

1. Opis techniczny

1.1. Podstawa opracowania

Podstawę opracowania stanowi temat ćwiczenia projektowego nr 40 2015/16 z przedmiotu Konstrukcje Metalowe- Elementy i Hale wydany przez dr inż. Pawła Lorkowskiego.

1.2 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

1.3. Podstawa merytoryczna

Podstawę merytoryczną stanowią następujące publikacje:

- Bogucki W., Żybertowicz 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

1.4. Przedmiot opracowania

Przedmiotem opracowania jest stalowa konstrukcja stropu budynku przemysłowego.

1.5. Cel i zakres opracowania

Celem jest wykonanie projektu stropu stalowego.

Zakres opracowania to:

- Opis techniczny

- Obliczenia statyczno- wytrzymałościowe
- Rysunki wykonawcze
- Zestawienie stali

1.6. Opis rozwiązań konstrukcyjnych

Projektowana konstrukcja to strop na belkach stalowych na blasze stalowej budynku przemysłowego o obciążeniu stropu 6,3 kPa.

Strop składa się z belek stalowych drugorzędnych A1, A3, podciągu drugorzędного P1, blachownicy pierwszorzędnej P1 oraz słupa stalowego S1.

Belka A1 to belka o profilu dwuteowym IPE360 i długości 6300 mm. Połączenie z blachownicą przewidziano jako połączenie śrubowe zakładkowe kategorii A na śruby zwykle wykonane przy pomocy 3 śrub M20 klasy 8.8. Zostanie ono zrealizowane poprzez żebro pośrednie o grubości 12 mm przyspawane do blachownicy spoiną pachwinową. Liczba belek drugorzędnych A1 wynosi 12 (po 6 z każdej strony), a ich rozstaw to 3300 mm. Belki skrajne odległa od lica ściany lub od podciągu P1 o 3200 mm.

Belka A3 to belka o profilu dwuteowym IPE360 i długości 5700 mm. Połączenie z podciągiem P1 przewidziano jako połączenie śrubowe zakładkowe kategorii A na śruby zwykle wykonane przy pomocy 3 śrub M20 klasy 8.8. Zostanie ono zrealizowane poprzez blachę węzłową o grubości 8 mm przyspawaną do podciągu P1 spoiną pachwinową. Liczba belek drugorzędnych A3 wynosi 2, a ich rozstaw to 4000 mm. Belki skrajne odległa od lica ściany o 4000 mm.

Podciąg P1 to belka o profilu dwuteowym IPE450 i długości 6300 mm. Połączenie z blachownicą przewidziano jako połączenie śrubowe zakładkowe kategorii A na śruby zwykle wykonane przy pomocy 3 śrub M20 klasy 8.8. Zostanie ono zrealizowane poprzez żebro podporowe o grubości 12 mm przyspawane do blachownicy spoiną pachwinową. Liczba podciągów drugorzędnych P1 wynosi 2 (po 1 z każdej strony). Oparcie na murze zostanie zrealizowane poprzez podławkę cementową o grubości 30 mm.

Blachownica jest podzielona na 3 elementy wysyłkowe: B1, B2, B3 o długościach kolejno 8500 mm, 6200 mm, 8500 mm. Wykonana zostanie z blach stalowych spawanych. Wysokość średnika wynosi 1395 mm, a jego grubość to 8 mm. Grubości pasów są zróżnicowane i wynoszą 16 mm, 25 mm oraz 28 mm. Zaprojektowano uźebrowanie blachownicy. Zarówno żebra podporowe, jak i pośrednie mają grubość 12 mm. Żebra pośrednie rozmieszczono w rozstawie 1650 mm, znajdują się one w miejscu przyłożenia belek A1 oraz w połowie ich rozstawu. Blachownica będzie opierała się z jednej strony na słupie, z drugiej na murze. Oparcie na murze zaprojektowano poprzez łożysko o wymiarach 330 mm x 100 mm, wysokości 18 mm i promieniu krzywizny 500 mm, które zostanie ułożone na blasze o wymiarach 500 mm x 200 mm oraz grubości 22 mm. Blacha zostanie ułożona na 30 mm warstwie podławki cementowej. Oparcie na słupie zaprojektowano poprzez łożysko o wymiarach 330 mm x 100 mm, wysokości 18 mm i promieniu krzywizny 500 mm oraz głowicę wykonaną z blachy o wymiarach 400 mm x 300 mm oraz grubości 23 mm.

Słup S1 zaprojektowano jako słup dwugałęziowy z przewiązkami podparty przegubowo. Jako gałęzie słupa dobrano 2 ceowniki C200 o długości 9684 mm. Przewidziano przewiązki w

rozstawie 1370 mm, skrajne o wymiarach 210 mm x 150 mm i grubości 10 mm oraz pośrednie o wymiarach 210 mm x 100 mm i grubości 7 mm. Zostanie umieszczony na blasze podstawy o wymiarach 410 mm x 300 mm, zakotwionej do betonu. Przy przewiązce znajdującej się najbliżej połowy wysokości słupa zaprojektowano przeponę poziomą zapobiegającą skręceniu.

1.7. Wytyczne realizacji montażu

Montaż należy rozpocząć od ustawienia słupa S1, który po złożeniu u umiejscowieniu należy tymczasowo zabezpieczyć. Następnie należy zmontować elementy wysyłkowe blachownicy B1, B2, B3 i ułożyć blachownicę na słupie i murze poprzez łożyska wraz blachami podkładowymi. Do blachownicy następnie należy zamontować podciągi P1, P1* oraz belki A1, A1*. Do podciągów P1, P1* należy przymocować belki A3. Kolejnym krokiem jest ułożenie blachy trapezowej na belkach A1, A1*, A3 oraz montaż sufitów podwieszanych. Ostatecznie należy wykonać warstwy podłogi. Należy pamiętać o odpowiednim zabezpieczeniu przeciwpożarowym i antykorozyjnym elementów.

1.8. Zabezpieczenia przeciwpożarowe

Zgodnie z Dz. U. Poz. 1422 Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie, strop budynku przemysłowego powinien spełniać wymagania klasy REI60. Zabezpieczenie zostanie zrealizowane przy pomocy farby pęczniącej Flame Stal.

1.9. Zabezpieczenia antykorozyjne

Zabezpieczenie zostanie zrealizowane przy pomocy powłoki malarskiej, przy czym należy wykonać 2 warstwy podkładowe oraz 1 warstwę nawierzchniową.

1.10. Uwagi

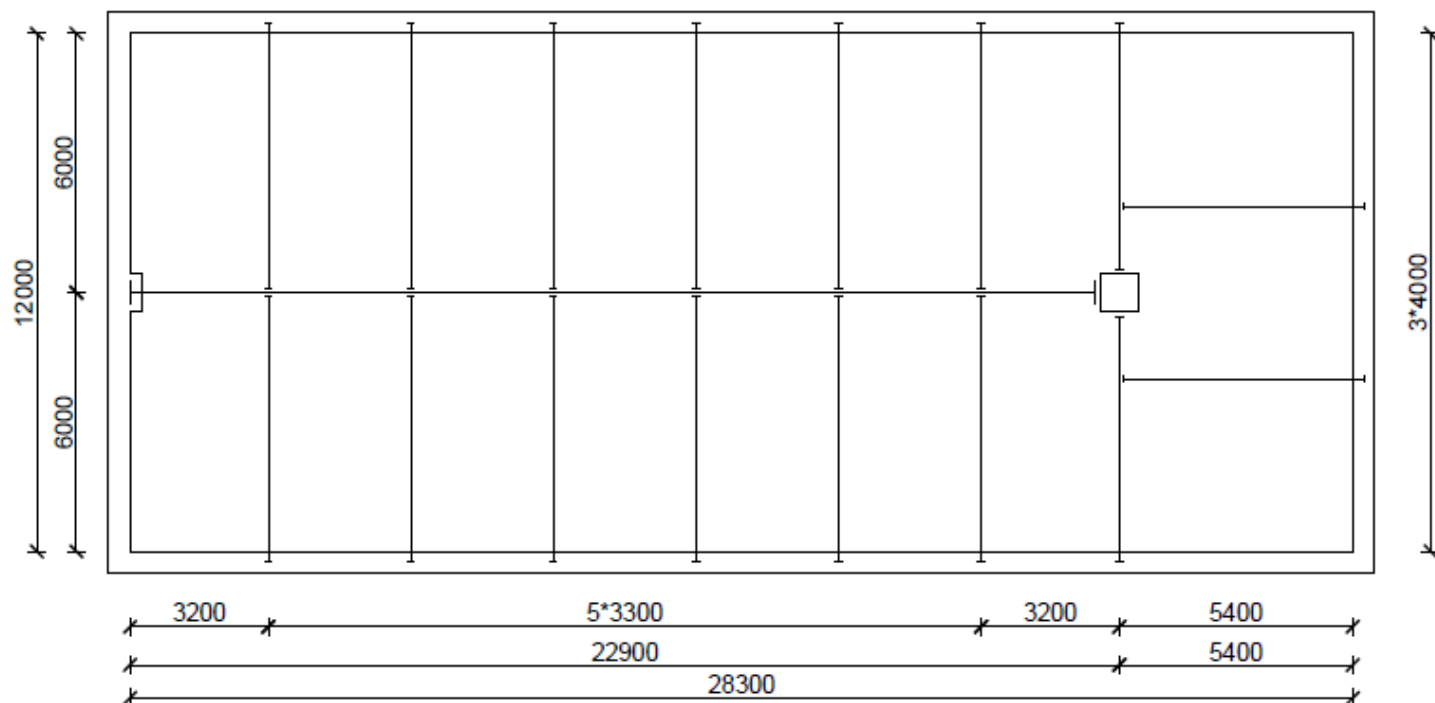
Na każdym etapie montażu stropu wymagana jest kontrola geodezyjna ustawienia słupa i blachownicy.

Na każdym etapie wymagany jest nadzór osoby uprawnionej do kierowania robotami budowlanymi w odpowiednim zakresie.

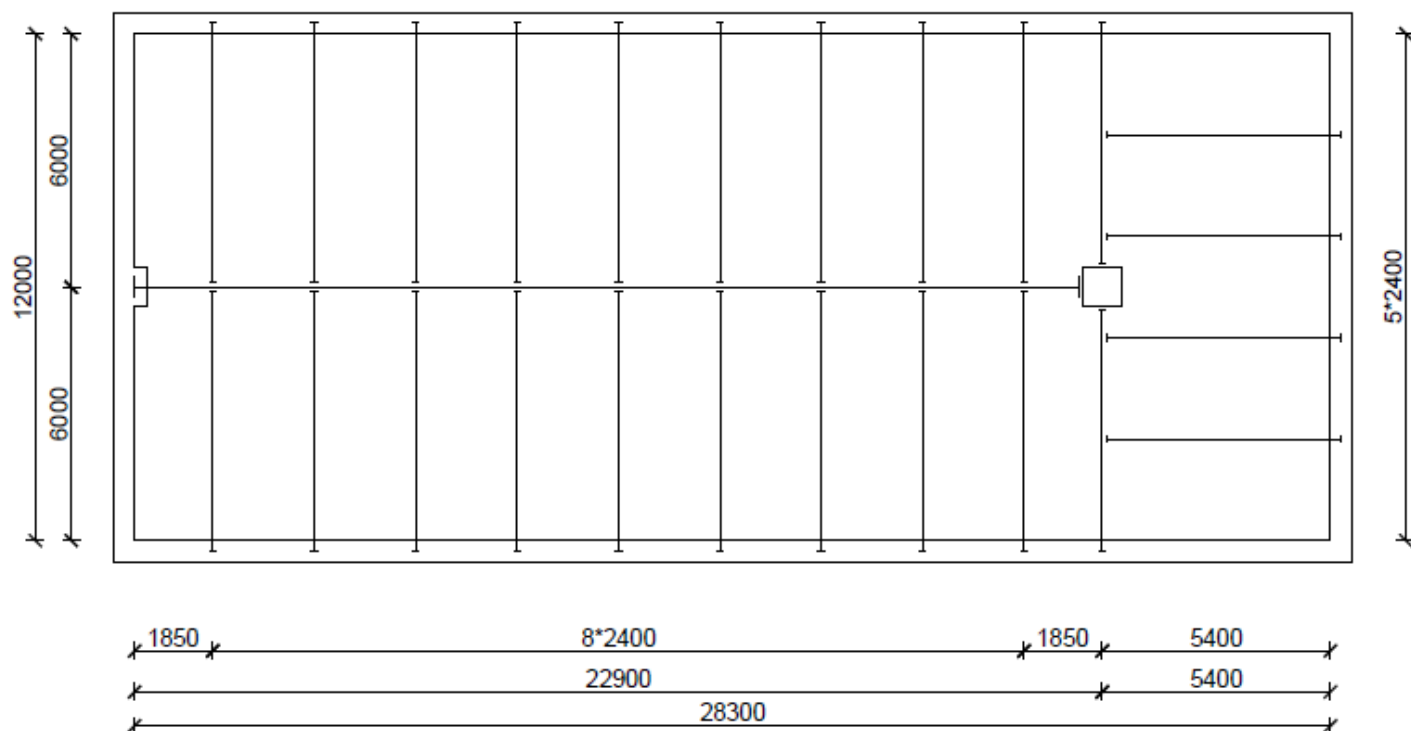
2. Obliczenia statyczno- wytrzymałościowe

2.1. Rozmieszczenie belek stropowych

Rozmieszczenie belek stropowych - wariant A



Rozmieszczenie belek stropowych - wariant B



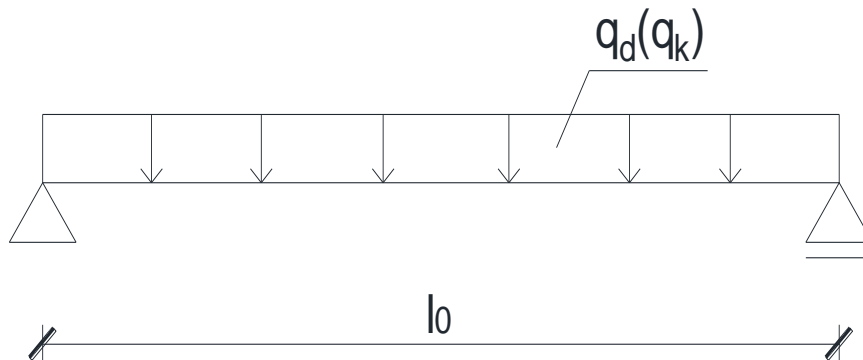
Przyjęto wariant A

2.2 Zestawienie obciążeń stropu [kN/m²] (charakterystyczne, obliczeniowe, montażowe)

LP	Obciążenie	Grubość [m]	Ciężar objętościowy [kN/m ³]	Wartość charakterystyczna [kN/m ²]	Charakter obciążenia
Faza użytkowania					
1	płytki ceramiczne	0,01	21	0,21	stałe
2	gładź cementowa	0,045	21	0,95	stałe
3	styropian	0,05	0,45	0,023	stałe
4	beton	0,05	24	1,2	stałe
5	blacha trapezowa 3 przęsłowa układana zakładkowo na pozytyw	0,015	-	0,19	stałe
6	Sufit podwieszany Rigips Quattro 40	-	-	0,12	stałe
Razem				2,69	-
7	Obciążenie użytkowe	-	-	6,3	zmienne
Faza montażu					
1	beton	0,05	25	1,25	stałe
2	blacha trapezowa 3 przęsłowa układana zakładkowo na pozytyw	0,015	-	0,19	stałe
Razem				1,44	-
3	Obciążenie montażowe	-	-	1,5	zmienne

2.3. Obliczenia belki A1

2.3.1. Schemat statyczny



$c = 6 \text{ m}$ – rozpiętość belki w świetle

$$l_0 = c * 1,025 = 6 * 1,025 = 6,15 \text{ m}$$

2.3.2. Wstępny dobór przekroju belki (ze wzgl. Na SGN i SGU)

Przyjęto stal S235 o $f_y = 235 \text{ MPa}$ i $E = 210 \text{ GPa}$

Obszar oddziaływania obciążenia – rozstaw belek – $3,3 \text{ m}$

Kombinacja obciążeń dla SGN (na podstawie wzoru 6.10 PN-EN 1990) – faza użytkowania:

$$q_d = (1,35 * 2,69 + 1,5 * 6,3) * 3,3 = 43,17 \text{ kN/m}$$

Kombinacja obciążeń dla SGU (na podstawie wzoru 6.14b PN-EN 1990) – faza użytkowania:

$$q_k = (2,69 + 6,3) * 3,3 = 29,67 \text{ kN/m}$$

$$M_{Ed} = M_{max} = \frac{q_d * l_0^2}{8} = \frac{43,17 * 6,15^2}{8} = 204,01 \text{ kNm}$$

$$M_{max} \leq M_{c,Rd}$$

$$M_{c,Rd} = \frac{W * f_y}{\gamma_{M0}}$$

$$W_y \geq \frac{M_{c,Rd} * \gamma_{M0}}{f_y} = \frac{204,01 * 1}{235000} = 0,00087 \text{ m}^3 = 870 \text{ cm}^3$$

$$u \leq u_{dop} = \frac{1}{250} l_0$$

$$u = \frac{5}{384} * \frac{q_k * l_0^4}{EI} \leq u_{dop}$$

$$I_y \geq \frac{625}{192} * \frac{q_k * l_0^3}{E} = \frac{625 * 29,67 * 6,15^3}{192 * 210000000} = 0,00011 \text{ m}^4 = 11000 \text{ cm}^4$$

Dobrano belkę IPE360 o następujących charakterystykach:

$$h = 360 \text{ mm}$$

$$h_w = 299 \text{ mm}$$

$$t_w = 8 \text{ mm}$$

$$b_f = 170 \text{ mm}$$

$$t_f = 12,7 \text{ mm}$$

$$A = 72,7 \text{ cm}^2$$

$$c = 63 \text{ mm}$$

$$r = 18 \text{ mm}$$

$$g = 0,571 \text{ kN/m}$$

$$W_y = 904 \text{ cm}^3$$

$$W_z = 123 \text{ cm}^3$$

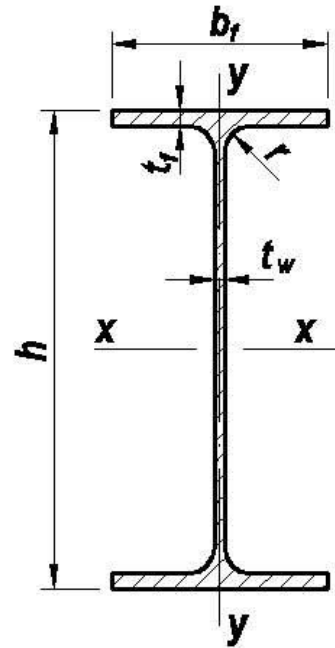
$$I_y = 16270 \text{ cm}^4$$

$$I_z = 1040 \text{ cm}^4$$

$$I_o = 313600 \text{ cm}^6$$

$$I_T = 38,30 \text{ cm}^4$$

$$W_{y,pl} = 1020 \text{ cm}^3$$



2.3.3. Zestawienie obciążeń

LP	Obciążenie	Grubość [m]	Ciężar objętościowy [kN/m ³]	Wartość charakterystyczna [kN/m ²]	Wartość charakterystyczna [kN/m]	Charakter obciążenia
Faza użytkowania						
1	płytki ceramiczne	0,01	21	0,21	0,69	stałe
2	gładź cementowa	0,045	21	0,95	3,14	stałe
3	styropian	0,05	0,45	0,023	0,076	stałe
4	beton	0,05	24	1,2	3,96	stałe
5	blacha trapezowa 3 przęsłowa układana zakładkowo na pozytyw	0,015	-	0,19	0,63	stałe
6	Belka stalowa IPE360	-	-		0,57	stałe
7	Sufit podwieszany Rigips Quattro 40	-	-	0,12	0,40	stałe
Razem					9,47	-
8	Obciążenie użytkowe	-	-	6,3	20,79	zmiennie
Faza montażu						
1	beton	0,05	25	1,25	4,13	stałe
2	blacha trapezowa 3 przęsłowa układana zakładkowo na pozytyw	0,015	-	0,19	0,63	stałe
3	Belka stalowa IPE360	-	-		0,57	stałe
Razem					5,33	-
4	Obciążenie montażowe	-	-	1,5	4,95	zmiennie

Kombinacja obciążeń dla SGN (faza użytkowania):

$$q_d = 1,35 * 9,47 + 1,5 * 1 * 20,79 = 43,97 \text{ kN/m (wzór 6.10a PN-EN 1990)}$$

$$q_d = 1,15 * 9,47 + 1,5 * 20,79 = 42,08 \text{ kN/m (wzór 6.10b PN-EN 1990)}$$

Przyjęto $q_d = 43,97 \text{ kN/m}$

Kombinacja obciążeń dla SGU (faza użytkowania):

$$q_k = 9,47 + 20,79 = 30,26 \text{ kN/m (wzór 6.14b PN-EN 1990)}$$

Kombinacja obciążeń dla SGN (faza montażu):

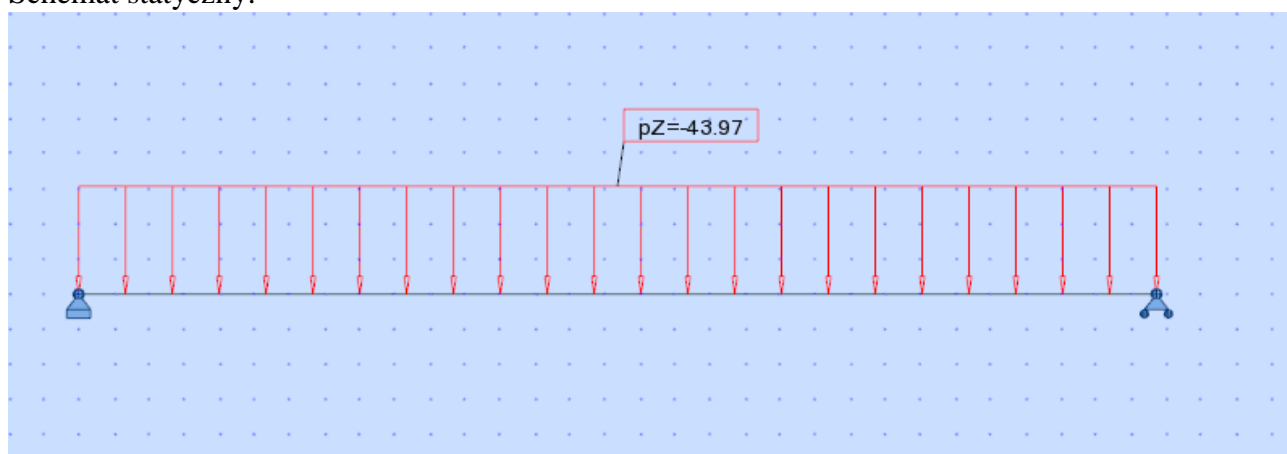
$$q_m = 1,35 * 5,33 + 1,5 * 1 * 4,95 = 7,20 \text{ kN/m} + 7,43 \text{ kN/m (wzór 6.10a PN-EN 1990)}$$

2.3.4. Obliczenie sił wewnętrznych

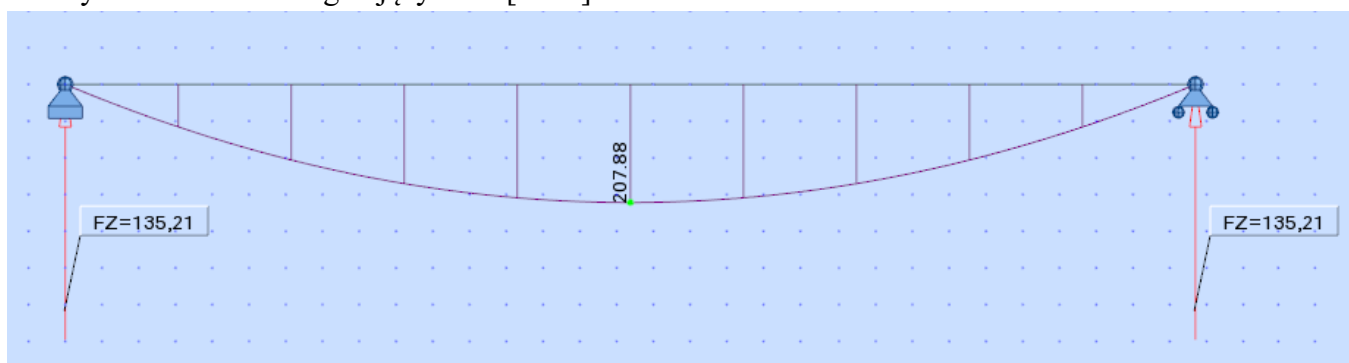
2.3.4.1. Siły wewnętrzne dla obciążeń użytkowych

Dla SGN:

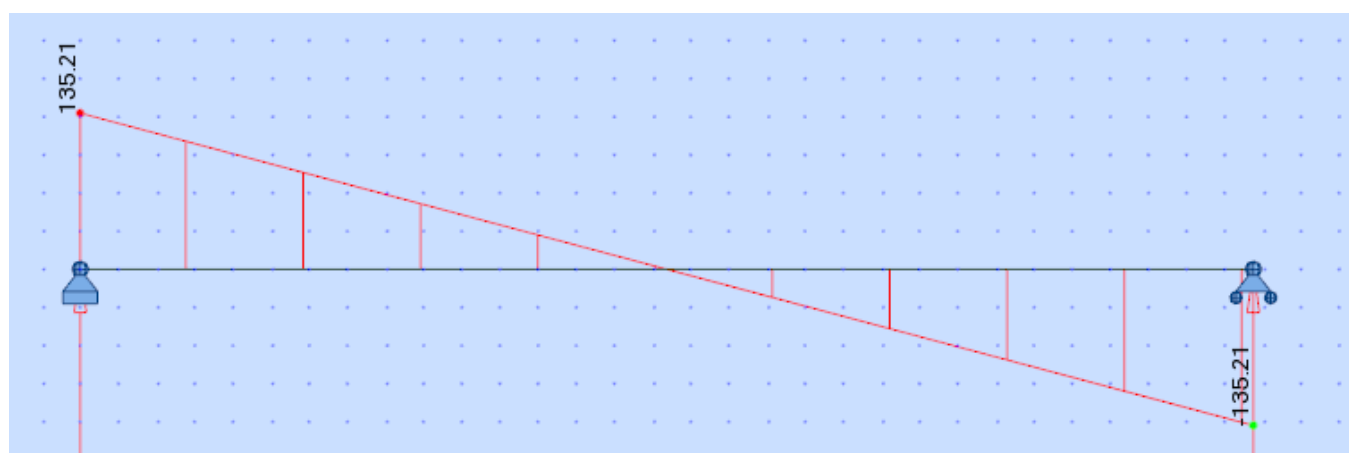
Schemat statyczny:



Wykres momentów zginających M [kNm]:

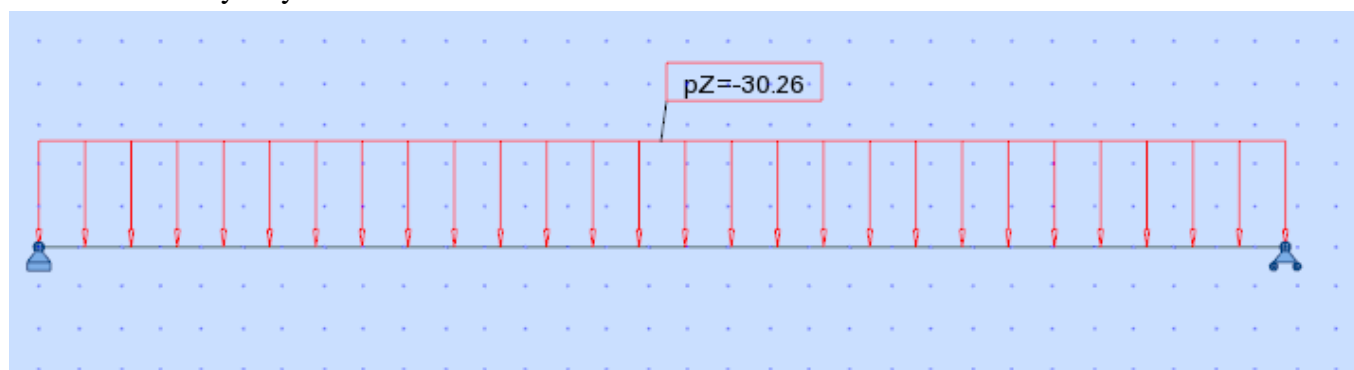


Wykres sił tnących V [kN]:

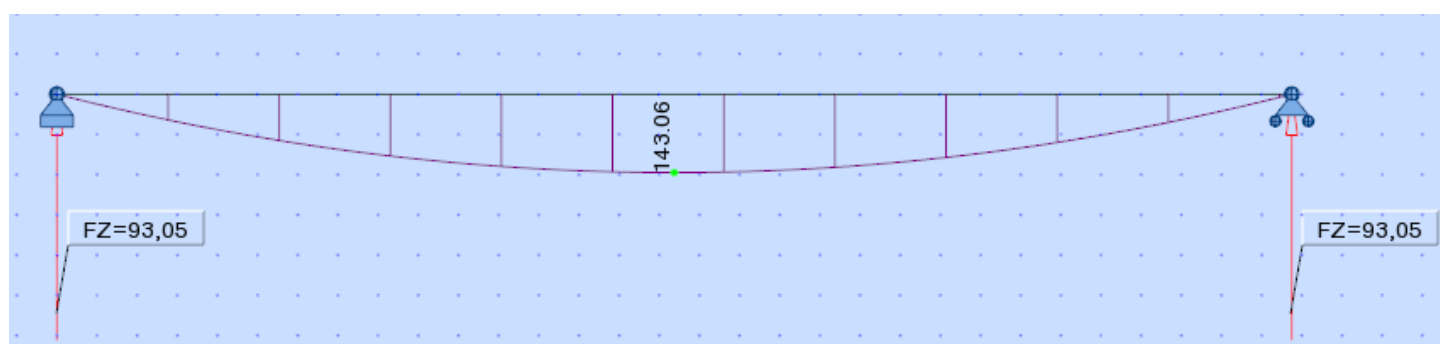


Dla SGU:

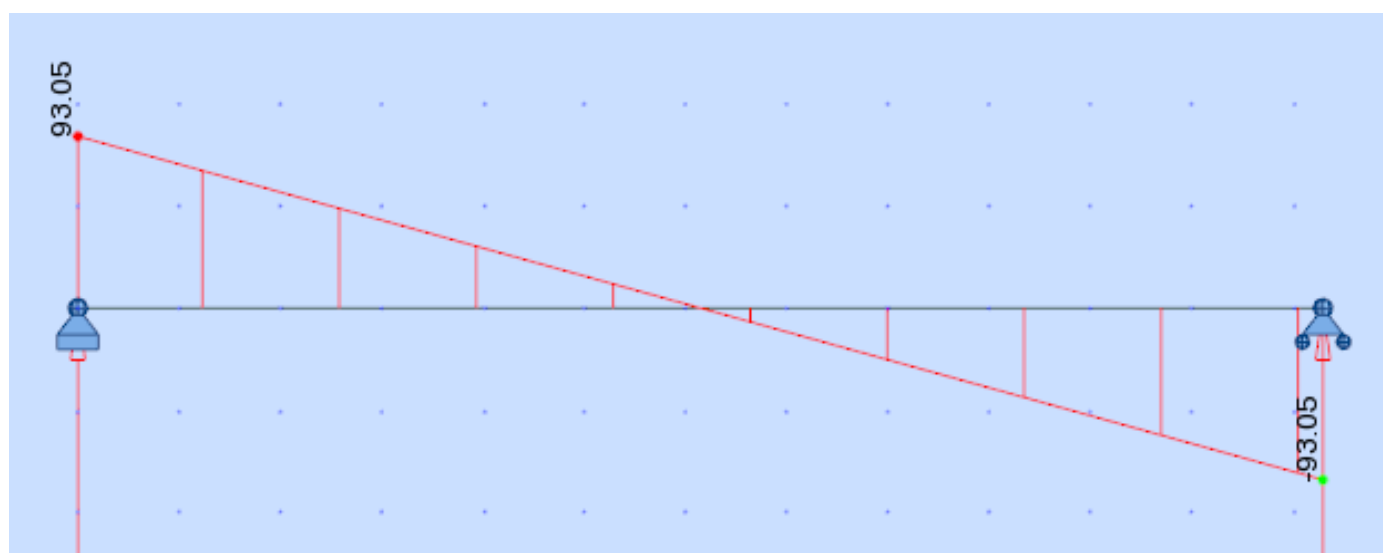
Schemat statyczny:



Wykres momentów zginających M [kNm]:



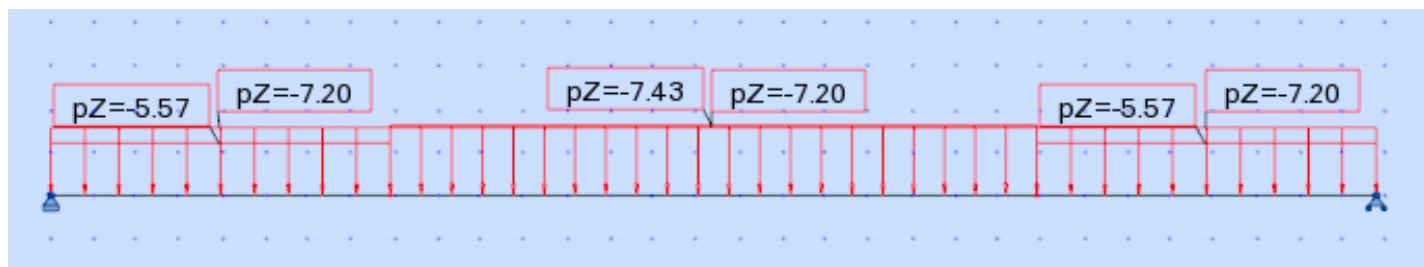
Wykres sił tnących V [kN]:



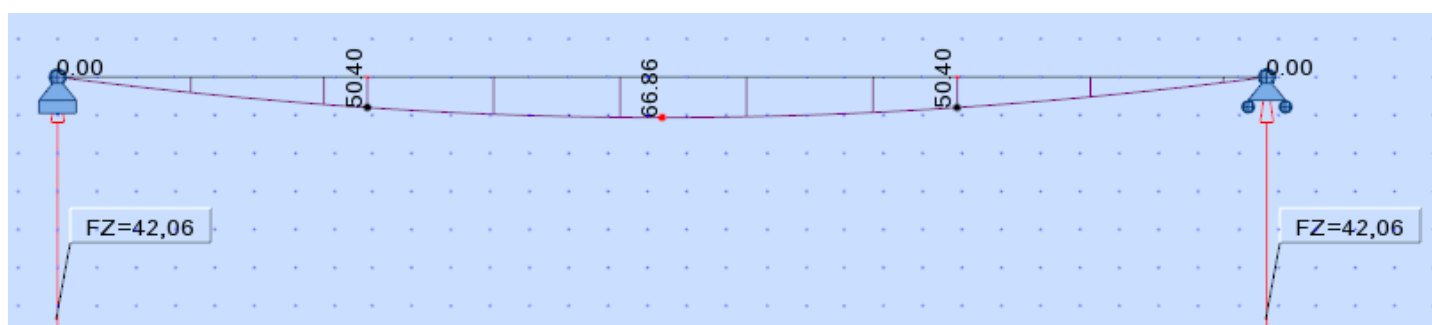
2.3.4.2. Siły wewnętrzne dla obciążeń w fazie montażu

Dla SGN:

Schemat statyczny:



Wykres momentów zginających M [kNm]:



Wykres sił tnących V [kN]:



2.3.5. Sprawdzenie nośności belki

2.3.5.1. Sprawdzenie nośności dla obciążenia użytkowego

Wyznaczenie klasy przekroju:

Środek:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{235}} = 1$$

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{299}{8} = 37,38 < 72\varepsilon = 72$$

Jest to klasa I.

Pas:

$$\frac{c}{t_f} = \frac{63}{12,7} = 4,96 < 9\varepsilon = 9$$

Jest to klasa I.

Cały przekrój jest klasy I.

Sprawdzenie nośności przekroju na zginanie:

$$M_{Ed} = M_{\max} = 207,88 \text{ kNm}$$

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{y,pl} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{0,001020 \cdot 235000}{1} = 239,7 \text{ kNm}$$

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} = \frac{207,88}{239,7} = 0,87 < 1$$

Sprawdzenie nośności przekroju na ścinanie:

$$\frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \leq 1$$

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{299}{8} = 37,38 < 72 \frac{\varepsilon}{\eta} = 72 * \frac{1}{1,2} = 60$$

$$V_{c,Rd} = V_{pl,Rd} = \frac{A_V * \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{M0}}$$

$$A_V = A - 2 * b_f * t_f + (t_w + 2r) * t_f \geq \eta * h_w * t_w$$

$$A_V = 7270 - 2 * 170 * 12,7 + (8 + 2 * 18) * 12,7 = 3510,8 \text{ mm}^2 > 1,2 * 299 * 8 = 2870,4 \text{ mm}^2$$

$$V_{c,Rd} = V_{pl,Rd} = \frac{A_V * \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,0035108 * \frac{235000}{\sqrt{3}}}{1} = 476,34 \text{ kN}$$

$$V_{Ed} = 135,21 \text{ kN}$$

$$\frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} = \frac{135,21}{476,34} = 0,28 < 1$$

$$\frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} = \frac{135,21}{476,34} = 0,28 < \frac{1}{2} - \text{można rozpatrywać przekrój niezależnie na ścinanie i zginanie}$$

Sprawdzenie  rodnika pod obci eniem skupionym:

$$S_s = \frac{h}{3} + 50 = \frac{360}{3} + 50 = 170 \text{ mm}$$

$$F_{Ed} = R = 135,21 \text{ kN}$$

$$\frac{F_{Ed}}{F_{Rd}} \leq 1$$

$$F_{Rd} = \frac{f_{yw} * l_{eff} * t_w}{\gamma_{M1}}$$

$$l_{eff} = \chi_F * l_y$$

$$\chi_F = \frac{0,5}{\bar{\lambda}_F} \leq 1$$

$$\bar{\lambda}_F = \sqrt{\frac{l_y * f_{yw} * t_w}{F_{Cr}}}$$

$$F_{Cr} = 0,9 * k_F * E * \frac{t_w^3}{h_w}$$

$$k_F = 2 + 6 * \left(\frac{S_s + c}{h_w} \right) \leq 6$$

$$k_F = 2 + 6 * \left(\frac{S_s + c}{h_w} \right) = 2 + 6 * \left(\frac{170 + 0}{299} \right) = 5,41 < 6$$

$$F_{Cr} = 0,9 * k_F * E * \frac{t_w^3}{h_w} = 0,9 * 5,41 * 210000000 * \frac{(0,008)^3}{0,299} = 1750,89 \text{ kN}$$

$$l_y = \min \begin{cases} l_e + t_f * \sqrt{\frac{m_1}{2} + \left(\frac{l_e}{t_f} \right)^2} + m_2 \\ l_e + t_f * \sqrt{m_1 + m_2} \end{cases}$$

$$l_e = \frac{k_F * E * t_w^2}{2 * f_{yw} * h_w} \leq S_s + c$$

$$l_e = \frac{k_F * E * t_w^2}{2 * f_{yw} * h_w} = \frac{5,41 * 210000000 * 0,008^2}{2 * 235000 * 0,299} = 0,52 \text{ m} > 0,17 \text{ m}$$

$$l_e = 0,17 \text{ m}$$

$$m_1 = \frac{f_{yt} * b_f}{f_{yw} * t_w} = \frac{235 * 0,170}{235 * 0,008} = 21,25$$

$$m_2 = \begin{cases} 0,02 * \left(\frac{h_w}{t_f} \right)^2 & \text{dla } \bar{\lambda}_F > 0,5 \\ 0 & \text{dla } \bar{\lambda}_F \leq 0,5 \end{cases}$$

$$m_2 = 0,02 * \left(\frac{h_w}{t_f} \right)^2 = 0,02 * \left(\frac{0,299}{0,0127} \right)^2 = 11,09$$

$$l_{y1} = l_e + t_f * \sqrt{\frac{m_1}{2} + \left(\frac{l_e}{t_f} \right)^2} + m_2 = 0,17 + 0,0127 * \sqrt{\frac{21,25}{2} + \left(\frac{0,17}{0,0127} \right)^2} + 11,09$$

$$= 0,35 \text{ m}$$

$$l_{y2} = l_e + t_f * \sqrt{m_1 + m_2} = 0,17 + 0,0127 * \sqrt{21,25 + 11,09} = 0,35 \text{ m}$$

$$l_y = 0,35 \text{ m}$$

$$\bar{\lambda}_F = \sqrt{\frac{l_y * f_{yw} * t_w}{F_{Cr}}} = \sqrt{\frac{0,35 * 235000 * 0,008}{1750,89}} = 0,61 > 0,5$$

$$\chi_F = \frac{0,5}{\bar{\lambda}_F} = \frac{0,5}{0,61} = 0,82$$

$$l_{eff} = \chi_F * l_y = 0,82 * 0,35 = 0,29 \text{ m}$$

$$F_{Rd} = \frac{f_{yw} * l_{eff} * t_w}{\gamma_{M1}} = \frac{235000 * 0,29 * 0,008}{1} = 545,2 \text{ kN}$$

$$\frac{F_{Ed}}{F_{Rd}} = \frac{135,21}{545,2} = 0,25 < 1$$

Nośność elementu z uwzględnieniem zwiczenia:

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

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} * \frac{W_{y,pl} * f_y}{\gamma_{M1}} = 1 * \frac{0,001020 * 235000}{1} = 239,7 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed} = M_{max} = 207,88 \text{ kNm}$$

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} = \frac{207,88}{239,7} = 0,87 < 1$$

Belka spełnia wymagania stanu granicznego nośności w fazie użytkowania.

2.3.5.2. Sprawdzenie nośności dla obciążenia w fazie montażu

Przekrój spełnia wymagania stanu granicznego nośności w fazie montażu ze względu na mniejsze obciążenia niż w fazie użytkowania.

Sprawdzenie nośności elementu z uwzględnieniem zwiczenia:

$$M_{cr} = C_1 * \frac{\pi^2 * E * I_z}{(k * l)^2} * \left[\sqrt{\left(\frac{k}{k_\omega} \right)^2 \frac{I_\omega}{I_z} + \frac{(k * l)^2 * G * I_T}{\pi^2 * E * I_z}} + (C_2 * z_g - C_3 * z_j)^2 - (C_2 * z_g - C_3 * z_j) \right]$$

$$z_g = z_a - z_s$$

$$z_a = 180 \text{ mm}$$

$$z_s = 0$$

$$z_g = z_a - z_s = 180 - 0 = 180 \text{ mm}$$

$$z_j = z_s - 0,5 * r_y$$

$$z_s = 0$$

$$r_y = 0$$

$$z_j = z_s - 0,5 * r_y = 0$$

$$C_1 = 1,132$$

$$C_2 = 0,459$$

$$C_3 = 0,525$$

$$k = 1,0$$

$$\begin{aligned}
M_{cr} &= C_1 * \frac{\pi^2 * E * I_z}{(k * l)^2} \\
&* \left[\sqrt{\left(\frac{k}{k_\omega}\right)^2 \frac{I_\omega}{I_z} + \frac{(k * l)^2 * G * I_T}{\pi^2 * E * I_z} + (C_2 * z_g - C_3 * z_j)^2} - (C_2 * z_g - C_3 * z_j) \right] \\
&= 1,132 * \frac{\pi^2 * 210000000 * 0,00001040}{(1 * 6)^2} \\
&* \left[\sqrt{\left(\frac{1}{1}\right)^2 * \frac{0,000000313600}{0,00001040} + \frac{(1 * 6)^2 * 81000000 * 0,0000003830}{\pi^2 * 210000000 * 0,00001040} + (0,459 * 0,18 - 0,525 * 0)^2} \right. \\
&\quad \left. - (0,459 * 0,18 - 0,525 * 0) \right] = 677,79 * [\sqrt{1 * 0,0302 + 0,0518 + 0,006826} - 0,0826] \\
&= 146,02 \text{ kNm}
\end{aligned}$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y * f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{0,000904 * 235000}{146,02}} = 1,21$$

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

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

$$\beta = 0,75$$

$$\frac{h}{b} = \frac{360}{170} = 2,12 > 2 \text{ zatem krzywa zwichrzenia c}$$

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

$$\begin{aligned}
\phi_{LT} &= 0,5 * [1 + \alpha_{LT} * (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta * \bar{\lambda}_{LT}^2] \\
&= 0,5 * [1 + 0,49 * (1,21 - 0,4) + 0,75 * 1,21^2] = 1,25
\end{aligned}$$

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

$$\chi_{LT1} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \beta * \bar{\lambda}_{LT}^2}} = \frac{1}{1,25 + \sqrt{1,25^2 - 0,75 * 1,21^2}} = 0,52 < 1$$

$$\chi_{LT2} = \frac{1}{\bar{\lambda}_{LT}^2} = \frac{1}{1,21^2} = 0,68$$

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

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

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} * \frac{W_{y,pl} * f_y}{\gamma_{M1}} = 0,52 * \frac{0,001020 * 235000}{1} = 124,64 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed} = M_{max} = 66,86 \text{ kNm}$$

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} = \frac{66,86}{124,64} = 0,54 < 1$$

Belka spełnia wymagania stanu granicznego nośności w fazie montażu.

2.3.6. Sprawdzenie ugięcia belki

Sprawdzenie stanu granicznego użytkowości:

$$u \leq u_{dop}$$

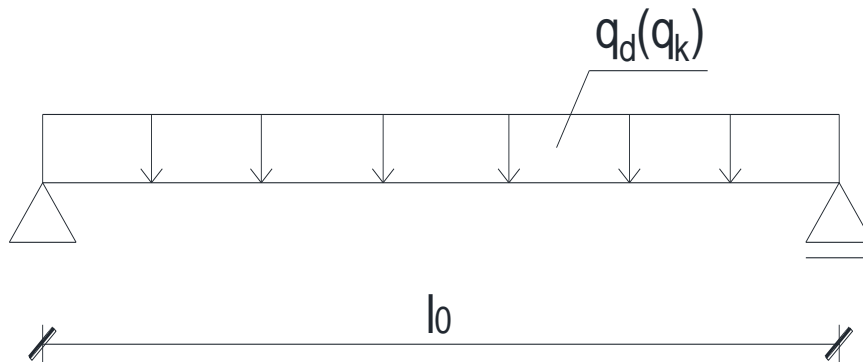
$$u_{dop} = \frac{1}{250} l_0 = \frac{1}{250} * 6,15 = 0,025 \text{ m}$$

$$u = \frac{5}{384} * \frac{q_k * l_0^4}{E * I_y} = \frac{5}{384} * \frac{30,26 * 6,15^4}{210000000 * 0,00016270} = 0,016 \text{ m} < 0,025 \text{ m} = u_{dop}$$

Belka spełnia wymagania stanu granicznego użytkowości.

2.4. Obliczenia belki A3

2.4.1. Schemat statyczny



$b = 5,4 \text{ m}$ – rozpiętość belki w świetle

$$l_0 = b * 1,025 = 5,4 * 1,025 = 5,54 \text{ m}$$

2.4.2. Wstępny dobór przekroju belki (ze wzgl. Na SGN i SGU)

Przyjęto stal S235 o $f_y = 235 \text{ MPa}$ i $E = 210 \text{ GPa}$

Obszar oddziaływania obciążenia – rozstaw belek – 4 m

Kombinacja obciążeń dla SGN (na podstawie wzoru 6.10 PN-EN 1990) – faza użytkowania:

$$q_d = (1,35 * 2,69 + 1,5 * 6,3) * 4 = 52,33 \text{ kN/m}$$

Kombinacja obciążeń dla SGU (na podstawie wzoru 6.14b PN-EN 1990) – faza użytkowania:

$$q_k = (2,69 + 6,3) * 4 = 35,96 \text{ kN/m}$$

$$M_{Ed} = M_{max} = \frac{q_d * l_0^2}{8} = \frac{52,33 * 5,54^2}{8} = 200,76 \text{ kNm}$$

$$M_{max} \leq M_{c,Rd}$$

$$M_{c,Rd} = \frac{W * f_y}{\gamma_{M0}}$$

$$W_y \geq \frac{M_{c,Rd} * \gamma_{M0}}{f_y} = \frac{200,76 * 1}{235000} = 0,00085 \text{ m}^3 = 850 \text{ cm}^3$$

$$u \leq u_{dop} = \frac{1}{250} l_0$$

$$u = \frac{5}{384} * \frac{q_k * l_0^4}{EI} \leq u_{dop}$$

$$I_y \geq \frac{625}{192} * \frac{q_k * l_0^3}{E} = \frac{625 * 35,96 * 5,54^3}{192 * 210000000} = 0,000095 \text{ m}^4 = 9500 \text{ cm}^4$$

Dobrano belkę IPE360 o następujących charakterystykach:

$$h = 360 \text{ mm}$$

$$h_w = 299 \text{ mm}$$

$$t_w = 8 \text{ mm}$$

$$b_f = 170 \text{ mm}$$

$$t_f = 12,7 \text{ mm}$$

$$A = 72,7 \text{ cm}^2$$

$$c = 63 \text{ mm}$$

$$r = 18 \text{ mm}$$

$$g = 0,571 \text{ kN/m}$$

$$W_y = 904 \text{ cm}^3$$

$$W_z = 123 \text{ cm}^3$$

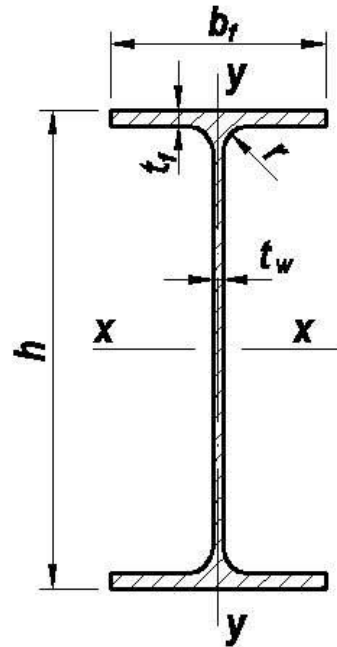
$$I_y = 16270 \text{ cm}^4$$

$$I_z = 1040 \text{ cm}^4$$

$$I_o = 313600 \text{ cm}^6$$

$$I_T = 38,30 \text{ cm}^4$$

$$W_{y,pl} = 1020 \text{ cm}^3$$



2.4.3. Zestawienie obciążeń

LP	Obciążenie	Grubość [m]	Ciężar objętościowy [kN/m ³]	Wartość charakterystyczna [kN/m ²]	Wartość charakterystyczna [kN/m]	Charakter obciążenia
Faza użytkowania						
1	płytki ceramiczne	0,01	21	0,21	0,84	stałe
2	gładź cementowa	0,045	21	0,95	3,8	stałe
3	styropian	0,05	0,45	0,023	0,092	stałe
4	beton	0,05	24	1,2	4,8	stałe
5	blacha trapezowa 3-przęsłowa układana zakładkowo na pozytyw	0,015	-	0,19	0,76	stałe
6	Belka stalowa IPE360	-	-		0,57	stałe
7	Sufit podwieszany Rigips Quattro 40	-	-	0,12	0,48	stałe
Razem					11,34	-
8	Obciążenie użytkowe	-	-	6,3	25,2	zmiennie
Faza montażu						
1	beton	0,05	25	1,25	5	stałe
2	blacha trapezowa 3-przęsłowa układana zakładkowo na pozytyw	0,015	-	0,19	0,76	stałe
3	Belka stalowa IPE360	-	-		0,57	stałe
Razem					6,33	-
4	Obciążenie montażowe	-	-	1,5	6	zmiennie

Kombinacja obciążeń dla SGN (faza użytkowania):

$$q_d = 1,35 * 11,34 + 1,5 * 1 * 25,2 = 53,11 \text{ kN/m (wzór 6.10a PN-EN 1990)}$$

$$q_d = 1,15 * 11,34 + 1,5 * 25,2 = 50,84 \text{ kN/m (wzór 6.10b PN-EN 1990)}$$

Przyjęto $q_d = 53,11 \text{ kN/m}$

Kombinacja obciążeń dla SGU (faza użytkowania):

$$q_k = 11,34 + 25,2 = 36,54 \text{ kN/m (wzór 6.14b PN-EN 1990)}$$

Kombinacja obciążeń dla SGN (faza montażu):

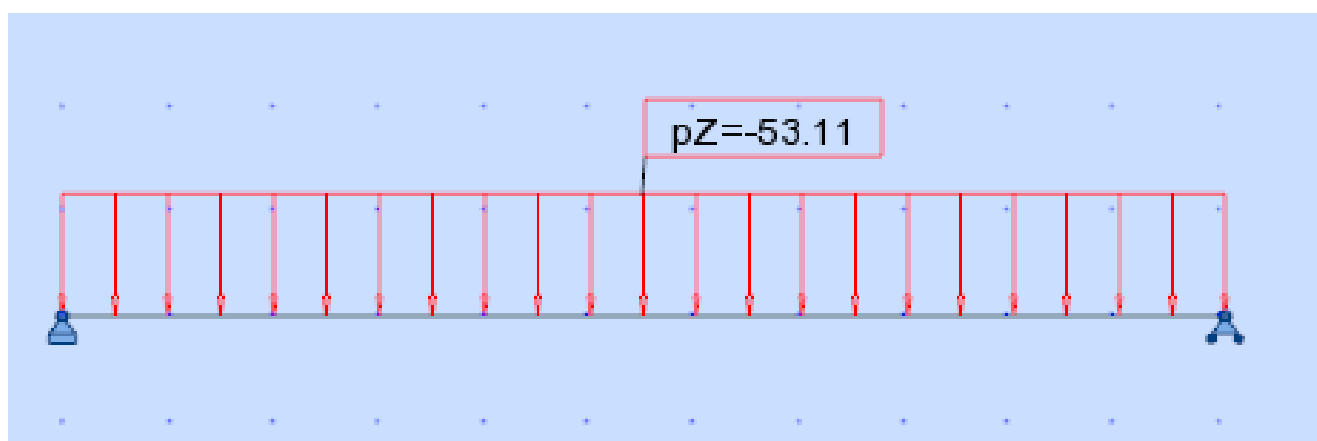
$$q_m = 1,35 * 6,33 + 1,5 * 1 * 6 = 8,55 \text{ kN/m} + 9 \text{ kN/m (wzór 6.10a PN-EN 1990)}$$

2.4.4. Obliczenie sił wewnętrznych

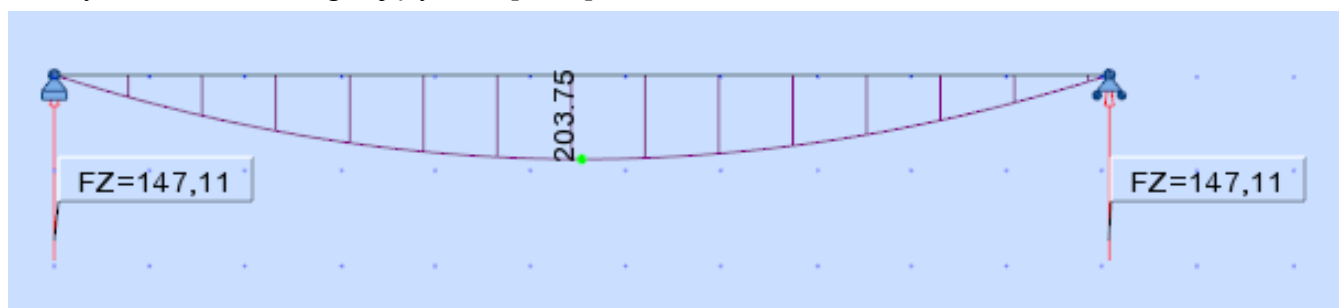
2.4.4.1. Siły wewnętrzne dla obciążeń użytkowych

Dla SGN:

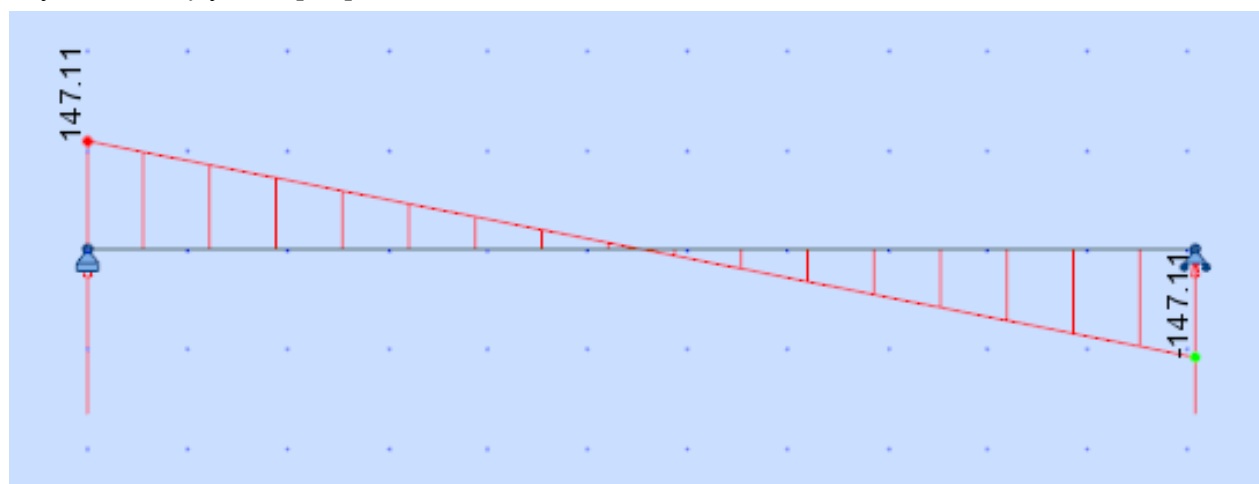
Schemat statyczny:



Wykres momentów zginających M [kNm]:

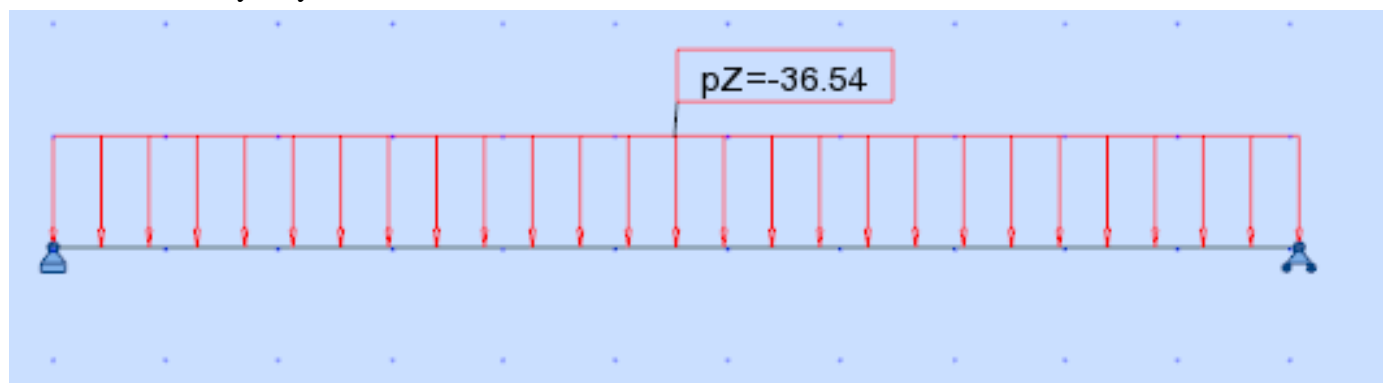


Wykres sił tnących V [kN]:

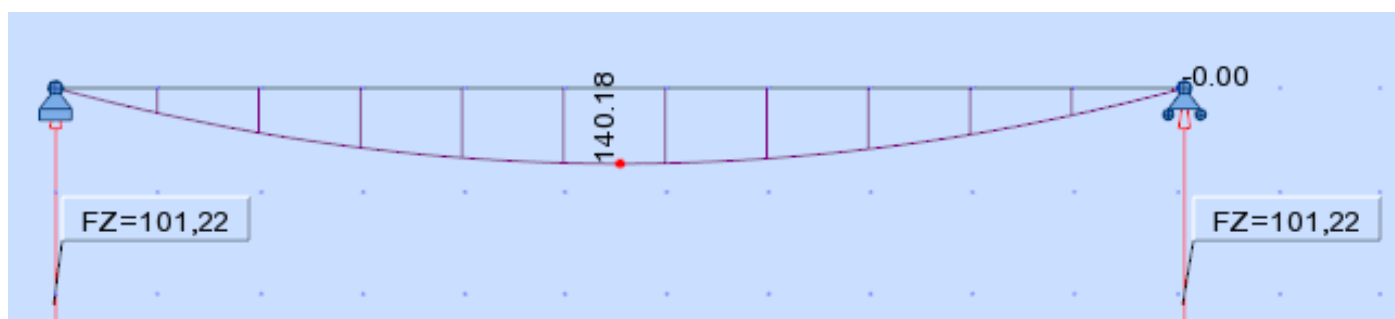


Dla SGU:

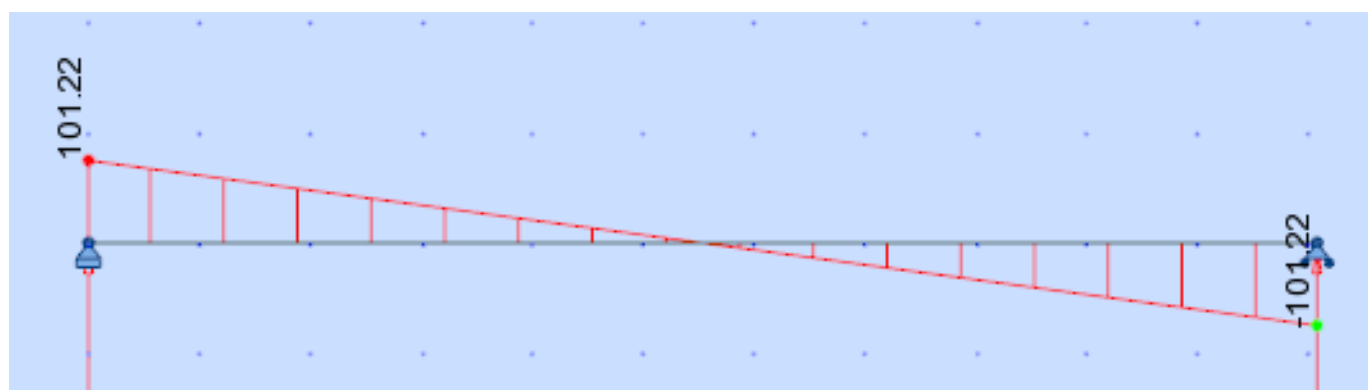
Schemat statyczny:



Wykres momentów zginających M [kNm]:



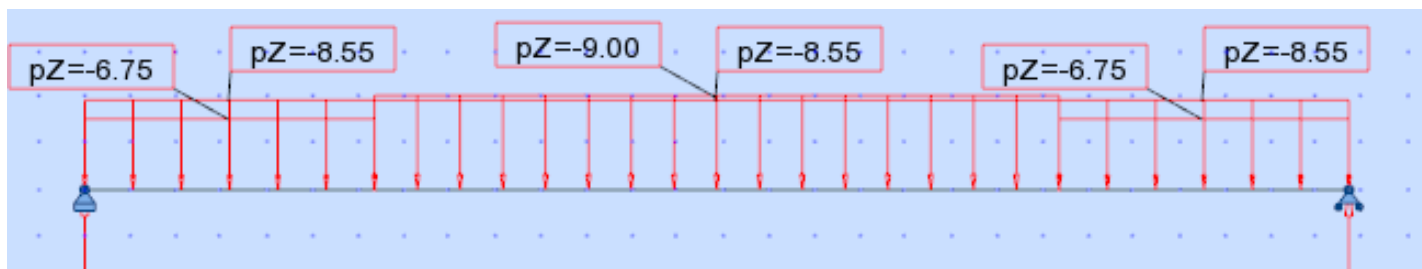
Wykres sił tnących V [kN]:



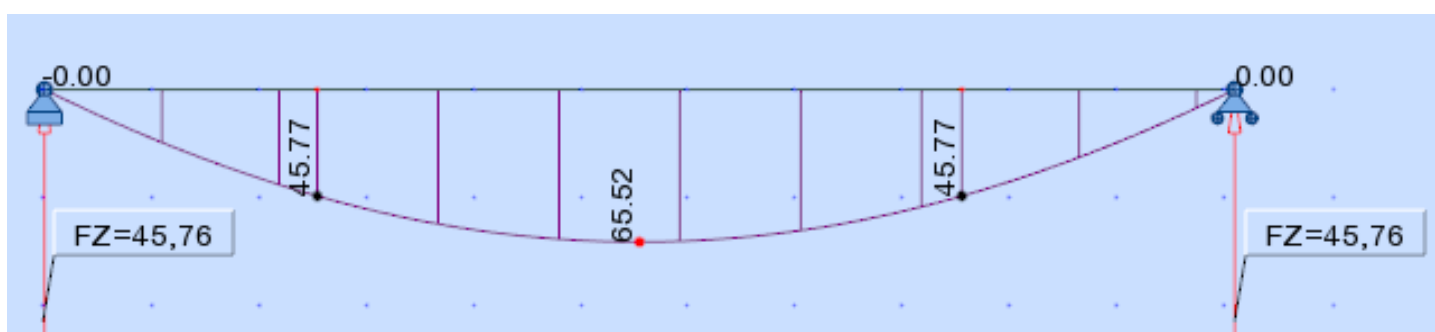
2.4.4.2. Siły wewnętrzne dla obciążeń w fazie montażu

Dla SGN:

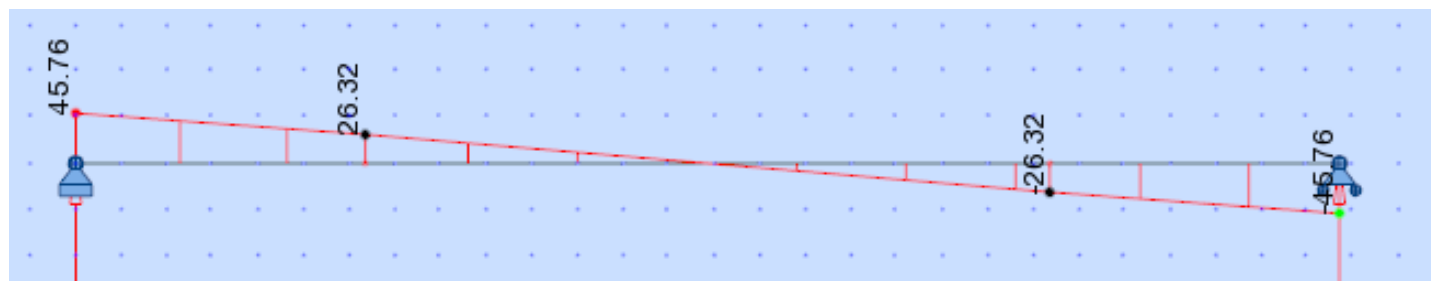
Schemat statyczny:



Wykres momentów zginających M [kNm]:



Wykres sił tnących V [kN]:



2.4.5. Sprawdzenie nośności belki

2.4.5.1. Sprawdzenie nośności dla obciążenia użytkowego

Wyznaczenie klasy przekroju:

Środek:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{235}} = 1$$

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{299}{8} = 37,38 < 72\varepsilon = 72$$

Jest to klasa I.

Pas:

$$\frac{c}{t_f} = \frac{63}{12,7} = 4,96 < 9\varepsilon = 9$$

Jest to klasa I.

Cały przekrój jest klasy I.

Sprawdzenie nośności przekroju na zginanie:

$$M_{Ed} = M_{\max} = 203,75 \text{ kNm}$$

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{y,pl} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{0,001020 \cdot 235000}{1} = 239,7 \text{ kNm}$$

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} = \frac{203,75}{239,7} = 0,85 < 1$$

Sprawdzenie nośności przekroju na ścinanie:

$$\frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \leq 1$$

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{299}{8} = 37,38 < 72 \frac{\varepsilon}{\eta} = 72 \cdot \frac{1}{1,2} = 60$$

$$V_{c,Rd} = V_{pl,Rd} = \frac{A_V \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{M0}}$$

$$A_V = A - 2 \cdot b_f \cdot t_f + (t_w + 2r) \cdot t_f \geq \eta \cdot h_w \cdot t_w$$

$$A_V = 7270 - 2 \cdot 170 \cdot 12,7 + (8 + 2 \cdot 18) \cdot 12,7 = 3510,8 \text{ mm}^2 > 1,2 \cdot 299 \cdot 8 = 2870,4 \text{ mm}^2$$

$$V_{c,Rd} = V_{pl,Rd} = \frac{A_V \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,0035108 \cdot \frac{235000}{\sqrt{3}}}{1} = 476,34 \text{ kN}$$

$$V_{Ed} = 147,11 \text{ kN}$$

$$\frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} = \frac{147,11}{476,34} = 0,31 < 1$$

$$\frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} = \frac{147,11}{476,34} = 0,31 < \frac{1}{2} - \text{można rozpatrywać przekrój niezależnie na ścinanie i zginanie}$$

Sprawdzenie  rodnika pod obci eniem skupionym:

$$S_s = \frac{h}{3} + 50 = \frac{360}{3} + 50 = 170 \text{ mm}$$

$$F_{Ed} = R = 147,11 \text{ kN}$$

$$\frac{F_{Ed}}{F_{Rd}} \leq 1$$

$$F_{Rd} = \frac{f_{yw} * l_{eff} * t_w}{\gamma_{M1}}$$

$$l_{eff} = \chi_F * l_y$$

$$\chi_F = \frac{0,5}{\bar{\lambda}_F} \leq 1$$

$$\bar{\lambda}_F = \sqrt{\frac{l_y * f_{yw} * t_w}{F_{Cr}}}$$

$$F_{Cr} = 0,9 * k_F * E * \frac{t_w^3}{h_w}$$

$$k_F = 2 + 6 * \left(\frac{S_s + c}{h_w} \right) \leq 6$$

$$k_F = 2 + 6 * \left(\frac{S_s + c}{h_w} \right) = 2 + 6 * \left(\frac{170 + 0}{299} \right) = 5,41 < 6$$

$$F_{Cr} = 0,9 * k_F * E * \frac{t_w^3}{h_w} = 0,9 * 5,41 * 210000000 * \frac{(0,008)^3}{0,299} = 1750,89 \text{ kN}$$

$$l_y = \min \begin{cases} l_e + t_f * \sqrt{\frac{m_1}{2} + \left(\frac{l_e}{t_f} \right)^2} + m_2 \\ l_e + t_f * \sqrt{m_1 + m_2} \end{cases}$$

$$l_e = \frac{k_F * E * t_w^2}{2 * f_{yw} * h_w} \leq S_s + c$$

$$l_e = \frac{k_F * E * t_w^2}{2 * f_{yw} * h_w} = \frac{5,41 * 210000000 * 0,008^2}{2 * 235000 * 0,299} = 0,52 \text{ m} > 0,17 \text{ m}$$

$$L_e = 0,17 \text{ m}$$

$$m_1 = \frac{f_{yt} * b_f}{f_{yw} * t_w} = \frac{235 * 0,170}{235 * 0,008} = 21,25$$

$$m_2 = \begin{cases} 0,02 * \left(\frac{h_w}{t_f} \right)^2 & \text{dla } \bar{\lambda}_F > 0,5 \\ 0 & \text{dla } \bar{\lambda}_F \leq 0,5 \end{cases}$$

$$m_2 = 0,02 * \left(\frac{h_w}{t_f} \right)^2 = 0,02 * \left(\frac{0,299}{0,0127} \right)^2 = 11,09$$

$$l_{y1} = l_e + t_f * \sqrt{\frac{m_1}{2} + \left(\frac{l_e}{t_f} \right)^2} + m_2 = 0,17 + 0,0127 * \sqrt{\frac{21,25}{2} + \left(\frac{0,17}{0,0127} \right)^2} + 11,09 = 0,35 \text{ m}$$

$$l_{y2} = l_e + t_f * \sqrt{m_1 + m_2} = 0,17 + 0,0127 * \sqrt{21,25 + 11,09} = 0,35 \text{ m}$$

$$l_y = 0,35 \text{ m}$$

$$\bar{\lambda}_F = \sqrt{\frac{l_y * f_{yw} * t_w}{F_{Cr}}} = \sqrt{\frac{0,35 * 235000 * 0,008}{1750,89}} = 0,61 > 0,5$$

$$\chi_F = \frac{0,5}{\bar{\lambda}_F} = \frac{0,5}{0,61} = 0,82$$

$$l_{eff} = \chi_F * l_y = 0,82 * 0,35 = 0,29 \text{ m}$$

$$F_{Rd} = \frac{f_{yw} * l_{eff} * t_w}{\gamma_{M1}} = \frac{235000 * 0,29 * 0,008}{1} = 545,2 \text{ kN}$$

$$\frac{F_{Ed}}{F_{Rd}} = \frac{147,11}{545,2} = 0,27 < 1$$

Nośność elementu z uwzględnieniem zwiczenia:

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

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} * \frac{W_{y,pl} * f_y}{\gamma_{M1}} = 1 * \frac{0,001020 * 235000}{1} = 239,7 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed} = M_{max} = 203,75 \text{ kNm}$$

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} = \frac{203,75}{239,7} = 0,85 < 1$$

Belka spełnia wymagania stanu granicznego nośności w fazie użytkowania.

2.4.5.2. Sprawdzenie nośności dla obciążenia w fazie montażu

Przekrój spełnia wymagania stanu granicznego nośności w fazie montażu ze względu na mniejsze obciążenia niż w fazie użytkowania.

Sprawdzenie nośności elementu z uwzględnieniem zwiczenia:

$$M_{cr} = C_1 * \frac{\pi^2 * E * I_z}{(k * l)^2} * \left[\sqrt{\left(\frac{k}{k_\omega} \right)^2 \frac{I_\omega}{I_z} + \frac{(k * l)^2 * G * I_T}{\pi^2 * E * I_z}} + (C_2 * z_g - C_3 * z_j)^2 - (C_2 * z_g - C_3 * z_j) \right]$$

$$z_g = z_a - z_s$$

$$z_a = 180 \text{ mm}$$

$$z_s = 0$$

$$z_g = z_a - z_s = 180 - 0 = 180 \text{ mm}$$

$$z_j = z_s - 0,5 * r_y$$

$$z_s = 0$$

$$r_y = 0$$

$$z_j = z_s - 0,5 * r_y = 0$$

$$C_1 = 1,132$$

$$C_2 = 0,459$$

$$C_3 = 0,525$$

$$k = 1,0$$

$$\begin{aligned}
M_{cr} &= C_1 * \frac{\pi^2 * E * I_z}{(k * l)^2} \\
&* \left[\sqrt{\left(\frac{k}{k_\omega}\right)^2 \frac{I_\omega}{I_z} + \frac{(k * l)^2 * G * I_T}{\pi^2 * E * I_z} + (C_2 * z_g - C_3 * z_j)^2} - (C_2 * z_g - C_3 * z_j) \right] \\
&= 1,132 * \frac{\pi^2 * 210000000 * 0,00001040}{(1 * 5,4)^2} \\
&* \left[\sqrt{\left(\frac{1}{1}\right)^2 * \frac{0,000000313600}{0,00001040} + \frac{(1 * 5,4)^2 * 81000000 * 0,0000003830}{\pi^2 * 210000000 * 0,00001040} + (0,459 * 0,18 - 0,525 * 0)^2} \right. \\
&\quad \left. - (0,459 * 0,18 - 0,525 * 0) \right] = 836,78 * [\sqrt{1 * 0,0302 + 0,0420 + 0,006826} - 0,0826] \\
&= 166,11 \text{ kNm}
\end{aligned}$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y * f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{0,000904 * 235000}{166,11}} = 1,13$$

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

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

$$\beta = 0,75$$

$$\frac{h}{b} = \frac{360}{170} = 2,12 > 2 \text{ zatem krzywa zwichrzenia c}$$

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

$$\begin{aligned}
\phi_{LT} &= 0,5 * [1 + \alpha_{LT} * (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta * \bar{\lambda}_{LT}^2] \\
&= 0,5 * [1 + 0,49 * (1,13 - 0,4) + 0,75 * 1,13^2] = 1,16
\end{aligned}$$

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

$$\chi_{LT1} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \beta * \bar{\lambda}_{LT}^2}} = \frac{1}{1,16 + \sqrt{1,16^2 - 0,75 * 1,13^2}} = 0,56 < 1$$

$$\chi_{LT2} = \frac{1}{\bar{\lambda}_{LT}^2} = \frac{1}{1,13^2} = 0,78$$

$$\chi_{LT} = 0,56$$

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

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} * \frac{W_{y,pl} * f_y}{\gamma_{M1}} = 0,56 * \frac{0,001020 * 235000}{1} = 134,23 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed} = M_{max} = 65,52 \text{ kNm}$$

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} = \frac{65,52}{134,23} = 0,49 < 1$$

Belka spełnia wymagania stanu granicznego nośności w fazie montażu.

2.4.6. Sprawdzenie ugięcia belki

Sprawdzenie stanu granicznego użytkowości:

$$u \leq u_{dop}$$

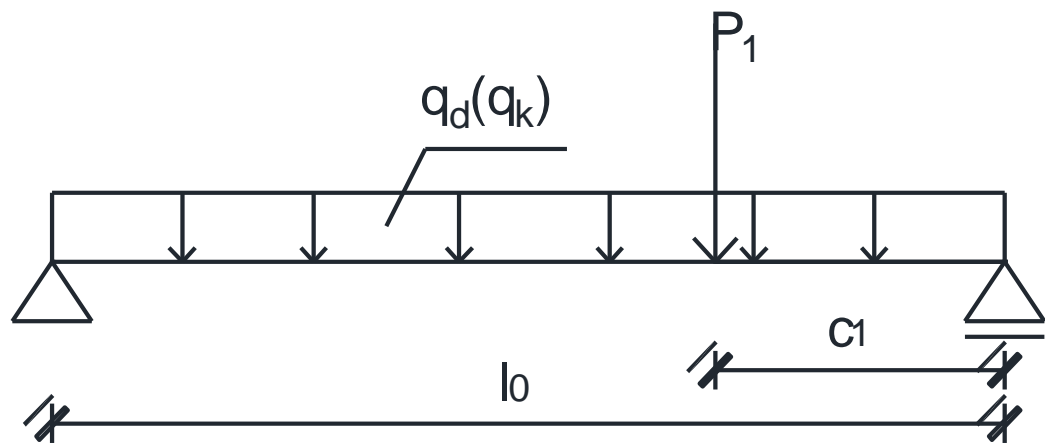
$$u_{dop} = \frac{1}{250} l_0 = \frac{1}{250} * 5,54 = 0,022 \text{ m}$$

$$u = \frac{5}{384} * \frac{q_k * l_0^4}{E * I_y} = \frac{5}{384} * \frac{36,54 * 5,54^4}{210000000 * 0,00016270} = 0,013 \text{ m} < 0,022 \text{ m} = u_{dop}$$

Belka spełnia wymagania stanu granicznego użytkowości.

2.5. Obliczenia belki P1

2.5.1. Schemat statyczny



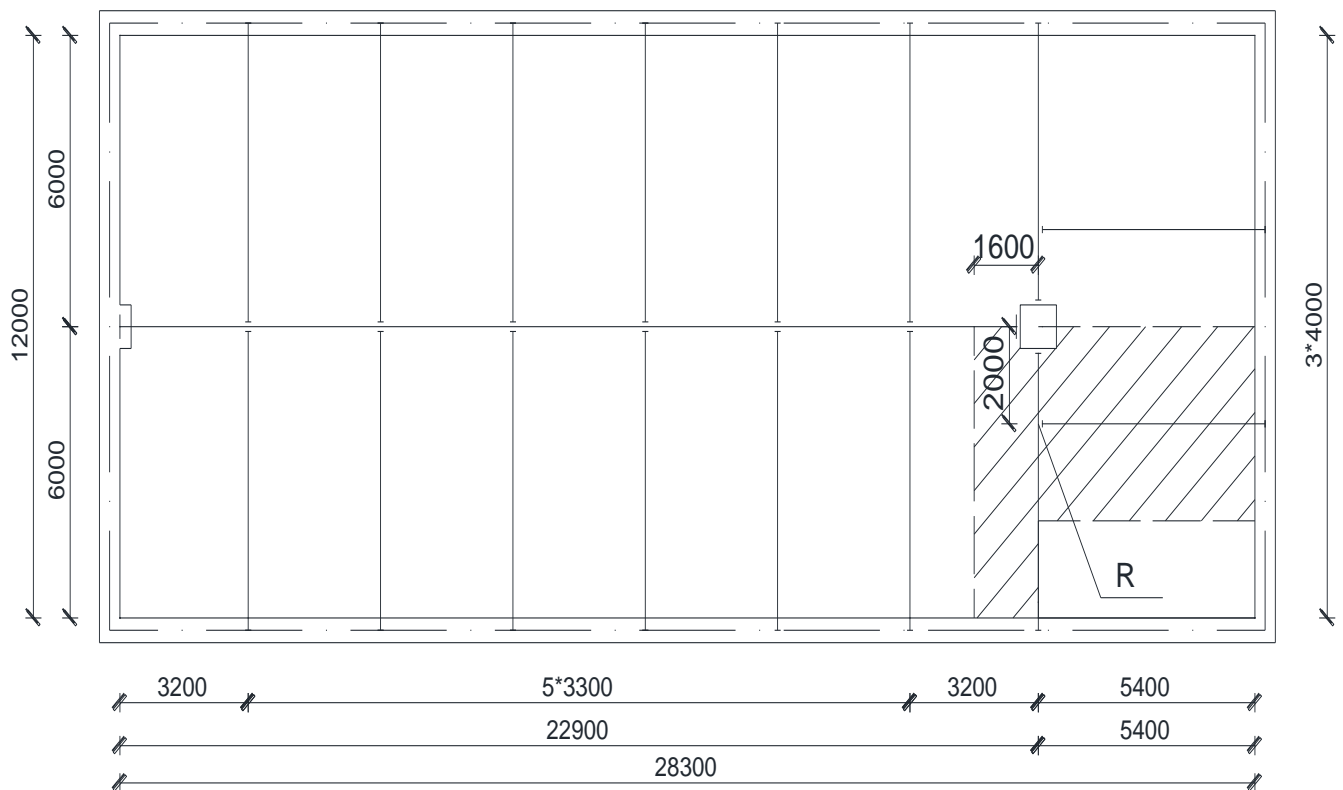
$c = 6 \text{ m}$ – rozpiętość belki w świetle

$l_0 = c * 1,025 = 6 * 1,025 = 6,15 \text{ m}$

$c_1 = 2 \text{ m}$

$P_{1d} = R(A3) = 147,11 \text{ kN}$

$P_{1k} = R(A3) = 101,22 \text{ kN}$



2.5.2. Wstępny dobór przekroju belki (ze wzgl. Na SGN i SGU)

Przyjęto stal S235 o $f_y = 235 \text{ MPa}$ i $E = 210 \text{ GPa}$

Obszar oddziaływania obciążenia – 1,6 m

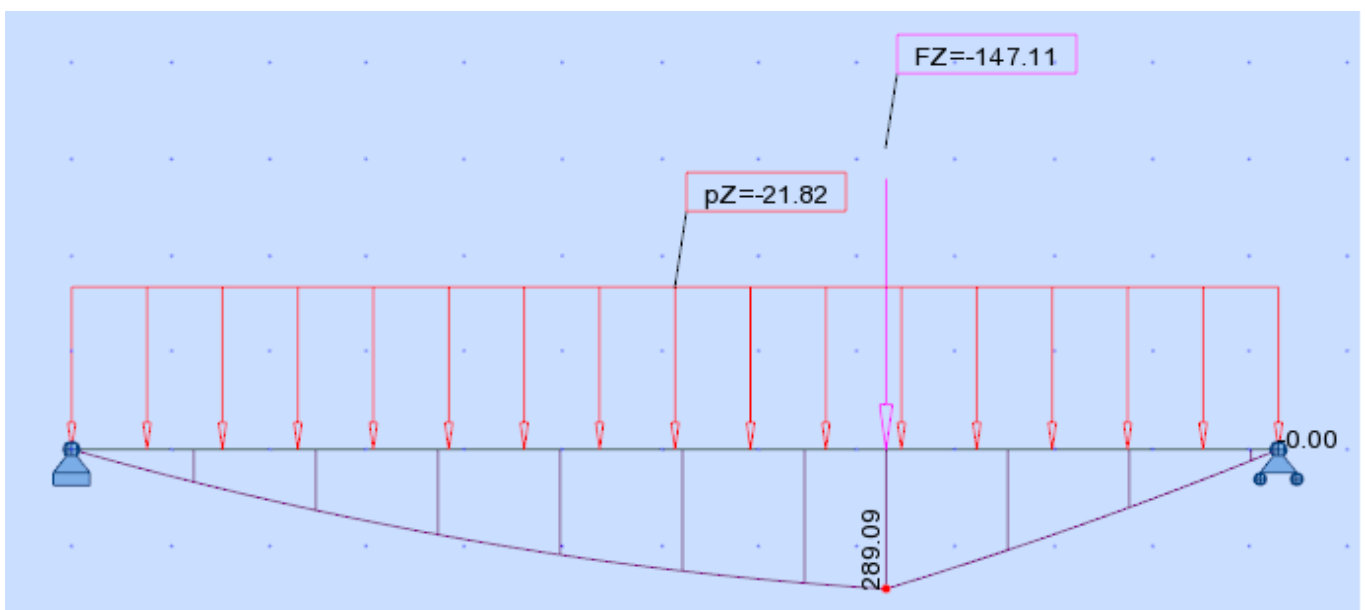
Ciężar IPE400 – 0,66 kN/m

Kombinacja obciążeń dla SGN (na podstawie wzoru 6.10 PN-EN 1990) – faza użytkowania:

$$q_d = (1,35 * 2,69 + 1,5 * 6,3) * 1,6 + 1,35 * 0,66 = 21,82 \text{ kN/m}$$

Kombinacja obciążeń dla SGU (na podstawie wzoru 6.14b PN-EN 1990) – faza użytkowania:

$$q_k = (2,69 + 6,3) * 1,6 + 0,66 = 15,04 \text{ kN/m}$$



$$M_{Ed} = M_{max} = 289,09 \text{ kNm}$$

$$M_{max} \leq M_{c,Rd}$$

$$M_{c,Rd} = \frac{W * f_y}{\gamma_{M0}}$$

$$W_y \geq \frac{M_{c,Rd} * \gamma_{M0}}{f_y} = \frac{289,09 * 1}{235000} = 0,00123 \text{ m}^3 = 1230 \text{ cm}^3$$

$$u = u^q + u^P$$

$$u \leq u_{dop} = \frac{1}{350} l_0$$

$$u^q = \frac{5}{384} * \frac{q_k * l_0^4}{EI}$$

$$u^P = \frac{1}{48} * \frac{P * l_0^3}{EI}$$

$$\xi = \frac{c_1}{l_0} = \frac{2}{6,15} = 0,33$$

$$\eta = \xi * (3 - 4 * \xi^2) = 0,33 * (3 - 4 * 0,33^2) = 0,85$$

$$P = \eta * P_1 = 0,85 * 101,22 = 86,04 \text{ kN}$$

$$u = u^q + u^P = \frac{5}{384} * \frac{q_k * l_0^4}{EI} + \frac{1}{48} * \frac{P * l_0^3}{EI} = \frac{5 * q_k * l_0^4 + 8 * P * l_0^3}{384 * E * I} \leq u_{dop} = \frac{1}{350} l_0$$

$$I_y \geq 350 * \frac{5 * q_k * l_0^4 + 8 * P * l_0^3}{384 * E * l_0} = 350 * \frac{5 * 15,04 * 6,15^4 + 8 * 86,04 * 6,15^3}{384 * 210000000 * 6,15} \\ = 0,000189 m^4 = 18900 cm^4$$

Dobrano belkę IPE450 o następujących charakterystykach:

$h = 450 \text{ mm}$

$h_w = 379 \text{ mm}$

$t_w = 9,4 \text{ mm}$

$b_f = 190 \text{ mm}$

$t_f = 14,6 \text{ mm}$

$A = 98,82 \text{ cm}^2$

$c = 69,3 \text{ mm}$

$r = 21 \text{ mm}$

$g = 0,776 \text{ kN/m}$

$W_y = 1499,6 \text{ cm}^3$

$W_z = 176,8 \text{ cm}^3$

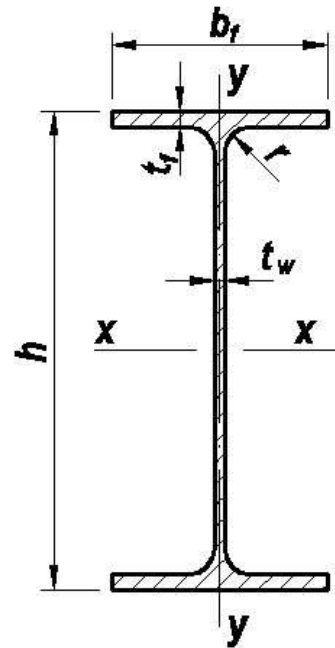
$I_y = 33740 \text{ cm}^4$

$I_z = 1680 \text{ cm}^4$

$I_w = 791000 \text{ cm}^6$

$I_T = 68,9 \text{ cm}^4$

$W_{y,pl} = 1701,3 \text{ cm}^3$



2.5.3. Zestawienie obciążeń

LP	Obciążenie	Grubość [m]	Ciężar objętościowy [kN/m ³]	Wartość charakterystyczna [kN/m ²]	Wartość charakterystyczna [kN/m]	Charakter obciążenia
Faza użytkowania						
1.	płytki ceramiczne	0,01	21	0,21	0,34	stałe
2.	gładź cementowa	0,045	21	0,95	1,52	stałe
3.	styropian	0,05	0,45	0,023	0,037	stałe
4.	beton	0,05	24	1,2	1,92	stałe
5.	blacha trapezowa 3 przęsłowa układana zakładkowo na pozytyw	0,015	-	0,19	0,30	stałe
6.	Belka stalowa IPE450	-	-		0,78	stałe
7.	Sufit podwieszany Rigips Quattro 40	-	-	0,12	0,19	stałe
Razem					5,09	-
8.	Obciążenie użytkowe	-	-	6,3	10,08	zmienne
Faza montażu						
1.	beton	0,05	25	1,25	2	stałe
2.	blacha trapezowa 3 przęsłowa układana zakładkowo na pozytyw	0,015	-	0,19	0,30	stałe
3.	Belka stalowa IPE450	-	-		0,78	stałe
Razem					3,08	-
4.	Obciążenie montażowe	-	-	1,5	2,40	zmienne

Reakcja z belki A3:

SGN (faza użytkowania) – 147,11 kN

SGN (faza montażu) – 45,76 kN

SGU – 101,22 kN

Kombinacja obciążeń dla SGN (faza użytkowania):

$$q_d = 1,35 * 5,09 + 1,5 * 1 * 10,08 = 21,99 \text{ kN/m (wzór 6.10a PN-EN 1990)}$$

$$q_d = 1,15 * 5,09 + 1,5 * 10,08 = 20,97 \text{ kN/m (wzór 6.10b PN-EN 1990)}$$

Przyjęto $q_d = 21,99 \text{ kN/m}$

Kombinacja obciążeń dla SGU (faza użytkowania):

$$q_k = 5,09 + 10,08 = 15,17 \text{ kN/m (wzór 6.14b PN-EN 1990)}$$

Kombinacja obciążeń dla SGN (faza montażu):

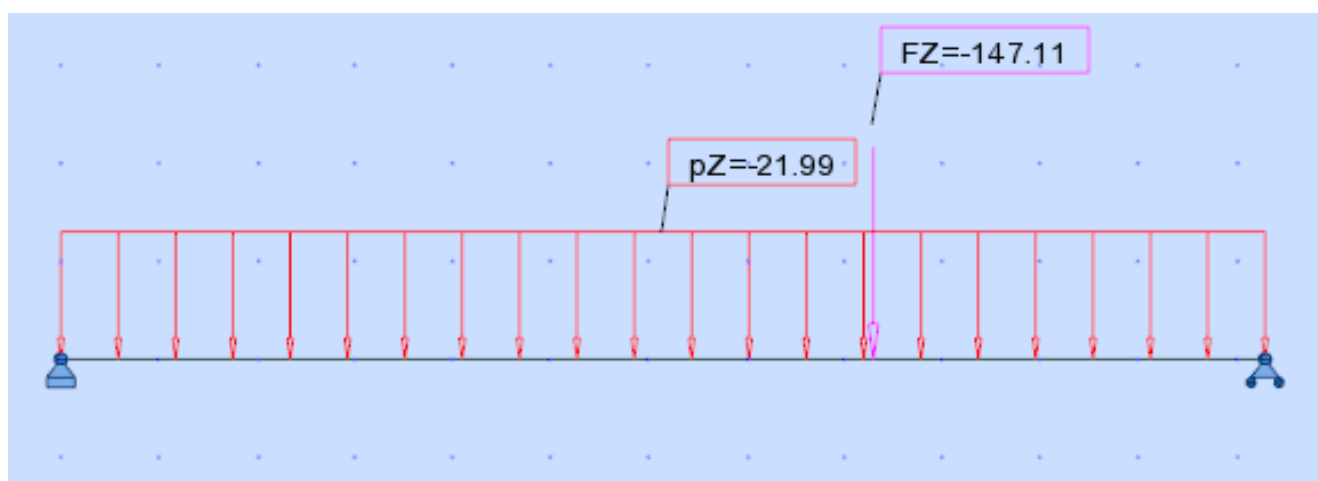
$$q_m = 1,35 * 3,08 + 1,5 * 1 * 2,4 = 7,76 \text{ kN/m (wzór 6.10a PN-EN 1990)}$$

2.5.4. Obliczenie sił wewnętrznych

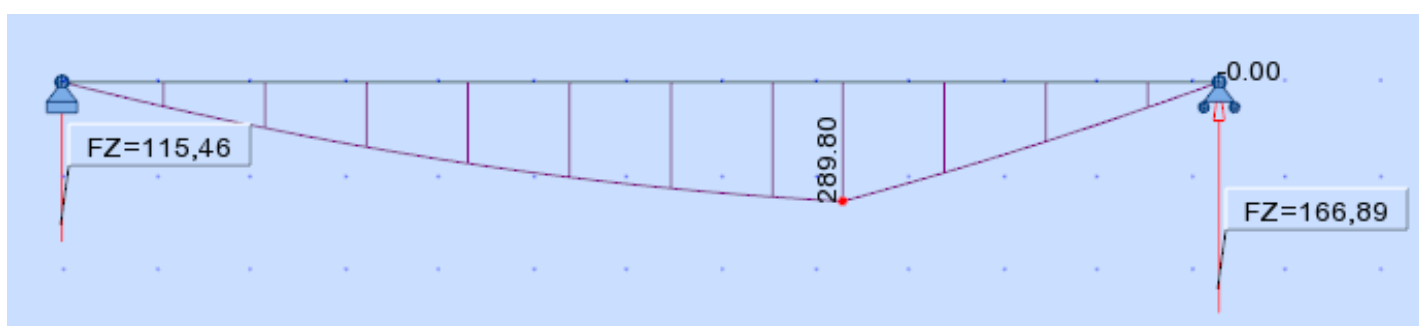
2.5.4.1. Siły wewnętrzne dla obciążeń użytkowych

Dla SGN:

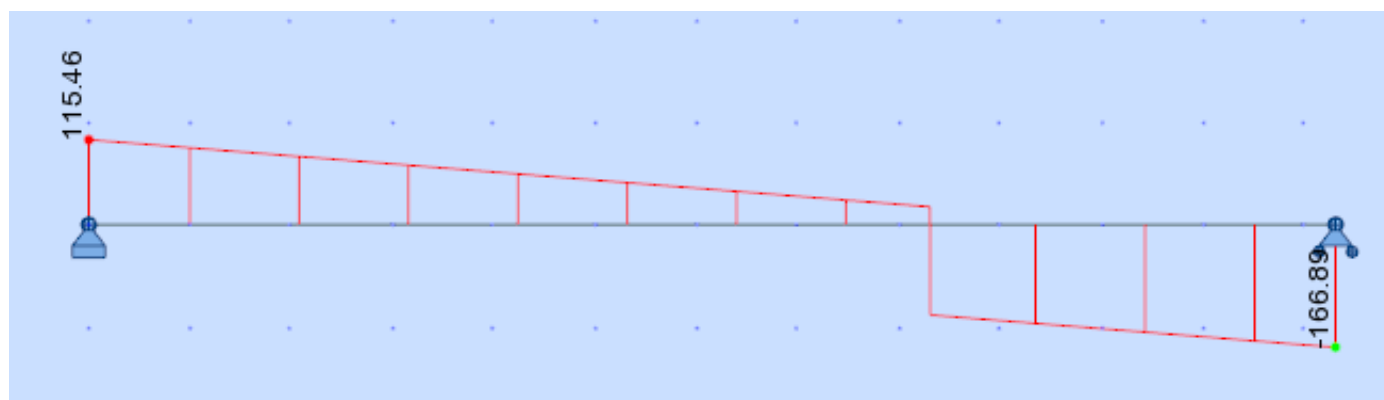
Schemat statyczny:



Wykres momentów zginających M [kNm]:

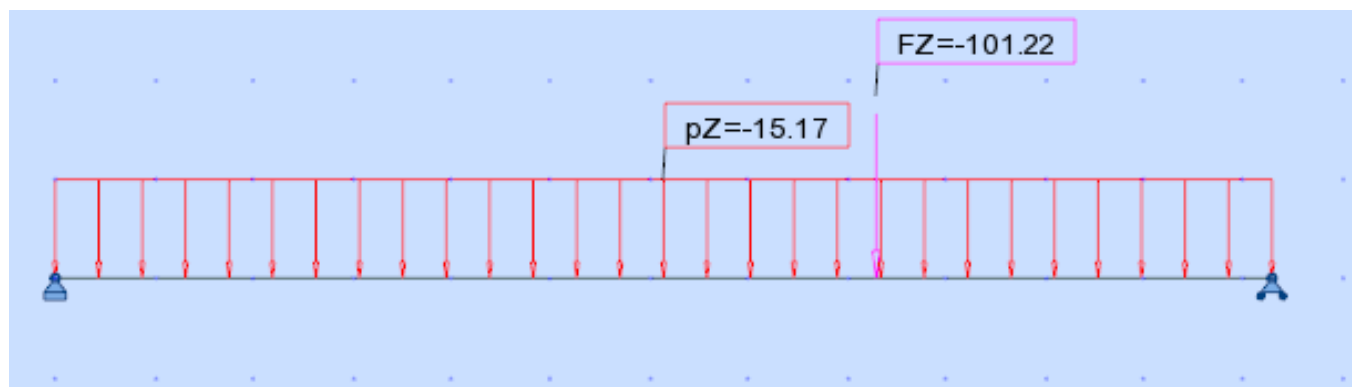


Wykres sił tnących V [kN]:

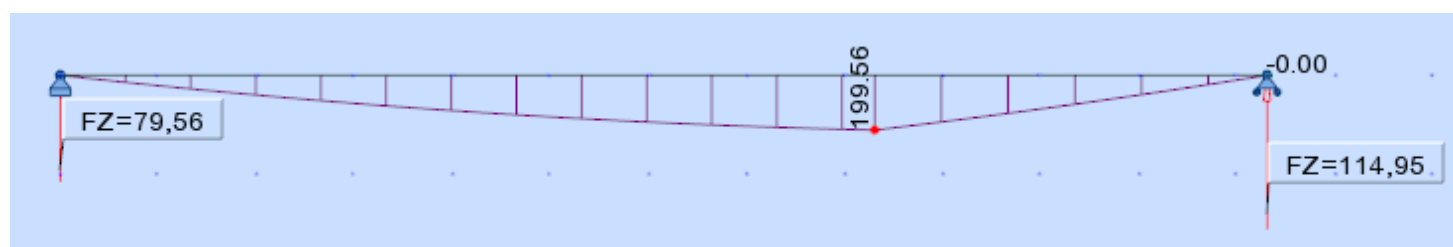


Dla SGU:

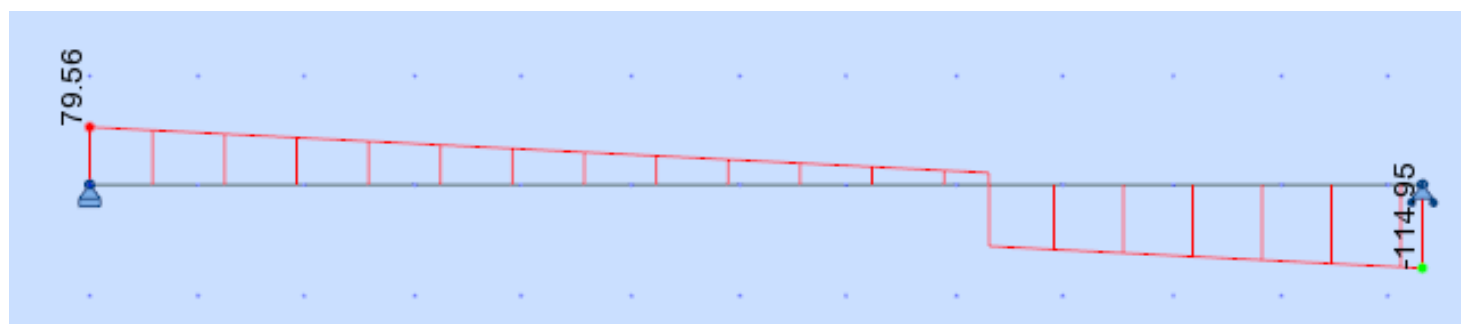
Schemat statyczny:



Wykres momentów zginających M [kNm]:



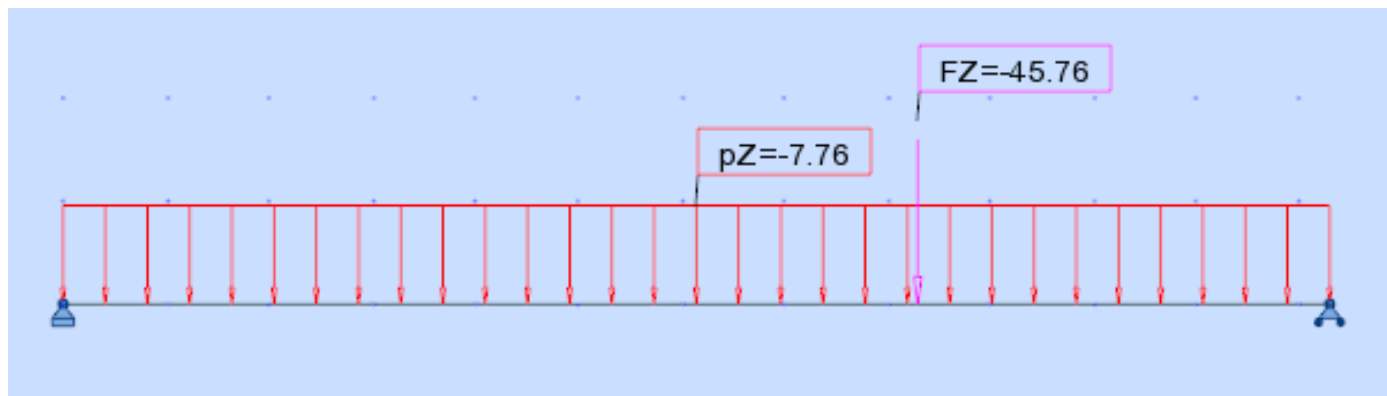
Wykres sił tnących V [kN]:



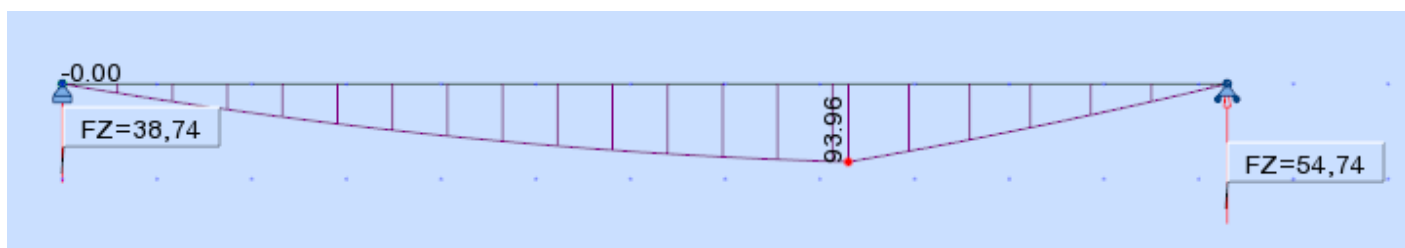
2.5.4.2. Siły wewnętrzne dla obciążeń w fazie montażu

Dla SGN:

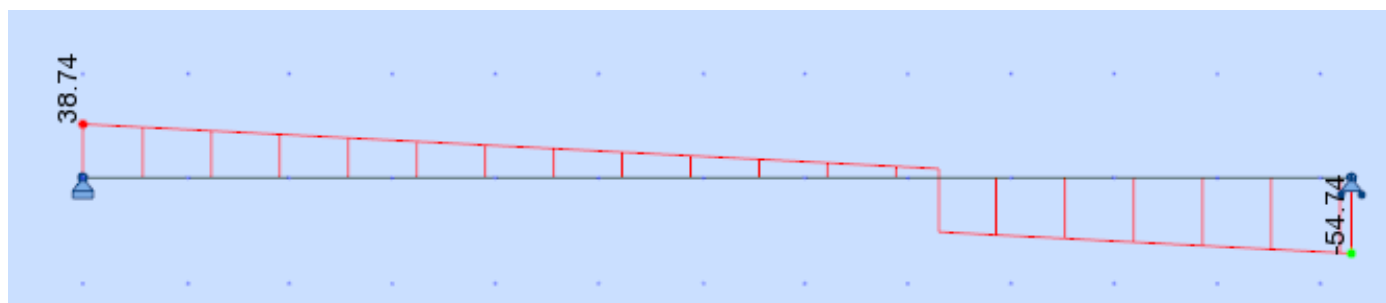
Schemat statyczny:



Wykres momentów zginających M [kNm]:



Wykres sił tnących V [kN]:



2.5.5. Sprawdzenie nośności belki

2.5.5.1. Sprawdzenie nośności dla obciążenia użytkowego

Wyznaczenie klasy przekroju:

Środek:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{235}} = 1$$

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{379}{9.4} = 40.32 < 72\varepsilon = 72$$

Jest to klasa I.

Pas:

$$\frac{c}{t_f} = \frac{69,3}{14,6} = 4,75 < 9\varepsilon = 9$$

Jest to klasa I.

Cały przekrój jest klasy I.

Sprawdzenie nośności przekroju na zginanie:

$$M_{Ed} = M_{max} = 289,80 \text{ kNm}$$

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{y,pl} * f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{0,0017013 * 235000}{1} = 399,81 \text{ kNm}$$

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} = \frac{289,8}{399,81} = 0,72 < 1$$

Sprawdzenie nośności przekroju na ścinanie:

$$\frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \leq 1$$

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{379}{9,4} = 40,32 < 72 \frac{\varepsilon}{\eta} = 72 * \frac{1}{1,2} = 60$$

$$V_{c,Rd} = V_{pl,Rd} = \frac{A_v * \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{M0}}$$

$$A_v = A - 2 * b_f * t_f + (t_w + 2r) * t_f \geq \eta * h_w * t_w$$

$$A_v = 9882 - 2 * 190 * 14,6 + (9,4 + 2 * 21) * 14,6 = 5084,44 \text{ mm}^2 > 1,2 * 379 * 9,4 = 4275,12 \text{ mm}^2$$

$$V_{c,Rd} = V_{pl,Rd} = \frac{A_v * \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,00508444 * \frac{235000}{\sqrt{3}}}{1} = 689,84 \text{ kN}$$

$$V_{Ed} = 166,89 \text{ kN}$$

$$\frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} = \frac{166,89}{689,84} = 0,24 < 1$$

$$\frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} = \frac{166,89}{689,84} = 0,24 < \frac{1}{2} - \text{można rozpatrywać przekrój niezależnie na ścinanie i zginanie}$$

Sprawdzenie środka pod obciążeniem skupionym w przekroju podporowym:

$$S_s = \frac{h}{3} + 150 = \frac{450}{3} + 150 = 300 \text{ mm}$$

$$F_{Ed} = R = 166,89 \text{ kN}$$

$$\frac{F_{Ed}}{F_{Rd}} \leq 1$$

$$F_{Rd} = \frac{f_{yw} * l_{eff} * t_w}{\gamma_{M1}}$$

$$l_{eff} = \chi_F * l_y$$

$$\chi_F = \frac{0,5}{\bar{\lambda}_F} \leq 1$$

$$\bar{\lambda}_F = \sqrt{\frac{l_y * f_{yw} * t_w}{F_{Cr}}}$$

$$F_{Cr} = 0,9 * k_F * E * \frac{t_w^3}{h_w}$$

$$k_F = 2 + 6 * \left(\frac{S_s + c}{h_w} \right) \leq 6$$

$$k_F = 2 + 6 * \left(\frac{S_s + c}{h_w} \right) = 2 + 6 * \left(\frac{300 + 0}{379} \right) = 6,75 > 6$$

$$k_F = 6$$

$$F_{Cr} = 0,9 * k_F * E * \frac{t_w^3}{h_w} = 0,9 * 6 * 210000000 * \frac{(0,0094)^3}{0,379} = 2485,18 \text{ kN}$$

$$l_y = \min \begin{cases} l_e + t_f * \sqrt{\frac{m_1}{2} + \left(\frac{l_e}{t_f} \right)^2} + m_2 \\ l_e + t_f * \sqrt{m_1 + m_2} \end{cases}$$

$$l_e = \frac{k_F * E * t_w^2}{2 * f_{yw} * h_w} \leq S_s + c$$

$$l_e = \frac{k_F * E * t_w^2}{2 * f_{yw} * h_w} = \frac{6 * 210000000 * 0,0094^2}{2 * 235000 * 0,379} = 0,63 \text{ m} > 0,3 \text{ m}$$

$$l_e = 0,3 \text{ m}$$

$$m_1 = \frac{f_{yt} * b_f}{f_{yw} * t_w} = \frac{235 * 0,190}{235 * 0,0094} = 20,21$$

$$m_2 = \begin{cases} 0,02 * \left(\frac{h_w}{t_f} \right)^2 & \text{dla } \bar{\lambda}_F > 0,5 \\ 0 & \text{dla } \bar{\lambda}_F \leq 0,5 \end{cases}$$

$$m_2 = 0,02 * \left(\frac{h_w}{t_f} \right)^2 = 0,02 * \left(\frac{0,379}{0,0146} \right)^2 = 13,48$$

$$l_{y1} = l_e + t_f * \sqrt{\frac{m_1}{2} + \left(\frac{l_e}{t_f} \right)^2} + m_2 = 0,3 + 0,0146 * \sqrt{\frac{20,21}{2} + \left(\frac{0,3}{0,0146} \right)^2} + 13,48 = 0,61 \text{ m}$$

$$l_{y2} = l_e + t_f * \sqrt{m_1 + m_2} = 0,3 + 0,0146 * \sqrt{20,21 + 13,48} = 0,38 \text{ m}$$

$$l_y = 0,38 \text{ m}$$

$$\bar{\lambda}_F = \sqrt{\frac{l_y * f_{yw} * t_w}{F_{Cr}}} = \sqrt{\frac{0,38 * 235000 * 0,0094}{2485,18}} = 0,58 > 0,5$$

$$\chi_F = \frac{0,5}{\bar{\lambda}_F} = \frac{0,5}{0,58} = 0,86$$

$$l_{eff} = \chi_F * l_y = 0,86 * 0,38 = 0,33 \text{ m}$$

$$F_{Rd} = \frac{f_{yw} * l_{eff} * t_w}{\gamma_{M1}} = \frac{235000 * 0,33 * 0,0094}{1} = 728,97 \text{ kN}$$

$$\frac{F_{Ed}}{F_{Rd}} = \frac{166,89}{728,97} = 0,23 < 1$$

Sprawdzenie  rodnika pod obci eniem skupionym w miejscu przy o enia reakcji z belki A3:

$$S_s = 12 \text{ mm}$$

$$F_{Ed} = R = 166,89 \text{ kN}$$

$$\frac{F_{Ed}}{F_{Rd}} \leq 1$$

$$F_{Rd} = \frac{f_{yw} * l_{eff} * t_w}{\gamma_{M1}}$$

$$l_{eff} = \chi_F * l_y$$

$$\chi_F = \frac{0,5}{\bar{\lambda}_F} \leq 1$$

$$\bar{\lambda}_F = \sqrt{\frac{l_y * f_{yw} * t_w}{F_{Cr}}}$$

$$F_{Cr} = 0,9 * k_F * E * \frac{t_w^3}{h_w}$$

$$k_F = 6 + 2 * \left(\frac{h_w}{a}\right)^2$$

$$a = 4 \text{ m}$$

$$k_F = 6 + 2 * \left(\frac{h_w}{a}\right)^2 = 6 + 2 * \left(\frac{0,379}{4}\right)^2 = 6,02$$

$$F_{Cr} = 0,9 * k_F * E * \frac{t_w^3}{h_w} = 0,9 * 6,02 * 210000000 * \frac{(0,0094)^3}{0,379} = 2493,46 \text{ kN}$$

$$l_y = s_s + 2 * t_f * (1 + \sqrt{m_1 + m_2})$$

$$m_1 = \frac{f_{yt} * b_f}{f_{yw} * t_w} = \frac{235 * 0,190}{235 * 0,0094} = 20,21$$

$$m_2 = \begin{cases} 0,02 * \left(\frac{h_w}{t_f}\right)^2 & \text{dla } \bar{\lambda}_F > 0,5 \\ 0 & \text{dla } \bar{\lambda}_F \leq 0,5 \end{cases}$$

$$m_2 = 0,02 * \left(\frac{h_w}{t_f}\right)^2 = 0,02 * \left(\frac{0,379}{0,0146}\right)^2 = 13,48$$

$$l_y = s_s + 2 * t_f * (1 + \sqrt{m_1 + m_2}) = 0,012 + 2 * 0,0146 * (1 + \sqrt{20,21 + 13,48}) = 0,21 \text{ m} < a = 4 \text{ m}$$

$$\bar{\lambda}_F = \sqrt{\frac{l_y * f_{yw} * t_w}{F_{Cr}}} = \sqrt{\frac{0,21 * 235000 * 0,0094}{2493,46}} = 0,43 < 0,5 \text{ zatem } m_2 = 0$$

$$l_y = s_s + 2 * t_f * (1 + \sqrt{m_1 + m_2}) = 0,012 + 2 * 0,0146 * (1 + \sqrt{20,21 + 0}) = 0,17 \text{ m} < a = 4 \text{ m}$$

$$\bar{\lambda}_F = \sqrt{\frac{l_y * f_{yw} * t_w}{F_{Cr}}} = \sqrt{\frac{0,17 * 235000 * 0,0094}{2493,46}} = 0,39$$

$$\chi_F = \frac{0,5}{\bar{\lambda}_F} = \frac{0,5}{0,39} = 1,28 > 1 \text{ zatem } \chi_F = 1$$

$$l_{eff} = \chi_F * l_y = 1 * 0,17 = 0,17 \text{ m}$$

$$F_{Rd} = \frac{f_{yw} * l_{eff} * t_w}{\gamma_{M1}} = \frac{235000 * 0,17 * 0,0094}{1} = 375,53 \text{ kN}$$

$$\frac{F_{Ed}}{F_{Rd}} = \frac{166,89}{375,53} = 0,44 < 1$$

Nośność elementu z uwzględnieniem zwichrzenia:

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

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} * \frac{W_{y,pl} * f_y}{\gamma_{M1}} = 1 * \frac{0,0017013 * 235000}{1} = 399,81 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed} = M_{\max} = 289,80 \text{ kNm}$$

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} = \frac{289,80}{399,81} = 0,72 < 1$$

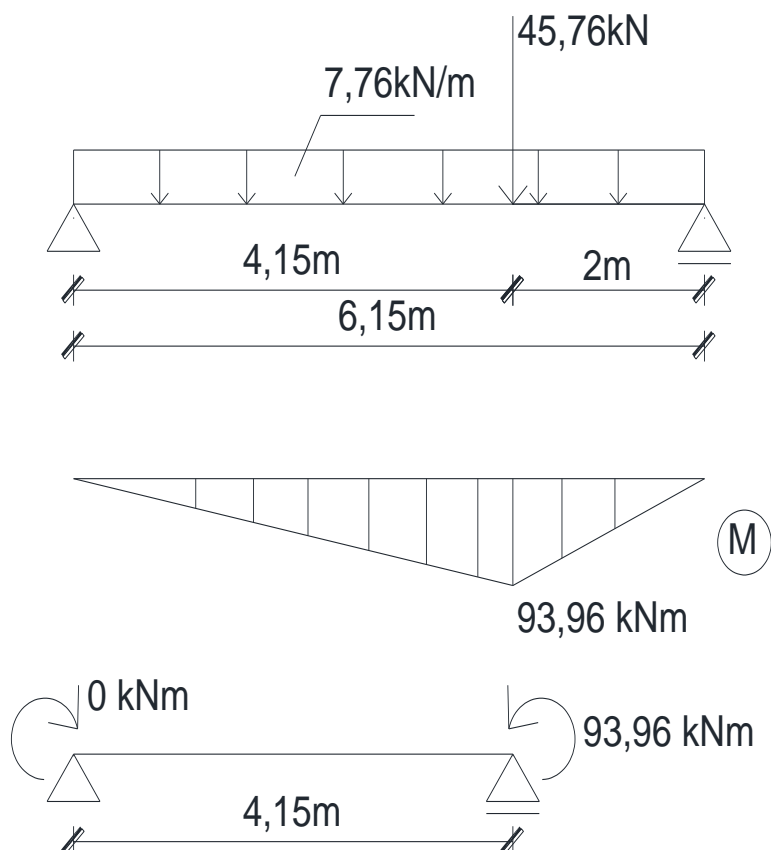
Belka spełnia wymagania stanu granicznego nośności w fazie użytkowania.

2.5.5.2. Sprawdzenie nośności dla obciążenia w fazie montażu

Przekrój spełnia wymagania stanu granicznego nośności w fazie montażu ze względu na mniejsze obciążenia niż w fazie użytkowania.

Sprawdzenie nośności elementu z uwzględnieniem zwichrzenia:

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



$$\Psi = 0$$

$$k = 1,0$$

$$C_1 = 1,879$$

$$\begin{aligned}
M_{cr} &= C_1 * \frac{\pi^2 * E * I_z}{(k * l)^2} * \sqrt{\left(\frac{k}{k_\omega}\right)^2 \frac{I_\omega}{I_z} + \frac{(k * l)^2 * G * I_T}{\pi^2 * E * I_z}} \\
&= 1,879 * \frac{\pi^2 * 210000000 * 0,00001680}{(1 * 4,15)^2} \\
&\quad * \sqrt{\left(\frac{1}{1}\right)^2 * \frac{0,0000007910000}{0,00001680} + \frac{(1 * 4,15)^2 * 81000000 * 0,00000068,9}{\pi^2 * 210000000 * 0,00001680}} \\
&= 3798,91 * \sqrt{1 * 0,047 + 0,0276} = 1037,60 \text{ kNm}
\end{aligned}$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y * f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{0,0014996 * 235000}{1037,60}} = 0,58$$

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

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

$$\beta = 0,75$$

$$\frac{h}{b} = \frac{450}{190} = 2,37 > 2 \text{ zatem krzywa zwichrzenia c}$$

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

$$\begin{aligned}
\phi_{LT} &= 0,5 * [1 + \alpha_{LT} * (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta * \bar{\lambda}_{LT}^2] \\
&= 0,5 * [1 + 0,49 * (0,58 - 0,4) + 0,75 * 0,58^2] = 0,67
\end{aligned}$$

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

$$\chi_{LT1} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \beta * \bar{\lambda}_{LT}^2}} = \frac{1}{0,67 + \sqrt{0,67^2 - 0,75 * 0,58^2}} = 0,90 < 1$$

$$\chi_{LT2} = \frac{1}{\bar{\lambda}_{LT}^2} = \frac{1}{0,58^2} = 2,97 > 1$$

$$\chi_{LT} = 0,90$$

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

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} * \frac{W_{y,pl} * f_y}{\gamma_{M1}} = 0,90 * \frac{0,0017013 * 235000}{1} = 359,82 \text{ kNm}$$

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

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} = \frac{93,96}{359,82} = 0,26 < 1$$

Belka spełnia wymagania stanu granicznego nośności w fazie montażu.

2.5.6. Sprawdzenie ugięcia belki

Sprawdzenie stanu granicznego użyteczności:

$$u \leq u_{dop}$$

$$u_{dop} = \frac{1}{350} l_0 = \frac{1}{350} * 6,15 = 0,018 \text{ m}$$

$$u = u^q + u^P$$

$$u^q = \frac{5}{384} * \frac{q_k * l_0^4}{EI}$$

$$u^P = \frac{1}{48} * \frac{P * l_0^3}{EI}$$

$$\xi = \frac{c_1}{l_0} = \frac{2}{6,15} = 0,33$$

$$\eta = \xi * (3 - 4 * \xi^2) = 0,33 * (3 - 4 * 0,33^2) = 0,85$$

$$P = \eta * P_1 = 0,85 * 101,22 = 86,04 \text{ kN}$$

$$u = u^q + u^P = \frac{5}{384} * \frac{q_k * l_0^4}{EI} + \frac{1}{48} * \frac{P * l_0^3}{EI} = \frac{5}{384} * \frac{15,17 * 6,15^4}{210000000 * 0,00033740} + \frac{1}{48} * \frac{86,04 * 6,15^3}{210000000 * 0,00033740} = 0,00399 + 0,00588 = 0,0099 \text{ m} < 0,018 \text{ m} = u_{dop}$$

Belka spełnia wymagania stanu granicznego użyteczności.

2.5.7. Sprawdzenie oparcia belki na murze

2.5.7.1. Sprawdzenie muru na docisk

Wytrzymałość muru na ściskanie

$$f_k = K * f_b^{0,7} * f_m^{0,3}$$

$$f_b = 7,5 \text{ MPa}$$

$$f_m = 12 \text{ MPa}$$

$K = 0,45$ Elementy murowe I kategorii.

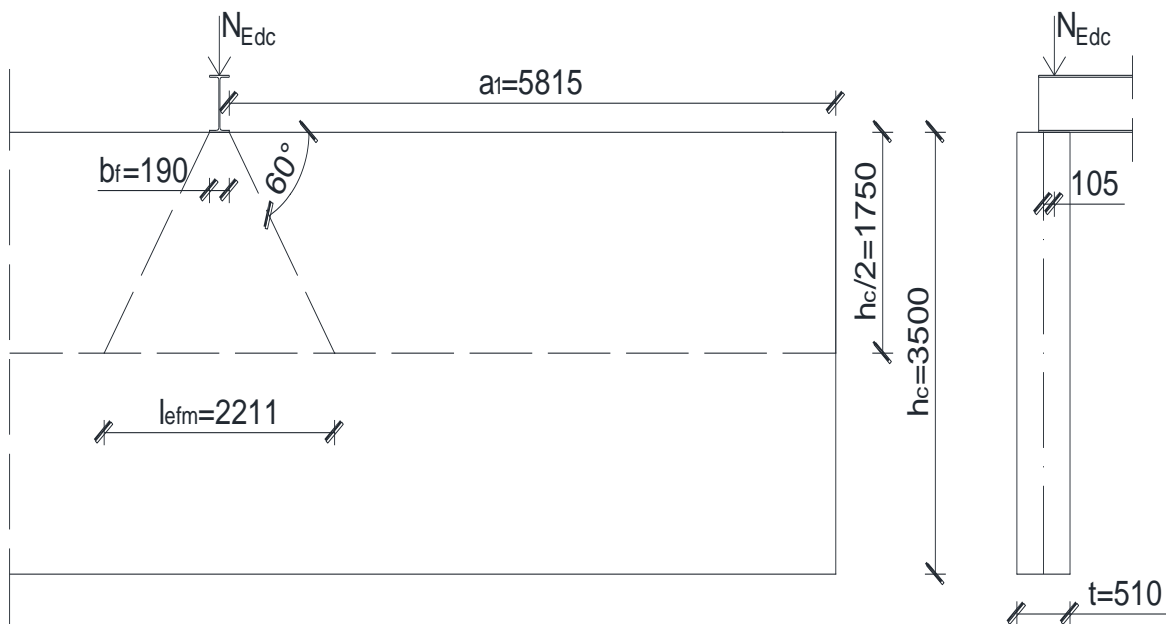
$$f_k = K * f_b^{0,7} * f_m^{0,3} = 0,45 * 7,5^{0,7} * 12^{0,3} = 3,89 \text{ MPa}$$

$$f_d = \frac{f_k}{\gamma_M}$$

$\gamma_M = 1,7$ Przyjęto klasę robót A oraz zaprawę projektowaną.

$$f_d = \frac{f_k}{\gamma_M} = \frac{3,89}{1,7} = 2,29 \text{ MPa}$$

Sprawdzenie nośności muru na docisk



$$N_{Edc} \leq N_{Rdc}$$

$$N_{Edc} = 115,46 \text{ kN}$$

$$N_{Rdc} = \beta * A_b * f_d$$

$$\beta = \left(1 + 0,3 * \frac{a_1}{h_c}\right) * \left(1,5 - 1,1 * \frac{A_b}{A_{ef}}\right) \leq \min \left\{ 1,5, 1,25 + \frac{a_1}{2 * h_c} \right\}$$

$$h_c = 3,5 \text{ m}$$

$$t = 0,51 \text{ m}$$

$$a_1 = 5,815 \text{ m}$$

$$A_{ef} = l_{efm} * t$$

$$l_{efm} = 2,211 \text{ m}$$

$$A_{ef} = l_{efm} * t = 2,211 * 0,51 = 1,13 \text{ m}^2$$

$$A_b = b_f * S_s$$

$$S_s = \frac{h}{3} + 150 = \frac{450}{3} + 150 = 300 \text{ mm}$$

$$b_f = 190 \text{ mm}$$

$$A_b = b_f * S_s = 0,19 * 0,3 = 0,057 \text{ m}^2$$

$$\beta = \left(1 + 0,3 * \frac{a_1}{h_c}\right) * \left(1,5 - 1,1 * \frac{A_b}{A_{ef}}\right) = \left(1 + 0,3 * \frac{5,815}{3,5}\right) * \left(1,5 - 1,1 * \frac{0,057}{1,13}\right) = 2,16$$

$$\leq \min \left\{ \begin{matrix} 1,5 \\ 1,25 + \frac{a_1}{2 * h_c} = 1,25 + \frac{5,815}{2 * 3,5} = 2,08 = 1,5 \end{matrix} \right.$$

$$\beta = 1,5$$

$$N_{Rdc} = \beta * A_b * f_d = 1,5 * 0,057 * 2290 = 195,80 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Edc}}{N_{Rdc}} = \frac{115,46}{195,80} = 0,59$$

Mur spełnia wymagania stanu granicznego nośności bez podkładki.

2.5.8. Wymiarowanie połączenia belek z podciągami

Połączenie zakładkowe niesprężone kategorii A.

Przyjęto blachę węzłową o grubości 8 mm.

Przyjęto 3 śruby M20 klasy 8.8:

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

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

$d = 20 \text{ mm}$

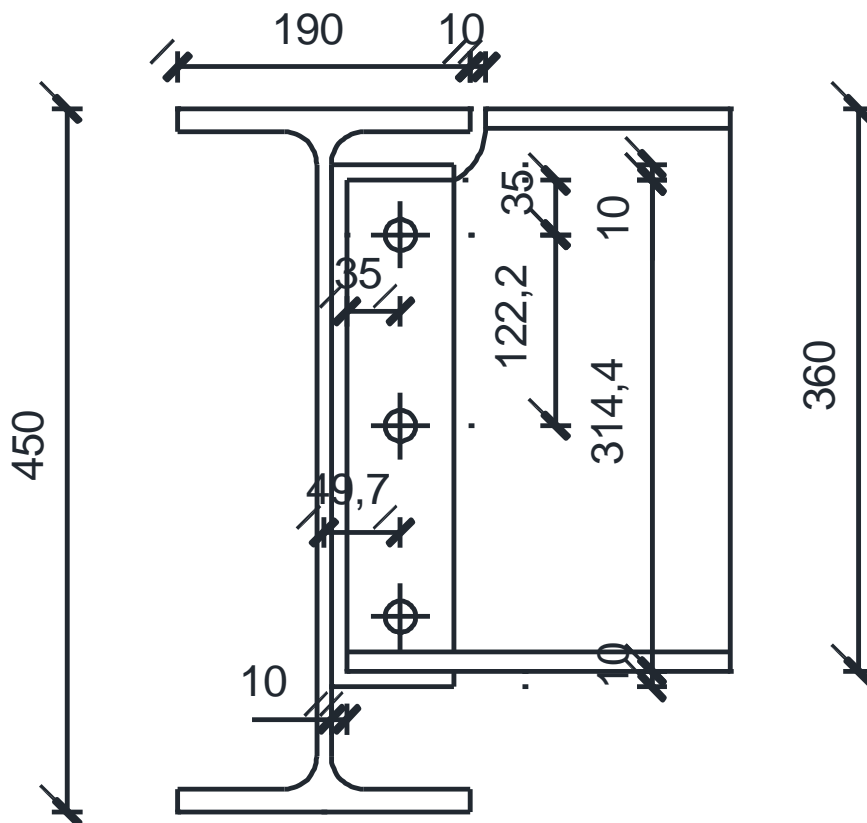
$d_0 = 20 + 2 = 22 \text{ mm}$

$1,2 * d_0 = 1,2 * 22 = 26,4 \text{ mm}$

Przyjęto odległości $e_1 = 35 \text{ mm}$ i $e_2 = 35 \text{ mm}$ oraz $p_2 = 122,2 \text{ mm}$

Przyjęto podkładkę okrągłą klasy C:

średnica otworu $d_1 = 22 \text{ mm}$, średnica zewnętrzna $d_2 = 37 \text{ mm}$, grubość $h = 3 \text{ mm}$



Obliczenie sił w najbardziej wyciążonej śrubie

$V_{Ed} = R(A3) = 147,11 \text{ kN}$

$e = 49,7 \text{ mm}$

$M_{Ed} = V_{Ed} * e = 147,11 * 0,0497 = 7,31 \text{ kNm}$

$F_{v,Ed} = \frac{V_{Ed}}{n} = \frac{147,11}{3} = 49,04 \text{ kN}$

$F_{M,Ed} = \frac{M_{Ed}}{r} = \frac{7,31}{0,2444} = 29,91 \text{ kN}$

$F_{Ed} = \sqrt{F_{M,Ed}^2 + F_{v,Ed}^2} = \sqrt{29,91^2 + 49,04^2} = 57,44 \text{ kN}$

Sprawdzenie nośności na ścinanie

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v * f_{ub} * A_s}{\gamma_{M2}}$$

$\alpha_v = 0,6$ dla śruby klasy 5.6 gdy płaszczyzna ścinania przechodzi przez gwintowaną część śruby

$$A_s = 2,45 \text{ cm}^2$$

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

$$\gamma_{M2} = 1,25$$

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v * f_{ub} * A_s}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 * 800000 * 0,000245}{1,25} = 94,08 \text{ kN}$$

$$\frac{F_{Ed}}{F_{v,Rd}} = \frac{57,44}{94,08} = 0,61 < 1$$

Sprawdzenie nośności na docisk

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 * \alpha_b * f_u * d * t}{\gamma_{M2}}$$

$$f_u = 800 \text{ MPa}$$

$$t = 8 \text{ mm}$$

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

$$\gamma_{M2} = 1,25$$

Dla sił działających prostopadle do osi belki A3

Dla śrub skrajnych

$$\alpha_b = \min \left\{ \frac{e_1}{3d_0}; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1,0 \right\} = \min \left\{ \frac{35}{3 * 22}; \frac{800}{800}; 1,0 \right\} = \min\{0,53; 1,0; 1,0\} = 0,53$$

$$k_1 = \min \left\{ 2,8 \frac{e_2}{d_0} - 1,7; 2,5 \right\} = \min \left\{ 2,8 * \frac{35}{22} - 1,7; 2,5 \right\} = \min\{2,75; 2,5\} = 2,5$$

$$F_{b,Rd,1} = \frac{k_1 * \alpha_b * f_u * d * t}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 * 0,53 * 800000 * 0,02 * 0,008}{1,25} = 135,68 \text{ kN}$$

Dla śruby pośredniej

$$\alpha_b = \min \left\{ \frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4}; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1,0 \right\} = \min \left\{ \frac{122,2}{3 * 22}; \frac{800}{800}; 1,0 \right\} = \min\{1,85; 1,0; 1,0\} = 1,0$$

$$k_1 = \min \left\{ 2,8 \frac{e_2}{d_0} - 1,7; 2,5 \right\} = \min \left\{ 2,8 * \frac{35}{22} - 1,7; 2,5 \right\} = \min\{2,75; 2,5\} = 2,5$$

$$F_{b,Rd,2} = \frac{k_1 * \alpha_b * f_u * d * t}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 * 1,0 * 800000 * 0,02 * 0,008}{1,25} = 256 \text{ kN}$$

$$F_{b,Rd} = 135,68 \text{ kN}$$

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{b,Rd}} = \frac{49,04}{135,68} = 0,36 < 1$$

Dla sił działających równolegle do osi belki A3

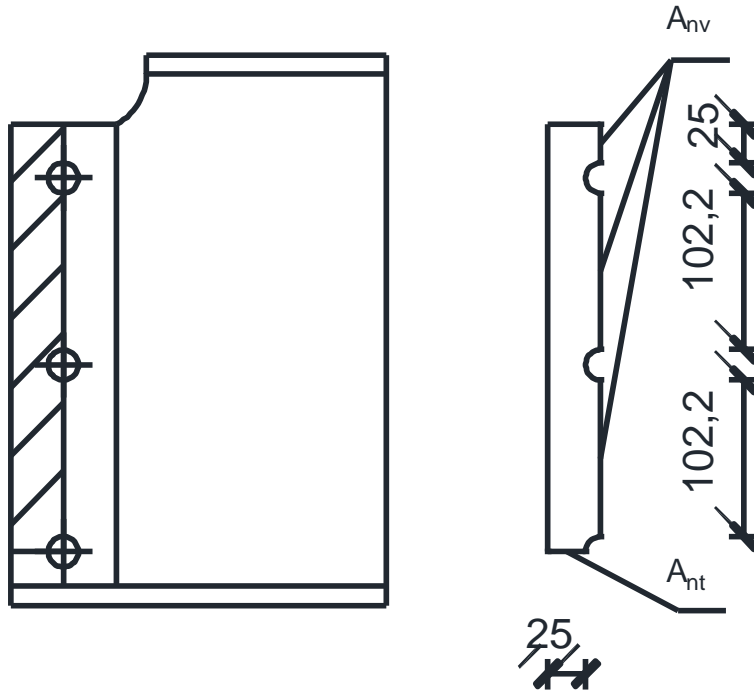
$$\alpha_b = \min \left\{ \frac{e_1}{3d_0}; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1,0 \right\} = \min \left\{ \frac{35}{3 * 22}; \frac{800}{800}; 1,0 \right\} = \min\{0,53; 1,0; 1,0\} = 0,53$$

$$k_1 = \min \left\{ 2,8 \frac{e_2}{d_0} - 1,7; 2,5 \right\} = \min \left\{ 2,8 * \frac{35}{22} - 1,7; 2,5 \right\} = \min\{2,75; 2,5\} = 2,5$$

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 * \alpha_b * f_u * d * t}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 * 0,53 * 800000 * 0,02 * 0,008}{1,25} = 135,68 \text{ kN}$$

$$\frac{F_{M,Ed}}{F_{b,Rd}} = \frac{29,91}{135,68} = 0,22 < 1$$

Sprawdzenie nośności na rozerwanie blokowe



$$V_{eff,2,Rd} = 0,5 * A_{nt} * \frac{f_u}{\gamma_{M2}} + \frac{1}{\sqrt{3}} * A_{nv} * \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$$

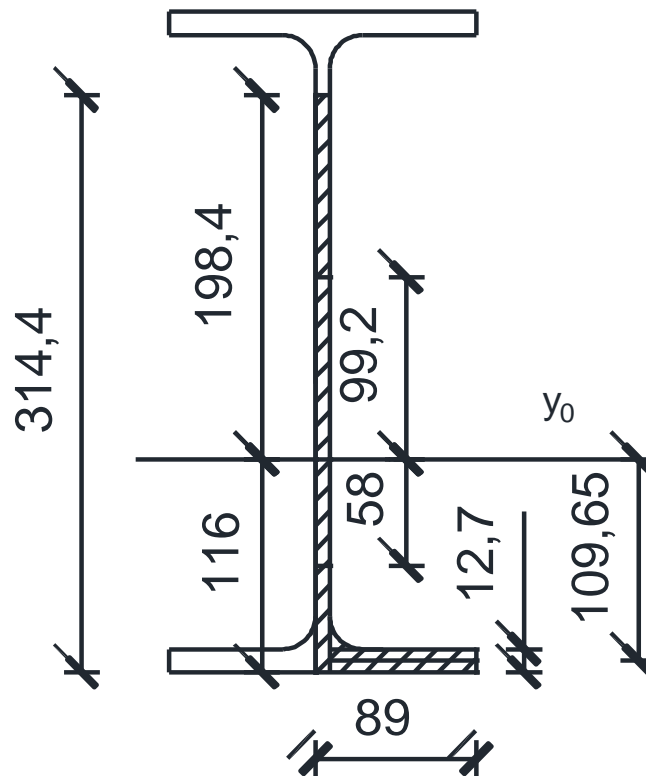
$$A_{nv} = 0,2294 * 0,008 = 0,0018 \text{ m}^2$$

$$A_{nt} = 0,0025 * 0,008 = 0,00002 \text{ m}^2$$

$$V_{eff,2,Rd} = 0,5 * 0,00002 * \frac{360000}{1,25} + \frac{1}{\sqrt{3}} * 0,0018 * \frac{235000}{1,00} = 247,1 \text{ kN}$$

$$\frac{V_{Ed}}{V_{eff,2,Rd}} = \frac{147,11}{247,1} = 0,60 < 1$$

Sprawdzenie nośności przekroju osłabionego



$$\left(\frac{\sigma_{Ed}}{f_y/\gamma_{M0}}\right)^2 + 3 * \left(\frac{\tau_{Ed}}{f_y/\gamma_{M0}}\right)^2 \leq 1$$

$$\sigma_{Ed} = \frac{M}{W_y}$$

$$M = M_{Ed} + V_{Ed} * e = 7,31 + 147,11 * 0,035 = 12,46 \text{ kNm}$$

$$I_y = \frac{0,008 * 0,1984^3}{12} + 0,008 * 0,1984 * 0,0992^2 + \frac{0,008 * 0,116^3}{12} + 0,008 * 0,116 * 0,058^2 + \frac{0,081 * 0,0127^3}{12} + 0,081 * 0,0127 * 0,1097^2 = 0,0000374 \text{ m}^4$$

$$W_y = \frac{I_y}{z} = \frac{0,0000374}{0,1984} = 0,000189 \text{ m}^3$$

$$A_v = 0,3144 * 0,008 = 0,00252 \text{ m}^2$$

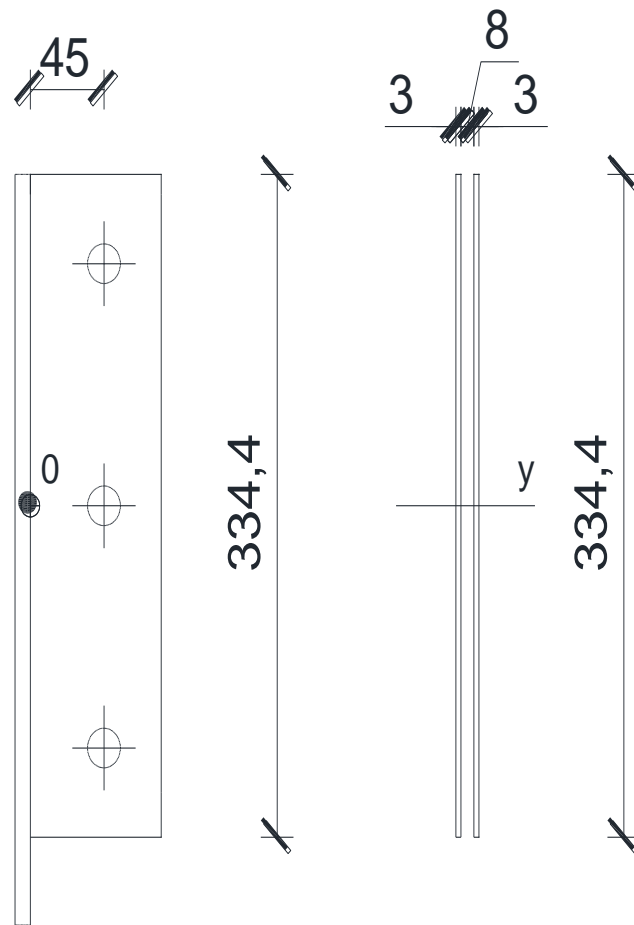
$$M = M_{Ed} + V_{Ed} * e = 7,31 + 147,11 * 0,0035 = 7,82 \text{ kNm}$$

$$\sigma_{Ed} = \frac{M}{W_y} = \frac{7,82}{0,000189} = 41375,66 \text{ kPa}$$

$$\tau_{Ed} = \frac{V_{Ed}}{A_v} = \frac{147,11}{0,00252} = 58376,98 \text{ kPa}$$

$$\left(\frac{\sigma_{Ed}}{f_y/\gamma_{M0}}\right)^2 + 3 * \left(\frac{\tau_{Ed}}{f_y/\gamma_{M0}}\right)^2 = \left(\frac{41375,66}{\frac{235000}{1}}\right)^2 + 3 * \left(\frac{58376,98}{\frac{235000}{1}}\right)^2 = 0,22 < 1$$

Sprawdzenie nośności połączenia spawanego pomiędzy środnikiem, a blachą węzłową



$$V_{Ed} = 147,11 \text{ kN}$$

$$M = M_{Ed} + V_{Ed} * e = 7,31 + 147,11 * 0,0045 = 7,97 \text{ kNm}$$

$$a_w = 0,003 \text{ m}$$

$$l_w = 0,3444 \text{ m}$$

$$A_w = a_w * l_w * 2 = 0,003 * 0,3444 * 2 = 0,00207 \text{ m}^2$$

$$W_y = \frac{0,003 * 0,3444^2}{6} * 2 = 0,000119 \text{ m}^3$$

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 * (\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \leq \frac{f_u}{\beta_w * \gamma_{M2}}$$

$$\sigma_{\perp} \leq 0,9 * \frac{f_u}{\gamma_{M2}}$$

$$\beta_w = 0,8 \text{ dla stali S235}$$

$$\tau = \frac{V_{Ed}}{A_w} = \frac{147,11}{0,00207} = 71067,63 \text{ kPa}$$

$$\tau = \tau_{\parallel} = 71067,63 \text{ kPa}$$

$$\sigma = \frac{M}{W_y} = \frac{7,97}{0,000119} = 66974,79 \text{ kPa}$$

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{\sigma}{\sqrt{2}} = \frac{66974,79}{\sqrt{2}} = 47358,33 \text{ kPa}$$

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 * (\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} = \sqrt{47358,33^2 + 3 * (47358,33^2 + 71067,63^2)} = 155316,03 \text{ kPa}$$

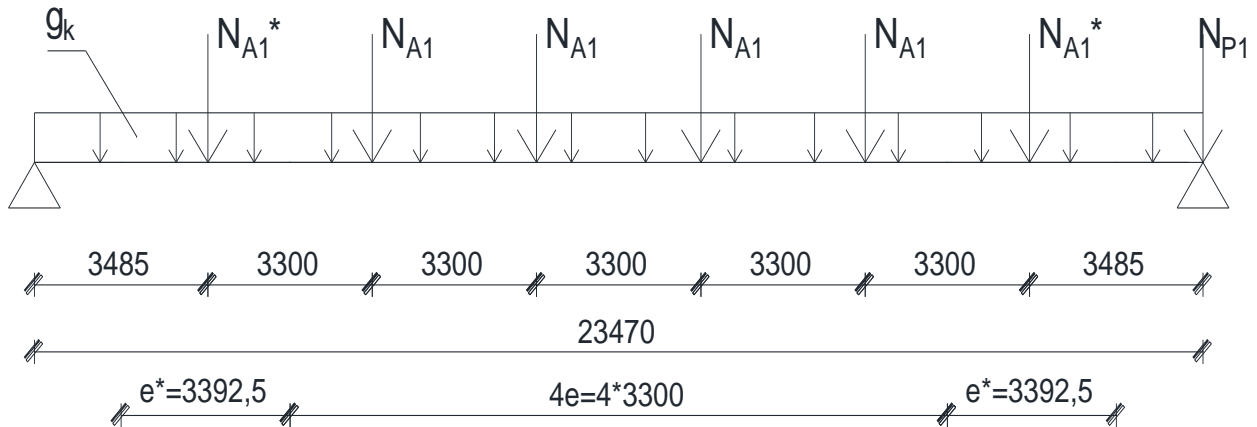
$$< 360000 \text{ kPa} = \frac{360000}{0,8 * 1,25} = \frac{f_u}{\beta_w * \gamma_{M2}}$$

$$\sigma_{\perp} = 47358,33 \text{ kPa} < 259200 \text{ kPa} = 0,9 * \frac{360000}{1,25} = 0,9 * \frac{f_u}{\gamma_{M2}}$$

Połączenie belki A3 z podciągami P1 spełnia wymagania nośności.

3. Obliczenia blachownicy

3.1. Schemat statyczny



$$a = 22,9 \text{ m}$$

$$l_0 = a \cdot 1,025 = 22,9 \cdot 1,025 = 23,47 \text{ m}$$

3.2. Zestawienie obciążeń

Ciężar własny

$$g_k = (0,7 + 0,1 \cdot l_0) \cdot \beta$$

$$\beta = 0,85$$

$$g_k = (0,7 + 0,1 \cdot l_0) \cdot \beta = (0,7 + 0,1 \cdot 23,47) \cdot 0,85 = 2,59 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$g_d = 1,35 \cdot g_k = 1,35 \cdot 2,59 = 3,50 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Reakcje z belek

Faza użytkowania

$$N_{A1d} = 135,21 \text{ kN}$$

$$N_{A1k} = 93,05 \text{ kN}$$

$$N_{A1d}^* = \frac{e^*}{e} \cdot N_{A1d} = \frac{3,3925}{3,3} \cdot 135,21 = 139 \text{ kN}$$

$$N_{A1k}^* = \frac{e^*}{e} \cdot N_{A1k} = \frac{3,3925}{3,3} \cdot 93,05 = 95,66 \text{ kN}$$

$$N_{P1d} = 166,89 \text{ kN}$$

$$N_{P1k} = 114,95 \text{ kN}$$

Faza montażu

$$N_{A1d} = 42,06 \text{ kN}$$

$$N_{A1d}^* = \frac{e^*}{e} \cdot N_{A1d} = \frac{3,3925}{3,3} \cdot 42,06 = 43,24 \text{ kN}$$

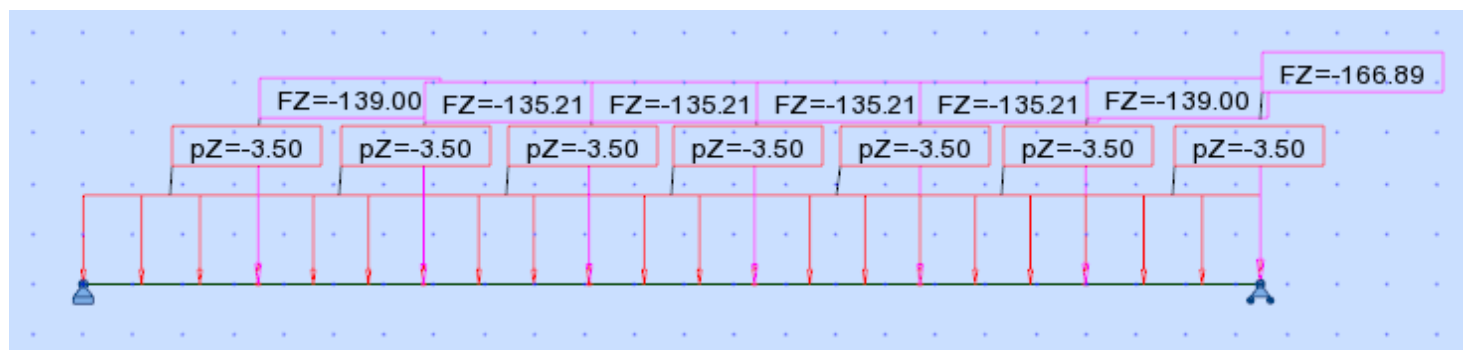
$$N_{P1d} = 54,74 \text{ kN}$$

3.3. Obliczenie sił wewnętrznych

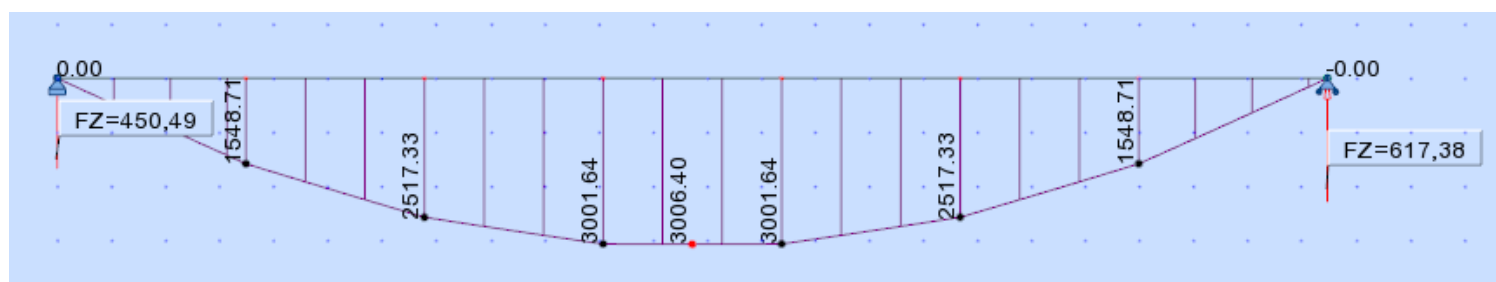
3.3.1. Siły wewnętrzne dla obciążeń użytkowych

Dla SGN

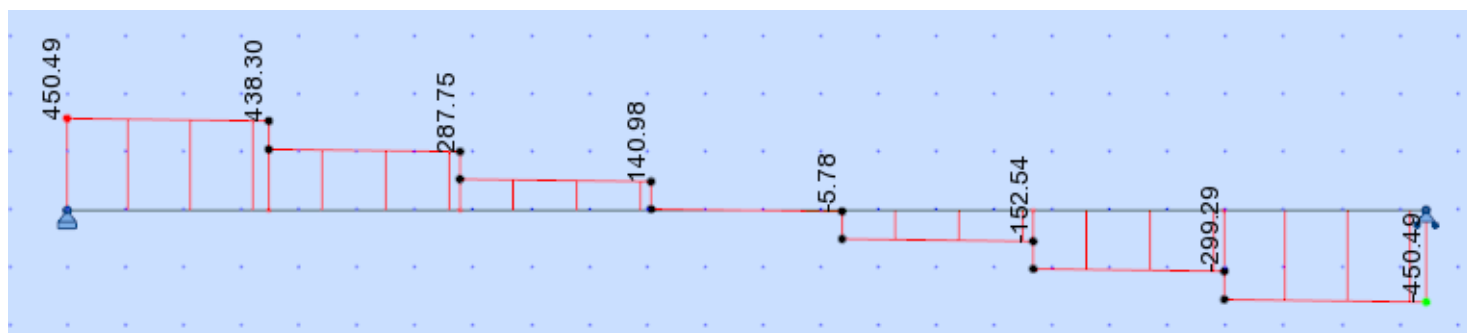
Schemat statyczny



Wykres momentów zginających M [kNm]

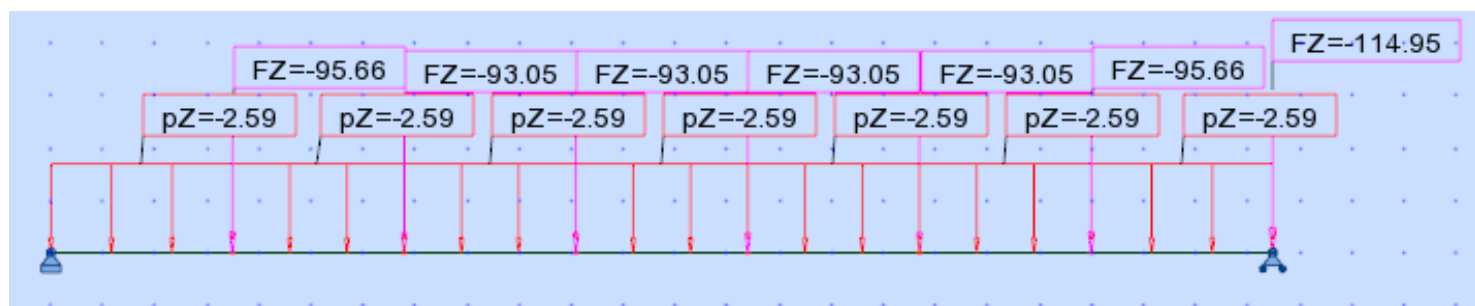


Wykres sił tnących V [kN]

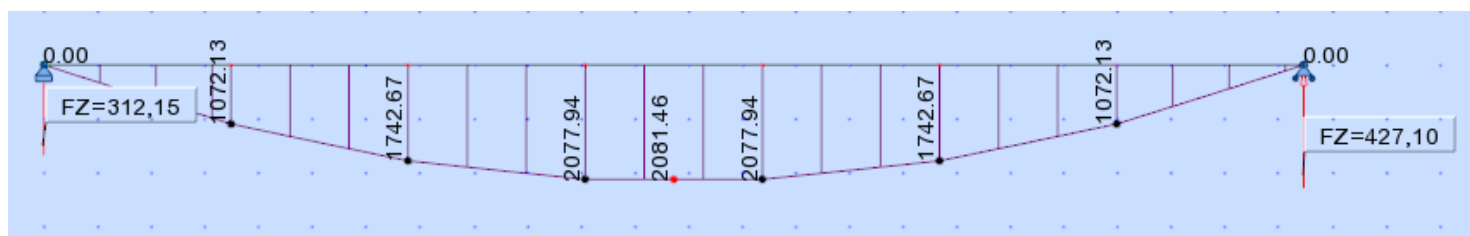


Dla SGU

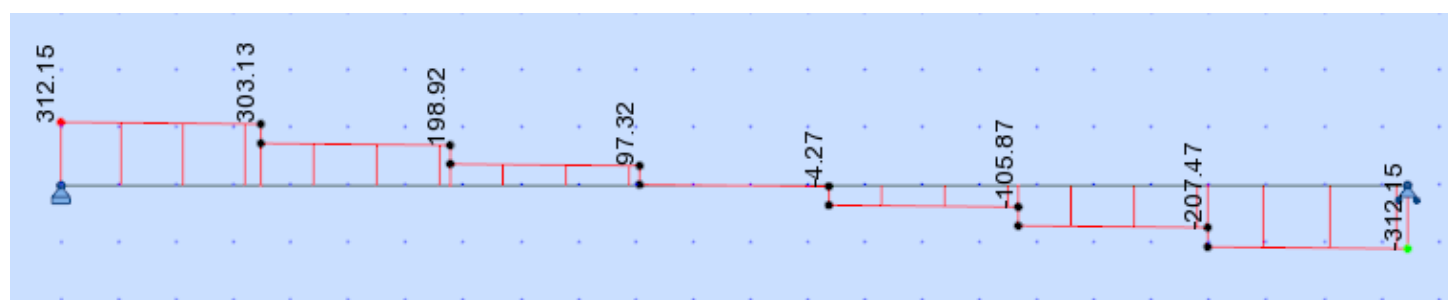
Schemat statyczny



Wykres momentów zginających M [kNm]

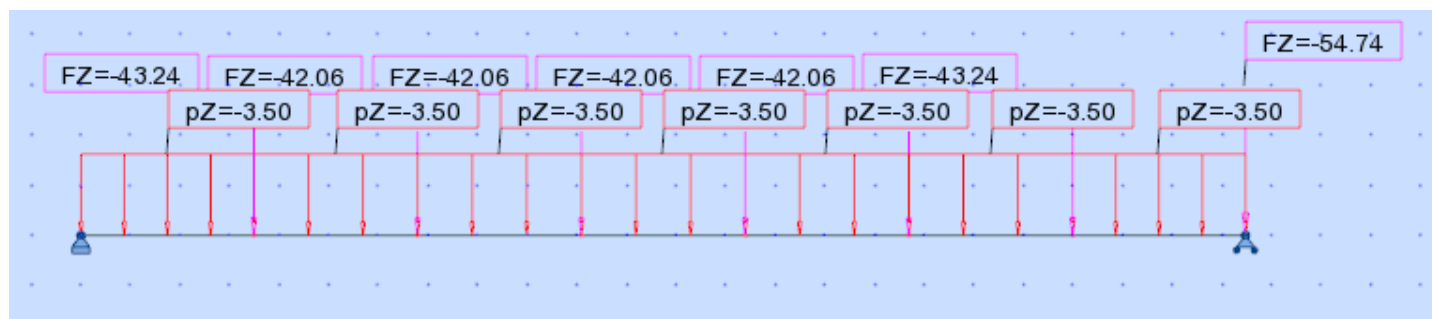


Wykres sił tnących V [kN]

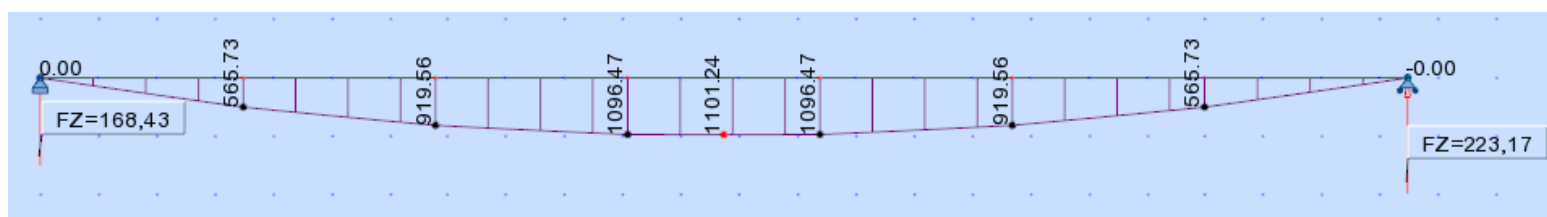


3.3.2. Siły wewnętrzne dla obciążeń w fazie montażu

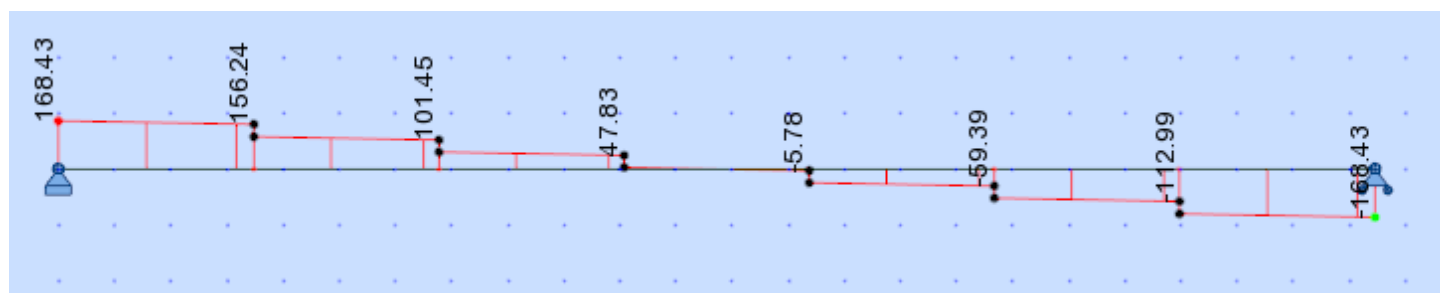
Schemat statyczny



Wykres momentów zginających M [kNm]



Wykres sił tnących V [kN]



3.4. Optymalizacja wymiarów przekroju poprzecznego blachownicy

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

$$M_{c,Rd} = \frac{W_y * f_y}{\gamma_{M0}}$$

$f_y = 235 \text{ MPa}$ Przyjęto stal S235.

$$\gamma_{M0} = 1,0$$

$$W_{y,pot} = \frac{M_{c,Rd} * \gamma_{M0}}{f_y} = \frac{3006,40 * 1,0}{235000} = 0,01279 \text{ m}^3$$

LP	$h_{w,opt}$	h_w	t_w	h_w/t_w	b_f	t_f	c/t	W_y	$W_y/W_{y,pot}$	A	G
	[m]	[m]	[m]	[-]	[m]	[m]	[-]	[m ³]	[-]	[m ²]	[kN/m]
1.	1,48689	1,49	0,007	212,86	0,302	0,03	4,916667	0,015996	1,250686	0,02855	2,19835
2.	1,48689	1,49	0,007	212,86	0,314	0,029	5,293103	0,016068	1,256263	0,028642	2,205434
3.	1,48689	1,49	0,007	212,86	0,324	0,028	5,660714	0,01602	1,252518	0,028574	2,200198
4.	1,48689	1,49	0,007	212,86	0,336	0,027	6,092593	0,016023	1,252738	0,028574	2,200198
5.	1,48689	1,49	0,007	212,86	0,348	0,026	6,557692	0,01599	1,250163	0,028526	2,196502
6.	1,48689	1,49	0,007	212,86	0,362	0,025	7,1	0,015995	1,250619	0,02853	2,19681
7.	1,48689	1,49	0,007	212,86	0,378	0,024	7,729167	0,016031	1,253408	0,028574	2,200198
8.	1,48689	1,49	0,007	212,86	0,394	0,023	8,413043	0,016019	1,25247	0,028554	2,198658
9.	1,48689	1,49	0,007	212,86	0,412	0,022	9,204545	0,016025	1,252932	0,028558	2,198966
10.	1,48689	1,49	0,007	212,86	0,432	0,021	10,11905	0,01604	1,254095	0,028574	2,200198
11.	1,39086	1,395	0,008	174,38	0,308	0,03	5	0,015385	1,202902	0,02964	2,28228
12.	1,39086	1,395	0,008	174,38	0,318	0,029	5,344828	0,015363	1,201168	0,029604	2,279508
13.	1,39086	1,395	0,008	174,38	0,33	0,028	5,75	0,015391	1,203363	0,02964	2,28228
14.	1,39086	1,395	0,008	174,38	0,342	0,027	6,185185	0,015386	1,202942	0,029628	2,281356
15.	1,39086	1,395	0,008	174,38	0,356	0,026	6,692308	0,015419	1,205578	0,029672	2,284744
16.	1,39086	1,395	0,008	174,38	0,37	0,025	7,24	0,015414	1,20516	0,02966	2,28382
17.	1,39086	1,395	0,008	174,38	0,384	0,024	7,833333	0,01537	1,20169	0,029592	2,278584
18.	1,39086	1,395	0,008	174,38	0,4	0,023	8,521739	0,01535	1,200186	0,02956	2,27612
19.	1,39086	1,395	0,008	174,38	0,42	0,022	9,363636	0,015409	1,204793	0,02964	2,28228
20.	1,39086	1,395	0,008	174,38	0,438	0,021	10,2381	0,015354	1,200456	0,029556	2,275812
21.	1,24402	1,245	0,01	124,50	0,328	0,03	5,3	0,014724	1,151247	0,03213	2,47401
22.	1,24402	1,245	0,01	124,50	0,34	0,029	5,689655	0,014753	1,153445	0,03217	2,47709
23.	1,24402	1,245	0,01	124,50	0,352	0,028	6,107143	0,014751	1,153309	0,032162	2,476474
24.	1,24402	1,245	0,01	124,50	0,364	0,027	6,555556	0,014719	1,150836	0,032106	2,472162
25.	1,24402	1,245	0,01	124,50	0,378	0,026	7,076923	0,014722	1,151094	0,032106	2,472162
26.	1,24402	1,245	0,01	124,50	0,394	0,025	7,68	0,014753	1,153496	0,03215	2,47555
27.	1,24402	1,245	0,01	124,50	0,41	0,024	8,333333	0,014744	1,152785	0,03213	2,47401
28.	1,24402	1,245	0,01	124,50	0,428	0,023	9,086957	0,014752	1,153439	0,032138	2,474626
29.	1,24402	1,245	0,01	124,50	0,446	0,022	9,909091	0,014716	1,15059	0,032074	2,469698
30.	1,24402	1,245	0,01	124,50	0,468	0,021	10,90476	0,014739	1,152417	0,032106	2,472162
31.	1,13563	1,140	0,012	95,00	0,34	0,03	5,466667	0,014107	1,103005	0,03408	2,62416
32.	1,13563	1,140	0,012	95,00	0,352	0,029	5,862069	0,01412	1,10399	0,034096	2,625392
33.	1,13563	1,140	0,012	95,00	0,364	0,028	6,285714	0,014105	1,102837	0,034064	2,622928
34.	1,13563	1,140	0,012	95,00	0,378	0,027	6,777778	0,014125	1,104363	0,034092	2,625084
35.	1,13563	1,140	0,012	95,00	0,392	0,026	7,307692	0,014112	1,103393	0,034064	2,622928
36.	1,13563	1,140	0,012	95,00	0,408	0,025	7,92	0,014125	1,104389	0,03408	2,62416
37.	1,13563	1,140	0,012	95,00	0,424	0,024	8,583333	0,014101	1,102533	0,034032	2,620464
38.	1,13563	1,140	0,012	95,00	0,442	0,023	9,347826	0,014094	1,101929	0,034012	2,618924
39.	1,13563	1,140	0,012	95,00	0,462	0,022	10,22727	0,014095	1,102041	0,034008	2,618616
40.	1,13563	1,140	0,012	95,00	0,484	0,021	11,2381	0,014099	1,102335	0,034008	2,618616

Przyjęto następujące charakterystyki blachownicy:

$$h_w = 1,395 \text{ m}$$

$$t_w = 0,008 \text{ m}$$

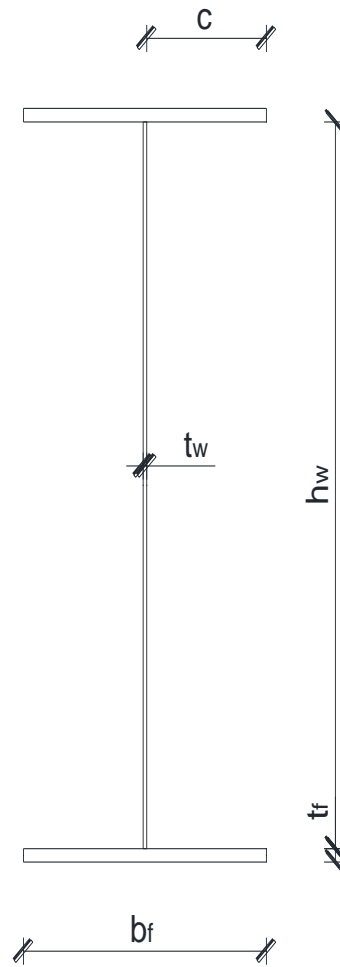
$$b_f = 0,33 \text{ m}$$

$$t_f = 0,028 \text{ m}$$

$$W_y = 0,01539 \text{ m}^3$$

$$A = 0,02964 \text{ m}^2$$

$$G = 2,28 \text{ kN/m}$$



Wstępne sprawdzenie ugięcia

$$I_y^* = k * I_y$$

$$k = 1,2 - 0,033 * \lambda_w^* \leq 1$$

$$\lambda_w^* = \frac{h_w}{t_w} * \sqrt{\frac{f_y}{E}} = \frac{1,395}{0,008} * \sqrt{\frac{235000}{210000000}} = 5,83$$

$$k = 1,2 - 0,033 * \lambda_w^* = 1,2 - 0,033 * 5,83 = 1,01 > 1$$

$$k = 1$$

$$I_y^* = k * I_y = 1 * I_y = I_y$$

$$\begin{aligned} I_y &= \frac{t_w * h_w^3}{12} + 2 * \left(\frac{b_f * t_f^3}{12} + b_f * t_f * \left(\frac{h_w}{2} + \frac{t_f}{2} \right)^2 \right) \\ &= \frac{0,008 * 1,395^3}{12} + 2 * \left(\frac{0,33 * 0,028^3}{12} + 0,33 * 0,028 * \left(\frac{1,395}{2} + \frac{0,028}{2} \right)^2 \right) \\ &= 0,01117 \text{ m}^4 \end{aligned}$$

$$u \leq u_{dop}$$

$$u_{dop} = \frac{1}{350} l_0 = \frac{1}{350} * 23,47 = 0,067 \text{ m}$$

$$u = u^q + u^p$$

$$u^q = \frac{5}{384} * \frac{q_k * l_0^4}{EI}$$

$$u^p = \frac{1}{48} * \frac{P * l_0^3}{EI}$$

$$\xi = \frac{C}{l_0}$$

$$\eta = \xi * (3 - 4 * \xi^2)$$

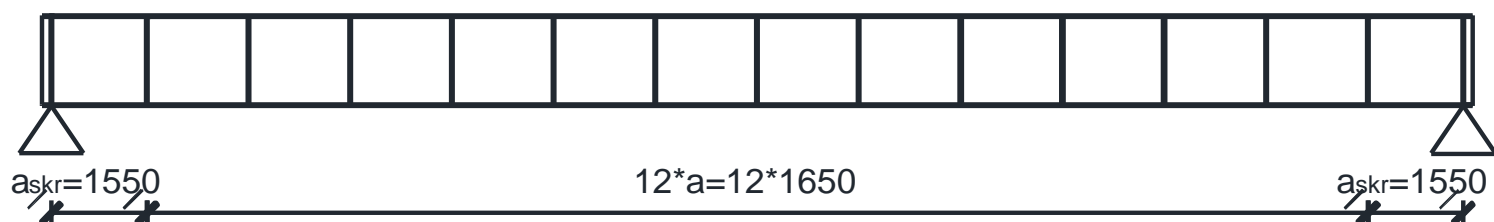
$$P_k = \sum_{i=1}^n \eta_i * P_i$$

n	c _i	ξ_i	η_i	P ₁	$P_i * \eta_i$
1	3,485	0,148	0,432	95,66	41,360
2	6,785	0,289	0,771	93,05	71,708
3	10,085	0,430	0,972	93,05	90,420
4	10,085	0,430	0,972	93,05	90,420
5	6,785	0,289	0,771	93,05	71,708
6	3,485	0,148	0,432	95,66	41,360
				Σ	406,975

$$\begin{aligned} u &= u^q + u^p = \frac{5}{384} * \frac{q_k * l_0^4}{EI} + \frac{1}{48} * \frac{P * l_0^3}{EI} = \frac{5}{384} * \frac{2,59 * 23,47^4}{210000000 * 0,01117} + \frac{1}{48} * \frac{406,975 * 23,47^3}{210000000 * 0,01117} = \\ &0,004362 + 0,04673 = 0,0511 \text{ m} < 0,067 \text{ m} = u_{dop} \end{aligned}$$

3.5. Kształtowanie podłużne blachownicy

3.5.1. Dobór rodzaju i układu żebra

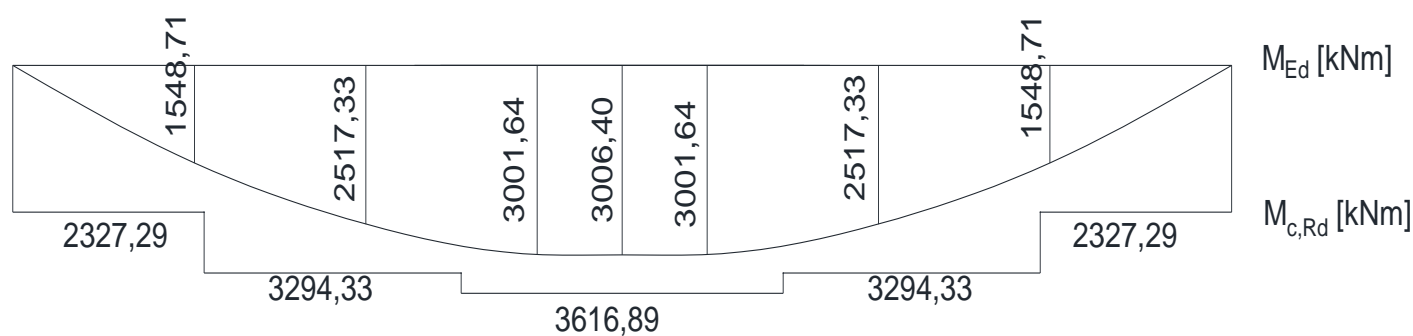
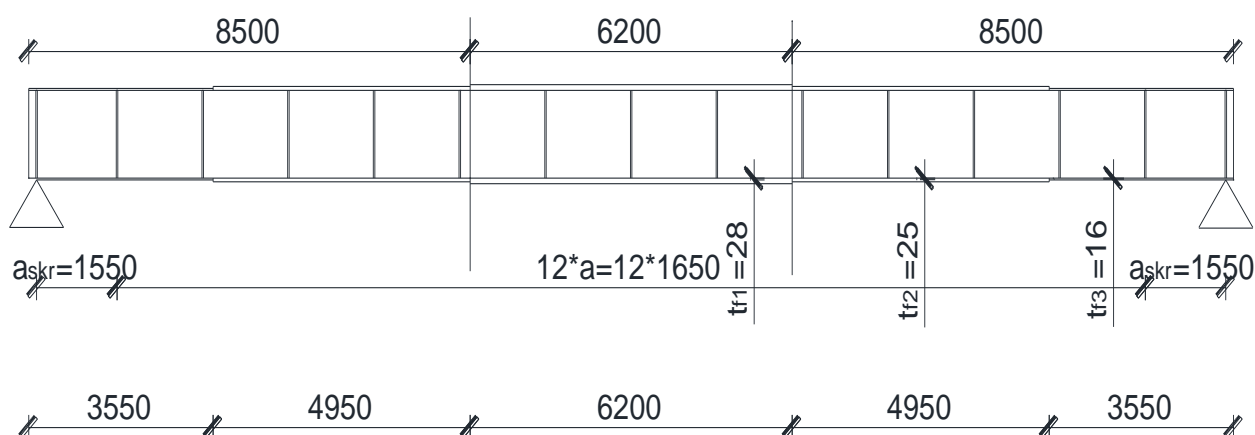


Przyjęto wszystkie żebra pełne

Rozstaw żebra skrajnych: $a_{skr} = 1550$ mm

Rozstaw żebra wewnętrznych $a = 1650$ mm

3.5.2. Kształtowanie stref podziału



Przyjęto następujące grubości pasów zgodnie ze szkicem:

h_w [m]	t_w [m]	b_f [m]	t_f [m]	W_y [m ³]	$M_{c,Rd}$ [kNm]
1,395	0,008	0,33	0,028	0,01539	3618,89
			0,025	0,01402	3294,33
			0,016	0,009903	2327,29

Blachownicę podzielono na 3 elementy wysyłkowe o długościach odpowiednio 8500 mm, 6200 mm oraz 8500 mm. Miejsca podziału pokrywają się z miejscami zmiany grubości pasów z 28 mm na 25 mm.

3.6. Sprawdzenie SGN blachownicy

Wyznaczenie klasy przekroju

Środek:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{235}} = 1$$

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{1,395}{0,008} = 174,38 > 124\varepsilon = 124$$

Jest to klasa IV.

Pas:

$$\frac{c}{t_f} = \frac{0,161}{0,028} = 5,75 < 9\varepsilon = 9$$

Jest to klasa I.

Przekrój jest klasy IV.

Efekt szerokiego pasa

$$b_o \leq \frac{l_e}{50}$$

$$l_e = 23,47 \text{ m}$$

$$b_o = 0,161 \text{ m}$$

$$0,161 \text{ m} < \frac{23,46}{50} = 0,469 \text{ m}$$

Efekt szerokiego pasa nie wystąpi.

3.6.1. Sprawdzenie nośności przekroju blachownicy z warunku na zginanie

Lokalna utrata stateczności

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

$$k_\delta = 23,9$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\frac{\bar{b}}{t}}{28,3 * \varepsilon * \sqrt{k_\delta}}$$

$$\bar{b} = h_w = 1,395 \text{ m}$$

$$t = t_w = 0,008 \text{ m}$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\frac{\bar{b}}{t}}{28,3 * \varepsilon * \sqrt{k_\delta}} = \frac{\frac{1,395}{0,008}}{28,3 * 1 * \sqrt{23,9}} = 1,26$$

$$\rho = 1,0 \text{ dla } \bar{\lambda}_p \leq 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055\Psi} = 0,87$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055 * (3 + \Psi)}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{1,26 - 0,055 * (3 - 1)}{1,26^2} = 0,72 < 1 \text{ dla } \bar{\lambda}_p > 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055\Psi} = 0,87$$

$$\rho = 0,72$$

$$b_{eff} = b_c * \rho = \rho * \frac{\bar{b}}{1 - \Psi} = 0,72 * \frac{1,395}{1 - (-1)} = 0,5022 \text{ m}$$

$$b_{e1} = 0,4 * b_{eff} = 0,4 * 0,5022 = 0,2009 \text{ m}$$

$$b_{e2} = 0,6 * b_{eff} = 0,6 * 0,5022 = 0,3013 \text{ cm}$$

$$A_{eff} = 0,028 * 0,33 * 2 + 0,008 * (0,6975 + 0,2009 + 0,3013) = 0,02808 \text{ m}^2$$

$$S_{y1} = 0,6975 * 0,008 * (-0,3488) + 0,33 * 0,028 * (-(0,014 + 0,6975)) + 0,33 * 0,028 * (0,014 + 0,6975) + 0,008 * 0,3013 * 0,1507 + 0,008 * 0,2009 * (0,1005 + 0,1953 + 0,3013) = -0,0006234 \text{ m}^3$$

$$z_c = \frac{S_{y1}}{A_{eff}} = -\frac{0,0006234}{0,02808} = -0,02221 \text{ m}$$

	Ψ [-]	k_σ [-]	$\bar{\lambda}_p$ [-]	ρ [-]	b_{eff} [m]	b_{e1} [m]	b_{e2} [m]	Δ_y [m]
1.	-1	23,9	1,260	0,72	0,5022	0,2009	0,3013	-0,02221
2.	-0,938	22,31	1,304	0,70	0,5039	0,2015	0,3023	-0,02202
3.	-0,939	22,33	1,304	0,70	0,5037	0,2015	0,3022	-0,02204
4.	-0,939	22,33	1,304	0,70	0,5037	0,2015	0,3022	-0,02204

Przekrój spełnia wymagania stanu granicznego nośności ze względu na zginanie.

Przekrój niebezpieczny: maksymalna siła tnąca

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

$$I_{y,eff} = \frac{0,33 * 0,016^3}{12} + 0,016 * 0,33 * 0,68346^2 + \frac{0,33 * 0,016^3}{12} + 0,016 * 0,33 * 0,72754^2 + \frac{0,008 * 0,67546^3}{12} + 0,008 * 0,67546 * 0,32873^2 + \frac{0,008 * 0,32424^3}{12} + 0,008 * 0,32424 * 0,16212^2 + \frac{0,008 * 0,2015^3}{12} + 0,008 * 0,2015 * 0,61879^2 = 0,006764 \text{ m}^4$$

$$z_{max} = 0,736 \text{ m}$$

$$W_{eff} = \frac{I_y}{z_{max}} = \frac{0,006764}{0,736} = 0,009190 \text{ m}^3$$

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{eff} * f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{0,009190 * 235000}{1} = 2159,65 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed} = 0$$

$$\eta_1 = \frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} = \frac{0}{2159,65} = 0,88 < 1$$

Przekrój spełnia wymagania stanu granicznego nośności ze względu na zginanie.

Przekrój niebezpieczny: zmiana grubości pasów z 28 mm na 25 mm

$$t_f = 25 \text{ mm}$$

$$I_{y,eff} = \frac{0,33 * 0,025^3}{12} + 0,025 * 0,33 * 0,68796^2 + \frac{0,33 * 0,025^3}{12} + 0,025 * 0,33 * 0,73204^2 + \frac{0,008 * 0,67546^3}{12} + 0,008 * 0,67546 * 0,32873^2 + \frac{0,008 * 0,32424^3}{12} + 0,008 * 0,32424 * 0,16212^2 + \frac{0,008 * 0,2015^3}{12} + 0,008 * 0,2015 * 0,61879^2 = 0,009830 \text{ m}^4$$

$$z_{max} = 0,745 \text{ m}$$

$$W_{eff} = \frac{I_y}{z_{max}} = \frac{0,009830}{0,745} = 0,01319 \text{ m}^3$$

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{eff} * f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{0,01319 * 235000}{1} = 3099,65 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed} = 2793,12 \text{ kNm}$$

$$\eta_1 = \frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} = \frac{2793,12}{3099,65} = 0,90 < 1$$

Przekrój spełnia wymagania stanu granicznego nośności ze względu na zginanie.

Przekrój niebezpieczny: zmiana grubości pasów z 25 mm na 16 mm

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

$$I_{y,eff} = \frac{0,33 * 0,016^3}{12} + 0,016 * 0,33 * 0,68346^2 + \frac{0,33 * 0,016^3}{12} + 0,016 * 0,33 * 0,72754^2 + \frac{0,008 * 0,67546^3}{12} + 0,008 * 0,67546 * 0,32873^2 + \frac{0,008 * 0,32424^3}{12} + 0,008 * 0,32424 * 0,16212^2 + \frac{0,008 * 0,2015^3}{12} + 0,008 * 0,2015 * 0,61879^2 = 0,006764 \text{ m}^4$$

$$z_{max} = 0,736 \text{ m}$$

$$W_{eff} = \frac{I_y}{z_{max}} = \frac{0,006764}{0,736} = 0,009190 \text{ m}^3$$

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{eff} * f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{0,009190 * 235000}{1} = 2159,65 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed} = 1608,30$$

$$\eta_1 = \frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} = \frac{1608,30}{2159,65} = 0,74 < 1$$

Przekrój spełnia wymagania stanu granicznego nośności ze względu na zginanie.

Przekrój niebezpieczny: 0,2 rozpiętości belki od podpory (0,2*23470=4694 mm od podpory)

$$t_f = 25 \text{ mm}$$

$$I_{y,eff} = \frac{0,33 * 0,025^3}{12} + 0,025 * 0,33 * 0,68796^2 + \frac{0,33 * 0,025^3}{12} + 0,025 * 0,33 * 0,73204^2 + \frac{0,008 * 0,67546^3}{12} + 0,008 * 0,67546 * 0,32873^2 + \frac{0,008 * 0,32424^3}{12} + 0,008 * 0,32424 * 0,16212^2 + \frac{0,008 * 0,2015^3}{12} + 0,008 * 0,2015 * 0,61879^2 = 0,009830 \text{ m}^4$$

$$z_{max} = 0,745 \text{ m}$$

$$W_{eff} = \frac{I_y}{z_{max}} = \frac{0,009830}{0,745} = 0,01319 \text{ m}^3$$

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{eff} * f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{0,01319 * 235000}{1} = 3099,65 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed} = 1908,09 \text{ kNm}$$

$$\eta_1 = \frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} = \frac{1908,09}{3099,65} = 0,62 < 1$$

Przekrój spełnia wymagania stanu granicznego nośności ze względu na zginanie.

3.6.2. Sprawdzenie nośności przekroju blachownicy z warunku na ścinanie

$$\eta_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{b,Rd}} \leq 1$$

$$\frac{h_w}{t_w} \leq 31 * \frac{\varepsilon}{\eta} * \sqrt{k_\tau}$$

$$\frac{a}{h_w} = \frac{1650}{1395} > 1 \rightarrow k_\tau = 5,34 + 4 * \left(\frac{h_w}{a}\right)^2$$

$$k_\tau = 5,34 + 4 * \left(\frac{1395}{1650}\right)^2 = 8,20$$

$$\eta = 1,2$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{235}} = 1$$

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{1395}{8} = 174,38 > 31 * \frac{\varepsilon}{\eta} * \sqrt{k_\tau} = 31 * \frac{1}{1,2} * \sqrt{8,20} = 73,98$$

Należy zastosować żebra poprzeczne przy podporach i sprawdzić niestateczność przy ścinaniu..

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

Nośność środnika na ścinanie

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

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{37,4 * t_w * \varepsilon * \sqrt{k_\tau}} = \frac{1395}{37,4 * 8 * 1 * \sqrt{8,20}} = 1,628$$

$$\bar{\lambda}_w > 1,08, \text{ żebro podporowe sztywne, } \eta = 1,2$$

$$\chi_w = \frac{1,37}{0,7 + \bar{\lambda}_w} = \frac{1,37}{0,7 + 1,628} = 0,588$$

$$V_{b_w,Rd} = \chi_w * \frac{f_{yw} * t_w * h_w}{\sqrt{3} * \gamma_{M1}} = 0,588 * \frac{235000 * 0,008 * 1,395}{\sqrt{3} * 1} = 890,33 \text{ kN}$$

Przekrój niebezpieczny: maksymalny moment zginający

$$t_f = 28 \text{ mm}$$

Nośność pasa na ścinanie

$$V_{b_f,Rd} = \frac{b_f * t_f^2 * f_{yt}}{c * \gamma_{M1}} * \left[1 - \left(\frac{M_{Ed}}{M_{f,Rd}} \right)^2 \right]$$

$$b_f = 15 * \varepsilon * t_f = 15 * 1 * 0,028 = 0,42 > 0,33$$

$$M_{f,Rd} = \frac{M_{f,Rk}}{\gamma_{M0}}$$

$$M_{f,Rk} = W_y * f_{yt}$$

$$W_y = \frac{2 * \left(\frac{0,33 * 0,028^3}{12} + 0,33 * 0,028 * (0,6975 + 0,014)^2 \right)}{0,6975 + 0,028} = 0,01290 \text{ m}^3$$

$$M_{f,Rk} = W_y * f_{yt} = 0,01290 * 235000 = 3031,5 \text{ kNm}$$

$$M_{f,Rd} = \frac{M_{f,Rk}}{\gamma_{M0}} = \frac{3031,5}{1} = 3031,5 \text{ kNm}$$

$$c = a * \left(0,25 + \frac{1,6 * b_f * t_f^2 * f_{yt}}{t_w * h_w^2 * f_{yw}} \right) = 1,65 * \left(0,25 + \frac{1,6 * 0,33 * 0,028^2 * 235000}{0,008 * 1,395^2 * 235000} \right) = 0,4564$$

$$V_{bf,Rd} = \frac{b_f * t_f^2 * f_{yt}}{c * \gamma_{M1}} * \left[1 - \left(\frac{M_{Ed}}{M_{f,Rd}} \right)^2 \right] = \frac{0,33 * 0,028^2 * 235000}{0,4564 * 1} * \left[1 - \left(\frac{3006,40}{3031,5} \right)^2 \right] = 132,23 \text{ kN}$$

$$V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} + V_{bf,Rd} = 890,33 + 132,23 = 1022,56 \text{ kN} < \frac{\eta * f_{yw} * t_w * h_w}{\sqrt{3} * \gamma_{M1}} = \frac{1,2 * 235000 * 0,008 * 1,395}{\sqrt{3} * 1} = 1816,99 \text{ kN}$$

$$V_{Ed} = 0$$

$$\eta_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{b,Rd}} = \frac{0}{1022,56} = 0 < 1$$

Przekrój spełnia wymagania stanu granicznego nośności ze względu na ścinanie.

Przekrój niebezpieczny: maksymalna siła tnąca

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

Nośność pasa na ścinanie

$$V_{bf,Rd} = \frac{b_f * t_f^2 * f_{yt}}{c * \gamma_{M1}} * \left[1 - \left(\frac{M_{Ed}}{M_{f,Rd}} \right)^2 \right]$$

$$b_f = 15 * \varepsilon * t_f = 15 * 1 * 0,016 = 0,24$$

$$M_{f,Rd} = \frac{M_{f,Rk}}{\gamma_{M0}}$$

$$M_{f,Rk} = W_y * f_{yt}$$

$$W_y = \frac{2 * \left(\frac{0,24 * 0,016^3}{12} + 0,24 * 0,016 * (0,6975 + 0,008)^2 \right)}{0,6975 + 0,016} = 0,005358 \text{ m}^3$$

$$M_{f,Rk} = W_y * f_{yt} = 0,005358 * 235000 = 1259,13 \text{ kNm}$$

$$M_{f,Rd} = \frac{M_{f,Rk}}{\gamma_{M0}} = \frac{1259,13}{1} = 1259,13 \text{ kNm}$$

$$c = a * \left(0,25 + \frac{1,6 * b_f * t_f^2 * f_{yt}}{t_w * h_w^2 * f_{yw}} \right) = 1,65 * \left(0,25 + \frac{1,6 * 0,24 * 0,016^2 * 235000}{0,008 * 1,395^2 * 235000} \right) = 0,4229$$

$$V_{bf,Rd} = \frac{b_f * t_f^2 * f_{yt}}{c * \gamma_{M1}} * \left[1 - \left(\frac{M_{Ed}}{M_{f,Rd}} \right)^2 \right] = \frac{0,24 * 0,016^2 * 235000}{0,4229 * 1} * \left[1 - \left(\frac{0}{1259,13} \right)^2 \right] = 34,14 \text{ kN}$$

$$V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} + V_{bf,Rd} = 890,33 + 34,14 = 924,47 \text{ kN} < \frac{\eta * f_{yw} * t_w * h_w}{\sqrt{3} * \gamma_{M1}} = \frac{1,2 * 235000 * 0,008 * 1,395}{\sqrt{3} * 1} = 1816,99 \text{ kN}$$

$$V_{Ed} = 450,49 \text{ kN}$$

$$\eta_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{b,Rd}} = \frac{450,49}{924,47} = 0,49 < 1$$

Przekrój spełnia wymagania stanu granicznego nośności ze względu na ścinanie.

Przekrój niebezpieczny: zmiana grubości pasów z 28 mm na 25 mm

$$t_f = 25 \text{ mm}$$

Nośność pasa na ścinanie

$$V_{b_f,Rd} = \frac{b_f * t_f^2 * f_{yt}}{c * \gamma_{M1}} * \left[1 - \left(\frac{M_{Ed}}{M_{f,Rd}} \right)^2 \right]$$

$$b_f = 15 * \varepsilon * t_f = 15 * 1 * 0,025 = 0,38 > 0,33$$

$$M_{f,Rd} = \frac{M_{f,Rk}}{\gamma_{M0}}$$

$$M_{f,Rk} = W_y * f_{yt}$$

$$W_y = \frac{2 * \left(\frac{0,33 * 0,025^3}{12} + 0,33 * 0,025 * (0,6975 + 0,0125)^2 \right)}{0,6975 + 0,025} = 0,01151 \text{ m}^3$$

$$M_{f,Rk} = W_y * f_{yt} = 0,01151 * 235000 = 2704,85 \text{ kNm}$$

$$M_{f,Rd} = \frac{M_{f,Rk}}{\gamma_{M0}} = \frac{2704,85}{1} = 2704,85 \text{ kNm}$$

$$c = a * \left(0,25 + \frac{1,6 * b_f * t_f^2 * f_{yt}}{t_w * h_w^2 * f_{yw}} \right) = 1,65 * \left(0,25 + \frac{1,6 * 0,33 * 0,025^2 * 235000}{0,008 * 1,395^2 * 235000} \right) = 0,4475$$

$$V_{b_f,Rd} = \frac{b_f * t_f^2 * f_{yt}}{c * \gamma_{M1}} * \left[1 - \left(\frac{M_{Ed}}{M_{f,Rd}} \right)^2 \right] = \frac{0,33 * 0,025^2 * 235000}{0,4475 * 1} * \left[1 - \left(\frac{2793,12}{2704,85} \right)^2 \right] < 0$$

Pasy są w pełni wykorzystane przy przenoszeniu momentu zginającego

$$V_{b,Rd} = V_{b_w,Rd} = 890,33 = 890,33 \text{ kN} < \frac{\eta * f_{yw} * t_w * h_w}{\sqrt{3} * \gamma_{M1}} = \frac{1,2 * 235000 * 0,008 * 1,395}{\sqrt{3} * 1} = 1816,99 \text{ kN}$$

$$V_{Ed} = 146,07 \text{ kN}$$

$$\eta_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{b,Rd}} = \frac{146,07}{890,33} = 0,16 < 1$$

Przekrój spełnia wymagania stanu granicznego nośności ze względu na ścinanie.

Przekrój niebezpieczny: zmiana grubości pasów z 25 mm na 16 mm

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

Nośność pasa na ścinanie

$$V_{b_f,Rd} = \frac{b_f * t_f^2 * f_{yt}}{c * \gamma_{M1}} * \left[1 - \left(\frac{M_{Ed}}{M_{f,Rd}} \right)^2 \right]$$

$$b_f = 15 * \varepsilon * t_f = 15 * 1 * 0,016 = 0,24$$

$$M_{f,Rd} = \frac{M_{f,Rk}}{\gamma_{M0}}$$

$$M_{f,Rk} = W_y * f_{yt}$$

$$W_y = \frac{2 * \left(\frac{0,24 * 0,016^3}{12} + 0,24 * 0,016 * (0,6975 + 0,008)^2 \right)}{0,6975 + 0,016} = 0,005358 \text{ m}^3$$

$$M_{f,Rk} = W_y * f_{yt} = 0,005358 * 235000 = 1259,13 \text{ kNm}$$

$$M_{f,Rd} = \frac{M_{f,Rk}}{\gamma_{M0}} = \frac{1259,13}{1} = 1259,13 \text{ kNm}$$

$$c = a * \left(0,25 + \frac{1,6 * b_f * t_f^2 * f_{yt}}{t_w * h_w^2 * f_{yw}} \right) = 1,65 * \left(0,25 + \frac{1,6 * 0,24 * 0,016^2 * 235000}{0,008 * 1,395^2 * 235000} \right)$$

$$= 0,4229$$

$$V_{b_f,Rd} = \frac{b_f * t_f^2 * f_{yt}}{c * \gamma_{M1}} * \left[1 - \left(\frac{M_{Ed}}{M_{f,Rd}} \right)^2 \right] = \frac{0,24 * 0,016^2 * 235000}{0,4229 * 1} * \left[1 - \left(\frac{1608,30}{1259,13} \right)^2 \right] < 0$$

Pasy są w pełni wykorzystane przy przenoszeniu momentu zginającego

$$V_{b,Rd} = V_{b_w,Rd} = 890,33 = 890,33 \text{ kN} < \frac{\eta * f_{yw} * t_w * h_w}{\sqrt{3} * \gamma_{M1}}$$

$$= \frac{1,2 * 235000 * 0,008 * 1,395}{\sqrt{3} * 1} = 1816,99 \text{ kN}$$

$$V_{Ed} = 298,60 \text{ kN}$$

$$\eta_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{b,Rd}} = \frac{298,60}{890,33} = 0,34 < 1$$

Przekrój spełnia wymagania stanu granicznego nośności ze względu na ścinanie.

Przekrój niebezpieczny: 0,2 rozpiętości belki od podpory (0,2*23470=4694 mm od podpory)

$$t_f = 25 \text{ mm}$$

Nośność pasa na ścinanie

$$V_{b_f,Rd} = \frac{b_f * t_f^2 * f_{yt}}{c * \gamma_{M1}} * \left[1 - \left(\frac{M_{Ed}}{M_{f,Rd}} \right)^2 \right]$$

$$b_f = 15 * \varepsilon * t_f = 15 * 1 * 0,025 = 0,38 > 0,33$$

$$M_{f,Rd} = \frac{M_{f,Rk}}{\gamma_{M0}}$$

$$M_{f,Rk} = W_y * f_{yt}$$

$$W_y = \frac{2 * \left(\frac{0,33 * 0,025^3}{12} + 0,33 * 0,025 * (0,6975 + 0,0125)^2 \right)}{0,6975 + 0,025} = 0,01151 \text{ m}^3$$

$$M_{f,Rk} = W_y * f_{yt} = 0,01151 * 235000 = 2704,85 \text{ kNm}$$

$$M_{f,Rd} = \frac{M_{f,Rk}}{\gamma_{M0}} = \frac{2704,85}{1} = 2704,85 \text{ kNm}$$

$$c = a * \left(0,25 + \frac{1,6 * b_f * t_f^2 * f_{yt}}{t_w * h_w^2 * f_{yw}} \right) = 1,65 * \left(0,25 + \frac{1,6 * 0,33 * 0,025^2 * 235000}{0,008 * 1,395^2 * 235000} \right)$$

$$= 0,4475$$

$$V_{bf,Rd} = \frac{b_f * t_f^2 * f_{yt}}{c * \gamma_{M1}} * \left[1 - \left(\frac{M_{Ed}}{M_{f,Rd}} \right)^2 \right] = \frac{0,33 * 0,025^2 * 235000}{0,4475 * 1} * \left[1 - \left(\frac{1908,09}{2704,85} \right)^2 \right]$$

$$= 54,41 \text{ kN}$$

$$V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} + V_{bf,Rd} = 890,33 + 54,41 = 944,74 \text{ kN} < \frac{\eta * f_{yw} * t_w * h_w}{\sqrt{3} * \gamma_{M1}}$$

$$= \frac{1,2 * 235000 * 0,008 * 1,395}{\sqrt{3} * 1} = 1816,99 \text{ kN}$$

$$V_{Ed} = 944,74 \text{ kN}$$

$$\eta_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{b,Rd}} = \frac{295,06}{944,74} = 0,31 < 1$$

Przekrój spełnia wymagania stanu granicznego nośności ze względu na ścinanie.

3.6.3. Sprawdzenie nośności przekroju blachownicy z warunku na obciążenie skupione

Nie ma potrzeby sprawdzania warunku z uwagi na obecność żeber poprzecznych pełnych w miejscach przyłożenia wszystkich sił skupionych.

3.6.4. Sprawdzenie interakcyjnych warunków nośności

W każdym przypadku $\bar{\eta}_3 < 0,5$ – nie ma potrzeby sprawdzać interakcyjnych warunków nośności.

3.6.5. Sprawdzenie stateczności pasa przy smukłym środkniku

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

$$k=0,55$$

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{1,395}{0,008} = 174,38 < k * \frac{E}{f_{yf}} \sqrt{\frac{A_w}{A_{fc}}} = 0,55 * \frac{210000000}{235000} \sqrt{\frac{1,395 * 0,008}{0,33 * 0,028}} = 540,14$$

Pas ściskany nie utraci stateczności.

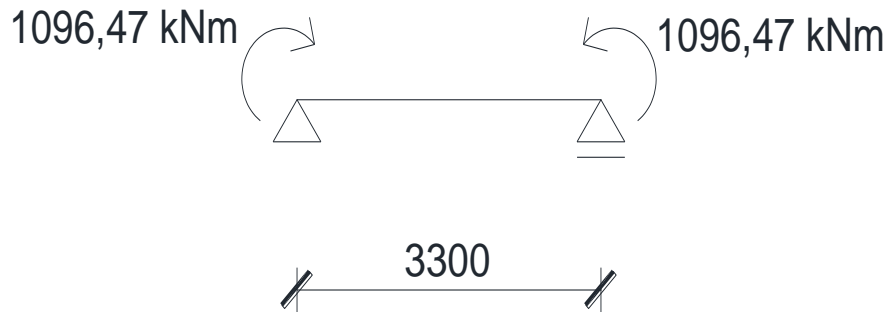
3.6.6. Sprawdzenie stateczności blachownicy z warunku na zwichrzenie

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

$$I_z = 0,00016777 \text{ m}^4$$

$$I_T = 0,0000048168 \text{ m}^4$$

$$I_\omega = 0,000084928 \text{ m}^6$$



$$\Psi = 1$$

$$k = 1,0$$

$$C_1 = 1,0$$

$$\begin{aligned} M_{cr} &= C_1 * \frac{\pi^2 * E * I_z}{(k * l)^2} * \sqrt{\left(\frac{k}{k_\omega}\right)^2 \frac{I_\omega}{I_z} + \frac{(k * l)^2 * G * I_T}{\pi^2 * E * I_z}} \\ &= 1,0 * \frac{\pi^2 * 210000000 * 0,00016777}{(1 * 3,3)^2} \\ &\quad * \sqrt{\left(\frac{1}{1}\right)^2 * \frac{0,000084928}{0,00016777} + \frac{(1 * 3,3)^2 * 81000000 * 0,0000048168}{\pi^2 * 210000000 * 0,00016777}} = \\ &= 22990,74 \text{ kNm} \end{aligned}$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y * f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{0,01453 * 235000}{22990,74}} = 0,39$$

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

$$\bar{\lambda}_{LT} = 0,39 < \bar{\lambda}_{LT,0} = 0,4$$

$$\chi_{LT} = 1,0$$

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

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} * \frac{W_y * f_y}{\gamma_{M1}} = 1,0 * \frac{0,01453 * 235000}{1} = 3414,55 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed} = M_{max} = 1101,24 \text{ kNm}$$

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} = \frac{1101,24}{3414,55} = 0,32 < 1$$

Blachownica spełnia wymagania stanu granicznego nośności w fazie montażu.

3.7. Sprawdzenie spoin pasowych blachownicy

$$\tau = \frac{V * \bar{S}}{I * b}$$

$$V_{max} = 450,49 \text{ kN}$$

$$\bar{S} = 0,33 * 0,028 * \left(0,6975 + \frac{0,028}{2}\right) = 0,006574 \text{ m}^3$$

$$I_{y,min} = \frac{0,33 * 0,016^3}{12} + 0,016 * 0,33 * 0,68346^2 + \frac{0,33 * 0,016^3}{12} + 0,016 * 0,33 * 0,72754^2 + \frac{0,008 * 0,67546^3}{12} + 0,008 * 0,67546 * 0,32873^2 + \frac{0,008 * 0,32424^3}{12} + 0,008 * 0,32424 * 0,16212^2 + \frac{0,008 * 0,2015^3}{12} + 0,008 * 0,2015 * 0,61879^2 = 0,006764 \text{ m}^4$$

$$\tau = \frac{V * \bar{S}}{I * b} = \frac{450,49 * 0,006574}{0,006764 * b} = \frac{437,836 \text{ kN}}{b} \frac{1}{m}$$

$$b = 2 * a_w$$

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 * (\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \leq \frac{f_u}{\beta_w * \gamma_{M2}}$$

$$\sigma_{\perp} = 0$$

$$\tau_{\perp} = 0$$

$$\tau_{\parallel} = \tau$$

$$a_w$$

$$\sqrt{3 * \left(\frac{437,836}{2 * a_w}\right)^2} \leq \frac{360000}{0,8 * 1,25}$$

$$a_w \geq 0,001053 \text{ m} = 1,05 \text{ mm}$$

$$0,2 * t_f = 0,2 * 28 = 5,6 \text{ mm} \leq a_w \leq 0,7 * t_w = 0,7 * 8 = 5,6 \text{ mm}$$

Przyjęto $a_w = 5 \text{ mm}$

3.8. Wymiarowanie styku montażowego blachownicy (średnika i pasa)

Przyjęto odległość spoin pasowych od styku montażowego

$$c = 20 * t_f = 20 * 0,028 = 0,56 \text{ m}$$

Dla łączonych pasów przyjęto spoinę typu V

3.9. Sprawdzenie SGU blachownicy

Sprawdzenie ugięcia

$$I_y^* = k * I_y$$

$$k = 1,2 - 0,033 * \lambda_w^* \leq 1$$

$$\lambda_w^* = \frac{h_w}{t_w} * \sqrt{\frac{f_y}{E}} = \frac{1,395}{0,008} * \sqrt{\frac{235000}{210000000}} = 5,83$$

$$k = 1,2 - 0,033 * \lambda_w^* = 1,2 - 0,033 * 5,83 = 1,01 > 1$$

$$k = 1$$

$$I_y^* = k * I_y = 1 * I_y = I_y$$

$$I_{y,eff} = 0,01087 \text{ m}^4$$

$$u \leq u_{dop}$$

$$u_{dop} = \frac{1}{350} l_0 = \frac{1}{350} * 23,47 = 0,067 \text{ m}$$

$$u = u^q + u^p$$

$$u^q = \frac{5}{384} * \frac{q_k * l_0^4}{EI}$$

$$u^p = \frac{1}{48} * \frac{P * l_0^3}{EI}$$

$$\xi = \frac{c}{l_0}$$

$$\eta = \xi * (3 - 4 * \xi^2)$$

$$P_k = \sum_{i=1}^n \eta_i * P_i$$

n	c _i	ξ_i	η_i	P ₁	$P_i * \eta_i$
1	3,485	0,148	0,432	95,66	41,360
2	6,785	0,289	0,771	93,05	71,708
3	10,085	0,430	0,972	93,05	90,420
4	10,085	0,430	0,972	93,05	90,420
5	6,785	0,289	0,771	93,05	71,708
6	3,485	0,148	0,432	95,66	41,360
				Σ	406,975

$$u = u^q + u^p = \frac{5}{384} * \frac{q_k * l_0^4}{EI} + \frac{1}{48} * \frac{P * l_0^3}{EI} = \frac{5}{384} * \frac{2,59 * 23,47^4}{210000000 * 0,01087} + \frac{1}{48} * \frac{406,975 * 23,47^3}{210000000 * 0,01087} =$$

$$0,004483 + 0,04802 = 0,0525 \text{ m} < 0,067 \text{ m} = u_{dop}$$

Sprawdzenie częstotliwości drgań własnych

$$\omega_0 = \frac{k^2 * \pi^2}{l^2} * \sqrt{\frac{E * I_y}{\mu}}$$

$$k = 1$$

$$\mu = \frac{2,28}{9,81} * 1000 = 232,42 \frac{kg}{m}$$

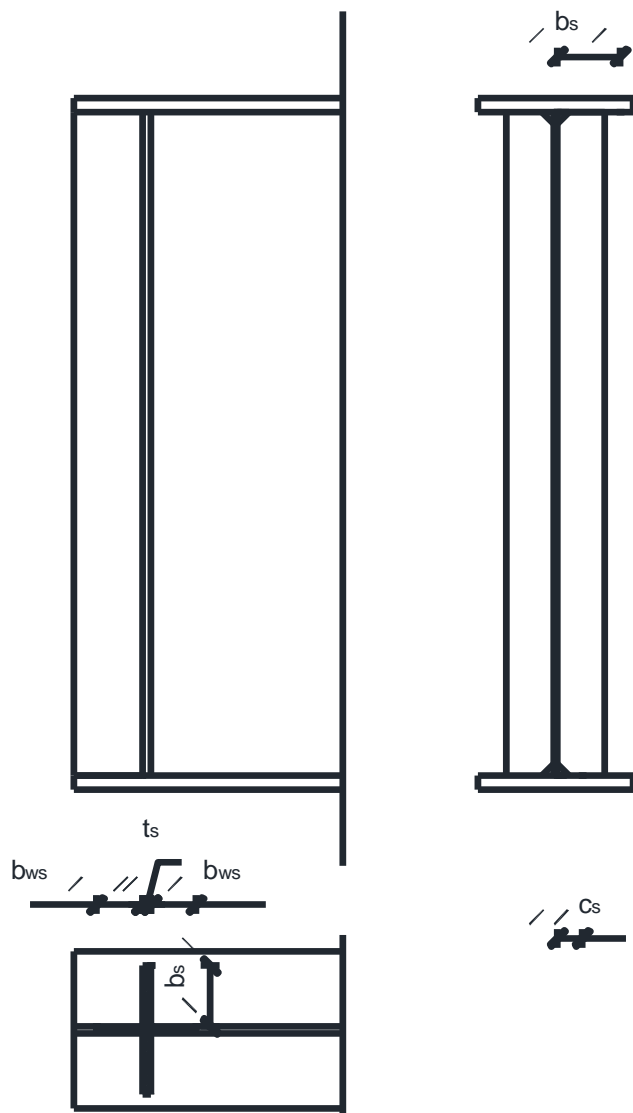
$$\omega_0 = \frac{k^2 * \pi^2}{l^2} * \sqrt{\frac{E * I_y}{\mu}} = \frac{1^2 * \pi^2}{23,47^2} * \sqrt{\frac{210000000000 * 0,00683}{232,42}} = 44,51 \text{ Hz}$$

$$\omega_0 = 44,51 \text{ Hz} > 5 \text{ Hz}$$

Blachownica spełnia wymagania stanu granicznego użyteczności.

3.10. Wymiarowanie żebra podporowego

3.10.1. Ustalenie przekroju żebra



$$b_{ws} = 15 * \varepsilon * t_w = 15 * \sqrt{\frac{235}{235}} * 0,008 = 0,12 \text{ m}$$

$$b_s \geq \frac{h_w}{30} + 40 = \frac{1395}{30} + 40 = 86,5 \text{ mm}$$

Przyjęto $b_s = 0,10 \text{ m}$

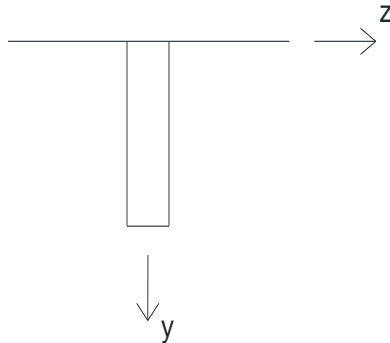
$$t_s \geq 2 * b_s * \sqrt{\frac{f_y}{E}} = 2 * 0,1 * \sqrt{\frac{235000}{210000000}} = 0,00669 \text{ m}$$

Przyjęto $t_s = 0,012 \text{ m}$

Przyjęto $c_s = 0,025 \text{ m}$

3.10.2. Obliczenie momentu bezwładności żebra

$$I_s = \frac{0,252 * 0,008^3}{12} + \frac{0,012 * 0,208^3}{12} - \frac{0,012 * 0,008^3}{12} = 0,000009009 \text{ m}^4$$



$$I_T = \frac{\alpha}{3} * \sum_{i=1}^n b_i * t_i^3$$

$$\alpha = 1$$

$$I_T = \frac{1}{3} * b_s * t_s^3 = \frac{1}{3} * 0,1 * 0,012^3 = 0,0000000576 \text{ m}^4$$

$$I_0 = I_y + I_z$$

$$I_y = \frac{b_s * t_s^3}{12} = \frac{0,1 * 0,012^3}{12} = 0,0000000144 \text{ m}^4$$

$$I_z = \frac{t_s * b_s^3}{12} + \left(\frac{b_s}{2}\right)^2 * t_s * b_s = \frac{0,012 * 0,1^3}{12} + \left(\frac{0,1}{2}\right)^2 * 0,012 * 0,1 = 0,000004 \text{ m}^4$$

$$I_0 = I_y + I_z = 0,0000000144 + 0,000004 = 0,000004014 \text{ m}^4$$

Skrętna utrata stateczności

$$\frac{I_T}{I_0} = \frac{0,0000000576}{0,000004014} = 0,01435 > 5,3 * \frac{f_y}{E} = 5,3 * \frac{235000}{210000000} = 0,005931$$

Skrętna utrata stateczności nie nastąpi.

3.10.3. Sprawdzenie nośności żebra na ściskanie z wyboczeniem

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

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

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

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

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

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 * E * I}{(k * l)^2}$$

$$k = 0,75$$

$$l = 1,395 \text{ m}$$

$$I = \frac{0,252 * 0,008^3}{12} + \frac{0,012 * 0,208^3}{12} - \frac{0,012 * 0,008^3}{12} = 0,000009009 \text{ m}^4$$

$$A = 0,252 * 0,008 + 2 * 0,012 * 0,1 = 0,004416 \text{ m}^2$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 * E * I}{(k * l)^2} = \frac{\pi^2 * 210000000 * 0,000009009}{(0,75 * 1,395)^2} = 17057,87 \text{ kN}$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A * f_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{0,004416 * 235000}{17057,87}} = 0,25$$

$$\alpha(c) = 0,49$$

$$\Phi = 0,5 * \frac{1 + \alpha * (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2}{1} = 0,5 * \frac{1 + 0,49 * (0,25 - 0,2) + 0,25^2}{1} = 0,54$$

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 + \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{0,54 + \sqrt{0,54^2 + 0,25^2}} = 0,88$$

$$N_{b,Rd} = \chi * \frac{A * f_y}{\gamma_{M1}} = 0,88 * \frac{0,004416 * 235000}{1,0} = 913,23 \text{ kN}$$

$$N_{Ed} = 617,38 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} = \frac{617,38}{913,23} = 0,68 < 1$$

Warunek nośności na ściskanie z wyboczeniem jest spełniony.

3.10.4. Sprawdzenie docisku żebra do pasa

$$\frac{N_{Ed,s}}{A_s} \leq f_y$$

$$N_{Ed,s} = \frac{1}{2} * \frac{2 * 0,1 * 0,012}{0,252 * 0,008 + 2 * 0,012 * 0,1} * 617,38 = 167,77 \text{ kN}$$

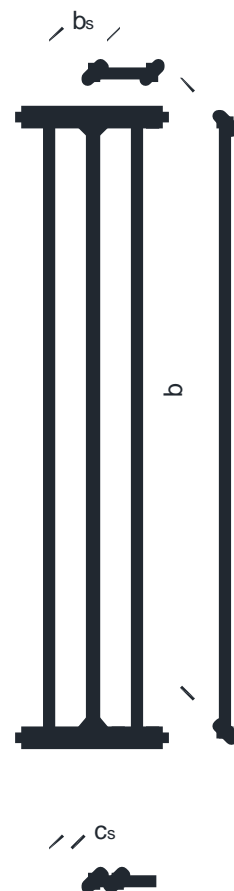
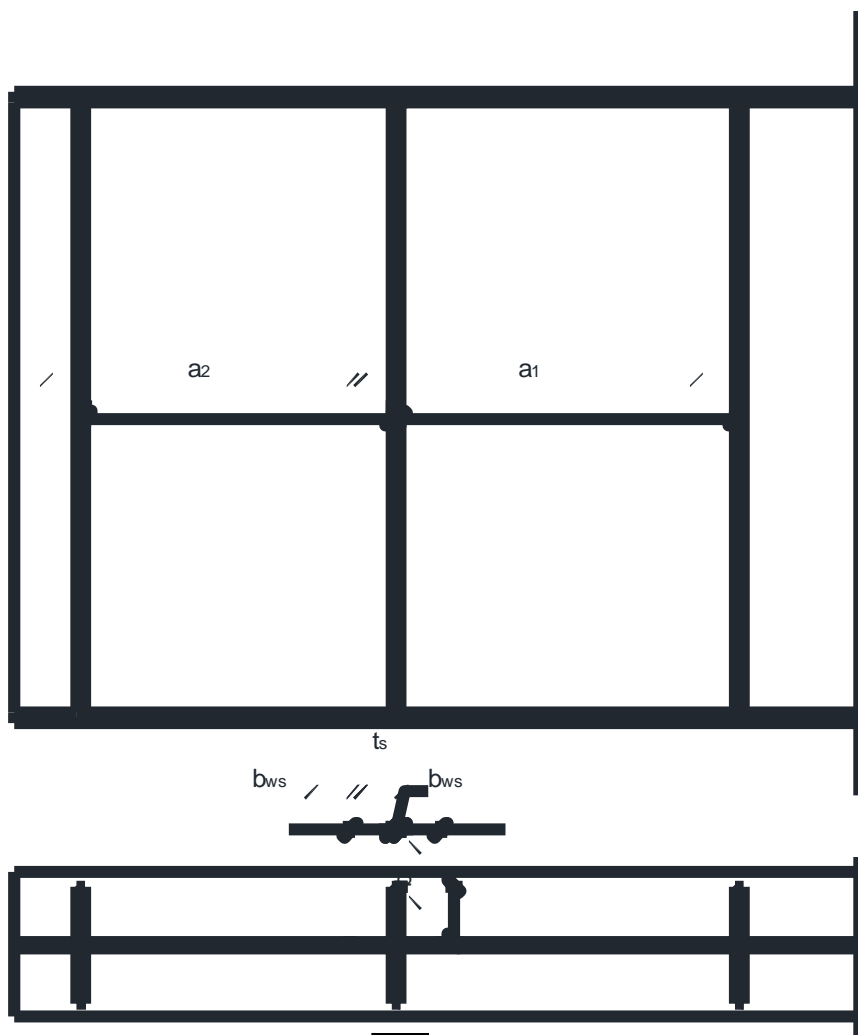
$$A_s = (b_s - c_s) * t_s = (0,1 - 0,025) * 0,012 = 0,0009 \text{ m}^2$$

$$\frac{N_{Ed,s}}{A_s} = \frac{167,77}{0,0009} = 186411,11 \text{ kPa} < f_y = 235000 \text{ kPa}$$

Warunek jest spełniony.

3.11. Wymiarowanie żeber pośrednich

3.11.1. Ustalenie przekroju żebra



$$b_{ws} = 15 * \varepsilon * t_w = 15 * \sqrt{\frac{235}{235}} * 0,008 = 0,12 \text{ m}$$

$$b_s \geq \frac{h_w}{30} + 40 = \frac{1395}{30} + 40 = 86,5 \text{ mm}$$

Przyjęto $b_s = 0,10 \text{ m}$

$$t_s \geq 2 * b_s * \sqrt{\frac{f_y}{E}} = 2 * 0,1 * \sqrt{\frac{235000}{210000000}} = 0,00669 \text{ m}$$

Przyjęto $t_s = 0,012 \text{ m}$

Przyjęto $c_s = 0,025 \text{ m}$

3.11.2. Obliczenie momentu bezwładności żebra

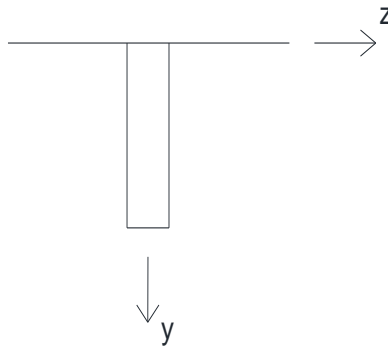
$$\frac{a}{h_w} = \frac{1650}{1395} = 1,18 < \sqrt{2}$$

$$I_{st} \geq 1,5 * \frac{h_w^3 * t_w^3}{a^2} = 1,5 * \frac{1,395^3 * 0,008^3}{1,65^2} = 0,0000007658 \text{ m}^4$$

$$I_{st} = \frac{0,252 * 0,008^3}{12} + \frac{0,012 * 0,208^3}{12} - \frac{0,012 * 0,008^3}{12} = 0,000009009 \text{ m}^4$$

$$0,000009009 \text{ m}^4 > 0,0000007658 \text{ m}^4$$

Warunek jest spełniony



$$I_T = \frac{\alpha}{3} * \sum_{i=1}^n b_i * t_i^3$$

$$\alpha = 1$$

$$I_T = \frac{1}{3} * b_s * t_s^3 = \frac{1}{3} * 0,1 * 0,012^3 = 0,0000000576 \text{ m}^4$$

$$I_0 = I_y + I_z$$

$$I_y = \frac{b_s * t_s^3}{12} = \frac{0,1 * 0,012^3}{12} = 0,0000000144 \text{ m}^4$$

$$I_z = \frac{t_s * b_s^3}{12} + \left(\frac{b_s}{2}\right)^2 * t_s * b_s = \frac{0,012 * 0,1^3}{12} + \left(\frac{0,1}{2}\right)^2 * 0,012 * 0,1 = 0,000004 \text{ m}^4$$

$$I_0 = I_y + I_z = 0,0000000144 + 0,000004 = 0,000004014 \text{ m}^4$$

Skrętna utrata stateczności

$$\frac{I_T}{I_0} = \frac{0,0000000576}{0,000004014} = 0,01435 > 5,3 * \frac{f_y}{E} = 5,3 * \frac{235000}{210000000} = 0,005931$$

Skrętna utrata stateczności nie nastąpi.

3.11.3. Sprawdzenie nośności zebra na ściskanie z wyboczeniem

$$N_{Ed} = F + N_{Ed,s}$$

$$F = 139 \text{ kN}$$

$$N_{Ed,s} = V_{Ed} - \frac{1}{\bar{\lambda}_w^2} * \frac{f_{yw} * h_w * t_w}{\sqrt{3} * \gamma_{M1}} > 0$$

$$V_{Ed} = 438,30 \text{ kN}$$

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{37,4 * t_w * \varepsilon * \sqrt{k_\tau}}$$

$$k_\tau = 5,34 + 4 * \left(\frac{h_w}{a}\right)^2 = 5,34 + 4 * \left(\frac{1395}{1650}\right)^2 = 8,20$$

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{37,4 * t_w * \varepsilon * \sqrt{k_\tau}} = \frac{1,395}{37,4 * 0,008 * 1 * \sqrt{8,20}} = 1,63$$

$$N_{Ed,s} = V_{Ed} - \frac{1}{\bar{\lambda}_w^2} * \frac{f_{yw} * h_w * t_w}{\sqrt{3} * \gamma_{M1}} = 438,30 - \frac{1}{1,63^2} * \frac{235000 * 1,395 * 0,008}{\sqrt{3} * 1} = -131,60 < 0$$

$$\text{Przyjęto } N_{Ed,s} = 0$$

$$N_{Ed} = F = 139 \text{ kN}$$

$$q = \frac{\pi}{4} * \sigma_m * (w_0 + w_{el})$$

$$w_0 = \frac{s}{300}$$

$$s = \min\{a; b\} = \min\{1,65; 1,395\} = 1,395 \text{ m}$$

$$w_0 = \frac{1,395}{300} = 0,00465 \text{ m}$$

$$w_{el} = \frac{b}{300} = \frac{1,395}{300} = 0,00465 \text{ m}$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{Cr,c}}{\sigma_{Cr,p}} * \frac{N_{Ed}^*}{b} * \left(\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2}\right)$$

$$\sigma_{Cr,c} = \frac{\pi^2 * E * t_w^2}{12 * (1 - \nu^2) * a^2} = \frac{\pi^2 * 210000000 * 0,008^2}{12 * (1 - 0,3^2) * 1,65^2} = 4461,78 \text{ kPa}$$

$$\sigma_{Cr,p} = k_\sigma * \sigma_E$$

$$k_\sigma = 21,77$$

$$\sigma_E = \frac{\pi^2 * E * t_w^2}{12 * (1 - \nu^2) * h_w^2} = \frac{\pi^2 * 210000000 * 0,008^2}{12 * (1 - 0,3^2) * 1,395^2} = 6242,06 \text{ kPa}$$

$$\sigma_{Cr,p} = k_\sigma * \sigma_E = 21,77 * 6242,06 = 135889,65 \text{ kPa}$$

$$N_{Ed}^* = \frac{1}{2} * \sigma_1 * b_{eff} * t_w$$

$$\sigma_1 = 1,044 * \sigma = 1,044 * \frac{M}{W} = 1,044 * \frac{1548,71}{0,009903} = 163269 \text{ kPa}$$

$$b_{eff} = 15 * \varepsilon * t_f = 15 * 1 * 0,016 = 0,24 \text{ m}$$

$$N_{Ed}^* = \frac{1}{2} * \sigma_1 * b_{eff} * t_w = \frac{1}{2} * 163269 * 0,24 * 0,008 = 156,74 \text{ kN}$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{Cr,c}}{\sigma_{Cr,p}} * \frac{N_{Ed}^*}{b} * \left(\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2}\right) = \frac{4461,78}{135889,65} * \frac{156,74}{1,395} * \left(\frac{1}{1,65} + \frac{1}{1,65}\right) = 4,47 \text{ kPa}$$

$$q = \frac{\pi}{4} * \sigma_m * (w_0 + w_{el}) = \frac{\pi}{4} * 4,47 * (0,00465 + 0,00465) = 0,033 \frac{kN}{m}$$

$$M_{Ed} = \frac{ql^2}{8} = \frac{0,033 * 1,395^2}{8} = 0,008 kNm$$

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} * \frac{W_y * f_y}{\gamma_{M1}} = 1 * \frac{8,6625 * 10^{-5} * 235000}{1,0} = 20,36 kNm$$

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

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

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

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

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 * E * I}{(k * l)^2}$$

$$k = 0,75$$

$$l = 1,395 m$$

$$I = \frac{0,252 * 0,008^3}{12} + \frac{0,012 * 0,208^3}{12} - \frac{0,012 * 0,008^3}{12} = 0,000009009 m^4$$

$$A = 0,252 * 0,008 + 2 * 0,012 * 0,1 = 0,004416 m^2$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 * E * I}{(k * l)^2} = \frac{\pi^2 * 210000000 * 0,000009009}{(0,75 * 1,395)^2} = 17057,87 kN$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A * f_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{0,004416 * 235000}{17057,87}} = 0,25$$

$$\alpha(c) = 0,49$$

$$\Phi = 0,5 * \frac{1 + \alpha * (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2}{1} = 0,5 * \frac{1 + 0,49 * (0,25 - 0,2) + 0,25^2}{1} = 0,54$$

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 + \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{0,54 + \sqrt{0,54^2 + 0,25^2}} = 0,88$$

$$N_{b,Rd} = \chi * \frac{A * f_y}{\gamma_{M1}} = 0,88 * \frac{0,004416 * 235000}{1,0} = 913,23 kN$$

$$k_{yy} = C_{my} \left(1 + 0,6 \lambda_y \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} \right)$$

$$C_{my} = 0,6 + 0,4 \psi \geq 0,4$$

$$\psi = 0$$

$$C_{my} = 0,6 + 0,4 * 0 = 0,6$$

$$k_{yy} = C_{my} \left(1 + 0,6 \lambda_y \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} \right) = 0,6 * \left(1 + 0,6 * 0,25 * \frac{139}{913,23} \right) = 0,61$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} + k_{yy} * \frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} = \frac{139}{913,23} + 0,61 * \frac{0,008}{20,36} = 0,15 < 1$$

Warunek nośności na ściskanie z wyboczeniem jest spełniony.

3.11.4. Sprawdzenie docisku żebra do pasa

$$\frac{N_{Ed,s}}{A_s} \leq f_y$$

$$N_{Ed,s} = \frac{1}{2} * \frac{2 * 0,1 * 0,012}{0,252 * 0,008 + 2 * 0,012 * 0,1} * 139 = 37,77 \text{ kN}$$

$$A_s = (b_s - c_s) * t_s = (0,1 - 0,025) * 0,012 = 0,0009 \text{ m}^2$$

$$\frac{N_{Ed,s}}{A_s} = \frac{37,77}{0,0009} = 41966,67 \text{ kPa} < f_y = 235000 \text{ kPa}$$

Warunek jest spełniony.

3.12. Wymiarowanie łożyska podporowego

3.12.1. Wymiarowanie poduszki

$$\sigma_{bH} = 0,42 \left(\frac{PE}{b_w r} \right)^{0,5} \leq 3,6 f_y$$

$$P = 617,38 \text{ kN}$$

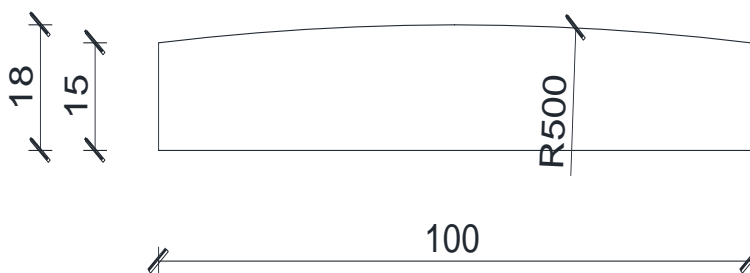
$$b_w = 0,33 \text{ m}$$

$$r \geq \frac{0,42^2}{3,6^2} * \frac{PE}{b_w f_y^2} = \frac{0,42^2}{3,6^2} * \frac{617,38 * 210000000}{0,33 * 235000^2} = 0,0968 \text{ m}$$

Przyjęto $r = 0,5 \text{ m}$

$$a_2 = 3,052 * \left(\frac{Pr}{b_w E} \right)^{0,5} = 3,052 * \left(\frac{617,38 * 0,5}{0,33 * 210000000} \right)^{0,5} = 0,00644 \text{ m}$$

$$h_1 = 15 \text{ mm} > 0,75h = 0,75 * 18 = 13,5 \text{ mm}$$



3.12.2 Wymiarowanie płyty poziomej

Beton C20/25, $f_{cd} = 14,29 \text{ MPa}$.

$P = 617,38 \text{ kN}$

$$A_0 = \frac{P}{f_{cd}} = \frac{617,38}{14290} = 0,0432 \text{ m}^2 = 432 \text{ cm}^2$$

Przyjęto blachę o wymiarach 500mm x 200mm o $A = 1000 \text{ cm}^2$

Ustalenie grubości

$$M = \frac{ql^2}{2}$$

$$M_{c,Rd} = \frac{Wf_y}{\gamma_{M0}}$$

$$W = \frac{bt^2}{6}$$

$$q = \frac{P}{0,2} = \frac{617,38}{0,2} = 3086,90 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$M = \frac{ql^2}{2} = \frac{3086,90 \cdot 0,05^2}{2} = 3,86 \text{ kNm}$$

$$t \geq \left(6 \cdot \frac{M}{b \cdot f_y} \right)^{0,5} = \left(6 \cdot \frac{3,86}{0,2 \cdot 235000} \right)^{0,5} = 0,022 \text{ m} = 22 \text{ mm}$$

Przyjęto blachę o $t = 22 \text{ mm}$

Wymiarowanie sworzni utrzymujących blachownicę na poduszce.

Założono sworznie klasy 5.6

$$F_{V,Rd} = \frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A}{\gamma_{M2}}$$

$$\alpha_v = 0,6$$

$$f_{ub} = 500 \text{ MPa}$$

$$\gamma_{M2} = 1,25$$

$$F_{Ed} = 0,05 \cdot 617,38 \text{ kN} = 30,87 \text{ kN}$$

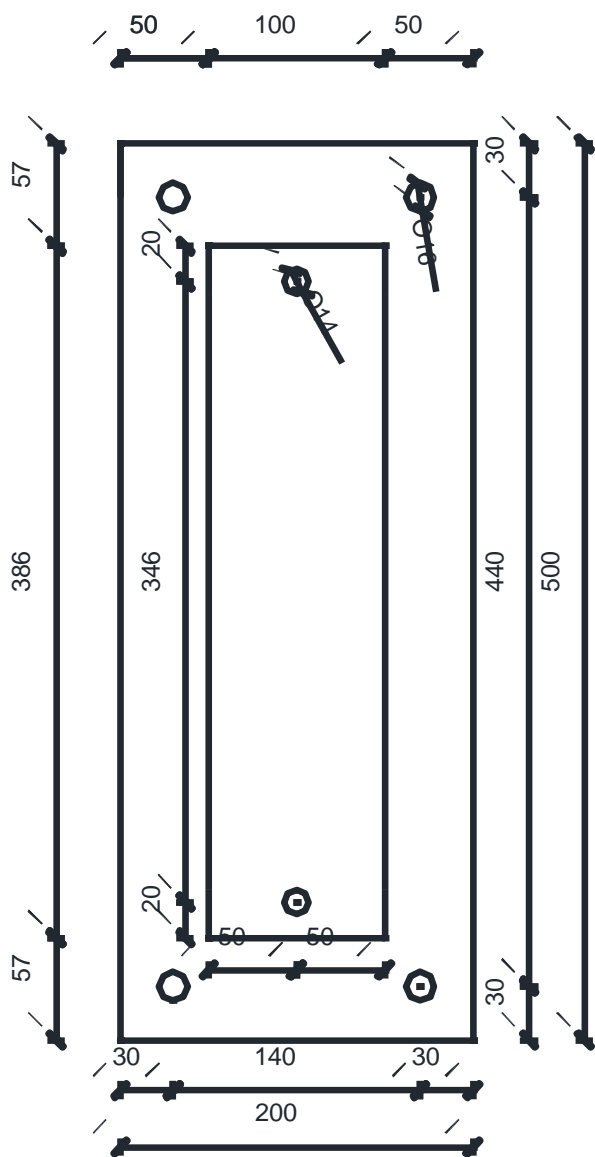
$$A \geq \frac{F_{Ed} \gamma_{M2}}{\alpha_v f_{ub}} = \frac{30,87 \cdot 1,25}{0,6 \cdot 500000} = 0,000129 \text{ m}^2 = 129 \text{ mm}^2$$

$$d \geq \left(\frac{4A}{\pi} \right)^{0,5} = \left(\frac{4 \cdot 129}{\pi} \right)^{0,5} = 12,8 \text{ mm}$$

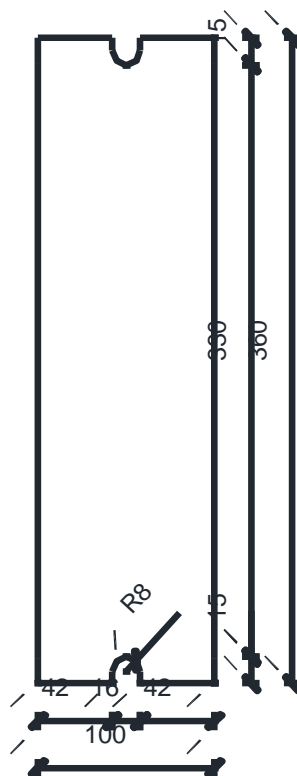
Przyjęto sworznie M14 $d = 14 \text{ mm}$

Przyjęto kotwy Hilti HST3 M16 (obliczono przy pomocy programu Hilti Anchor)

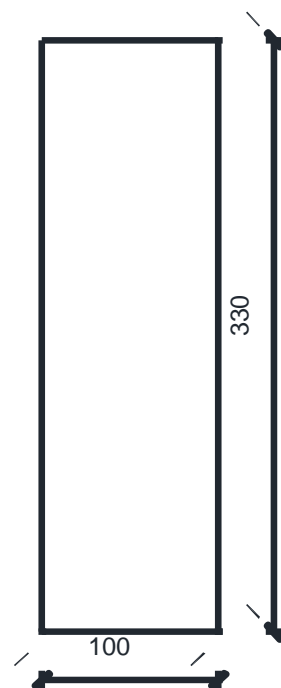
Przyjęto grubość podlewki cementowej, na której zostanie ułożona płyta pozioma 30 mm.



Od strony słupa



Od strony ściany



3.13. Wymiarowanie połączeń belek z blachownicą

Połączenie belki A1 z blachownicą B1.

Połączenie zakładkowe niesprężone kategorii A.

Przyjęto blachę węzłową o grubości 8 mm.

Przyjęto 3 śruby M20 klasy 8.8:

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

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

$d = 20 \text{ mm}$

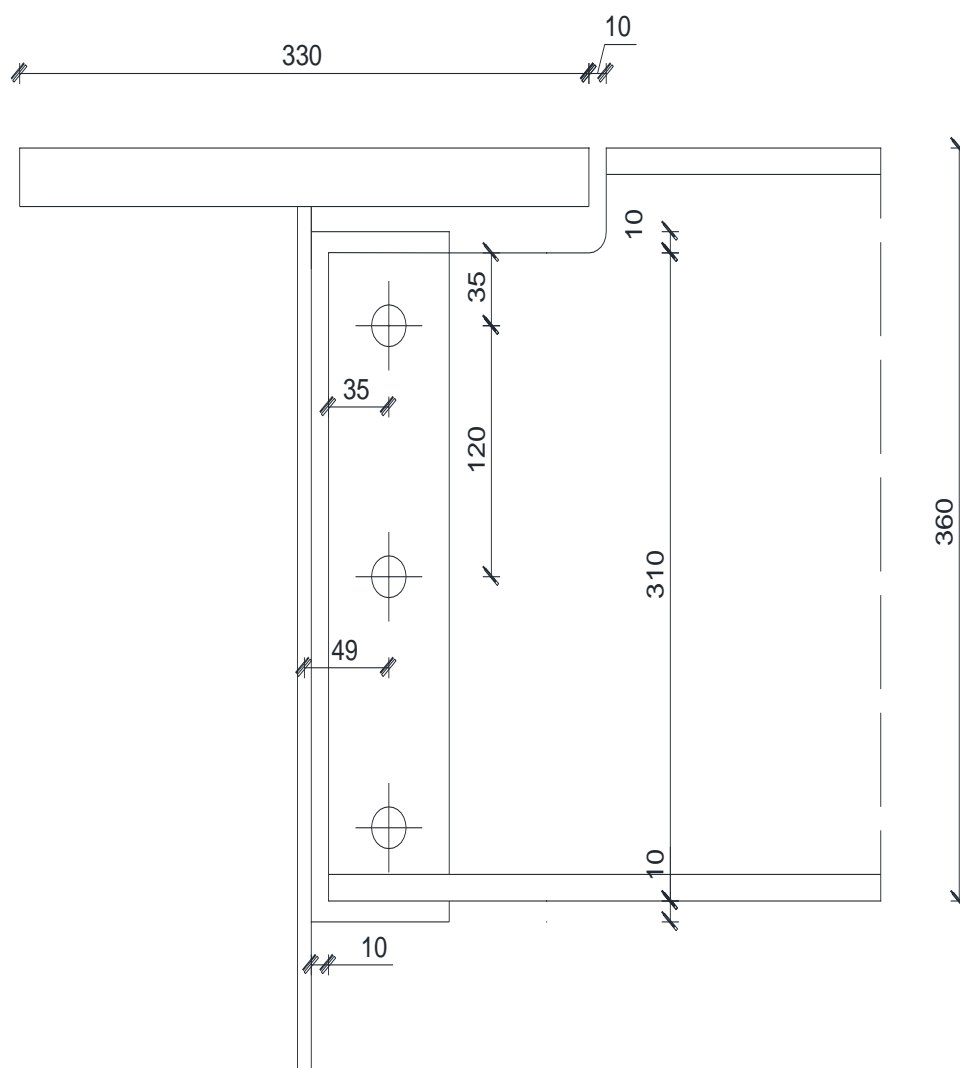
$d_0 = 20 + 2 = 22 \text{ mm}$

$1,2 * d_0 = 1,2 * 22 = 26,4 \text{ mm}$

Przyjęto odległości $e_1 = 35 \text{ mm}$ i $e_2 = 35 \text{ mm}$ oraz $p_2 = 120 \text{ mm}$

Przyjęto podkładkę okrągłą klasy C:

średnica otworu $d_1 = 22 \text{ mm}$, średnica zewnętrzna $d_2 = 37 \text{ mm}$, grubość $h = 3 \text{ mm}$



Obliczenie sił w najbardziej wyężonej śrubie

$$V_{Ed} = R(A1) = 135,21 \text{ kN}$$

$$e = 49 \text{ mm}$$

$$M_{Ed} = V_{Ed} * e = 135,21 * 0,049 = 6,63 \text{ kNm}$$

$$F_{v,Ed} = \frac{V_{Ed}}{n} = \frac{135,21}{3} = 45,07 \text{ kN}$$

$$F_{M,Ed} = \frac{M_{Ed}}{r} = \frac{6,63}{0,240} = 27,63 \text{ kN}$$

$$F_{Ed} = \sqrt{F_{M,Ed}^2 + F_{v,Ed}^2} = \sqrt{27,63^2 + 45,07^2} = 52,87 \text{ kN}$$

Sprawdzenie nośności na ścinanie

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v * f_{ub} * A_s}{\gamma_{M2}}$$

$\alpha_v = 0,6$ dla śruby klasy 5.6 gdy płaszczyzna ścinania przechodzi przez gwintowaną część śruby

$$A_s = 2,45 \text{ cm}^2$$

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

$$\gamma_{M2} = 1,25$$

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v * f_{ub} * A_s}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 * 800000 * 0,00245}{1,25} = 94,08 \text{ kN}$$

$$\frac{F_{Ed}}{F_{v,Rd}} = \frac{52,87}{94,08} = 0,56 < 1$$

Sprawdzenie nośności na docisk

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 * \alpha_b * f_u * d * t}{\gamma_{M2}}$$

$$f_u = 800 \text{ MPa}$$

$$t = 8 \text{ mm}$$

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

$$\gamma_{M2} = 1,25$$

Dla sił działających prostopadle do osi belki A3

Dla śrub skrajnych

$$\alpha_b = \min \left\{ \frac{e_1}{3d_0}; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1,0 \right\} = \min \left\{ \frac{35}{3 * 22}; \frac{800}{800}; 1,0 \right\} = \min\{0,53; 1,0; 1,0\} = 0,53$$

$$k_1 = \min \left\{ 2,8 \frac{e_2}{d_0} - 1,7; 2,5 \right\} = \min \left\{ 2,8 * \frac{35}{22} - 1,7; 2,5 \right\} = \min\{2,75; 2,5\} = 2,5$$

$$F_{b,Rd,1} = \frac{k_1 * \alpha_b * f_u * d * t}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 * 0,53 * 800000 * 0,02 * 0,008}{1,25} = 135,68 \text{ kN}$$

Dla śruby pośredniej

$$\alpha_b = \min \left\{ \frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4}; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1,0 \right\} = \min \left\{ \frac{120}{3 * 22}; \frac{800}{800}; 1,0 \right\} = \min\{1,82; 1,0; 1,0\} = 1,0$$

$$k_1 = \min \left\{ 2,8 \frac{e_2}{d_0} - 1,7; 2,5 \right\} = \min \left\{ 2,8 * \frac{35}{22} - 1,7; 2,5 \right\} = \min\{2,75; 2,5\} = 2,5$$

$$F_{b,Rd,2} = \frac{k_1 * \alpha_b * f_u * d * t}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 * 1,0 * 800000 * 0,02 * 0,008}{1,25} = 256 \text{ kN}$$

$$F_{b,Rd} = 135,68 \text{ kN}$$

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{b,Rd}} = \frac{45,07}{135,68} = 0,33 < 1$$

Dla sił działających równoległe do osi belki A3

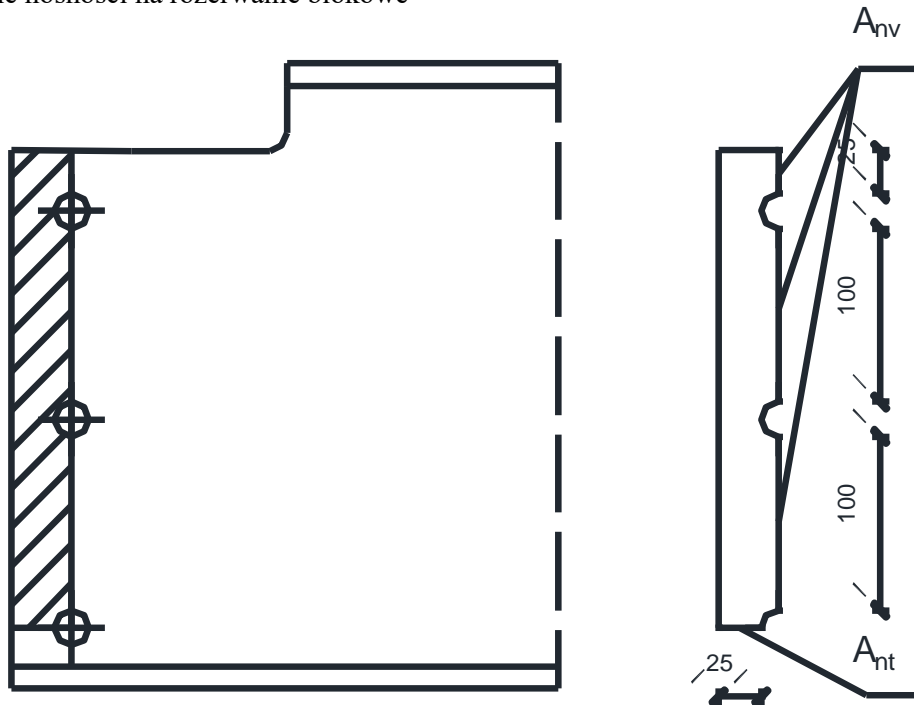
$$\alpha_b = \min \left\{ \frac{e_1}{3d_0}; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1,0 \right\} = \min \left\{ \frac{35}{3 * 22}; \frac{800}{800}; 1,0 \right\} = \min\{0,53; 1,0; 1,0\} = 0,53$$

$$k_1 = \min \left\{ 2,8 \frac{e_2}{d_0} - 1,7; 2,5 \right\} = \min \left\{ 2,8 * \frac{35}{22} - 1,7; 2,5 \right\} = \min\{2,75; 2,5\} = 2,5$$

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 * \alpha_b * f_u * d * t}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 * 0,53 * 800000 * 0,02 * 0,008}{1,25} = 135,68 \text{ kN}$$

$$\frac{F_{M,Ed}}{F_{b,Rd}} = \frac{27,63}{135,68} = 0,22 < 1$$

Sprawdzenie nośności na rozerwanie blokowe



$$V_{eff,2,Rd} = 0,5 * A_{nt} * \frac{f_u}{\gamma_{M2}} + \frac{1}{\sqrt{3}} * A_{nv} * \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$$

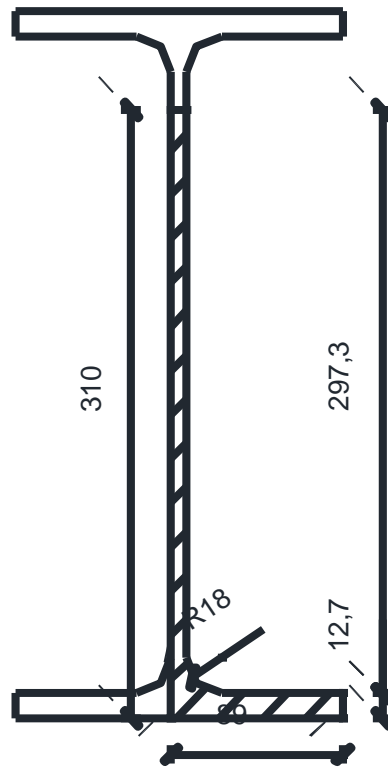
$$A_{nv} = 0,225 * 0,008 = 0,0018 \text{ m}^2$$

$$A_{nt} = 0,025 * 0,008 = 0,0002 \text{ m}^2$$

$$V_{eff,2,Rd} = 0,5 * 0,0002 * \frac{360000}{1,25} + \frac{1}{\sqrt{3}} * 0,0018 * \frac{235000}{1,00} = 273,02 \text{ kN}$$

$$\frac{V_{Ed}}{V_{eff,2,Rd}} = \frac{135,21}{273,02} = 0,50 < 1$$

Sprawdzenie nośności przekroju osłabionego



$$\left(\frac{\sigma_{Ed}}{f_y/\gamma_{M0}}\right)^2 + 3 * \left(\frac{\tau_{Ed}}{f_y/\gamma_{M0}}\right)^2 \leq 1$$

$$\sigma_{Ed} = \frac{M}{W_y}$$

$$M = M_{Ed} + V_{Ed} * e = 6,63 + 135,21 * 0,035 = 11,36 \text{ kNm}$$

$$I_y = 0,00003170 \text{ m}^4$$

$$W_y = \frac{I_y}{z} = \frac{0,00003170}{0,1904} = 0,000166 \text{ m}^3$$

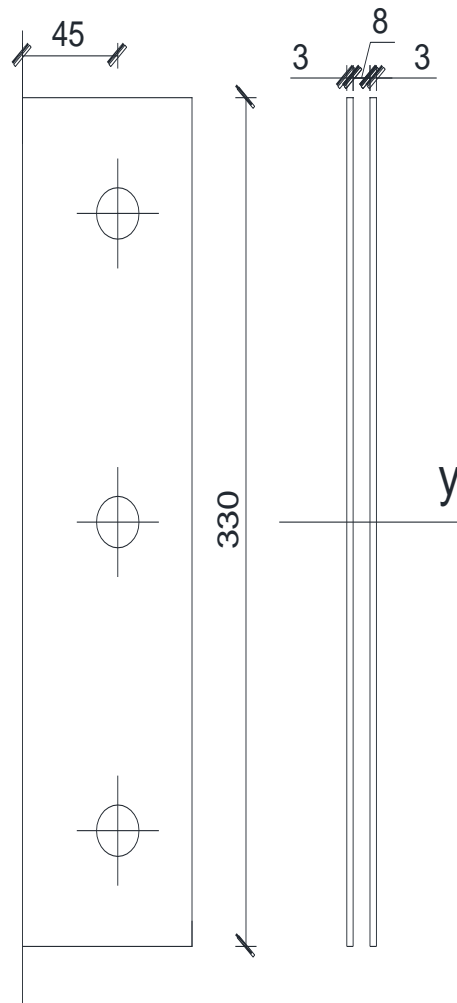
$$A_v = 0,310 * 0,008 = 0,00248 \text{ m}^2$$

$$\sigma_{Ed} = \frac{M}{W_y} = \frac{11,36}{0,000166} = 68433,73 \text{ kPa}$$

$$\tau_{Ed} = \frac{V_{Ed}}{A_v} = \frac{135,21}{0,00248} = 57782,05 \text{ kPa}$$

$$\left(\frac{\sigma_{Ed}}{f_y/\gamma_{M0}}\right)^2 + 3 * \left(\frac{\tau_{Ed}}{f_y/\gamma_{M0}}\right)^2 = \left(\frac{68433,73}{\frac{235000}{1}}\right)^2 + 3 * \left(\frac{57782,05}{\frac{235000}{1}}\right)^2 = 0,27 < 1$$

Sprawdzenie nośności połączenia spawanego pomiędzy środnikiem, a blachą węzłową



$$V_{Ed} = 135,21 \text{ kN}$$

$$M = M_{Ed} + V_{Ed} * e = 6,63 + 135,21 * 0,045 = 12,71 \text{ kNm}$$

$$a_w = 0,003 \text{ m}$$

$$l_w = 0,33 \text{ m}$$

$$A_w = a_w * l_w * 2 = 0,003 * 0,33 * 2 = 0,001872 \text{ m}^2$$

$$W_y = \frac{0,003 * 0,33^2}{6} * 2 = 0,00009734 \text{ m}^3$$

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 * (\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \leq \frac{f_u}{\beta_w * \gamma_{M2}}$$

$$\sigma_{\perp} \leq 0,9 * \frac{f_u}{\gamma_{M2}}$$

$$\beta_w = 0,8 \text{ dla stali S235}$$

$$\tau = \frac{V_{Ed}}{A_w} = \frac{135,21}{0,001872} = 72227,56 \text{ kPa}$$

$$\tau = \tau_{\parallel} = 72227,56 \text{ kPa}$$

$$\sigma = \frac{M}{W_y} = \frac{12,71}{0,00009734} = 130573,2 \text{ kPa}$$

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{\sigma}{\sqrt{2}} = \frac{130573,2}{\sqrt{2}} = 92329,20 \text{ kPa}$$

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 * (\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} = \sqrt{92329,20^2 + 3 * (92329,20^2 + 72227,56^2)} = 223045,3 \text{ kPa}$$

$$< 360000 \text{ kPa} = \frac{360000}{0,8 * 1,25} = \frac{f_u}{\beta_w * \gamma_{M2}}$$

$$\sigma_{\perp} = 92329,20 \text{ kPa} < 259200 \text{ kPa} = 0,9 * \frac{360000}{1,25} = 0,9 * \frac{f_u}{\gamma_{M2}}$$

Połączenie belki A1 z blachownicą B1 spełnia wymagania nośności.

Połączenie podciągu P1 z blachownicą B1.

Połączenie zakładkowe niesprężone kategorii A.

Przyjęto blachę węzłową o grubości 10 mm.

Przyjęto 3 śruby M20 klasy 8.8:

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

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

$d = 20 \text{ mm}$

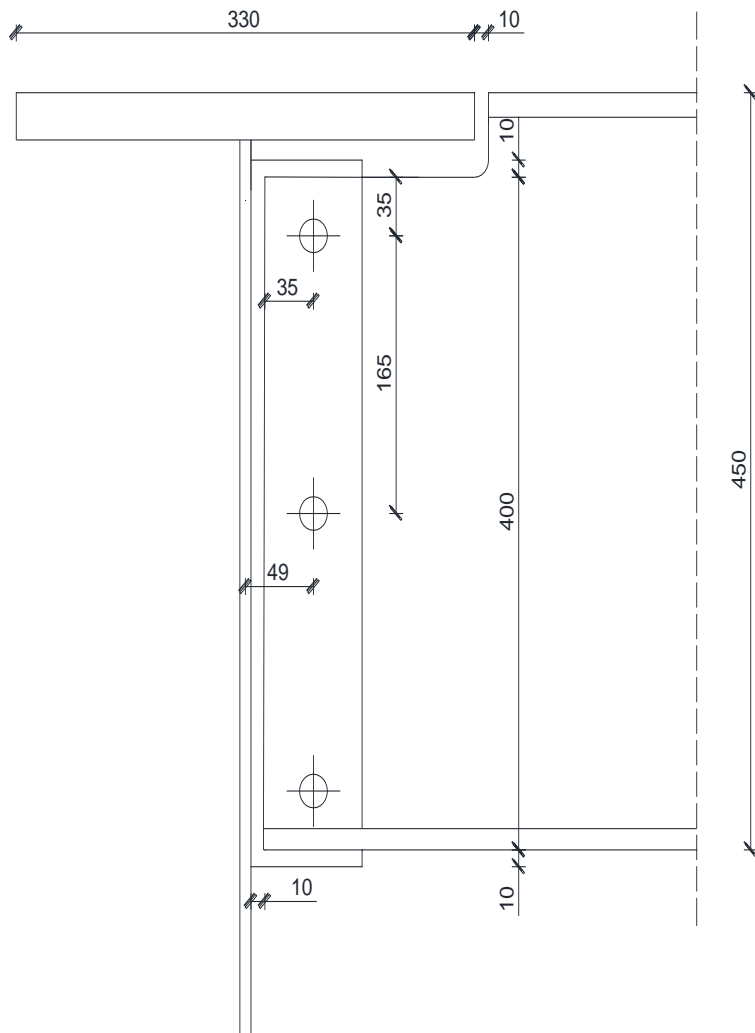
$d_0 = 20 + 2 = 22 \text{ mm}$

$1,2 * d_0 = 1,2 * 22 = 26,4 \text{ mm}$

Przyjęto odległości $e_1 = 35 \text{ mm}$ i $e_2 = 35 \text{ mm}$ oraz $p_2 = 165 \text{ mm}$

Przyjęto podkładkę okrągłą klasy C:

średnica otworu $d_1 = 22 \text{ mm}$, średnica zewnętrzna $d_2 = 37 \text{ mm}$, grubość $h = 3 \text{ mm}$



Obliczenie sił w najbardziej wyężonej śrubie

$$V_{Ed} = R(P1) = 166,89 \text{ kN}$$

$$e = 49 \text{ mm}$$

$$M_{Ed} = V_{Ed} * e = 166,89 * 0,049 = 8,18 \text{ kNm}$$

$$F_{v,Ed} = \frac{V_{Ed}}{n} = \frac{166,89}{3} = 55,63 \text{ kN}$$

$$F_{M,Ed} = \frac{M_{Ed}}{r} = \frac{8,18}{0,33} = 26,22 \text{ kN}$$

$$F_{Ed} = \sqrt{F_{M,Ed}^2 + F_{v,Ed}^2} = \sqrt{26,22^2 + 55,63^2} = 61,50 \text{ kN}$$

Sprawdzenie nośności na ścinanie

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v * f_{ub} * A_s}{\gamma_{M2}}$$

$\alpha_v = 0,6$ dla śruby klasy 5.6 gdy płaszczyzna ścinania przechodzi przez gwintowaną część śruby

$$A_s = 2,45 \text{ cm}^2$$

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

$$\gamma_{M2} = 1,25$$

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v * f_{ub} * A_s}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 * 800000 * 0,000245}{1,25} = 94,08 \text{ kN}$$

$$\frac{F_{Ed}}{F_{v,Rd}} = \frac{61,50}{94,08} = 0,65 < 1$$

Sprawdzenie nośności na docisk

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 * \alpha_b * f_u * d * t}{\gamma_{M2}}$$

$$f_u = 800 \text{ MPa}$$

$$t = 10 \text{ mm}$$

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

$$\gamma_{M2} = 1,25$$

Dla sił działających prostopadle do osi belki A3

Dla śrub skrajnych

$$\alpha_b = \min \left\{ \frac{e_1}{3d_0}; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1,0 \right\} = \min \left\{ \frac{35}{3 * 22}; \frac{800}{800}; 1,0 \right\} = \min\{0,53; 1,0; 1,0\} = 0,53$$

$$k_1 = \min \left\{ 2,8 \frac{e_2}{d_0} - 1,7; 2,5 \right\} = \min \left\{ 2,8 * \frac{35}{22} - 1,7; 2,5 \right\} = \min\{2,75; 2,5\} = 2,5$$

$$F_{b,Rd,1} = \frac{k_1 * \alpha_b * f_u * d * t}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 * 0,53 * 800000 * 0,02 * 0,01}{1,25} = 169,60 \text{ kN}$$

Dla śruby pośredniej

$$\alpha_b = \min \left\{ \frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4}; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1,0 \right\} = \min \left\{ \frac{165}{3 * 22}; \frac{800}{800}; 1,0 \right\} = \min\{2,5; 1,0; 1,0\} = 1,0$$

$$k_1 = \min \left\{ 2,8 \frac{e_2}{d_0} - 1,7; 2,5 \right\} = \min \left\{ 2,8 * \frac{35}{22} - 1,7; 2,5 \right\} = \min\{2,75; 2,5\} = 2,5$$

$$F_{b,Rd,2} = \frac{k_1 * \alpha_b * f_u * d * t}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 * 1,0 * 800000 * 0,02 * 0,01}{1,25} = 320 \text{ kN}$$

$$F_{b,Rd} = 169,60 \text{ kN}$$

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{b,Rd}} = \frac{55,63}{169,60} = 0,33 < 1$$

Dla sił działających równoległe do osi belki A3

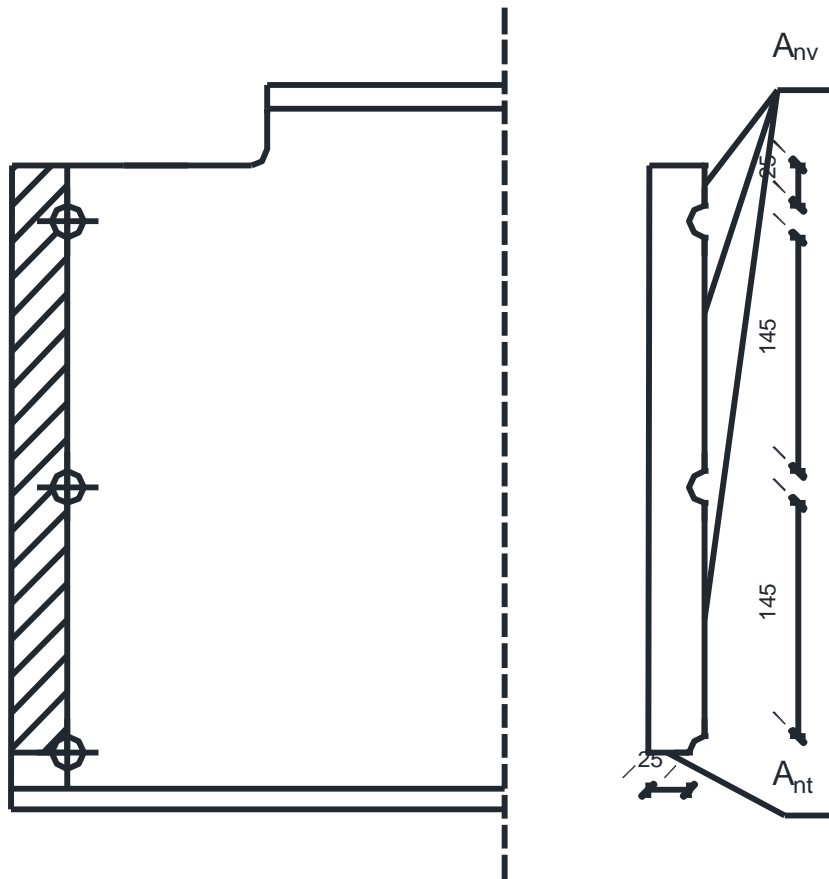
$$\alpha_b = \min \left\{ \frac{e_1}{3d_0}; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1,0 \right\} = \min \left\{ \frac{35}{3 * 22}; \frac{800}{800}; 1,0 \right\} = \min\{0,53; 1,0; 1,0\} = 0,53$$

$$k_1 = \min \left\{ 2,8 \frac{e_2}{d_0} - 1,7; 2,5 \right\} = \min \left\{ 2,8 * \frac{35}{22} - 1,7; 2,5 \right\} = \min\{2,75; 2,5\} = 2,5$$

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 * \alpha_b * f_u * d * t}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 * 0,53 * 800000 * 0,02 * 0,01}{1,25} = 169,60 \text{ kN}$$

$$\frac{F_{M,Ed}}{F_{b,Rd}} = \frac{26,22}{169,60} = 0,15 < 1$$

Sprawdzenie nośności na rozerwanie blokowe



$$V_{eff,2,Rd} = 0,5 * A_{nt} * \frac{f_u}{\gamma_{M2}} + \frac{1}{\sqrt{3}} * A_{nv} * \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$$

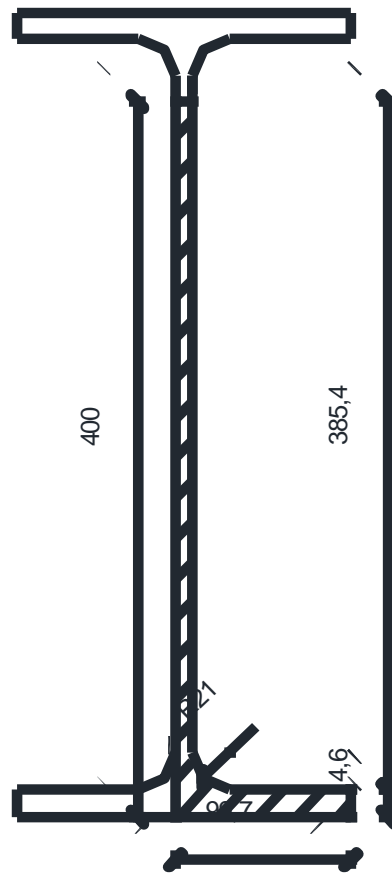
$$A_{nv} = 0,315 * 0,008 = 0,0025 \text{ m}^2$$

$$A_{nt} = 0,025 * 0,008 = 0,0002 \text{ m}^2$$

$$V_{eff,2,Rd} = 0,5 * 0,0002 * \frac{360000}{1,25} + \frac{1}{\sqrt{3}} * 0,0025 * \frac{235000}{1,00} = 259,45 \text{ kN}$$

$$\frac{V_{Ed}}{V_{eff,2,Rd}} = \frac{135,21}{259,45} = 0,52 < 1$$

Sprawdzenie nośności przekroju osłabionego



$$\left(\frac{\sigma_{Ed}}{f_y/\gamma_{M0}}\right)^2 + 3 * \left(\frac{\tau_{Ed}}{f_y/\gamma_{M0}}\right)^2 \leq 1$$

$$\sigma_{Ed} = \frac{M}{W_y}$$

$$M = M_{Ed} + V_{Ed} * e = 8,18 + 166,89 * 0,035 = 14,02 \text{ kNm}$$

$$I_y = 0,00007865 \text{ m}^4$$

$$W_y = \frac{I_y}{z} = \frac{0,00007865}{0,2427} = 0,0003241 \text{ m}^3$$

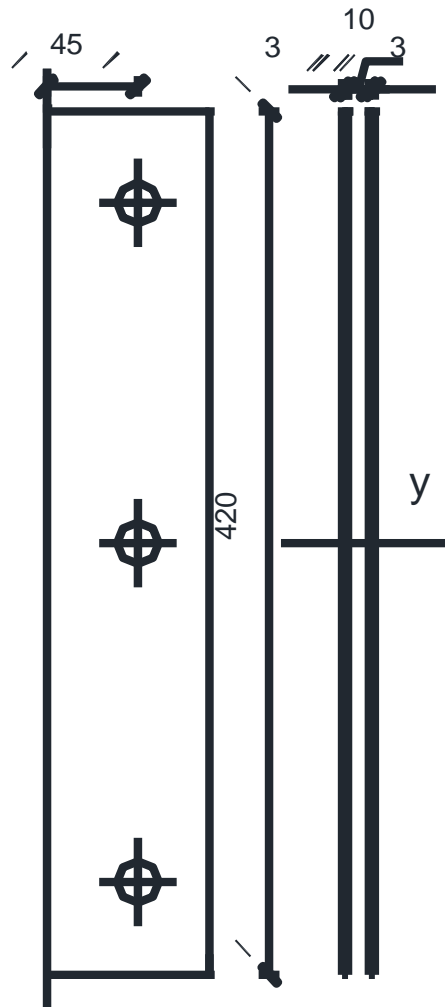
$$A_v = 0,400 * 0,0094 = 0,003591 \text{ m}^2$$

$$\sigma_{Ed} = \frac{M}{W_y} = \frac{14,02}{0,0003241} = 43258,25 \text{ kPa}$$

$$\tau_{Ed} = \frac{V_{Ed}}{A_v} = \frac{166,89}{0,003591} = 46474,52 \text{ kPa}$$

$$\left(\frac{\sigma_{Ed}}{f_y/\gamma_{M0}}\right)^2 + 3 * \left(\frac{\tau_{Ed}}{f_y/\gamma_{M0}}\right)^2 = \left(\frac{43258,25}{\frac{235000}{1}}\right)^2 + 3 * \left(\frac{46474,52}{\frac{235000}{1}}\right)^2 = 0,15 < 1$$

Sprawdzenie nośności połączenia spawanego pomiędzy środnikiem, a blachą węzłową



$$V_{Ed} = 166,89 \text{ kN}$$

$$M = M_{Ed} + V_{Ed} * e = 8,18 + 166,89 * 0,045 = 15,69 \text{ kNm}$$

$$a_w = 0,003 \text{ m}$$

$$l_w = 0,42 \text{ m}$$

$$A_w = a_w * l_w * 2 = 0,003 * 0,42 * 2 = 0,002412 \text{ m}^2$$

$$W_y = \frac{0,003 * 0,42^2}{6} * 2 = 0,000162 \text{ m}^3$$

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 * (\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \leq \frac{f_u}{\beta_w * \gamma_{M2}}$$

$$\sigma_{\perp} \leq 0,9 * \frac{f_u}{\gamma_{M2}}$$

$$\beta_w = 0,8 \text{ dla stali S235}$$

$$\tau = \frac{V_{Ed}}{A_w} = \frac{166,89}{0,002412} = 69191,54 \text{ kPa}$$

$$\tau = \tau_{\parallel} = 69191,54 \text{ kPa}$$

$$\sigma = \frac{M}{W_y} = \frac{15,69}{0,000162} = 96851,85 \text{ kPa}$$

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{\sigma}{\sqrt{2}} = \frac{96851,85}{\sqrt{2}} = 68484,60 \text{ kPa}$$

$$\begin{aligned}
\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 * (\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} &= \sqrt{68484,60^2 + 3 * (68484,60^2 + 69191,54^2)} = 181997,17 \text{ kPa} \\
&< 360000 \text{ kPa} = \frac{360000}{0,8 * 1,25} = \frac{f_u}{\beta_w * \gamma_{M2}} \\
\sigma_{\perp} = 68484,60 \text{ kPa} &< 259200 \text{ kPa} = 0,9 * \frac{360000}{1,25} = 0,9 * \frac{f_u}{\gamma_{M2}}
\end{aligned}$$

Połączenie podciągu P1 z blachownicą B1 spełnia wymagania nośności.

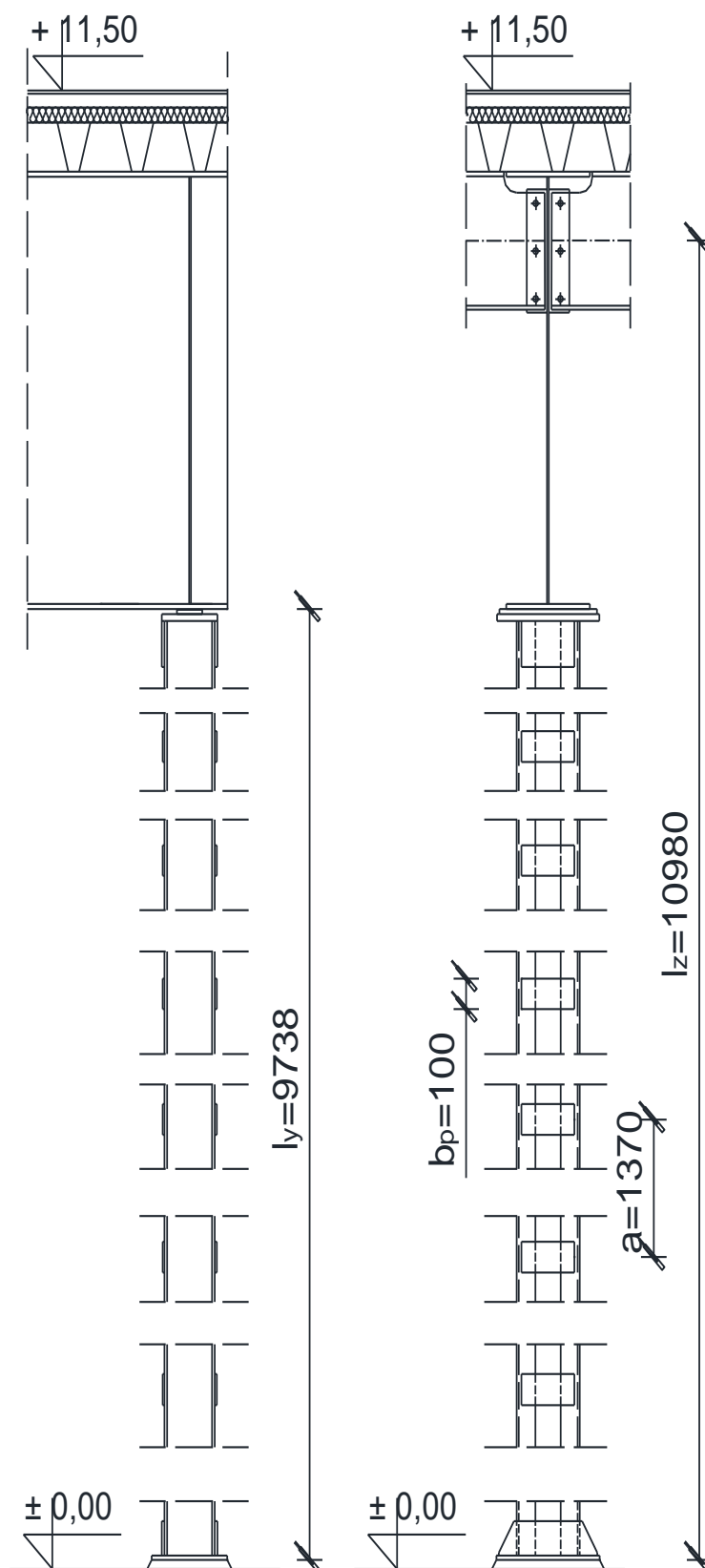
4. Obliczenia słupa

$$l_y = 9,738 \text{ m}$$

$$l_z = 10,980 \text{ m}$$

$$L_{cr,y} = 1 * l_y = 1 * 9,738 = 9,738 \text{ m}$$

$$L_{cr,z} = 1 * l_z = 1 * 10,980 = 10,980 \text{ m}$$



Wstępny dobór przekroju trzonu słupa

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

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

Przyjęto $\chi_y = 0,5$

$$f_y = 235000 \text{ kPa}$$

$$N_{Ed} = 617,38 \text{ kN}$$

$$A \geq \frac{N_{Ed} * \gamma_{M1}}{\chi_y * f_y} = \frac{617,38 * 1}{0,5 * 235000} = 0,005254 \text{ m}^2 = 52,54 \text{ cm}^2$$

Przyjęto 2 ceowniki C200

$$A = 32,20 \text{ cm}^2$$

$$i_y = 0,0771 \text{ m}$$

$$i_z = 0,0214 \text{ m}$$

$$I_y = 0,0000191 \text{ m}^4$$

$$I_z = 0,00000148 \text{ m}^4$$

$$y_s = 20,1 \text{ mm}$$

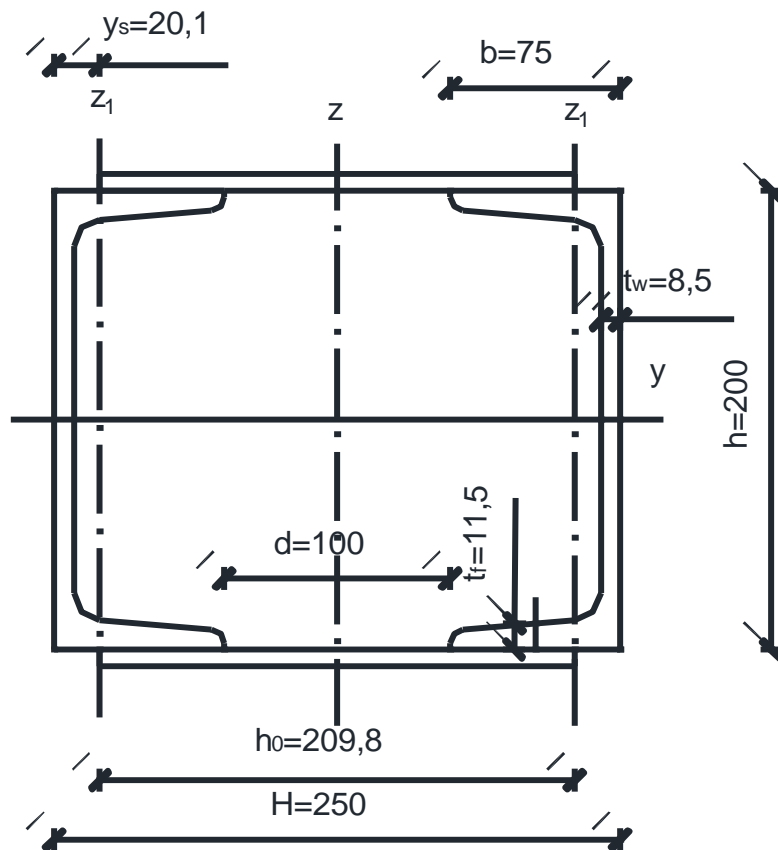
$$W_z = 0,0000512 \text{ m}^3$$

$$t_f = 11,5 \text{ mm}$$

$$t_w = 8,5 \text{ mm}$$

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

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



Smukłość

$$\lambda_y = \frac{l_{cr,y}}{i_y}$$

$$\lambda_y = \frac{l_{cr,y}}{i_y} = \frac{9,738}{0,0771 * 2} = 63,15 < 150$$

$$\bar{\lambda}_y = \frac{\lambda_y}{\lambda_1}$$

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

$$\bar{\lambda}_y = \frac{\lambda_y}{\lambda_1} = \frac{63,15}{93,9} = 0,67$$

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

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

$$\alpha(c) = 0,49$$

$$\Phi = 0,5 * [1 + \alpha * (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] = 0,5 * [1 + 0,49 * (0,67 - 0,2) + 0,67^2] = 0,84$$

$$\chi_y = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{0,84 + \sqrt{0,84^2 - 0,67^2}} = 0,74$$

$$N_{b,Rd} = \chi_y * \frac{A * f_y}{\gamma_{M1}} = 0,74 * \frac{2 * 0,003220 * 235000}{1} = 1119,92 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} = \frac{617,38}{1119,92} = 0,55 < 1$$

Warunek nośności spełniony.

Rozstaw osiowy gałęzi

$$h_0 \approx 2 \left(\frac{1,1 I_{y1} - I_{z1}}{A_h} \right)^{0,5} = 2 \left(\frac{1,1 * 0,0000191 - 0,00000148}{0,003220} \right)^{0,5} = 0,156 \text{ m} = 156 \text{ mm}$$

$$H = h_0 + 2y_s = 156 + 2 * 20,1 = 196,2 \text{ mm}$$

Przyjęto $H = 250 \text{ mm}$, $h_0 = 209,8 \text{ mm}$

Rozstaw osiowy przewiązek

$$I_z = 2 * I_{z1} + 2 * A_h * \left(\frac{h_0}{2} \right)^2 = 2 * 0,00000148 + 2 * 0,003220 * \left(\frac{0,2098}{2} \right)^2 = 0,00007383 \text{ m}^4$$

$$i_z = \left(\frac{I_z}{A} \right)^{0,5} = \left(\frac{0,00007383}{2 * 0,003220} \right)^{0,5} = 0,107 \text{ m}$$

$$\lambda_z = \frac{L_{cr,z}}{i_z} = \frac{10,980}{0,107} = 102,62$$

$$\lambda_{z1} = \frac{a}{i_{z1}} \leq 0,8 \lambda_z$$

$$a \leq 0,8 * \lambda_z * i_{z1} = 0,8 * 102,62 * 0,0214 = 1,757 \text{ m}$$

Przyjęto $a = 1,370 \text{ m}$

Geometria przewiązek

Przewiązki pośrednie

$$b_{p,min} = 100 \text{ mm}$$

Przyjęto $b_p = 100 \text{ mm}$

$$t_p \geq \frac{b_p}{15} = \frac{100}{15} = 6,67 \text{ mm}$$

Przyjęto $t_p = 7 \text{ mm}$

Przewiązki skrajne

Przyjęto $b_p = 1,5 * 100 = 150 \text{ mm}$

$$t_p \geq \frac{b_p}{15} = \frac{150}{15} = 10 \text{ mm}$$

Przyjęto $t_p = 10 \text{ mm}$

Sztywność postaciowa

$$S_v = \frac{24 * E * I_{z1}}{a^2 * \left[1 + \frac{2 * I_{z1} * h_0}{n * I_b * a} \right]} \leq \frac{2 * \pi^2 * E * I_{z1}}{a^2}$$

$$I_b = \frac{t_b * h_b^3}{12} = \frac{0,007 * 0,1^3}{12} = 0,0000005833 \text{ m}^4$$

$$n = 2$$

$$S_v = \frac{24 * E * I_{z1}}{a^2 * \left[1 + \frac{2 * I_{z1} * h_0}{n * I_b * a} \right]} = \frac{24 * 210000000 * 0,00000148}{1,370^2 * \left(1 + \frac{2 * 0,00000148 * 0,2098}{2 * 0,0000005833 * 1,370} \right)} = 2862,12 \text{ kN}$$
$$< \frac{2 * \pi^2 * E * I_{z1}}{a^2} = \frac{2 * \pi^2 * 210000000 * 0,00000148}{1,370^2} = 3268,66 \text{ kN}$$

$$S_v = 2862,12 \text{ kN}$$

Efektywny moment bezwładności

$$I_{eff} = 0,5 * h_0^2 * A_{ch} + 2 * \mu * I_{z1}$$

$$\mu = 2 - \frac{\lambda_z}{75} = 2 - \frac{102,62}{75} = 0,63$$

$$I_{eff} = 0,5 * h_0^2 * A_{ch} + 2 * \mu * I_{z1} = 0,5 * 0,2098^2 * 0,003220 + 2 * 0,63 * 0,00000148 = 0,00007273 \text{ m}^4$$

Siła krytyczna wyboczenia giętnego

$$N_{Cr,z} = \frac{\pi^2 * E * I_{eff}}{L_{Cr,z}^2} = \frac{\pi^2 * 210000000 * 0,00007273}{10,980^2} = 1250,34 \text{ kN}$$

$$N_{ch,Ed} = 0,5 * N_{Ed} + \frac{M_{Ed} * h_0 * A_{ch}}{2 * I_{eff}}$$

$$M_{Ed} = \frac{N_{Ed} * e_0 + M_{Ed}'}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{Cr,z}} - \frac{N_{Ed}}{S_v}}$$

$$e_0 = \frac{l_{cr}}{500} = \frac{10,980}{500} = 0,022 \text{ m}$$

$$M_{Ed} = \frac{N_{Ed} * e_0 + M_{Ed}'}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{Cr,z}} - \frac{N_{Ed}}{S_v}} = \frac{617,38 * 0,022}{1 - \frac{617,38}{1250,34} - \frac{617,38}{2862,12}} = 46,75 \text{ kNm}$$

$$N_{ch,Ed} = 0,5 * N_{Ed} + \frac{M_{Ed} * h_0 * A_{ch}}{2 * I_{eff}} = 0,5 * 617,38 + \frac{46,75 * 0,2098 * 0,003220}{2 * 0,00007273} = 525,81 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{ch,Ed}}{N_{b,z1,Rd}} \leq 1$$

$$N_{b,z1,Rd} = \chi_{z1} * \frac{A_{ch} * f_y}{\gamma_{M1}}$$

$$\bar{\lambda}_{z1} = \frac{\lambda_z}{\lambda_1} = \frac{\frac{a}{i_{z1}}}{\lambda_1} = \frac{\frac{1,370}{0,0214}}{93,9} = 0,68$$

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

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

$$\alpha(c) = 0,49$$

$$\Phi = 0,5 * [1 + \alpha * (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] = 0,5 * [1 + 0,49 * (0,68 - 0,2) + 0,68^2] = 0,85$$

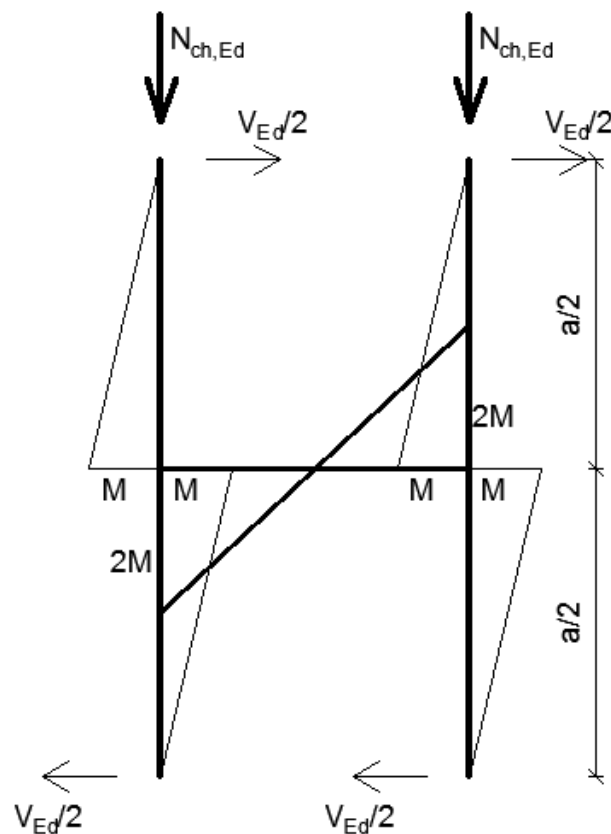
$$\chi_{z1} = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{0,85 + \sqrt{0,85^2 - 0,68^2}} = 0,74$$

$$N_{b,z1,Rd} = \chi_{z1} * \frac{A_{ch} * f_y}{\gamma_{M1}} = 0,74 * \frac{0,003220 * 235000}{1} = 559,96 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{ch,Ed}}{N_{b,z1,Rd}} = \frac{525,81}{559,96} = 0,94 < 1$$

Warunek nośności spełniony.

Nośność słupa w przekroju przypodporowym



$$V_{Ed} = \frac{\pi * M_{Ed}}{L_{cr,z}} = \frac{\pi * 46,75}{10,98} = 13,38 \text{ kN}$$

$$N_{ch,Ed} = \frac{N_{Ed}}{2} = \frac{617,38}{2} = 308,69 \text{ kN}$$

$$M = \frac{V_{Ed} * a}{4} = \frac{13,38 * 1,370}{4} = 4,58 \text{ kNm}$$

$$2M = \frac{V_{Ed} * a}{2} = 2 * 4,58 = 9,16 \text{ kNm}$$

$$\frac{\frac{N_{ch,Ed}}{\chi_y * N_{Rk}}}{\gamma_{M1}} + k_{yz} * \frac{\frac{M_{z1,Ed}}{M_{z1,Rk}}}{\gamma_{M1}} \leq 1$$

$$\frac{\frac{N_{ch,Ed}}{\chi_{z1} * N_{Rk}}}{\gamma_{M1}} + k_{zz} * \frac{\frac{M_{z1,Ed}}{M_{z1,Rk}}}{\gamma_{M1}} \leq 1$$

$$N_{Rk} = \frac{A_{ch} * f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{0,003220 * 235000}{1} = 756,70 \text{ kN}$$

$$M_{z1,Rk} = \frac{W_{z1} * f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{0,0000512 * 235000}{1} = 12,03 \text{ kNm}$$

$$\psi = \frac{-M}{M} = -1$$

$$C_{mz} = 0,6 + 0,4 * \psi \geq 0,4$$

$$C_{mz} = 0,6 - 0,4 = 0,2 \leq 0,4$$

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

$$k_{zz} = C_{mz} * \left[1 + (2 * \bar{\lambda}_{z1} - 0,6) * \frac{N_{ch,Ed}}{\chi_{z1} * N_{Rk}} \right] \leq C_{mz} * \left[1 + 1,4 * \frac{N_{ch,Ed}}{\chi_{z1} * N_{Rk}} \right]$$

$$k_{zz} = C_{mz} * \left[1 + (2 * \bar{\lambda}_{z1} - 0,6) * \frac{N_{ch,Ed}}{\chi_{z1} * N_{Rk}} \right] = 0,4 * \left[1 + (2 * 0,68 - 0,6) * \frac{525,81}{0,74 * 756,70} \right]$$

$$= 0,69 < C_{mz} * \left[1 + 1,4 * \frac{N_{ch,Ed}}{\chi_{z1} * N_{Rk}} \right] = 0,4 * \left[1 + 1,4 * \frac{525,81}{0,74 * 756,70} \right] = 0,93$$

$$k_{zz} = 0,69$$

$$k_{yz} = 0,6 * k_{zz} = 0,6 * 0,69 = 0,41$$

$$\frac{\frac{N_{ch,Ed}}{\chi_y * N_{Rk}}}{\gamma_{M1}} + k_{yz} * \frac{\frac{M_{z1,Ed}}{M_{z1,Rk}}}{\gamma_{M1}} = \frac{308,69}{0,74 * 756,70} + 0,41 * \frac{4,58}{12,03} = 0,71 < 1$$

$$\frac{\frac{N_{ch,Ed}}{\chi_{z1} * N_{Rk}}}{\gamma_{M1}} + k_{zz} * \frac{\frac{M_{z1,Ed}}{M_{z1,Rk}}}{\gamma_{M1}} = \frac{308,69}{0,74 * 756,70} + 0,69 * \frac{4,58}{12,03} = 0,81 < 1$$

Warunek nośności spełniony.

Obliczenia przewiązek

$$M_{b,Ed} = 0,25 * V_{Ed} * a = \frac{13,38 * 1,370}{4} = 4,58 \text{ kNm}$$

$$V_{b,Ed} = 0,5 * \frac{V_{Ed} * a}{h_0} = 0,5 * \frac{13,38 * 1,37}{0,2098} = 43,69 \text{ kN}$$

$$\sqrt{\left(\frac{\frac{\sigma}{f_y}}{\gamma_{M0}} \right)^2 + 3 * \left(\frac{\frac{\tau}{f_y}}{\gamma_{M0}} \right)^2} \leq 1$$

$$A_p = b_p * t_p = 0,15 * 0,01 = 0,0015 \text{ m}^2$$

$$\tau = \frac{V_{b,Ed}}{A_p} = \frac{43,69}{0,0015} = 29126,67 \text{ kPa}$$

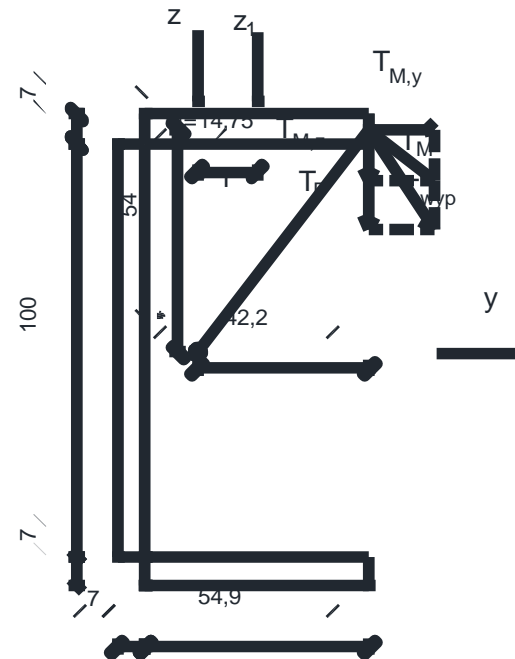
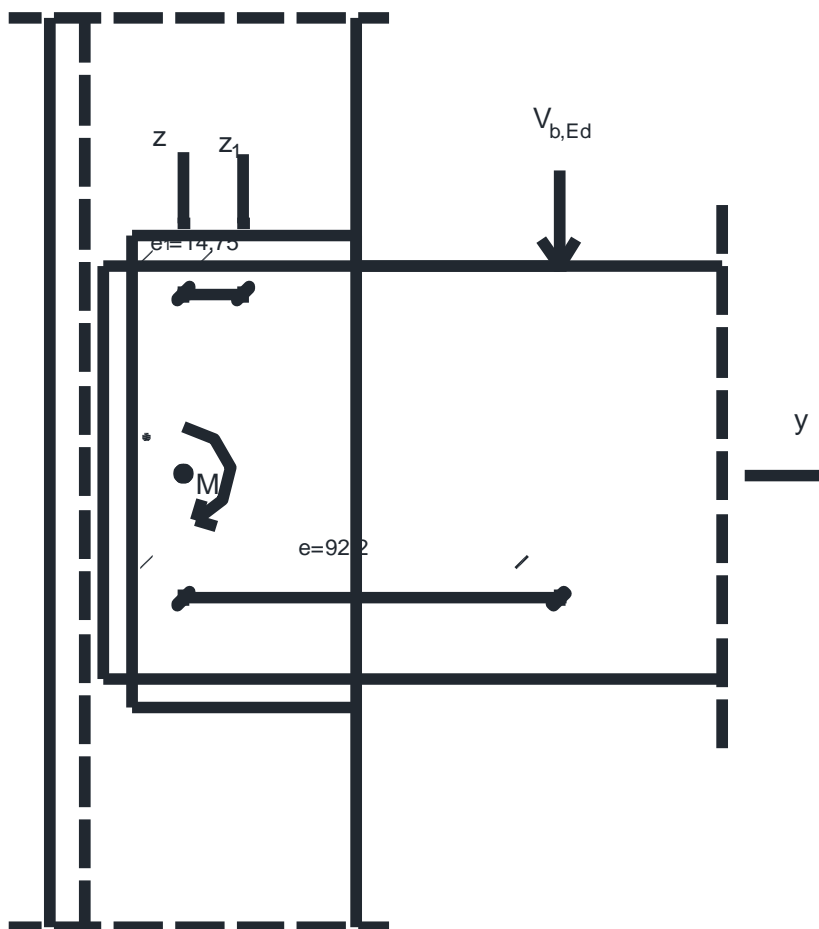
$$W_p = \frac{t_p * b_p^2}{6} = \frac{0,01 * 0,15^2}{6} = 0,0000375 \text{ m}^3$$

$$\sigma = \frac{M_{b,Ed}}{W_p} = \frac{4,58}{0,0000375} = 122133,33 \text{ kPa}$$

$$\sqrt{\left(\frac{\sigma}{\frac{f_y}{\gamma_{M0}}}\right)^2 + 3 * \left(\frac{\tau}{\frac{f_y}{\gamma_{M0}}}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{\frac{122133,33}{\frac{235000}{1}}}{1}\right)^2 + 3 * \left(\frac{\frac{29126,67}{\frac{235000}{1}}}{1}\right)^2} = 0,56 < 1$$

Warunek nośności spełniony.

Połączenie spawane przewiązki z gałęzią słupa



Przyjęto grubość spoin $a_w = 7 \text{ mm}$

$V_{b,Ed} = 43,69 \text{ kN}$

Pole przekroju łądu spoin

$$A_{w,v} = 0,1 * 0,007 = 0,0007 \text{ m}^2$$

$$A_{w,h} = 2 * 0,0549 * 0,007 = 0,0007686 \text{ m}^2$$

$$A_w = A_{w,v} + A_{w,h} = 0,0007 + 0,0007686 = 0,001469 \text{ m}^2$$

Położenie środka ciężkości łądu spoin

$$e_1 = \frac{S_{z1}}{A_w} = \frac{0,03095 * 0,1 * 0,007}{0,001469} = 0,01475 \text{ m}$$

Moment bezwładności

$$I_0 = I_y + I_z$$

$$I_y = \frac{0,007 * 0,1^3}{12} + 2 * \left(\frac{0,0549 * 0,007^3}{12} + 0,007 * 0,0549 * 0,0535^2 \right) = 0,000002786 \text{ m}^4$$

$$I_z = \frac{0,1 * 0,007^3}{12} + 0,1 * 0,007 * 0,01602^2 + 2 * \left(\frac{0,007 * 0,0549^3}{12} + 0,007 * 0,0549 * 0,01475^2 \right) = 0,0000005428 \text{ m}^4$$

$$I_0 = I_y + I_z = 0,000002786 + 0,0000005428 = 0,000003329 \text{ m}^4$$

$$e = 0,0922 \text{ m}$$

$$r = \sqrt{0,054^2 + 0,0422^2} = 0,0685 \text{ m}$$

$$M = V_{b,Ed} * e = 43,69 * 0,0685 = 2,99 \text{ kNm}$$

$$\tau_M = \frac{M * r}{I_0} = \frac{2,99 * 0,0685}{0,000003329} = 61524,48 \text{ kPa}$$

$$\tau_F = \frac{V_{b,Ed}}{A_v} = \frac{43,69}{0,0007} = 62414,29 \text{ kPa}$$

$$\tau_{M,z} = \tau_M * \sin \alpha = 61524,48 * \frac{0,0422}{0,0685} = 37902,67 \text{ kPa}$$

$$\tau_{\parallel} = \tau_{M,y} = \tau_M * \cos \alpha = 61524,48 * \frac{0,054}{0,0685} = 48501,05 \text{ kPa}$$

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{\tau_{M,z} + \tau_F}{\sqrt{2}} = \frac{37902,67 + 62414,29}{\sqrt{2}} = 70934,80 \text{ kPa}$$

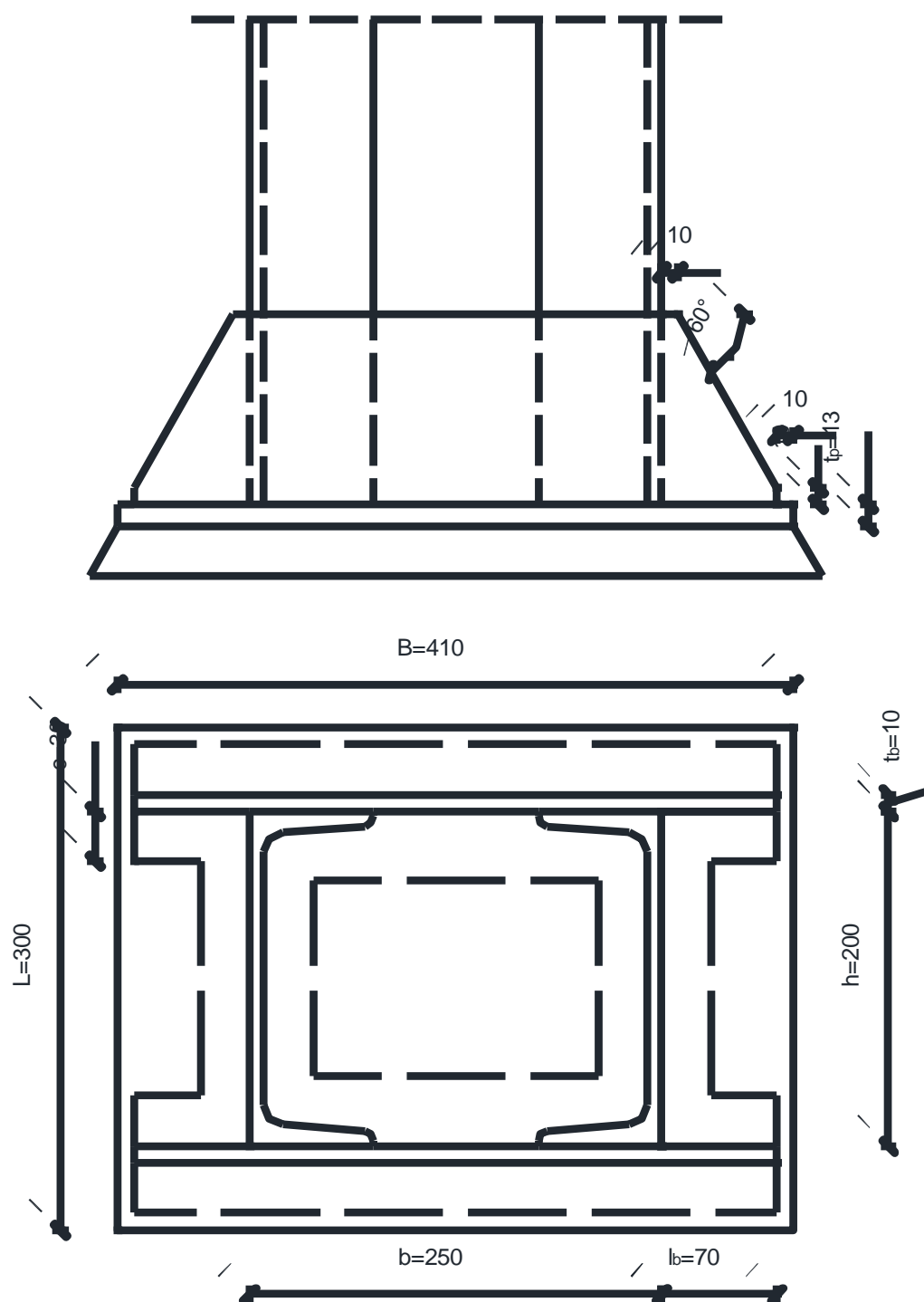
$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 * (\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} = \sqrt{70934,80^2 + 3 * (70934,80^2 + 48501,05^2)} = 164875,80 \text{ kPa}$$

$$< 360000 \text{ kPa} = \frac{360000}{0,8 * 1,25} = \frac{f_u}{\beta_w * \gamma_{M2}}$$

$$\sigma_{\perp} = 70934,80 \text{ kPa} < 259200 \text{ kPa} = 0,9 * \frac{360000}{1,25} = 0,9 * \frac{f_u}{\gamma_{M2}}$$

Warunek nośności spełniony.

Podstawa słupa



$$f_{cd} = 14,29 \text{ MPa}$$

$$\frac{N_{Ed}}{A_b} \leq f_{cd}$$

$$A_b \geq \frac{N_{Ed}}{f_{cd}} = \frac{617,38}{14290} = 0,043 \text{ m}^2$$

$$A_b = B * L$$

$$\text{Przyjęto } B = 0,41 \text{ m}, L = 0,3 \text{ m}, A_b = 0,41 * 0,3 = 0,12 \text{ m}^2$$

$$c = -\frac{x_2 - \sqrt{x_2^2 - 4 * x_1 * x_3 + 4 * x_1 * N_{Rd}}}{2 * x_1}$$

$$x_1 = -8 * f_{cd} = -8 * 14290 = -114320 \text{ kPa}$$

$$\begin{aligned} x_2 &= 4 * f_{cd} * (b + h + 2 * l_b - 2 * t_f - t_w) \\ &= 4 * 14290 * (0,250 + 0,200 + 2 * 0,07 - 2 * 0,0115 - 0,0085) \\ &= 31923,86 \text{ kPa} * \text{m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x_3 &= 2 * f_{cd} * (b * t_b + b * t_f + h * t_w + 2 * l_b * t_f + 2 * l_b * t_b - 2 * t_f * t_w) \\ &= 2 * 14290 \\ &\quad * (0,250 * 0,01 + 0,250 * 0,0115 + 0,200 * 0,0085 + 2 * 0,07 * 0,0115 + 2 \\ &\quad * 0,07 * 0,01 - 2 * 0,0115 * 0,0085) = 282,64 \text{ kPa} * \text{m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c &= -\frac{x_2 - \sqrt{x_2^2 - 4 * x_1 * x_3 + 4 * x_1 * N_{Rd}}}{2 * x_1} \\ &= -\frac{31923,86 - \sqrt{31923,86^2 - 4 * (-114320) * 282,64 + 4 * (-114320) * 1119,92}}{2 * (-114320)} \\ &= 0,0293 \text{ m} \end{aligned}$$

$$t_{p,min} = \frac{c}{\sqrt{\frac{f_y}{3 * f_{cd} * \gamma_{M0}}}} = \frac{0,0293}{\sqrt{\frac{235000}{3 * 14290 * 1}}} = 0,013 \text{ m}$$

$$\text{Przyjęto } t_p = 0,013 \text{ m}$$

$$c = t_p * \sqrt{\frac{f_y}{3 * f_{cd} * \gamma_{M0}}} = 0,013 * \sqrt{\frac{235000}{3 * 14290 * 1}} = 0,030 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} A_{eff} &= (2 * c + t_b) * (b + 2 * l_b) * 2 + (h - 2 * c) * (t_w + 2 * c) * 2 \\ &= (2 * 0,03 + 0,01) * (0,250 + 2 * 0,07) * 2 + (0,200 - 2 * 0,03) \\ &\quad * (0,0085 + 2 * 0,03) * 2 = 0,074 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$N_{Rd} = \frac{A_{eff} * f_{cd}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,074 * 14290}{1} = 1057,46 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} = \frac{617,38}{1057,46} = 0,58 < 1$$

Warunek nośności spełniony.

Sprawdzenie spoin pionowych

$$\tau_{II} = \frac{N_{Ed}}{A_w} \leq \frac{f_u}{\sqrt{3}\beta_w\gamma_{M2}}$$

$$A_w = 4l_s a$$

$$a \geq \frac{N_{Ed} * \sqrt{3}\beta_w\gamma_{M2}}{4l_s f_u}$$

$$l_s = 0,114 \text{ m}$$

$$a \geq \frac{N_{Ed} * \sqrt{3}\beta_w\gamma_{M2}}{4l_s f_u} = \frac{617,38 * \sqrt{3} * 0,8 * 1,25}{4 * 0,150 * 360000} = 0,0065 \text{ m}$$

Przyjęto grubość spoin a = 7 mm

Sprawdzenie spoin poziomych

$$\tau_{II} = \frac{V_{Ed}}{\sum l_w a_w} + \frac{T^{\alpha-\alpha} * \bar{S}}{I_y * 4 * a_w}$$

$$l_w = 0,39 \text{ m}$$

$$\text{Przyjęto } a_w = 0,007 \text{ m}$$

$$\bar{S} = 0,3 * 0,013 * 0,023 = 0,0000897 \text{ m}^3$$

$$I_y = 0,000008326 \text{ m}^4$$

$$\tau_{II} = \frac{V_{Ed}}{\sum l_w a_w} + \frac{T^{\alpha-\alpha} * \bar{S}}{I_y * 4 * a_w} = \frac{13,38}{4 * 0,39 * 0,007} + \frac{308,69 * 0,0000897}{0,000008326 * 4 * 0,007} = 119999,1 \text{ kPa}$$

$$A_w = 4 * a_w * l_w = 4 * 0,007 * 0,39 = 0,011 \text{ m}^2$$

$$\sigma = \frac{N_{Ed}}{A_w} = \frac{617,38}{0,011} = 56125,45 \text{ kPa}$$

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{\sigma}{\sqrt{2}} = \frac{56125,45}{\sqrt{2}} = 39686,69 \text{ kPa}$$

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 * (\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} = \sqrt{39686,69^2 + 3 * (39686,69^2 + 119999,1^2)} = 222484,80 \text{ kPa}$$

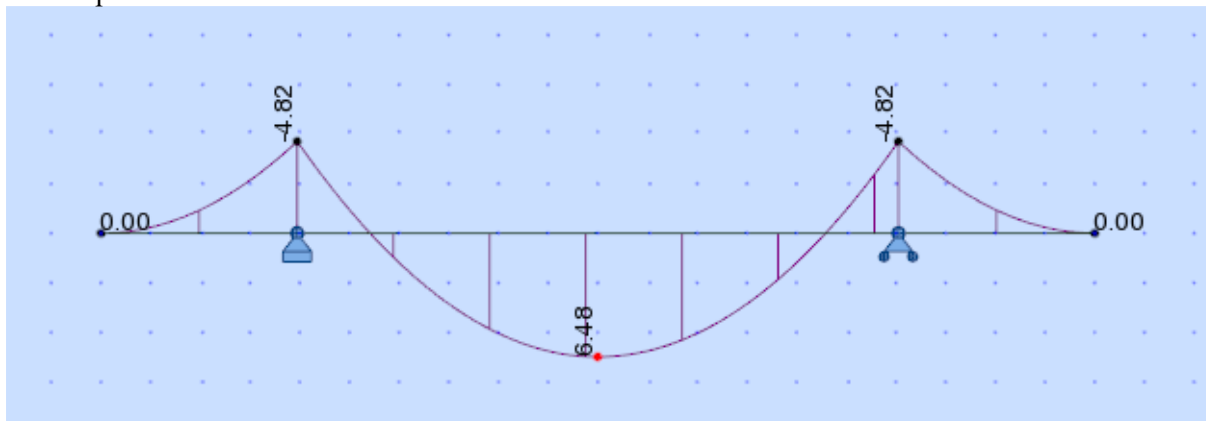
$$< 360000 \text{ kPa} = \frac{360000}{0,8 * 1,25} = \frac{f_u}{\beta_w * \gamma_{M2}}$$

$$\sigma_{\perp} = 39686,69 \text{ kPa} < 259200 \text{ kPa} = 0,9 * \frac{360000}{1,25} = 0,9 * \frac{f_u}{\gamma_{M2}}$$

Warunek został spełniony.

Głowica słupa

Blacha podkładowa



$$q = \frac{N_{Ed}}{0,4} = \frac{617,38}{0,4} = 1543,45 \frac{kN}{m}$$

$$\frac{M}{W} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$$

$$t_g \geq \sqrt{\frac{6M\gamma_{M0}}{b * f_y}} = \sqrt{\frac{6 * 6,48 * 1}{0,3 * 235000}} = 0,023 \text{ m}$$

Przyjęto $t_g = 0,023 \text{ m}$

Przepona pozioma

$$\frac{h}{t} \leq 50 \sqrt{\frac{235}{f_y}}$$

$$h = 0,233 \text{ m}$$

$$t \geq \frac{h}{50} = \frac{0,233}{50} = 0,0047 \text{ m}$$

Przyjęto $t = 0,005 \text{ m}$