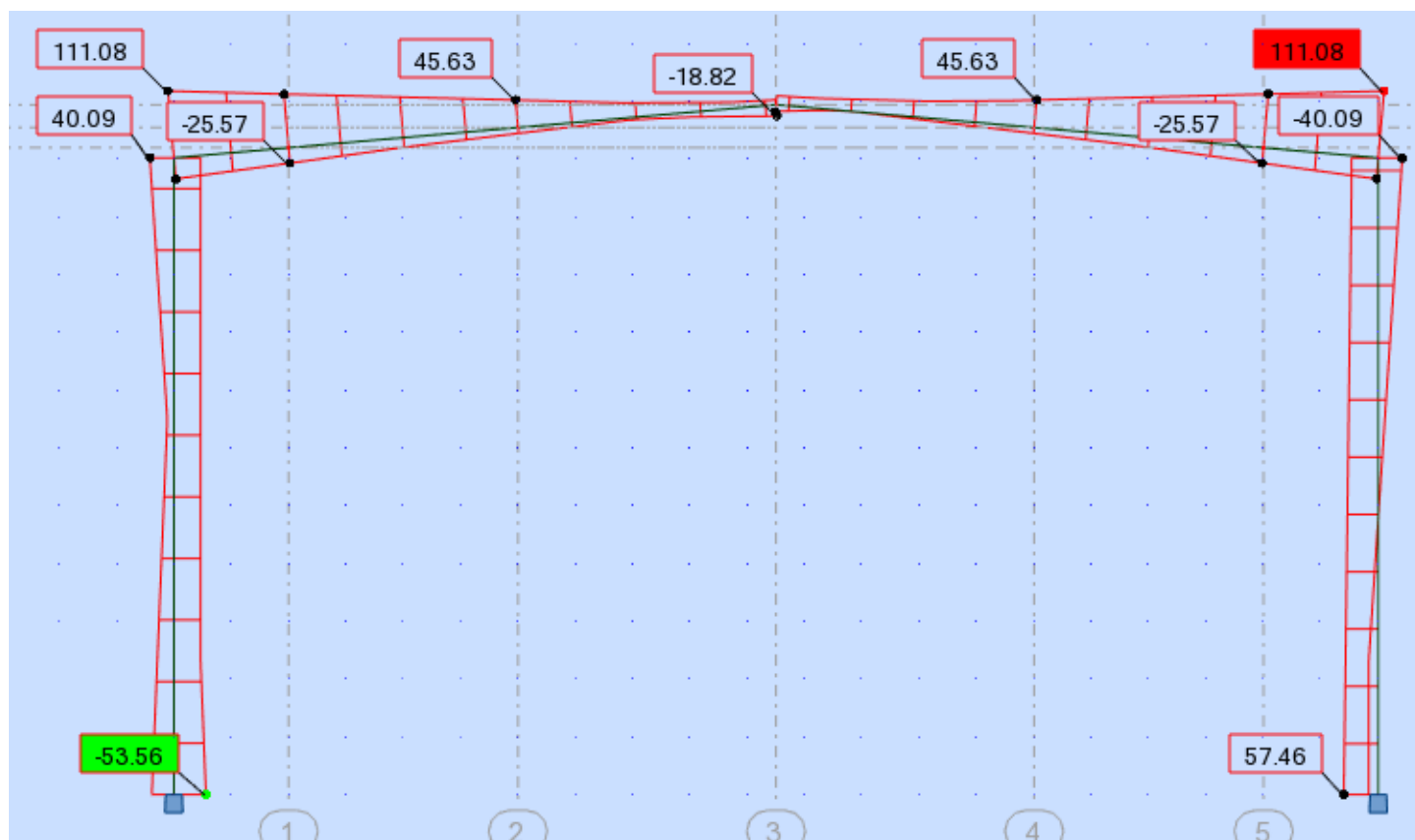
$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} = \frac{300,46}{246,84} = 1,22 > 1$$

**Nośność elementu jest niewystarczająca, zdecydowano o zwiększeniu szerokości pasów do 20 cm**

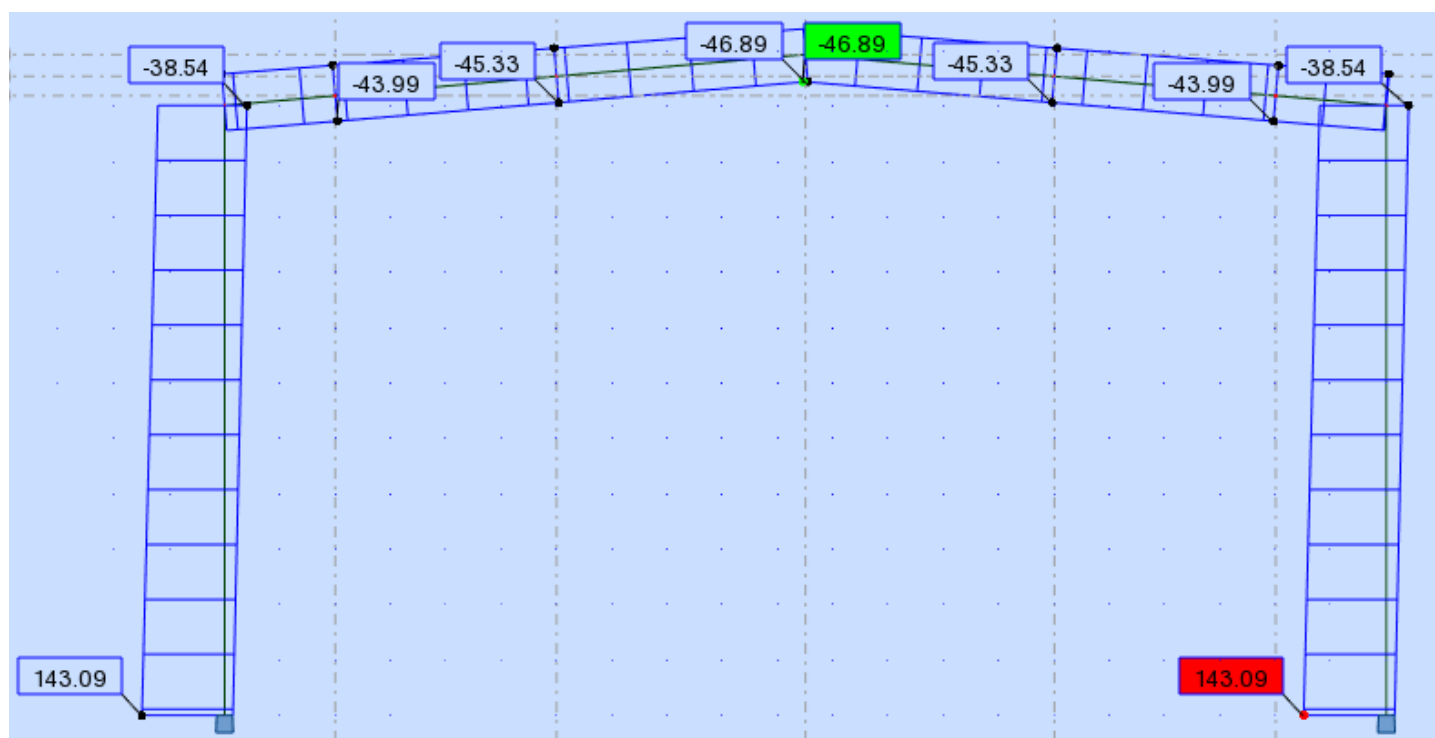
Obwiednia momentów zginających [kNm]



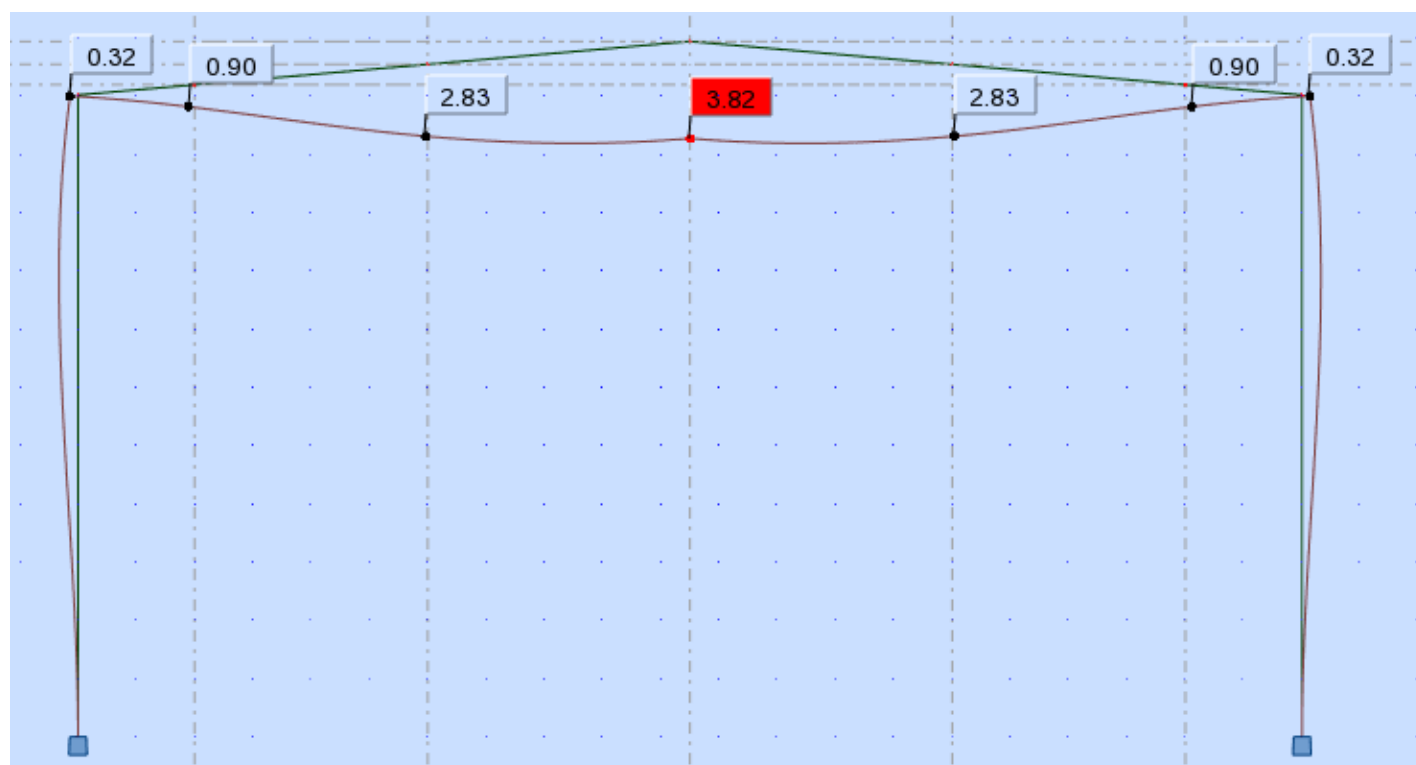
Obwiednia sił tnących [kN]



Obwiednia sił osiowych [kN]



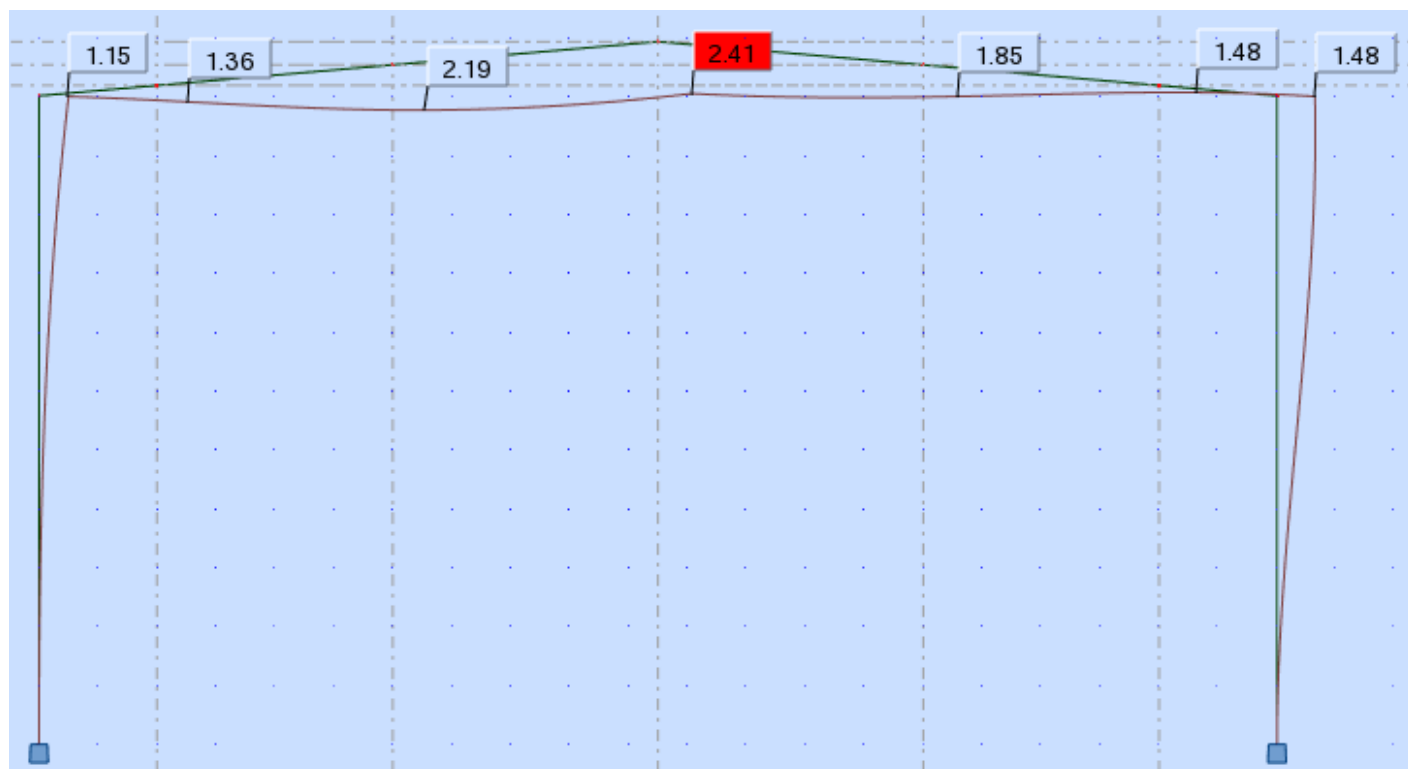
Maksymalne przemieszczenie pionowe [cm]



$$w = 3,82 \text{ cm} < w_{dop} = \frac{L}{350} = \frac{2100 \text{ cm}}{350} = 6 \text{ cm}$$

Warunek spełniony

Maksymalne przemieszczenie poziome [cm]



$$w = 1,48 \text{ cm} < w_{dop} = \frac{h}{150} = \frac{1100 \text{ cm}}{150} = 7,33 \text{ cm}$$

Warunek spełniony

#### Przekrój 14

Siły wewnętrzne

$$M_{Ed} = 314,58 \text{ kNm}$$

$$V_{Ed} = 111,08 \text{ kN}$$

$$N_{Ed} = 51,89 \text{ kN}$$

Klasa przekroju

$$h_w = 600 \text{ mm}$$

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

$$b_f = 200 \text{ mm}$$

$$t_f = 20 \text{ mm}$$

$$\frac{c}{t} = \frac{h_w}{t_w} = \frac{600 \text{ mm}}{6 \text{ mm}} = 100 < 124\varepsilon - \text{klasa 3}$$

$$\frac{c}{t} = \frac{\frac{b_f - t_w}{2}}{t_f} = \frac{\frac{200 \text{ mm} - 6 \text{ mm}}{2}}{20 \text{ mm}} = 4,85 < 9\varepsilon - \text{klasa 1}$$

Przekrój jest klasy 3

Nośność przekroju przy ściskaniu i jednokierunkowym zginaniu (PN-EN 1993-1-5 4.6)

$$\begin{aligned} \eta_1 &= \frac{N_{Ed}}{\frac{f_y * A}{\gamma_{M0}}} + \frac{M_{Ed}}{\frac{f_y * W_y}{\gamma_{M0}}} \\ &= \frac{51,89 \text{ kN}}{\frac{235000 \text{ kPa} * (0,006 * 0,6 + 2 * 0,20 * 0,02) \text{ m}^2}{1,0}} \\ &\quad + \frac{314,58 \text{ kNm}}{\frac{235000 \text{ kPa} * 0,002741 \text{ m}^3}{1,0}} = 0,51 < 1,0 \end{aligned}$$

Warunek nośności spełniony

Nośność przekroju na ścinanie (PN-EN 1993-1-1 p. 6.2.6., PN-EN 1993-1-5 r. 5)

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{0,6 \text{ m}}{0,006 \text{ m}} = 100 > 72 \frac{\varepsilon}{\eta} = 72 * \frac{1}{1,2} = 60$$

Należy sprawdzić średnik na niestateczność przy ścinaniu



Nośność obliczeniowa przekroju blachownicy przy ścinaniu

$$V_{b,Rd} = V_{b_w,Rd} + V_{bf,Rd} \leq \frac{\eta * f_{yw} * t_w * h_w}{\sqrt{3} * \gamma_{M1}}$$

Udział środnika w nośności obliczeniowej

$$V_{b_w,Rd} = \chi_w * \frac{f_{yw} * t_w * h_w}{\sqrt{3} * \gamma_{M1}}$$

Względna smukłość płytowa

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{86,4 * t_w * \varepsilon} = \frac{0,6 \text{ m}}{86,4 * 0,006 \text{ m} * 1} = 1,16 > 1,08$$

Współczynnik niestateczności przy ścinaniu dla żebra podporowego podatnego

$$\chi_w = \frac{0,83}{\bar{\lambda}_w} = \frac{0,83}{1,16} = 0,72$$

$$V_{b_w,Rd} = \chi_w * \frac{f_{yw} * t_w * h_w}{\sqrt{3} * \gamma_{M1}} = 0,72 * \frac{235000 \text{ kPa} * 0,006 \text{ m} * 0,6 \text{ m}}{\sqrt{3} * 1} = 351,68 \text{ kN}$$

Pominięto udział pasów w przenoszeniu ścinania

$$V_{bf,Rd} = 0$$

$$V_{b,Rd} = V_{b_w,Rd} + V_{bf,Rd} = 351,68 \text{ kN} < \frac{\eta * f_{yw} * t_w * h_w}{\sqrt{3} * \gamma_{M1}} = \frac{1,2 * 235000 \text{ kPa} * 0,006 \text{ m} * 0,6 \text{ m}}{\sqrt{3} * 1} = 586,13 \text{ kN}$$

$$\eta_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{b,Rd}} = \frac{111,08 \text{ kN}}{351,68 \text{ kN}} = 0,32$$

Warunek nośności spełniony

Zginanie ze ścinaniem

$$\eta_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{b,Rd}} = \frac{111,08 \text{ kN}}{351,68 \text{ kN}} = 0,32 < 0,5$$

Wpływ ścinania na nośność przy zginaniu można pominąć

Stateczność pasa przy smukłym środkniku (PN-EN 1993-1-5 r.8)

$$\frac{h_w}{t_w} \leq k * \frac{E}{f_{yf}} \sqrt{\frac{A_w}{A_{fc}}}$$

$$k = 0,55$$

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{0,6 \text{ m}}{0,006 \text{ m}} = 100 < k * \frac{E}{f_{yf}} \sqrt{\frac{A_w}{A_{fc}}} = 0,55 * \frac{210000000 \text{ kPa}}{235000 \text{ kPa}} \sqrt{\frac{0,6 \text{ m} * 0,006 \text{ m}}{0,20 \text{ m} * 0,020 \text{ m}}} = 466,27$$

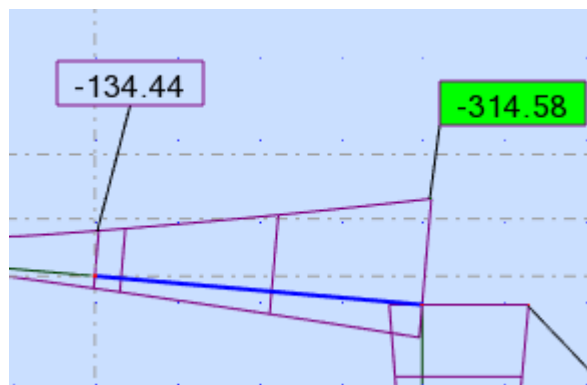
Warunek spełniony


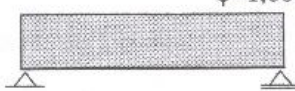
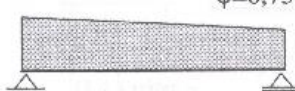
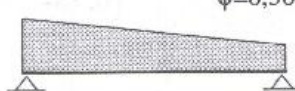
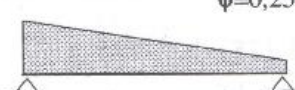

Nośność elementu na zwichrzenie (PN-EN 1991-1-1 p.6.3.2)

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1$$

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} * \frac{W_y * f_y}{\gamma_{M1}}$$

$$M_{cr} = C_1 * \frac{\pi^2 * E * I_z}{(k * l)^2} * \sqrt{\left(\frac{k}{k_\omega}\right)^2 \frac{I_\omega}{I_z} + \frac{(k * l)^2 * G * I_T}{\pi^2 * E * I_z}}$$



Warunki obciążenia i podparcia	Wykres momentów zginających	Wartość $k_z$	Wartości współczynników $C_i$	
			$C_1$	$C_3$
	$\psi=1,00$ 	1,0	1,000	1,000
		0,7	1,000	1,113
		0,5	1,000	1,144
	$\psi=0,75$ 	1,0	1,141	0,998
		0,7	1,270	1,565
		0,5	1,305	2,283
	$\psi=0,50$ 	1,0	1,323	0,992
		0,7	1,473	1,556
		0,5	1,514	2,271
	$\psi=0,25$ 	1,0	1,563	0,977
		0,7	1,739	1,531
		0,5	1,788	2,235
	$\psi=0$ 	1,0	1,879	0,939
		0,7	2,092	1,473
		0,5	2,150	2,150

$$\psi = \frac{M_1}{M_2} = \frac{134,44}{314,58} = 0,43$$

$$C_1 = 1,409$$

$$k = 1,0$$

$$k_\omega = 1,0$$

$$W_y = 0,002741 \text{ m}^4$$

$$I_z = 0,00002668 \text{ m}^4$$

$$I_\omega = 0,000002564 \text{ m}^6$$

$$I_t = 0,000001045 \text{ m}^4$$

$$\begin{aligned}
 M_{cr} &= C_1 * \frac{\pi^2 * E * I_z}{(k * l)^2} * \sqrt{\left(\frac{k}{k_\omega}\right)^2 \frac{I_\omega}{I_z} + \frac{(k * l)^2 * G * I_T}{\pi^2 * E * I_z}} \\
 &= 1,409 * \frac{\pi^2 * 210000000 * 0,00002668}{(1 * 5,25)^2} \\
 &\quad * \sqrt{\left(\frac{1}{1}\right)^2 * \frac{0,000002564}{0,00002668} + \frac{(1 * 5,25)^2 * 81000000 * 0,000001045}{\pi^2 * 210000000 * 0,00002668}} = 1051,23 \text{ kNm}
 \end{aligned}$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y * f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{0,002741 * 235000}{1051,23}} = 0,78$$

$$\phi_{LT} = 0,5 * [1 + \alpha_{LT} * (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta * \bar{\lambda}_{LT}^2]$$

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

$$\beta = 0,75$$

$$\frac{h}{b} = \frac{0,640}{0,200} = 3,2 > 2 - \text{krzywa zwichrzenia d}$$

$$\alpha_{LT} = 0,76$$

$$\phi_{LT} = 0,5 * [1 + \alpha_{LT} * (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta * \bar{\lambda}_{LT}^2] = 0,5 * [1 + 0,76 * (0,78 - 0,4) + 0,75 * 0,78^2] = 0,87$$

$$\chi_{LT} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \beta * \bar{\lambda}_{LT}^2}} \leq 1 \\ \frac{1}{\bar{\lambda}_{LT}^2} \end{array} \right.$$

$$\chi_{LT1} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \beta * \bar{\lambda}_{LT}^2}} = \frac{1}{0,87 + \sqrt{0,87^2 - 0,75 * 0,78^2}} = 0,71 < 1$$

$$\chi_{LT2} = \frac{1}{\bar{\lambda}_{LT}^2} = \frac{1}{0,78^2} = 1,64$$

$$\chi_{LT} = 0,71$$

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} * \frac{W_y * f_y}{\gamma_{M1}} = 0,71 * \frac{0,002741 * 235000}{1} = 457,34 \text{ kNm}$$

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} = \frac{314,58}{457,34} = 0,69 < 1$$

Warunek spełniony

Nośność elementu na wyboczenie

Wyboczenie giętnie

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1$$

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi * A * f_y}{\gamma_{M1}}$$

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}}$$

$$\Phi = 0,5 * [1 + \alpha * (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2]$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A * f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i * \lambda_1}$$

$$\lambda_1 = 93,9 \varepsilon = 93,9$$

Względem osi y

$$L_{cr,y} = 21 \text{ m}$$

$$i_y = \sqrt{\frac{I}{A}} = \sqrt{\frac{0,0008771 \text{ m}^4}{0,0116 \text{ m}^2}} = 0,27 \text{ m}$$

$t_f < 40 \text{ mm}$  – krzywa wyboczenia b

$$\alpha = 0,34$$

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{A * f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i * \lambda_1} = \frac{21 \text{ m}}{0,27 \text{ m} * 93,9} = 0,83$$

$$\Phi_y = 0,5 * [1 + \alpha * (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] = 0,5 * (1 + 0,34 * (0,83 - 0,2) + 0,83^2) = 0,95$$

$$\chi_y = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{0,95 + \sqrt{0,95^2 - 0,83^2}} = 0,71$$

$$N_{b,Rd,y} = \frac{\chi_y * A * f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,71 * 0,0116 \text{ m}^2 * 235000 \text{ kPa}}{1} = 1935,46 \text{ kN}$$

Względem osi z

$$L_{cr,z} = 5,25 \text{ m}$$

$$i_z = \sqrt{\frac{I}{A}} = \sqrt{\frac{0,00002668 \text{ m}^4}{0,0116 \text{ m}^2}} = 0,048 \text{ m}$$

$t_f < 40 \text{ mm}$  – krzywa wyboczenia c

$$\alpha = 0,49$$

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{A * f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i * \lambda_1} = \frac{5,25 \text{ m}}{0,048 \text{ m} * 93,9} = 1,16$$

$$\Phi_z = 0,5 * [1 + \alpha * (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] = 0,5 * (1 + 0,49 * (1,16 - 0,2) + 1,16^2) = 1,41$$

$$\chi_z = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{1,41 + \sqrt{1,41^2 - 1,16^2}} = 0,45$$

$$N_{b,Rd,z} = \frac{\chi_z * A * f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,45 * 0,0116 \text{ m}^2 * 235000 \text{ kPa}}{1} = 1226,7 \text{ kN}$$

Wyboczenie skrętne (PN-EN 1993-1-1 p.6.3.1.4)

Siła krytyczna wyboczenia skrętnego

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_o^2} \left( G I_t + \frac{\pi^2 E I_w}{L_t^2} \right)$$

$$i_o^2 = i_y^2 + i_z^2 = 0,27^2 + 0,048^2 = 0,075 \text{ m}^2$$

$$L_t = 5,25 \text{ m}$$

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_o^2} \left( G I_t + \frac{\pi^2 E I_w}{L_t^2} \right) = \frac{1}{0,075 \text{ m}^2} \left( 80770000 \text{ kPa} * 0,000001045 \text{ m}^4 + \frac{\pi^2 * 210000000 \text{ kPa} * 0,000002564 \text{ m}^6}{(5,25 \text{ m})^2} \right) = 3696,13 \text{ kN}$$

$$\bar{\lambda}_T = \sqrt{\frac{A * f_y}{N_{cr,T}}} = \sqrt{\frac{0,0116 \text{ m}^2 * 235000 \text{ kPa}}{3691,13 \text{ kN}}} = 0,86$$

$t_f < 40 \text{ mm}$  – krzywa wyboczenia c

$$\alpha = 0,49$$

$$\Phi_T = 0,5 * [1 + \alpha * (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] = 0,5 * (1 + 0,49 * (0,86 - 0,2) + 0,86^2) = 1,03$$

$$\chi_T = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{1,03 + \sqrt{1,03^2 - 0,86^2}} = 0,63$$

$$N_{b,Rd,T} = \frac{\chi_T * A * f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,63 * 0,0116 \text{ m}^2 * 235000 \text{ kPa}}{1} = 1717,38 \text{ kN}$$

$$N_{b,Rd} = \min\{N_{b,Rd,y}; N_{b,Rd,z}; N_{b,Rd,T}\} = N_{b,Rd,z} = 1226,7 \text{ kN}$$


$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} = \frac{51,89 \text{ kN}}{1226,7 \text{ kN}} = 0,04 \leq 1$$

Warunek spełniony

Sprawdzenie nośności elementu zginanego i ściskanego

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + \frac{k_{yy} \cdot M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + \frac{k_{zy} M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1$$

Wykres momentów	Zakres	$C_{my}$ , $C_{mz}$ i $C_{mLT}$	
		Obciążenie równomierne	Obciążenie skupione
	$-1 \leq \psi \leq 1$	$0,6 + 0,4\psi \geq 0,4$	

$$C_{my} = 0,6 + 0,4\psi = 0,6 + 0,4 * \left( \frac{134,44}{314,58} \right) = 0,77 > 0,4$$

$$k_{yy} = C_{my} \left( 1 + 0,6 * \overline{\lambda}_y * \frac{N_{Ed}}{\chi_y * \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) = 0,77 \left( 1 + 0,6 * 0,83 * \frac{51,89 \text{ kN}}{0,71 * \frac{2726 \text{ kN}}{1}} \right) = 0,78$$

$$= C_{my} \left( 1 + 0,6 * \frac{N_{Ed}}{\chi_y * \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) = 0,77 \left( 1 + 0,6 * \frac{51,89 \text{ kN}}{0,71 * \frac{2726 \text{ kN}}{1}} \right) = 0,78$$

$$k_{yy} = 0,78$$

$$k_{zy} = 0,8 * k_{yy} = 0,8 * 0,78 = 0,62$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y * \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + \frac{k_{yy} * M_{y,Ed}}{\chi_{LT} * \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} = \frac{51,89 \text{ kN}}{0,71 * \frac{2726 \text{ kN}}{1}} + \frac{0,77 * 314,58 \text{ kNm}}{0,71 * \frac{644,14 \text{ kNm}}{1}} = 0,56 < 1$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z * \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + \frac{k_{zy} M_{y,Ed}}{\chi_{LT} * \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} = \frac{51,89 \text{ kN}}{0,31 * \frac{2726 \text{ kN}}{1}} + \frac{0,62 * 314,58 \text{ kNm}}{0,71 * \frac{644,14 \text{ kNm}}{1}} = 0,49 < 1$$

Warunki spełnione

## Przekrój 11

Siły wewnętrzne

$$M_{Ed} = 156,76 \text{ kNm}$$

$$V_{Ed} = 45,63 \text{ kN}$$

$$N_{Ed} = 46,25 \text{ kN}$$

Klasa przekroju

$$h_w = 600 \text{ mm}$$

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

$$b_f = 200 \text{ mm}$$

$$t_f = 16 \text{ mm}$$

$$\frac{c}{t} = \frac{h_w}{t_w} = \frac{600 \text{ mm}}{6 \text{ mm}} = 100 < 124\varepsilon - \text{klasa 3}$$

$$\frac{c}{t} = \frac{\frac{b_f - t_w}{2}}{t_f} = \frac{\frac{200 \text{ mm} - 6 \text{ mm}}{2}}{16 \text{ mm}} = 6,06 < 9\varepsilon - \text{klasa 1}$$

Przekrój jest klasy 3

Nośność przekroju przy ściskaniu i jednokierunkowym zginaniu (PN-EN 1993-1-5 4.6)

$$\begin{aligned} \eta_1 &= \frac{N_{Ed}}{\frac{f_y * A}{\gamma_{M0}}} + \frac{M_{Ed}}{\frac{f_y * W_y}{\gamma_{M0}}} \\ &= \frac{46,25 \text{ kN}}{\frac{235000 \text{ kPa} * (0,006 * 0,6 + 2 * 0,20 * 0,016) \text{ m}^2}{1,0}} \\ &\quad + \frac{156,76 \text{ kNm}}{\frac{235000 \text{ kPa} * 0,002264 \text{ m}^3}{1,0}} = 0,31 < 1,0 \end{aligned}$$

Warunek nośności spełniony

Nośność przekroju na ścinanie (PN-EN 1993-1-1 p. 6.2.6., PN-EN 1993-1-5 r. 5)

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{0,6 \text{ m}}{0,006 \text{ m}} = 100 > 72 \frac{\varepsilon}{\eta} = 72 * \frac{1}{1,2} = 60$$

Należy zastosować żebra poprzeczne na podporach oraz sprawdzić środnik na niestateczność przy ścinaniu



Nośność obliczeniowa przekroju blachownicy przy ścinaniu

$$V_{b,Rd} = V_{b_w,Rd} + V_{bf,Rd} \leq \frac{\eta * f_{yw} * t_w * h_w}{\sqrt{3} * \gamma_{M1}}$$

Udział środnika w nośności obliczeniowej

$$V_{b_w,Rd} = \chi_w * \frac{f_{yw} * t_w * h_w}{\sqrt{3} * \gamma_{M1}}$$

Względna smukłość płytowa

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{86,4 * t_w * \varepsilon} = \frac{0,6 \text{ m}}{86,4 * 0,006 \text{ m} * 1} = 1,16 > 1,08$$

Współczynnik niestateczności przy ścinaniu dla żebra podporowego podatnego

$$\chi_w = \frac{0,83}{\bar{\lambda}_w} = \frac{0,83}{1,16} = 0,72$$

$$V_{b_w,Rd} = \chi_w * \frac{f_{yw} * t_w * h_w}{\sqrt{3} * \gamma_{M1}} = 0,72 * \frac{235000 \text{ kPa} * 0,006 \text{ m} * 0,6 \text{ m}}{\sqrt{3} * 1} = 351,68 \text{ kN}$$

Pominięto udział pasów w przenoszeniu ścinania

$$V_{bf,Rd} = 0$$

$$V_{b,Rd} = V_{b_w,Rd} + V_{bf,Rd} = 351,68 \text{ kN} < \frac{\eta * f_{yw} * t_w * h_w}{\sqrt{3} * \gamma_{M1}} = \frac{1,2 * 235000 \text{ kPa} * 0,006 \text{ m} * 0,6 \text{ m}}{\sqrt{3} * 1} = 586,13 \text{ kN}$$

$$\eta_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{b,Rd}} = \frac{45,63 \text{ kN}}{351,68 \text{ kN}} = 0,13$$

Warunek nośności spełniony

Zginanie ze ścinaniem

$$\eta_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{b,Rd}} = \frac{45,63 \text{ kN}}{351,68 \text{ kN}} = 0,13 < 0,5$$

Wpływ ścinania na nośność przy zginaniu można pominąć

Stateczność pasa przy smukłym środkniku (PN-EN 1993-1-5 r.8)

$$\frac{h_w}{t_w} \leq k * \frac{E}{f_{yf}} \sqrt{\frac{A_w}{A_{fc}}}$$

$$k = 0,55$$

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{0,6 \text{ m}}{0,006 \text{ m}} = 100 < k * \frac{E}{f_{yf}} \sqrt{\frac{A_w}{A_{fc}}} = 0,55 * \frac{210000000 \text{ kPa}}{235000 \text{ kPa}} \sqrt{\frac{0,6 \text{ m} * 0,006 \text{ m}}{0,20 \text{ m} * 0,016 \text{ m}}} = 521,30$$

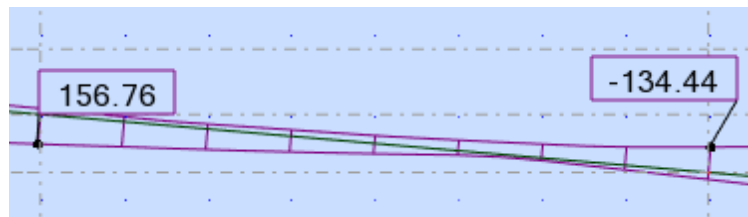
Warunek spełniony

Nośność elementu na zwichrzenie (PN-EN 1991-1-1 p.6.3.2)

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1$$

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} * \frac{W_y * f_y}{\gamma_{M1}}$$

$$M_{cr} = C_1 * \frac{\pi^2 * E * I_z}{(k * l)^2} * \sqrt{\left(\frac{k}{k_\omega}\right)^2 \frac{I_\omega}{I_z} + \frac{(k * l)^2 * G * I_T}{\pi^2 * E * I_z}}$$



	$\psi=0$	1,0	1,879	0,939
		0,7	2,092	1,473
		0,5	2,150	2,150
	$\psi=-0,25$	1,0	2,281	0,855
		0,7	2,538	1,340
		0,5	2,609	1,957
	$\psi=-0,50$	1,0	2,704	0,676
		0,7	3,009	1,059
		0,5	3,093	1,546
	$\psi=-0,75$	1,0	2,927	0,366
		0,7	3,009	0,575
		0,5	3,093	0,837
	$\psi=-1,00$	1,0	2,752	0,000
		0,7	3,063	0,000
		0,5	3,149	0,000

$$\psi = \frac{M_1}{M_2} = \frac{134,44}{156,76} = 0,86$$

$$C_1 = 2,840$$

$$k = 1,0$$

$$k_\omega = 1,0$$

$$I_z = 0,00002134 \text{ m}^4$$

$$I_\omega = 0,000002025 \text{ m}^6$$

$$I_t = 0,0000005637 \text{ m}^4$$

$$l = 5,25 \text{ m}$$

$$M_{cr} = C_1 * \frac{\pi^2 * E * I_z}{(k * l)^2} * \sqrt{\left(\frac{k}{k_\omega}\right)^2 \frac{I_\omega}{I_z} + \frac{(k * l)^2 * G * I_T}{\pi^2 * E * I_z}} = 2,84 * \frac{\pi^2 * 210000000 * 0,00002134}{(1 * 5,25)^2} *$$

$$\sqrt{\left(\frac{1}{1}\right)^2 * \frac{0,000002025}{0,00002134} + \frac{(1 * 5,25)^2 * 81000000 * 0,0000005637}{\pi^2 * 210000000 * 0,00002134}} = 1600,57 \text{ kNm}$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y * f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{0,002264 * 235000}{1600,57}} = 0,58$$

$$\phi_{LT} = 0,5 * [1 + \alpha_{LT} * (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta * \bar{\lambda}_{LT}^2]$$

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

$$\beta = 0,75$$

$$\frac{h}{b} = \frac{0,640}{0,200} = 3,2 > 2 - \text{krzywa zwichrzenia d}$$

$$\alpha_{LT} = 0,76$$

$$\phi_{LT} = 0,5 * [1 + \alpha_{LT} * (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta * \bar{\lambda}_{LT}^2] = 0,5 * [1 + 0,76 * (0,58 - 0,4) + 0,75 * 0,58^2] = 0,69$$

$$\chi_{LT} = \min \left\{ \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \beta * \bar{\lambda}_{LT}^2}} \leq 1, \frac{1}{\bar{\lambda}_{LT}^2} \right\}$$

$$\chi_{LT1} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \beta * \bar{\lambda}_{LT}^2}} = \frac{1}{0,69 + \sqrt{0,69^2 - 0,75 * 0,58^2}} = 0,86 < 1$$

$$\chi_{LT2} = \frac{1}{\bar{\lambda}_{LT}^2} = \frac{1}{0,58^2} = 1,35$$

$$\chi_{LT} = 0,86$$

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} * \frac{W_y * f_y}{\gamma_{M1}} = 0,86 * \frac{0,002264 * 235000}{1} = 457,55 \text{ kNm}$$

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} = \frac{156,76}{457,55} = 0,34 < 1$$

Warunek spełniony

Nośność elementu na wyboczenie

Wyboczenie giętne

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1$$

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi * A * f_y}{\gamma_{M1}}$$

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}}$$

$$\Phi = 0,5 * [1 + \alpha * (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2]$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A * f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i * \lambda_1}$$

$$\lambda_1 = 93,9 \text{ } \varepsilon = 93,9$$

Względem osi y

$$L_{cr,y} = 21 \text{ m}$$

$$i_y = \sqrt{\frac{I}{A}} = \sqrt{\frac{0,0007153 \text{ m}^4}{0,01 \text{ m}^2}} = 0,27 \text{ m}$$

$t_f < 40 \text{ mm}$  – krzywa wyboczenia b

$$\alpha = 0,34$$

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{A * f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i * \lambda_1} = \frac{21 \text{ m}}{0,27 \text{ m} * 93,9} = 0,83$$

$$\Phi_y = 0,5 * [1 + \alpha * (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] = 0,5 * (1 + 0,34 * (0,83 - 0,2) + 0,83^2) = 0,95$$

$$\chi_y = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{0,95 + \sqrt{0,95^2 - 0,83^2}} = 0,71$$

$$N_{b,Rd,y} = \frac{\chi_y * A * f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,71 * 0,01 \text{ m}^2 * 235000 \text{ kPa}}{1} = 1668,6 \text{ kN}$$

Względem osi z

$$L_{cr,z} = 5,25 \text{ m}$$

$$i_z = \sqrt{\frac{I}{A}} = \sqrt{\frac{0,00002134 \text{ m}^4}{0,01 \text{ m}^2}} = 0,046 \text{ m}$$

$t_f < 40 \text{ mm}$  – krzywa wyboczenia c

$$\alpha = 0,49$$

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{A * f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i * \lambda_1} = \frac{5,25 \text{ m}}{0,046 \text{ m} * 93,9} = 1,22$$

$$\Phi_z = 0,5 * [1 + \alpha * (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] = 0,5 * (1 + 0,49 * (1,22 - 0,2) + 1,22^2) = 1,49$$

$$\chi_z = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{1,49 + \sqrt{1,49^2 - 1,22^2}} = 0,43$$

$$N_{b,Rd,z} = \frac{\chi_z * A * f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,43 * 0,01 \text{ m}^2 * 235000 \text{ kPa}}{1} = 1010,5 \text{ kN}$$

Wyboczenie skrętne (PN-EN 1993-1-1 p.6.3.1.4)

Siła krytyczna wyboczenia skrętnego

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_o^2} \left( GI_t + \frac{\pi^2 EI_w}{L_t^2} \right)$$

$$i_o^2 = i_y^2 + i_z^2 = 0,27^2 + 0,046^2 = 0,075 \text{ m}^2$$

$$L_t = 5,25 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} N_{cr,T} &= \frac{1}{i_o^2} \left( GI_t + \frac{\pi^2 EI_w}{L_t^2} \right) \\ &= \frac{1}{0,075 \text{ m}^2} \\ &\quad * \left( 80770000 \text{ kPa} * 0,0000005637 \text{ m}^4 \right. \\ &\quad \left. + \frac{\pi^2 * 210000000 \text{ kPa} * 0,000002025 \text{ m}^6}{(5,25 \text{ m})^2} \right) = 2637,39 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\bar{\lambda}_T = \sqrt{\frac{A * f_y}{N_{cr,T}}} = \sqrt{\frac{0,01 \text{ m}^2 * 235000 \text{ kPa}}{2637,39 \text{ kN}}} = 0,94$$

$t_f < 40 \text{ mm}$  – krzywa wyboczenia c

$$\alpha = 0,49$$

$$\Phi_T = 0,5 * [1 + \alpha * (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] = 0,5 * (1 + 0,49 * (0,94 - 0,2) + 0,94^2) = 1,12$$

$$\chi_T = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{1,12 + \sqrt{1,12^2 - 0,94^2}} = 0,58$$

$$N_{b,Rd,T} = \frac{\chi_T \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,58 \cdot 0,01 \text{ m}^2 \cdot 235000 \text{ kPa}}{1} = 1363 \text{ kN}$$

$$N_{b,Rd} = \min\{N_{b,Rd,y}; N_{b,Rd,z}; N_{b,Rd,T}\} = N_{b,Rd,z} = 1010,5 \text{ kN}$$


$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} = \frac{46,25 \text{ kN}}{1010,5 \text{ kN}} = 0,05 \leq 1$$

Warunek spełniony

Sprawdzenie nośności elementu zginanego i ściskanego

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + \frac{k_{yy} \cdot M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + \frac{k_{zy} M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1$$

Wykres momentów	Zakres	C <sub>my</sub> , C <sub>mz</sub> i C <sub>mLT</sub>	
		Obciążenie równomierne	Obciążenie skupione
	-1 ≤ ψ ≤ 1	0,6 + 0,4ψ ≥ 0,4	

$$C_{my} = 0,6 + 0,4\psi = 0,6 + 0,4 \cdot \left(\frac{-134,44}{156,76}\right) = 0,26 < 0,4$$

$$C_{my} = 0,4$$

$$k_{yy} = C_{my} \left( 1 + 0,6 \cdot \bar{\lambda}_y \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) = 0,4 \left( 1 + 0,6 \cdot 0,83 \cdot \frac{46,25 \text{ kN}}{0,71 \cdot \frac{2350 \text{ kN}}{1}} \right) = 0,41$$

$$= C_{my} \left( 1 + 0,6 \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) = 0,4 \left( 1 + 0,6 \cdot \frac{46,25 \text{ kN}}{0,71 \cdot \frac{2350 \text{ kN}}{1}} \right) = 0,41$$

$$k_{yy} = 0,41$$

$$k_{zy} = 0,8 \cdot k_{yy} = 0,8 \cdot 0,41 = 0,33$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + \frac{k_{yy} \cdot M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} = \frac{46,25 \text{ kN}}{0,71 \cdot \frac{2350 \text{ kN}}{1}} + \frac{0,41 \cdot 156,76 \text{ kNm}}{0,86 \cdot \frac{532,04 \text{ kNm}}{1}} = 0,17 < 1$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + \frac{k_{zy} M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} = \frac{46,25 \text{ kN}}{0,43 \cdot \frac{2350 \text{ kN}}{1}} + \frac{0,33 \cdot 156,76 \text{ kNm}}{0,86 \cdot \frac{532,04 \text{ kNm}}{1}} = 0,16 < 1$$

Warunki spełnione

## Przekrój 8

Siły wewnętrzne

$$M_{Ed} = 251,71 \text{ kNm}$$

$$V_{Ed} = 18,82 \text{ kN}$$

$$N_{Ed} = 42,01 \text{ kN}$$

Klasa przekroju

$$h_w = 600 \text{ mm}$$

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

$$b_f = 200 \text{ mm}$$

$$t_f = 20 \text{ mm}$$

$$\frac{c}{t} = \frac{h_w}{t_w} = \frac{600 \text{ mm}}{6 \text{ mm}} = 100 < 124\varepsilon - \text{klasa 3}$$

$$\frac{c}{t} = \frac{\frac{b_f - t_w}{2}}{t_f} = \frac{\frac{200 \text{ mm} - 6 \text{ mm}}{2}}{20 \text{ mm}} = 4,85 < 9\varepsilon - \text{klasa 1}$$

Przekrój jest klasy 3

Nośność przekroju przy ściskaniu i jednokierunkowym zginaniu (PN-EN 1993-1-5 4.6)

$$\begin{aligned} \eta_1 &= \frac{N_{Ed}}{\frac{f_y * A}{\gamma_{M0}}} + \frac{M_{Ed}}{\frac{f_y * W_y}{\gamma_{M0}}} \\ &= \frac{42,01 \text{ kN}}{\frac{235000 \text{ kPa} * (0,006 * 0,6 + 2 * 0,20 * 0,02) \text{ m}^2}{1,0}} \\ &\quad + \frac{251,71 \text{ kNm}}{\frac{235000 \text{ kPa} * 0,002741 \text{ m}^3}{1,0}} = 0,41 < 1,0 \end{aligned}$$

Warunek nośności spełniony

Nośność przekroju na ścinanie (PN-EN 1993-1-1 p. 6.2.6., PN-EN 1993-1-5 r. 5)

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{0,6 \text{ m}}{0,006 \text{ m}} = 100 > 72 \frac{\varepsilon}{\eta} = 72 * \frac{1}{1,2} = 60$$

Należy sprawdzić średnik na niestateczność przy ścinaniu

Nośność obliczeniowa przekroju blachownicy przy ścinaniu

$$V_{b,Rd} = V_{b_w,Rd} + V_{bf,Rd} \leq \frac{\eta * f_{yw} * t_w * h_w}{\sqrt{3} * \gamma_{M1}}$$

Udział środnika w nośności obliczeniowej

$$V_{b_w,Rd} = \chi_w * \frac{f_{yw} * t_w * h_w}{\sqrt{3} * \gamma_{M1}}$$

Względna smukłość płytowa

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{86,4 * t_w * \varepsilon} = \frac{0,6 \text{ m}}{86,4 * 0,006 \text{ m} * 1} = 1,16 > 1,08$$

Współczynnik niestateczności przy ścinaniu dla żebra podporowego podatnego

$$\chi_w = \frac{0,83}{\bar{\lambda}_w} = \frac{0,83}{1,16} = 0,72$$

$$V_{b_w,Rd} = \chi_w * \frac{f_{yw} * t_w * h_w}{\sqrt{3} * \gamma_{M1}} = 0,72 * \frac{235000 \text{ kPa} * 0,006 \text{ m} * 0,6 \text{ m}}{\sqrt{3} * 1} = 351,68 \text{ kN}$$

Pominięto udział pasów w przenoszeniu ścinania

$$V_{bf,Rd} = 0$$

$$V_{b,Rd} = V_{b_w,Rd} + V_{bf,Rd} = 351,68 \text{ kN} < \frac{\eta * f_{yw} * t_w * h_w}{\sqrt{3} * \gamma_{M1}} = \frac{1,2 * 235000 \text{ kPa} * 0,006 \text{ m} * 0,6 \text{ m}}{\sqrt{3} * 1} = 586,13 \text{ kN}$$

$$\eta_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{b,Rd}} = \frac{18,82 \text{ kN}}{351,68 \text{ kN}} = 0,05$$

Warunek nośności spełniony

Zginanie ze ścinaniem

$$\eta_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{b,Rd}} = \frac{18,82 \text{ kN}}{351,68 \text{ kN}} = 0,05 < 0,5$$

Wpływ ścinania na nośność przy zginaniu można pominąć



Stateczność pasa przy smukłym środkniku (PN-EN 1993-1-5 r.8)

$$\frac{h_w}{t_w} \leq k * \frac{E}{f_{yf}} \sqrt{\frac{A_w}{A_{fc}}}$$

$$k = 0,55$$

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{0,6 \text{ m}}{0,006 \text{ m}} = 100 < k * \frac{E}{f_{yf}} \sqrt{\frac{A_w}{A_{fc}}} = 0,55 * \frac{210000000 \text{ kPa}}{235000 \text{ kPa}} \sqrt{\frac{0,6 \text{ m} * 0,006 \text{ m}}{0,20 \text{ m} * 0,020 \text{ m}}} = 466,27$$

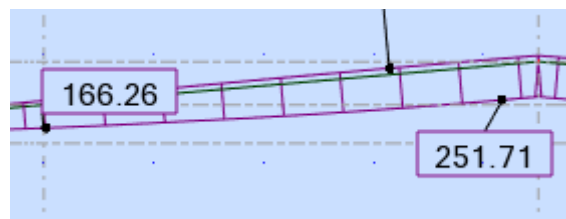
Warunek spełniony

Nośność elementu na zwichrzenie (PN-EN 1991-1-1 p.6.3.2)

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1$$

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} * \frac{W_y * f_y}{\gamma_{M1}}$$

$$M_{cr} = C_1 * \frac{\pi^2 * E * I_z}{(k * l)^2} * \sqrt{\left(\frac{k}{k_\omega}\right)^2 \frac{I_\omega}{I_z} + \frac{(k * l)^2 * G * I_T}{\pi^2 * E * I_z}}$$



Warunki obciążenia i podparcia	Wykres momentów zginających	Wartość $k_z$	Wartości współczynników $C_i$	
			$C_1$	$C_3$
	$\psi=1,00$ 	1,0	1,000	1,000
		0,7	1,000	1,113
		0,5	1,000	1,144
	$\psi=0,75$ 	1,0	1,141	0,998
		0,7	1,270	1,565
		0,5	1,305	2,283
	$\psi=0,50$ 	1,0	1,323	0,992
		0,7	1,473	1,556
		0,5	1,514	2,271
	$\psi=0,25$ 	1,0	1,563	0,977
		0,7	1,739	1,531
		0,5	1,788	2,235
	$\psi=0$ 	1,0	1,879	0,939
		0,7	2,092	1,473
		0,5	2,150	2,150

$$\psi = \frac{M_1}{M_2} = \frac{166,26}{251,71} = 0,66$$

$$C_1 = 1,232$$

$$k = 1,0$$

$$k_\omega = 1,0$$

$$W_y = 0,002741 \text{ m}^4$$

$$I_z = 0,00002668 \text{ m}^4$$

$$I_\omega = 0,000002564 \text{ m}^6$$

$$I_t = 0,000001045 \text{ m}^4$$

$$\begin{aligned} M_{cr} &= C_1 * \frac{\pi^2 * E * I_z}{(k * l)^2} * \sqrt{\left(\frac{k}{k_\omega}\right)^2 \frac{I_\omega}{I_z} + \frac{(k * l)^2 * G * I_T}{\pi^2 * E * I_z}} \\ &= 1,232 * \frac{\pi^2 * 210000000 * 0,00002668}{(1 * 5,25)^2} \\ &\quad * \sqrt{\left(\frac{1}{1}\right)^2 * \frac{0,000002564}{0,00002668} + \frac{(1 * 5,25)^2 * 81000000 * 0,000001045}{\pi^2 * 210000000 * 0,00002668}} = 919,17 \text{ kNm} \end{aligned}$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y * f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{0,002741 * 235000}{919,17}} = 0,84$$

$$\phi_{LT} = 0,5 * [1 + \alpha_{LT} * (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta * \bar{\lambda}_{LT}^2]$$

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

$$\beta = 0,75$$

$$\frac{h}{b} = \frac{0,640}{0,200} = 3,2 > 2 - \text{krzywa zwichrzenia d}$$

$$\alpha_{LT} = 0,76$$

$$\begin{aligned} \phi_{LT} &= 0,5 * [1 + \alpha_{LT} * (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta * \bar{\lambda}_{LT}^2] = 0,5 * [1 + 0,76 * (0,84 - 0,4) + 0,75 * 0,84^2] \\ &= 0,93 \end{aligned}$$

$$\chi_{LT} = \min \left\{ \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \beta * \bar{\lambda}_{LT}^2}} \leq 1, \frac{1}{\bar{\lambda}_{LT}^2} \right\}$$

$$\chi_{LT1} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \beta * \bar{\lambda}_{LT}^2}} = \frac{1}{0,93 + \sqrt{0,93^2 - 0,75 * 0,84^2}} = 0,66 < 1$$

$$\chi_{LT2} = \frac{1}{\bar{\lambda}_{LT}^2} = \frac{1}{0,66^2} = 2,30$$

$$\chi_{LT} = 0,66$$

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} * \frac{W_y * f_y}{\gamma_{M1}} = 0,66 * \frac{0,002741 * 235000}{1} = 425,13 \text{ kNm}$$

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} = \frac{251,71}{425,13} = 0,59 < 1$$

Warunek spełniony

Nośność elementu na wyboczenie

Wyboczenie giętne

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1$$

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi * A * f_y}{\gamma_{M1}}$$

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}}$$

$$\Phi = 0,5 * [1 + \alpha * (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2]$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A * f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i * \lambda_1}$$

$$\lambda_1 = 93,9 \text{ ε} = 93,9$$

Względem osi y

$$L_{cr,y} = 21 \text{ m}$$

$$i_y = \sqrt{\frac{I}{A}} = \sqrt{\frac{0,0008771 \text{ m}^4}{0,0116 \text{ m}^2}} = 0,27 \text{ m}$$

$t_f < 40 \text{ mm}$  – krzywa wyboczenia b

$$\alpha = 0,34$$

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{A * f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i * \lambda_1} = \frac{21 \text{ m}}{0,27 \text{ m} * 93,9} = 0,83$$

$$\Phi_y = 0,5 * [1 + \alpha * (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] = 0,5 * (1 + 0,34 * (0,83 - 0,2) + 0,83^2) = 0,95$$

$$\chi_y = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{0,95 + \sqrt{0,95^2 - 0,83^2}} = 0,71$$

$$N_{b,Rd,y} = \frac{\chi_y * A * f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,71 * 0,0116 \text{ m}^2 * 235000 \text{ kPa}}{1} = 1935,46 \text{ kN}$$

Względem osi z

$$L_{cr,z} = 5,25 \text{ m}$$

$$i_z = \sqrt{\frac{I}{A}} = \sqrt{\frac{0,00002668 \text{ m}^4}{0,0116 \text{ m}^2}} = 0,048 \text{ m}$$

$t_f < 40 \text{ mm}$  – krzywa wyboczenia c

$$\alpha = 0,49$$

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{A * f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i * \lambda_1} = \frac{5,25 \text{ m}}{0,048 \text{ m} * 93,9} = 1,16$$

$$\Phi_z = 0,5 * [1 + \alpha * (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] = 0,5 * (1 + 0,49 * (1,16 - 0,2) + 1,16^2) = 1,41$$

$$\chi_z = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{1,41 + \sqrt{1,41^2 - 1,16^2}} = 0,45$$

$$N_{b,Rd,z} = \frac{\chi_z * A * f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,45 * 0,0116 \text{ m}^2 * 235000 \text{ kPa}}{1} = 1226,7 \text{ kN}$$

Wyboczenie skrętne (PN-EN 1993-1-1 p.6.3.1.4)

Siła krytyczna wyboczenia skrętnego

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_o^2} \left( GI_t + \frac{\pi^2 EI_w}{L_t^2} \right)$$

$$i_o^2 = i_y^2 + i_z^2 = 0,27^2 + 0,048^2 = 0,075 \text{ m}^2$$

$$L_t = 5,25 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} N_{cr,T} &= \frac{1}{i_o^2} \left( GI_t + \frac{\pi^2 EI_w}{L_t^2} \right) \\ &= \frac{1}{0,075 \text{ m}^2} \\ &\quad * \left( 80770000 \text{ kPa} * 0,000001045 \text{ m}^4 \right. \\ &\quad \left. + \frac{\pi^2 * 210000000 \text{ kPa} * 0,000002564 \text{ m}^6}{(5,25 \text{ m})^2} \right) = 3696,13 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\bar{\lambda}_T = \sqrt{\frac{A * f_y}{N_{cr,T}}} = \sqrt{\frac{0,0116 \text{ m}^2 * 235000 \text{ kPa}}{3691,13 \text{ kN}}} = 0,86$$

$t_f < 40 \text{ mm}$  – krzywa wyboczenia c

$$\alpha = 0,49$$

$$\Phi_T = 0,5 * [1 + \alpha * (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] = 0,5 * (1 + 0,49 * (0,86 - 0,2) + 0,86^2) = 1,03$$

$$\chi_T = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{1,03 + \sqrt{1,03^2 - 0,86^2}} = 0,63$$

$$N_{b,Rd,T} = \frac{\chi_T \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,63 \cdot 0,0116 \text{ m}^2 \cdot 235000 \text{ kPa}}{1} = 1717,38 \text{ kN}$$

$$N_{b,Rd} = \min\{N_{b,Rd,y}; N_{b,Rd,z}; N_{b,Rd,T}\} = N_{b,Rd,z} = 1226,7 \text{ kN}$$


$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} = \frac{42,01 \text{ kN}}{1226,7 \text{ kN}} = 0,03 \leq 1$$

Warunek spełniony

Sprawdzenie nośności elementu zginanego i ściskanego

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + \frac{k_{yy} \cdot M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + \frac{k_{zy} M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1$$

Wykres momentów	Zakres	C <sub>my</sub> , C <sub>mz</sub> i C <sub>mLT</sub>	
		Obciążenie równomierne	Obciążenie skupione
	-1 ≤ ψ ≤ 1	0,6 + 0,4ψ ≥ 0,4	

$$C_{my} = 0,6 + 0,4\psi = 0,6 + 0,4 \cdot \left(\frac{166,26}{251,71}\right) = 0,86 > 0,4$$

$$k_{yy} = C_{my} \left( 1 + 0,6 \cdot \bar{\lambda}_y \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) = 0,86 \left( 1 + 0,6 \cdot 0,83 \cdot \frac{42,01 \text{ kN}}{0,71 \cdot \frac{2726 \text{ kN}}{1}} \right) = 0,87$$

$$= C_{my} \left( 1 + 0,6 \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) = 0,86 \left( 1 + 0,6 \cdot \frac{42,01 \text{ kN}}{0,71 \cdot \frac{2726 \text{ kN}}{1}} \right) = 0,87$$

$$k_{yy} = 0,87$$

$$k_{zy} = 0,8 \cdot k_{yy} = 0,8 \cdot 0,87 = 0,70$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + \frac{k_{yy} \cdot M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} = \frac{42,01 \text{ kN}}{0,71 \cdot \frac{2726 \text{ kN}}{1}} + \frac{0,87 \cdot 251,71 \text{ kNm}}{0,66 \cdot \frac{644,14 \text{ kNm}}{1}} = 0,54 < 1$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + \frac{k_{zy} M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} = \frac{42,01 \text{ kN}}{0,31 \cdot \frac{2726 \text{ kN}}{1}} + \frac{0,70 \cdot 251,71 \text{ kNm}}{0,66 \cdot \frac{644,14 \text{ kNm}}{1}} = 0,46 < 1$$

Warunki spełnione

Ostatecznie przyjęto następujące przekroje blachownicy

Lp	Odcinek	$h_w$ [mm]	$t_w$ [mm]	$b_f$ [mm]	$t_f$ [mm]
1	0 – 2 m	600	6	200	20
2	2 m – 6 m	600	6	200	16
3	6 m – 10,5 m	600	6	200	20

## 5.2. Wymiarowanie słupa

Przyjęto słup o następującym przekroju

$h_w$ [mm]	$t_w$ [mm]	$b_f$ [mm]	$t_f$ [mm]
600	6	200	20

### Sprawdzenie SGN

#### Przekrój 2

Siły wewnętrzne

$$M_{Ed} = 314,58 \text{ kNm}$$

$$V_{Ed} = 40,09 \text{ kN}$$

$$N_{Ed} = 115,41 \text{ kN}$$

Klasa przekroju

$$h_w = 600 \text{ mm}$$

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

$$b_f = 200 \text{ mm}$$

$$t_f = 20 \text{ mm}$$

$$\frac{c}{t} = \frac{h_w}{t_w} = \frac{600 \text{ mm}}{6 \text{ mm}} = 100 < 124\varepsilon - \text{klasa 3}$$

$$\frac{c}{t} = \frac{\frac{b_f - t_w}{2}}{t_f} = \frac{\frac{200 \text{ mm} - 6 \text{ mm}}{2}}{20 \text{ mm}} = 4,85 < 9\varepsilon - \text{klasa 1}$$

Przekrój jest klasy 3

Nośność przekroju przy ściskaniu i jednokierunkowym zginaniu (PN-EN 1993-1-5 4.6)

$$\begin{aligned} \eta_1 &= \frac{N_{Ed}}{f_y * A} + \frac{M_{Ed}}{f_y * W_y} \\ &= \frac{115,41 \text{ kN}}{\frac{235000 \text{ kPa} * (0,006 * 0,6 + 2 * 0,20 * 0,02) \text{ m}^2}{1,0}} \\ &\quad + \frac{314,58 \text{ kNm}}{\frac{235000 \text{ kPa} * 0,002741 \text{ m}^3}{1,0}} = 0,53 < 1,0 \end{aligned}$$

Warunek nośności spełniony

Nośność przekroju na ścinanie (PN-EN 1993-1-1 p. 6.2.6., PN-EN 1993-1-5 r. 5)

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{0,6 \text{ m}}{0,006 \text{ m}} = 100 > 72 \frac{\varepsilon}{\eta} = 72 * \frac{1}{1,2} = 60$$

Należy sprawdzić średnik na niestateczność przy ścinaniu

Nośność obliczeniowa przekroju blachownicy przy ścinaniu

$$V_{b,Rd} = V_{b_w,Rd} + V_{b_f,Rd} \leq \frac{\eta * f_{yw} * t_w * h_w}{\sqrt{3} * \gamma_{M1}}$$

Udział średnika w nośności obliczeniowej

$$V_{b_w,Rd} = \chi_w * \frac{f_{yw} * t_w * h_w}{\sqrt{3} * \gamma_{M1}}$$

Względna smukłość płytowa

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{86,4 * t_w * \varepsilon} = \frac{0,6 \text{ m}}{86,4 * 0,006 \text{ m} * 1} = 1,16 > 1,08$$

Współczynnik niestateczności przy ścinaniu dla żebra podporowego podatnego

$$\chi_w = \frac{0,83}{\bar{\lambda}_w} = \frac{0,83}{1,16} = 0,72$$

$$V_{b_w,Rd} = \chi_w * \frac{f_{yw} * t_w * h_w}{\sqrt{3} * \gamma_{M1}} = 0,72 * \frac{235000 \text{ kPa} * 0,006 \text{ m} * 0,6 \text{ m}}{\sqrt{3} * 1} = 351,68 \text{ kN}$$

Pominięto udział pasów w przenoszeniu ścinania

$$V_{b_f,Rd} = 0$$

$$V_{b,Rd} = V_{b_w,Rd} + V_{b_f,Rd} = 351,68 \text{ kN} < \frac{\eta * f_{yw} * t_w * h_w}{\sqrt{3} * \gamma_{M1}} = \frac{1,2 * 235000 \text{ kPa} * 0,006 \text{ m} * 0,6 \text{ m}}{\sqrt{3} * 1} = 586,13 \text{ kN}$$

$$\eta_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{b,Rd}} = \frac{40,09 \text{ kN}}{351,68 \text{ kN}} = 0,11$$

Warunek nośności spełniony

Zginanie ze ścinaniem

$$\eta_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{b,Rd}} = \frac{40,09 \text{ kN}}{351,68 \text{ kN}} = 0,11 < 0,5$$

Wpływ ścinania na nośność przy zginaniu można pominąć



Stateczność pasa przy smukłym środkniku (PN-EN 1993-1-5 r.8)

$$\frac{h_w}{t_w} \leq k * \frac{E}{f_{yf}} \sqrt{\frac{A_w}{A_{fc}}}$$

$$k = 0,55$$

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{0,6 \text{ m}}{0,006 \text{ m}} = 100 < k * \frac{E}{f_{yf}} \sqrt{\frac{A_w}{A_{fc}}} = 0,55 * \frac{210000000 \text{ kPa}}{235000 \text{ kPa}} \sqrt{\frac{0,6 \text{ m} * 0,006 \text{ m}}{0,20 \text{ m} * 0,020 \text{ m}}} = 466,27$$

Warunek spełniony

### Przekrój 16

Siły wewnętrzne

$$M_{Ed} = 243,96 \text{ kNm}$$

$$V_{Ed} = 57,46 \text{ kN}$$

$$N_{Ed} = 143,09 \text{ kN}$$

Klasa przekroju

$$h_w = 600 \text{ mm}$$

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

$$b_f = 200 \text{ mm}$$

$$t_f = 20 \text{ mm}$$

$$\frac{c}{t} = \frac{h_w}{t_w} = \frac{600 \text{ mm}}{6 \text{ mm}} = 100 < 124\varepsilon - \text{klasa 3}$$

$$\frac{c}{t} = \frac{\frac{b_f - t_w}{2}}{t_f} = \frac{\frac{200 \text{ mm} - 6 \text{ mm}}{2}}{20 \text{ mm}} = 4,85 < 9\varepsilon - \text{klasa 1}$$

Przekrój jest klasy 3

Nośność przekroju przy ściskaniu i jednokierunkowym zginaniu (PN-EN 1993-1-5 4.6)

$$\begin{aligned} \eta_1 &= \frac{N_{Ed}}{f_y * A} + \frac{M_{Ed}}{f_y * W_y} \\ &= \frac{143,09 \text{ kN}}{\frac{235000 \text{ kPa} * (0,006 * 0,6 + 2 * 0,20 * 0,02) \text{ m}^2}{1,0}} + \frac{243,96 \text{ kNm}}{\frac{235000 \text{ kPa} * 0,002741 \text{ m}^3}{1,0}} = 0,43 < 1,0 \end{aligned}$$

Warunek nośności spełniony

Nośność przekroju na ścinanie (PN-EN 1993-1-1 p. 6.2.6., PN-EN 1993-1-5 r. 5)

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{0,6 \text{ m}}{0,006 \text{ m}} = 100 > 72 \frac{\varepsilon}{\eta} = 72 * \frac{1}{1,2} = 60$$

Należy sprawdzić średnik na niestateczność przy ścinaniu

Nośność obliczeniowa przekroju blachownicy przy ścinaniu

$$V_{b,Rd} = V_{b_w,Rd} + V_{b_f,Rd} \leq \frac{\eta * f_{yw} * t_w * h_w}{\sqrt{3} * \gamma_{M1}}$$

Udział średnika w nośności obliczeniowej

$$V_{b_w,Rd} = \chi_w * \frac{f_{yw} * t_w * h_w}{\sqrt{3} * \gamma_{M1}}$$

Względna smukłość płytowa

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{86,4 * t_w * \varepsilon} = \frac{0,6 \text{ m}}{86,4 * 0,006 \text{ m} * 1} = 1,16 > 1,08$$

Współczynnik niestateczności przy ścinaniu dla żebra podporowego podatnego

$$\chi_w = \frac{0,83}{\bar{\lambda}_w} = \frac{0,83}{1,16} = 0,72$$

$$V_{b_w,Rd} = \chi_w * \frac{f_{yw} * t_w * h_w}{\sqrt{3} * \gamma_{M1}} = 0,72 * \frac{235000 \text{ kPa} * 0,006 \text{ m} * 0,6 \text{ m}}{\sqrt{3} * 1} = 351,68 \text{ kN}$$

Pominięto udział pasów w przenoszeniu ścinania

$$V_{b_f,Rd} = 0$$

$$V_{b,Rd} = V_{b_w,Rd} + V_{b_f,Rd} = 351,68 \text{ kN} < \frac{\eta * f_{yw} * t_w * h_w}{\sqrt{3} * \gamma_{M1}} = \frac{1,2 * 235000 \text{ kPa} * 0,006 \text{ m} * 0,6 \text{ m}}{\sqrt{3} * 1} = 586,13 \text{ kN}$$

$$\eta_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{b,Rd}} = \frac{57,46 \text{ kN}}{351,68 \text{ kN}} = 0,16$$

Warunek nośności spełniony

Zginanie ze ścinaniem

$$\eta_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{b,Rd}} = \frac{57,46 \text{ kN}}{351,68 \text{ kN}} = 0,16 < 0,5$$

Wpływ ścinania na nośność przy zginaniu można pominąć

Stateczność pasa przy smukłym środkniku (PN-EN 1993-1-5 r.8)

$$\frac{h_w}{t_w} \leq k * \frac{E}{f_{yf}} \sqrt{\frac{A_w}{A_{fc}}}$$

$$k = 0,55$$

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{0,6 \text{ m}}{0,006 \text{ m}} = 100 < k * \frac{E}{f_{yf}} \sqrt{\frac{A_w}{A_{fc}}} = 0,55 * \frac{210000000 \text{ kPa}}{235000 \text{ kPa}} \sqrt{\frac{0,6 \text{ m} * 0,006 \text{ m}}{0,20 \text{ m} * 0,020 \text{ m}}} = 466,27$$

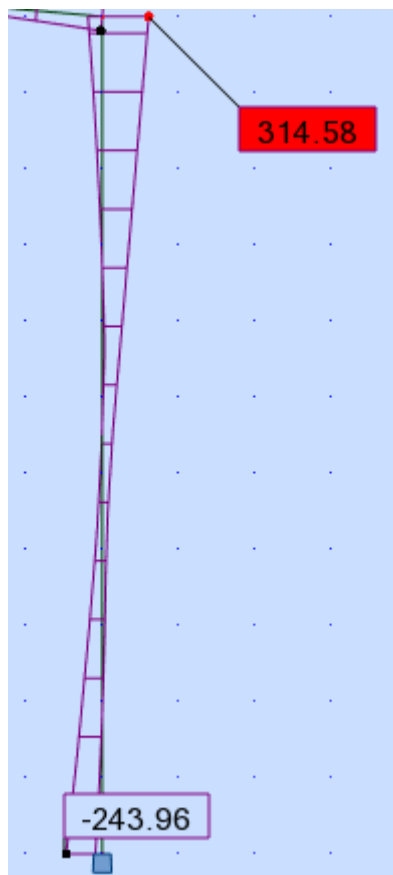
Warunek spełniony

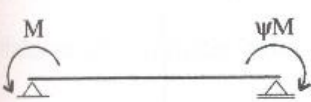

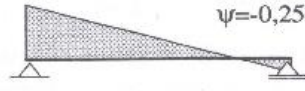
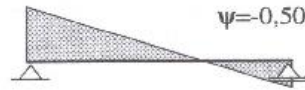
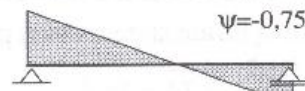
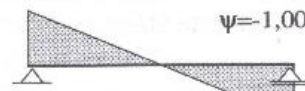
Nośność elementu na zwichrzenie (PN-EN 1991-1-1 p.6.3.2)

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1$$

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} * \frac{W_y * f_y}{\gamma_{M1}}$$

$$M_{cr} = C_1 * \frac{\pi^2 * E * I_z}{(k * l)^2} * \sqrt{\left(\frac{k}{k_\omega}\right)^2 \frac{I_\omega}{I_z} + \frac{(k * l)^2 * G * I_T}{\pi^2 * E * I_z}}$$



		$\psi=0$	1,0	1,879	0,939	
		0,7	2,092	1,473		
		0,5	2,150	2,150		
			$\psi=-0,25$	1,0	2,281	0,855
			0,7	2,538	1,340	
			0,5	2,609	1,957	
			$\psi=-0,50$	1,0	2,704	0,676
			0,7	3,009	1,059	
			0,5	3,093	1,546	
			$\psi=-0,75$	1,0	2,927	0,366
			0,7	3,009	0,575	
			0,5	3,093	0,837	
			$\psi=-1,00$	1,0	2,752	0,000
			0,7	3,063	0,000	
			0,5	3,149	0,000	

$$\psi = \frac{M_1}{M_2} = \frac{243,96}{314,58} = 0,78$$

$$C_1 = 2,927$$

$$k = 1,0$$

$$k_\omega = 1,0$$

$$W_y = 0,002741 \text{ m}^4$$

$$I_z = 0,00002668 \text{ m}^4$$

$$I_\omega = 0,000002564 \text{ m}^6$$

$$I_t = 0,000001045 \text{ m}^4$$

$$l = 11 \text{ m}$$

$$\begin{aligned}
 M_{cr} &= C_1 * \frac{\pi^2 * E * I_z}{(k * l)^2} * \sqrt{\left(\frac{k}{k_\omega}\right)^2 \frac{I_\omega}{I_z} + \frac{(k * l)^2 * G * I_T}{\pi^2 * E * I_z}} \\
 &= 2,927 * \frac{\pi^2 * 210000000 * 0,00002668}{(1 * 11)^2} \\
 &\quad * \sqrt{\left(\frac{1}{1}\right)^2 * \frac{0,000002564}{0,00002668} + \frac{(1 * 5,25)^2 * 81000000 * 0,000001045}{\pi^2 * 210000000 * 0,00002668}} = 522,31 \text{ kNm}
 \end{aligned}$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y * f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{0,002741 * 235000}{522,31}} = 1,11$$

$$\phi_{LT} = 0,5 * [1 + \alpha_{LT} * (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta * \bar{\lambda}_{LT}^2]$$

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

$$\beta = 0,75$$

$$\frac{h}{b} = \frac{0,640}{0,200} = 3,2 > 2 - \text{krzywa zwichrzenia d}$$

$$\alpha_{LT} = 0,76$$

$$\phi_{LT} = 0,5 * [1 + \alpha_{LT} * (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta * \bar{\lambda}_{LT}^2] = 0,5 * [1 + 0,76 * (1,11 - 0,4) + 0,75 * 1,11^2] = 1,23$$

$$\chi_{LT} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \beta * \bar{\lambda}_{LT}^2}} \leq 1 \\ \frac{1}{\bar{\lambda}_{LT}^2} \end{array} \right.$$

$$\chi_{LT1} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \beta * \bar{\lambda}_{LT}^2}} = \frac{1}{1,23 + \sqrt{1,23^2 - 0,75 * 1,11^2}} = 0,50 < 1$$

$$\chi_{LT2} = \frac{1}{\bar{\lambda}_{LT}^2} = \frac{1}{0,50^2} = 4$$

$$\chi_{LT} = 0,50$$

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} * \frac{W_y * f_y}{\gamma_{M1}} = 0,50 * \frac{0,002741 * 235000}{1} = 322,07 \text{ kNm}$$

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} = \frac{314,58}{322,07} = 0,98 < 1$$

Warunek spełniony

Nośność elementu na wyboczenie

Wyboczenie giętne

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1$$

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi * A * f_y}{\gamma_{M1}}$$

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}}$$

$$\Phi = 0,5 * [1 + \alpha * (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2]$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A * f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i * \lambda_1}$$

$$\lambda_1 = 93,9 \text{ cm} = 93,9$$

Względem osi y

$$\mu = \mu(C_1, C_2)$$

$$C_i = \frac{K_c}{K_c + K_{0,i}} \geq 0,3$$

$$K_c = \frac{I_s}{h_s}$$

$$K_{0,i} = \sum_j \eta_{ij} * \frac{I_{b,ij}}{l_{b,ij}}$$

$$I_s = 0,0008771 \text{ m}^4$$

$$h_s = 11 \text{ m}$$

$$K_c = \frac{I_s}{h_s} = \frac{0,0008771 \text{ m}^4}{11 \text{ m}} = 0,00007974 \text{ m}^3$$

$C_1$  – dolny węzeł

$$K_{0,1} = K_c = 0,00007974 \text{ m}^3$$

$$C_1 = \frac{K_c}{K_c + K_{0,1}} = \frac{0,00007974}{0,00007974 + 0,00007974} = 0,5 > 0,3$$

$C_2$  – górny węzeł

$$\eta = 1,0$$

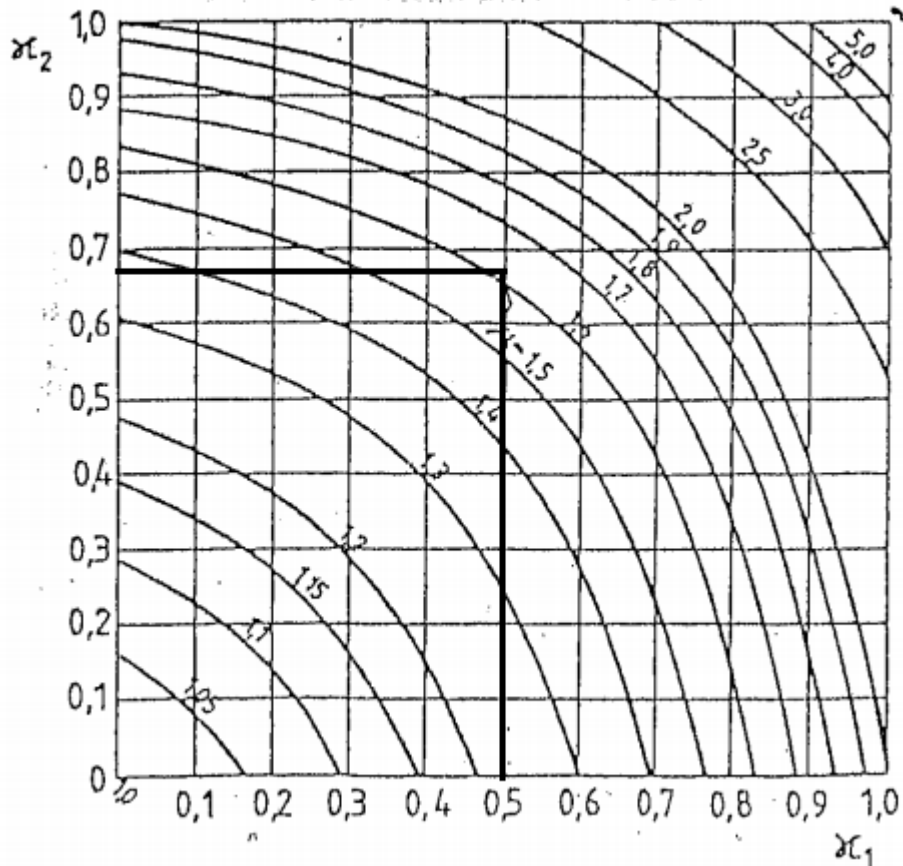
$$I_b = \frac{0,0008771 \text{ m}^4 * 13 \text{ m} + 0,0007153 \text{ m}^4 * 8 \text{ m}}{21 \text{ m}} = 0,0008155 \text{ m}^4$$

$$l_b = 21 \text{ m}$$

$$K_{0,2} = \eta * \frac{I_b}{l_b} = 1 * \frac{0,0008155 \text{ m}^4}{21 \text{ m}} = 0,00003883 \text{ m}^3$$

$$C_2 = \frac{K_c}{K_c + K_{0,2}} = \frac{0,00007974}{0,00007974 + 0,00003883} = 0,67 > 0,3$$

# Układy o węzłach przesuwnych



$$\mu = 1,62$$

$$L_{cr,y} = h * \mu = 11 \text{ m} * 1,62 = 17,82 \text{ m}$$

$$i_y = \sqrt{\frac{I}{A}} = \sqrt{\frac{0,0008771 \text{ m}^4}{0,0116 \text{ m}^2}} = 0,27 \text{ m}$$

$t_f < 40 \text{ mm}$  – krzywa wyboczenia b

$$\alpha = 0,34$$

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{A * f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i * \lambda_1} = \frac{17,82 \text{ m}}{0,27 \text{ m} * 93,9} = 0,70$$

$$\Phi_y = 0,5 * [1 + \alpha * (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] = 0,5 * (1 + 0,34 * (0,70 - 0,2) + 0,70^2) = 0,83$$

$$\chi_y = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{0,83 + \sqrt{0,83^2 - 0,70^2}} = 0,78$$

$$N_{b,Rd,y} = \frac{\chi_y * A * f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,78 * 0,0116 \text{ m}^2 * 235000 \text{ kPa}}{1} = 2126,28 \text{ kN}$$

Względem osi z

$$L_{cr,z} = 5,5 \text{ m}$$

$$i_z = \sqrt{\frac{I}{A}} = \sqrt{\frac{0,00002668 \text{ m}^4}{0,0116 \text{ m}^2}} = 0,048 \text{ m}$$

$t_f < 40 \text{ mm}$  – krzywa wyboczenia c

$$\alpha = 0,49$$

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{A * f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i * \lambda_1} = \frac{5,5 \text{ m}}{0,048 \text{ m} * 93,9} = 1,22$$

$$\Phi_z = 0,5 * [1 + \alpha * (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] = 0,5 * (1 + 0,49 * (1,22 - 0,2) + 1,22^2) = 1,49$$

$$\chi_z = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{1,49 + \sqrt{1,49^2 - 1,22^2}} = 0,43$$

$$N_{b,Rd,z} = \frac{\chi_z * A * f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,43 * 0,0116 \text{ m}^2 * 235000 \text{ kPa}}{1} = 1172,18 \text{ kN}$$

Wyboczenie skrętne (PN-EN 1993-1-1 p.6.3.1.4)

Siła krytyczna wyboczenia skrętnego

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_o^2} \left( GI_t + \frac{\pi^2 EI_w}{L_t^2} \right)$$

$$i_o^2 = i_y^2 + i_z^2 = 0,27^2 + 0,048^2 = 0,075 \text{ m}^2$$

$$L_t = 5,5 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} N_{cr,T} &= \frac{1}{i_o^2} \left( GI_t + \frac{\pi^2 EI_w}{L_t^2} \right) \\ &= \frac{1}{0,075 \text{ m}^2} \\ &\quad * \left( 80770000 \text{ kPa} * 0,000001045 \text{ m}^4 \right. \\ &\quad \left. + \frac{\pi^2 * 210000000 \text{ kPa} * 0,000002564 \text{ m}^6}{(5,5 \text{ m})^2} \right) = 3467,74 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\bar{\lambda}_T = \sqrt{\frac{A * f_y}{N_{cr,T}}} = \sqrt{\frac{0,0116 \text{ m}^2 * 235000 \text{ kPa}}{3467,74 \text{ kN}}} = 0,89$$

$t_f < 40 \text{ mm}$  – krzywa wyboczenia c

$$\alpha = 0,49$$

$$\Phi_T = 0,5 * [1 + \alpha * (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] = 0,5 * (1 + 0,49 * (0,89 - 0,2) + 0,89^2) = 1,07$$

$$\chi_T = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{1,07 + \sqrt{1,07^2 - 0,89^2}} = 0,60$$

$$N_{b,Rd,T} = \frac{\chi_T * A * f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,60 * 0,0116 \text{ m}^2 * 235000 \text{ kPa}}{1} = 1635,6 \text{ kN}$$

$$N_{b,Rd} = \min\{N_{b,Rd,y}; N_{b,Rd,z}; N_{b,Rd,T}\} = N_{b,Rd,z} = 1172,18 \text{ kN}$$




$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} = \frac{143,09 \text{ kN}}{1172,18 \text{ kN}} = 0,12 \leq 1$$

Warunek spełniony

Sprawdzenie nośności elementu zginanego i ściskanego

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + \frac{k_{yy} \cdot M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + \frac{k_{zy} M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1$$

Wykres momentów	Zakres	C <sub>my</sub> , C <sub>mz</sub> i C <sub>mLT</sub>	
		Obciążenie równomierne	Obciążenie skupione
	-1 ≤ ψ ≤ 1	0,6 + 0,4ψ ≥ 0,4	

$$C_{my} = 0,6 + 0,4\psi = 0,6 + 0,4 * \left( \frac{-243,96}{314,58} \right) = 0,29 < 0,4$$

$$C_{my} = 0,4$$

$$k_{yy} = C_{my} \left( 1 + 0,6 * \bar{\lambda}_y * \frac{N_{Ed}}{\chi_y * \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) = 0,4 \left( 1 + 0,6 * 0,70 * \frac{143,09 \text{ kN}}{0,78 * \frac{2726 \text{ kN}}{1}} \right) = 0,41$$

$$< C_{my} \left( 1 + 0,6 * \frac{N_{Ed}}{\chi_y * \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) = 0,4 \left( 1 + 0,6 * \frac{143,09 \text{ kN}}{0,78 * \frac{2726 \text{ kN}}{1}} \right) = 0,42$$

$$k_{yy} = 0,41$$

$$k_{zy} = 0,8 * k_{yy} = 0,8 * 0,41 = 0,33$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + \frac{k_{yy} \cdot M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} = \frac{143,09 \text{ kN}}{0,78 * \frac{2726 \text{ kN}}{1}} + \frac{0,41 * 314,58 \text{ kNm}}{0,50 * \frac{644,14 \text{ kNm}}{1}} = 0,47 < 1$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + \frac{k_{zy} M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} = \frac{143,09 \text{ kN}}{0,43 * \frac{2726 \text{ kN}}{1}} + \frac{0,33 * 314,58 \text{ kNm}}{0,50 * \frac{644,14 \text{ kNm}}{1}} = 0,44 < 1$$

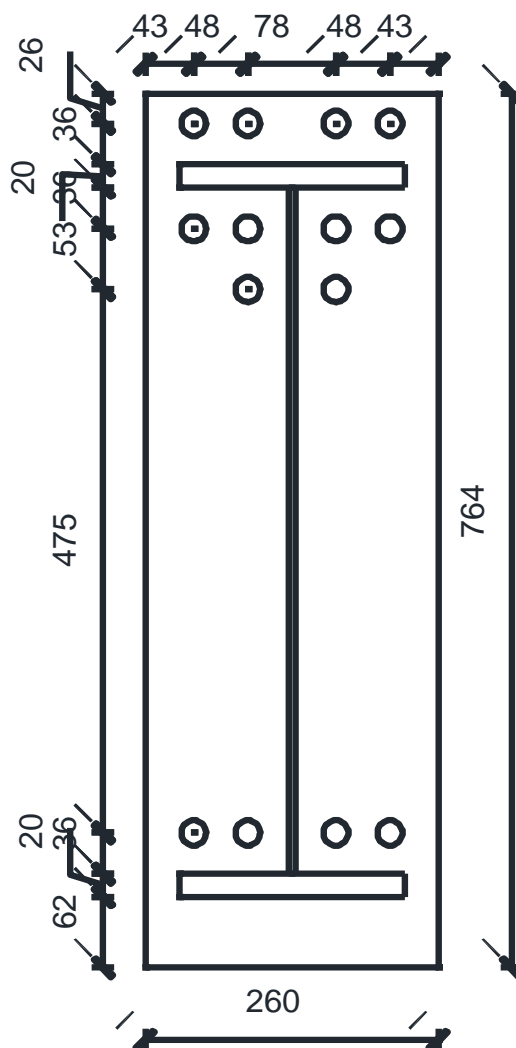
Warunki spełnione

Ostatecznie przyjęto słup o następującym przekroju

h <sub>w</sub>	t <sub>w</sub>	b <sub>f</sub>	t <sub>f</sub>
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
600	6	200	20

### 6.1. Spoiny pasów blachownicy

Warunek spełniony



Siły wewnętrzne

$$M_{Ed} = 314,58 \text{ kNm}$$

$$V_{Ed} = 111,08 \text{ kN}$$

$$N_{Ed} = 40,09 \text{ kN}$$

Spoiny łączące pasy rygla z blachą czołową

$$0,2 * t_{max} = 0,2 * 0,025 \text{ m} = 0,005 \text{ m} \leq a \leq 0,7 * t_{min} = 0,7 * 0,02 \text{ m} = 0,014 \text{ m}$$

Przyjęto  $a = 10 \text{ mm}$

$$l = b_f = 0,2 \text{ m}$$

$$N_t = t_f * b_f * \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 0,02 \text{ m} * 0,2 \text{ m} * \frac{235000 \text{ kPa}}{1} = 940 \text{ kN}$$

$$\sigma = \frac{N_t}{a * 2l} = \frac{940 \text{ kN}}{0,01 \text{ m} * 2 * 0,2 \text{ m}} = 235000 \text{ kPa}$$

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{\sigma}{\sqrt{2}} = \frac{235000 \text{ kPa}}{\sqrt{2}} = 166170 \text{ kPa} < 0,9 * \frac{f_u}{\gamma_{M2}} = 0,9 * \frac{360000 \text{ kPa}}{1,25} = 259200 \text{ kPa}$$

$$\tau_{\parallel} = 0$$

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 * (\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} = \sqrt{166170^2 + 3 * (166170^2)} = 332340 \text{ kPa} < \frac{f_u}{\beta_w * \gamma_{M2}} = \frac{360000 \text{ kPa}}{0,8 * 1,25} = 360000 \text{ kPa}$$

Spoina łącząca środknik rygla z blachą czołową

$$\tau = \frac{f_y}{\sqrt{3} * \gamma_{M0}} = \frac{235000 \text{ kPa}}{\sqrt{3} * 1} = 135677 \text{ kPa}$$

$$f_{vw,d} = \frac{f_u}{\sqrt{3} * \beta_w * \gamma_{M2}} = \frac{360000 \text{ kPa}}{\sqrt{3} * 0,8 * 1,25} = 207846 \text{ kPa}$$

$$a = \frac{\tau}{f_{vw,d}} * t = \frac{135677 \text{ kPa}}{207846 \text{ kPa}} * 0,006 \text{ m} = 0,004 \text{ m}$$

$$0,2 * t_{max} = 0,2 * 0,025 \text{ m} = 0,005 \text{ m} \leq a \leq 0,7 * t_{min} = 0,7 * 0,02 \text{ m} = 0,014 \text{ m}$$

Przyjęto  $a = 6 \text{ mm}$

$$l_w = 0,6 \text{ m} - 2 * 0,01 \text{ m} = 0,58 \text{ m}$$

Sprawdzenie nośności spoin

$$A_w = 2 * 0,58 \text{ m} * 0,006 \text{ m} + 4 * 0,2 \text{ m} * 0,01 \text{ m} = 0,015 \text{ m}^2$$

$$I_y = \frac{0,006 * 0,58^3}{12} + 2 * \left( \frac{0,2 * 0,01^3}{12} + 0,2 * 0,01 * 0,295^2 + \frac{0,2 * 0,01^3}{12} + 0,2 * 0,01 * 0,325^2 \right) \\ = 0,0008682 \text{ m}^4$$

$$\sigma = \frac{M_{Ed} \cdot z}{I_y} + \frac{N_{Ed}}{A_w} = \frac{314,58 * 0,325}{0,0008682} + \frac{40,09}{0,015} = 120432 \text{ kPa}$$

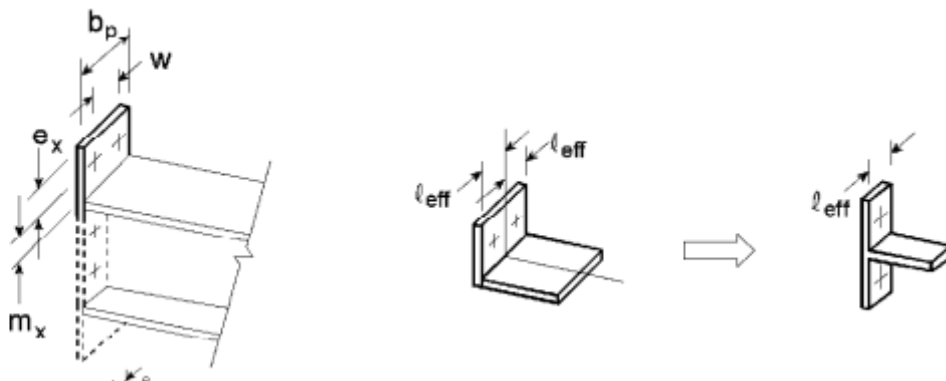
$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{\sigma}{\sqrt{2}} = \frac{120432 \text{ kPa}}{\sqrt{2}} = 85158 \text{ kPa} < 0,9 * \frac{f_u}{\gamma_{M2}} = 0,9 * \frac{360000 \text{ kPa}}{1,25} = 259200 \text{ kPa}$$

$$\tau_{\parallel} = \frac{V_{Ed}}{A_{w1}} = \frac{111,08 \text{ kN}}{(2 * 0,58 * 0,006) \text{ m}^2} = 15960 \text{ kPa}$$

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 * (\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} = \sqrt{85158^2 + 3 * (85158^2 + 15960^2)} = 172545 \text{ kPa} < \frac{f_u}{\beta_w * \gamma_{M2}} \\ = \frac{360000 \text{ kPa}}{0,8 * 1,25} = 360000 \text{ kPa}$$

Nośność blachy czołowej przy zginaniu

Długość efektywna blachy czołowej – model króćca teowego



$$l_{eff(1)} = 0,25 * b_p = 0,25 * 0,26 \text{ m} = 0,065 \text{ m} = 65 \text{ mm}$$

$$m_{1x} = 26 \text{ mm}$$

$$n = e_1 = 43 \text{ mm}$$

$$m_{2z} = 26 \text{ mm}$$

$$n = e_{2z} = 1,25 * 26 \text{ mm} = 32,5 \text{ mm}$$

$$p = 53 \text{ mm}$$

$$l_{eff(2z)} = 0,5w_2 + w_3 = 0,5 * 0,048 + 0,043 = 0,067 \text{ m} = 67 \text{ mm}$$

$$m_{2(2w)} = m_{2z} = 26 \text{ mm}$$

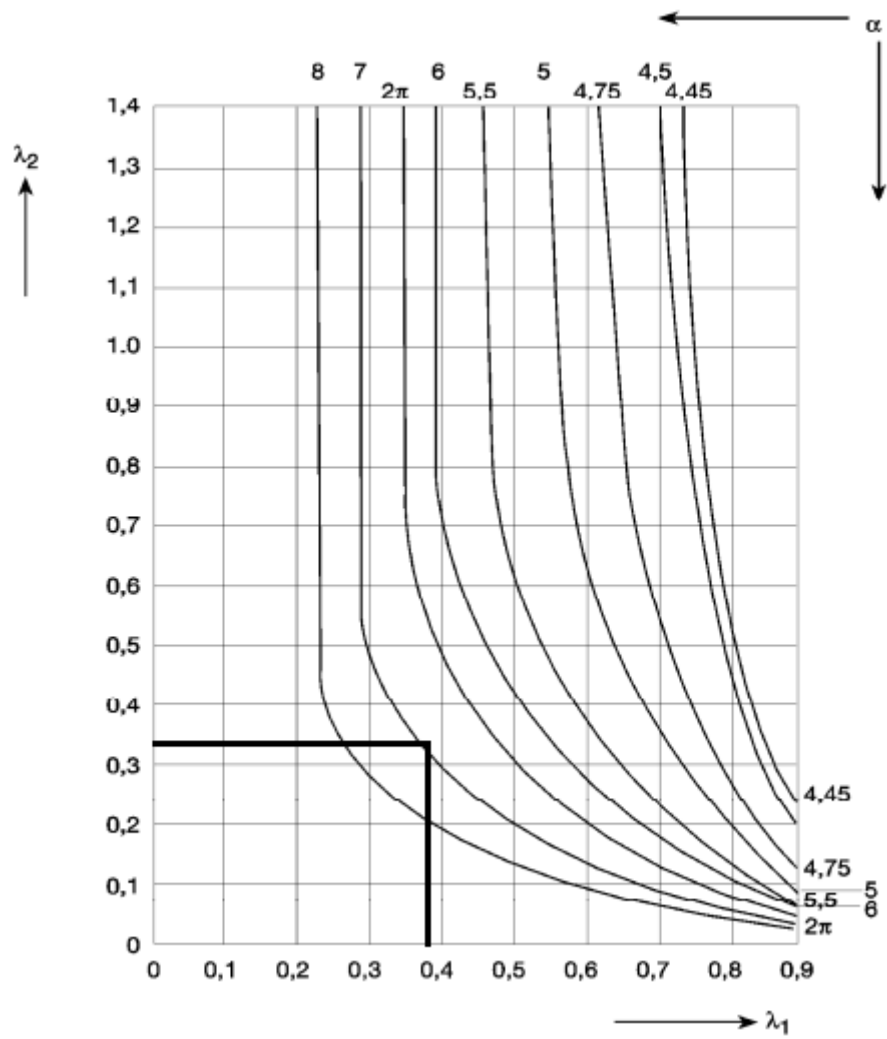
$$m_{2w} = 30 \text{ mm}$$

$$e_{2w} = w_2 = 48 \text{ mm}$$

$$n = 1,25 * m_3 = 1,25 * 30 \text{ mm} = 37,5 \text{ mm}$$

$$\lambda_1 = \frac{m}{m+e} = \frac{30}{30+48} = 0,38$$

$$\lambda_2 = \frac{m_2}{m+e} = \frac{26}{30+48} = 0,33$$



$$\alpha = 7$$

$$\text{Osobno } l_{eff(2w)} = \alpha m = 7 * 30 \text{ mm} = 210 \text{ mm}$$

$$\text{W grupie } l_{eff(2w)} = 0,5p + \alpha m - (2m + 0,625e) = 0,5 * 53 + 7 * 30 - (2 * 30 + 0,625 * 48) = 146,5 \text{ mm}$$

$$m_3 = m_{2w} = 30 \text{ mm}$$

$$e_3 = 91 \text{ mm}$$

$$n = 1,25m_3 = 1,25 * 30 \text{ mm} = 37,5 \text{ mm}$$

$$l_{eff(3)} = 0,5p + 2m + 0,625e = 0,5 * 53 + 2 * 30 + 0,625 * 91 = 143 \text{ mm}$$

Nośności obliczeniowe szeregów śrub

Szereg 1

$$M_{pl,2,Rd(1)} = \frac{0,25 * l_{eff,1} * t_p^2 * f_{y,p}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,25 * 2 * 65 * 25^2 * 235 * 10^{-6}}{1} = 4,77 \text{ kNm}$$

Nośność śruby na rozciąganie

$$F_{t,Rd} = \frac{0,9f_{ub} * A_s}{\gamma_{m2}} = \frac{0,9 * 1000 * 10^{-3} * 245}{1,25} = 176,4 \text{ kN}$$

$$F_{T,2,Rd(1)} = \frac{2 * M_{pl,2,Rd} + n * \Sigma F_{t,Rd}}{m + n} = \frac{2 * 4,77 + 43 * 4 * 176,4}{26 + 43} = 439,86 \text{ kN}$$

Szereg 2

$$M_{pl,2,Rd,2z} = \frac{0,25 * l_{eff(2z)} * t_p^2 * f_{y,p}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,25 * 67 * 25^2 * 255 * 10^{-6}}{1,0} = 2,67 \text{ kNm}$$

$$M_{pl,2,Rd,2w} = \frac{0,25 * l_{eff(2w)} * t_p^2 * f_{y,p}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,25 * 146,5 * 25^2 * 255 * 10^{-6}}{1,0} = 5,84 \text{ kNm}$$

$$F_{T,2,Rd,2z} = \frac{2 * M_{pl,2,Rd} + 2 * n * F_{t,Rd}}{m + n} = \frac{2 * 2,67 * 10^3 + 2 * 32,5 * 176,4}{26 + 32,5} = 287,28 \text{ kN} < 2F_{t,Rd}$$

$$= 2 * 176,4 = 352,8 \text{ kN}$$

$$F_{T,2,Rd,2w} = \frac{2 * M_{pl,2,Rd} + 2 * n * F_{t,Rd}}{m + n} = \frac{2 * 5,84 * 10^3 + 2 * 37,5 * 176,4}{30 + 37,5} = 369,04 \text{ kN} > 2F_{t,Rd}$$

$$= 2 * 176,4 = 352,8 \text{ kN}$$

Nośność połączenia na zginanie

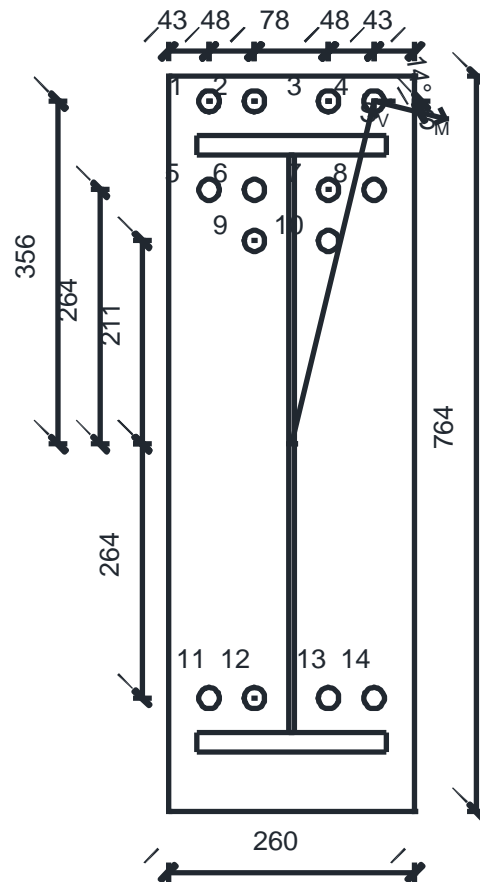
$$M_{j,Rd} = (F_{T,Rd(1)} + F_{T,Rd,2w} + F_{T,Rd,2z}) * h_0 = (439,86 + 287,28 + 352,8) * 0,62 = 669,56 \text{ kNm}$$

$$> M_{Ed} = 314,58 \text{ kNm}$$

Nośność szeregów śrub przylegających do pasa rozciąganego

$$\Sigma F_{T,Rd} = 439,86 + 287,28 + 352,8 = 1079,94 \text{ kN} > \frac{b_f * t_f * f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{0,2 * 0,02 * 235000}{1} = 940 \text{ kN}$$

Nośność pojedynczej śruby (śruba 4)



$$S_V = \frac{V_{Ed}}{n} = \frac{111,08 \text{ kN}}{14} = 7,93 \text{ kN}$$

$$S_M = \frac{M_o * r}{\sum r^2} = \frac{314,58 * 0,367}{2 * 0,367^2 + 2 * 0,358^2 + 4 * 0,278^2 + 4 * 0,267^2 + 2 * 0,215^2} = 95,22 \text{ kN}$$

$$S_{M,\parallel} = S_M * \sin 14^\circ = 95,22 \text{ kN} * \sin 14^\circ = 23,04 \text{ kN}$$

$$S_{M,\perp} = S_M * \cos 14^\circ = 95,22 \text{ kN} * \cos 14^\circ = 92,39 \text{ kN}$$

$$S_{max} = \sqrt{(S_V + S_{M,\parallel})^2 + S_{M,\perp}^2} = \sqrt{(7,93 + 23,04)^2 + 92,39^2} = 97,44 \text{ kN} < 176,4 \text{ kN}$$

### 6.3. Podstawa słupa

Siły wewnętrzne

$$N_{Ed} = -143,09 \text{ kN}$$

$$M_{Ed} = 243,96 \text{ kNm}$$

$$V_{Ed} = 57,46 \text{ kN}$$

Kotwy Hilti HAS-E-F kl. 8.8 M27 o długości 340 mm

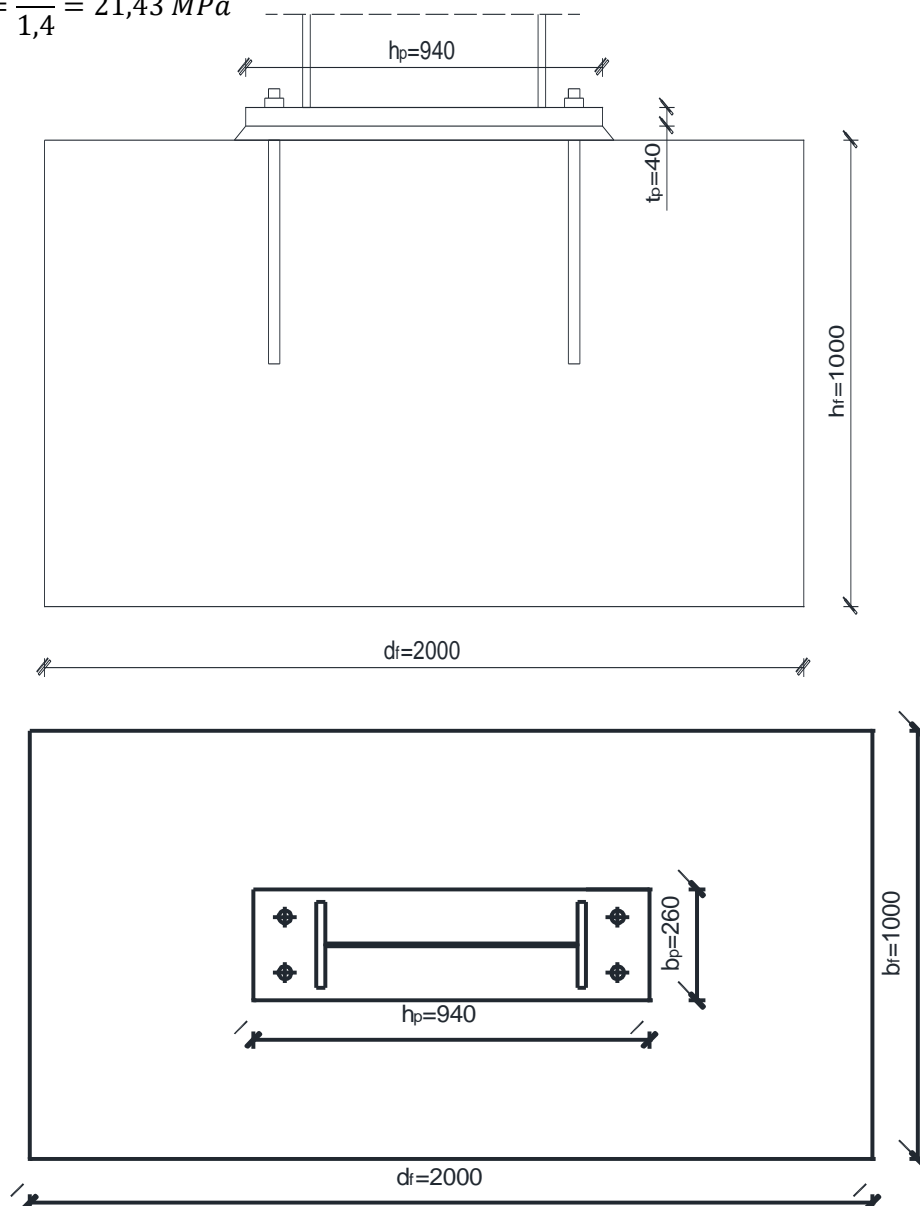
$$f_{yb} = 640 \text{ MPa}$$

$$f_{ub} = 800 \text{ MPa}$$

$$A_s = 4,60 \text{ cm}^2$$

Beton C30/37

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{1,4} = \frac{30}{1,4} = 21,43 \text{ MPa}$$





Spoiny łączące pasy słupa z blachą podstawy

$$0,2 * t_{max} = 0,2 * 0,040 \text{ m} = 0,008 \text{ m} \leq a \leq 0,7 * t_{min} = 0,7 * 0,02 \text{ m} = 0,014 \text{ m}$$

Przyjęto  $a = 10 \text{ mm}$

$$l = b_f = 0,2 \text{ m}$$

$$N_t = t_f * b_f * \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 0,02 \text{ m} * 0,2 \text{ m} * \frac{235000 \text{ kPa}}{1} = 940 \text{ kN}$$

$$\sigma = \frac{N_t}{a * 2l} = \frac{940 \text{ kN}}{0,01 \text{ m} * 2 * 0,2 \text{ m}} = 235000 \text{ kPa}$$

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{\sigma}{\sqrt{2}} = \frac{235000 \text{ kPa}}{\sqrt{2}} = 166170 \text{ kPa} < 0,9 * \frac{f_u}{\gamma_{M2}} = 0,9 * \frac{360000 \text{ kPa}}{1,25} = 259200 \text{ kPa}$$

$$\tau_{\parallel} = 0$$

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 * (\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} = \sqrt{166170^2 + 3 * (166170^2)} = 332340 \text{ kPa} < \frac{f_u}{\beta_w * \gamma_{M2}} = \frac{360000 \text{ kPa}}{0,8 * 1,25} = 360000 \text{ kPa}$$

Spoina łączą środnik słupa z blachą podstawy

$$\tau = \frac{f_y}{\sqrt{3} * \gamma_{M0}} = \frac{235000 \text{ kPa}}{\sqrt{3} * 1} = 135677 \text{ kPa}$$

$$f_{vw,d} = \frac{f_u}{\sqrt{3} * \beta_w * \gamma_{M2}} = \frac{360000 \text{ kPa}}{\sqrt{3} * 0,8 * 1,25} = 207846 \text{ kPa}$$

$$a = \frac{\tau}{f_{vw,d}} * t = \frac{135677 \text{ kPa}}{207846 \text{ kPa}} * 0,006 \text{ m} = 0,004 \text{ m}$$

$$0,2 * t_{max} = 0,2 * 0,04 \text{ m} = 0,008 \text{ m} \leq a \leq 0,7 * t_{min} = 0,7 * 0,02 \text{ m} = 0,014 \text{ m}$$

Przyjęto  $a = 8 \text{ mm}$

$$l_w = 0,6 \text{ m} - 2 * 0,01 \text{ m} = 0,58 \text{ m}$$

Sprawdzenie nośności spoin

$$A_w = 2 * 0,58 \text{ m} * 0,008 \text{ m} + 4 * 0,2 \text{ m} * 0,01 \text{ m} = 0,017 \text{ m}^2$$

$$I_y = \frac{0,008 * 0,58^3}{12} + 2 * \left( \frac{0,2 * 0,01^3}{12} + 0,2 * 0,01 * 0,295^2 + \frac{0,2 * 0,01^3}{12} + 0,2 * 0,01 * 0,325^2 \right) = 0,0009007 \text{ m}^4$$

$$\sigma = \frac{M_{Ed} * z}{I_y} + \frac{N_{Ed}}{A_w} = \frac{243,96 * 0,325}{0,0009007} + \frac{143,09}{0,017} = 96445 \text{ kPa}$$

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{\sigma}{\sqrt{2}} = \frac{96445 \text{ kPa}}{\sqrt{2}} = 68197 \text{ kPa} < 0,9 * \frac{f_u}{\gamma_{M2}} = 0,9 * \frac{360000 \text{ kPa}}{1,25} = 259200 \text{ kPa}$$

$$\tau_{\parallel} = \frac{V_{Ed}}{A_{w1}} = \frac{57,46 \text{ kN}}{(2 * 0,58 * 0,008) \text{ m}^2} = 6192 \text{ kPa}$$

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 * (\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} = \sqrt{68197^2 + 3 * (68197^2 + 6192^2)} = 136815 \text{ kPa} < \frac{f_u}{\beta_w * \gamma_{M2}}$$

$$= \frac{360000 \text{ kPa}}{0,8 * 1,25} = 360000 \text{ kPa}$$

Obliczeniowa nośność pojedynczej kotwy na rozciąganie

$$k_2 = 0,9$$

$$F_{t,Rd} = \frac{k_2 * f_{ub} * A_s}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 * 800000 \text{ kPa} * 0,00046 \text{ m}^2}{1,25} = 264,96 \text{ kN}$$

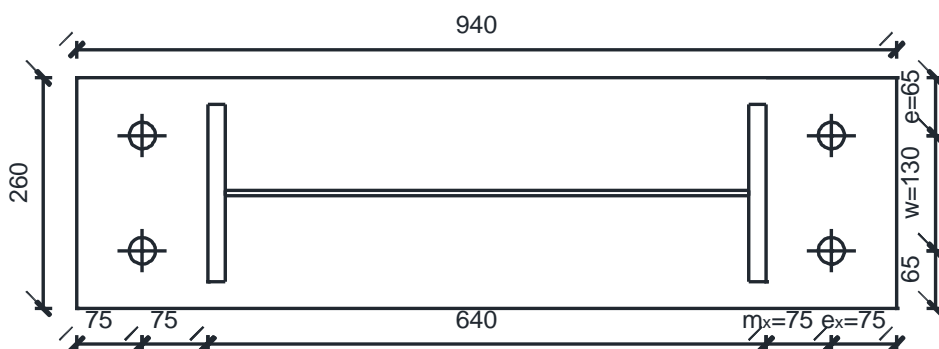
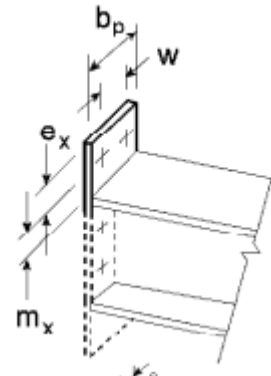
Parametry geometryczne połączenia

Odległość kotew od zewnętrznego brzegu blachy  $e = 65 \text{ mm}$

Odległość śrub od górnego brzegu blachy  $e_x = 75 \text{ mm}$

Odległość śrub od pasa słupa  $m_x = 75 \text{ mm}$

Rozstaw śrub w szeregu  $w = 130 \text{ mm}$



Blacha podstawy przy zginaniu w strefie rozciągania

Długości efektywne blachy podstawy

Mechanizmy kołowe

$$l_{eff,ep} = \min \begin{cases} 2\pi m_x = 2\pi * 75 = 471,2 \text{ mm} \\ \pi m_x + w = \pi * 75 + 130 = 365,6 \text{ mm} \\ \pi m_x + 2e = \pi * 75 + 2 * 65 = 365,6 \text{ mm} \end{cases}$$

$$l_{eff,ep} = 365,6 \text{ mm}$$

Mechanizmy niekołowe

$$l_{eff,ne} = \min \begin{cases} 4m_x + 1,25e_x = 4 * 75 + 1,25 * 75 = 393,8 \text{ mm} \\ e + 2m_x + 0,625e_x = 65 + 2 * 75 + 0,625 * 75 = 261,9 \text{ mm} \\ 0,5b_p = 0,5 * 260 = 130 \text{ mm} \\ 0,5w + 2m_x + 0,625e_x = 0,5 * 130 + 2 * 75 + 0,625 * 75 = 261,9 \text{ mm} \end{cases}$$

$$l_{eff,ne} = 130 \text{ mm}$$

Długość efektywna w modelu 1

$$l_{eff,1} = l_{eff,ne} \leq l_{eff,ep}$$

$$l_{eff,1} = 130 \text{ mm}$$

Długość efektywna w modelu 2

$$l_{eff,2} = l_{eff,ne} = 130 \text{ mm}$$

Obliczenie nośności stopki króćca teowego

$$M_{pl,1,Rd} = \frac{0,25l_{eff,1} * t_p^2 * f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{0,25 * 130 * 40^2 * 235 * 10^{-6}}{1} = 12,22 \text{ kNm}$$

$$\text{Model 1-2 } F_{T,1-2,Rd} = \frac{2M_{pl,1,Rd}}{m_x} = \frac{2 * 12,22}{0,075} = 325,87 \text{ kN}$$

$$\text{Model 3 } F_{T,3,Rd} = \sum F_{t,Rd} = 2 * 264,96 = 529,92 \text{ kN}$$

$$F_{T,Rd} = \min\{F_{T,1-2,Rd}, F_{T,3,Rd}\} = 325,87 \text{ kN}$$

Wytrzymałość obliczeniowa na docisk betonu

Powierzchnia kontaktu płyty podstawy z fundamentem

$$A_{c0} = h_p * b_p = 940 * 260 = 244400 \text{ mm}^2$$

Maksymalne obliczeniowe pole rozkładu obciążenia

$$A_{c1} = \left( h_p + 2 * \frac{h_f}{2 * h_p} * h_p \right) * (b_p + 2b_p) = \left( 940 + 2 * \frac{1000}{2 * 940} * 940 \right) * (260 + 2 * 260) \\ = 1513200 \text{ mm}^2$$

Wytrzymałość obliczeniowa na docisk

$$\alpha = \sqrt{\frac{A_{c1}}{A_{c0}}} = \sqrt{\frac{1513200}{244400}} = 2,49 < 3$$

$$\beta_j = \frac{2}{3}$$

$$f_{jd} = \alpha * \beta_j * f_{cd} = 2,49 * \frac{2}{3} * 21,43 = 35,57 \text{ MPa}$$

Maksymalny wysięg strefy docisku

$$c = t_p \sqrt{\frac{f_{yp}}{3f_{jd} * \gamma_{M0}}} = 40 \sqrt{\frac{235}{3 * 35,57 * 1}} = 59,4 \text{ mm}$$

Obliczeniowa nośność przy ściskaniu króćca teowego

$$\text{Szerokość efektywna } b_{eff} = t_f + 2c = 20 + 2 * 59,4 = 138,8 \text{ mm}$$

$$c = 59,4 \text{ mm} > \frac{b_p - b_c}{2} = \frac{260 - 200}{2} = 30 \text{ mm}$$

$$\text{Długość efektywna } l_{eff} = b_p = 260 \text{ mm}$$

Powierzchnia kontaktu zastępczego króćca teowego z fundamentem

$$A_{c0} = b_{eff} * l_{eff} = 138,8 * 260 = 36088 \text{ mm}^2$$

Maksymalne obliczeniowe pole rozkładu obciążenia dla króćca teowego

$$A_{c1} = 3b_{eff} * 3l_{eff} = 3 * 138,8 * 3 * 260 = 324792 \text{ mm}^2$$

Obliczeniowa nośność na docisk

$$\alpha = \sqrt{\frac{A_{c1}}{A_{c0}}} = \sqrt{\frac{324792}{36088}} = 3$$

$$\begin{aligned} F_{Rdu} &= A_{c0} * f_{cd} * \sqrt{\frac{A_{c1}}{A_{c0}}} = 36088 * 21,43 * 10^{-3} * 3 = 2320,1 \text{ kN} \leq 3 * A_{c0} * f_{cd} \\ &= 3 * 36088 * 21,43 * 10^{-3} = 2320,1 \end{aligned}$$

Obliczeniowa wytrzymałość połączenia na docisk

$$f_{jd} = \frac{\beta_j * F_{Rdu}}{b_{eff} * l_{eff}} = \frac{\frac{2}{3} * 2320,1 * 10^3}{138,8 * 260} = 42,86 \text{ MPa}$$

Obliczeniowa nośność przy ściskaniu króćca teowego

$$F_{C,pl,Rd} = f_{jd} * b_{eff} * l_{eff} = 42,86 * 10^{-3} * 138,8 * 260 = 1546,73 \text{ kN}$$

Obliczeniowa nośność pasa i środka słupa przy poprzecznym ściskaniu

$$M_{c,Rd} = \frac{W_y * f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{0,002741 * 235000}{1,0} = 644,14 \text{ kNm}$$

$$F_{c,fc,Rd} = \frac{M_{c,Rd}}{h_c - t_f} = \frac{644,14}{0,64 - 0,02} = 1038,94 \text{ kN}$$

Obliczeniowa nośność na ściskanie części węzła

$$F_{c,Rd} = \min\{F_{C,pl,Rd}; F_{c,fc,Rd}\} = 1038,94 \text{ kN}$$

Obliczeniowa nośność podstawy słupa przy zginaniu

Ramię dźwigni

$$z_c = \frac{h_c}{2} - \frac{t_f}{2} = \frac{640}{2} - \frac{20}{2} = 310 \text{ mm}$$

$$z_t = \frac{h_c}{2} + 75 = \frac{640}{2} + 75 = 395 \text{ mm}$$

$$z = z_t + z_c = 395 + 310 = 705 \text{ mm}$$

$$\text{Mimośród } e = \frac{M_{Ed}}{-N_{Ed}} = \frac{243,96}{-143,09} = -1,705 \text{ m} = -1705 \text{ mm}$$

Obliczeniowa nośność przy zginaniu

$$M_{j,Rd} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{F_{T,Rd} * z}{\frac{z_c}{e} + 1} = \frac{325,87 * 0,705}{\frac{0,310}{-1,705} + 1} = 280,79 \text{ kNm} \\ \frac{-F_{C,Rd} * z}{\frac{z_t}{e} - 1} = \frac{-1038,94 * 0,705}{\frac{0,395}{-1,705} - 1} = 594,68 \text{ kNm} \end{array} \right.$$

$$M_{j,Rd} = 280,79 \text{ kNm}$$

$$\frac{M_{Ed}}{M_{j,Rd}} = \frac{243,96}{280,79} = 0,87$$

Warunek spełniony

Obliczeniowa nośność ze względu na poślizg

Współczynnik tarcia  $C_{f,d} = 0,2$

$$F_{f,Rd} = C_{f,d} * N_{c,Ed} = 0,2 * 143,09 = 28,62 \text{ kN}$$

Obliczeniowa nośność śrub kotwiących na ścinanie

$$\alpha_v = 0,6$$

$$\alpha_b = 0,44 - 0,0003 f_{yb} = 0,44 - 0,0003 * 640 = 0,25$$

$$F_{1,vb,Rd} = \frac{\alpha_v * f_{ub} * A}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 * 800 * 460 * 10^{-3}}{1,25} = 176,64 \text{ kN}$$

$$F_{2,vb,Rd} = \frac{\alpha_b * f_{ub} * A}{\gamma_{M2}} = \frac{0,25 * 800 * 460 * 10^{-3}}{1,25} = 73,6 \text{ kN}$$

Obliczeniowa nośność śrub kotwiących na docisk

$$e_1 = 65 \text{ mm}$$

$$e_2 = 75 \text{ mm}$$

$$\alpha_b = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{e_1}{3d_0} = \frac{65}{3 * 30} = 0,72 \\ \frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{800}{360} = 2,22 \\ 1,0 \end{array} \right. = 0,72$$

$$k_1 = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{2,8 e_2}{d_0} - 1,7 = 2,8 * \frac{75}{30} - 1,7 = 5,3 \\ 2,5 \end{array} \right. = 2,5$$

$$F_{3,b,Rd} = \frac{k_1 \alpha_b f_u d t}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 * 0,72 * 360 * 10^{-3} * 27 * 40}{1,25} = 559,87 \text{ kN}$$

Obliczeniowa nośność przy obciążeniu siłą poprzeczną blachy podstawy słupa

$$F_{v,Rd} = F_{f,Rd} + n * \min\{F_{1,vb,Rd}; F_{2,vb,Rd}; F_{3,b,Rd}\} = 28,62 + 4 * 73,6 = 323,02 \text{ kN}$$

$$\frac{V_{Ed}}{F_{v,Rd}} = \frac{57,46}{323,02} = 0,18$$

Warunek spełniony

Współczynniki sztywności w przypadku betonu

$$b_{eff} = 138,8 \text{ mm}$$

$$l_{eff} = 260 \text{ mm}$$

$$E_c = 32 \text{ GPa}$$

$$E_s = 210 \text{ GPa}$$

$$k_{13} = \frac{E_c \sqrt{b_{eff} l_{eff}}}{1,275 E_s} = \frac{32 \sqrt{138,8 * 260}}{1,275 * 210} = 22,7 \text{ mm}$$

Współczynniki sztywności w przypadku blachy podstawy

$$l_{eff} = 130 \text{ mm}$$

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

$$k_{15} = \frac{0,425 l_{eff} * t_p^3}{m^3} = \frac{0,425 * 130 * 40^3}{75^3} = 8,4 \text{ mm}$$

Współczynniki sztywności w przypadku śrub kotwiących

$$L_b = 340 \text{ mm}$$

$$k_{16} = \frac{2A_s}{L_b} = \frac{2 * 460}{340} = 2,7 \text{ mm}$$

Sztywność obrotowa podstawy słupa

$$z = z_t + z_c = 395 + 310 = 705 \text{ mm}$$

$$e = -1705 \text{ mm}$$

$$\text{Współczynnik sztywności części węzła przy ściskaniu } k_c = k_{13} = 22,7 \text{ mm}$$

$$\text{Współczynnik sztywności części węzła przy rozciąganiu } k_t = k_{15} + k_{16} = 8,4 + 2,7 = 11,1 \text{ mm}$$

$$M_{j,Ed} = 243,96 \text{ kNm} < \frac{2}{3} M_{j,Rd} = \frac{2}{3} * 280,79 = 187,19 \text{ kNm}$$

$$\mu = 1,0$$

$$e_k = \frac{z_c k_c - z_t k_t}{k_t + k_c} = \frac{310 * 22,7 - 395 * 11,1}{22,7 + 11,1} = 78,5 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} S_{j,ini} &= \frac{E_s * z^2}{\mu * \left( \frac{1}{k_t} + \frac{1}{k_c} \right)} * \frac{e}{e + e_k} = \frac{210 * 10^3 * 705^2}{1 * \left( \frac{1}{22,7} + \frac{1}{11,1} \right)} * \frac{-1705}{-1705 + 78,5} = 8,156 * 10^{11} \frac{\text{Nmm}}{\text{rad}} \\ &= 815600 \frac{\text{kNm}}{\text{rad}} \end{aligned}$$

Klasyfikacja węzła ze względu na sztywność

$$S_{j,ini} = 815600 \frac{kNm}{rad} > 30 \frac{EIc}{L_c} = 30 * \frac{210 * 10^6 * 87707 * 10^{-8}}{11} = 502322 \frac{kNm}{rad}$$

Węzeł jest sztywny



## 7. Słupy ściany szczytowej

Przyjęto stal S235

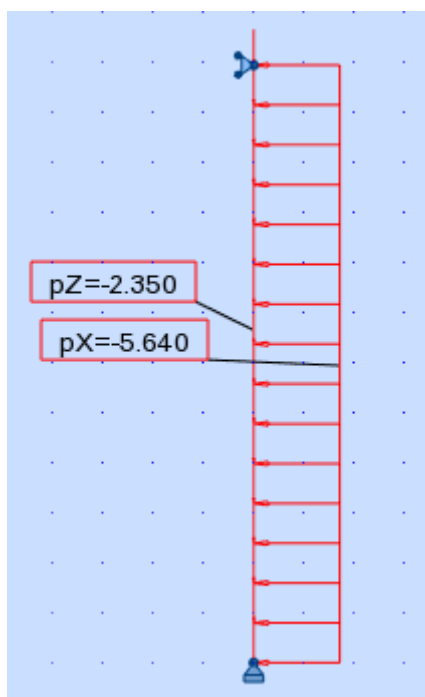
Wstępnie przyjęto słupy o przekroju HEB200

Wysokość słupa:  $h = 11,9 \text{ m}$

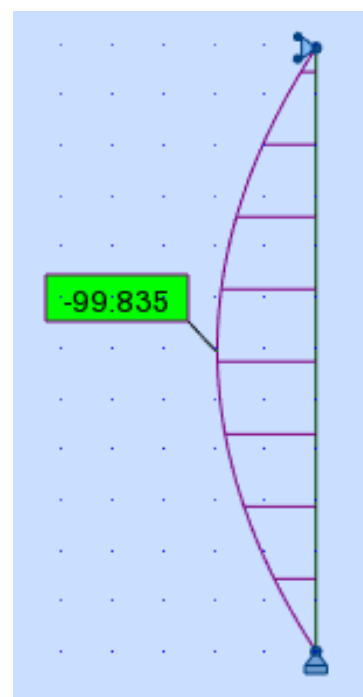
Zestawienie obciążeń na rygiel dachowy

Obciążenie	Obciążenie charakterystyczne k [kN/m]	$\gamma_F$		Obciążenie obliczeniowe d [kN/m]	
		>1	$\leq 1$	>1	$\leq 1$
Stałe g					
słup HEB200	0,60	1,35	1,0	0,81	0,26
obudowa ścian $\left(0,129 \frac{kN}{m^2} + 0,0312 \frac{kN}{m^2} + 0,057 \frac{kN}{m^2}\right) * 5,25 \text{ m}$	1,14	1,35	1,0	1,54	1,14
Razem	1,74	-	-	2,35	1,74
Zmienne q					
wiatr (ssanie) $0,716 \frac{kN}{m^2} * 5,25 \text{ m}$	3,76 kN/m	1,5	0	5,64	0

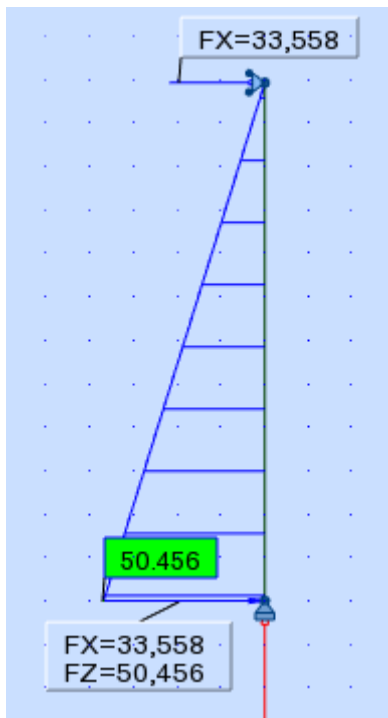
Schemat statyczny



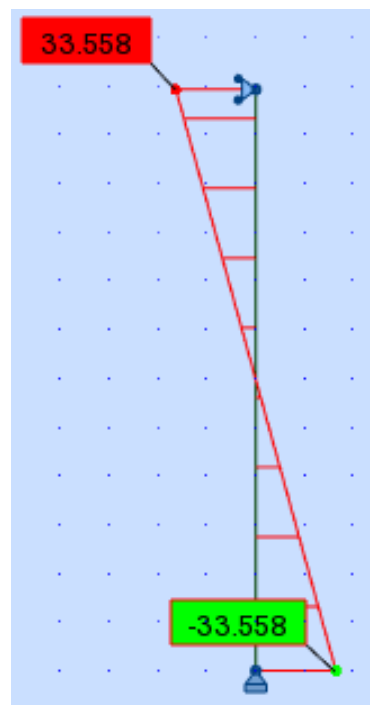
Wykres momentów zginających [kNm]



Wykres sił osiowych i reakcje [kN]



Wykres sił tnących [kN]



Maksymalne siły wewnętrzne

$$M_{Ed} = 99,84 \text{ kNm}$$

$$V_{Ed} = 33,56 \text{ kN}$$

$$N_{Ed} = 50,46 \text{ kN}$$

Nośność przekroju na ściskanie

$$N_{t,Rd} = \frac{A * f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{0,007808 \text{ m}^2 * 235000 \text{ kPa}}{1,0} = 1834,88 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} = \frac{50,46}{1834,88} = 0,03 < 1,0$$

Warunek spełniony

Nośność przekroju na ścinanie

$$V_{c,Rd} = \frac{A_v * \left(\frac{f_y}{\sqrt{3}}\right)}{\gamma_{M0}} = \frac{0,002483 \text{ m}^2 * \left(\frac{235000 \text{ kPa}}{\sqrt{3}}\right)}{1,0} = 336,89 \text{ kN}$$

$$\frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} = \frac{33,56}{336,89} = 0,10 < 0,5$$

Warunek spełniony, nie jest wymagane sprawdzenie interakcji zginania ze ścinaniem

Nośność przekroju na zginanie

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{pl} * f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{0,0006426 \text{ m}^3 * 235000 \text{ kPa}}{1} = 151,01 \text{ kNm}$$

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} = \frac{99,84}{151,01} = 0,66 < 1,0$$

Warunek spełniony

Nośność elementu na zwichrzenie

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1$$

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} * \frac{W_y * f_y}{\gamma_{M1}}$$

$M_{cr} = 137,62 \text{ kNm}$  – wyznaczono przy pomocy programu LTBeam

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y * f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{0,0006426 * 235000}{137,62}} = 1,05$$

$$\phi_{LT} = 0,5 * [1 + \alpha_{LT} * (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta * \bar{\lambda}_{LT}^2]$$

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

$$\beta = 0,75$$

$$\frac{h}{b} = \frac{0,200}{0,200} = 1 < 2 \text{ - krzywa zwichrzenia a}$$

$$\alpha_{LT} = 0,21$$

$$\phi_{LT} = 0,5 * [1 + \alpha_{LT} * (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta * \bar{\lambda}_{LT}^2] = 0,5 * [1 + 0,21 * (1,05 - 0,4) + 0,75 * 1,05^2] = 0,98$$

$$\chi_{LT} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \beta * \bar{\lambda}_{LT}^2}} \leq 1 \\ \frac{1}{\bar{\lambda}_{LT}^2} \end{array} \right.$$

$$\chi_{LT1} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \beta * \bar{\lambda}_{LT}^2}} = \frac{1}{0,98 + \sqrt{0,98^2 - 0,75 * 1,05^2}} = 0,74 < 1$$

$$\chi_{LT2} = \frac{1}{\bar{\lambda}_{LT}^2} = \frac{1}{1,05^2} = 0,91$$

$$\chi_{LT} = 0,74$$

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} * \frac{W_y * f_y}{\gamma_{M1}} = 0,74 * \frac{0,0006426 * 235000}{1} = 111,75 \text{ kNm}$$

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} = \frac{99,84}{111,75} = 0,89 < 1$$

Warunek spełniony

Ostatecznie przyjęto słupy o przekroju HEB200

## 8. Stężenie połączeniowe poprzeczne

Obciążenia:

a) Reakcja z słupów ściany szczytowej  $R = 33,56 \text{ kN}$

b) Obciążenie od imperfekcji ryglu dachowego

Liczba stężanych elementów  $m = 5$

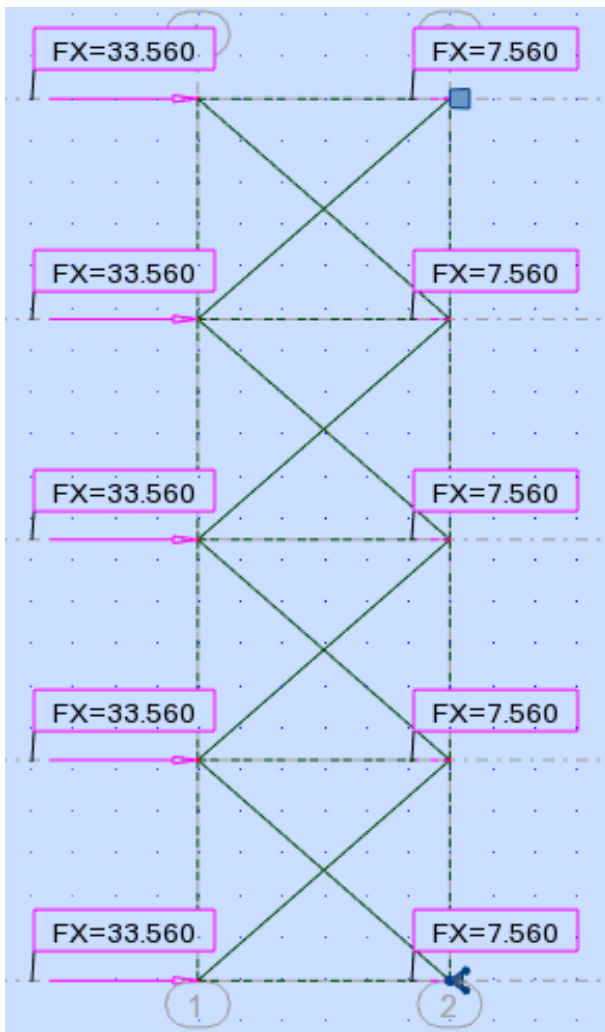
$$\alpha_m = \sqrt{0,5 * \left(1 + \frac{1}{m}\right)} = \sqrt{0,5 * \left(1 + \frac{1}{5}\right)} = 0,77$$

$$e_0 = \alpha_m * \frac{L}{500} = 0,77 * \frac{21 \text{ m}}{500} = 0,032 \text{ m}$$

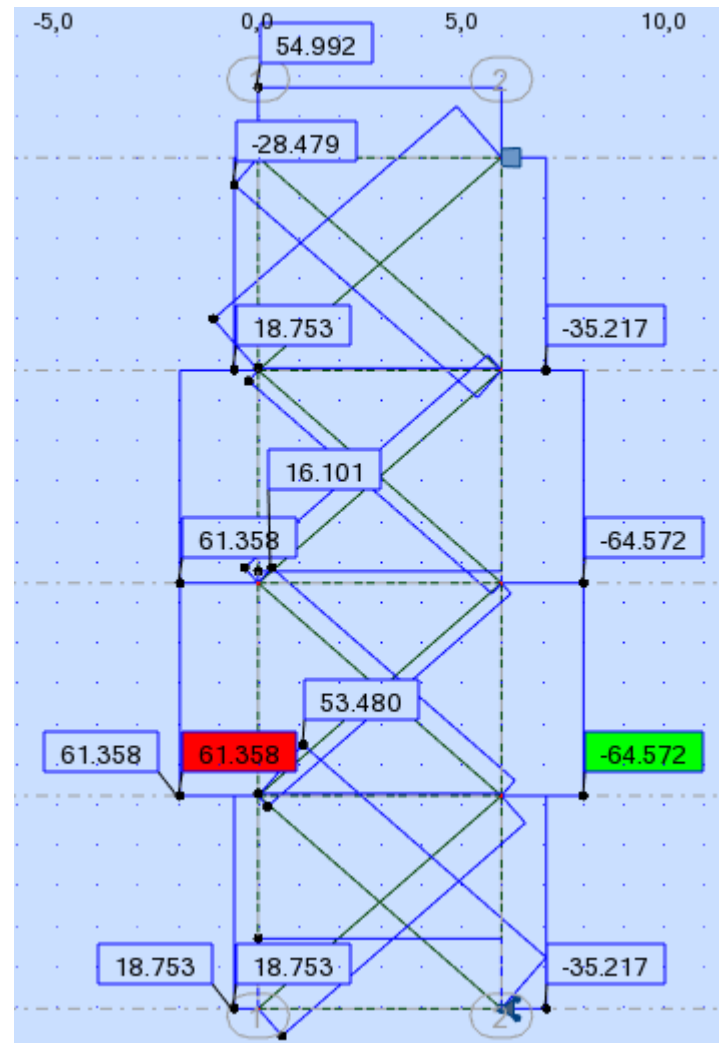
$$N_{Ed} = \frac{N_{Ed,i}}{2} + \frac{M_{Ed}}{h} = \frac{51,89 \text{ kN}}{2} + \frac{300,73 \text{ kNm}}{0,64 \text{ m}} = 495,84 \text{ kN}$$

$$F_m = \sum 8a * N_{Ed} * \frac{e_0}{L^2} = 5 * 8 * 5,25 \text{ m} * 495,84 \text{ kN} * \frac{0,032 \text{ m}}{(21 \text{ m})^2} = 7,56 \text{ kN}$$

Schemat statyczny



Wykres sił osiowych [kN]



Maksymalna siła ściskająca w słupkach:  $N_{Ed,1} = 54,99 \text{ kN}$

Maksymalna siła rozciągająca w krzyżulcach:  $N_{Ed,2} = 28,48 \text{ kN}$

Przyjęto krzyżulce z prętów gładkich gwintowanych na końcach

$$A_{pot} = \frac{N_{Ed,2}}{f_y} = \frac{28,48 \text{ kN}}{235000 \text{ kPa}} = 0,0001212 \text{ m}^2 = 1,21 \text{ cm}^2$$

Przyjęto pręty  $\Phi 16 \text{ A} = 2,01 \text{ cm}^2$

Wstępnie przyjęto słupki z rur okrągłych o średnicy 101,6 mm i grubości ścianki 3 mm

Nośność elementu na ściskanie

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1$$

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi * A * f_y}{\gamma_{M1}}$$

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}}$$

$$\Phi = 0,5 * [1 + \alpha * (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2]$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A * f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i * \lambda_1}$$

$$\lambda_1 = 93,9 \varepsilon = 93,9$$

$$L_{cr} = 6 \text{ m}$$

$$i = 0,035 \text{ m}$$

$$\alpha = 0,21 \text{ krzywa wyboczenia a}$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A * f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i * \lambda_1} = \frac{6 \text{ m}}{0,035 \text{ m} * 93,9} = 1,83$$

$$\Phi = 0,5 * [1 + \alpha * (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] = 0,5 * (1 + 0,21 * (1,83 - 0,2) + 1,83^2) = 2,35$$

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{2,35 + \sqrt{2,35^2 - 1,83^2}} = 0,28$$

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi * A * f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,28 * 0,00093 \text{ m}^2 * 235000 \text{ kPa}}{1} = 61,19 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} = \frac{54,99}{61,19} = 0,90 < 1$$

Warunek spełniony

Ostatecznie przyjęto rury okrągłe 101,6 mm x 3,0 mm

## **Opis techniczny**

### **Podstawa opracowania**

Podstawę opracowania stanowi temat ćwiczenia projektowego nr 5/B02-07d z przedmiotu Konstrukcje Metalowe- Obiekty wydany przez dr inż. Jacka Dudkiewicza.

### **Podstawa formalna**

Podstawę formalną stanowią następujące dokumenty:

- PN-EN 1990:2004 Podstawy projektowania konstrukcji
- PN-EN 1991-1-1 :2004 Oddziaływania na konstrukcje. Oddziaływania ogólne.
- PN-EN 1991-1-6:2007 Oddziaływania na konstrukcje. Oddziaływania ogólne. Oddziaływania w czasie wykonywania konstrukcji.
- PN-EN 1993-1-1:2006 Projektowanie konstrukcji stalowych. Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- PN-EN 1993-1-5:2008 Projektowanie konstrukcji stalowych. Blachownice.
- PN-EN 1993-1-8:2006 Projektowanie konstrukcji stalowych. Projektowanie węzłów.
- PN-EN 1993-1-10:2007 Projektowanie konstrukcji stalowych. Dobór stali ze względu na odporność na kruche pękanie i ciągliwość międzywarstwową
- PN-EN 1996-1-1:2010 Projektowanie konstrukcji murowych. Reguły ogólne dla zbrojonych i niezbrojonych konstrukcji murowych.
- Dz. U. Poz. 1422 Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie

### **Podstawa merytoryczna**

Podstawę merytoryczną stanowią następujące publikacje:

- Bogucki W., Żyburtowicz M., „Tablice do projektowania konstrukcji metalowych”, Arkady, Warszawa 1996
- Rykaluk K., „Konstrukcje stalowe. Podstawy i elementy”, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2006, Wydanie drugie zmienione
- Kozłowski A., „Konstrukcje stalowe. Przykłady obliczeń według PN-EN 1993-1. Cz. 1. Wybrane elementy i połączenia”, 2010, Wydanie drugie poprawione

### **Przedmiot opracowania**

Przedmiotem opracowania jest stalowa konstrukcja hali.

### **Cel i zakres opracowania**

Celem jest wykonanie projektu hali stalowej.

Zakres opracowania to:

- Opis techniczny
- Obliczenia statyczno- wytrzymałościowe

- Rysunki wykonawcze

- Zestawienie stali

### **Lokalizacja**

Lokalizacja projektowanego obiektu to Krapkowice.

### **Geometria**

Rozpiętość ramy wynosi 21 m, długość hali 120 m, a jej wysokość użytkowa to 11 m. Ramy rozstawione są w odległości 6 m.

### **Opis rozwiązań konstrukcyjnych**

Główny dźwigar poprzeczny hali składa się z rygla blachownicowego o zmiennej grubości pasów o rozpiętości 21 m oraz z słupów blachownicowych o stałym przekroju i wysokości 11 m. Połączenia rygla z słupem oraz słupa z fundamentem zaprojektowano jako sztywne. Styki montażowe zaprojektowano jako śrubowe doczołowe sprężone kategorii E. Na dźwigarze dachowym opierają się płatwie zimnogięte BP/Z250. Obudowę dachu stanowi blacha trapezowa Pruszyński T35, płyty z wełny mineralnej o grubości 200 mm oraz izolacja przeciwwilgociowa z papy termozgrzewalnej. Obudowę ścian stanowią kaset ściennie Pruszyński 500/120 wypełnione wełną mineralną oraz blacha elewacyjna firmy ArcelorMittal. Zaprojektowano niezależne stężenia z rur okrągłych 101,6 x 3,0 mm pod płatwiami oraz stężenia połaciowe poprzeczne w formie prętów gładkich o średnicy 16 mm.

### **Zabezpieczenia przeciwpożarowe**

Zabezpieczenie zostanie zrealizowane przy pomocy farby pęczniejącej Flame Stal.

### **Zabezpieczenia antykorozyjne**

Zabezpieczenie zostanie zrealizowane przy pomocy powłoki malarskiej, przy czym należy wykonać 2 warstwy podkładowe oraz 1 warstwę nawierzchniową.

### **Uwagi**

Na każdym etapie montażu wymagana jest kontrola geodezyjna ustawienia elementów.

Na każdym etapie wymagany jest nadzór osoby uprawnionej do kierowania robotami budowlanymi w odpowiednim zakresie.