



Politechnika
Wrocławska

Politechniki Wrocławska
Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

(Zał. 5a do procedury Pr 08)



SPECJALNOŚĆ: IBB

INŻYNIERSKA

PRACA DYPLOMOWA

PROJEKT STALOWEJ KONSTRUKCJI HALI DO SKŁADOWANIA WAPNA

Autor: Filip Łukasik

Opiekun: dr inż. Krzysztof Marcinczak

Recenzent: dr inż. Maciej Kożuch

Rok akademicki: 2024/2025

Spis treści

1. Streszczenie	5
2. Wprowadzenie	5
2.1 Przedmiot, cel , zakres opracowania i słowa kluczowe	5
2.1.1 Przedmiot opracowania	5
2.1.2 Cele pracy	6
2.1.3 Podstawa opracowania	6
2.1.4 Zakres pracy	6
2.1.5 Słowa kluczowe.....	6
2.2 Założenia projektowe	6
2.2.1 Dane ogólne.....	6
2.2.2 Przyjęte warunki posadowienia konstrukcji.....	7
2.2.3 Materiały użyte w konstrukcji.....	7
2.3 Materiały wykorzystane w opracowaniu.....	7
2.3.1 Normy i akty prawne	7
2.3.2 Literatura	8
2.3.3 Licencje i wykorzystane oprogramowanie.....	8
3. Projekt wstępny	9
3.1 Obciążenia	9
3.1.1 Obciążenie śniegiem	9
3.1.2 Obciążenie wiatrem.....	9
3.1.3 Obciążenie technologiczne.....	16
3.1.4 Obciążenie podestu roboczego	16
3.1.5 Dobór pokrycia dachowego	17
3.1.6 Dobór płatwi dachowych i tężników	19
3.1.7 Dobór przekroju dźwigara dachowego	21
4. Projekt Techniczny	22
4.1 Opis techniczny	22
4.1.1 Dane ogólne obiektu.....	22
4.1.2 Opis poszczególnych elementów konstrukcji	22
4.1.3 Warunki posadowienia obiektu	23
4.1.4 Warunki odbioru i montażu konstrukcji	23
4.1.5 Zabezpieczenie antykorozyjne i przeciwpożarowe konstrukcji.....	24
4.2 Obliczenia statyczno – wytrzymałościowe	24
4.2.1 Zestawienie pozycji obliczeniowych	24
4.2.2 Kombinacje obciążeń	24
4.3 Pozycja 1 – Płatew kratowa	31
4.3.1 Wymiarowanie pasa górnego	31
4.3.1.1 Charakterystyki przekroju	31
4.3.1.2 Nośność przekroju.....	32
4.3.1.3 Nośność elementu	37
4.3.1.4 Stan Graniczny Użytkowalności	42
4.3.2 Wymiarowanie pasa dolnego.....	43

4.3.2.1	Charakterystyki przekroju	43
4.3.2.2	Nośność przekroju	44
4.3.2.3	Nośność elementu	49
4.3.2.4	Stan Graniczny Użytkowości	54
4.3.3	Wymiarowanie krzyżulców	55
4.3.3.1	Charakterystyki przekroju	55
4.3.3.2	Nośność przekroju	56
4.3.3.3	Nośność elementu	60
4.3.4	Wymiarowanie słupków	62
4.3.4.1	Charakterystyki przekroju	62
4.3.4.2	Nośność przekroju	63
4.3.4.3	Nośność elementu	64
4.4	Pozycja 2 - Rama główna	65
4.4.1	Charakterystyki przekroju	66
4.4.2	Nośność przekroju	67
4.4.3	Nośność elementu - analiza globalna	72
4.4.4	Stan Graniczny Użytkowości	79
4.5	Pozycja 3 - Podwieszenia płatwi - tężniki między płatwiowe	80
4.5.1	Charakterystyki przekroju	81
4.5.2	Nośność przekroju	81
4.5.3	Nośność elementu	82
4.6	Pozycja 4 - elementy ściany szczytowej	83
4.6.1	Elementy ściany szczytowej	84
4.6.2	Obciążenia i model obliczeniowy	84
4.6.3	Sprawdzenie słupa	86
4.6.3.1	Charakterystyki przekroju	86
4.6.3.2	Nośność przekroju	87
4.6.3.3	Nośność elementu	90
4.6.3.4	Stan Graniczny Użytkowości	92
4.7	Pozycja 5 - Stężenia połączeniowe poprzeczne	93
4.7.1	Konstrukcja stężeń	93
4.7.2	Wyznaczenie sił od imperfekcji	93
4.7.3	Wymiarowanie stężeń	98
4.7.4	Sprawdzenie Stanu Granicznego Użytkowości	99
4.8	Pozycja 6 - Stężenia ściany szczytowej	100
4.8.1	Wyznaczenie sił od imperfekcji	100
4.8.2	Wymiarowanie stężeń prętowych	102
4.9	Wymiarowanie połączeń	103
4.9.1	Wymiarowanie przegubowego połączenia na sworzeń	103
4.9.2	Wymiarowanie sztywnego połączenia doczołowego pomostu roboczego z ryglem ramy	107

1. Streszczenie

Streszczenie w języku polskim

W niniejszej pracy wykonany został projekt hali stalowej przeznaczonej do składowania wapna. Przedstawiony został opis techniczny, obliczenia oraz rysunki architektoniczno-budowlane i warsztatowe obiektu. W części głównej pracy przedstawiono obliczenia statyczno-wytrzymałościowe takich elementów hali jak: rygiel ramy głównej, płatew kratowa, tężniki między-płatwiowe, słup ściany szczytowej, stężenia ściany szczytowej, stężenia połączeniowe poprzeczne oraz połączenia. Obliczenia przeprowadzono na podstawie obowiązujących Eurokodów PN-EN. Dużą uwagę poświęcono modelowi obliczeniowemu konstrukcji w 3D. Opis techniczny zawiera ogólne dane dotyczące obiektu, opis poszczególnych elementów konstrukcji, warunki posadowienia obiektu, warunki odbioru i montażu konstrukcji a także opis zabezpieczenia antykorozyjnego i przeciwpożarowego konstrukcji. W pracy zawarto dwa główne etapy projektowe: projekt wstępny oraz techniczny. W projekcie wstępnym uwzględniono obciążenia działające na konstrukcję, dobrano również wstępne wymiary profili stalowych. Projekt techniczny obejmuje opis techniczny oraz obliczenia statyczno-wytrzymałościowe wszystkich elementów.

Razem z pracą dołączone zostały rysunki: perspektywa obiektu, przekrój hali, widok ściany szczytowej, przekrój połaci dachowej, płatew kratowa, rygiel dachowy, podstawa przegubowa.

Streszczenie w języku angielskim

This thesis presents the design of a steel hall intended for lime storage. It includes technical description, calculations, as well as architectural, construction, and workshop drawings of the structure. The main section focuses on static and strength calculations for key elements of the hall, such as the main frame girder, truss purlin, inter-purlin bracings, gable wall column, gable wall bracings, roof cross-bracings, and connections. The calculations were performed according to the applicable Eurocodes (PN-EN), with significant emphasis placed on the 3D computational model of the structure. The technical description provides general information about the facility, details of individual structural components, foundation conditions, assembly and acceptance guidelines, as well as corrosion and fire protection measures. The work is divided into two main design stages: the preliminary and technical design. The preliminary design outlines the loads acting on the structure and includes initial dimensioning of steel profiles. The technical design features a comprehensive technical description and static-strength calculations for all structural elements.

The thesis is accompanied by drawings, including a perspective view of the structure, hall cross-section, gable wall view, roof slope section, truss purlin, roof girder, and hinged base detail.

2. Wprowadzenie

2.1 Przedmiot, cel , zakres opracowania i słowa kluczowe

2.1.1 Przedmiot opracowania

Przedmiotem opracowania jest temat pracy dyplomowej inżynierskiej pod tytułem:
"Projekt stalowej konstrukcji hali do składowania wapna"

2.1.2 Cele pracy

Celem pracy jest pogłębienie wiedzy studenta w zakresie projektowania konstrukcji stalowych oraz zastosowanie w praktyce metod wspomagających projektowanie.

2.1.3 Podstawa opracowania

Podstawę opracowania stanowi temat wydany przez Katedrę Konstrukcji Budowlanych pt.: "Projekt stalowej konstrukcji hali do składowania wapna", a także Ustawa Prawo Budowlane z dnia 7 lipca 1994 roku (z późniejszymi zmianami), obowiązujące normy oraz dane wyjściowe otrzymane od Opiekuna pracy dyplomowej.

2.1.4 Zakres pracy

Wykonanie wybranych elementów projektu budowlanego i wykonawczego dla wybranego wariantu konstrukcji oraz opracowanie rysunków budowlanych, zestawczo-montażowych i warsztatowych dla wybranych elementów.

2.1.5 Słowa kluczowe

Hala, obiekt, wapno, magazyn, stal, konstrukcja

2.2 Założenia projektowe

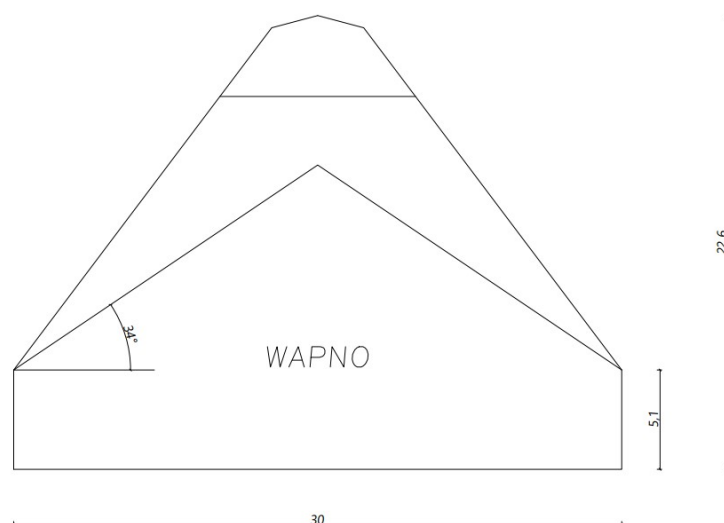
2.2.1 Dane ogólne

Wykonanie projektowanego obiektu planowane jest na terenie Zakładów Wapienniczych w miejscowości Wojcieszów, na Dolnym Śląsku. Podstawowe wymiary obiektu w osiach modularnych to: szerokość 30 m, długość 60 m, wysokość maksymalna 22.6 m. Obiekt przeznaczony jest do składowania wapna hydratyzowanego w stożkach nasypu. Główna konstrukcja nośna wykonana zostanie ze stali S355 i posadowiona na słupach żelbetowych.

Kształt obiektu determinowany jest stożkiem nasypu powstającym w wyniku magazynowania materiału sypkiego jakim jest wapno. Według różnych źródeł [14, 15] Materiał tworzy stożek nasypu o kącie nachylenia $30^\circ - 45^\circ$ [Rys. 1] stąd kształt obiektu powinien być zbliżony.

Rodzaj ośrodka rozdrob- nionego	Ciężar objęto- ściowy [kN/m ³]		Kąt stoku natural- nego [stopnie]	Kąt tarcia wewnętrznego ϕ_i	
	γ_t	γ_u		ϕ_{im} stopnie	a_ϕ
	dolny	górnny		średni	para- metr zmien- ności
Wapno hydratyzo- wane	6,0	8,0	34	27	1,26

Tabela nr 1 Dane składowanego materiału



Rys. 1 Szkic obiektu

W związku z tym ustalono kąt nachylenia połaci 53° aby w górnej części konstrukcji umiejscowić przenośnik taśmowy. Wapno hydratyzowane tworzyć będzie stożek nasypu od wysokości ok. 5m gdzie kończyć będzie się żelbetowa ściana oporowa.

2.2.2 Przyjęte warunki posadowienia konstrukcji

Opracowanie warunków geotechnicznych powinno obejmować oddzielny projekt. Dlatego też założono stabilne podłoże, na którym nie wystąpią osiadania mające negatywne oddziaływanie na projektowaną konstrukcję.

2.2.3 Materiały użyte w konstrukcji

Wszystkie elementy, które zostały użyte w konstrukcji wykonano ze stali S355JR, której granica plastyczności wynosi 355 MPa. Zastosowane wyroby powinny spełniać wymagania i normy zgodne z PN-EN 10025-1 i PN-EN10025-2 oraz Prawa Budowlanego.

2.3 Materiały wykorzystane w opracowaniu

2.3.1 Normy i akty prawne

[1] PN -EN 1990 Podstawy projektowania konstrukcji

[2] PN-EN 1991-1-1 Oddziaływania na konstrukcje Część 1.1 Oddziaływania ogólne, Ciężar objętościowy, ciężar własny, obciążenia użytkowe w budynkach

[3] PN-EN 1991-1-2 Oddziaływania na konstrukcje Część 1.3 Oddziaływania ogólne - obciążenie śniegiem

[4] PN-EN 1991-1-4 Oddziaływania na konstrukcje Część 1.4 Oddziaływania ogólne - obciążenie wiatrem

[5] PN-EN 1993-1-1 Projektowanie konstrukcji stalowych Część 1.1 Reguły ogólne i reguły dla budynków

- [6] PN-EN 1993-1-5 Projektowanie konstrukcji stalowych Część 1.5 Blachownice
- [7] PN-EN 1993-1-8 Projektowanie konstrukcji stalowych Część 1.8 Projektowanie węzłów

2.3.2 Literatura

- [8] Konstrukcje stalowe przykłady obliczeń według PN-EN 1993-1-1 Część trzecia "Hale i wiaty", pod redakcją Aleksandra Kozłowskiego
- [9] Stalowe budynki halowe, Antoni Biegus Wydawnictwo Arkady, Warszawa 2003
- [10] Konstrukcje Stalowe Podstawy i elementy, Kazimierz Rykaluk Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2009
- [11] Przykłady obliczeń konstrukcji stalowych, Jerzy Goczek, Łukasz Supeł, Michał Gajdzicki
- [12] Katalog producenta ArcelorMittal
- [13] Katalog producenta BalexMetal
- [14] PROPERTIES OF LIME PRODUCTS - National Lime Association
- [15] Projektowanie wybranych stalowych konstrukcji powłokowych z przykładami obliczeń Marian Giżejowski, Jerzy Ziółko

2.3.3 Licencje i wykorzystane oprogramowanie

Licencje studenckie:

- Dlubal RFEM 6,
- AutoCad 2023,
- bocad steel
- LTBeamN 1.05,
- IdeaStatiCa
- Kalkulatory inżynierskie SPECBUD

3. Projekt wstępny

3.1 Obciążenia

3.1.1 Obciążenie śniegiem

Dane podstawowe

Lokalizacja: Wojcieszów, woj. dolnośląskie - 1-sza strefa śniegowa

Wysokość n.p.m.: $A = 336$ m n.p.m.

Kąt nachylenia dachu: $\alpha = 53^\circ$ - w celu uproszczenia obliczeń przyjęto stałe nachylenie bez uwzględniania zmiany kąta przy kalency.

Obciążenie określono na podstawie [3]

Wartość charakterystyczna obciążenia śniegiem gruntu:

$$s_k = \max(0.007 * A - 1.4, 0.7) * 1 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = \max(0.007 * 336 - 1.4, 0.7) * 1 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 0.952 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Współczynnik ekspozycji: warunki normalne $C_e = 1$

Współczynnik termiczny: połać izolowana $C_t = 1$

$$\text{Współczynnik kształtu dachu: } \mu_1 = \frac{0.8 * (60^\circ - \alpha)}{30^\circ} = \frac{0.8 * (60^\circ - 53^\circ)}{30^\circ} = 0.187$$

Charakterystyczne obciążenie śniegiem dachu w sytuacji trwałej i przejściowej:

$$s = \mu_1 * C_t * C_e * s_k = 0.187 * 1 * 1 * 0.952 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 0.178 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Obliczeniowe obciążenie śniegiem dachu:

$$s_{d1} = \gamma_s * s = 1.5 * 0.178 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 0.27 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

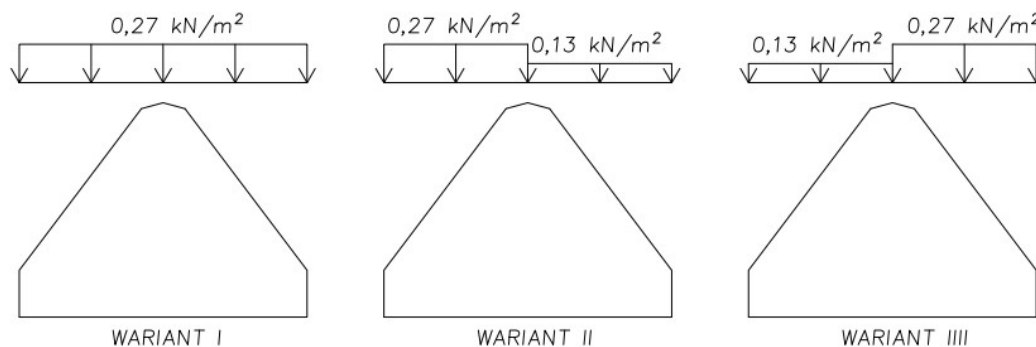
$$s_{d2} = 0.5 * \gamma_s * s = 0.5 * 1.5 * 0.178 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 0.13 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

gdzie $\gamma_s = 1.5$

Ponieważ miejscowość jest położona poniżej 800 m n.p.m. nie ma konieczności sprawdzania obciążeń od nawisów śniegu.

Dla dachu dwupołaciowego bez zabezpieczeń przed zsunięciem się śniegu:

Warianty obciążenia śniegiem dachu:



Rys. 2 - warianty obciążenia śniegiem wg [3]

3.1.2 Obciążenie wiatrem

Dane podstawowe

Lokalizacja: Wojcieszów, woj. dolnośląskie - 3-cia strefa wiatrowa określona na podstawie rysunku NA.1 [1], teren zaklasyfikowany do kategorii III

Wysokość n.p.m.: $A = 336$ m n.p.m.

Podstawowa prędkość wiatru: $v_{b,0} = 22.48 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Podstawowe ciśnienie prędkości wiatru: $q_{b,0} = 0.32 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$

Współczynnik kierunku wiatru - $C_{\text{dir}} = 1$

Współczynnik pory roku - $C_{\text{season}} = 1$

Bazowa prędkość wiatru:

$$v_b = v_{b,0} * C_{\text{season}} * C_{\text{dir}} = 22.48 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 1 * 1 = 22.5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Średnia prędkość wiatru:

$$v_{\text{mz}} = c_{\text{rz}} * c_{0z} * v_b = 0.971 * 1 * 22.5 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 21.8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Współczynnik rzeźby terenu - $c_{0z} = 1$

$$\text{Współczynnik chropowatości: } c_{\text{rz}} = 0.8 * \left(\frac{z}{10}\right)^{0.24} = 0.8 * \left(\frac{22.4}{10}\right)^{0.24} = 0.971,$$

gdzie $z = 22.4\text{m} < 400\text{m}$

$$\text{Współczynnik ekspozycji: } c_{\text{ez}} = 1.9 * \left(\frac{z}{10}\right)^{0.26} = 1.9 * \left(\frac{22.4}{10}\right)^{0.26} = 2.343$$

Intensywność turbulencji:

$$I_v = \frac{k_1}{c_{0z} * \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} = \frac{1}{1 * \ln\left(\frac{22.4}{0.3}\right)} = 0.232$$

gdzie $z_0 = 0.3$ - wymiar chropowatości dla kat. III terenu, $k_1 = 1$ - współczynnik turbulencji

Wartość szczytowa ciśnienia prędkości:

$$q_p = \left(1 + 7 * I_v\right) * \left(\frac{1}{2}\right) * \rho * v_{\text{mz}}^2 = (1 + 7 * 0.232) * \left(\frac{1}{2}\right) * 1.25 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * \left(21.8 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2$$
$$= 0.781 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

gdzie: $\rho = 1.25 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ - zalecana gęstość powietrza

Ciśnienie wiatru:

Podział budynku na strefy wiatrowe zgodnie z rysunkiem 7.5 [4]

Wiatr prostopadle do kalenicy:

$d = 30$ m

$b = 60$ m - wymiar poprzeczny do kierunku wiatru

$$h = 22.4 \text{ m}; \frac{h}{d} = \frac{22.4 \text{ m}}{30 \text{ m}} = 0.747 < 1$$

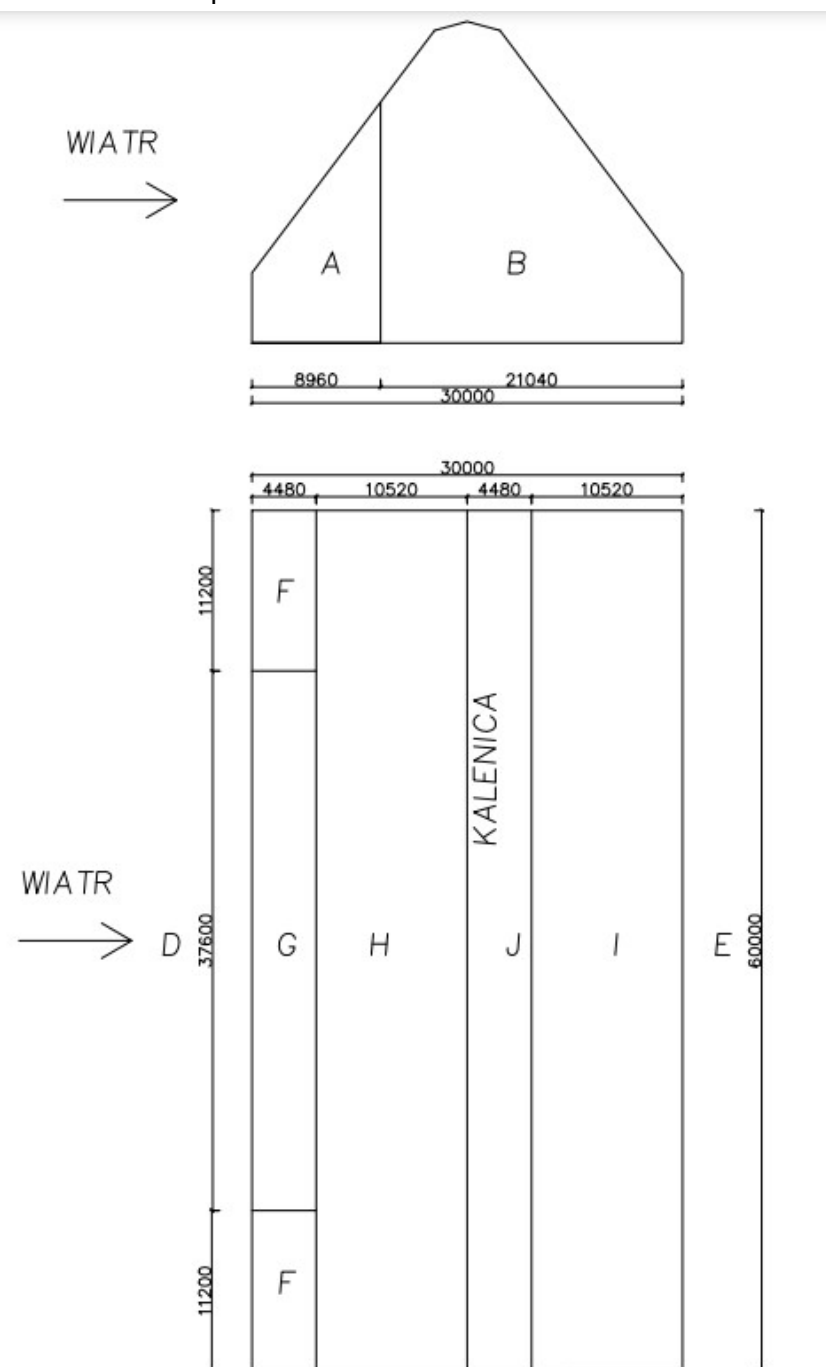
$$e = \min(b, 2 * h) = \min(60 \text{ m}, 2 * 22.4 \text{ m}) = 44.8 \text{ m}$$

Ponieważ - $e > d = 44.8 \text{ m} > 30 \text{ m} = \text{True}$

$$A = \frac{e}{5} = \frac{44.8 \text{ m}}{5} = 8.96 \text{ m}, B = d - \frac{e}{5} = 30 \text{ m} - \frac{44.8 \text{ m}}{5} = 21.04 \text{ m}$$

$$F = \frac{e}{4} = \frac{44.8 \text{ m}}{4} = 11.2 \text{ m} \quad \frac{e}{10} = \frac{44.8 \text{ m}}{10} = 4.48 \text{ m},$$

$$G = b - \frac{2 * e}{4} = 60 \text{ m} - \frac{2 * 44.8 \text{ m}}{4} = 37.6 \text{ m}$$



Rys. 3 - podział ścian i dachu dla wiatru wiejącego prostopadłe do kalenicy

Wiatr równoległy do kalenicy:

$b = 30 \text{ m}$ - wymiar poprzeczny do kierunku wiatru

$d = 60 \text{ m}$

$$h = 22.4 \text{ m}; \frac{h}{d} = \frac{22.4 \text{ m}}{60 \text{ m}} = 0.373 < 1$$

$$e = \min(b, 2 * h) = \min(30 \text{ m}, 2 * 22.4 \text{ m}) = 30 \text{ m}$$

Ponieważ $e < d = 30 \text{ m} < 60 \text{ m} = \text{True}$

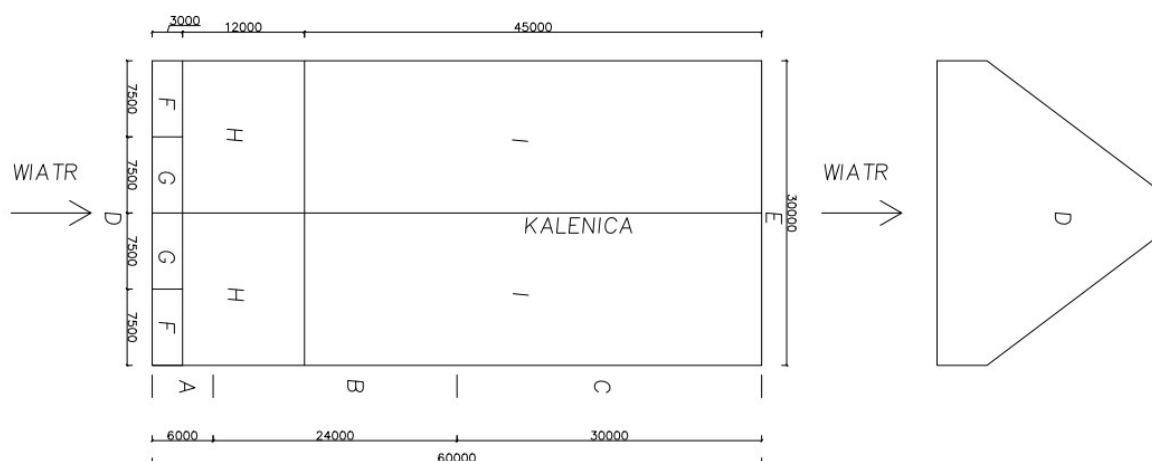
$$A = \frac{e}{5} = \frac{30 \text{ m}}{5} = 6 \text{ m}$$

$$B = \frac{4 * e}{5} = \frac{4 * 30 \text{ m}}{5} = 24 \text{ m}$$

$$C = d - e = 60 \text{ m} - 30 \text{ m} = 30 \text{ m}$$

$$F = \frac{e}{4} = \frac{30 \text{ m}}{4} = 7.5 \text{ m}; \frac{e}{10} = \frac{30 \text{ m}}{10} = 3 \text{ m}$$

$$H = \frac{e}{2} - \frac{e}{10} = \frac{30 \text{ m}}{2} - \frac{30 \text{ m}}{10} = 12 \text{ m}$$



Rys. 4 - podział ścian i dachu dla wiatru wiejącego równoległe do kalenicy

Określenie współczynników ciśnienia zewnętrznego według [4], Tablica 7.4a i 7.4b

Kąt spadku dachu	Pole dla kierunku prostopadłego do kalenicy									
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
	c_{pe10}									
53 °	-1.2	-0.8	-0.5	0.8	-0.5	0.7	0.7	0.7	-0.2	-0.3

Tabela nr 2 - współczynniki ciśnienia zewnętrznego dla wiatru prostopadłego do kalenicy

Kąt spadku dachu	Pole dla kierunku równoległego do kalenicy									
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
	c_{pe10}									
53 °	-1.2	-0.8	-0.5	0.8	-0.5	-1.1	-1.2	-0.8	-0.5	-

Tabela nr 3 - współczynniki ciśnienia zewnętrznego dla wiatru równoległego do kalenicy

Zgodnie z [4] oprócz ciśnienia wiatru działającego na konstrukcję z zewnątrz należy rozważyć również ciśnienie wewnętrzne wiatru.

Ciśnienie wiatru działające na powierzchnie zewnętrzne konstrukcji:

$$w_e = q_{pze} * c_{pe}$$

Ciśnienie wiatru działające na powierzchnie wewnętrzne konstrukcji:

$$w_i = q_{pzi} * c_{pi}$$

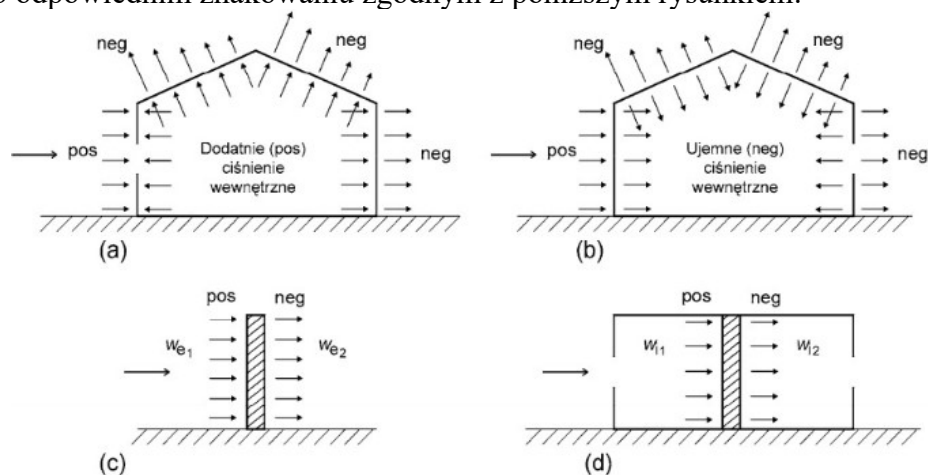
Zgodnie z punktem 7.3 [4] do obliczeń wykorzystam bardziej niekorzystną z wartości:

Niekorzystne wartości współczynników c_{pi} :

$$c_{pi1} = -0.3; c_{pi2} = 0.2$$

Obliczenie wartości ciśnienia wiatru dla wiatru wiejącego prostopadle do kalenicy:

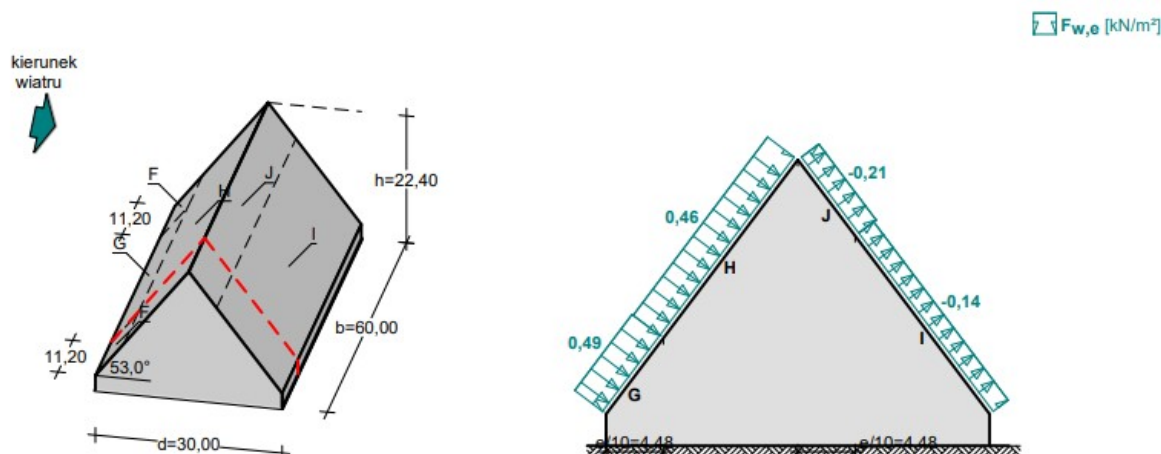
Aby poprawnie zsumować ze sobą wartości ciśnienia wewnętrznego i zewnętrznego należy pamiętać o odpowiednim znakowaniu zgodnym z poniższym rysunkiem:



Rys. 5 [4] Oddziaływania wiatru.

Wielkość	POLE									
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
c_{pe10}	-1.2	-0.8	-0.5	0.8	-0.5	0.7	0.7	0.7	-0.2	-0.3
W_{e10}	-0.94	-0.62	-0.39	0.62	-0.39	0.55	0.55	0.55	-0.16	-0.23
$W_{i10}(0,2)$	0.16	0.16	0.16	-	0.16	-	-	-	0.16	0.16
$W_{i10}(-0,3)$	-	-	-	-0.23	-	-0.23	-0.23	-0.23	-	-
W_{netto}	-1.093	-0.781	-0.547	0.859	-0.547	0.781	0.781	0.781	-0.312	-0.390

Tabela nr 4 - sumaryczne obciążenie ciśnieniem wiatru dla kierunku prostopadłego do kalenicy



Rys. 6 Obciążenie wiatrem na powierzchnię zewnętrzną obliczone w programie SPECBUD

Wartości obciążeń w kN/m dla kierunku prostopadłego do kalenicy:

Rozstaw ram: $L = 12 \text{ m}$

$$A = -0.95 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * L = -0.95 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * 12 \text{ m} = -11.4 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$B = -0.62 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * L = -0.62 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * 12 \text{ m} = -7.44 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$C = -0.39 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * L = -0.39 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * 12 \text{ m} = -4.68 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$D = 0.62 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * L = 0.62 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * 12 \text{ m} = 7.44 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$E = -0.39 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * L = -0.39 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * 12 \text{ m} = -4.68 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$F = 0.55 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * L = 0.55 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * 12 \text{ m} = 6.6 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$G = 0.55 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * L = 0.55 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * 12 \text{ m} = 6.6 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$H = 0.55 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * L = 0.55 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * 12 \text{ m} = 6.6 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$I = -0.16 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * L = -0.16 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * 12 \text{ m} = -1.92 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$J = -0.23 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * L = -0.23 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * 12 \text{ m} = -2.76 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

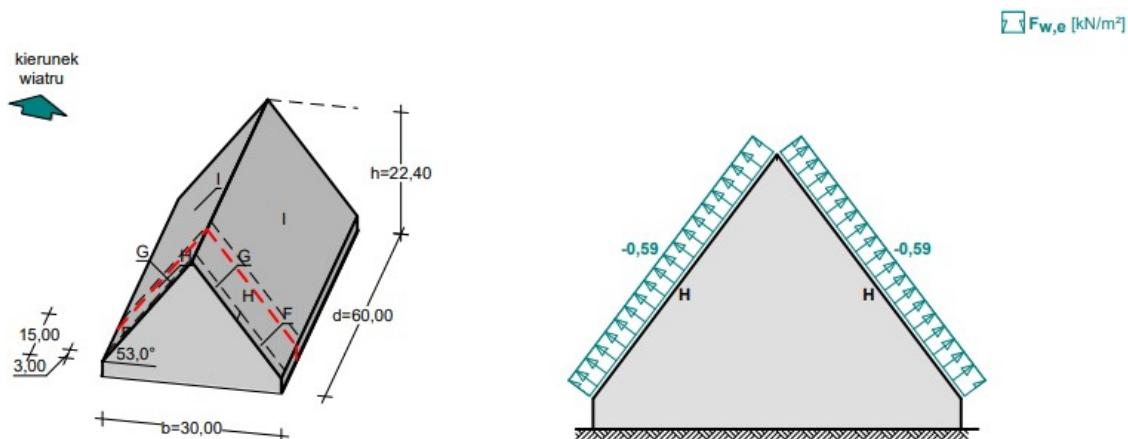
Ciśnienie wewnętrzne:

$$w_1 = 0.16 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * L = 0.16 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * 12 \text{ m} = 1.92 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$w_2 = -0.23 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * L = -0.23 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * 12 \text{ m} = -2.76 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Wielkość	POLE									
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
c_{pe10}	-1.2	-0.8	-0.5	0.8	-0.5	-1.1	-1.2	-0.8	-0.5	-
W_{e10}	-0.94	-0.62	-0.39	0.62	-0.39	-0.86	-0.94	-0.62	-0.39	-
$W_{i10}(0,2)$	0.16	0.16	0.16	-	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	-
$W_{i10}(-0,3)$	-	-	-	-0.23	-	-	-	-	-	-
W_{netto}	-1.093	-0.781	-0.547	0.859	-0.547	-1.015	-1.093	-0.781	-0.547	-

Tabela nr 5 - summaryczne obciążenie ciśnieniem wiatru dla kierunku równoległego do kalenicy



Rys. 7 Obciążenie wiatrem na powierzchnię zewnętrzną obliczone w programie SPECBUD

Wartości obciążeń w kN/m dla kierunku równoległego do kalenicy:

Rozstaw ram:

$$\begin{aligned}
 A &= -0.94 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * L = -0.94 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * 12 \text{ m} = -11.28 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \\
 B &= -0.62 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * L = -0.62 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * 12 \text{ m} = -7.44 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \\
 C &= -0.39 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * L = -0.39 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * 12 \text{ m} = -4.68 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \\
 D &= 0.62 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * L = 0.62 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * 12 \text{ m} = 7.44 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \\
 E &= -0.39 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * L = -0.39 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * 12 \text{ m} = -4.68 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \\
 F &= -0.86 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * L = -0.86 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * 12 \text{ m} = -10.32 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \\
 G &= -0.94 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * L = -0.94 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * 12 \text{ m} = -11.28 \frac{\text{kN}}{\text{m}}
 \end{aligned}$$

$$H = -0.62 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * L = -0.62 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * 12 \text{ m} = -7.44 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$I = -0.39 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * L = -0.39 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * 12 \text{ m} = -4.68 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

3.1.3 Obciążenie technologiczne

Dla hali przyjęto ciężar instalacji elektrycznej, sanitarnej i wentylacyjnej, urządzeń technologicznych powieszonych do sufitu, oświetlenia itp według rozdziału 6 [2] jako obciążenie kategorii E - powierzchnie składowania jako równe:

$$q_{\text{inst}} = 0.25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

3.1.4 Obciążenie podestu roboczego

Podest roboczy znajdujący się w górnej części składu jest skonstruowany w celu umieszczania na nim przenośnika taśmowego i podestu technicznego.

$$\text{Ciężar belek poprzecznych: } c_b = 0.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\text{Ciężar barierki } c_{b1} = 13 \frac{\text{kg}}{\text{m}} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 0.128 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Dodatkowo poprzeczna belka pomostowa jest a ciężarem przenośnika taśmowego:

Ciężar przenośnika taśmowego wraz z materiałem - wapno CaO - gęstość 800-1100 kg/m³, średnia grubość warstwy materiału 10cm na szerokości taśmy 1m, oraz z osprzętem do zsypu materiału przyjęto zgodnie z informacjami technologa jako $c_t = 5 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$.

$$\text{Współczynnik dynamiczny przyjęto jako: } \Phi = 1.3 \quad c_{t,k} = c_t * \Phi = 5 \frac{\text{kN}}{\text{m}} * 1.3 = 6.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Dodatkowo obciążony jest on kratą pomostową WEMA.

Dobór kraty pomostowej:

Rozstaw belek: $a = 1000 \text{ mm}$

Krata wciskana, płaskownik nośny 35x3

$$\text{Obciążenie użytkowe: } q = 2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$1) F_v = 8.4 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} - \text{nośność kraty na obciążenie rozłożone}$$

$$q * 1.5 = 2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * 1.5 = 3 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} < F_v = 8.4 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$2) f_v = 15 \text{ mm} - \text{ugięcie krat od obciążenia dopuszczalnego}$$

$$\frac{a}{200} = \frac{1000 \text{ mm}}{200} = 5 \text{ mm} - \text{ugięcie dopuszczalne}$$

Wyznaczenie ugięcia od obciążenia użytkowego:

$$u = \frac{q * f_v}{F_v} = \frac{2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * 15 \text{ mm}}{8.4 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}} = 3.571 \text{ mm} < 5 \text{ mm}$$

3) $F_p = 1.5 \text{ kN}$ Nośność kraty na obciążenie punktowe

$$f = (q * 1.5) * 0.2 \text{ m} * 0.2 \text{ m} = \left(2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * 1.5 \right) * 0.2 \text{ m} * 0.2 \text{ m} = 0.12 \text{ kN} < F_p = 1.5 \text{ kN}$$

4) $f_p = 12 \text{ mm}$ - ugięcie kraty od dopuszczalnego obciążenia punktowego

Wyznaczenie ugięcia od obciążenia użytkowego:

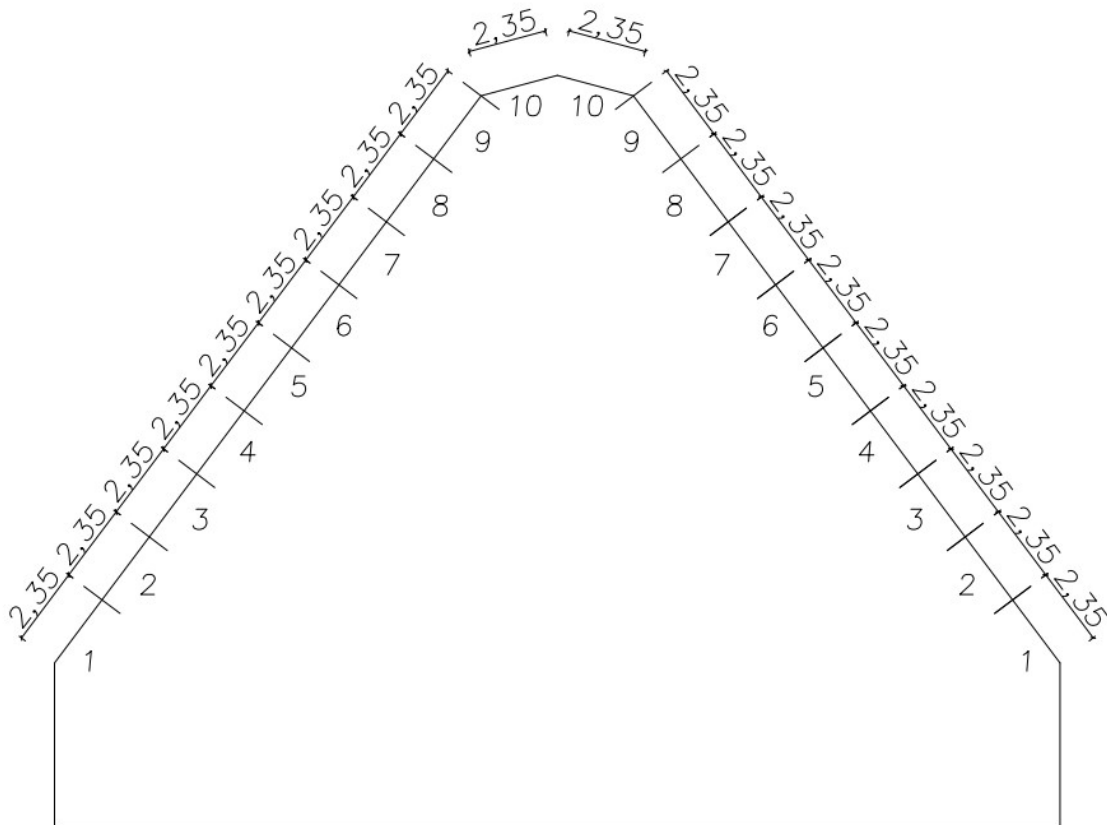
$$u_p = \frac{f * f_p}{F_p} = \frac{0.12 \text{ kN} * 12 \text{ mm}}{1.5 \text{ kN}} = 0.96 \text{ mm} < 5 \text{ mm}$$

Wniosek: Dobrano kratę wciskaną z płaskownikiem nośnym 35x3 o oczku 33x33 i ciężarze

$$\text{własnym } 34 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \text{ Obciążenie - } q_{\text{kraty}} = 34 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} * 12 \text{ m} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 4.0 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

3.1.5 Dobór pokrycia dachowego

W celu dobrania pokrycia dachowego dokonano podziału hali na 10 pól składowych. Każde pole o długości $L = 2.35 \text{ m}$.



Rys. 8 Podział dachu na symetryczną ilość pól w celu ustalenia rozkładu płatwi

W celu dobrania pokrycia dachowego należy zebrać obciążenie w postaci parcia lub ssania wiatru, śniegu i obciążenia technologicznego.

$$q_k = s + \frac{0.859 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}}{\cos(\alpha)} + q_{\text{inst}} * \cos(\alpha) = 0.178 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} + \frac{0.859 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}}{\cos(53^\circ)} + 0.25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * \cos(53^\circ)$$

$$= 1.756 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$q_k = 1.756 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} < 2.7 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} - \text{dopuszczalne ugięcie blachy trapezowej}$$

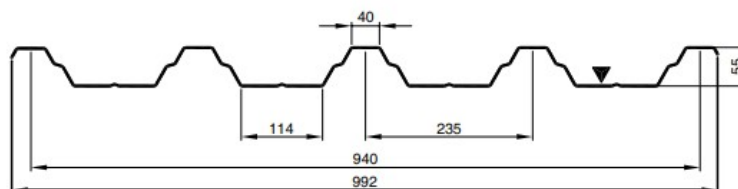
$$q_d = 1.5 * q_k = 1.5 * 1.756 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 2.633 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} < 3.15 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} - \text{SGN dla blachy trapezowej}$$

Na tej podstawie dobrano blachę trapezową TR 55.235.940 z katalogu producenta BALEX METAL [13], o ciężarze własnym $c_{bl} = 8.31 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$

2.4.9. Blacha trapezowa TR 55.235.940

Szerokość krycia	940 mm
Granica plastyczności	250 MPa
Wytrzymałość na rozciąganie	330 MPa
Współczynnik materiałowy	$\gamma_{M1}=1,0$
Uwzględnione szerokości podpór:	
podpory skrajne	60 mm
podpory pośrednie	120 mm
Długość maksymalna	15 000 mm

Blacha trapezowa TR 55.235.940 układana jako negatyw



Blacha trapezowa TR 55.235.940 NEGATYW

Układ 3-przęsłowy

Grubość nominalna t_{nom} [mm]	J_x [cm ⁴]	Negatyw	Rozpiętość między podporami																				
			min	Warunek	1,50	1,75	2,00	2,25	2,50	2,75	3,00	3,25	3,50	3,75	4,00	4,25	4,50	4,75	5,00	5,25	5,50	5,75	6,00
					[m]																		
					max																		
0,50	22,64	SGN	4,63	3,63	2,92	2,41	2,02	1,72	1,48	1,29	1,13	1,00	0,89	0,80	0,72	0,65	0,59	0,53	0,49	0,45	0,41		
		L/150	4,63	3,63	2,92	2,41	2,02	1,72	1,48	1,29	1,10	0,90	0,75	0,63	0,53	0,45	0,39	0,34	0,30	0,26	0,23		
	25,71	L/200	4,63	3,63	2,92	2,41	2,02	1,70	1,32	1,05	0,85	0,69	0,57	0,48	0,41	0,35	0,30	0,26	0,23	0,20	0,18		
		L/300	4,63	3,63	2,92	2,17	1,60	1,21	0,94	0,75	0,60	0,49	0,41	0,34	0,29	0,25	0,21	0,18	0,16	0,14	0,12		
0,60	29,26	SGN	6,24	4,87	3,91	3,21	2,69	2,28	1,96	1,71	1,50	1,33	1,18	1,06	0,94	0,85	0,76	0,69	0,63	0,58	0,53		
		L/150	6,24	4,87	3,91	3,21	2,69	2,28	1,96	1,71	1,38	1,13	0,94	0,79	0,67	0,57	0,49	0,42	0,37	0,33	0,29		
	32,12	L/200	6,24	4,87	3,91	3,21	2,69	2,14	1,66	1,32	1,06	0,87	0,72	0,60	0,51	0,44	0,37	0,32	0,28	0,25	0,22		
		L/300	6,24	4,87	3,82	2,72	2,00	1,52	1,18	0,93	0,75	0,61	0,51	0,42	0,36	0,30	0,26	0,22	0,20	0,17	0,15		
0,70	35,15	SGN	7,96	6,19	4,96	4,06	3,39	2,87	2,47	2,14	1,88	1,66	1,46	1,30	1,16	1,04	0,94	0,85	0,77	0,71	0,65		
		L/150	7,96	6,19	4,96	4,06	3,39	2,87	2,47	2,08	1,68	1,37	1,14	0,95	0,80	0,69	0,59	0,51	0,45	0,39	0,35		
	38,16	L/200	7,96	6,19	4,96	4,06	3,39	2,59	2,01	1,59	1,28	1,05	0,87	0,73	0,61	0,52	0,45	0,39	0,34	0,30	0,26		
		L/300	7,96	6,19	4,63	3,29	2,42	1,82	1,40	1,10	0,88	0,72	0,59	0,49	0,42	0,35	0,30	0,26	0,23	0,20	0,18		

Rys. 9 Dane techniczne dobranej blachy trapezowej

3.1.6 Dobór płatwi dachowych i tężników

Ze względu na duży kąt nachylenia dachu zdecydowano się na wykorzystanie płatwi kratowych, których wysokość będzie równa wysokości dźwigara głównego. Płatwie pionowe będą miały za zadanie przenosić obciążenia prostopadłe do płaszczyzny dachu natomiast układ tężników i podwieszenia płatwi obciążenia równoległe do płaszczyzny dachu.

W związku z tym w pierwszej kolejności dokonany zostanie wybór dźwigara dachowego, natomiast następnie skonstruowana zostanie płatew kratowa.

Przybliżony ciężar płatwi został dobrany na podstawie poniższej tabeli:

Lp.	Rozpiętość płatwi [m]	Obciążenie równomierne w kN/m długości płatwi			
		6,0	7,0	8,0	9,0
		Ciężar własny płatwi [kN/m ²]			
1.	7,5	0,054	0,056	0,065	0,073
2.	9,0	0,058	0,066	0,074	0,078
3.	12,0	0,078	0,084	0,085	0,087

Tabela nr 6 - A. Kozłowski Konstrukcje Stalowe Cz3 Hale i Wiaty [8]

Rozpiętość płatwi: $L = 12 \text{ m}$

Obciążenie równomierne w kN/m długości płatwi:

Współczynniki bezpieczeństwa: $\Psi_1 = 1.35 \quad \Psi_2 = 1.5$

- śnieg :

$$s_{z,d} = s_{d1} * 2.35 \text{ m} * \cos^2(\alpha) = 0.27 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * 2.35 \text{ m} * \cos^2(53^\circ) = 0.227 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$s_{z,k} = s * 2.35 \text{ m} * \cos^2(\alpha) = 0.178 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * 2.35 \text{ m} * \cos^2(53^\circ) = 0.151 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

- wiatr:

$$w_{z,d} = 0.859 * 1 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * 2.35 \text{ m} * \Psi_2 = 0.859 * 1 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * 2.35 \text{ m} * 1.5 = 3.028 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$w_{z,k} = 0.859 * 1 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * 2.35 \text{ m} = 2.019 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

- technologiczne:

$$t_z = q_{\text{inst}} * 2.35 \text{ m} * \cos(\alpha) * 1.5 = 0.25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * 2.35 \text{ m} * \cos(53^\circ) * 1.5 = 0.530 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$t_{z,k} = q_{\text{inst}} * 2.35 \text{ m} * \cos(\alpha) = 0.25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * 2.35 \text{ m} * \cos(53^\circ) = 0.354 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

- pokrycie dachowe:

$$p_z = c_{bl} * \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) * 2.35 \text{ m} * \cos(\alpha) * \Psi_1 =$$

$$8.31 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} * \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) * 2.35 \text{ m} * \cos(53^\circ) * 1.35 = 0.156 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$p_{z,k} = c_{bl} * \left(9.81 \frac{m}{s^2} \right) * 2.35 m * \cos(\alpha) = 8.31 \frac{kg}{m^2} * \left(9.81 \frac{m}{s^2} \right) * 2.35 m * \cos(53^\circ)$$

$$= 0.115 \frac{kN}{m}$$

Obciążenie sumaryczne:

$$q = s_{z,d} + w_{z,d} + t_z + p_z = 0.227 \frac{kN}{m} + 3.028 \frac{kN}{m} + 0.530 \frac{kN}{m} + 0.156 \frac{kN}{m} = 3.941 \frac{kN}{m}$$

Dla porównania obciążenie maksymalnym ssaniem wiatru wynosi:

$$q_2 = 1.1 \frac{kN}{m^2} * 2.35 m * \psi_2 = 1.1 \frac{kN}{m^2} * 2.35 m * 1.5 = 3.878 \frac{kN}{m} < 3.927 \frac{kN}{m}$$

Na tej podstawie i w celu utrzymania zapasu nośności przyjęto ciężar płatwi kratowej równy:

$$c_p = 0.078 \frac{kN}{m^2} + 0.032 \frac{kN}{m^2} = 0.11 \frac{kN}{m^2}$$

Rozłożenie obciążenia na drugim kierunku:

- śnieg :

$$s_y = s_{dl} * 4 * 2.35 m * \cos(\alpha) * \sin(\alpha) = 0.27 \frac{kN}{m^2} * 4 * 2.35 m * \cos(53^\circ) * \sin(53^\circ)$$

$$= 1.204 \frac{kN}{m}$$

- wiatr:

$$w_y = 0$$

- technologiczne:

$$t_y = q_{inst} * 4 * 2.35 m * \cos(\alpha) * 1.5 = 0.25 \frac{kN}{m^2} * 4 * 2.35 m * \cos(53^\circ) * 1.5 = 2.121 \frac{kN}{m}$$

- pokrycie dachowe:

$$p_y = c_{bl} * \left(9.81 \frac{m}{s^2} \right) * 4 * 2.35 m * \sin(\alpha) = 8.31 \frac{kg}{m^2} * \left(9.81 \frac{m}{s^2} \right) * 4 * 2.35 m * \sin(53^\circ)$$

$$= 0.826 \frac{kN}{m}$$

Obciążenie sumaryczne:

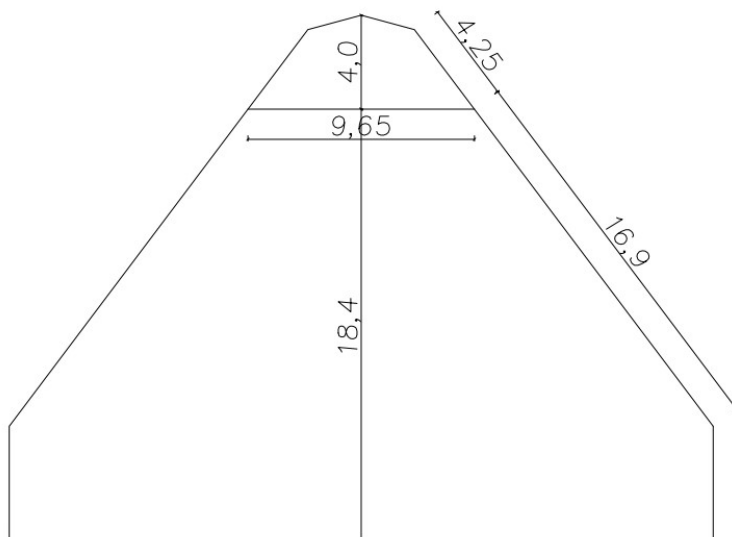
$$q = s_y + w_y + t_y + p_y = 1.204 \frac{kN}{m} + 0 + 2.121 \frac{kN}{m} + 0.826 \frac{kN}{m} = 4.152 \frac{kN}{m}$$

Przyjęto ciężar tężnika równy: $c_t = 0.078 \frac{kN}{m^2}$

3.1.7 Dobór przekroju dźwigara dachowego

Ze względu na to, że zdecydowaną większość obciążeń przenosi część dźwigara znajdująca się poniżej pomostu roboczego to właśnie na podstawie jej długości zostanie dobrana wysokość dźwigara.

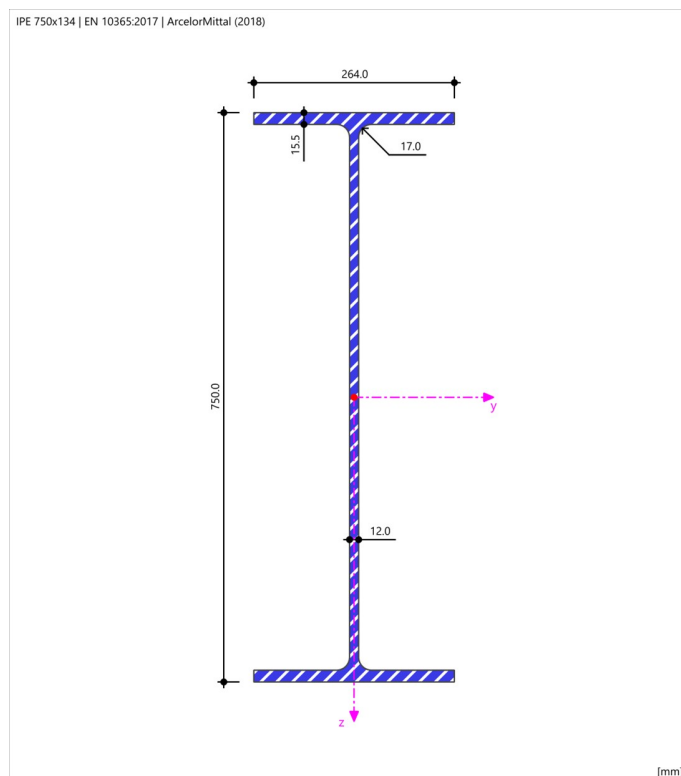
Długość analizowanego elementu: $L = 16.9 \text{ m}$



Rys. 10 Szkic wymiarów obiektu

Na podstawie projektów i podobnych obiektów wstępnie dobrana zostaje wysokość dźwigara:

$$h = \frac{16.9 \text{ m}}{25} = 0.676 \text{ m} \rightarrow \text{wybrano kształtownik IPE 750}$$



Rys. 11 Rysunek poprzeczny wybranego przekroju

Na tej podstawie rozpoczynam dobór wymiarów płatwi kratowej:

- Pas górny: HEB120
- Pas dolny: SHS50x50x5
- Skratowanie: SHS40x40x3

4. Projekt Techniczny

4.1 Opis techniczny

4.1.1 Dane ogólne obiektu

Zaprojektowano budynek parterowy, nieocieplony, jednonawowy przeznaczony do celów produkcyjno - magazynowych. Na poziomie +18,85 znajduje się pomost roboczy oraz konstrukcja przenośnika taśmowego. Wymiary konstrukcji stalowej w osiach rzutu poziomego to 30m x 61,16m. Wysokość obiektu w kalenicy to 22,60m.

Konstrukcja hali składa się z:

- poszycia dachu
- płatwi kratowych (rozpiętość 12,0m, wysokość 0,75m, rozstaw 2,35m)
- tężników między-płatwiowych
- ram głównych w konstrukcji stalowej
- stężeń połączonych poprzecznych typu V,
- stężeń połączonych podłużnych typu X
- słupów ściany szczytowej
- rygli ściany szczytowej
- stężeń ściany szczytowej typu X
- żelbetowej konstrukcji wsporczej w postaci słupów i ścian.

Elementy głównej konstrukcji nośnej będą wykonane ze stali S355JR.

4.1.2 Opis poszczególnych elementów konstrukcji

Obudowa dachu

Zaprojektowano obudowę dachu składającą się z blachy trapezowej TR55.235.940 o grubości 0,70mm, ułożonej w pozycji "na negatyw" w schemacie trójkątowym. Blachę należy przymocować wkrętami samowiercącymi z uszczelką, w dolnych fałdach blachy.

Płatwie dachowe

Płatwie zaprojektowane zostały jako kratownice o rozpiętości 12,0m i wysokości 0,75m. Pas górny wykonany jest z profilu gorącowalcowanego HEB120, pas dolny z rury kwadratowej SHS80x80x5, a słupki i krzyżulce z profili SHS40x40x3. Płatew oznaczona jest jako PŁ-1. Rozstaw elementów wynosi 2,35m.

Rama główna

Rama główna zaprojektowana jest z profilu gorącowalcowanego IPE750x134. Rama podzielona jest na 6 elementów wysyłkowych. Rama połączona jest z konstrukcją żelbetową przez przegubową podstawę. Do rygli ramy przymocowane są płatwie kratowe połączeniami doczołowymi do żeber w rozstawie 2,35m. Na wysokości +18,60 połączony jest pomost roboczy sztywnym połączeniem doczołowym.

Tężniki między-płatwiowe

Tężniki stanowią konstrukcję usztywniającą płatwie, oraz skracają długości wyboczeniowe pasów kratownic. Wykonane zostały z profili o przekroju SHS60x60x4.

Ściana szczytowa

Elementy ściany szczytowej zostały zaprojektowane z profili gorącowalcowanych. Słup został wykonany z profilu IPE400, natomiast rygle ścienne z profili RHS160x80x6. Słup jest zabezpieczony przed zwichrzeniem za pomocą zastrzałów w węzłach ze stężeniami. Połączenie słupa z rygłem ramy głównej wykonstruowane jest poprzez śruby z owalnymi otworami umożliwiając ugięcie się ramy głównej bez przenoszenia siły ściskającej na słup ściany szczytowej.

Stężenia połaciowe poprzeczne

Stężenia połaciowe poprzeczne zaprojektowano w układzie V, rozmieszczone pomiędzy ramą główną a pierwszym rzędem tężników między-płatwiowych, w skrajnych polach pomiędzy pierwszym i ostatnim segmentem ram. Stężenia te wykonane są z profili SHS70x70x6.

Stężenia połaciowe podłużne

Stężenia połaciowe podłużne zaprojektowano w układzie X pomiędzy płatwiami kratowymi w polach pierwszych, piąty, dziewiąty, oraz we wszystkich na szczycie ramy. Są to stężenia prętowe z prętów pełnych o średnicy 20mm. W tych samych polach znajdują się także układy stężające tężniki między-płatwiowe.

Stężenia ściany szczytowej

Stężenia w ścianie szczytowej zaprojektowane są jako układy prętowe typu X. Elementy te wykonane są z prętów o średnicy 20mm. Stężą one słupy ściany szczytowej. Znajdują się one w polach drugim, trzecim oraz czwartym, w różnym rozstawie.

4.1.3 Warunki posadowienia obiektu

Projekt ten nie zawiera opracowania warunków geotechnicznych. Zakłada się, że konstrukcja posadowiona jest na stabilnym podłożu, na którym nie wystąpią osiadania negatywnie wpływające na konstrukcję. Posadowienia słupów stalowych przyjęto na słupach żelbetowych, te z kolei zostaną posadowione na stopach fundamentowych. Schematyczne wymiary fundamentu zostały podane na rysunkach i przekrojach obiektu.

4.1.4 Warunki odbioru i montażu konstrukcji

Wszystkie elementy konstrukcji zostaną wytworzone w wytwórni konstrukcji stalowych zgodnie z rysunkami konstrukcyjno-wysyłkowymi dołączonymi do pracy. Na placu budowy zakłada się montaż konstrukcji przy pomocy śrub stalowych od gwintach od M12 do M30 klasy min. 8.8.

Zakłada się następującą kolejność robót:

- wykonanie stóp i ław fundamentowych pod ściany i słupy żelbetowe,
- wykonanie podbudowy pod posadzkę w hali składowania
- wykonanie konstrukcji żelbetowej w osiach 1-4
- montaż dwóch pierwszych osi elementów wysyłkowych rygli dachowym
- montaż płatwi kratowych
- montaż stężeń konstrukcji
- montaż kolejnych osi ram głównych
- wykonanie pozostałych konstrukcji żelbetowych
- montaż pozostałych ram i płatwi zgodnie z poprzednią kolejnością
- montaż elementów ścian szczytowych
- montaż obudowy dachu

4.1.5 Zabezpieczenie antykorozyjne i przeciwpożarowe konstrukcji

Określono klasę odporności pożarowej budynku jako "D", główna konstrukcja nośna zakwalifikowana do klasy odporności ogniowej R30. Zabezpieczenie przeciwpożarowe projektuje się w postaci powłoki z farby pęczniejącej, nakładanej natryskowo.

W związku z ulokowaniem obiektu na terenie zakładu przemysłowego, bez bliskości innych obiektów wytwarzających zanieczyszczenia, kategorię korozyjności określa się jako C3 - średnia, zabezpieczenie przez pokrycie farbą alkidową S3.06 o grubości 80µm.

4.2 Obliczenia statyczno-wytrzymałościowe

4.2.1 Zestawienie pozycji obliczeniowych

W projekcie technicznym obliczane będą następujące pozycje:

- Pozycja 1 - Płatew kratowa
- Pozycja 2 - Rama główna
- Pozycja 3 - Podwieszenia płatwi (tężniki)
- Pozycja 4 - Elementy ściany szczytowej
- Pozycja 5 - Stężenia połaciowe poprzeczne
- Pozycja 6 - Stężenia ściany szczytowej
- Wybrane połączenia

4.2.2 Kombinacje obciążeń

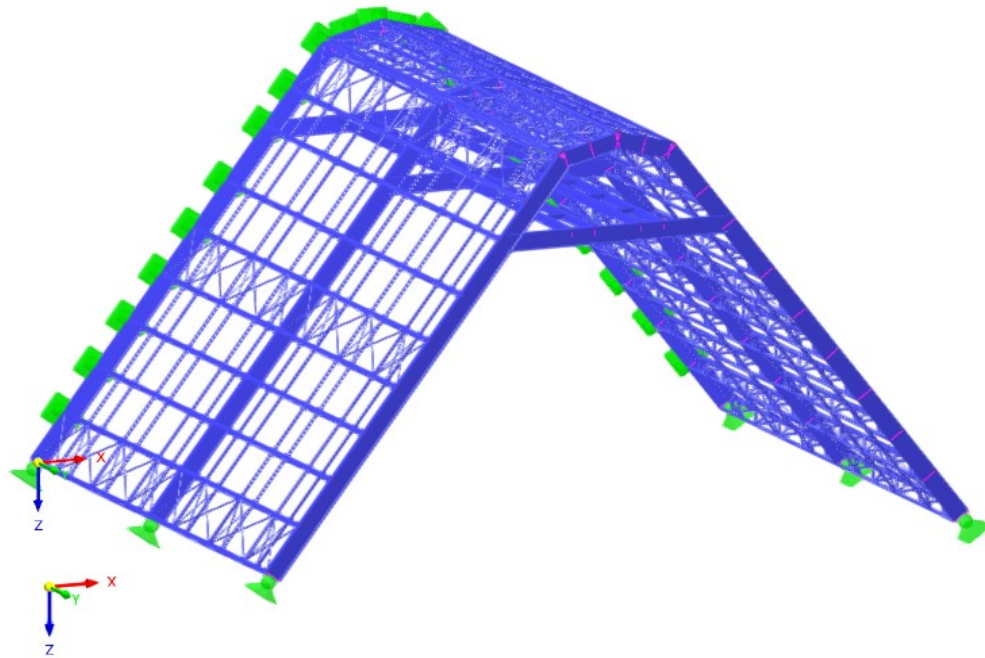
Kombinacje obciążeń dla całego obiektu zostały wykonane na podstawie wzorów 6.10a oraz 6.10b dla kombinacji SGN i za pomocą wzoru 6.14 dla kombinacji SGU [1].

Przypadki obciążeń dla obiektu zostały przedstawione na rysunkach z modelu. Zamodelowano obciążenia powierzchniowe, które następnie zostały wygenerowane na prętach.

Poniżej przedstawiono przypadki proste obciążeń:

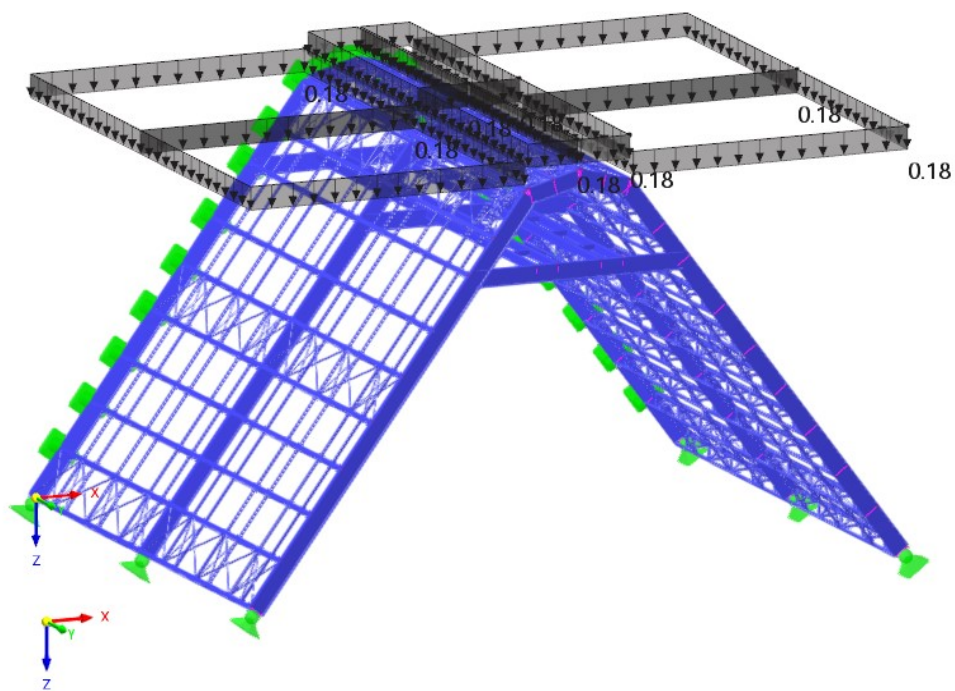
1. PO1 - Ciężar własny

PO1 - Ciężar własny



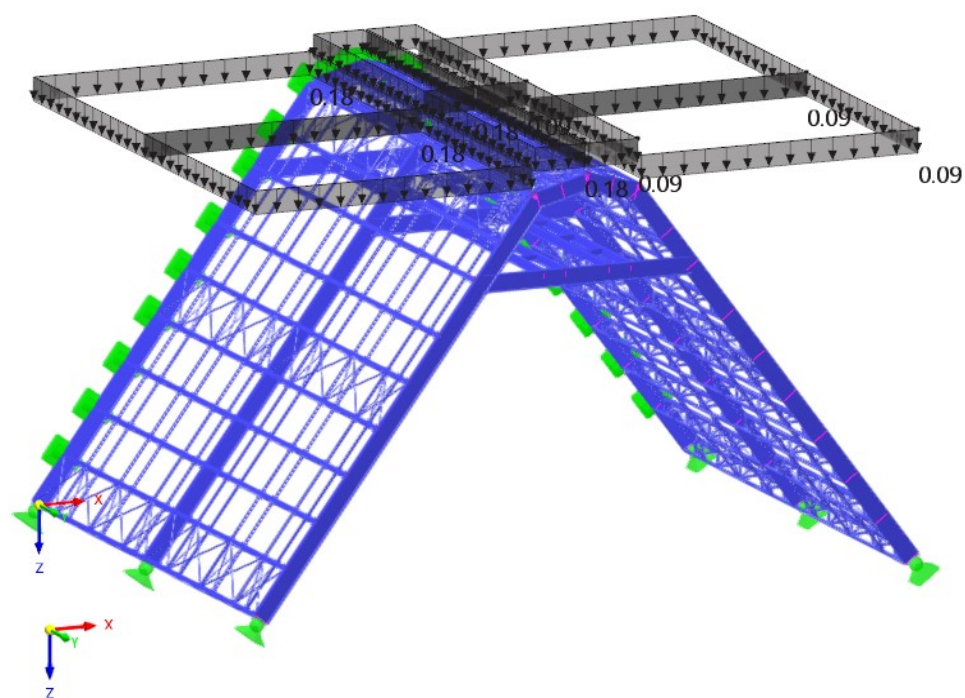
2. PO2 - Obciążenie śniegiem max. na obu połaciach

PO2 - ŚNIEG MAX
Obciążenia [kN/m²]



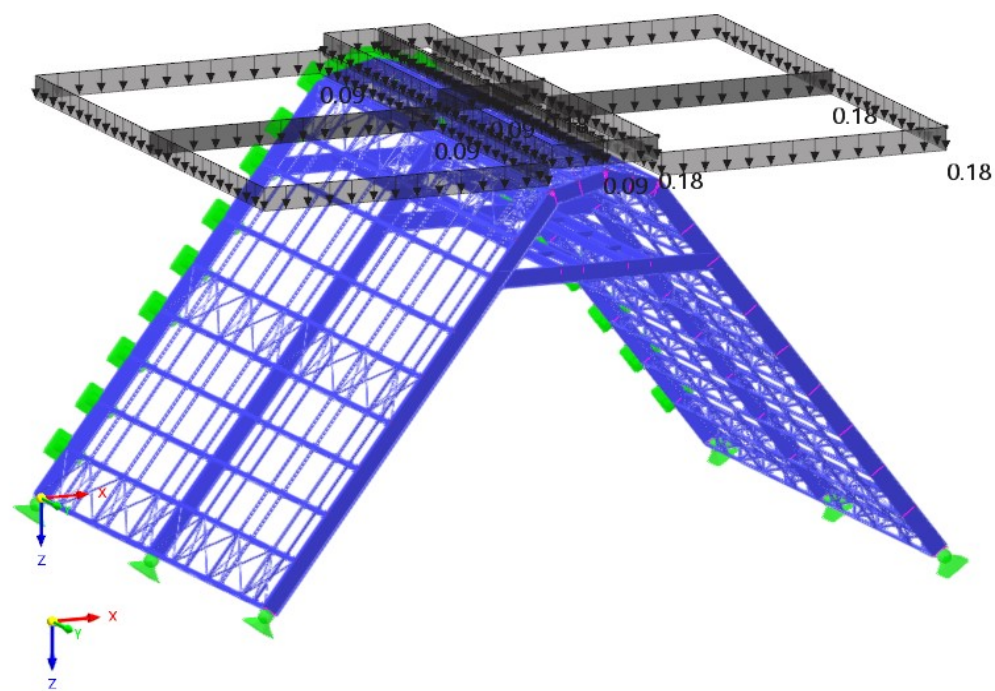
3. PO3 - Obciążenie śniegiem min. na połaci prawej

PO3 - SNIEG MIN 1
Obciążenia [kN/m²]



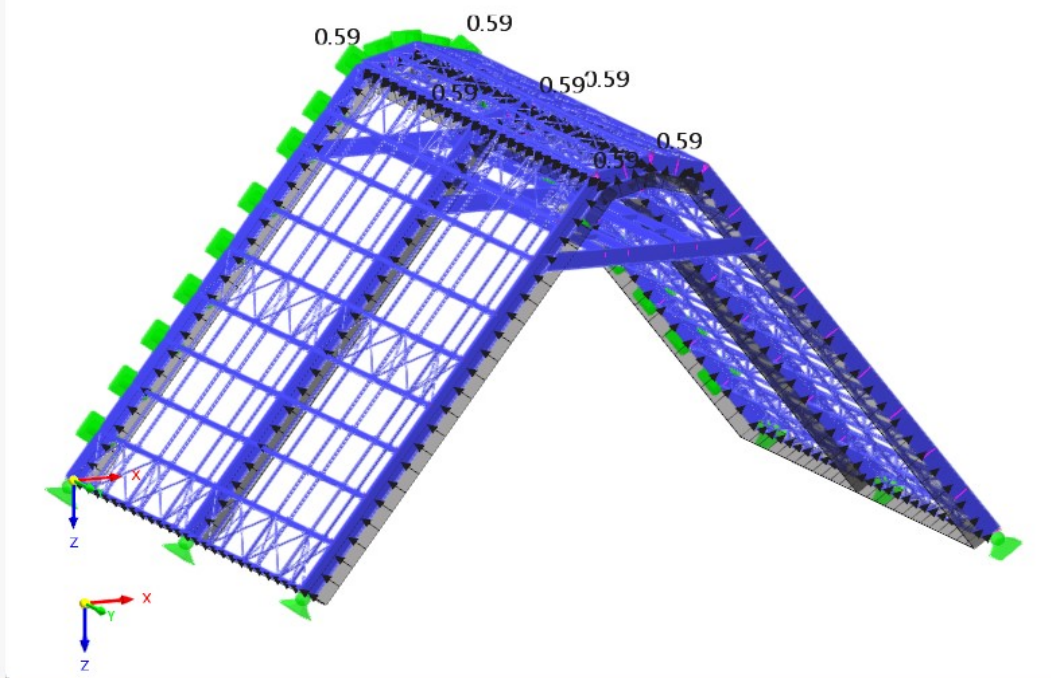
4. PO4 - Obciążenie śniegiem min. na połaci lewej

PO4 - SNIEG MIN 2
Obciążenia [kN/m²]



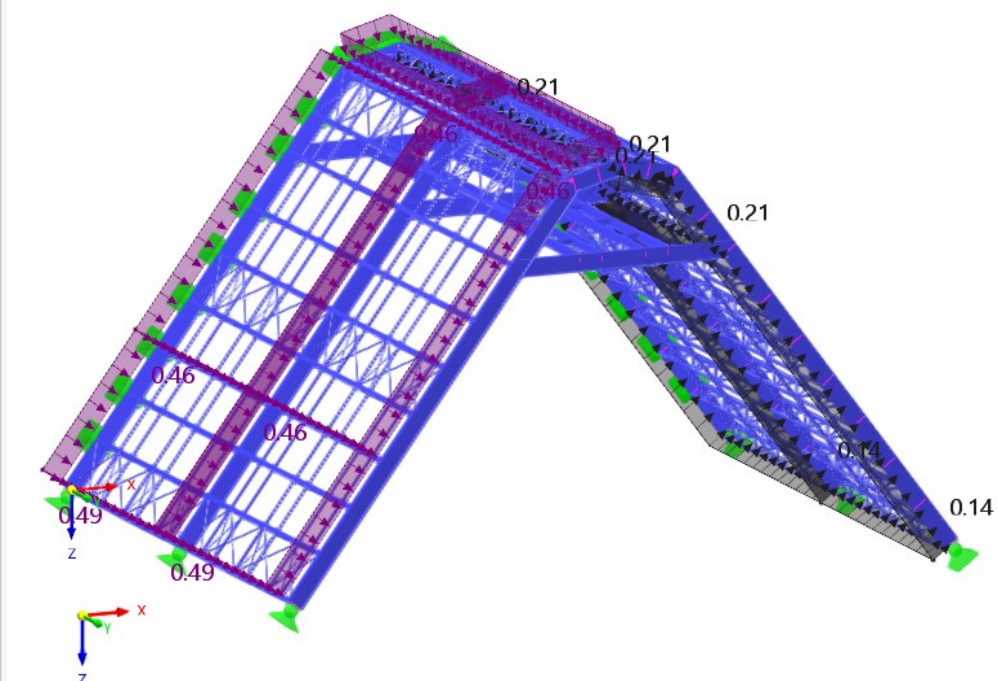
5. PO5 - Wiatr od czoła obiektu

PO5 - WIATR OD CZOŁA
Obciążenia [kN/m²]



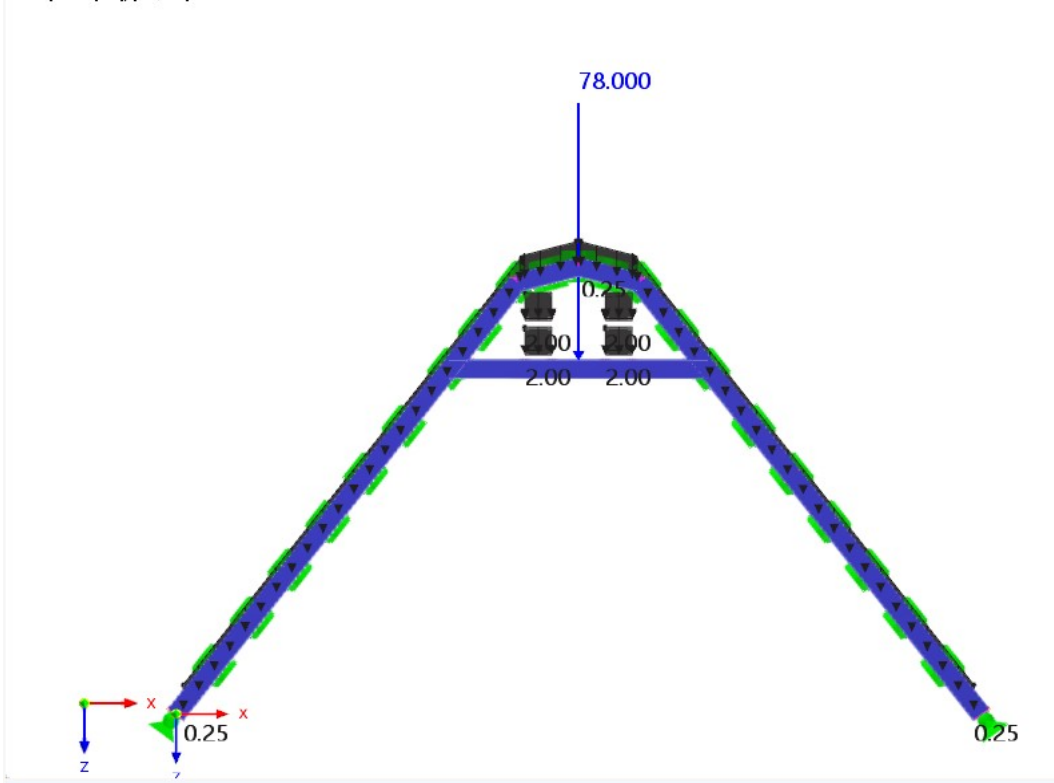
6. PO6 - Wiatr od czoła obiektu

PO6 - WIATR OD BOKU
Obciążenia [kN/m²]



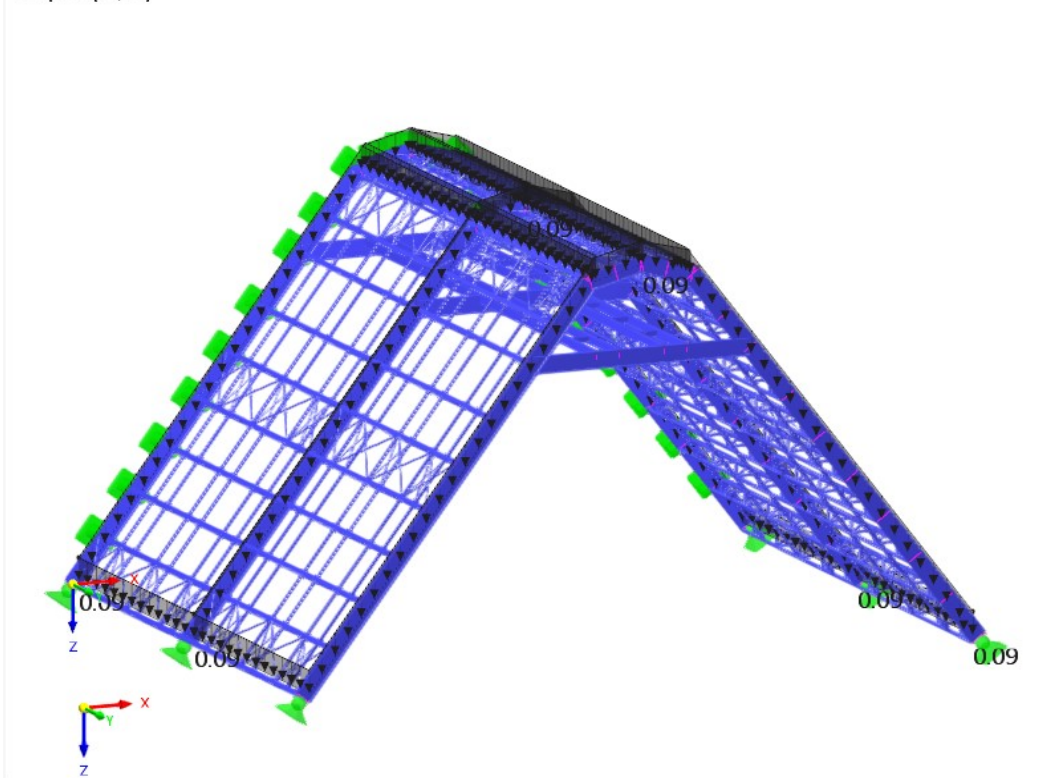
7. PO7 - Technologiczne (Przenośnik taśmowy, obciążenie kraty pomostowej itp.)

PO7 - TECHNOLOGICZNE
Obciążenia [kN], [kN/m²]



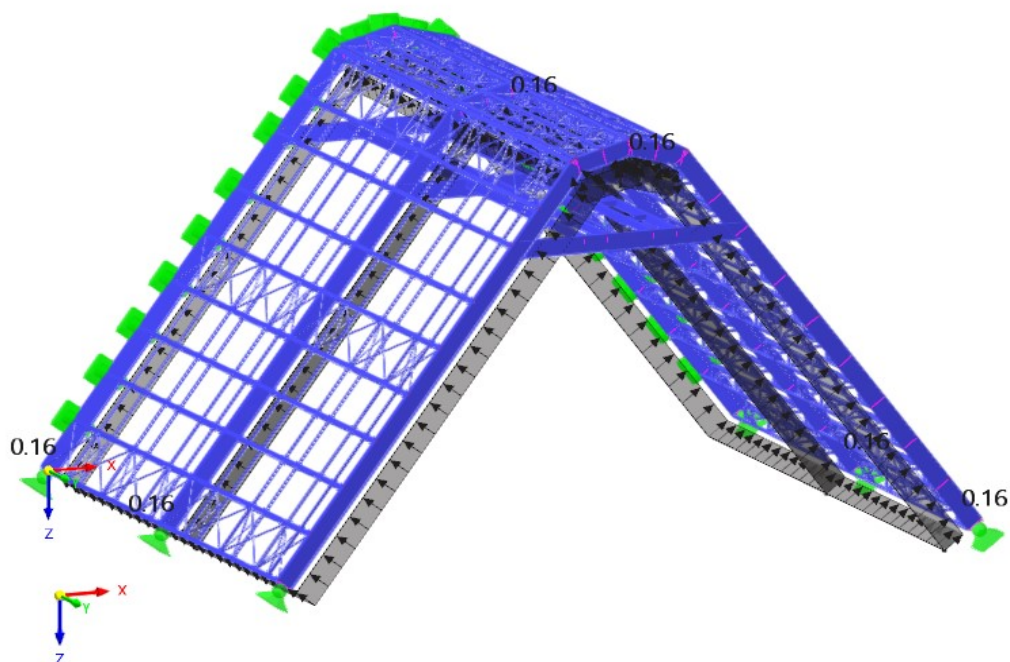
8. PO8 - Pokrycie dachowe

PO8 - POKRYCIE DACHOWE
Obciążenia [kN/m²]



9. PO9 - Wiatr wewnętrzny przypadek 1

PO9 - WIATR WEW 0.2
Obciążenia [kN/m²]



10. PO10 - Wiatr wewnętrzny przypadek 2

PO10 - WIATR WEW -0.3
Obciążenia [kN/m²]

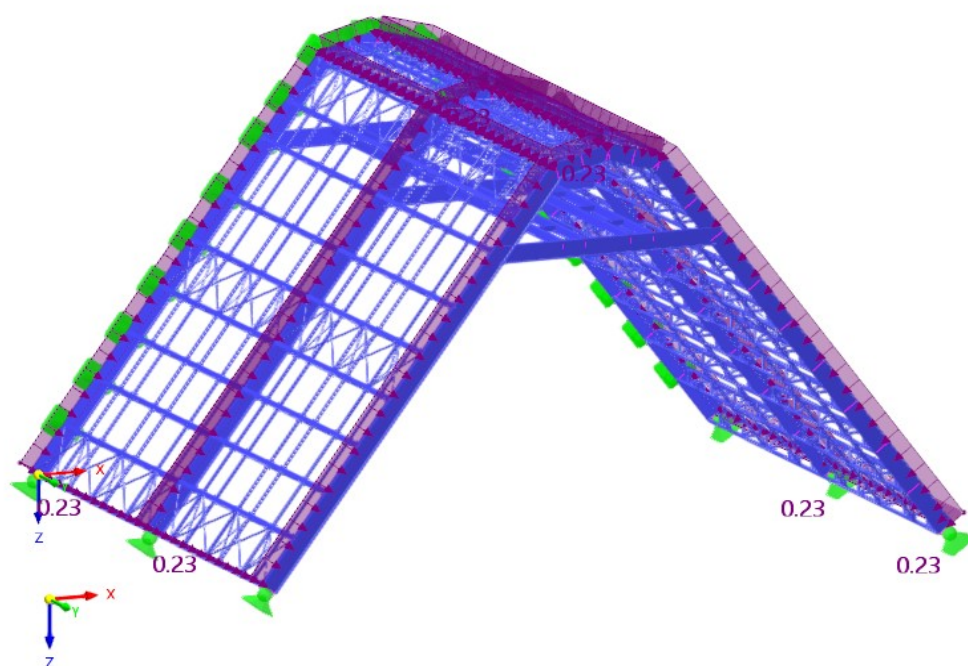


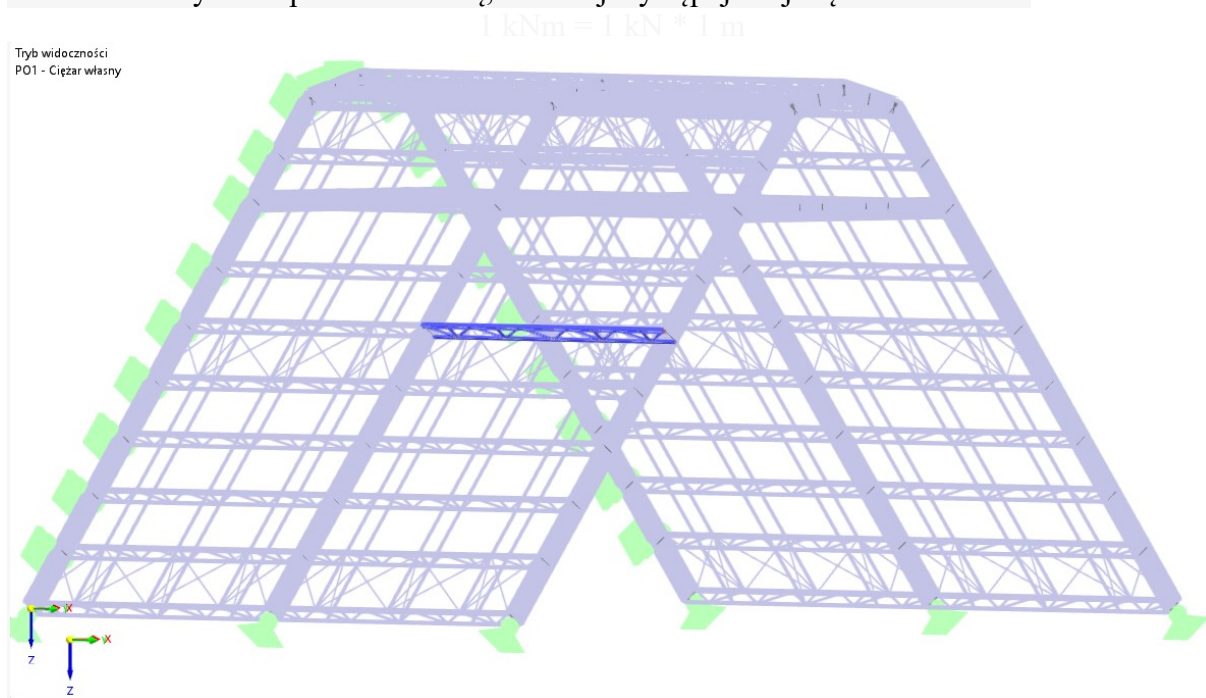
Tabela nr 7 Lista zastosowanych kombinacji obciążeń:

[illegible]

KO68	$PO1 + PO4 + 0.60 * PO5 + PO7 + PO8 + 0.60 * PO10$	SO2 - SGU - Charakterystyczna
KO69	$PO1 + PO4 + 0.60 * PO6 + PO7 + PO8 + 0.60 * PO10$	SO2 - SGU - Charakterystyczna
KO70	$PO1 + 0.50 * PO2 + PO5 + PO7 + PO8$	SO2 - SGU - Charakterystyczna
KO71	$PO1 + 0.50 * PO3 + PO5 + PO7 + PO8$	SO2 - SGU - Charakterystyczna
KO72	$PO1 + 0.50 * PO4 + PO5 + PO7 + PO8$	SO2 - SGU - Charakterystyczna
KO73	$PO1 + 0.50 * PO2 + PO6 + PO7 + PO8$	SO2 - SGU - Charakterystyczna
KO74	$PO1 + 0.50 * PO3 + PO6 + PO7 + PO8$	SO2 - SGU - Charakterystyczna
KO75	$PO1 + 0.50 * PO4 + PO6 + PO7 + PO8$	SO2 - SGU - Charakterystyczna
KO76	$PO1 + 0.50 * PO2 + PO6 + PO7 + PO8 + PO9$	SO2 - SGU - Charakterystyczna
KO77	$PO1 + 0.50 * PO3 + PO6 + PO7 + PO8 + PO9$	SO2 - SGU - Charakterystyczna
KO78	$PO1 + 0.50 * PO4 + PO6 + PO7 + PO8 + PO9$	SO2 - SGU - Charakterystyczna
KO79	$PO1 + 0.50 * PO2 + PO6 + PO7 + PO8 + PO10$	SO2 - SGU - Charakterystyczna
KO80	$PO1 + 0.50 * PO3 + PO6 + PO7 + PO8 + PO10$	SO2 - SGU - Charakterystyczna
KO81	$PO1 + 0.50 * PO4 + PO6 + PO7 + PO8 + PO10$	SO2 - SGU - Charakterystyczna
KO82	$PO1 + 0.50 * PO2 + PO5 + PO7 + PO8 + PO9$	SO2 - SGU - Charakterystyczna
KO83	$PO1 + 0.50 * PO3 + PO5 + PO7 + PO8 + PO9$	SO2 - SGU - Charakterystyczna
KO84	$PO1 + 0.50 * PO4 + PO5 + PO7 + PO8 + PO9$	SO2 - SGU - Charakterystyczna
KO85	$PO1 + 0.50 * PO2 + PO5 + PO7 + PO8 + PO10$	SO2 - SGU - Charakterystyczna
KO86	$PO1 + 0.50 * PO3 + PO5 + PO7 + PO8 + PO10$	SO2 - SGU - Charakterystyczna
KO87	$PO1 + 0.50 * PO4 + PO5 + PO7 + PO8 + PO10$	SO2 - SGU - Charakterystyczna
KO88	$PO1 + PO5 + PO8$	SO2 - SGU - Charakterystyczna
KO89	$PO1 + PO6 + PO8$	SO2 - SGU - Charakterystyczna
KO90	$PO1 + PO5 + PO8 + PO9$	SO2 - SGU - Charakterystyczna
KO91	$PO1 + PO6 + PO8 + PO9$	SO2 - SGU - Charakterystyczna
KO92	$PO1 + PO5 + PO8 + PO10$	SO2 - SGU - Charakterystyczna
KO93	$PO1 + PO6 + PO8 + PO10$	SO2 - SGU - Charakterystyczna

4.3 Pozycja 1 - Płatew kratowa

Do obliczeń wybrano płatew kratową, w której występuje największe ściskanie.

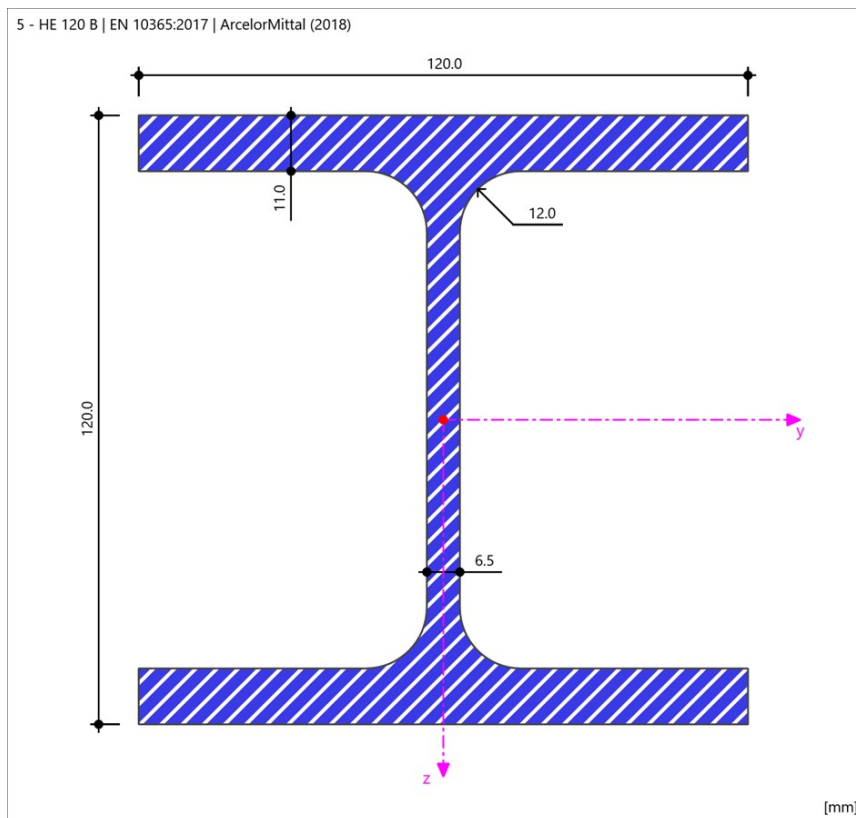


Rys. 12 Wymiarowana płatew kratowa

4.3.1 Wymiarowanie pasa górnego

4.3.1.1 Charakterystyki przekroju

Dla pasa górnego wybrano przekrój HEB120 z katalogu ArcelorMittal [12]



Rys. 13 Rysunek poprzeczny wybranego przekroju

$h = 120 \text{ mm}$; $b = 120 \text{ mm}$; $t_w = 6.5 \text{ mm}$; $t_f = 11 \text{ mm}$; $h_i = 98 \text{ mm}$; $d = 74 \text{ mm}$; $r_1 = 12 \text{ mm}$
 $A = 34 \text{ cm}^2$; $A_y = 22.11 \text{ cm}^2$; $A_z = 6.52 \text{ cm}^2$; $I_y = 864.40 \text{ cm}^4$; $I_z = 317.50 \text{ cm}^4$; $f_y = 355 \text{ MPa}$
 $W_{pl,y} = 165.20 \text{ cm}^3$; $W_{pl,z} = 80.97 \text{ cm}^3$; $E = 210 \text{ GPa}$

4.3.1.2 Nośność przekroju

- Klasa przekroju pasa górnego przy ściskaniu

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{f_y}{235 \text{ MPa}}} = \sqrt{\frac{355 \text{ MPa}}{235 \text{ MPa}}} = 1.229$$

Stosunek szerokości do grubości:

$$\text{Środek: } \frac{d}{t_w} = \frac{74 \text{ mm}}{6.5 \text{ mm}} = 11.385 < 33 * \varepsilon = 33 * 1.229 = 40.560 - \text{klasa I}$$

$$\text{Pasy: } \frac{\frac{b - t_w - 2 * r_1}{2}}{t_f} = \frac{\frac{120 \text{ mm} - 6.5 \text{ mm} - 2 * 12 \text{ mm}}{2}}{11 \text{ mm}} = 4.068 < 9 * \varepsilon = 9 * 1.229$$

= 11.062 - klasa I

Przekrój przy ściskaniu jest klasy 1

$$N_{R,k} = A * f_v = 34 \text{ cm}^2 * 355 \text{ MPa} = 1207 \text{ kN}$$
$$N_{c,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{34 \text{ cm}^2 \cdot 355 \text{ MPa}}{1} = 1207 \text{ kN} - \text{gdzie } \gamma_{M0} = 1$$

A 3D visualization of a truss structure, likely a bridge or roof truss, showing the displacement of various nodes. The structure is composed of blue truss members and green rectangular plates. The displacement values are indicated by numbers at the nodes, with a color gradient from red (positive) to blue (negative). The values range from -149.60 to 116.80.

Node	Displacement
1	32.23
2	35.25
3	-49.83
4	-19.71
5	-13.35
6	-41.09
7	60.26
8	53.37
9	53.35
10	26.14
11	116.80
12	34.48
13	15.85
14	9.54
15	15.85
16	19.78
17	3.35
18	-149.60
19	62.64
20	62.63

$$N_{Ed} = 149.6 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} = \frac{149.6 \text{ kN}}{1207 \text{ kN}} = 0.124 < 1.0 - \text{warunek spełniony}$$

Stosunek szerokości do grubości:

$$\text{Środek: } \frac{d}{t_w} = \frac{74 \text{ mm}}{6.5 \text{ mm}} = 11.385 < 72 * \varepsilon = 72 * 1.229 = 88.494 - \text{klasa I}$$

$$\text{Pasy: } \frac{\frac{b - t_w - 2 * r_1}{2}}{t_f} = \frac{\frac{120 \text{ mm} - 6.5 \text{ mm} - 2 * 12 \text{ mm}}{2}}{11 \text{ mm}} = 4.068 < 9 * \varepsilon = 9 * 1.229$$

Charakterystyczna nośność plastyczna przekroju pasa górnego przy zginaniu:

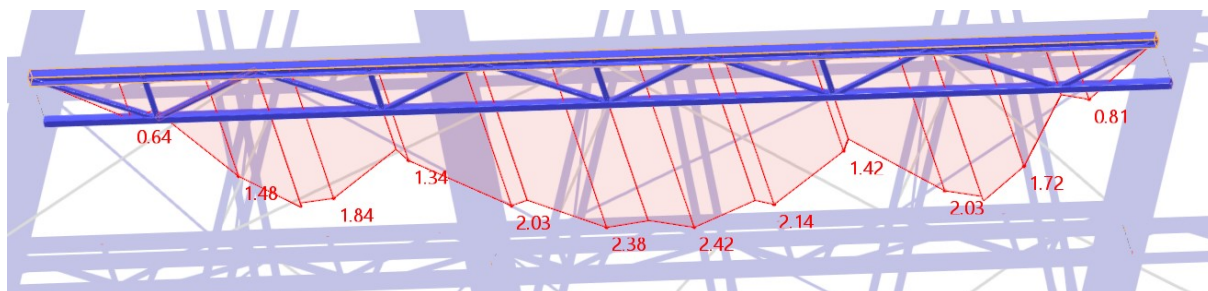
$$M_{v,Rk} = W_{pl,v} * f_v = 165.20 \text{ cm}^3 * 355 \text{ MPa} = 58.646 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Rk} = W_{pl,z} * f_y = 80.97 \text{ cm}^3 * 355 \text{ MPa} = 28.744 \text{ kNm}$$

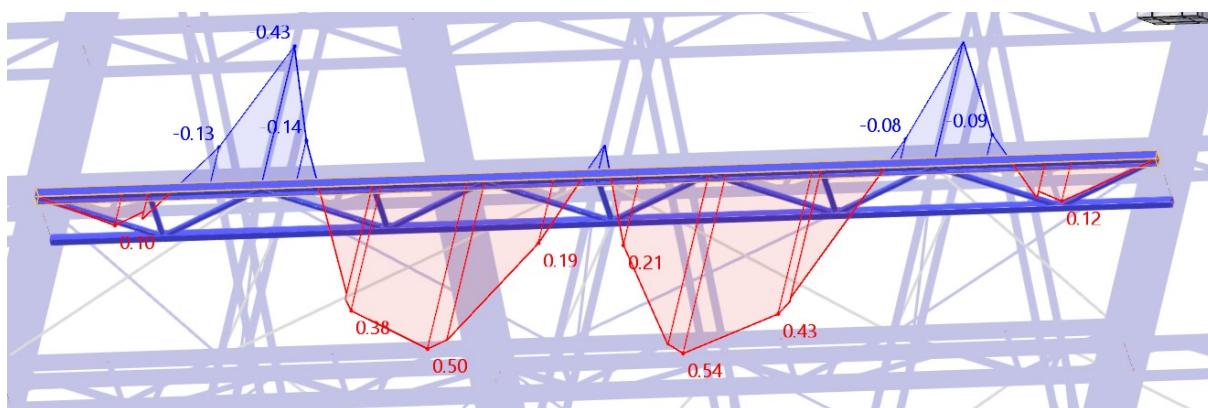
Obliczeniowa nośność przekroju pasa górnego przy zginaniu:

$$M_{pl,y,Rd} = \frac{W_{pl,y} * f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{165.20 \text{ cm}^3 * 355 \text{ MPa}}{1} = 58.646 \text{ kNm}$$

$$M_{pl,z,Rd} = \frac{W_{pl,z} * f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{80.97 \text{ cm}^3 * 355 \text{ MPa}}{1} = 28.744 \text{ kNm}$$



Rys. 15 Wykres momentów zginających My



Rys. 16 Obwiednia momentów zginających Mz

$$M_{y,Ed} = 2.42 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Ed} = 0.54 \text{ kNm}$$

Warunek nośności pasa górnego przy zginaniu:

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,y,Rd}} = \frac{2.42 \text{ kNm}}{58.646 \text{ kNm}} = 0.04 < 1 - \text{warunek spełniony}$$

$$\frac{M_{z,Ed}}{M_{pl,z,Rd}} = \frac{0.54 \text{ kNm}}{28.744 \text{ kNm}} = 0.02 < 1 - \text{warunek spełniony}$$

- Klasa przekroju pasa górnego przy zginaniu i ściskaniu

Stosunek szerokości do grubości środnika:

$$\frac{d}{t_w} = \frac{74 \text{ mm}}{6.5 \text{ mm}} = 11.385$$

Siła ściskająca w pasie górnym w miejscu maksymalnego momentu zginającego:

$$N_{Ed,2} = 149.60 \text{ kN}$$

Szerokość środnika przenosząca siłę ściskającą

$$h_N = \frac{N_{Ed,2}}{t_w * f_y} = \frac{149.60 \text{ kN}}{6.5 \text{ mm} * 355 \text{ MPa}} = 64.832 \text{ mm}$$

Względny zasięg strefy ściskanej środka:

$$\alpha = \frac{h_N + h - 2 * t_f - 2 * r_l}{2 * (h - 2 * t_f - 2 * r_l)} = \frac{64.832 \text{ mm} + 120 \text{ mm} - 2 * 11 \text{ mm} - 2 * 12 \text{ mm}}{2 * (120 \text{ mm} - 2 * 11 \text{ mm} - 2 * 12 \text{ mm})} = 0.938 > 0.5$$

Graniczny stosunek szerokości środka do grubości dla klasy 1:

$$\frac{396 * \varepsilon}{13 * \alpha - 1} = \frac{396 * 1.229}{13 * 0.938 - 1} = 43.477$$

$$\frac{d}{t_w} = \frac{74 \text{ mm}}{6.5 \text{ mm}} = 11.385 < 43.48 - \text{klasa I}$$

Stosunek szerokości do grubości pasa:

$$\frac{b - t_w - 2 * r_l}{2} = \frac{120 \text{ mm} - 6.5 \text{ mm} - 2 * 12 \text{ mm}}{2} = 4.068 < 9 * \varepsilon = 9 * 1.229 = 11.062 -$$

klasa I

Przekrój klasy 1 przy zginaniu i ściskaniu

- Nośność przekroju pasa górnego przy ścinaniu:

Warunek stateczności środka

Zgodnie z (PN-EN 1993 6.2.6) $\eta = 1.2$

$$\frac{d}{t_w} = \frac{74 \text{ mm}}{6.5 \text{ mm}} = 11.385 < \frac{72 * \varepsilon}{\eta} = \frac{72 * 1.229}{1.2} = 73.745 - \text{środek nie jest narażony na}$$

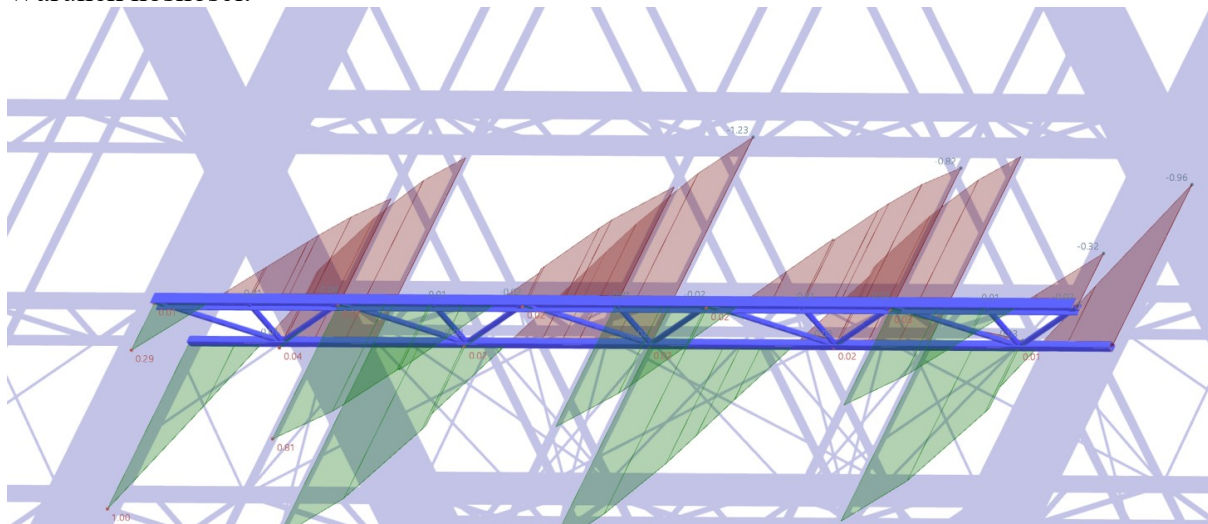
niestateczność przy ścinaniu

Obliczeniowa nośność plastyczna przy ścinaniu:

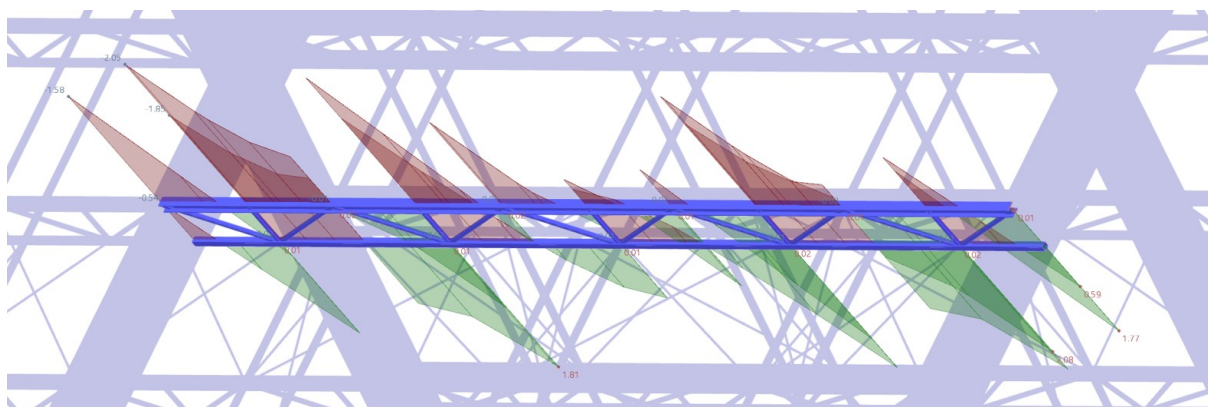
$$V_{pl,y,Rd} = \frac{\frac{A_y * f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{M0}} = \frac{\frac{22.11 \text{ cm}^2 * 355 \text{ MPa}}{\sqrt{3}}}{1} = 453.165 \text{ kN}$$

$$V_{pl,z,Rd} = \frac{\frac{A_z * f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{M0}} = \frac{\frac{6.52 \text{ cm}^2 * 355 \text{ MPa}}{\sqrt{3}}}{1} = 133.633 \text{ kN}$$

Warunek nośności:



Rys. 17 Obwiednia sił ścinających Vy



Rys. 18 Obwiednia sił ścinających Wykres Vz

$$V_{y,Ed} = 1.23 \text{ kN}$$

$$V_{z,Ed} = 2.08 \text{ kN}$$

$$\frac{V_{y,Ed}}{V_{pl,y,Rd}} = \frac{1.23 \text{ kN}}{453.165 \text{ kN}} = 0.003 < 1$$

$$\frac{V_{z,Ed}}{V_{pl,z,Rd}} = \frac{2.08 \text{ kN}}{133.633 \text{ kN}} = 0.0156 < 1$$

Warunek nośności na ścinanie spełniony

- Nośność przy zginaniu z siłą podłużną

Sprawdzenie czy można pominąć wpływ siły podłużnej na zginanie:

$$y-y: N_{Ed} = 149.6 \text{ kN} < 0.25 * N_{c,Rd} = 0.25 * 1207 \text{ kN} = 301.75 \text{ kN}$$

$$N_{Ed} = 149.6 \text{ kN} > \frac{0.5 * d * t_w * f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{0.5 * 74 \text{ mm} * 6.5 \text{ mm} * 355 \text{ MPa}}{1} = 85.378 \text{ kN}$$

$$z-z: N_{Ed} = 149.6 \text{ kN} < \frac{d * t_w * f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{74 \text{ mm} * 6.5 \text{ mm} * 355 \text{ MPa}}{1} = 170.755 \text{ kN}$$

Należy uwzględnić wpływ siły podłużnej.

$$M_{N,y,Rd} = \frac{M_{pl,y,Rd} * (1 - n)}{1 - 0.5 * a} = \frac{58.646 \text{ kNm} * (1 - 0.124)}{1 - 0.5 * 0.224} = 57.842 \text{ kNm}$$

lecz:

$$M_{N,y,Rd} = 57.842 \text{ kNm} < M_{pl,y,Rd} = 58.646 \text{ kNm}$$

gdzie:

$$n = \frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} = \frac{149.6 \text{ kN}}{1207 \text{ kN}} = 0.124$$

$$a = \frac{A - 2 * b * t_f}{A} = \frac{34 \text{ cm}^2 - 2 * 120 \text{ mm} * 11 \text{ mm}}{34 \text{ cm}^2} = 0.224 < 0.5$$

$$\text{dla: } n \leq a = 0.124 \leq 0.224 = \text{True} - M_{N,z,Rd} = M_{pl,z,Rd} = 28.744 \text{ kNm}$$

Warunki nośności:

$$M_{y,Ed} = 2.42 \text{ kNm} < M_{N,y,Rd} = 57.842 \text{ kNm} - \text{warunek spełniony}$$

$$M_{z,Ed} = 0.54 \text{ kNm} < M_{N,z,Rd} = 28.744 \text{ kNm} - \text{warunek spełniony}$$

- Nośność na zginanie ze ścinaniem i siłą podłużną

Zgodnie z 6.2.10 (1) wpływ siły podłużnej może być pominięty jeśli:

$$V_{y,Ed} = 1.23 \text{ kN} < 0.5 * V_{pl,y,Rd} = 0.5 * 453.165 \text{ kN} = 226.583 \text{ kN} - \text{warunek spełniony}$$

$$V_{z,Ed} = 2.08 \text{ kN} < 0.5 * V_{pl,z,Rd} = 0.5 * 133.633 \text{ kN} = 66.817 \text{ kN} - \text{warunek spełniony}$$

Wpływ ścinania może być pominięty

4.3.1.3 Nośność elementu

- Nośność na wyboczenie

Wyboczenie w płaszczyźnie płatwi:

Wyznaczenie długości wyboczeniowej:

Pas górny w płaszczyźnie ramy jest zabezpieczony przed wyboczeniem przez słupki kratownicy, więc:

$$L_{cr,y} = 2.4 \text{ m}$$

Korzystając ze wzoru Eulera mogę wyznaczyć siłę krytyczną:

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 * E * I_y}{L_{cr,y}^2} = \frac{3.142^2 * 210 \text{ GPa} * 864.40 \text{ cm}^4}{(2.4 \text{ m})^2} = 3110.365 \text{ kN}$$

$$\chi_y = \frac{1}{\varphi + \sqrt{\varphi^2 - \lambda_y^2}} = \frac{1}{0.766 + \sqrt{0.766^2 - 0.623^2}} = 0.825 < 1.0$$

gdzie:

$$\varphi = 0.5 * \left(1 + \alpha * (\lambda_y - 0.2) + \lambda_y^2 \right) = 0.5 * \left(1 + 0.34 * (0.623 - 0.2) + 0.623^2 \right) = 0.766$$

$$\text{Ponieważ: } \frac{h}{b} = \frac{120 \text{ mm}}{120 \text{ mm}} = 1 \leq 1.2 - \text{krzywa wyboczenia b}$$

Parametr krzywej wyboczenie: $\alpha = 0.34$

Smukłość względna wyboczenia giętnego:

$$\lambda_y = \sqrt{\frac{A * f_y}{N_{cr,y}}} = \sqrt{\frac{34 \text{ cm}^2 * 355 \text{ MPa}}{3110.365 \text{ kN}}} = 0.623$$

Nośność na wyboczenie elementu ściskanego:

$$N_{b,y,Rd} = \frac{\chi_y * A * f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0.825 * 34 \text{ cm}^2 * 355 \text{ MPa}}{1} = 996.234 \text{ kN, gdzie } \gamma_{M1} = 1$$

Wyboczenie z płaszczyzny płatwi:

Wyznaczenie długości wyboczeniowej:

Pas górny jest zabezpieczony przed wyboczeniem z płaszczyzny przez podwieszenia między płatwiowe, więc:

$$L_{cr,z} = 3.6 \text{ m}$$

Korzystając ze wzoru Eulera mogą wyznaczyć siłę krytyczną:

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 * E * I_z}{L_{cr,z}^2} = \frac{3.142^2 * 210 \text{ GPa} * 317.50 \text{ cm}^4}{(3.6 \text{ m})^2} = 507.759 \text{ kN}$$

$$\chi_z = \frac{1}{\varphi + \sqrt{\varphi^2 - \lambda_z^2}} = \frac{1}{2.017 + \sqrt{2.017^2 - 1.542^2}} = 0.301 < 1.0$$

gdzie:

$$\varphi = 0.5 * \left(1 + \alpha * (\lambda_z - 0.2) + \lambda_z^2\right) = 0.5 * \left(1 + 0.49 * (1.542 - 0.2) + 1.542^2\right) = 2.017$$

$$\text{Ponieważ: } \frac{h}{b} = \frac{120 \text{ mm}}{120 \text{ mm}} = 1 \leq 1.2 - \text{krzywa wyboczenia c}$$

Parametr krzywej wyboczenie: $\alpha = 0.49$

Smukłość względna wyboczenia giętnego:

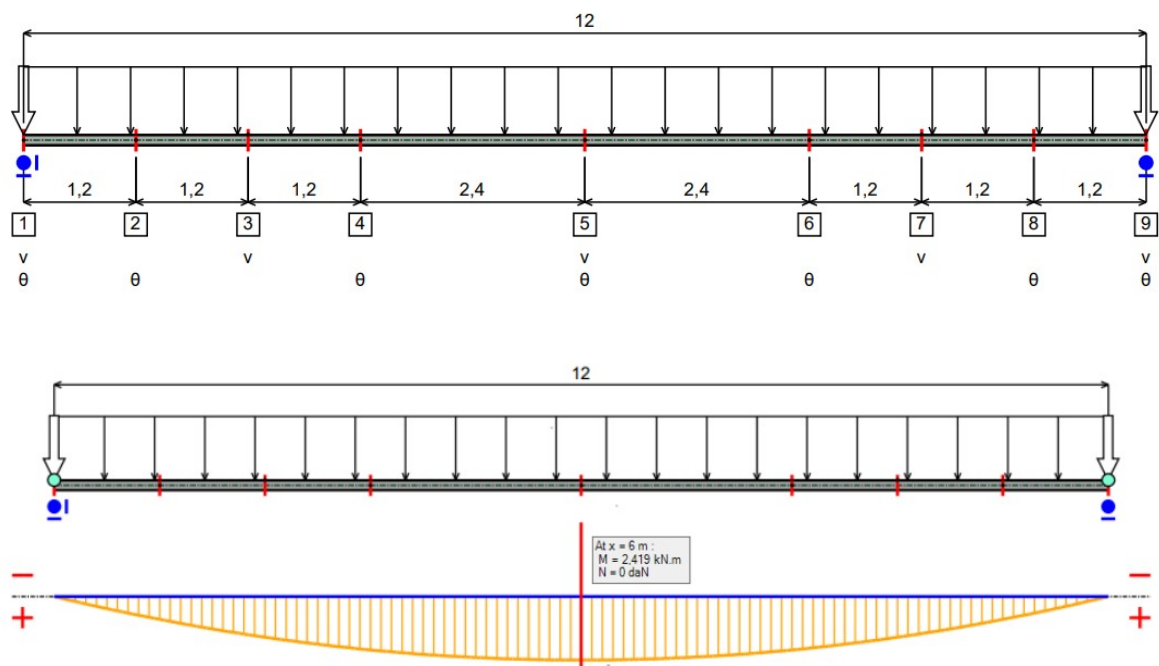
$$\lambda_z = \sqrt{\frac{A * f_y}{N_{cr,z}}} = \sqrt{\frac{34 \text{ cm}^2 * 355 \text{ MPa}}{507.759 \text{ kN}}} = 1.542$$

Nośność na wyboczenie elementu ściskanego:

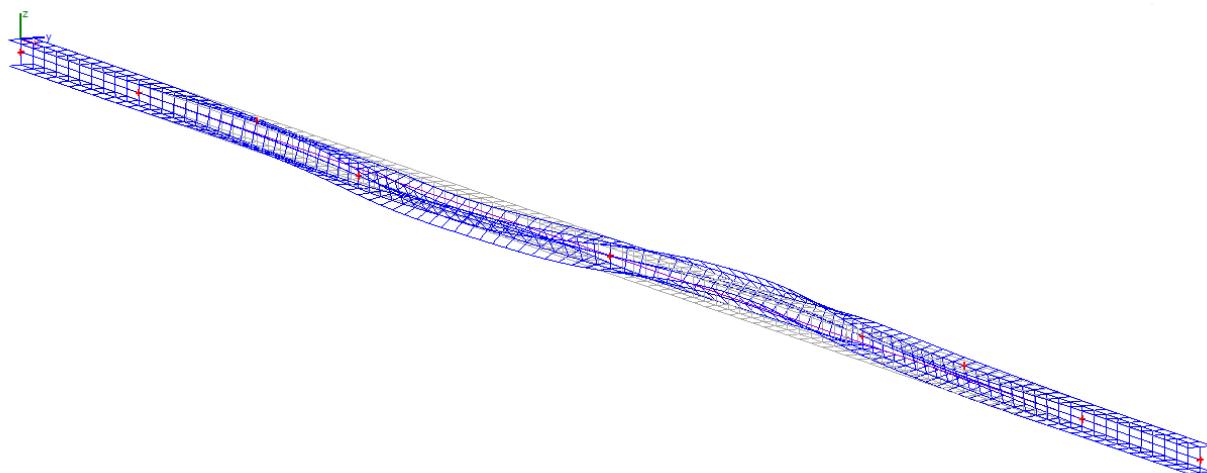
$$N_{b,z,Rd} = \frac{\chi_z * A * f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0.301 * 34 \text{ cm}^2 * 355 \text{ MPa}}{1} = 363.751 \text{ kN, gdzie } \gamma_{M1} = 1$$

- Sprawdzenie zwichrzenia:

W celu zbadania zjawiska zwichrzenia elementu, zamodelowano pas górny płatwi kratowej przy pomocy programu LTBeamN - przekrój został obciążony tak jak w modelu statycznym, w miejscach podwieszeń pasa górnego zablokowano przesuw prostopadły do osi pasa górnego. W miejscach słupków zablokowano obrót wokół osi prostopadłej do przekroju.



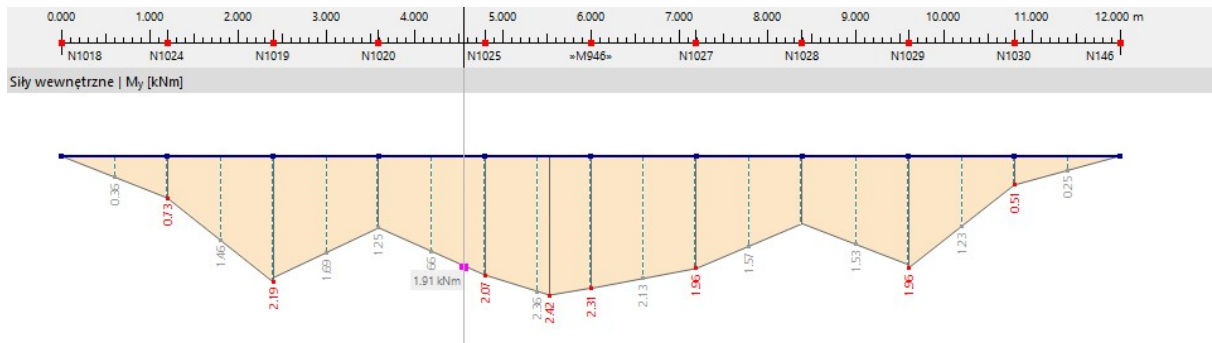
Rys. 19 Model obliczeniowy pasa górnego kratownicy w programie LTBeamN



Mode	μ_{cr}	$M_{max,cr}$ [kN.m]	$x(M_{max})$ [m]	$N_{max,cr}$ [kN]	$x(N_{max})$ [m]
1	59,93	144,99	6	0	6

Rys. 20 Postać i wartości własne zwichrzenia pasa górnego kratownicy zamodelowane oraz obliczone w programie LTBeamN
Współczynnik krytyczny: $\mu_{cr} = 59.93$

Aby wyznaczyć moment krytyczny mnożę współczynnik krytyczny przez wartość momentu zginającego w miejscu zwężenia:



Rys. 21 Wykres momentów zginających pasa górnego kratownicy
 $M_{cr} = \mu_{cr} * 1.91 \text{ kNm} = 59.93 * 1.91 \text{ kNm} = 114.466 \text{ kNm}$

Smukłość względna:

$$\lambda_{LT} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} * f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{165.20 \text{ cm}^3 * 355 \text{ MPa}}{114.466 \text{ kNm}}} = 0.716$$

Krzywa zwężenia: $\frac{h}{b} = \frac{120 \text{ mm}}{120 \text{ mm}} = 1 \leq 1$ - krzywa b

Parametr krzywej imperfekcji: $\alpha_{LT} = 0.34$

Współczynnik zwężenia:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \beta * \lambda_{LT}^2}} = \frac{1}{0.746 + \sqrt{0.746^2 - 0.75 * 0.716^2}} = 0.862$$

lecz:

$$1) \chi_{LT} = 0.862 < 1$$

$$2) \chi_{LT} = 0.862 < \frac{1}{\lambda_{LT}^2} = \frac{1}{0.716^2} = 1.952$$

$$\phi_{LT} = 0.5 * \left(1 + \alpha_{LT} * (\lambda_{LT} - \lambda_{LT,0}) + \beta * \lambda_{LT}^2 \right) =$$

$$0.5 * \left(1 + 0.34 * (0.716 - 0.4) + 0.75 * 0.716^2 \right) = 0.746$$

gdzie:

$\lambda_{LT,0} = 0.4$ - wartość maksymalna

$\beta = 0.75$ - wartość minimalna

Nośność elementu na zwężenie

$$M_{b,y,Rd} = \frac{\chi_{LT} * W_{pl,y} * f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{0.862 * 165.20 \text{ cm}^3 * 355 \text{ MPa}}{1} = 50.535 \text{ kNm}$$

Warunek nośności:

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{b,y,Rd}} = \frac{2.42 \text{ kNm}}{50.535 \text{ kNm}} = 0.0479 < 1.0 - \text{warunek spełniony}$$

W celu obliczenia warunku nośności elementu zginanego i ściskanego należy określić współczynniki interakcji zgodnie z załącznikiem B do PN-EN 1993-1-1.

Ze względu na trudność w dopasowaniu wykresu momentów do przypadków podanych załączniku do normy [5] - przyjmuję najbardziej niekorzystny przypadek stałego momentu.

Wykres momentów	Zakres	C_{my} , C_{mz} i C_{mLT}		
		Obciążenie równomierne	Obciążenie skupione	
	$-1 \leq \psi \leq 1$	$0,6 + 0,4\psi \geq 0,4$		
	$0 \leq \alpha_s \leq 1$	$-1 \leq \psi \leq 1$	$0,2 + 0,8\alpha_s \geq 0,4$	$0,2 + 0,8\alpha_s \geq 0,4$
	$-1 \leq \alpha_s < 0$	$0 \leq \psi \leq 1$	$0,1 - 0,8\alpha_s \geq 0,4$	$-0,8\alpha_s \geq 0,4$
		$-1 \leq \psi < 0$	$0,1(1-\psi) - 0,8\alpha_s \geq 0,4$	$0,2(-\psi) - 0,8\alpha_s \geq 0,4$
	$0 \leq \alpha_h \leq 1$	$-1 \leq \psi \leq 1$	$0,95 + 0,05\alpha_h$	$0,90 + 0,10\alpha_h$
	$-1 \leq \alpha_h < 0$	$0 \leq \psi \leq 1$	$0,95 + 0,05\alpha_h$	$0,90 + 0,10\alpha_h$
		$-1 \leq \psi < 0$	$0,95 + 0,05\alpha_h(1+2\psi)$	$0,90 - 0,10\alpha_h(1+2\psi)^{N28)}$
W przypadku przechyłowej postaci wyoboczenia można przyjmować odpowiednio $C_{my} = 0,9$ lub $C_{mz} = 0,9$.				
C_{my} , C_{mz} i C_{mLT} ustala się odpowiednio do rozkładu momentów między punktami podparcia (stężeniami), jak następuje:				
Współczynnik momentu	Oś zginania	Kierunek podparcia		
C_{my}	y-y	z-z		
C_{mz}	z-z	y-y		
C_{mLT}	y-y	y-y		

Tabela nr 8 Wzory do wyznaczania współczynników interakcji [5]

Dlatego też:

$C_{my} = 0.6 + 0.4 * \psi = 0.6 + 0.4 * 1 = 1 \geq 0.4$ - współczynnik równoważnego stałego momentu

$$C_{mz} = C_{my} = 1$$

gdzie: $\psi = 1$ ponieważ przyjmuję stały moment

Wyznaczenie współczynników interakcji dla elementów zginanych i ściskanych:

$$k_{yy} = \min \left(C_{my} * \left(1 + (\lambda_y - 0.2) * \left(\frac{N_{Ed}}{\chi_y * N_{R,k}} \right) \right), C_{my} * \left(1 + 0.8 * \left(\frac{N_{Ed}}{N_{R,k} * \chi_y} \right) \right) \right) =$$

$$\min \left(1 * \left(1 + (0.623 - 0.2) * \left(\frac{149.6 \text{ kN}}{0.825 * 1207 \text{ kN}} \right) \right), 1 * \left(1 + 0.8 * \left(\frac{149.6 \text{ kN}}{1207 \text{ kN} * 0.825} \right) \right) \right)$$

$$= 1.064$$

$$k_{zz} = \min \left(C_{mz} * \left(1 + (2 * \lambda_z - 0.6) * \left(\frac{N_{Ed}}{\chi_z * N_{R,k}} \right) \right), C_{mz} * \left(1 + 1.4 * \left(\frac{N_{Ed}}{\chi_z * N_{R,k}} \right) \right) \right) =$$

$$\min \left(1 * \left(1 + (2 * 1.542 - 0.6) * \left(\frac{149.6 \text{ kN}}{0.301 * 1207 \text{ kN}} \right) \right), 1 * \left(1 + 1.4 * \left(\frac{149.6 \text{ kN}}{0.301 * 1207 \text{ kN}} \right) \right) \right)$$

$$= 1.576$$

$$k_{yz} = 0.6 * k_{zz} = 0.6 * 1.576 = 0.945$$

$$k_{zy} = 0.6 * k_{yy} = 0.6 * 1.064 = 0.638$$

Warunek nośności pasa zginanego i ściskanego:

$$1) \quad \frac{N_{Ed}}{\chi_y * \left(\frac{N_{R,k}}{\gamma_{M1}} \right)} + k_{yy} * \left(\frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} * \left(\frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}} \right)} \right) + k_{yz} * \left(\frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) = \frac{149.6 \text{ kN}}{0.825 * \left(\frac{1207 \text{ kN}}{1} \right)}$$

$$+ 1.064 * \left(\frac{2.42 \text{ kNm}}{0.862 * \left(\frac{58.646 \text{ kNm}}{1} \right)} \right) + 0.945 * \left(\frac{0.54 \text{ kNm}}{\frac{28.744 \text{ kNm}}{1}} \right) = 0.219 \leq 1.0$$

Warunek spełniony

$$2) \quad \frac{N_{Ed}}{\chi_z * \left(\frac{N_{R,k}}{\gamma_{M1}} \right)} + k_{zy} * \left(\frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} * \left(\frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}} \right)} \right) + k_{zz} * \left(\frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) = \frac{149.6 \text{ kN}}{0.301 * \left(\frac{1207 \text{ kN}}{1} \right)}$$

$$+ 0.638 * \left(\frac{2.42 \text{ kNm}}{0.862 * \left(\frac{58.646 \text{ kNm}}{1} \right)} \right) + 1.576 * \left(\frac{0.54 \text{ kNm}}{\frac{28.744 \text{ kNm}}{1}} \right) = 0.471 \leq 1.0$$

Warunek spełniony

4.3.1.4 Stan Graniczny Użytkowości

Ugięcia:

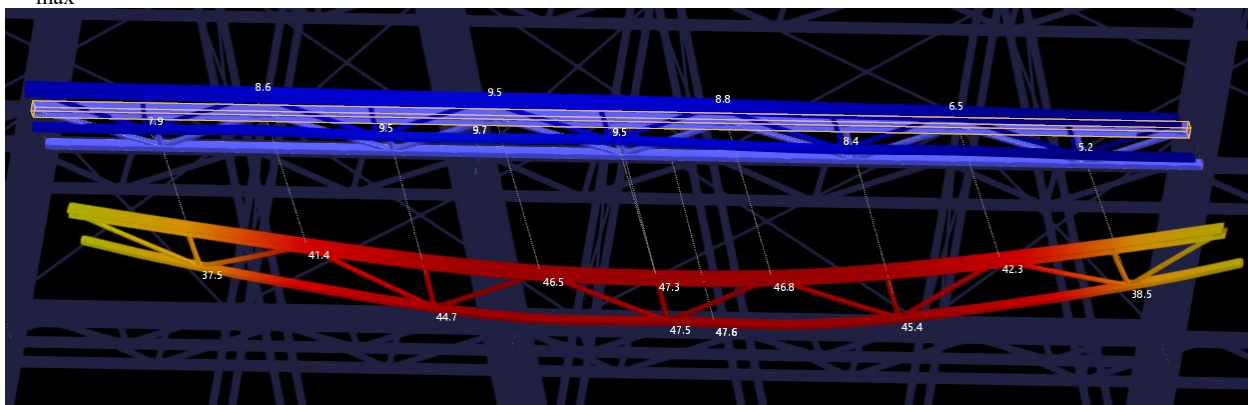
$$w_y = 34 \text{ mm}$$

$$w_z = 32.9 \text{ mm}$$

$$w = \sqrt{w_y^2 + w_z^2} = \sqrt{(34 \text{ mm})^2 + (32.9 \text{ mm})^2} = 47.312 \text{ mm}$$

$$w_{\max} = \frac{L}{200} = \frac{12 \text{ m}}{200} = 60 \text{ mm} - \text{na podstawie załącznika NA. 22 - AD 7.2.1 (1)B}$$

$$\frac{w}{w_{\max}} = \frac{47.312 \text{ mm}}{60 \text{ mm}} = 0.8 \leq 1.0 - \text{warunek spełniony}$$

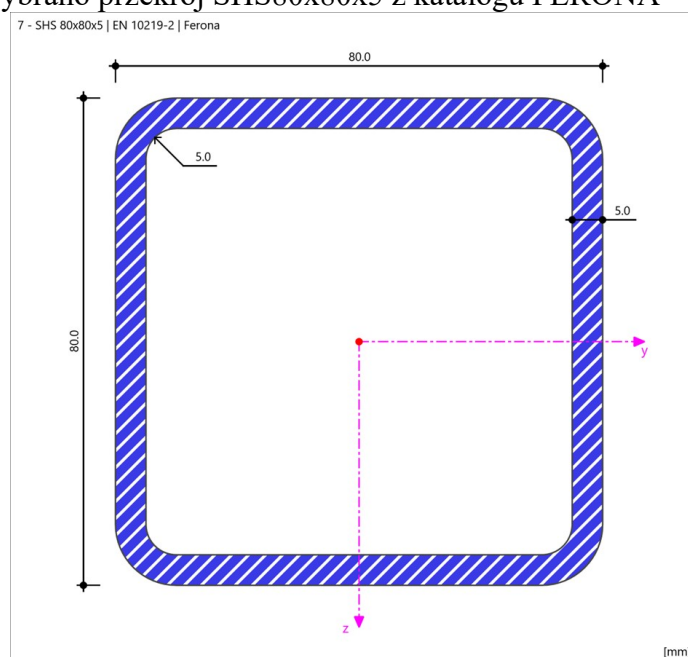


Rys. 22 Zsumowane ugięcia płaty kratowej

4.3.2 Wymiarowanie pasa dolnego

4.3.2.1 Charakterystyki przekroju

Dla pasa dolnego wybrano przekrój SHS80x80x5 z katalogu FERONA



Rys. 23 Rysunek poprzeczny wybranego przekroju

$h = 80 \text{ mm}$ - wysokość przekroju

$t = 5 \text{ mm}$ - grubość ścianki

$r_o = 10 \text{ mm}$ - zewnętrzny promień naroża

$r_i = 5 \text{ mm}$ - wewnętrzny promień naroża

$d = 60 \text{ mm}$ - wysokość prostej części środkowej

$A = 14.40 \text{ cm}^2$ - pole przekroju

$I_y = 131 \text{ cm}^4$ - moment bezwładności względem osi y-y

$I_z = I_y = 131 \text{ cm}^4$

$W_{pl,y} = 39.70 \text{ cm}^3$ - wskaźnik plastyczny względem osi y-y

$A_{v,y} = 7.20 \text{ cm}^2$ - powierzchnia ścinania

Współczynniki częściowe:

$$\gamma_{M0} = 1; \gamma_{M1} = 1$$

Gatunek stali: S355

$f_y = 355 \text{ MPa}$ - granica plastyczności

$E = 210 \text{ GPa}$ - moduł sprężystości

4.3.2.2 Nośność przekroju

- Klasa przekroju pasa dolnego przy ściskaniu

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{f_y}{235 \text{ MPa}}} = \sqrt{\frac{355 \text{ MPa}}{235 \text{ MPa}}} = 1.2$$

Stosunek szerokości do grubości:

$$\frac{d}{t} = \frac{60 \text{ mm}}{5 \text{ mm}} = 12 \leq 33 * \varepsilon = 33 * 1.2 = 40.6$$

Przekrój przy ściskaniu jest klasy 1

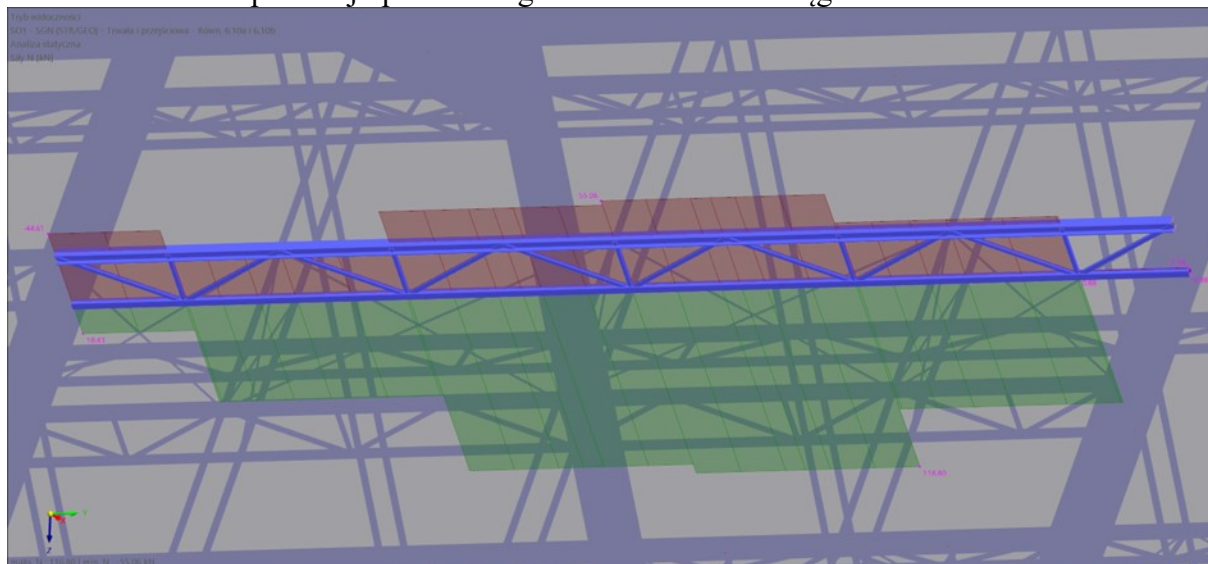
Charakterystyczna nośność przekroju pasa dolnego klasy 1 przy ściskaniu:

$$N_{R,k} = A * f_y = 14.40 \text{ cm}^2 * 355 \text{ MPa} = 511.2 \text{ kN}$$

Obliczeniowa nośność przekroju pasa dolnego przy podstawie:

$$N_{c,Rd} = \frac{A * f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{14.40 \text{ cm}^2 * 355 \text{ MPa}}{1} = 511.2 \text{ kN}$$

Warunek nośności przekroju pasa dolnego na ściskanie i rozciąganie:



Rys. 24 Obwiednia sił osiowych pasa dolnego

$$N_{Ed,1} = 116.8 \text{ kN} - \text{rozciąganie}$$

$$N_{Ed,2} = 50.06 \text{ kN} - \text{ściskanie}$$

$$1) \text{ Ściskanie: } \frac{N_{Ed,2}}{N_{c,Rd}} = \frac{50.06 \text{ kN}}{511.2 \text{ kN}} = 0.0979 \leq 1.0 - \text{warunek spełniony}$$

$$2) \text{ Rozciąganie: } \frac{N_{Ed,1}}{N_{c,Rd}} = \frac{116.8 \text{ kN}}{511.2 \text{ kN}} = 0.228 \leq 1.0 - \text{warunek spełniony}$$

- Klasa przekroju pasa dolnego przy zginaniu względem osi y-y

$$\frac{d}{t} = \frac{60 \text{ mm}}{5 \text{ mm}} = 12 \leq 72 * \varepsilon = 72 * 1.2 = 88.5$$

Przekrój przy zginaniu względem osi y-y jest klasy 1

Charakterystyczna nośność przekroju pasa dolnego przy zginaniu

$$M_{y,Rk} = W_{pl,y} * f_y = 39.70 \text{ cm}^3 * 355 \text{ MPa} = 14.094 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Rk} = M_{y,Rk} = 14.094 \text{ kNm}$$

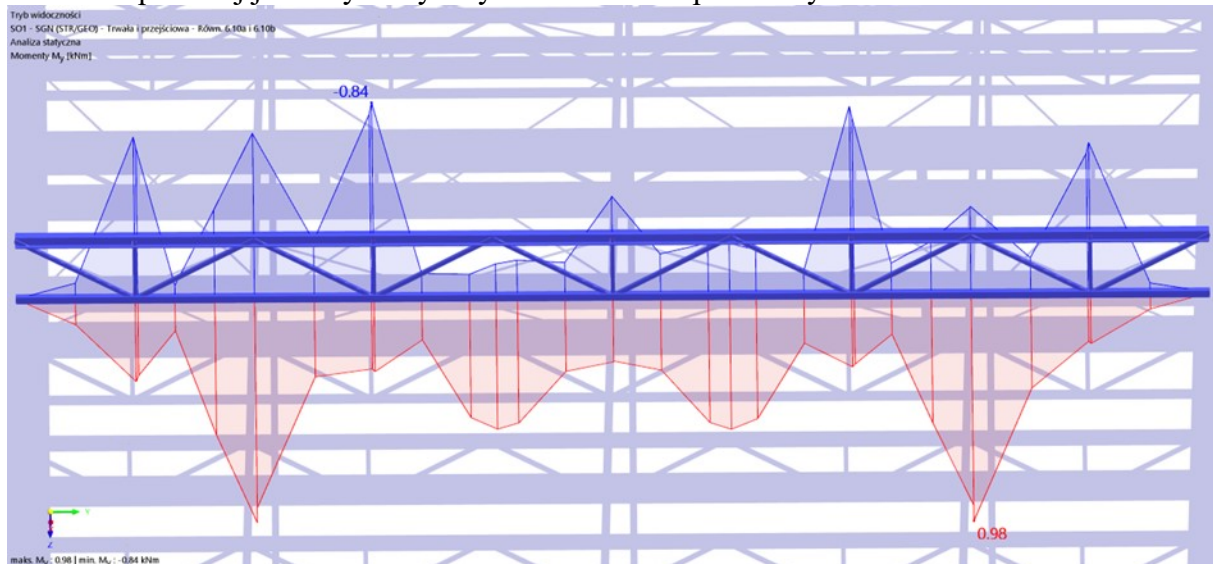
Obliczeniowa nośność przekroju pasa górnego przy zginaniu

$$M_{pl,y,Rd} = \frac{W_{pl,y} * f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{39.70 \text{ cm}^3 * 355 \text{ MPa}}{1} = 14.094 \text{ kNm}$$

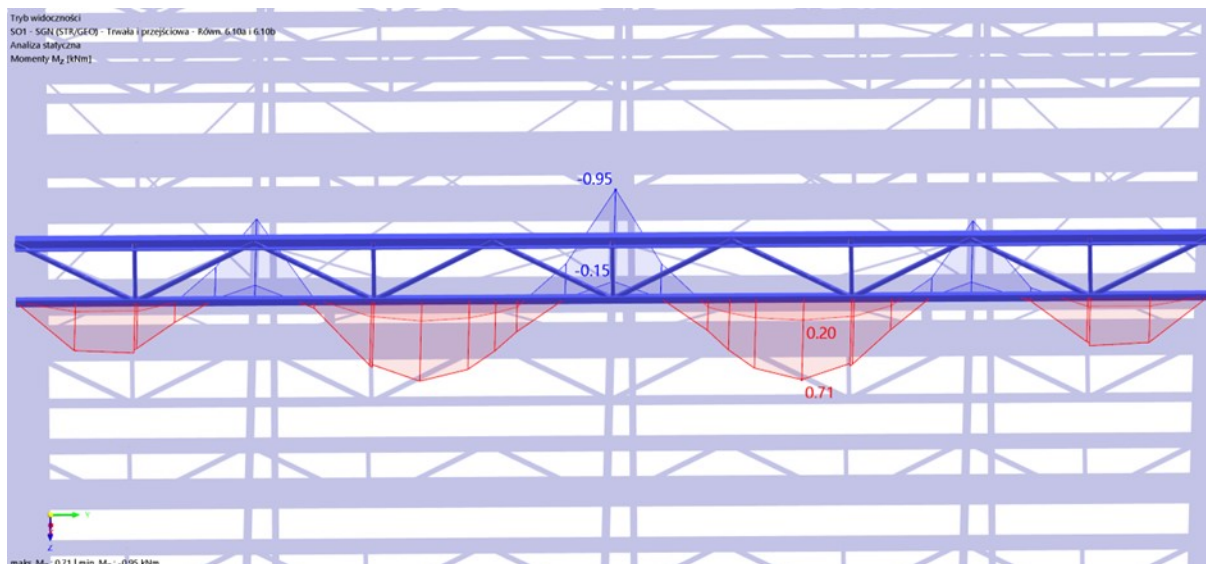
$$M_{pl,z,Rd} = M_{pl,y,Rd} = 14.094 \text{ kNm}$$

Warunek nośności pasa dolnego przy zginaniu:

Ponieważ przekrój jest bisymetryczny ma takie same parametry w obu kierunkach



Rys. 25 Obwiednia momentów zginających M_y dla pasa dolnego



Rys. 26 Obwiednia momentów zginających M_z dla pasa dolnego

$$M_{y,Ed} = 0.98 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Ed} = 0.95 \text{ kNm}$$

$$1) \frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,y,Rd}} = \frac{0.98 \text{ kNm}}{14.094 \text{ kNm}} = 0.0695 \leq 1.0 - \text{warunek spełniony}$$

$$2) \frac{M_{z,Ed}}{M_{pl,z,Rd}} = \frac{0.95 \text{ kNm}}{14.094 \text{ kNm}} = 0.0674 \leq 1.0 - \text{warunek spełniony}$$

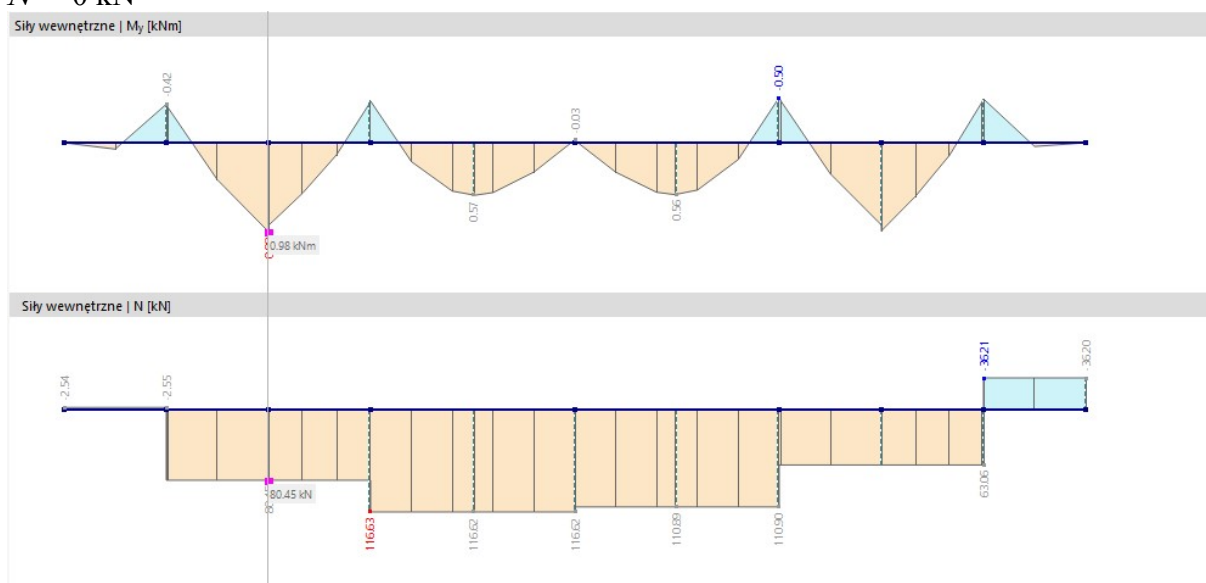
- Klasa przekroju pasa dolnego przy zginaniu i ściskaniu

Stosunek szerokości do grubości:

$$\frac{d}{t} = \frac{60 \text{ mm}}{5 \text{ mm}} = 12$$

Siła ściskająca w pasie dolnym, w miejscu maksymalnego momentu zginającego:

$$N = 0 \text{ kN}$$



Rys. 27 Wykres interakcji siły ściskającej i momentu zginającego

Szerokość środnika przenosząca siłę ściskającą:

$$h_N = \frac{N}{t * f_y} = \frac{0 \text{ kN}}{5 \text{ mm} * 355 \text{ MPa}} = 0 \text{ mm}$$

Względny zasięg strefy ściskanej:

$$\alpha = \frac{h_N + h - 2 * t - 2 * r_i}{2 * (h - 2 * t - 2 * r_i)} = \frac{0 \text{ mm} + 80 \text{ mm} - 2 * 5 \text{ mm} - 2 * 5 \text{ mm}}{2 * (80 \text{ mm} - 2 * 5 \text{ mm} - 2 * 5 \text{ mm})} = 0.5 \leq 0.5$$

Graniczny stosunek szerokości środnika do grubości dla klasy 1:

$$\frac{d}{t} = \frac{60 \text{ mm}}{5 \text{ mm}} = 12 \leq \frac{36 * \epsilon}{\alpha} = \frac{36 * 1.2}{0.5} = 88.494$$

Przekrój jest klasy 1 przy zginaniu i ściskaniu

Nośność przekroju pasa dolnego przy ścinaniu:

Warunek stateczności środnika:

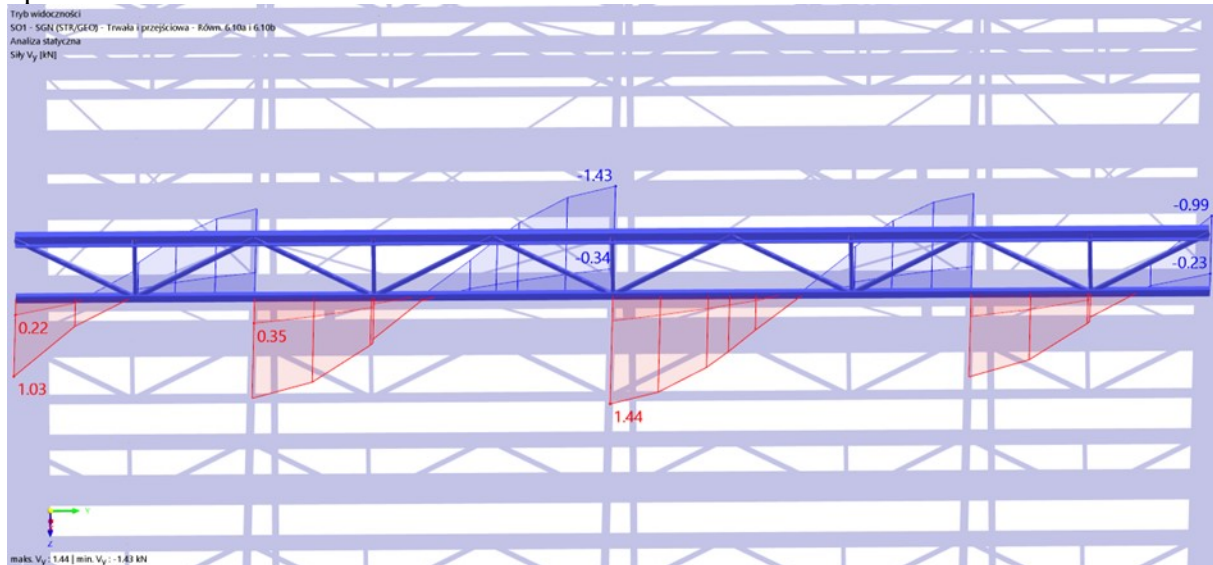
$\eta = 1$ w przybliżeniu wg [PN-EN 1993-1-1 (6.2.6)]

$$\frac{d}{t} = \frac{60 \text{ mm}}{5 \text{ mm}} = 12 \leq \frac{72 * \epsilon}{\eta} = \frac{72 * 1.2}{1} = 88.494 \quad - \text{ środnik nie jest narażony na niestateczność.}$$

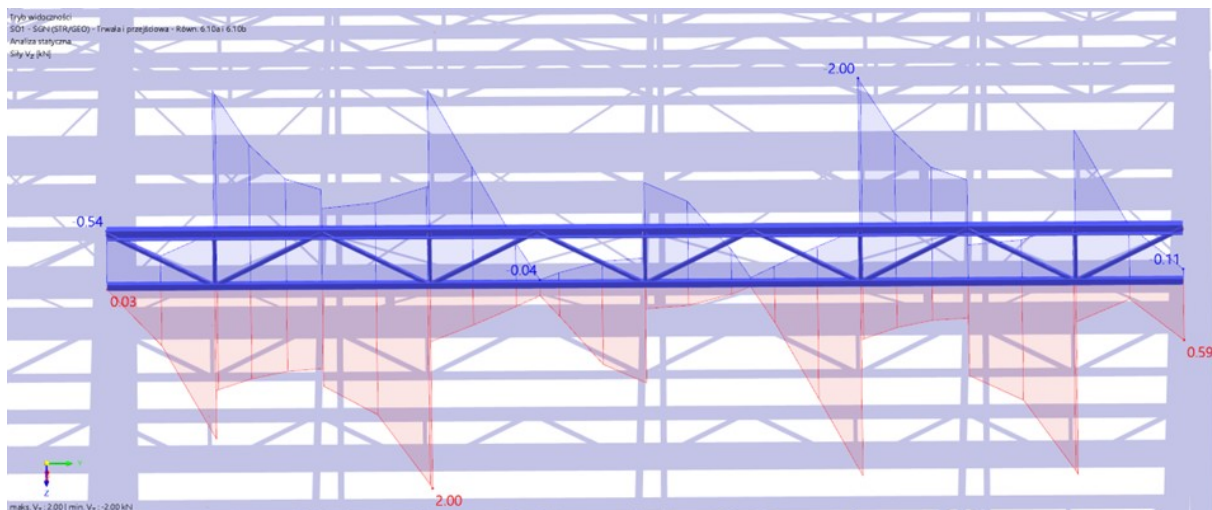
Obliczeniowa nośność przekroju przy ścinaniu:

$$V_{c,Rd} = \frac{A_{v,y} * \left(\frac{f_y}{\sqrt{3}} \right)}{\gamma_{M0}} = \frac{7.20 \text{ cm}^2 * \left(\frac{355 \text{ MPa}}{\sqrt{3}} \right)}{1} = 147.571 \text{ kN}$$

Sprawdzenie warunków nośności:



Rys. 28 Obwiednia sił ścinających V_y



Rys. 29 Obwiednia sił ścinających V_z

$$V_{y,Ed} = 1.44 \text{ kN}, V_{z,Ed} = 2.00 \text{ kN}$$

$$1) \frac{V_{y,Ed}}{V_{c,Rd}} = \frac{1.44 \text{ kN}}{147.571 \text{ kN}} = 0.010 \leq 1.0 - \text{warunek spełniony}$$

$$2) \frac{V_{z,Ed}}{V_{c,Rd}} = \frac{2.00 \text{ kN}}{147.571 \text{ kN}} = 0.014 \leq 1.0 - \text{warunek spełniony}$$

Nośność przy zginaniu z siłą podłużną

$$M_{N,y,Rd} = M_{pl,y,Rd} * \left(\frac{1 - N}{1 - 0.5 * a_w} \right) = 14.094 \text{ kNm} * \left(\frac{1 - 0 \text{ kN}}{1 - 0.5 * 0.5} \right) = 18.791 \text{ kNm}$$

$$M_{N,z,Rd} = M_{pl,z,Rd} * \left(\frac{1 - N}{1 - 0.5 * a_f} \right) = 14.094 \text{ kNm} * \left(\frac{1 - 0 \text{ kN}}{1 - 0.5 * 0.5} \right) = 18.791 \text{ kNm}$$

gdzie:

$$a_w = \min \left(\frac{A - d * t}{A}, 0.5 \right) = \min \left(\frac{14.40 \text{ cm}^2 - 60 \text{ mm} * 5 \text{ mm}}{14.40 \text{ cm}^2}, 0.5 \right) = 0.5$$

$$a_f = \min \left(\frac{A - d * t}{A}, 0.5 \right) = \min \left(\frac{14.40 \text{ cm}^2 - 60 \text{ mm} * 5 \text{ mm}}{14.40 \text{ cm}^2}, 0.5 \right) = 0.5$$

Warunek nośności:

$$\left(\frac{M_{y,Ed}}{M_{N,y,Rd}} \right)^\alpha + \left(\frac{M_{z,Ed}}{M_{N,z,Rd}} \right)^\beta = \left(\frac{0.98 \text{ kNm}}{18.791 \text{ kNm}} \right)^{0.6} + \left(\frac{0.95 \text{ kNm}}{18.791 \text{ kNm}} \right)^{0.6} = 0.337 \leq 1.0 - \text{warunek spełniony}$$

gdzie:

$$\alpha = \min \left(\frac{1.66}{1 - 1.13 * n^2}, 0.6 \right) = \min \left(\frac{1.66}{1 - 1.13 * 0.228^2}, 0.6 \right) = 0.6$$

$$\beta = \alpha = 0.6$$

$$n = \frac{N_{Ed,1}}{N_{c,Rd}} = \frac{116.8 \text{ kN}}{511.2 \text{ kN}} = 0.228$$

Nośność na zginanie ze ścinaniem i siłą podłużną

Zgodnie z 6.2.10 (1) wpływ siły podłużnej może być pominięty jeśli:

$$V_{y,Ed} = 1.44 \text{ kN} < 0.5 * V_{c,Rd} = 0.5 * 147.571 \text{ kN} = 73.785 \text{ kN} - \text{warunek spełniony}$$

$$V_{z,Ed} = 2 \text{ kN} < 0.5 * V_{c,Rd} = 0.5 * 147.571 \text{ kN} = 73.785 \text{ kN} - \text{warunek spełniony}$$

Wpływ ścinania na zginanie z siłą podłużną może być pominięty.

4.3.2.3 Nośność elementu

- Nośność na wyboczenie

Wyboczenie w płaszczyźnie płatwi:

Wyznaczenie długości wyboczeniowej:

Pas dolny w płaszczyźnie ramy jest zabezpieczony przed wyboczeniem przez słupki kratownicy, więc:

$$L_{cr,y} = 2.4 \text{ m}$$

Korzystając ze wzoru Eulera mogą wyznaczyć siłę krytyczną:

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 * E * I_y}{L_{cr,y}^2} = \frac{3.142^2 * 210 \text{ GPa} * 131 \text{ cm}^4}{(2.4 \text{ m})^2} = 471.376 \text{ kN}$$

$$\chi_y = \frac{1}{\varphi + \sqrt{\varphi^2 - \lambda_y^2}} = \frac{1}{1.131 + \sqrt{1.131^2 - 1.041^2}} = 0.637 < 1.0$$

gdzie:

$$\varphi = 0.5 * \left(1 + \alpha * (\lambda_y - 0.2) + \lambda_y^2 \right) = 0.5 * \left(1 + 0.21 * (1.041 - 0.2) + 1.041^2 \right) = 1.131$$

Ponieważ: kształtownik rurowy wykończony na gorąco, stal s355 - **krzywa wyboczenia a**

Parametr krzywej wyboczenie: $\alpha = 0.21$

Smukłość względna wyboczenia giętnego:

$$\lambda_y = \sqrt{\frac{A * f_y}{N_{cr,y}}} = \sqrt{\frac{14.40 \text{ cm}^2 * 355 \text{ MPa}}{471.376 \text{ kN}}} = 1.041$$

Nośność na wyboczenie elementu ściskanego:

$$N_{b,y,Rd} = \frac{\chi_y * A * f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0.637 * 14.40 \text{ cm}^2 * 355 \text{ MPa}}{1} = 325.449 \text{ kN}, \text{ gdzie } \gamma_{M1} = 1$$

Wyboczenie z płaszczyzny płatwi:

Wyznaczenie długości wyboczeniowej:

Pas górny jest zabezpieczony przed wyboczeniem z płaszczyzny przez podwieszenia (tężniki) między płatwiowe, więc:

$$L_{cr,z} = 3.6 \text{ m}$$

Korzystając ze wzoru Eulera mogę wyznaczyć siłę krytyczną:

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 * E * I_z}{L_{cr,z}^2} = \frac{3.142^2 * 210 \text{ GPa} * 131 \text{ cm}^4}{(3.6 \text{ m})^2} = 209.501 \text{ kN}$$

$$\chi_z = \frac{1}{\varphi + \sqrt{\varphi^2 - \lambda_z^2}} = \frac{1}{1.863 + \sqrt{1.863^2 - 1.562^2}} = 0.347 < 1.0$$

gdzie:

$$\varphi = 0.5 * \left(1 + \alpha * (\lambda_z - 0.2) + \lambda_z^2 \right) = 0.5 * \left(1 + 0.21 * (1.562 - 0.2) + 1.562^2 \right) = 1.863$$

Ponieważ: kształtownik rurowy wykończony na gorąco, stal s355 - **krzywa wyboczenia a**
 Parametr krzywej wyboczenie: $\alpha = 0.21$

Smukłość względna wyboczenia giętnego:

$$\lambda_z = \sqrt{\frac{A * f_y}{N_{cr,z}}} = \sqrt{\frac{14.40 \text{ cm}^2 * 355 \text{ MPa}}{209.501 \text{ kN}}} = 1.562$$

Nośność na wyboczenie elementu ściskanego:

$$N_{b,z,Rd} = \frac{\chi_z * A * f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0.347 * 14.40 \text{ cm}^2 * 355 \text{ MPa}}{1} = 177.599 \text{ kN}, \text{ gdzie } \gamma_{M1} = 1$$

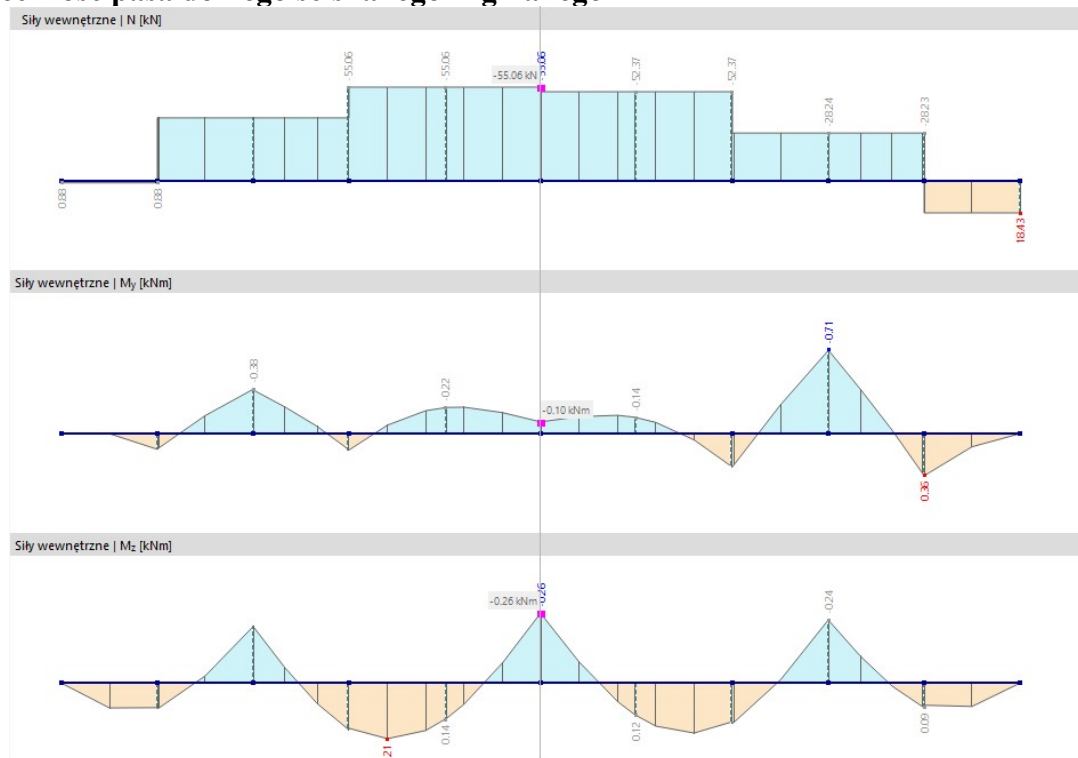
Nośność na zwichrzenie:

Elementy o przekroju zamkniętym rurowym nie są narażone na zwichrzenie wg [5]

Współczynnik zwichrzenia:

$$\chi_{LT} = 1$$

Stateczność pasa dolnego ściskanego i zginanego



Rys. 30 Wykresy interakcji siły ściskającej i momentu zginającego

$$M_{y,Ed} = 0.1 \text{ kNm}; M_{z,Ed} = 0.26 \text{ kNm}; N_{Ed} = 55.06 \text{ kN}$$

Warunki nośności elementu zginanego i ściskanego:

$$1) \quad \frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_y * N_{R,k}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy,1} * \left(\frac{M_{y,Ed}}{\frac{\chi_{LT} * M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) + k_{yz,1} * \left(\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rk} * \gamma_{M1}} \right) = \frac{55.06 \text{ kN}}{\frac{0.637 * 511.2 \text{ kN}}{1}} + 1.135 * \left(\frac{0.1 \text{ kNm}}{\frac{1 * 14.094 \text{ kNm}}{1}} \right) + 0.749 * \left(\frac{0.26 \text{ kNm}}{14.094 \text{ kNm} * 1} \right) = 0.191 \leq 1.0 - \text{warunek}$$

spełniony

$$2) \quad \frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_z * N_{R,k}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy,1} * \left(\frac{M_{y,Ed}}{\frac{\chi_{LT} * M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) + k_{zz,1} * \left(\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rk} * \gamma_{M1}} \right) = \frac{55.06 \text{ kN}}{\frac{0.347 * 511.2 \text{ kN}}{1}} + 0.681 * \left(\frac{0.1 \text{ kNm}}{\frac{1 * 14.094 \text{ kNm}}{1}} \right) + 1.248 * \left(\frac{0.26 \text{ kNm}}{14.094 \text{ kNm} * 1} \right) = 0.338 \leq 1.0 - \text{warunek}$$

spełniony

gdzie k_{yy} - współczynnik interakcji pręta o przekroju klasy 1 przy wyboczeniu względem osi y-y i zginaniu względem osi y-y.

$$k_{yy,1} = \min \left(C_{my} * \left(1 + (\lambda_y - 0.2) * \left(\frac{N_{Ed}}{\chi_y * N_{R,k}} \right) \right), C_{my} * \left(1 + 0.8 * \left(\frac{N_{Ed}}{N_{R,k} * \chi_y} \right) \right) \right) =$$

$$\min \left(1 * \left(1 + (1.041 - 0.2) * \left(\frac{55.06 \text{ kN}}{\frac{0.637 * 511.2 \text{ kN}}{1}} \right) \right), 1 * \left(1 + 0.8 * \left(\frac{55.06 \text{ kN}}{\frac{511.2 \text{ kN} * 0.637}{1}} \right) \right) \right)$$

$$= 1.135$$

$$k_{zz,1} = \min \left(C_{mz} * \left(1 + (\lambda_z - 0.2) * \left(\frac{N_{Ed}}{\chi_z * N_{R,k}} \right) \right), C_{mz} * \left(1 + 0.8 * \left(\frac{N_{Ed}}{\chi_z * N_{R,k}} \right) \right) \right) =$$

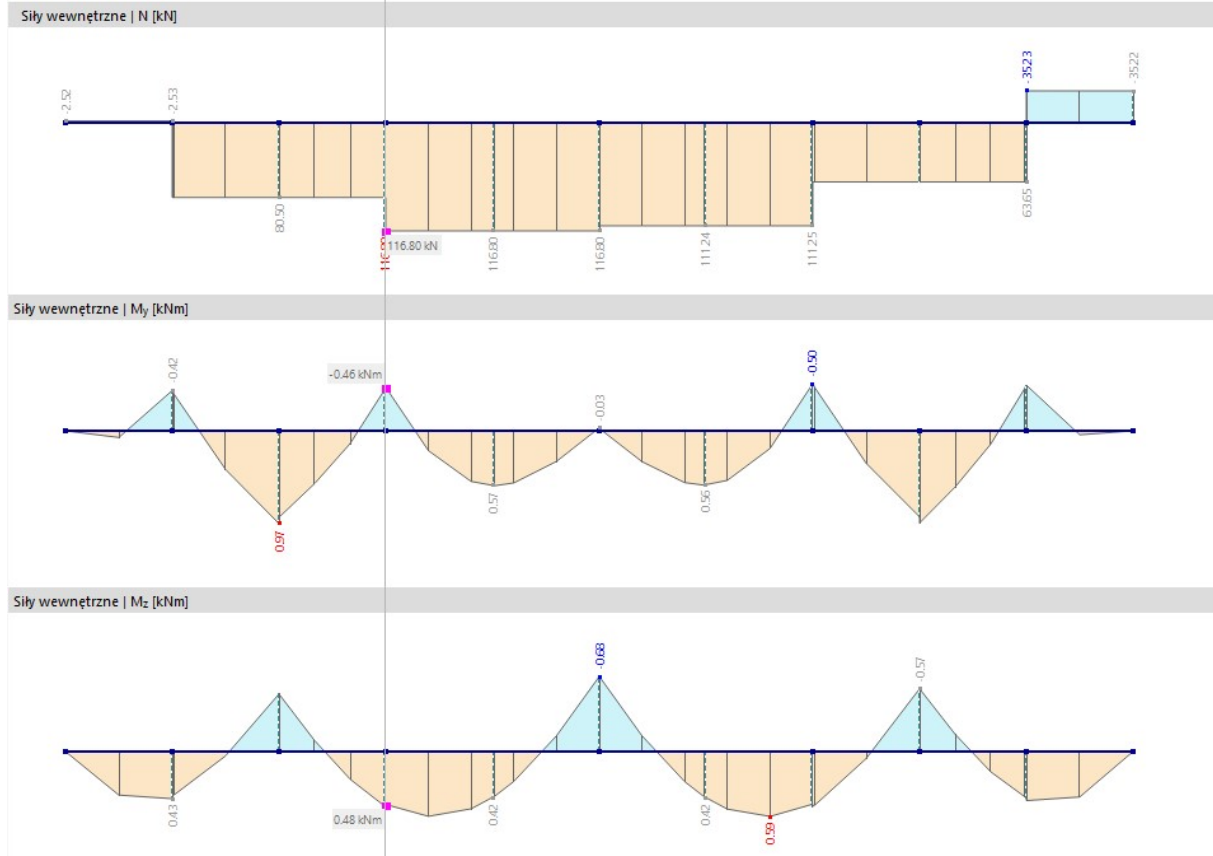
$$\min \left(1 * \left(1 + (1.562 - 0.2) * \left(\frac{55.06 \text{ kN}}{\frac{0.347 * 511.2 \text{ kN}}{1}} \right) \right), 1 * \left(1 + 0.8 * \left(\frac{55.06 \text{ kN}}{\frac{0.347 * 511.2 \text{ kN}}{1}} \right) \right) \right)$$

$$= 1.248$$

$$k_{yz,1} = 0.6 * k_{zz,1} = 0.6 * 1.248 = 0.749$$

$$k_{zy,1} = 0.6 * k_{yy,1} = 0.6 * 1.135 = 0.681$$

Stateczność pasa rozciąganego:



Rys. 31 Wykresy interakcji siły rozciągającej i momentu zginającego

$$M_{y,Ed} = 0.46 \text{ kNm}; M_{z,Ed} = 0.48 \text{ kNm}; N_{Ed} = 116.80 \text{ kN}$$

$$1) \quad \frac{N_{Ed}}{\frac{N_{R,k}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy,2} * \left(\frac{M_{y,Ed}}{\frac{\chi_{LT} * M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) + k_{yz,2} * \left(\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rk} * \gamma_{M1}} \right) = \frac{116.80 \text{ kN}}{511.2 \text{ kN}}$$

$$+ 1.287 * \left(\frac{0.46 \text{ kNm}}{\frac{1 * 14.094 \text{ kNm}}{1}} \right) + 0.916 * \left(\frac{0.48 \text{ kNm}}{14.094 \text{ kNm} * 1} \right) = 0.302 \leq 1.0 - \text{warunek}$$

spełniony

$$2) \quad \frac{N_{Ed}}{\frac{N_{R,k}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy,2} * \left(\frac{M_{y,Ed}}{\frac{\chi_{LT} * M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) + k_{zz,2} * \left(\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rk} * \gamma_{M1}} \right) = \frac{116.80 \text{ kN}}{511.2 \text{ kN}}$$

$$+ 0.772 * \left(\frac{0.46 \text{ kNm}}{\frac{1 * 14.094 \text{ kNm}}{1}} \right) + 1.526 * \left(\frac{0.48 \text{ kNm}}{14.094 \text{ kNm} * 1} \right) = 0.306 \leq 1.0 - \text{warunek}$$

spełniony

$$k_{yy,2} = \min \left(C_{my} * \left(1 + (\lambda_y - 0.2) * \left(\frac{N_{Ed}}{\chi_y * N_{R,k}} \right) \right), C_{my} * \left(1 + 0.8 * \left(\frac{N_{Ed}}{N_{R,k} * \chi_y} \right) \right) \right) =$$

$$\min \left(1 * \left(1 + (1.041 - 0.2) * \left(\frac{116.8 \text{ kN}}{0.637 * 511.2 \text{ kN}} \right) \right), 1 * \left(1 + 0.8 * \left(\frac{116.80 \text{ kN}}{511.2 \text{ kN} * 0.637} \right) \right) \right)$$

$$= 1.287 =$$

$$k_{zz,2} = \min \left(C_{mz} * \left(1 + (\lambda_z - 0.2) * \left(\frac{N_{Ed}}{\chi_z * N_{R,k}} \right) \right), C_{mz} * \left(1 + 0.8 * \left(\frac{N_{Ed}}{\chi_z * N_{R,k}} \right) \right) \right) =$$

$$\min \left(1 * \left(1 + (1.562 - 0.2) * \left(\frac{116.8 \text{ kN}}{0.347 * 511.2 \text{ kN}} \right) \right), 1 * \left(1 + 0.8 * \left(\frac{116.8 \text{ kN}}{0.347 * 511.2 \text{ kN}} \right) \right) \right)$$

$$= 1.526$$

$$k_{yz,2} = 0.6 * k_{zz,2} = 0.6 * 1.526 = 0.916$$

$$k_{zy,2} = 0.6 * k_{yy,2} = 0.6 * 1.287 = 0.772$$

$C_{my} = 0.6 + 0.4 * \psi = 0.6 + 0.4 * 1 = 1 \geq 0.4$ - współczynnik równoważnego stałego momentu

$$C_{mz} = C_{my} = 1$$

gdzie: $\psi = 1$ ponieważ przyjmuję stały moment

4.3.2.4 Stan Graniczny Użytkowości

Ugięcia:

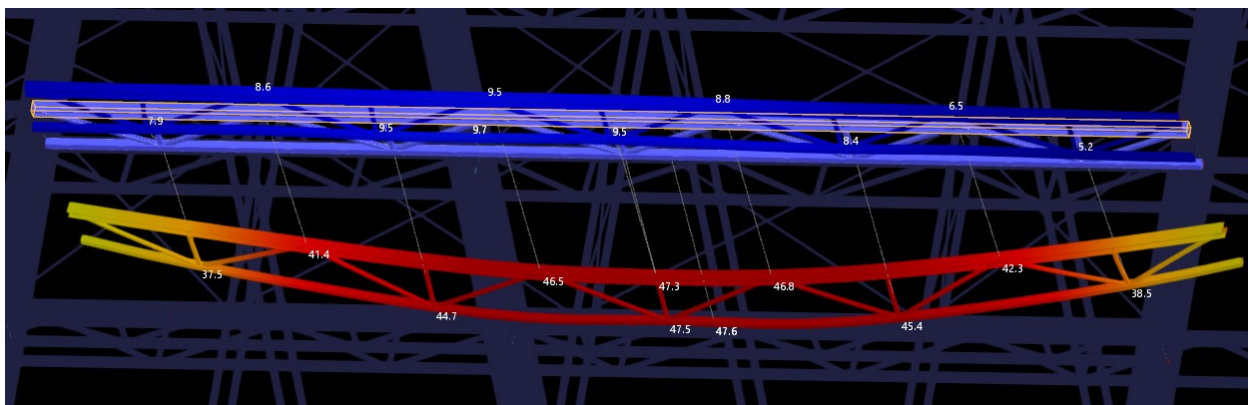
$$w_y = 32.9 \text{ mm}$$

$$w_z = 34.3 \text{ mm}$$

$$w = \sqrt{w_y^2 + w_z^2} = \sqrt{(32.9 \text{ mm})^2 + (34.3 \text{ mm})^2} = 47.528 \text{ mm}$$

$$w_{\max} = \frac{L}{200} = \frac{12 \text{ m}}{200} = 60 \text{ mm} - \text{na podstawie załącznika NA. 22 - AD 7.2.1 (1)B}$$

$$\frac{w}{w_{\max}} = \frac{47.528 \text{ mm}}{60 \text{ mm}} = 0.79 \leq 1.0 - \text{warunek spełniony}$$

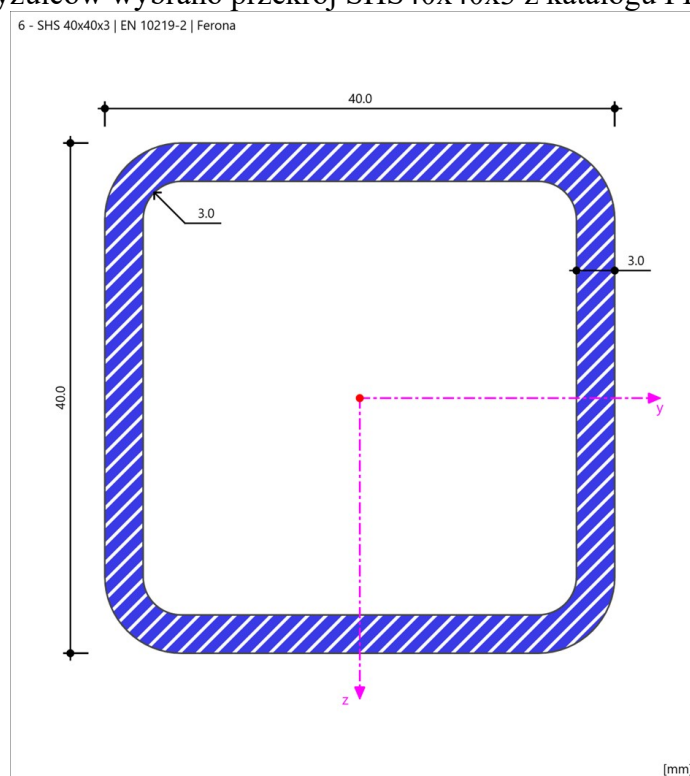


Rys. 32 Zsumowane ugięcia płatwi kratowej

4.3.3 Wymiarowanie krzyżulców

4.3.3.1 Charakterystyki przekroju

Dla wszystkich krzyżulców wybrano przekrój SHS40x40x3 z katalogu FERONA



Rys. 33 Rysunek poprzeczny wybranego przekroju

$h = 40 \text{ mm}$ - wysokość przekroju

$t = 3 \text{ mm}$ - grubość ścianki

$r_o = 6 \text{ mm}$ - zewnętrzny promień naroża

$r_i = 3 \text{ mm}$ - wewnętrzny promień naroża

$d = 28 \text{ mm}$ - wysokość prostej części środka

$A = 4.21 \text{ cm}^2$ - pole przekroju

$I_y = 9.32 \text{ cm}^4$ - moment bezwładności względem osi y-y

$I_z = I_y = 9.32 \text{ cm}^4$

$W_{pl,y} = 5.72 \text{ cm}^3$ - wskaźnik plastyczny względem osi y-y

$A_{v,y} = 2.22 \text{ cm}^2$ - powierzchnia ścinania

Współczynniki częściowe:

$$\gamma_{M0} = 1; \gamma_{M1} = 1$$

Gatunek stali: S355

$f_y = 355 \text{ MPa}$ - granica plastyczności

$E = 210 \text{ GPa}$ - moduł sprężystości

4.3.3.2 Nośność przekroju

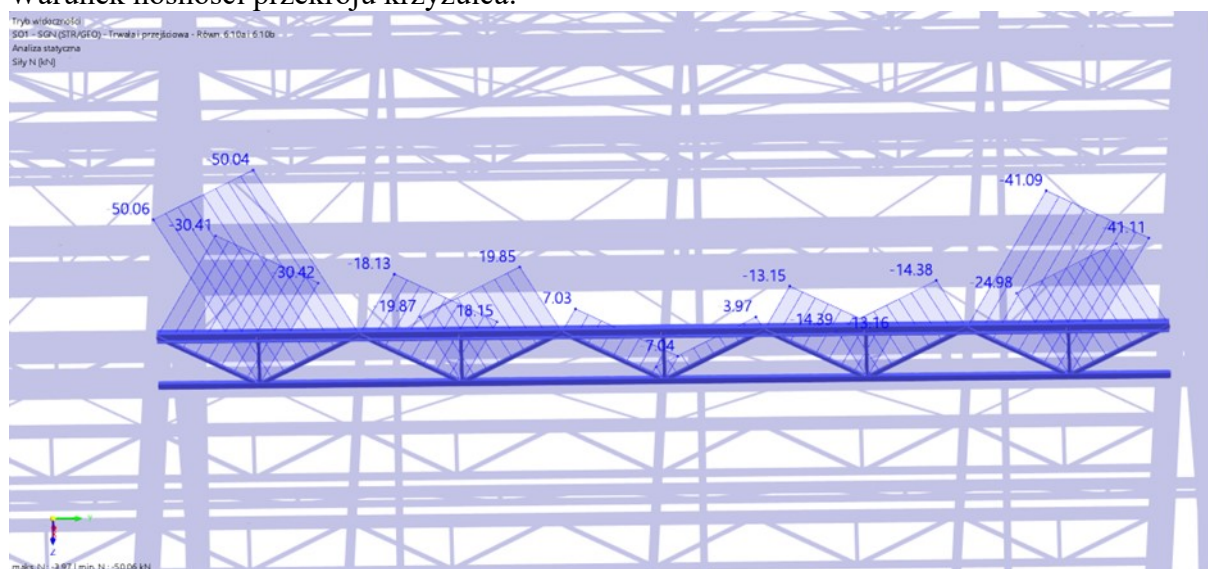
Charakterystyczna nośność przekroju krzyżulca:

$$N_{R,k} = A \cdot f_y = 4.21 \text{ cm}^2 \cdot 355 \text{ MPa} = 149.455 \text{ kN}$$

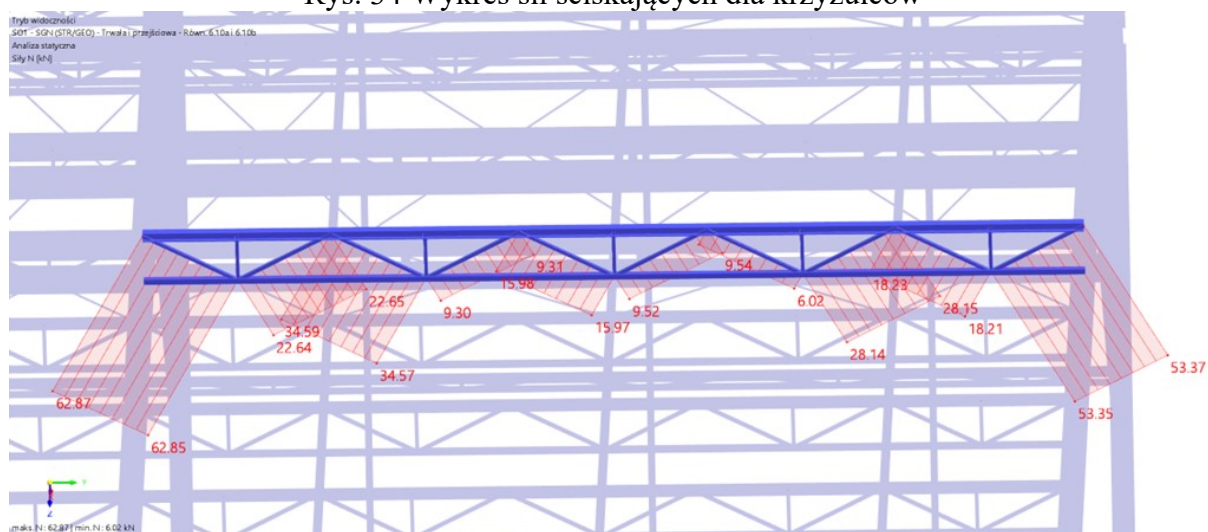
Obliczeniowa nośność przekroju krzyżulca:

$$N_{c,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{4.21 \text{ cm}^2 \cdot 355 \text{ MPa}}{1} = 149.455 \text{ kN}$$

Warunek nośności przekroju krzyżulca:



Rys. 34 Wykres sił ściskających dla krzyżulców



Rys. 35 Wykres sił rozciągających dla krzyżulców

$N_{Ed,1} = 62.87 \text{ kN}$ - rozciąganie; $N_{Ed,2} = 50.06 \text{ kN}$ - ściskanie

$$1) \text{ Rozciąganie: } \frac{N_{Ed,1}}{N_{c,Rd}} = \frac{62.87 \text{ kN}}{149.455 \text{ kN}} = 0.421 \leq 1.0 - \text{warunek spełniony}$$

$$2) \text{ Ściskanie: } \frac{N_{Ed,2}}{N_{c,Rd}} = \frac{50.06 \text{ kN}}{149.455 \text{ kN}} = 0.335 \leq 1.0 - \text{warunek spełniony}$$

Klasa przekroju krzyżulców przy zginaniu:

Stosunek szerokości do grubości:

$$\frac{d}{t} = \frac{28 \text{ mm}}{3 \text{ mm}} = 9.333 \leq 72 * \varepsilon = 72 * 1.2 = 88.494 - \text{klasa 1}$$

Przekrój jest klasy 1 przy zginaniu

Charakterystyczna nośność przekroju krzyżulca przy zginaniu

$$M_{y,Rk} = W_{pl,y} * f_y = 5.72 \text{ cm}^3 * 355 \text{ MPa} = 2.031 \text{ kNm}$$

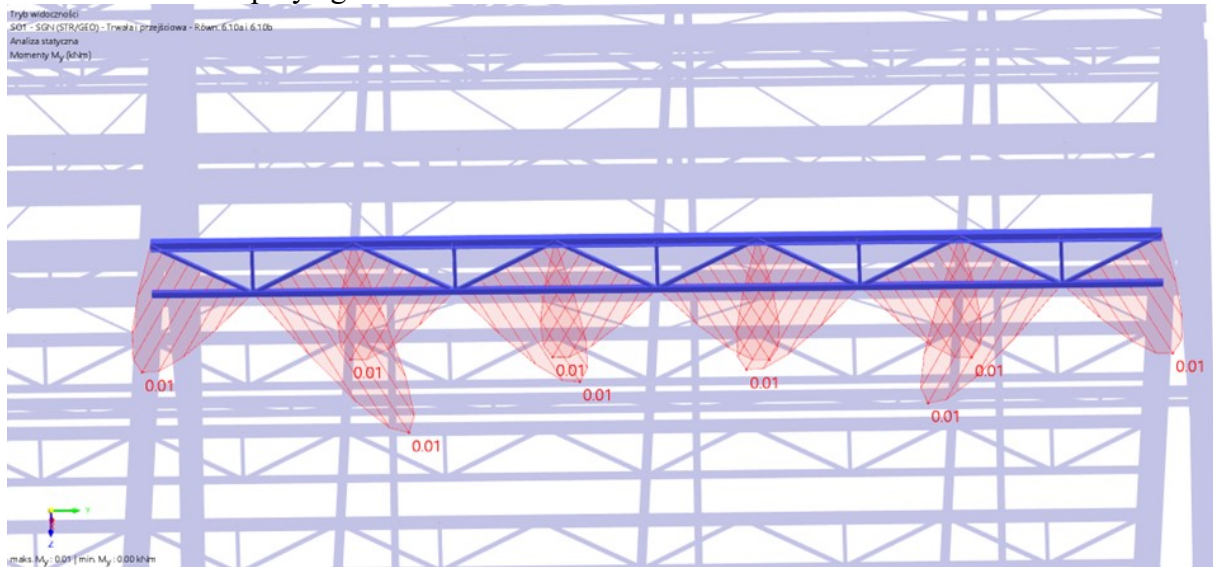
$$M_{z,Rk} = M_{y,Rk} = 2.031 \text{ kNm}$$

Obliczeniowa nośność przekroju krzyżulca przy zginaniu

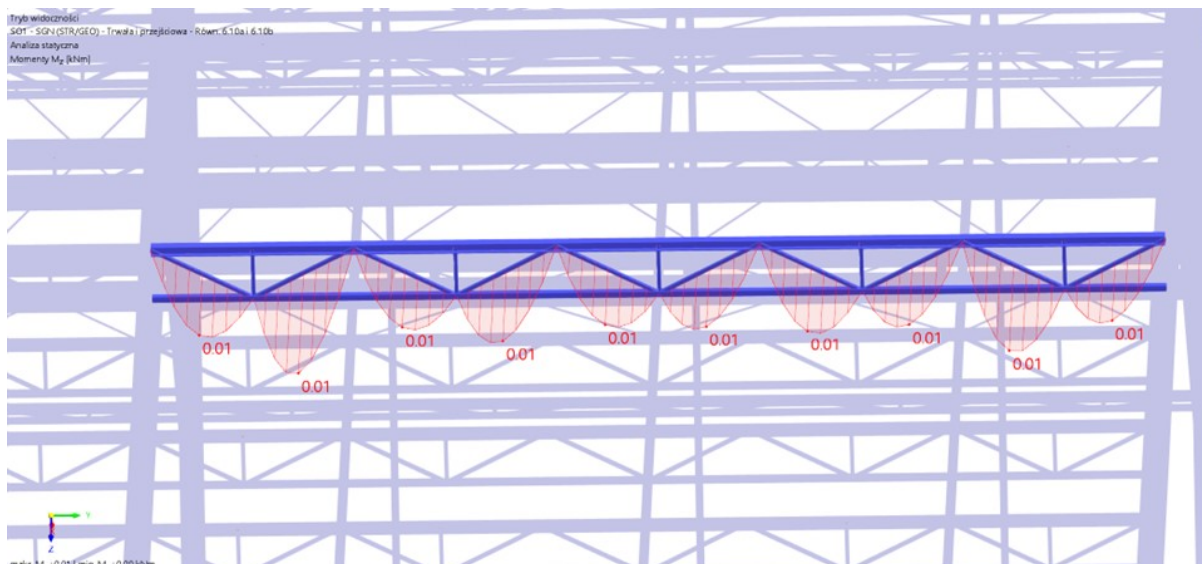
$$M_{pl,y,Rd} = \frac{W_{pl,y} * f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{5.72 \text{ cm}^3 * 355 \text{ MPa}}{1} = 2.031 \text{ kNm}$$

$$M_{pl,z,Rd} = M_{pl,y,Rd} = 2.031 \text{ kNm}$$

Warunek nośności przy zginaniu:



Rys. 36 Wykres momentów zginających M_y dla krzyżulców



Rys. 37 Wykres momentów zginających M_z dla krzyżulców

$$M_{y,Ed} = 0.01 \text{ kNm}; M_{z,Ed} = 0.01 \text{ kNm}$$

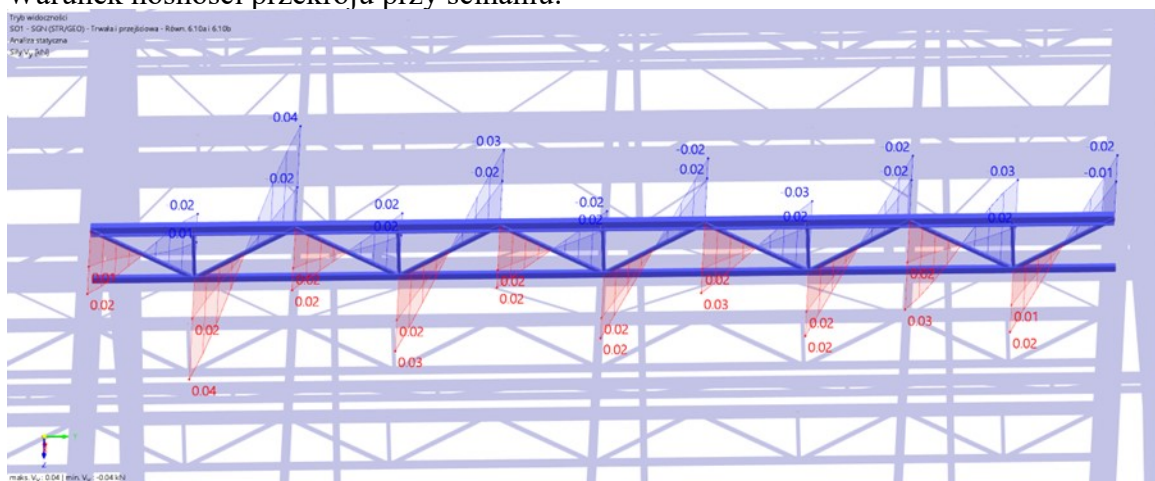
$$1) \frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,y,Rd}} = \frac{0.01 \text{ kNm}}{2.031 \text{ kNm}} = 0.005 \leq 1.0 - \text{warunek spełniony}$$

$$2) \frac{M_{z,Ed}}{M_{pl,z,Rd}} = \frac{0.01 \text{ kNm}}{2.031 \text{ kNm}} = 0.005 \leq 1.0 - \text{warunek spełniony}$$

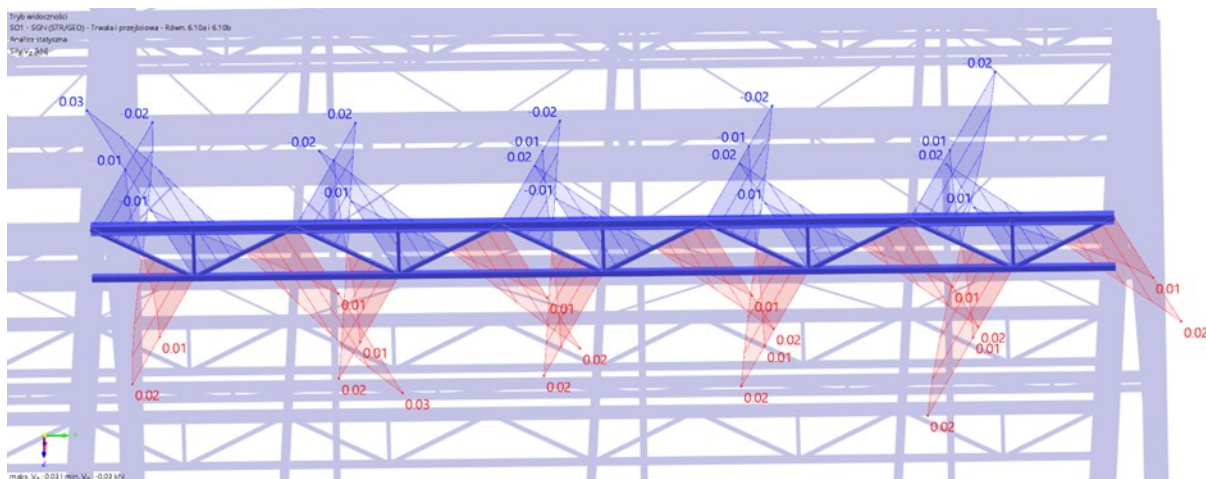
Obliczeniowa nośność przekroju krzyżulca przy ścinaniu

$$V_{c,Rd} = \frac{A_{v,y} * f_y}{\sqrt{3} * \gamma_{M0}} = \frac{2.22 \text{ cm}^2 * 355 \text{ MPa}}{\sqrt{3} * 1} = 45.501 \text{ kN}$$

Warunek nośności przekroju przy ścinaniu:



Rys. 38 Wykres sił ścinających V_y dla krzyżulców



Rys. 39 Wykres sił ścinających V_z dla krzyżulców

$$V_{y,Ed} = 0.04 \text{ kN}; V_{z,Ed} = 0.03 \text{ kN}$$

$$1) \frac{V_{y,Ed}}{V_{c,Rd}} = \frac{0.04 \text{ kN}}{45.501 \text{ kN}} = 0.001 \leq 1.0 - \text{warunek spełniony}$$

$$2) \frac{V_{z,Ed}}{V_{c,Rd}} = \frac{0.03 \text{ kN}}{45.501 \text{ kN}} = 0.001 \leq 1.0 - \text{warunek spełniony}$$

Obliczeniowa nośność przekroju krzyżulca przy zginaniu z siłą podłużną

Stosunek obliczeniowej siły podłużnej do obliczeniowej nośności plastycznej przekroju przy obciążeniu siłą podłużną:

$$n = \frac{N_{Ed,1}}{N_{c,Rd}} = \frac{62.87 \text{ kN}}{149.455 \text{ kN}} = 0.421$$

Nośność przekroju przy zginaniu wskutek ściskania redukuje się do wartości:

$$M_{N,Rd} = M_{pl,z,Rd} * (1 - n) = 2.031 \text{ kNm} * (1 - 0.421) = 1.176 \text{ kNm} \leq M_{pl,y,Rd} = 2.031 \text{ kNm}$$

Warunek nośności przekroju zginanego z siłą podłużną:

$$1) \frac{M_{y,Ed}}{M_{N,Rd}} = \frac{0.01 \text{ kNm}}{1.176 \text{ kNm}} = 0.01 \leq 1.0 - \text{warunek spełniony}$$

$$2) \frac{M_{z,Ed}}{M_{N,Rd}} = \frac{0.01 \text{ kNm}}{1.176 \text{ kNm}} = 0.01 \leq 1.0 - \text{warunek spełniony}$$

Obliczeniowa nośność przekroju krzyżulca przy zginaniu ze ścinaniem

Można pominąć wpływ ścinania na nośność przekroju przy zginaniu ponieważ:

$$V_{y,Ed} = 0.04 \text{ kN} \leq 0.5 * V_{c,Rd} = 0.5 * 45.501 \text{ kN} = 22.750 \text{ kN}$$

Obliczeniowa nośność przekroju krzyżulca przy zginaniu z siłą podłużną i ścinaniem.

Jeśli pominąć wpływ ścinania na nośność przekroju przy zginaniu i ściskaniu to:

$$M_{N,V,Rd} = M_{N,Rd} = 1.176 \text{ kNm}$$

4.3.3.3 Nośność elementu

Nośność ze względu na wyboczenie

Wyznaczenie długości wyboczeniowej:

Krzyżulce nie są zabezpieczone w żaden sposób przed wyboczeniem, więc ich długość wyboczeniowa jest równa całkowitej długości elementu:

$$L_{cr,y} = 1.365 \text{ m}$$

$$L_{cr,z} = L_{cr,y} = 1.365 \text{ m}$$

Korzystając ze wzoru Eulera mogę wyznaczyć siłę krytyczną:

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 * E * I_y}{L_{cr,y}^2} = \frac{3.142^2 * 210 \text{ GPa} * 9.32 \text{ cm}^4}{(1.365 \text{ m})^2} = 103.674 \text{ kN}$$

$$N_{cr,z} = N_{cr,y} = 103.674 \text{ kN}$$

$$\chi_y = \frac{1}{\varphi + \sqrt{\varphi^2 - \lambda_y^2}} = \frac{1}{1.326 + \sqrt{1.326^2 - 1.201^2}} = 0.530 < 1.0$$

$$\chi_z = \chi_y = 0.530$$

gdzie:

$$\varphi = 0.5 * \left(1 + \alpha * (\lambda_y - 0.2) + \lambda_y^2 \right) = 0.5 * \left(1 + 0.21 * (1.201 - 0.2) + 1.201^2 \right) = 1.326$$

Ponieważ: kształtownik rurowy wykończony na gorąco, stal S355 - **krzywa wyboczenia a**

Parametr krzywej wyboczenie: $\alpha = 0.21$

Smukłość względna wyboczenia giętnego:

$$\lambda_y = \sqrt{\frac{A * f_y}{N_{cr,y}}} = \sqrt{\frac{4.21 \text{ cm}^2 * 355 \text{ MPa}}{103.674 \text{ kN}}} = 1.201$$

$$\lambda_z = \lambda_y = 1.201$$

Nośność na wyboczenie elementu ściskanego:

$$N_{b,y,Rd} = \frac{\chi_y * A * f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0.530 * 14.40 \text{ cm}^2 * 355 \text{ MPa}}{1} = 270.721 \text{ kN, gdzie } \gamma_{M1} = 1$$

Nośność na zwichrzenie

Elementy o przekroju zamkniętym rurowym nie są narażone na zwichrzenie wg [5]

Współczynnik zwichrzenia:

$$\chi_{LT} = 1$$

Stateczność krzyżulca ściskanego i zginanego

Warunek nośności elementu zginanego i ściskanego:

$$\frac{\frac{N_{Ed,2}}{\chi_y * N_{R,k}}}{\gamma_{M1}} + k_{yy} * \left(\frac{\frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} * M_{y,Rk}}}{\gamma_{M1}} \right) + k_{yz} * \left(\frac{\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rk} * \gamma_{M1}}}{\gamma_{M1}} \right) = \frac{50.06 \text{ kN}}{0.530 * 149.455 \text{ kN}} = 1$$

$$+ 1.506 * \left(\frac{0.01 \text{ kNm}}{1 * 2.031 \text{ kNm}} \right) + 0.904 * \left(\frac{0.01 \text{ kNm}}{2.031 \text{ kNm} * 1} \right) = 0.644 \leq 1.0 \text{ -warunek spełniony}$$

$$\frac{\frac{N_{Ed,2}}{\chi_z * N_{R,k}}}{\gamma_{M1}} + k_{zy} * \left(\frac{\frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} * M_{y,Rk}}}{\gamma_{M1}} \right) + k_{zz} * \left(\frac{\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rk} * \gamma_{M1}}}{\gamma_{M1}} \right) = \frac{50.06 \text{ kN}}{0.530 * 149.455 \text{ kN}} = 1$$

$$+ 0.904 * \left(\frac{0.01 \text{ kNm}}{1 * 2.031 \text{ kNm}} \right) + 1.506 * \left(\frac{0.01 \text{ kNm}}{2.031 \text{ kNm} * 1} \right) = 0.644 \leq 1.0 \text{ -warunek spełniony}$$

gdzie k_{yy} - współczynnik interakcji pręta o przekroju klasy 1 przy wyboczeniu względem osi y-y i zginaniu względem osi y-y.

$$k_{yy} = \min \left(C_{my} * \left(1 + (\lambda_y - 0.2) * \left(\frac{\frac{N_{Ed,2}}{\chi_y * N_{R,k}}}{\gamma_{M1}} \right) \right), C_{my} * \left(1 + 0.8 * \left(\frac{\frac{N_{Ed,2}}{N_{R,k} * \chi_y}}{\gamma_{M1}} \right) \right) \right) =$$

$$\min \left(1 * \left(1 + (1.201 - 0.2) * \left(\frac{50.06 \text{ kN}}{0.530 * 149.455 \text{ kN}} \right) \right), 1 * \left(1 + 0.8 * \left(\frac{50.06 \text{ kN}}{149.455 \text{ kN} * 0.530} \right) \right) \right)$$

$$= 1.506$$

$$k_{zz} = \min \left(C_{mz} * \left(1 + (\lambda_z - 0.2) * \left(\frac{\frac{N_{Ed,2}}{\chi_z * N_{R,k}}}{\gamma_{M1}} \right) \right), C_{mz} * \left(1 + 0.8 * \left(\frac{\frac{N_{Ed,2}}{\chi_z * N_{R,k}}}{\gamma_{M1}} \right) \right) \right) =$$

$$\min \left(1 * \left(1 + (1.201 - 0.2) * \left(\frac{50.06 \text{ kN}}{0.530 * 149.455 \text{ kN}} \right) \right), 1 * \left(1 + 0.8 * \left(\frac{50.06 \text{ kN}}{0.530 * 149.455 \text{ kN}} \right) \right) \right)$$

$$= 1.506$$

$$k_{yz} = 0.6 * k_{zz} = 0.6 * 1.506 = 0.904$$

$$k_{zy} = 0.6 * k_{yy} = 0.6 * 1.506 = 0.904$$

$C_{my} = 0.6 + 0.4 * \psi = 0.6 + 0.4 * 1 = 1 \geq 0.4$ - współczynnik równoważnego stałego momentu

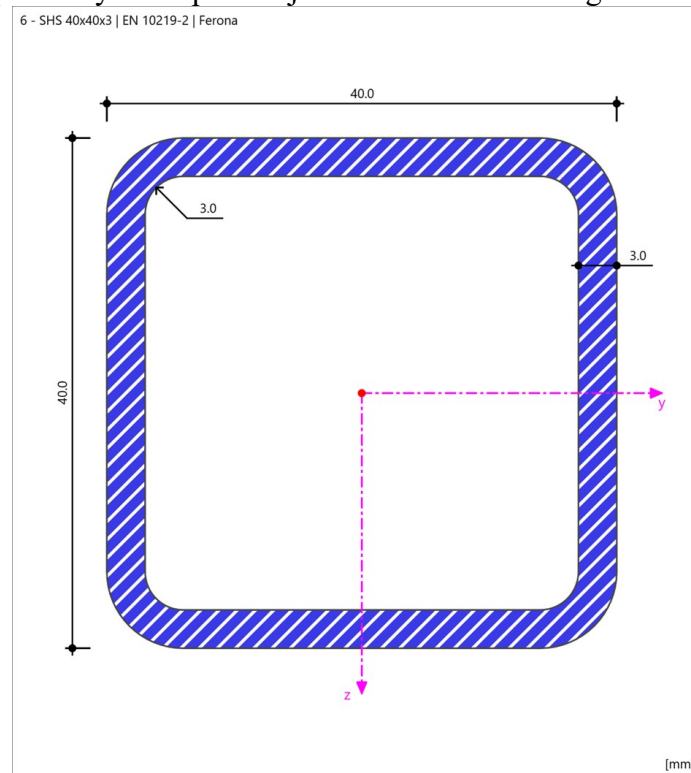
$$C_{mz} = C_{my} = 1$$

gdzie: $\psi = 1$ ponieważ przyjmuję stały moment

4.3.4 Wymiarowanie słupków

4.3.4.1 Charakterystyki przekroju

Dla wszystkich słupków wybrano przekrój SHS40x40x3 z katalogu FERONA [12]



Rys. 40 Rysunek przekroju poprzecznego słupka

$h = 40$ mm - wysokość przekroju

$t = 3$ mm - grubość ścianki

$r_o = 6$ mm - zewnętrzny promień naroża

$r_i = 3$ mm - wewnętrzny promień naroża

$d = 28$ mm - wysokość prostej części środniczki

$A = 4.21$ cm² - pole przekroju

$I_y = 9.32$ cm⁴ - moment bezwładności względem osi y-y

$I_z = I_y = 9.32$ cm⁴

$W_{pl,y} = 5.72$ cm³ - wskaźnik plastyczny względem osi y-y

$A_{v,y} = 2.22$ cm² - powierzchnia ścinania

Współczynniki częściowe:

$$\gamma_{M0} = 1; \gamma_{M1} = 1$$

Gatunek stali: S355

$f_y = 355 \text{ MPa}$ - granica plastyczności

$E = 210 \text{ GPa}$ - moduł sprężystości

4.3.4.2 Nośność przekroju

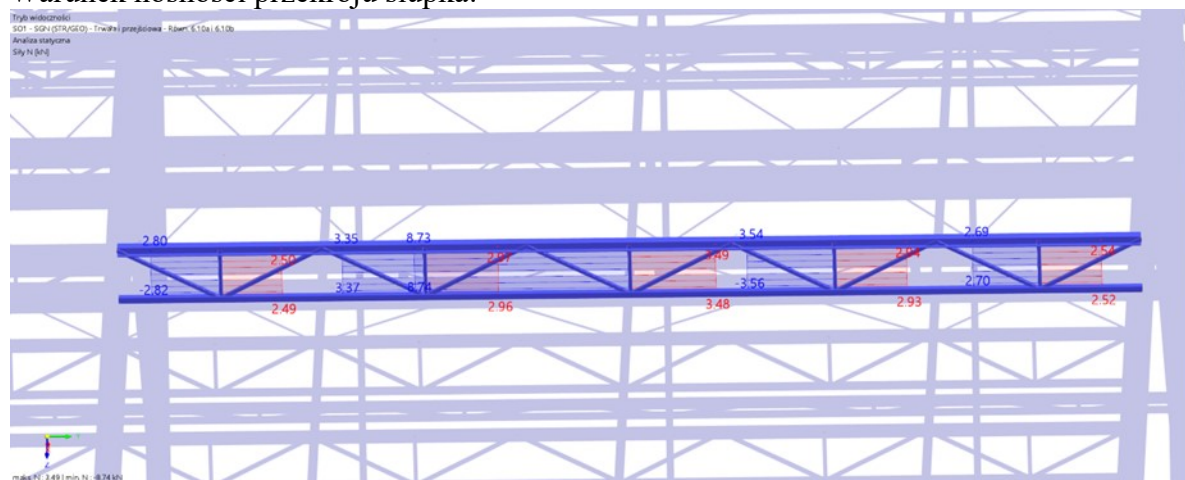
Charakterystyczna nośność przekroju słupka:

$$N_{R,k} = A * f_y = 4.21 \text{ cm}^2 * 355 \text{ MPa} = 149.455 \text{ kN}$$

Obliczeniowa nośność przekroju słupka:

$$N_{c,Rd} = \frac{A * f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{4.21 \text{ cm}^2 * 355 \text{ MPa}}{1} = 149.455 \text{ kN}$$

Warunek nośności przekroju słupka:



Rys. 41 Obwiednia sił osiowych dla słupków

$$N_{Ed,1} = 8.74 \text{ kN} - \text{ściskanie}, N_{Ed,2} = 3.49 \text{ kN} - \text{rozciąganie}$$

1) Rozciąganie: $\frac{N_{Ed,2}}{N_{c,Rd}} = \frac{3.49 \text{ kN}}{149.455 \text{ kN}} = 0.0234 \leq 1.0$ - **warunek spełniony**

2) Ściskanie: $\frac{N_{Ed,1}}{N_{c,Rd}} = \frac{8.74 \text{ kN}}{149.455 \text{ kN}} = 0.0585 \leq 1.0$ - **warunek spełniony**

Klasa przekroju krzyżulców przy zginaniu:

Stosunek szerokości do grubości:

$$\frac{d}{t} = \frac{28 \text{ mm}}{3 \text{ mm}} = 9.333 \leq 72 * \varepsilon = 72 * 1.2 = 88.494 - \text{klasa 1}$$

Przekrój jest klasy 1 przy zginaniu

Charakterystyczna nośność przekroju krzyżulca przy zginaniu

$$M_{y,Rk} = W_{pl,y} * f_y = 5.72 \text{ cm}^3 * 355 \text{ MPa} = 2.031 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Rk} = M_{y,Rk} = 2.031 \text{ kNm}$$

Obliczeniowa nośność przekroju krzyżulca przy zginaniu

$$M_{pl,y,Rd} = \frac{W_{pl,y} * f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{5.72 \text{ cm}^3 * 355 \text{ MPa}}{1} = 2.031 \text{ kNm}$$

$$M_{pl,z,Rd} = M_{pl,y,Rd} = 2.031 \text{ kNm}$$

Warunek nośności przy zginaniu:

Słupki nie ulegają zginaniu ponieważ $M_{Ed} = 0 \text{ kNm}$

Obliczeniowa nośność przekroju krzyżulca przy ścinaniu

$$V_{c,Rd} = \frac{A_{v,y} * f_y}{\sqrt{3} * \gamma_{M0}} = \frac{2.22 \text{ cm}^2 * 355 \text{ MPa}}{\sqrt{3} * 1} = 45.501 \text{ kN}$$

Warunek nośności przekroju przy ścinaniu:

Słupki nie ulegają ścinaniu ponieważ $V_{Ed} = 0 \text{ kN}$

4.3.4.3 Nośność elementu

Nośność ze względu na wyboczenie

Wyznaczenie długości wyboczeniowej:

Słupki nie są zabezpieczone w żaden sposób przed wyboczeniem, więc ich długość wyboczeniowa jest równa całkowitej długości elementu:

$$L_{cr,y} = 0.65 \text{ m}$$

$$L_{cr,z} = L_{cr,y} = 0.65 \text{ m}$$

Korzystając ze wzoru Eulera mogą wyznaczyć siłę krytyczną:

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 * E * I_y}{L_{cr,y}^2} = \frac{3.142^2 * 210 \text{ GPa} * 9.32 \text{ cm}^4}{(0.65 \text{ m})^2} = 457.202 \text{ kN}$$

$$N_{cr,z} = N_{cr,y} = 457.202 \text{ kN}$$

$$\chi_y = \frac{1}{\varphi + \sqrt{\varphi^2 - \lambda_y^2}} = \frac{1}{0.702 + \sqrt{0.702^2 - 0.572^2}} = 0.900 < 1.0$$

$$\chi_z = \chi_y = 0.900$$

gdzie:

$$\varphi = 0.5 * \left(1 + \alpha * (\lambda_y - 0.2) + \lambda_y^2 \right) = 0.5 * \left(1 + 0.21 * (0.572 - 0.2) + 0.572^2 \right) = 0.702$$

Ponieważ: kształtownik rurowy wykończony na gorąco, stal s355 - **krzywa wyboczenia a**

Parametr krzywej wyboczenie: $\alpha = 0.21$

Smukłość względna wyboczenia giętnego:

$$\lambda_y = \sqrt{\frac{A * f_y}{N_{cr,y}}} = \sqrt{\frac{4.21 \text{ cm}^2 * 355 \text{ MPa}}{457.202 \text{ kN}}} = 0.572$$

$$\lambda_z = \lambda_y = 0.572$$

Nośność na wyboczenie elementu ściskanego:

$$N_{b,y,Rd} = \frac{\chi_y * A * f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0.900 * 4.21 \text{ cm}^2 * 355 \text{ MPa}}{1} = 134.568 \text{ kN}, \text{ gdzie } \gamma_{M1} = 1$$

Nośność na zwichrzenie

Elementy o przekroju zamkniętym rurowym nie są narażone na zwichrzenie wg [5]

Współczynnik zwichrzenia:

$$\chi_{LT} = 1$$

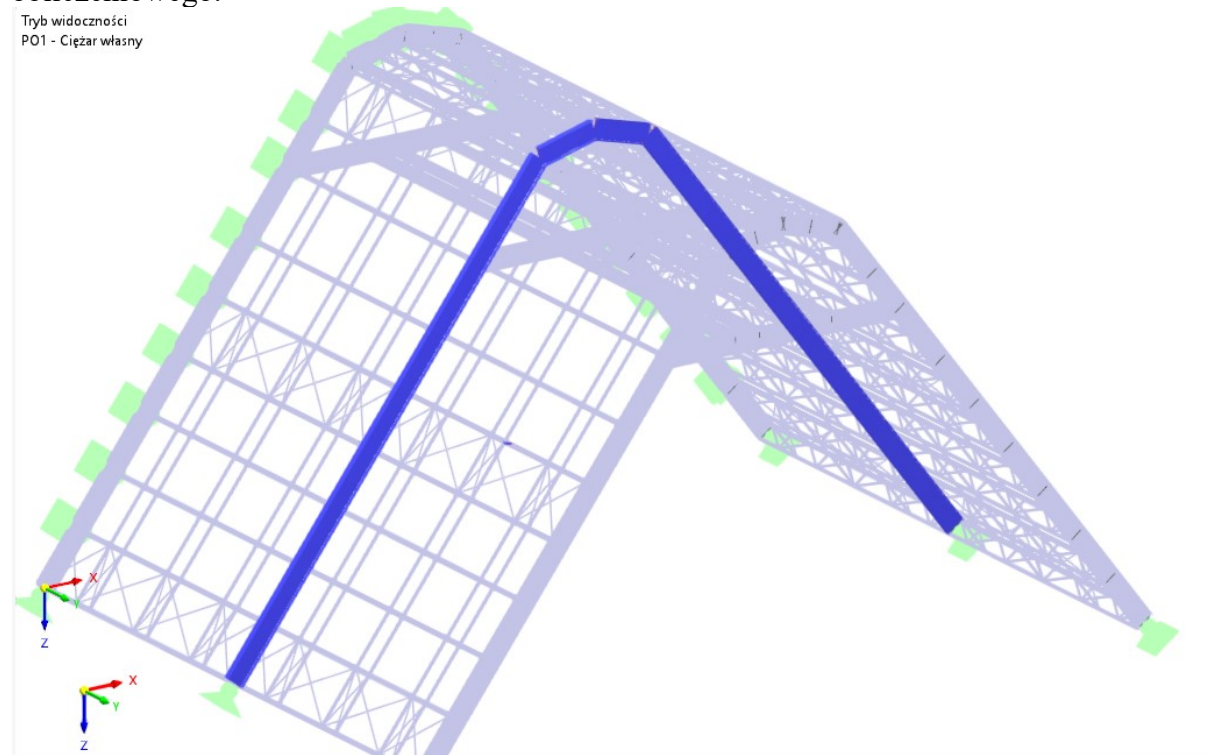
Stateczność krzyżulca ściskanego i zginanego

Warunek nośności elementu zginanego i ściskanego:

$$\frac{N_{Ed,1}}{\chi_y * N_{R,k}} = \frac{8.74 \text{ kN}}{0.900 * 149.455 \text{ kN}} = 0.0649 \leq 1.0 - \text{warunek spełniony}$$

4.4 Pozycja 2 - Rama główna

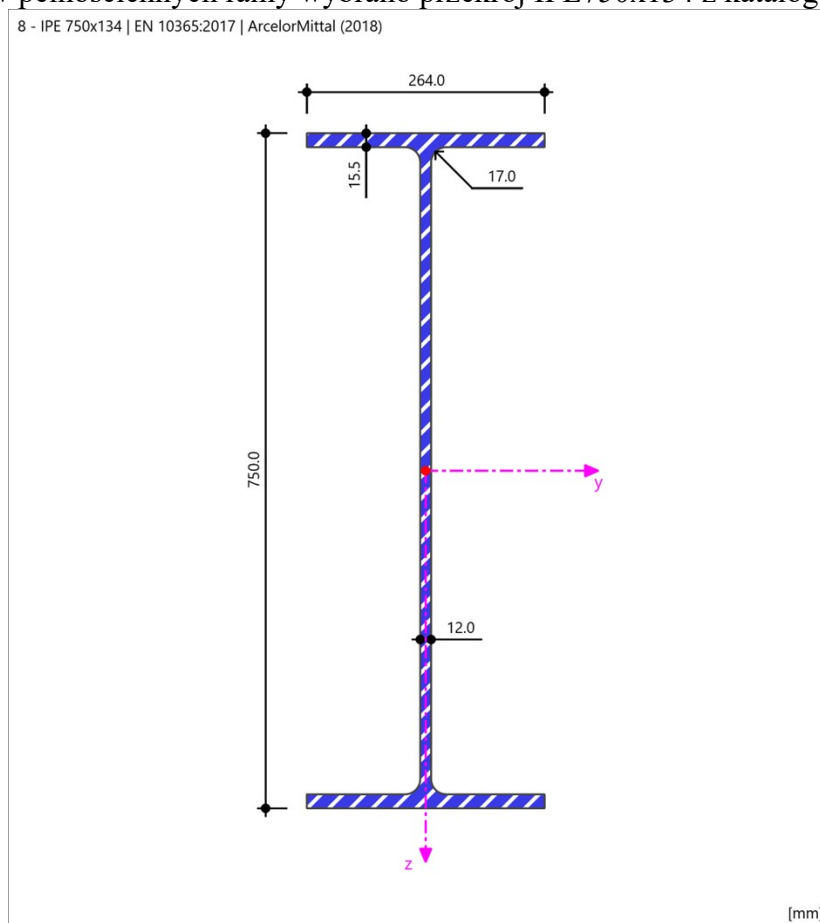
Do obliczeń wybrana została rama środkowa przedstawiona na rysunku z modelu obliczeniowego.



Rys. 42 Obliczana rama główna

4.4.1 Charakterystyki przekroju

Dla dźwigarów pełnościennych ramy wybrano przekrój IPE750x134 z katalogu ArcelorMittal



Rys. 43 Rysunek przekroju poprzecznego rygła ramy

$h = 750$ mm - wysokość przekroju

$b = 264$ mm - szerokość przekroju

$t_w = 12$ mm - grubość środnika

$t_f = 15.5$ mm - grubość półki

$h_i = 719$ mm - wewnętrzna wysokość między pasami

$r_1 = 17$ mm - promień wyokrąglenia naroża

$d = 685$ mm - wysokość prostej części środnika

$A = 170.60$ cm² - pole przekroju

$I_y = 150700$ cm⁴ - moment bezwładności przekroju względem osi y

$I_z = 4788$ cm⁴ - moment bezwładności przekroju względem osi z

$W_{pl,y} = 4644$ cm³ - plastyczny wskaźnik wytrzymałości względem osi y

$i_y = 297$ mm - promień bezwładności w kierunku y

$i_z = 53$ mm - promień bezwładności w kierunku z

Współczynniki częściowe:

$\gamma_{M0} = 1$; $\gamma_{M1} = 1$

Gatunek stali: S355

$f_y = 355$ MPa - granica plastyczności

$E = 210$ GPa - moduł sprężystości

4.4.2. Nośność przekroju

Klasa przekroju rygla przy ściskaniu

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{f_y}{235 \text{ MPa}}} = \sqrt{\frac{355 \text{ MPa}}{235 \text{ MPa}}} = 1.229$$

Stosunek szerokości do grubości:

Środek:

$$\frac{d}{t_w} = \frac{685 \text{ mm}}{12 \text{ mm}} = 57.083 > 42 * \varepsilon = 42 * 1.229 = 51.621$$

Środek przy ściskaniu jest klasy 4

Pasy:

$$\frac{b - t_w - 2 * r_1}{2 * t_f} = \frac{264 \text{ mm} - 12 \text{ mm} - 2 * 17 \text{ mm}}{2 * 15.5 \text{ mm}} = 7.032 < 9 * \varepsilon = 9 * 1.229 = 11.062$$

Pasy przy ściskaniu są klasy 1

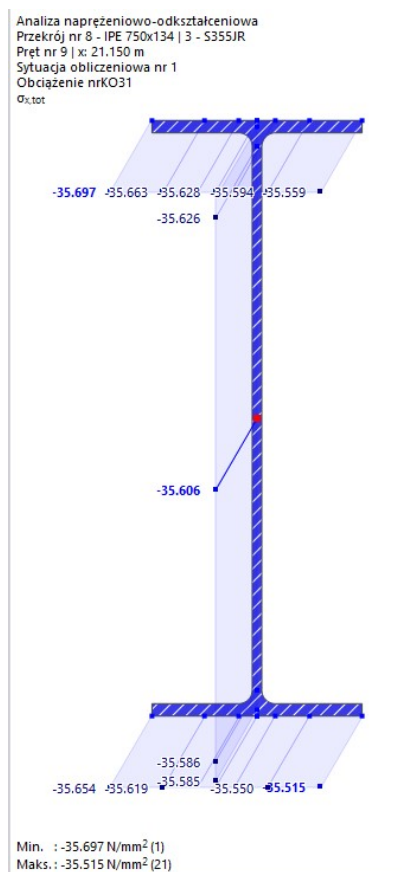
Przekrój przy ściskaniu jest klasy 4, przy czym wrażliwy na utratę stateczności miejscowej jest tylko środek.

Stateczność miejscowa środka

Parametr niestateczności równomiernie ściskanej ścianki przęsłowej przy stosunku naprężeń:

$$\sigma_1 = -35.63 \text{ MPa}, \sigma_2 = -35.63 \text{ MPa} \quad \psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{-35.63 \text{ MPa}}{-35.63 \text{ MPa}} = 1$$

$k_\sigma = 4$ wg. tabeli 4.1 [6]



Rys. 44 Wykres naprężeń w przekroju

Smukłość względna ścianki:

$$\lambda_p = \frac{\left(\frac{h - 2 * t_f - 2 * r_1}{t_w} \right) * 1}{28.4 * \varepsilon * \sqrt{k_\sigma}} = \frac{\left(\frac{750 \text{ mm} - 2 * 15.5 \text{ mm} - 2 * 17 \text{ mm}}{12 \text{ mm}} \right) * 1}{28.4 * 1.229 * \sqrt{4}} = 0.818$$

Współczynnik redukcyjny:

$$\rho = \frac{\lambda_p - 0.055 * (3 + \psi)}{\lambda_p^2} = \frac{0.818 - 0.055 * (3 + 1)}{0.818^2} = 0.894 \leq 1.0$$

Miarodajna szerokość środka:

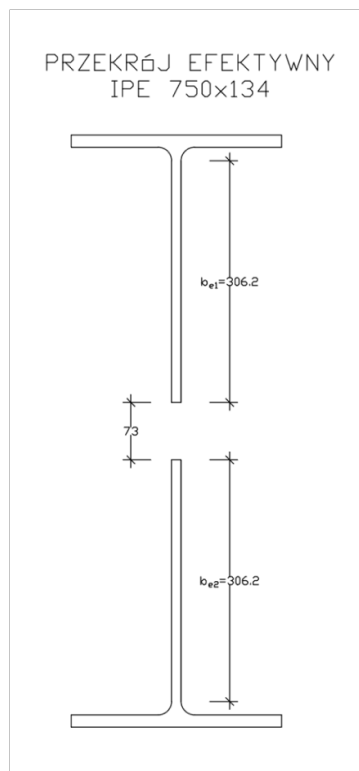
$$b' = h - 2 * t_f - 2 * r_1 = 750 \text{ mm} - 2 * 15.5 \text{ mm} - 2 * 17 \text{ mm} = 685 \text{ mm}$$

Szerokość współpracująca:

$$b_{\text{eff}} = \rho * b' = 0.894 * 685 \text{ mm} = 612.3 \text{ mm}$$

$$b_{e,1} = 0.5 * b_{\text{eff}} = 0.5 * 612.3 \text{ mm} = 306.171 \text{ mm}$$

$$b_{e,2} = 0.5 * b_{\text{eff}} = 0.5 * 612.3 \text{ mm} = 306.171 \text{ mm}$$



Rys. 45 Przekrój efektywny rygla

Pole powierzchni przekroju współpracującego:

$$A_{\text{eff}} = A - t_w * (b' - b_{\text{eff}}) = 170.60 \text{ cm}^2 - 12 \text{ mm} * (685 \text{ mm} - 612.3 \text{ mm}) = 161.881 \text{ cm}^2$$

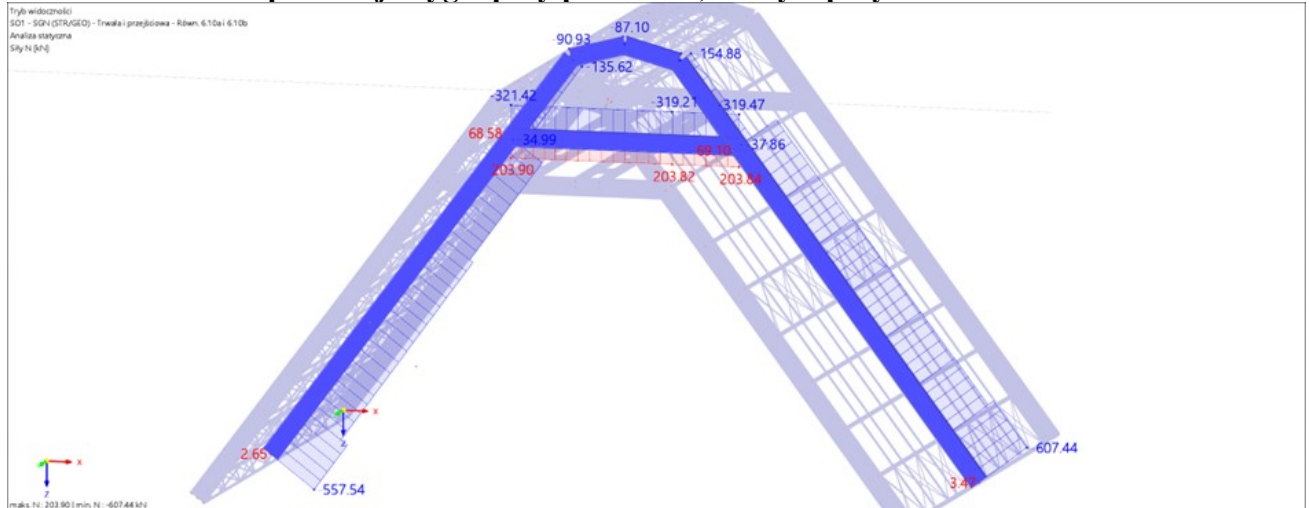
Charakterystyczna nośność przekroju rygla klasy 4 przy ściskaniu:

$$N_{Rk} = A_{\text{eff}} * f_y = 161.881 \text{ cm}^2 * 355 \text{ MPa} = 5746.8 \text{ kN}$$

Obliczeniowa nośność przekroju rygla klasy 4 przy ściskaniu:

$$N_{c,Rd} = \frac{A_{eff} * f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{161.881 \text{ cm}^2 * 355 \text{ MPa}}{1} = 5746.8 \text{ kN}$$

Warunek nośności przekroju rygla przy podstawie, klasy 4 przy ściskaniu



Rys. 46 Obwiednia sił ściskających N rygla ramy głównej
Siła ściskająca w ryglu przy podstawie: $N_{Ed} = 607.44 \text{ kN}$

Warunek nośności przekroju rygla przy podstawie:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} = \frac{607.44 \text{ kN}}{5746.8 \text{ kN}} = 0.106 \leq 1.0 - \text{warunek spełniony}$$

Klasa przekroju rygla przy zginaniu względem osi y-y

Stosunek szerokości do grubości:

środnik:

$$\frac{h - 2 * t_f - 2 * r_1}{t_w} = \frac{750 \text{ mm} - 2 * 15.5 \text{ mm} - 2 * 17 \text{ mm}}{12 \text{ mm}} = 57.083 < 72 * \varepsilon = 72 * 1.229 = 88.494$$

Środnik przy zginaniu jest klasy 1

pasy:

$$\frac{b - t_w - 2 * r_1}{2 * t_f} = \frac{264 \text{ mm} - 12 \text{ mm} - 2 * 17 \text{ mm}}{2 * 15.5 \text{ mm}} = 7.032 < 9 * \varepsilon = 9 * 1.229 = 11.062$$

Pasy przy zginaniu są klasy 1

Przy zginaniu względem osi y-y przekrój jest klasy 1

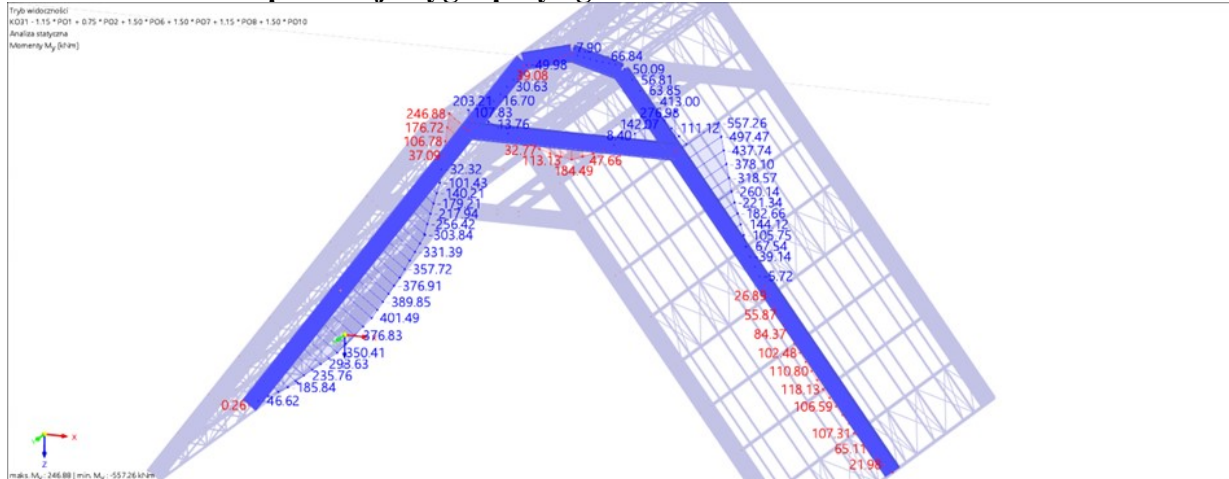
Charakterystyczna nośność przekroju rygla przy zginaniu klasy 1

$$M_{y,Rk} = W_{pl,y} * f_y = 4644 \text{ cm}^3 * 355 \text{ MPa} = 1648.62 \text{ kNm}$$

Obliczeniowa nośność przekroju rygla przy zginaniu

$$M_{c,y,Rd} = \frac{W_{pl,y} * f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{4644 \text{ cm}^3 * 355 \text{ MPa}}{1} = 1648.62 \text{ kNm}$$

Warunek nośności przekroju rygla przy zginaniu



Rys. 47 Wykres momentów zginających M_y dla kombinacji 31 powodującej największy moment zginający na połączeniu z rygłem podestu roboczego.

$$M_{y,Ed} = -557.26 \text{ kNm}$$

Warunek nośności:

$$\frac{|M_{y,Ed}|}{M_{c,y,Rd}} = \frac{|-557.26 \text{ kNm}|}{1648.62 \text{ kNm}} = 0.34 < 1.0 - \text{warunek spełniony}$$

Klasa przekroju słupa przy zginaniu i ściskaniu

Stosunek szerokości do grubości środnika:

$$\frac{d}{t_w} = \frac{685 \text{ mm}}{12 \text{ mm}} = 57.083$$

Siła ściskająca w słupie na połączeniu z rygłem (kombinacja 31):

$$N_{Ed} = 472.71 \text{ kN}$$

Szerokość środnika przenosząca siłę ściskającą w stanie plastycznym:

$$h_N = \frac{N_{Ed}}{t_w * f_y} = \frac{472.71 \text{ kN}}{12 \text{ mm} * 355 \text{ MPa}} = 110.96 \text{ mm}$$

Względny zasięg strefy plastycznej środnika:

$$\alpha = \frac{h_N + h - 2 * t_f - 2 * r_1}{2 * (h - 2 * t_f - 2 * r_1)} = \frac{110.96 \text{ mm} + 750 \text{ mm} - 2 * 15.5 \text{ mm} - 2 * 17 \text{ mm}}{2 * (750 \text{ mm} - 2 * 15.5 \text{ mm} - 2 * 17 \text{ mm})} = 0.581 > 0.5$$

Maksymalny stosunek szerokości do grubości dla klasy 1:

$$\frac{d}{t_w} = \frac{685 \text{ mm}}{12 \text{ mm}} = 57.083 < \frac{396 * \epsilon}{13 * \alpha - 1} = \frac{396 * 1.229}{13 * 0.581 - 1} = 74.274$$

Przy zginaniu i ściskaniu środnik jest klasy 1

Stosunek szerokości do grubości półki:

$$\frac{b - t_w - 2 * r_1}{2 * t_f} = \frac{264 \text{ mm} - 12 \text{ mm} - 2 * 17 \text{ mm}}{2 * 15.5 \text{ mm}} = 7.032 < 9 * \varepsilon = 9 * 1.229 = 11.062$$

Przy zginaniu i ściskaniu pasy są klasy 1

Przy zginaniu i ściskaniu przekrój jest klasy 1

Nośność przekroju słupa przy ścinaniu

Przekrój klasy 1 przy zginaniu i ściskaniu

- Nośność przekroju pasa górnego przy ścinaniu:

Warunek stateczności środka uźebrowanego:

Zgodnie z (PN-EN 1993-1-1 6.2.6 i PN-EN 1993-1-5 5.1 [5] i [6]) $\eta = 1.2$

Środek nie jest narażony na niestateczność przy ścinaniu ponieważ:

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{719 \text{ mm}}{12 \text{ mm}} = 59.917 < \left(\frac{31}{\eta} \right) * \varepsilon * \sqrt{k_\tau} = \left(\frac{31}{1.2} \right) * 1.229 * \sqrt{5.714} = 75.901$$

gdzie:

Parametr niestateczności przy ścinaniu wg załącznika A.3 do [1995]:

$$\text{Ponieważ: } \frac{a}{h_w} = \frac{2.35 \text{ m}}{719 \text{ mm}} = 3.268 \geq 1.0$$

$a = 2.35 \text{ m}$ - rozstaw żebrow równy rozstawowi płatwi

$h_w = 750 \text{ mm} - 31 \text{ mm} = 719 \text{ mm}$

to:

$$k_\tau = 5.34 + 4 * \left(\frac{h_w}{a} \right)^2 = 5.34 + 4 * \left(\frac{719 \text{ mm}}{2.35 \text{ m}} \right)^2 = 5.714$$

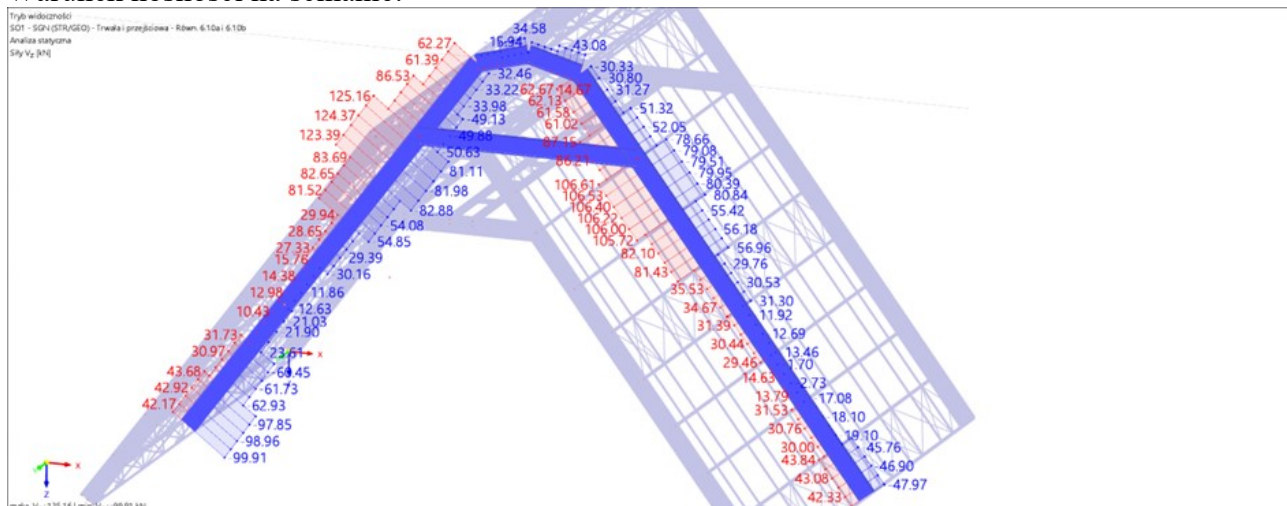
Pole przekroju czynnego przy ścinaniu:

$$A_v = \max \left(\left(A - 2 * b * t_f + (t_w + 2 * r_1) * t_f \right), \eta * d * t_w \right) = \\ \max \left(\left(170.60 \text{ cm}^2 - 2 * 264 \text{ mm} * 15.5 \text{ mm} + (12 \text{ mm} + 2 * 17 \text{ mm}) * 15.5 \text{ mm} \right), 1.2 * 685 \text{ mm} * 12 \text{ mm} \right) \\ = 98.64 \text{ cm}^2$$

Obliczeniowa nośność plastyczna przy ścinaniu:

$$V_{pl,y,Rd} = \frac{A_v * f_y}{\sqrt{3} * \gamma_{M0}} = \frac{98.64 \text{ cm}^2 * 355 \text{ MPa}}{\sqrt{3} * 1} = 2021.72 \text{ kN}$$

Warunek nośności na ścinanie:



Rys. 48 Obwódnicza sił ścinających V_y :

$$V_{y,Ed} = 125.17 \text{ kN}$$

Warunek nośności:

$$\frac{V_{y,Ed}}{V_{pl,y,Rd}} = \frac{125.17 \text{ kN}}{2021.72 \text{ kN}} = 0.06 < 1.0 - \text{warunek spełniony}$$

Nośność przy zginaniu z siłą podłużną:

Sprawdzenie czy można pominąć wpływ siły podłużnej na zginanie:

$$1) N_{Ed} = 472.71 \text{ kN} < 0.25 \cdot N_{c,Rd} = 0.25 \cdot 5746.8 \text{ kN} = 1436.694 \text{ kN}$$

$$2) N_{Ed} = 472.71 \text{ kN} < \frac{0.5 \cdot d \cdot t_w \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{0.5 \cdot 685 \text{ mm} \cdot 12 \text{ mm} \cdot 355 \text{ MPa}}{1} = 1459.05 \text{ kN}$$

Można pominąć wpływ siły podłużnej

Nośność przy zginaniu ze ścinaniem i siłą podłużną

- Nośność na zginanie ze ścinaniem i siłą podłużną

Zgodnie z 6.2.10 (1) wpływ siły podłużnej może być pominięty jeśli:

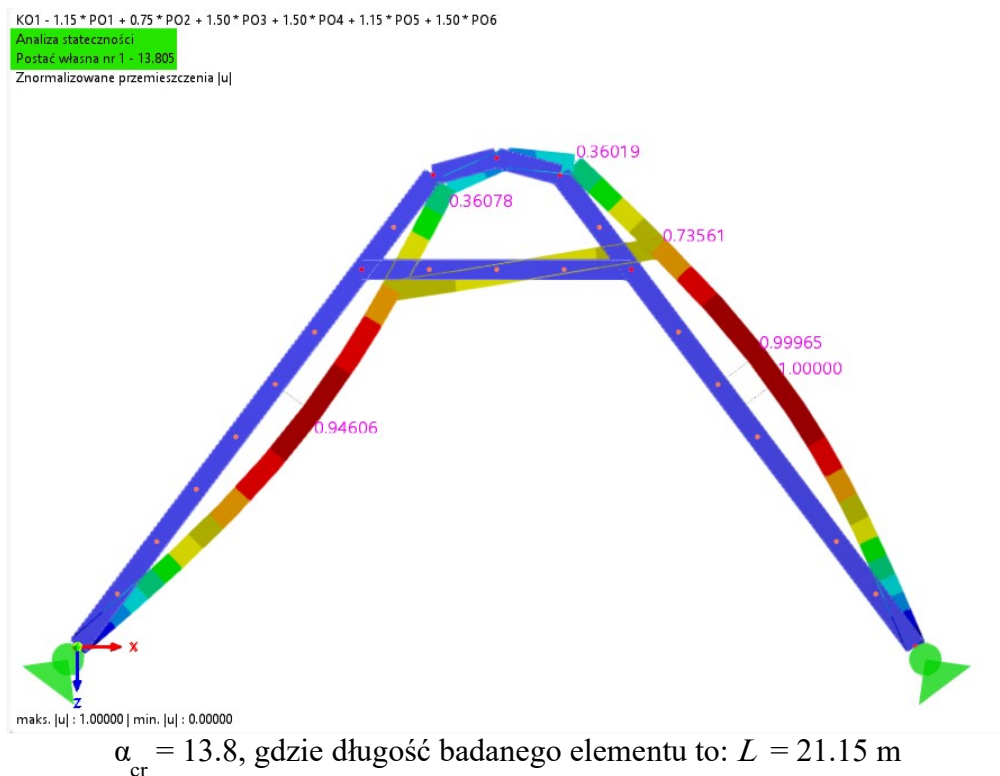
$$V_{y,Ed} = 125.17 \text{ kN} < 0.5 \cdot V_{pl,y,Rd} = 0.5 \cdot 2021.72 \text{ kN} = 1010.859 \text{ kN} - \text{warunek spełniony}$$

Wpływ ścinania może być pominięty

4.4.3 Nośność elementu - analiza globalna

Sprawdzenie wrażliwości na efekty II-go rzędu wg. PN-EN 1993-1-1 [5]

W celu znalezienia mnożnika obciążenia krytycznego, zamodelowano obliczaną ramę oraz jej obciążenia, odpowiadające kombinacjom wywołującym największe ściskanie w słupie. Otrzymano w ten sposób przechyłową postać utraty stateczności, a także odpowiadający jej mnożnik krytyczny.



Sprawdzenie czy można zastosować analizę I rzędu:

$\alpha_{cr} = 13.8 \geq 10$ - można zastosować analizę sprężystą I rzędu (wg 5.2.1 z [5])

Analiza wyboczeniowa dla kombinacji wywołującej największe ściskanie w słupie:

- Wyboczeni w płaszczyźnie ramy

Wyznaczenie siły krytycznej:

$$N_{cr} = N_{Ed} * \alpha_{cr} = 607.44 \text{ kN} * 13.8 = 8382.672 \text{ kN}$$

Korzystając ze wzoru Eulera na siłę krytyczną mogę wyznaczyć współczynnik wyboczeniowy ramy:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 * E * I}{L_{cr}^2} \quad (1)$$

$$L_{cr} = \sqrt{\frac{\pi^2 * E * I}{P_{cr}}}, \text{ gdzie } P_{cr} = N_{cr} \quad (2)$$

$$\frac{L_{cr}}{L} = \mu \quad (3)$$

Korzystając z wyprowadzenia wzoru nr (1):

$$L_{cr,y} = \sqrt{\frac{\pi^2 * E * I_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{3.142^2 * 210 \text{ GPa} * 150700 \text{ cm}^4}{8382.672 \text{ kN}}} = 19.30 \text{ m}$$

$$\mu = \frac{L_{cr,y}}{L} = \frac{19.30 \text{ m}}{21.15 \text{ m}} = 0.913$$

Obliczenie współczynnika wyboczenia wg. 6.3.1.2 z [5]

$$\chi_y = \frac{1}{\phi_y + \sqrt{\phi_y^2 - \lambda_y^2}} = \frac{1}{0.930 + \sqrt{0.930^2 - 0.851^2}} = 0.766 < 1.0$$

gdzie:

$$\phi_y = 0.5 * \left(1 + \alpha * (\lambda_y - 0.2) + \lambda_y^2 \right) = 0.5 * \left(1 + 0.21 * (0.851 - 0.2) + 0.851^2 \right) = 0.930$$

Smukłość względna:

$$\lambda_y = \left(\frac{L_{cr,y}}{i_y} \right) * \left(\frac{1}{\lambda_1} \right) = \left(\frac{19.30 \text{ m}}{297 \text{ mm}} \right) * \left(\frac{1}{76.409} \right) = 0.851$$

$$\lambda_1 = \pi * \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 3.142 * \sqrt{\frac{210 \text{ GPa}}{355 \text{ MPa}}} = 76.409$$

Ponieważ: $\frac{h}{b} = \frac{750 \text{ mm}}{264 \text{ mm}} = 2.841 > 1.2 \rightarrow$ **krzywa wyboczenia a a więc:**

Parametr imperfekcji krzywej wyboczenia: $\alpha = 0.21$

Wyboczenie z płaszczyzny ramy:

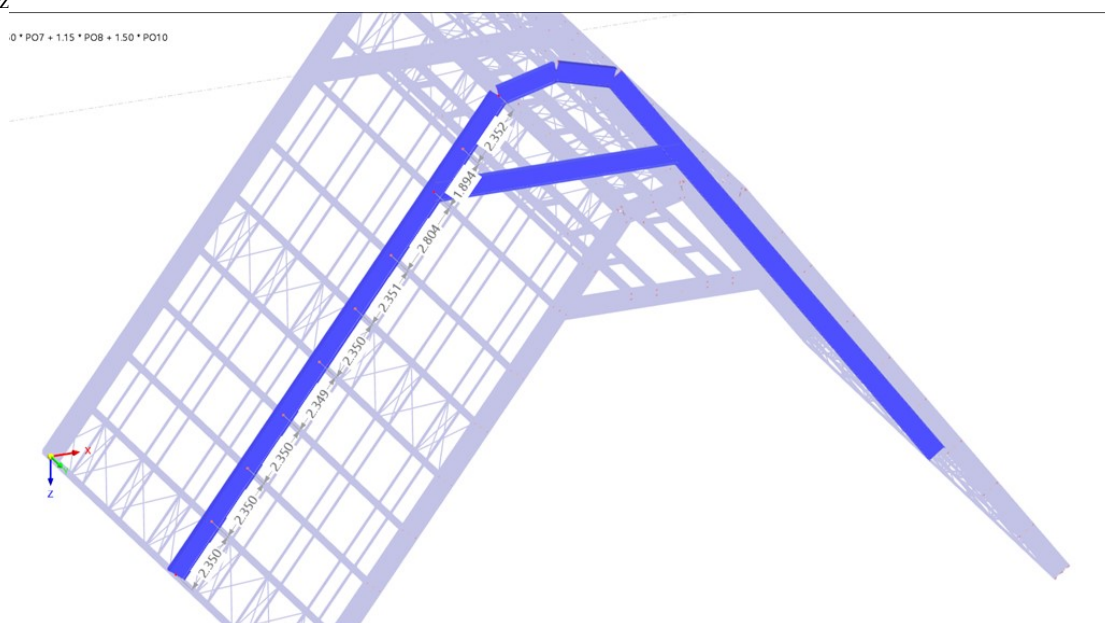
Zgodnie z [8]:

"Kluczowe dla zapewnienia stateczności i podparcia rygla ma współdziałanie płatwi dachowych z ryglem. Płatwie przymocowane do pasa górnego zapewniają boczne i skrętne podparcie gdy płatew jest połączona pasem ściskającym rygla za pomocą zastrzałów tworząc stężenie przeciwskrętne"

Ponieważ płatwie kratowe podpierają zarówno pas górny jak i dolny rygla można uznać, że zabezpieczają one rygiel przed wyboczeniem z płaszczyzny, dlatego też przyjęto długość wyboczeniową rygla z płaszczyzny równą rozstawowi płatwi:

W związku z tym:

$$L_{cr,z} = 2.35 \text{ m}$$



Rys. 49 Długości wyboczeniowe rygla ramy głównej

Korzystając ze wzoru Eulera (1):

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 * E * I_z}{L_{cr,z}^2} = \frac{3.142^2 * 210 \text{ GPa} * 4788 \text{ cm}^4}{(2.35 \text{ m})^2} = 17969.6 \text{ kN}$$

Smukłość względna wybowoczenia giętnego dla przekrój klasy 1-3 wg wzoru 6.50 z [5]:

$$\lambda_z = \left(\frac{L_{cr,z}}{i_z} \right) * \left(\frac{1}{\lambda_1} \right) = \left(\frac{2.35 \text{ m}}{53 \text{ mm}} \right) * \left(\frac{1}{76.409} \right) = 0.580$$

Ponieważ: $\frac{h}{b} = \frac{750 \text{ mm}}{264 \text{ mm}} = 2.841 > 1.2$ **krzywa wybowoczenia b** a więc:

Parametr imperfekcji krzywej wybowoczenia: $\alpha = 0.34$

$$\phi_z = 0.5 * \left(1 + \alpha * (\lambda_z - 0.2) + \lambda_z^2 \right) = 0.5 * \left(1 + 0.34 * (0.580 - 0.2) + 0.580^2 \right) = 0.733$$

Współczynnik wybowoczenia:

$$\chi_z = \frac{1}{\phi_z + \sqrt{\phi_z^2 - \lambda_z^2}} = \frac{1}{0.733 + \sqrt{0.733^2 - 0.580^2}} = 0.847 < 1.0$$

Sprawdzenie elementu ze względu na zwichrzenie:

Elementem zginanym jest dwuteownik walcowany w związku z tym w celu wyznaczenia wartości współczynnika zwichrzenia χ_{LT} wykorzystuję punkt 6.3.2 normy [5] dotyczący elementów zginanych o stałym przekroju.

Zgodnie z punktem 6.3.2.3 wartość współczynnika zwichrzenia χ_{LT} można wyznaczyć według wzoru:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \beta * \lambda_{LT}^2}} = \frac{1}{0.606 + \sqrt{0.606^2 - 0.75 * 0.479^2}} = 0.956$$

lecz:

$$1) \chi_{LT} \leq 1.0 = 0.956 \leq 1 = \text{True}$$

$$2) \chi_{LT} \leq \frac{1}{\lambda_{LT}^2} = 0.956 \leq \frac{1}{0.479^2} = \text{True}$$

gdzie:

$$\begin{aligned} \phi_{LT} &= 0.5 * \left(1 + \alpha_{LT} * (\lambda_{LT} - \lambda_{LT,0}) + \beta * \lambda_{LT}^2 \right) = \\ &= 0.5 * \left(1 + 0.49 * (0.479 - 0.4) + 0.75 * 0.479^2 \right) = 0.606 \end{aligned}$$

$\lambda_{LT,0} = 0.4$ - wartość maksymalna, zalecana wg. [5]

$\beta = 0.75$ - wartość minimalna zalecana wg. [5]

Przyporządkowanie krzywej wybowoczenia: $\frac{h}{b} = \frac{750 \text{ mm}}{264 \text{ mm}} = 2.841 > 2 \rightarrow$ **krzywa c**

Dla krzywej wybowoczenia c wartość parametru imperfekcji wynosi: $\alpha_{LT} = 0.49$

Smukłość względna zwichrzenia:

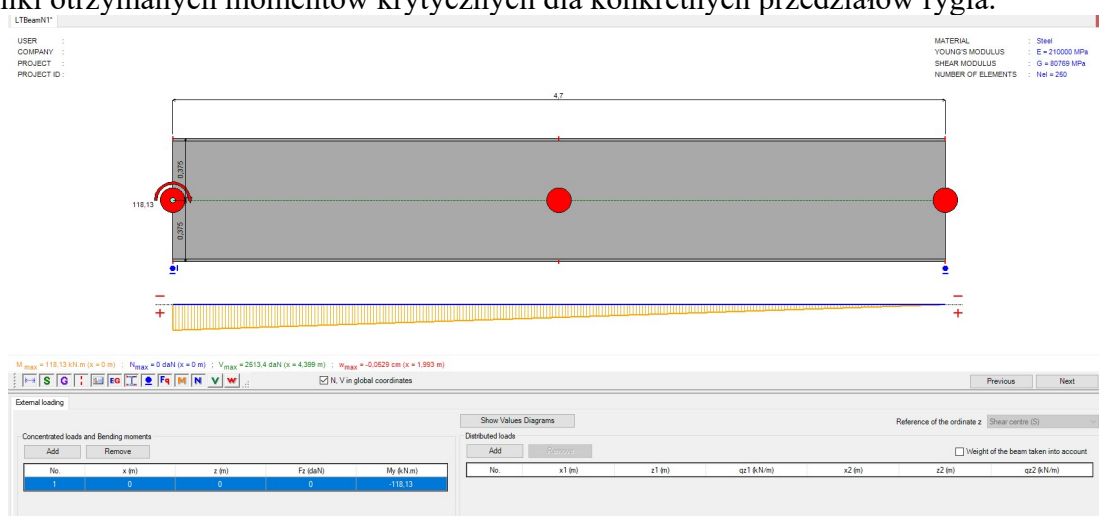
$$\lambda_{LT} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} * f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{4644 \text{ cm}^3 * 355 \text{ MPa}}{7179.6 \text{ kNm}}} = 0.479$$

M_{cr} - moment krytyczny przy zwichrzeniu sprężystym

Wyznaczenie wartości momentu krytycznego:

W celu wyznaczenia wartości momentu krytycznego wykorzystano oprogramowanie LTBeamN, w którym to zamodelowany został przekrój rygła z największą siłą ściskającą jako 3 odcinki pomiędzy usztywnieniami bocznymi.

Na rysunku nr 50 pokazano przykładowy model badanego elementu. W tabeli nr 9 zestawiono wyniki otrzymanych momentów krytycznych dla konkretnych przedziałów rygła.



Rys. 50 Obciążenie segmentu rygła wartościami momentów zginających odpowiadającymi tym na jego końcach

Mode	μ_{cr}	$M_{max,cr}$ [kN.m]	$x(M_{max})$ [m]
1	93,64	11062	0

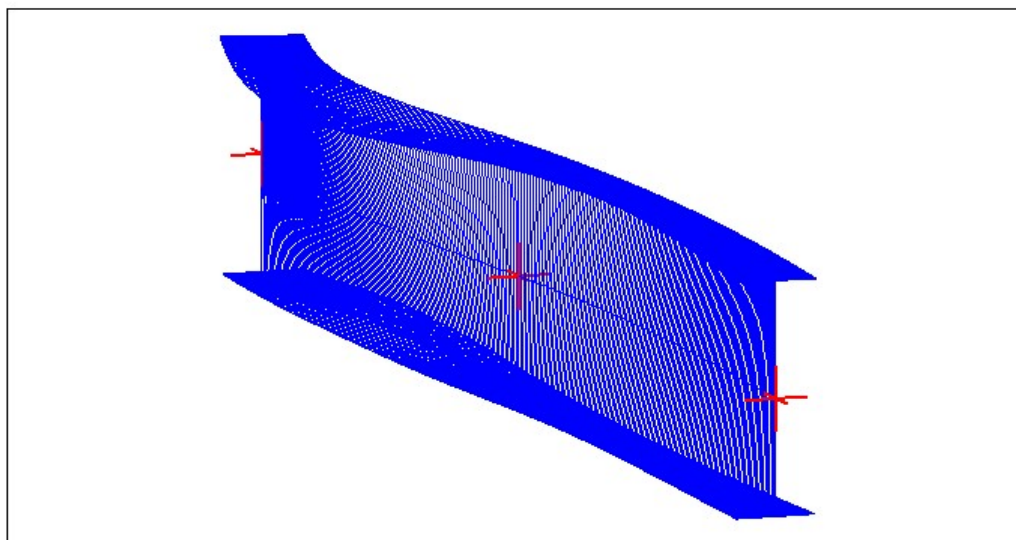


Figure 9 : Mode shape in 3D (Mode 1).

Rys. 51 Wartość Momentu krytycznego dla pierwszego segmentu ramy

Nr elementu	Długość "L"	M_{cr}	Miejsce zwichrzenia "x"
	[m]	[kNm]	[m]
1	4.7	11062	1.053
2	7.05	11471	6.007
3	5.15	8113	1.236
4	4.25	12148	1.224

Tabela nr 9 Wartości momentów krytycznych dla dźwigara nr 1

Mode	μ_{cr}	$M_{max,cr}$ [kN.m]	$x(M_{max})$ [m]	$N_{max,cr}$ [kN]	$x(N_{max})$ [m]
1	14,56	-8113	0	0	0

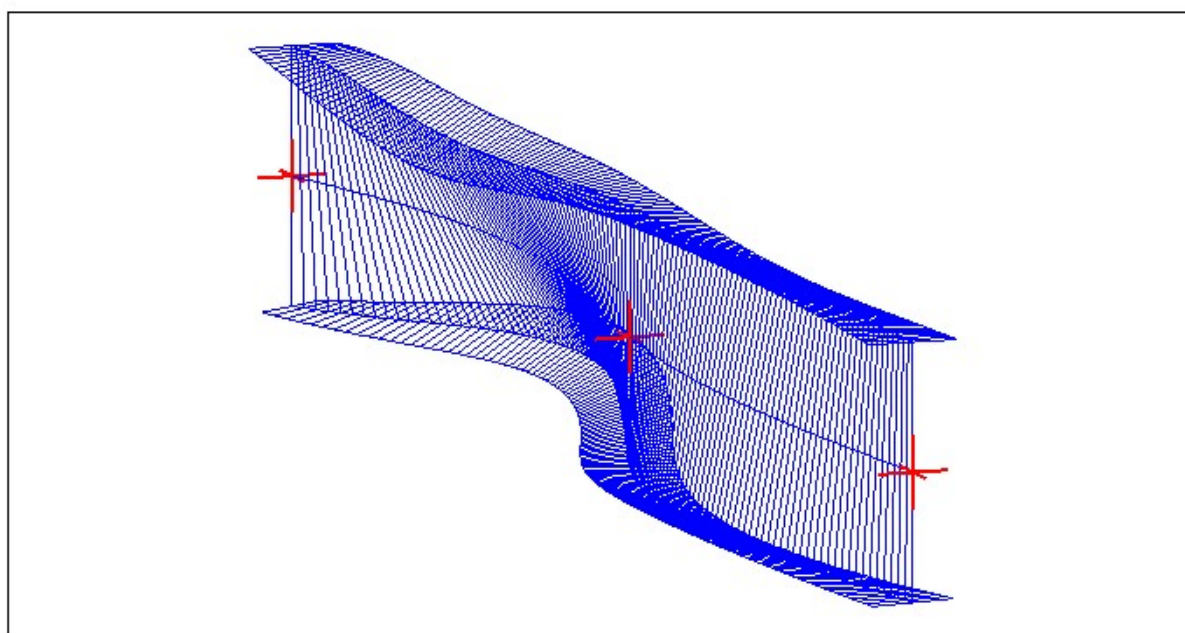
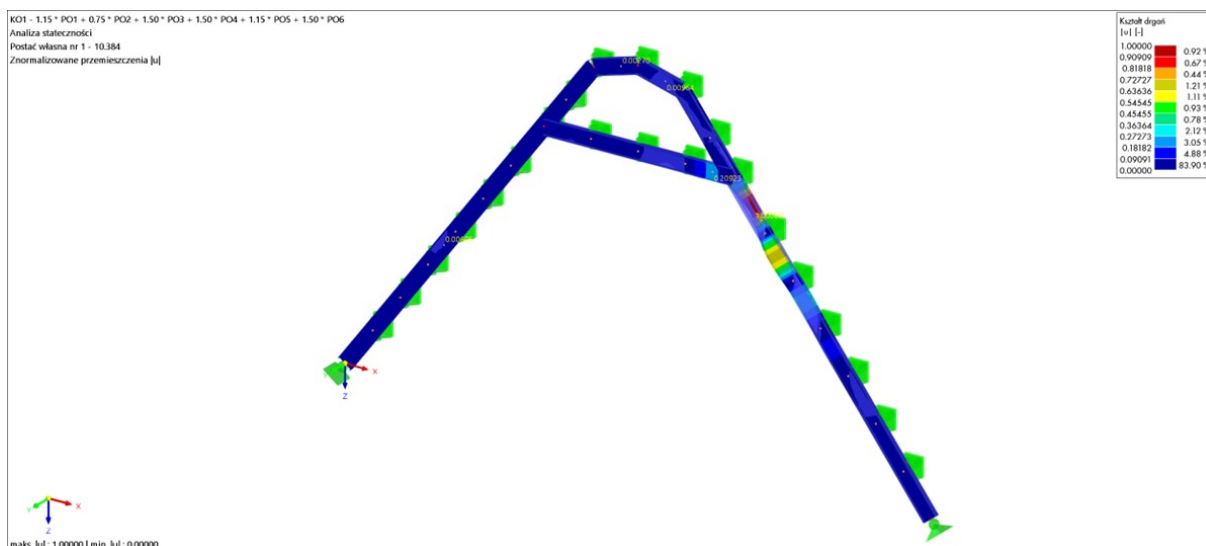


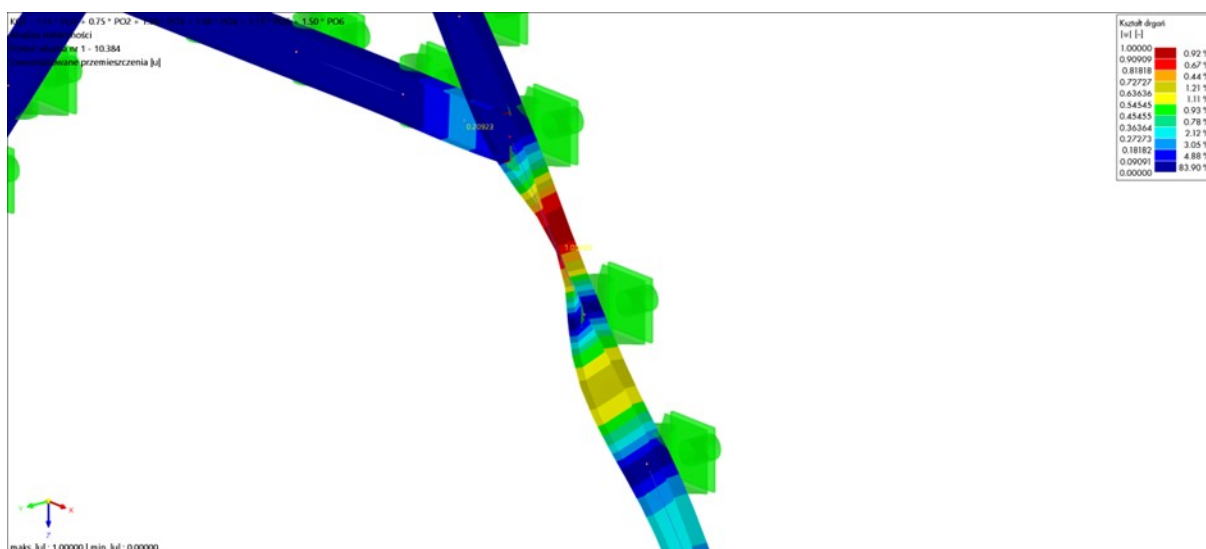
Figure 12 : Mode shape in 3D (Mode 1).

Rys. 52 Postać zwichrzenia, dla której występuje najmniejszy moment krytyczny

Dla weryfikacji zamodelowano środkową ramę jako element wydzielony w programie RFEM i obciążono kombinacją wywołującą największe ściskanie w ryglu.



Rys. 53 Postać zwichrzenia dla obliczanej ramy otrzymana w programie RFEM 6



Rys. 54 Miejsce utraty stateczności w badanej ramie

Wartość mnożnika otrzymana w programie RFEM $\alpha_{cr} = 10.384$, miejsce zwichrzenia odpowiada przekrojowi, w którym występuje moment zginający o wartości:

$$M_{Ed} = 691.41 \text{ kNm},$$

dlatego też:

$$M_{cr} = M_{Ed} * \alpha_{cr} = 691.41 \text{ kNm} * 10.384 = 7179.601 \text{ kNm}$$

Spośród otrzymanych wyników należy wybrać wartość najmniejszą momentu krytycznego, która będzie najbezpieczniejsza.

$$M_{cr} = \min(7179.6 \text{ kNm}, 11062 \text{ kNm}, 11471 \text{ kNm}, 8113 \text{ kNm}, 12148 \text{ kNm}) = 7179.6 \text{ kNm}$$

Sprawdzenie warunków nośności elementów ściskanych i zginanych wg wzorów 6.61 i 6.62 zgodnie z [5]

$$1) \frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_y * N_{Rk}} + k_{yy} * \left(\frac{\frac{|M_{y,Ed}|}{\gamma_{M1}}}{\left(\frac{\chi_{LT} * M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}} \right)} \right)}{\gamma_{M1}} = \frac{607.44 \text{ kN}}{0.766 * 5746.8 \text{ kN}} = 1$$

$$+ 1.09 * \left(\frac{\frac{|-557.26 \text{ kNm}|}{\gamma_{M1}}}{\left(\frac{0.956 * 1648.62 \text{ kNm}}{1} \right)} \right) = 0.524 \leq 1.0 - \text{warunek spełniony}$$

$$2) \frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_z * N_{Rk}} + k_{zy} * \left(\frac{\frac{|M_{y,Ed}|}{\gamma_{M1}}}{\left(\frac{\chi_{LT} * M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}} \right)} \right)}{\gamma_{M1}} = \frac{607.44 \text{ kN}}{0.847 * 5746.8 \text{ kN}} = 1$$

$$+ 0.65 * \left(\frac{\frac{|-557.26 \text{ kNm}|}{\gamma_{M1}}}{\left(\frac{0.956 * 1648.62 \text{ kNm}}{1} \right)} \right) = 0.356 \leq 1.0 - \text{warunek spełniony}$$

Niekorzystne wartości współczynników interakcji obliczone na podstawie załącznika B do [5]:

Współczynnik interakcji	C _{my}	Wartosc współczynnika
k _{yy}	1	1.09
k _{zy}	1	0.65

Tabela nr 10 Wartości współczynników Interakcji

4.4.4 Stan Graniczny Użytkowości

Zgodnie z N1. 22 -ad 7.2.1 (1)B obliczam dopuszczalne ugięcie dla dźwigara dachowego

Element konstrukcji	w _{max} , w ₃ ^{*/l} ≤
– Dźwigary dachowe (kratowe i pełnościenne)	L/250
– Płatwie	L/200
– Blacha profilowana	L/150
– Elementy stropów i stropodachów:	
– belki główne (podciąg)	L/350
– belki drugorzędne	L/250
– Nadproża okien i bram	L/500

*/ Gdy zastosowano strzałkę odwrotną.
Oznaczenia: w_{max} – ugięcie całkowite netto (po odjęciu ewentualnej strzałki odwrotnej);
w₃ – strzałka ugięcia od obciążeń zmiennych;
L – rozpiętość elementu (lub podwójny wysięg wspornika).

Tabela nr 11 Wartości dopuszczalnych ugięć dla elementów konstrukcji

Długość badanego elementu: $L = 21.15 \text{ m}$

Ugięcia:

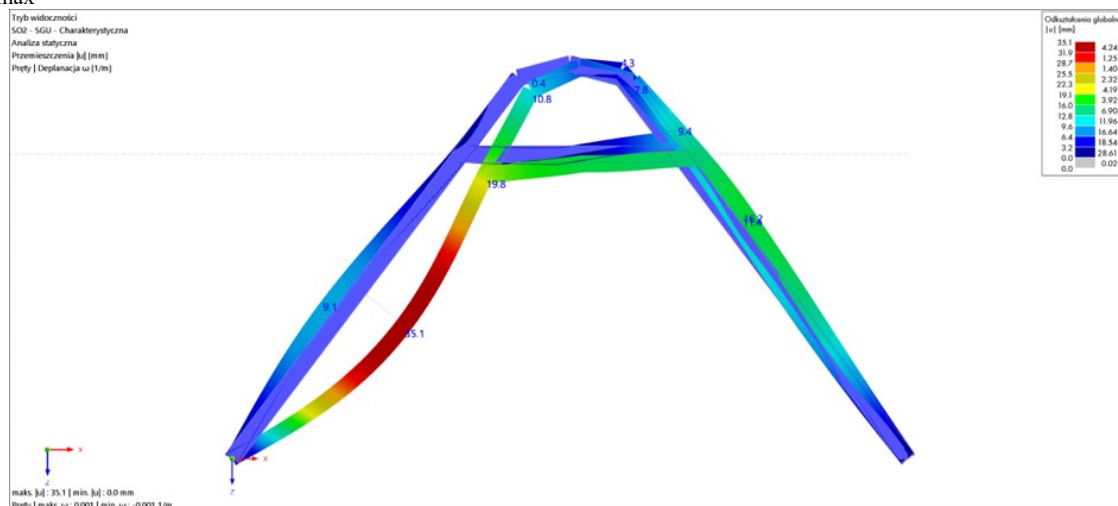
$$w_y = 27.4 \text{ mm}$$

$$w_z = 21.8 \text{ mm}$$

$$w = \sqrt{w_y^2 + w_z^2} = \sqrt{(27.4 \text{ mm})^2 + (21.8 \text{ mm})^2} = 35.014 \text{ mm}$$

$$w_{\max} = \frac{L}{250} = \frac{21.15 \text{ m}}{250} = 84.6 \text{ mm} - \text{na podstawie załącznika}$$

$$\frac{w}{w_{\max}} = \frac{35.014 \text{ mm}}{84.6 \text{ mm}} = 0.4 \leq 1.0 - \text{warunek spełniony}$$

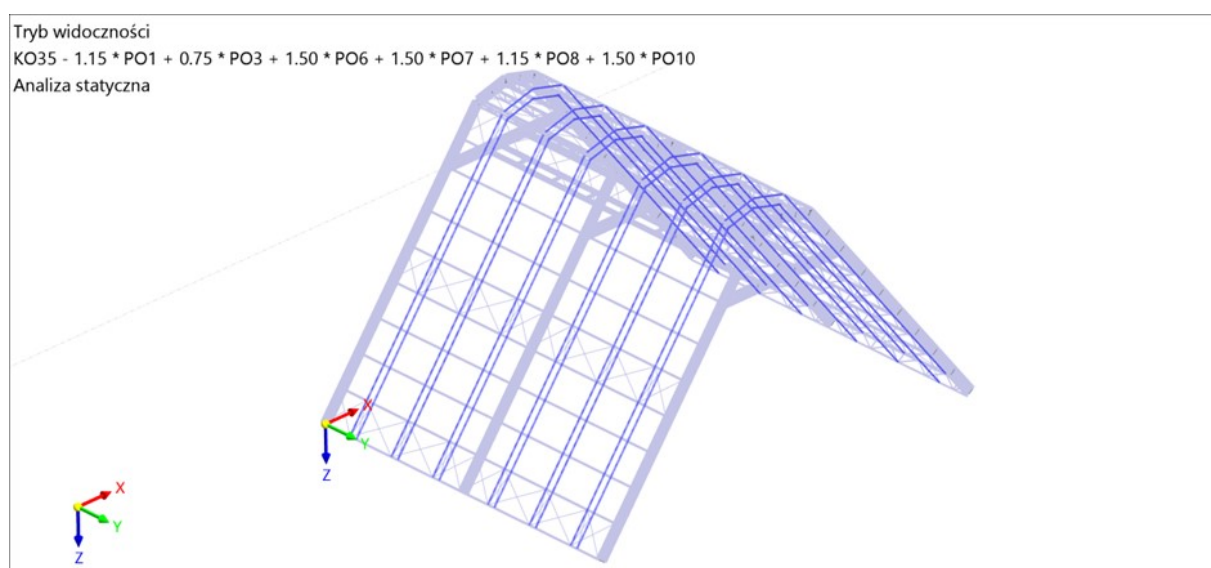


Rys. 55 Ugięcie sumaryczne obliczanej ramy

4.5 Pozycja 3 - Podwieszenia płatwi - tężniki między-płatwiowe

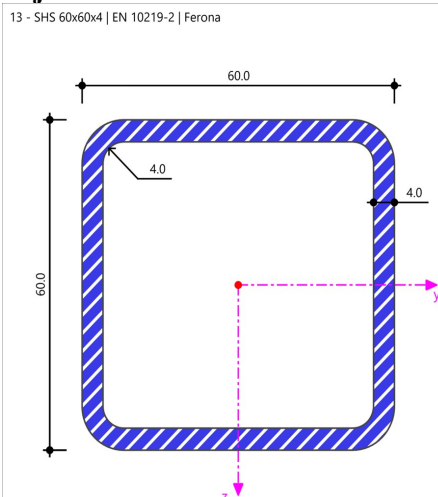
Podwieszenia stanowią podparcie dla płatwi kratowych. Zabezpieczają one pasy górny oraz dolny przed zwichrzeniem i skracają ich długości wyboczeniowe.

Zaprojektowane zostały jako zamknięte przekroje kwadratowe SHS 60x60x4



Rys. 56 Podwieszenia wybrane do wymiarowania

4.5.1 Charakterystyki przekroju



Rys. 57 Rysunek przekroju poprzecznego tężnika

$A = 8.55 \text{ cm}^2$ - pole przekroju poprzecznego

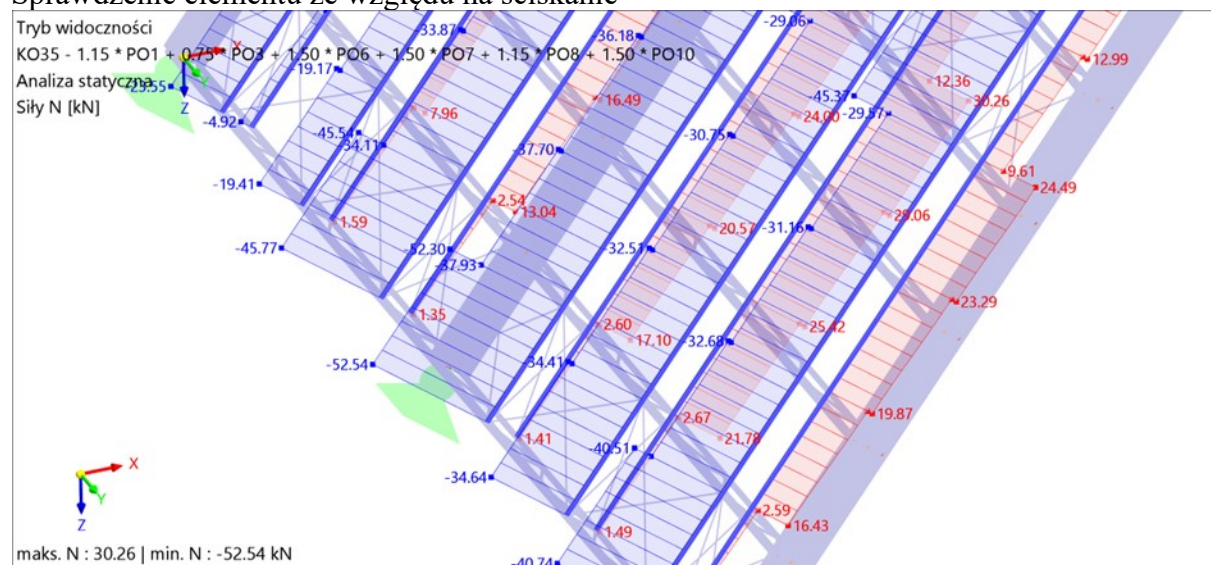
$W_{pl} = 17.60 \text{ cm}^3$ - wskaźnik plastyczny na zginanie

$I_y = 43.60 \text{ cm}^4$ - moment bezwładności przekroju

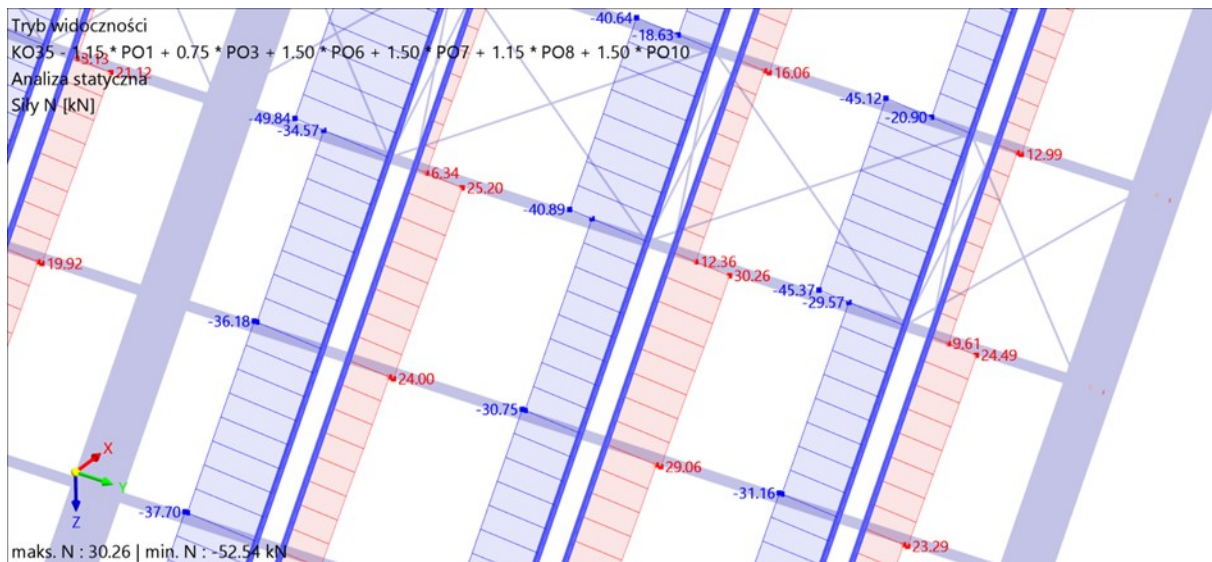
$f_y = 355 \text{ MPa}$ - granica plastyczności stali

4.5.2 Nośność przekroju

Sprawdzenie elementu ze względu na ściskanie



Rys. 58 Wykresy sił osiowych - maksymalne ściskanie
 $N_{Ed} = 52.54 \text{ kN}$ - maksymalna siła ściskająca podwieszenie



Rys. 59 Wykresy sił osiowych - maksymalne rozciąganie
 $N_{Ed} = 30.26 \text{ kN}$ - maksymalna siła rozciągająca przekrój

Obliczeniowa nośność przekroju na ściskanie i rozciąganie

$$N_{Rd} = \frac{A * f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{8.55 \text{ cm}^2 * 355 \text{ MPa}}{1} = 303.5 \text{ kN}$$

Warunki Nośności:

1) Ściskanie $\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} = \frac{52.54 \text{ kN}}{303.5 \text{ kN}} = 0.17 \leq 1.0$ - warunek spełniony

2) Rozciąganie $\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} = \frac{30.26 \text{ kN}}{303.5 \text{ kN}} = 0.10 \leq 1.0$ - warunek spełniony

4.5.3 Nośność elementu

Sprawdzenie wyboczenia elementu:

Podwieszenia nie są zabezpieczone w żaden sposób przed wyboczeniem, dlatego ich długość teoretyczna jest równa długości wyboczeniowej.

$$L_{cr} = 2.35 \text{ m}$$

Korzystając ze wzoru Eulera mogę wyznaczyć siłę krytyczną:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 * E * I_y}{L_{cr}^2} = \frac{3.142^2 * 210 \text{ GPa} * 43.60 \text{ cm}^4}{(2.35 \text{ m})^2} = 163.633 \text{ kN}$$

$$\chi_y = \frac{1}{\varphi + \sqrt{\varphi^2 - \lambda_y^2}} = \frac{1}{1.549 + \sqrt{1.549^2 - 1.362^2}} = 0.437 < 1.0$$

gdzie:

$$\varphi = 0.5 * \left(1 + \alpha * (\lambda_y - 0.2) + \lambda_y^2 \right) = 0.5 * \left(1 + 0.21 * (1.362 - 0.2) + 1.362^2 \right) = 1.549$$

Ponieważ: kształtownik rurowy wykończony na gorąco, stal S355 - **krzywa wyboczenia a**
 Parametr krzywej wyboczenie: $\alpha = 0.21$

Smukłość względna wyboczenia giętnego:

$$\lambda_y = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{8.55 \text{ cm}^2 \cdot 355 \text{ MPa}}{163.633 \text{ kN}}} = 1.362$$

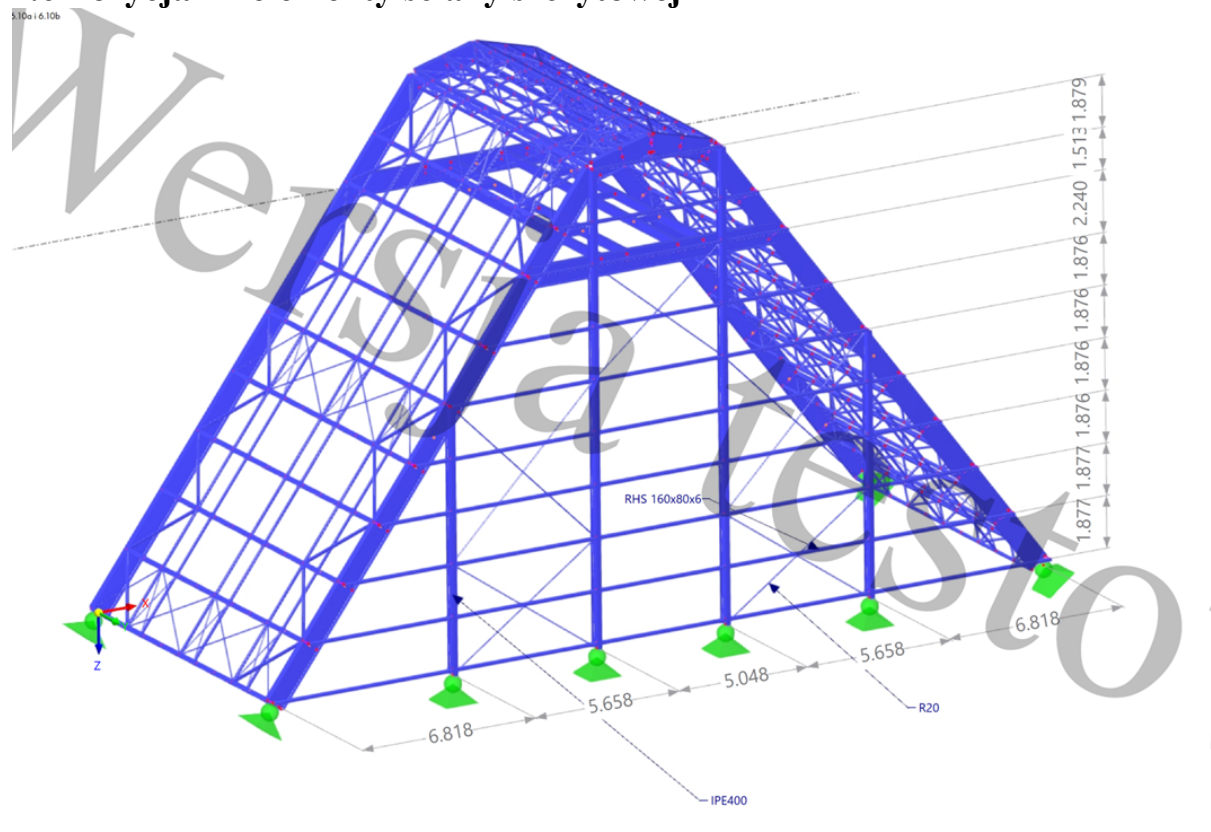
Nośność na wyboczenie elementu ściskanego:

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi_y \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0.437 \cdot 8.55 \text{ cm}^2 \cdot 355 \text{ MPa}}{1.0} = 132.640 \text{ kN, gdzie } \gamma_{M1} = 1.0$$

Warunek nośności:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} = \frac{52.54 \text{ kN}}{132.640 \text{ kN}} = 0.396 \leq 1.0 - \text{warunek spełniony}$$

4.6 Pozycja 4 - elementy ściany szczytowej



Rys. 60 Model ściany szczytowej

4.6.1 Elementy ściany szczytowej

Do wykonania głównych elementów nośnych ściany szczytowej wykorzystane zostaną profile:

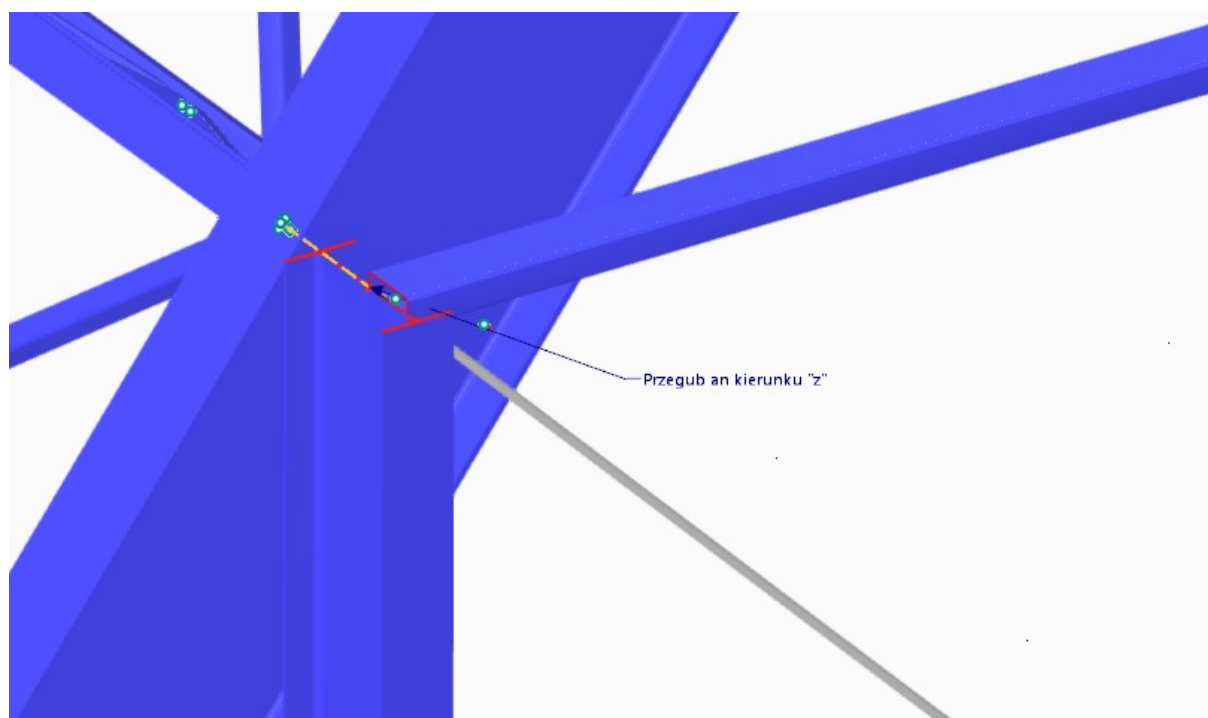
- Słupy: IPE400
- Rygle ścienne: RHS160x80x6
- Stężenia ścienne: Pręt pełny $\Phi 20$
- Stężenia połaciowe poprzeczne: SHS70x70x6

Rama szczytowa składa się jedynie ze słupów bez rygli dachowych, które mają za zadanie przekazać obciążenia na żelbetową ścianę oporową poniżej, a także na ramy główne.

Dodatkowo słupy ściany szczytowej zostały zaprojektowane w ten sposób aby nie osiadały one po ugięciu się rygli ramy głównej. Zostanie to wykonstruowane przy użyciu śrub mocowanych w otworach owalnych.

4.6.2 Obciążenia i model obliczeniowy

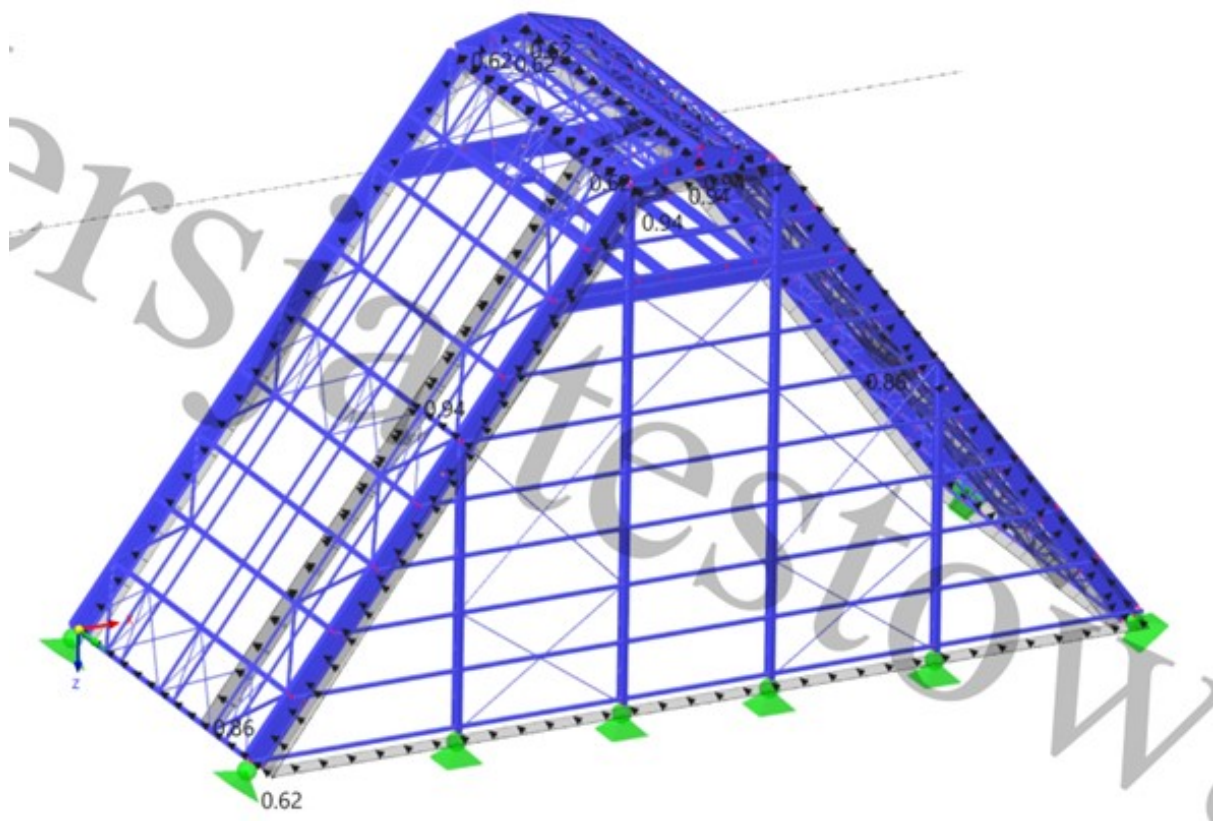
Jako model obliczeniowy zostały wprowadzone rama skrajna i przed-skrajna wraz ze ścianą szczytową. Obciążone są one w sposób analogiczny do ramy środkowej, jednak rama skrajna zbiera obciążenie tylko z połowy rozpiętości. Słupy i rygle ścienne zostały połączone z ramą główną za pomocą elementów sztywnych, dodatkowo w elementach łączących słupy szczytowe z ryglami głównymi zamodelowane zostały przeguby przesuwne na kierunku "z", tak aby siły tnące ramy głównej nie generowały ściskania i ugięcia słupów ściany szczytowej.



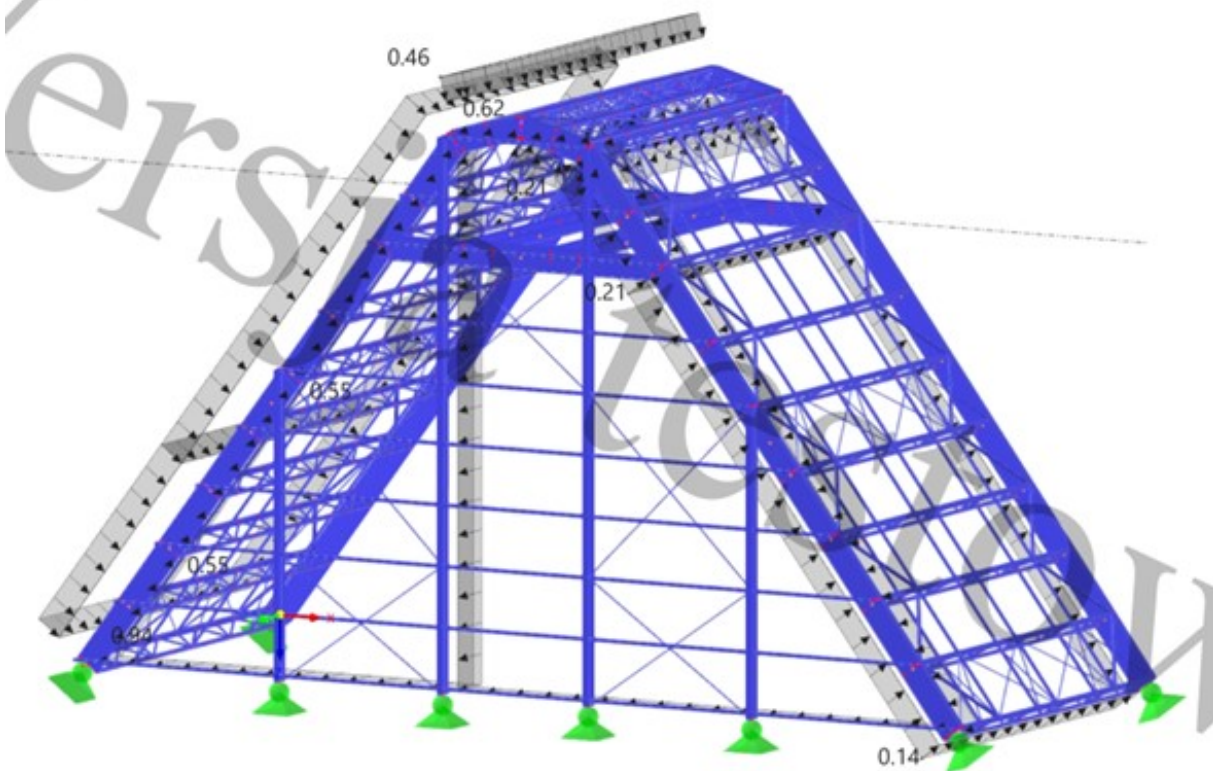
Rys. 61 Przegub na połączeniu słup-rygiel

Obciążenie wiatrem różni się od tego działającego na ramę środkową ponieważ projektowane elementy znajdują się w innym polu oddziaływania wiatru. Ściana szczytowa została obciążona dodatkowoarciem bądź ssaniem wiatru w zależności od przypadku:

- Wiatr od czoła (parcie na ścianę szczytową)



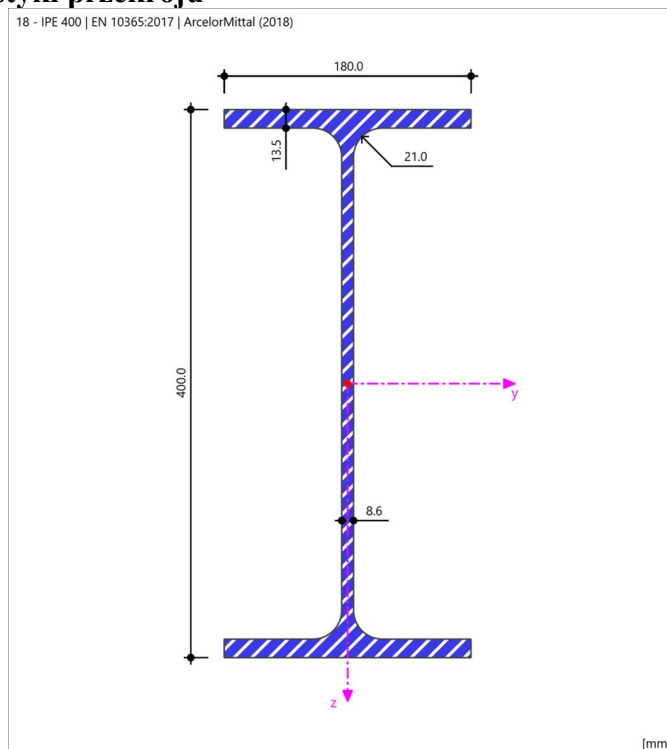
-Wiatr od boku (ssanie na ścianie szczytowej):



4.6.3 Sprawdzenie słupa

Wymiarowany będzie środkowy słup o długości $L = 17.08$ m

4.6.3.1 Charakterystyki przekroju



Rys. 62 Rysunek przekroju poprzecznego słupa szczytowego IPE400

$h = 400$ mm - wysokość przekroju

$b = 180$ mm - szerokość przekroju

$t_w = 8.6$ mm - grubość środnika

$t_f = 13.5$ mm - grubość półki

$h_i = 373$ mm - wewnętrzna wysokość między pasami

$r_1 = 21$ mm - promień wyokrąglenia naroża

$d = 331$ mm - wysokość prostej części środnika

$A = 84.50$ cm² - pole przekroju

$I_y = 23130$ cm⁴ - moment bezwładności przekroju względem osi y

$I_z = 1318$ cm⁴ - moment bezwładności przekroju względem osi z

$W_{pl,y} = 1307$ cm³ - plastyczny wskaźnik wytrzymałości względem osi y

$i_y = 166$ mm - promień bezwładności w kierunku y

$i_z = 39.5$ mm - promień bezwładności w kierunku z

Współczynniki częściowe:

$\gamma_{M0} = 1$; $\gamma_{M1} = 1$

Gatunek stali: S355

$f_y = 355$ MPa - granica plastyczności

$E = 210$ GPa - moduł sprężystości

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{f_y}{235 \text{ MPa}}} = \sqrt{\frac{355 \text{ MPa}}{235 \text{ MPa}}} = 1.229$$

Stosunek szerokości do grubości:

Środek:

$$\frac{d}{t_w} = \frac{331 \text{ mm}}{8.6 \text{ mm}} = 38.488 < 33 * \varepsilon = 33 * 1.229 = 40.560$$

Środek przy ściskaniu jest klasy 1

Pasy:

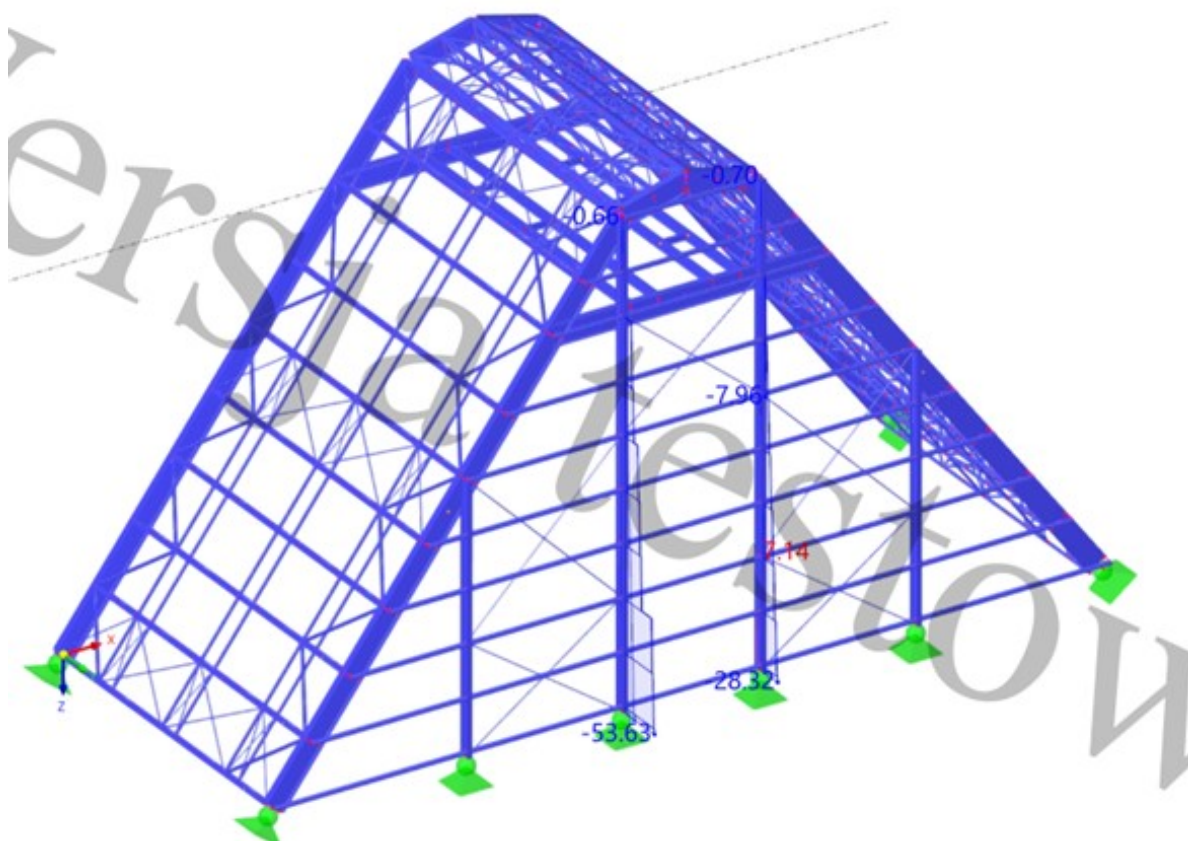
$$\frac{b - t_w - 2 * r_1}{2 * t_f} = \frac{180 \text{ mm} - 8.6 \text{ mm} - 2 * 21 \text{ mm}}{2 * 13.5 \text{ mm}} = 4.793 < 9 * \varepsilon = 9 * 1.229 = 11.062$$

Pasy przy ściskaniu są klasy 1

Przekrój przy ściskaniu jest klasy 1

4.6.3.2 Nośność przekroju

Sprawdzenie ze względu na ściskanie:



Rys. 63 Obwiednia sił ściskających

$$N_{Ed} = 53.63 \text{ kN}$$

$$N_{c,Rd} = \frac{A * f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{84.50 \text{ cm}^2 * 355 \text{ MPa}}{1} = 2999.75 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} = \frac{53.63 \text{ kN}}{2999.75 \text{ kN}} = 0.0179 < 1.0 - \text{warunek spełniony}$$

Zginanie:

Stosunek szerokości do grubości:

Środek:

$$\frac{d}{t_w} = \frac{331 \text{ mm}}{8.6 \text{ mm}} = 38.488 < 72 * \varepsilon = 72 * 1.229 = 88.494$$

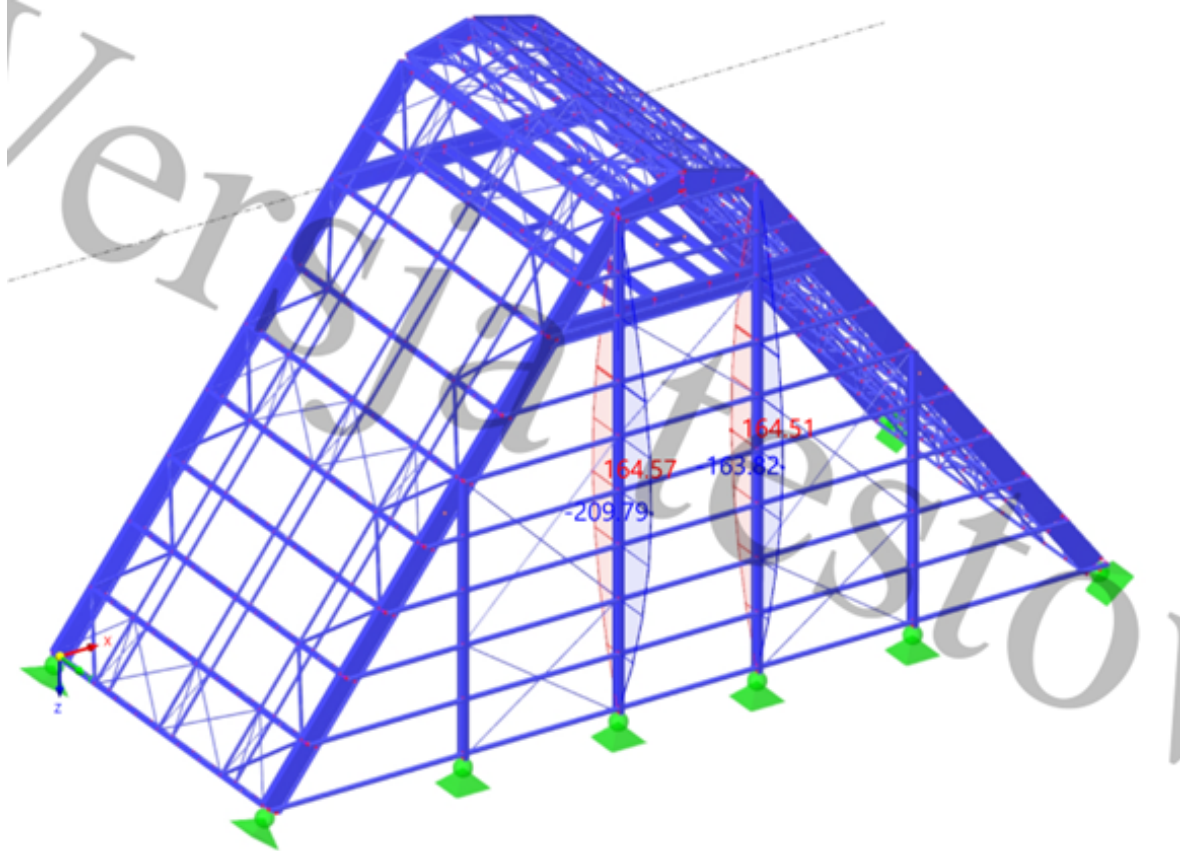
Środek przy ściskaniu jest klasy 1

Pasy:

$$\frac{b - t_w - 2 * r_l}{2 * t_f} = \frac{180 \text{ mm} - 8.6 \text{ mm} - 2 * 21 \text{ mm}}{2 * 13.5 \text{ mm}} = 4.793 < 9 * \varepsilon = 9 * 1.229 = 11.062$$

Pasy przy ściskaniu są klasy 1

Przekrój przy zginaniu jest klasy 1



Rys. 64 Obwiednia momentów zginających

$$M_{Ed} = 209.79 \text{ kNm}$$

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{pl,y} * f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{1307 \text{ cm}^3 * 355 \text{ MPa}}{1} = 463.99 \text{ kNm}$$

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} = \frac{209.79 \text{ kNm}}{463.99 \text{ kNm}} = 0.452 \leq 1.0 - \text{warunek spełniony}$$

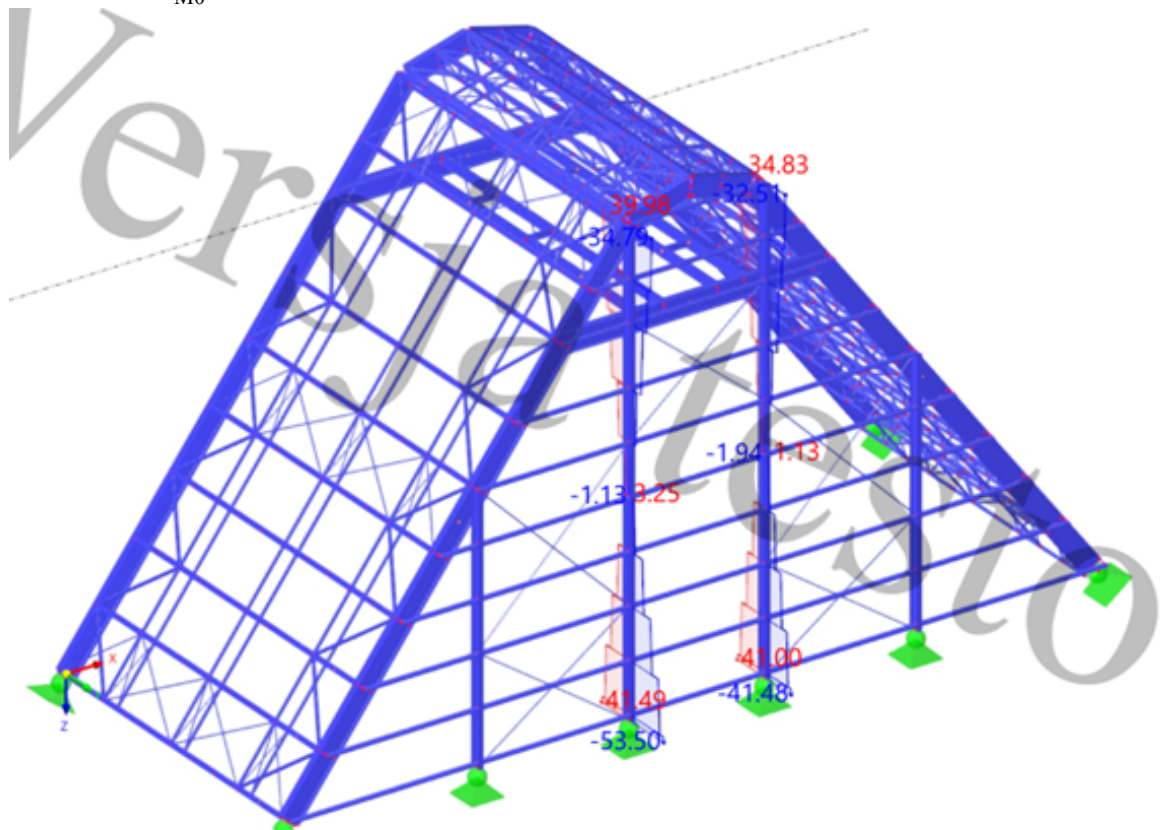
Ścinanie:

Pole przekroju czynnego przy ścinaniu:

$$A_v = A - 2 * b * t_f + (t_w + 2 * r_l) * t_f = 84.50 \text{ cm}^2 - 2 * 180 \text{ mm} * 13.5 \text{ mm} + (8.6 \text{ mm} + 2 * 21 \text{ mm}) * 13.5 \text{ mm} = 42.731 \text{ cm}^2$$

Nośność na ścinanie:

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v * \left(\frac{f_y}{\sqrt{3}} \right)}{\gamma_{M0}} = \frac{42.731 \text{ cm}^2 * \left(\frac{355 \text{ MPa}}{\sqrt{3}} \right)}{1} = 875.81 \text{ kN}$$



Rys. 65 Obwiednia sił ścinających
 $V_{Ed} = 53.50 \text{ kN}$

$$\frac{V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} = \frac{53.50 \text{ kN}}{875.81 \text{ kN}} = 0.06 \leq 1.0 - \text{warunek spełniony}$$

Zginanie ze ścinaniem:

Ponieważ siła poprzeczna nie przekracza 50% nośności plastycznej przekroju na ścinanie jej wpływ na nośność na zginanie może być pominięty.

Zginanie z siłą podłużną:

Wpływ siły podłużnej na nośność na zginanie może być pominięty jeśli dla dwuteowników bisymetrycznych spełnione są warunki:

$$1) N_{Ed} = 53.63 \text{ kN} < 0.25 * N_{c,Rd} = 0.25 * 2999.75 \text{ kN} = 749.938 \text{ kN}$$

$$2) N_{Ed} = 53.63 \text{ kN} < \frac{0.5 * d * t_w * f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{0.5 * 74 \text{ mm} * 6.5 \text{ mm} * 355 \text{ MPa}}{1} = 85.378 \text{ kN}$$

Wpływ siły podłużnej na zginanie może być pominięty ponieważ oba warunki zostały spełnione.

4.6.3.3 Nośność elementu

Nośność na wyboczenie:

oś	L_{cr}	$I_{y,z}$	λ	ϕ	χ	$N_{b,Rd}$	$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}}$
y-y	17.08 m	23130 cm ⁴	1.35	1.53	0.45	1335 kN	0.04
z-z	7.508 m	1318 cm ⁴	2.49	3.98	0.14	423 kN	0.13

Tabela nr 12 Sprawdzenie nośności na wyboczenie

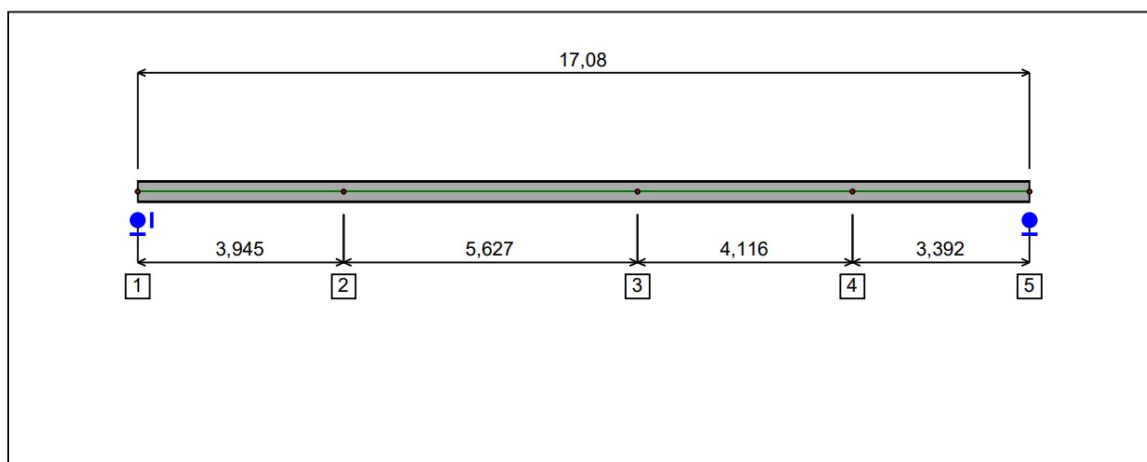
Warunek spełniony

Nośność na zwichrzenie

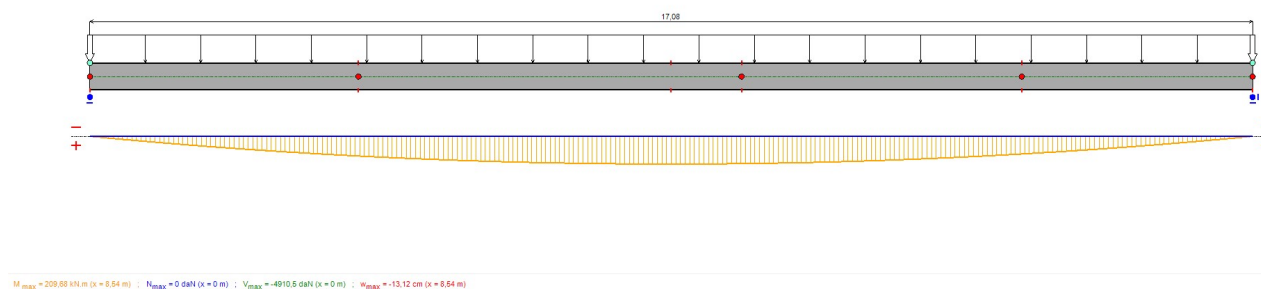
Moment krytyczny wyliczony został za pomocą programu LTBeamN:

W miejscach podparć znajdują się węzły do których rygle ścienne stabilizujące pas górny słupa oraz zastrzały stabilizujące pas dolny słupa a także stężenia prętowe.

1.4 - Lateral restraints

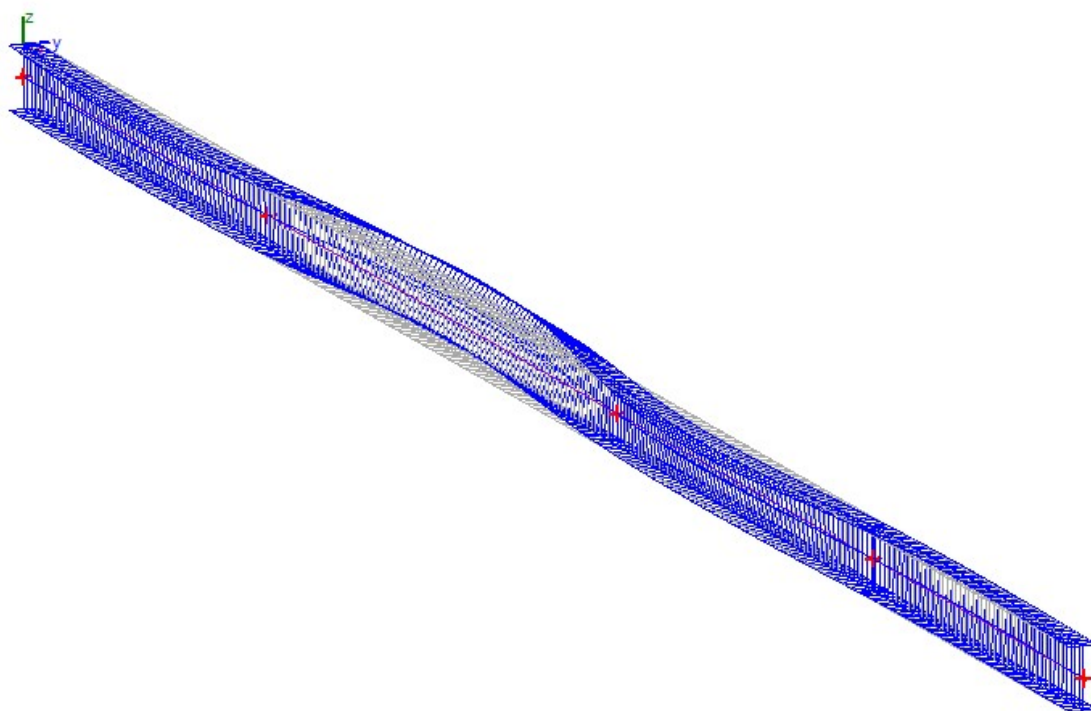


Rys. 66 Układ obliczeniowy



Rys. 67 Schemat obciążenia i wykres momentów zginających

Zwichrzenie słupa:

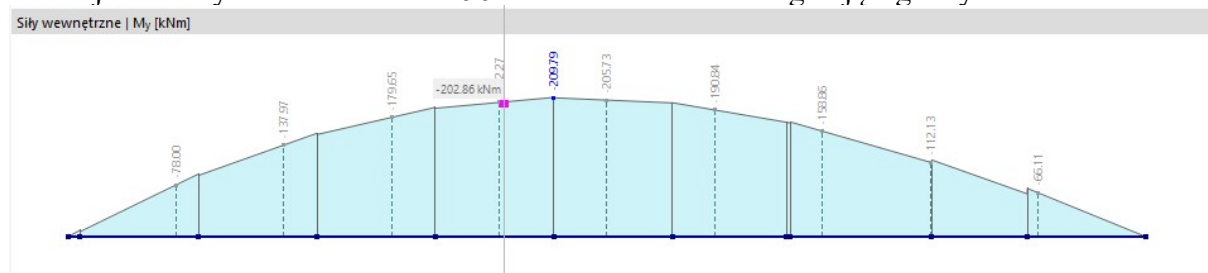


Rys. 68 Postać zwichrzenia słupa

Mode	μ_{cr}	$M_{max,cr}$ [kN.m]	x (Mmax) [m]	$N_{max,cr}$ [daN] (*)	x (Nmax) [m]
1	1.924	403.36	8.54	-105.3	0

Tabela nr 13 Wartości współczynnika krytycznego

W miejscu utraty stateczności $x = 6.9$ m wartość momentu zginającego wynosi:



Rys. 69 Wartość momentu zginającego $M_{Ed} = 202.86$ kNm

Dlatego wartość momentu krytycznego wynosi:

$$M_{cr} = 1.924 * M_{Ed} = 1.924 * 202.86 \text{ kNm} = 390.303 \text{ kNm}$$

Obliczenie nośności oraz sprawdzenie warunku zwichrzenia:

M_{cr}	λ_{LT}	ϕ_{LT}	χ_{LT}	$M_{b,Rd}$	M_{Ed}	$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}}$
390 kNm	1.09	1.06	0.64	299.02 kNm	209.79 kNm	0.70

Tabela nr 14 Sprawdzenie nośności na zwichrzenie

Warunek spełniony

- Sprawdzenie zginania ze ściskaniem

Warunek interakcji:

$$1) \frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} + \frac{N_{Ed}}{N_{B,Rd}} = \frac{209.79 \text{ kNm}}{299.02 \text{ kNm}} + \frac{53.63 \text{ kN}}{1335 \text{ kN}} = 0.74 \leq 1.0 - \text{warunek spełniony}$$

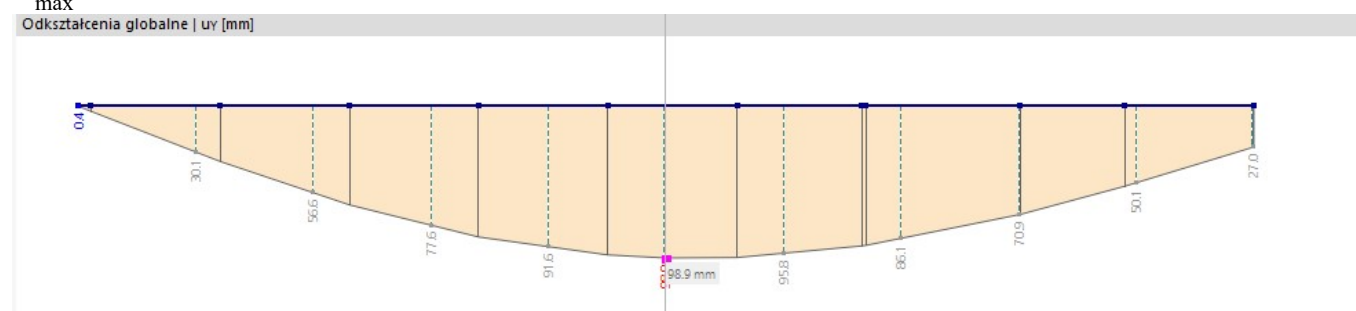
4.6.3.4 Stan Graniczny Użytkowości

Ugięcie dopuszczalne:

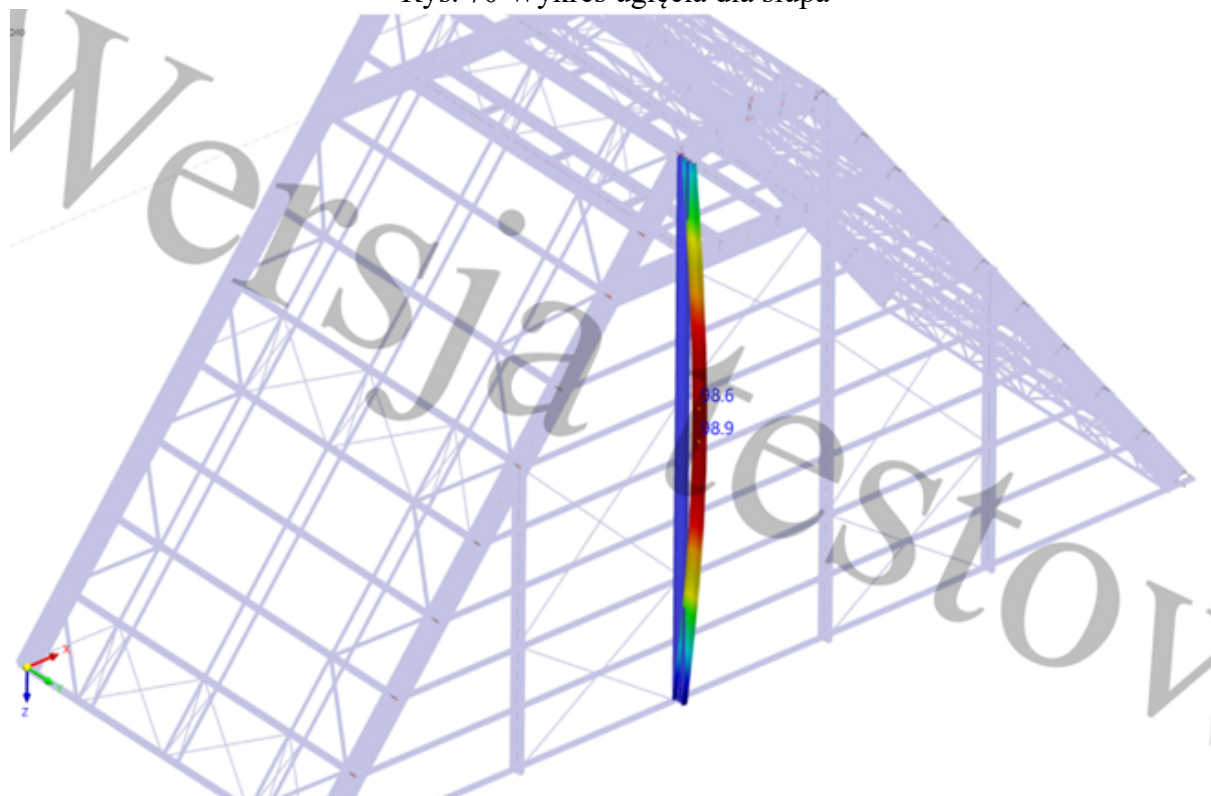
$$w_{dop} = \frac{L}{150} = \frac{17.08 \text{ m}}{150} = 113.9 \text{ mm}$$

Ugięcie maksymalne:

$$w_{max} = 98.9 \text{ mm}$$



Rys. 70 Wykres ugięcia dla słupa



Rys. 71 Model deformacji słupa

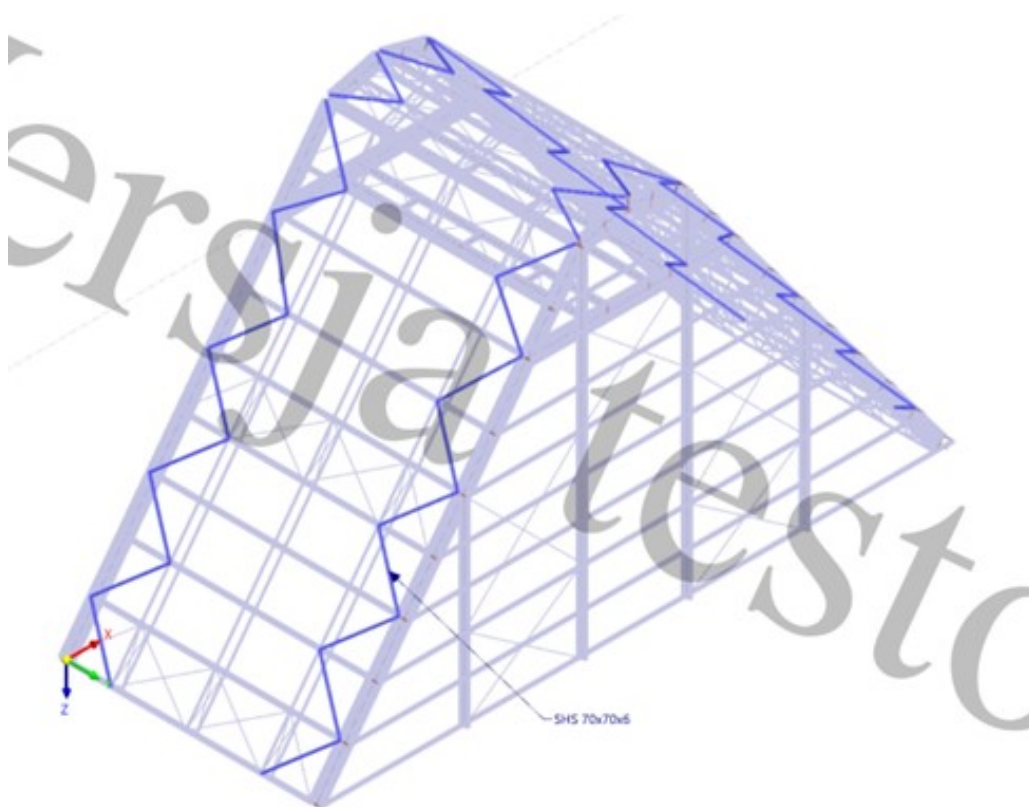
Warunek użytkowalności:

$$\frac{w_{\max}}{w_{\text{dop}}} = \frac{98.9 \text{ mm}}{113.9 \text{ mm}} = 0.869 \leq 1.0 - \text{warunek spełniony}$$

4.7 Pozycja 5 - Stężenia połaciowe poprzeczne

4.7.1 Konstrukcja stężeń

Stężenia połaciowe poprzeczne zaprojektowane zostały jako przekroje zamknięte kwadratowe wykonane z profili SHS70x70x6. Są to pręty zarówno rozciągane jak i ściskane.



Rys. 72 Schemat zaprojektowanych stężeń

4.7.2 Wyznaczenie sił od imperfekcji

Imperfekcje łukowe:

Liczba stężanych elementów $m_i = \frac{5}{2} = 2.5$ - zaokrąglono w górę do liczby całkowitej $m = 3$

Współczynnik redukcyjny ze względu na liczbę elementów stężanych:

$$\alpha_m = \sqrt{\frac{m+1}{2 \cdot m}} = \sqrt{\frac{3+1}{2 \cdot 3}} = 0.816$$

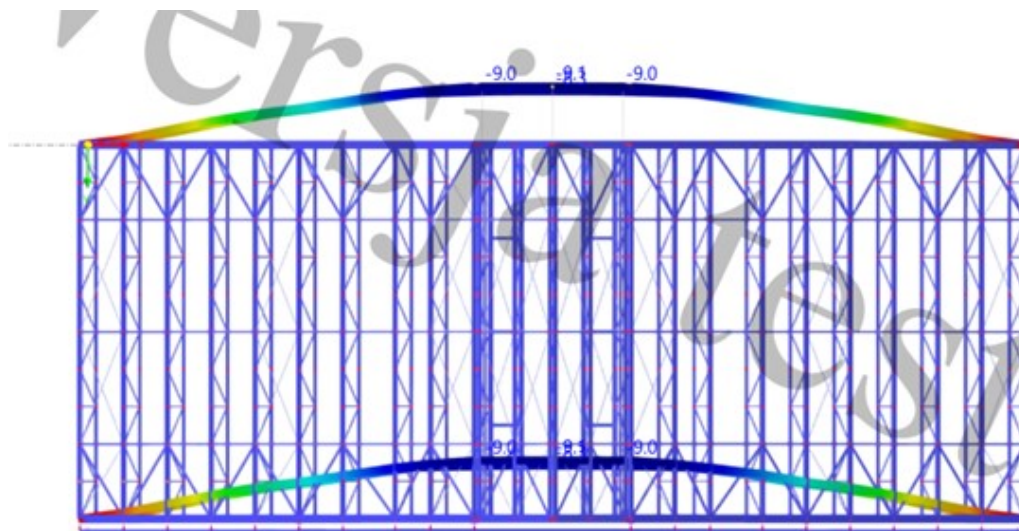
Strzałka wstępnej imperfekcji łukowej:

$$e_0 = \frac{\alpha_m \cdot L}{500} = \frac{0.816 \cdot 47 \text{ m}}{500} = 0.0768 \text{ m, gdzie } L = 47 \text{ m - rozpiętość ramy}$$

Równoważne obciążenie obliczeniowe:

$$q_{Ed,1} = m * N' * 8 * \left(\frac{e_0}{L^2} \right) = 3 * 1350.453 \text{ kN} * 8 * \left(\frac{0.0768 \text{ m}}{(47 \text{ m})^2} \right) = 1.126 \frac{\text{kN}}{\text{m}},$$

$$\text{gdzie: } N' = N_{Ed} + \frac{|M_{y,Ed}|}{0.75 \text{ m}} = 607.44 \text{ kN} + \frac{|-557.26 \text{ kNm}|}{0.75 \text{ m}} = 1350.453 \text{ kN}$$



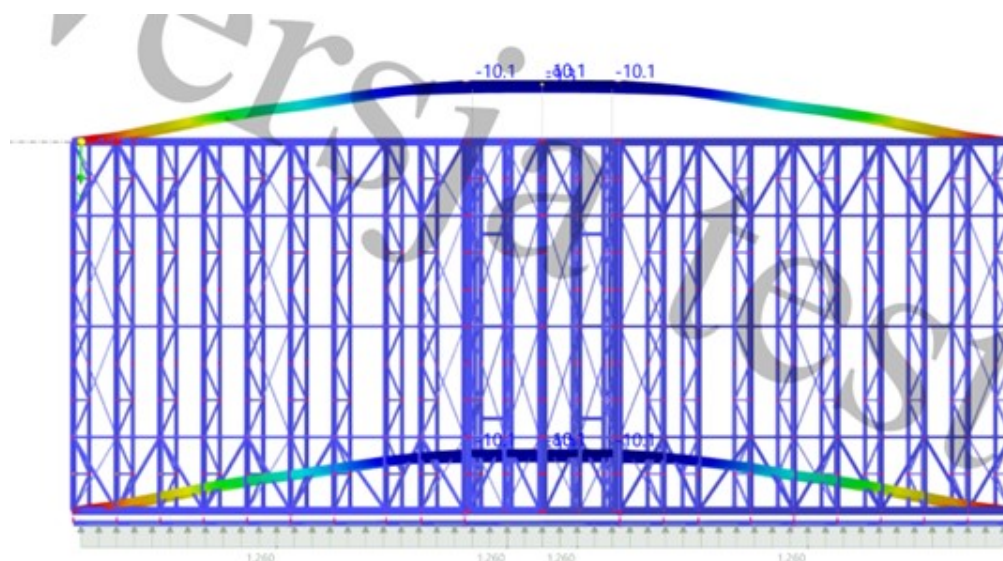
Rys. 73 Wykres ugięć od obciążenia imperfekcjami

Deformacja od imperfekcji, krok 1

Siła q_d uzupełniona o $\delta_{d1} = 0.0091 \text{ m}$:

$$q_{Ed,2} = m * N' * 8 * \left(\frac{e_0 + \delta_{d1}}{L^2} \right) = 3 * 1350.453 \text{ kN} * 8 * \left(\frac{0.0768 \text{ m} + 0.0091 \text{ m}}{(47 \text{ m})^2} \right)$$

$$= 1.260 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$



Rys. 74 Wykres ugięć od zmienionego obciążenia

Siła q_d uzupełniona o $\delta_{d2} = 0.0101$ m

$$q_{Ed,3} = m * N' * 8 * \left(\frac{e_0 + \delta_{d2}}{L^2} \right) = 3 * 1350.453 \text{ kN} * 8 * \left(\frac{0.0768 \text{ m} + 0.0101 \text{ m}}{(47 \text{ m})^2} \right) \\ = 1.274 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Imperfekcja od sił destabilizujących:

$$N_{Ed,dst} = \frac{m * \alpha_m * N_{Ed}}{100} = \frac{3 * 0.816 * 607.44 \text{ kN}}{100} = 14.879 \text{ kN}$$

gdzie N jest siłą osiową z rygla ramy głównej

Przy wyliczaniu sił wewnętrznych użyte zostały kombinacje:

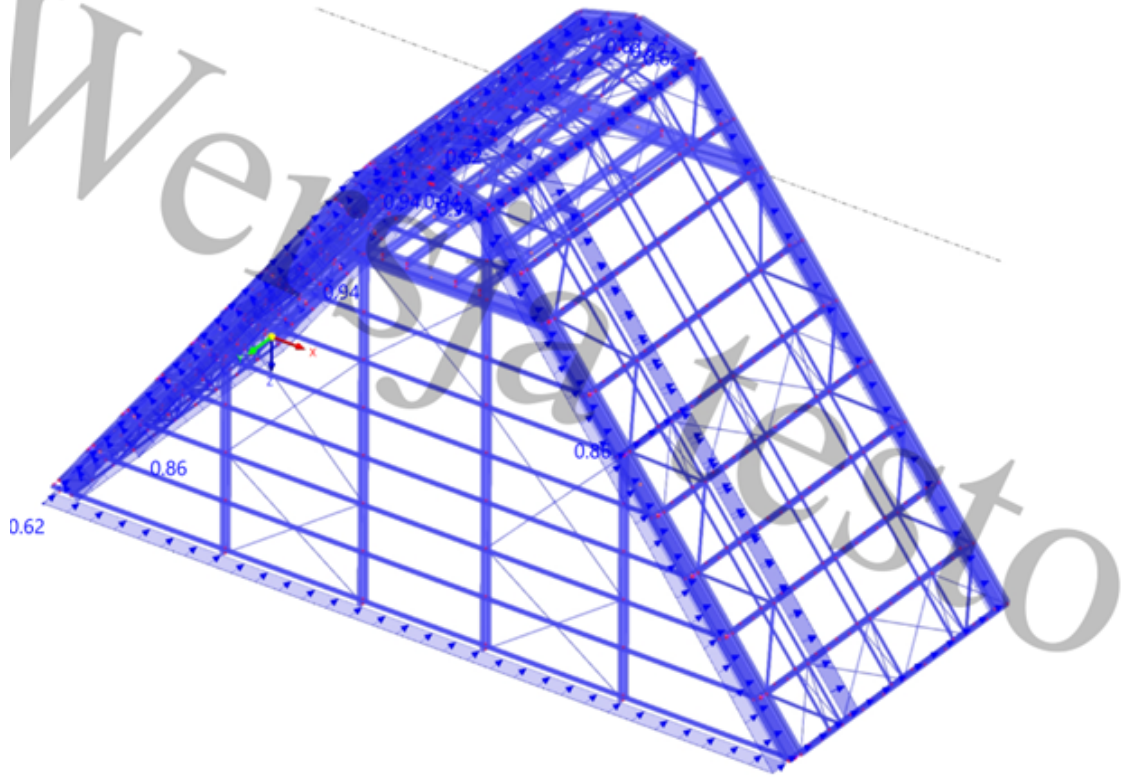
- siły od imperfekcji łukowej: $q_{Ed,3} = 1.274 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$ - równomiernie rozłożone

lub

- siła destabilizująca: $N_{Ed,dst} = 14.879 \text{ kN}$ - siły skupione w miejscach styków

Połączone z:

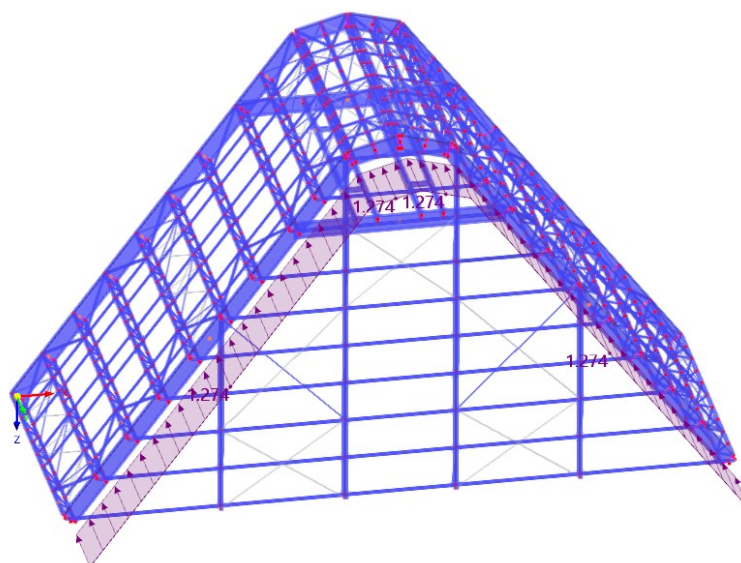
- siły od obciążeń zewnętrznych, w analizowanym przypadku jest to wiatr działający na ścianę szczytową jako obciążenie powierzchniowe wygenerowane na prętach (ze wszystkich przypadków wybrany został najbardziej niekorzystny):



Rys. 75 Obc. wiatrem od czoła, połąć podzielona na strefy oddziaływania wiatru

PO11 - rozłożone dst
Obciążenia [kN/m]
Analiza statyczna
Siły N [kN]

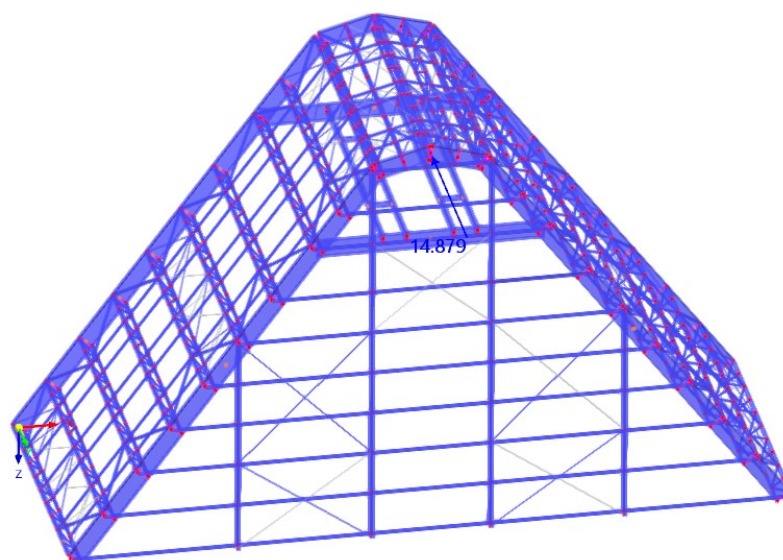
N : Nie wybrano obiektu



Rys. 76 Obciążenie rozłożone od destabilizacji

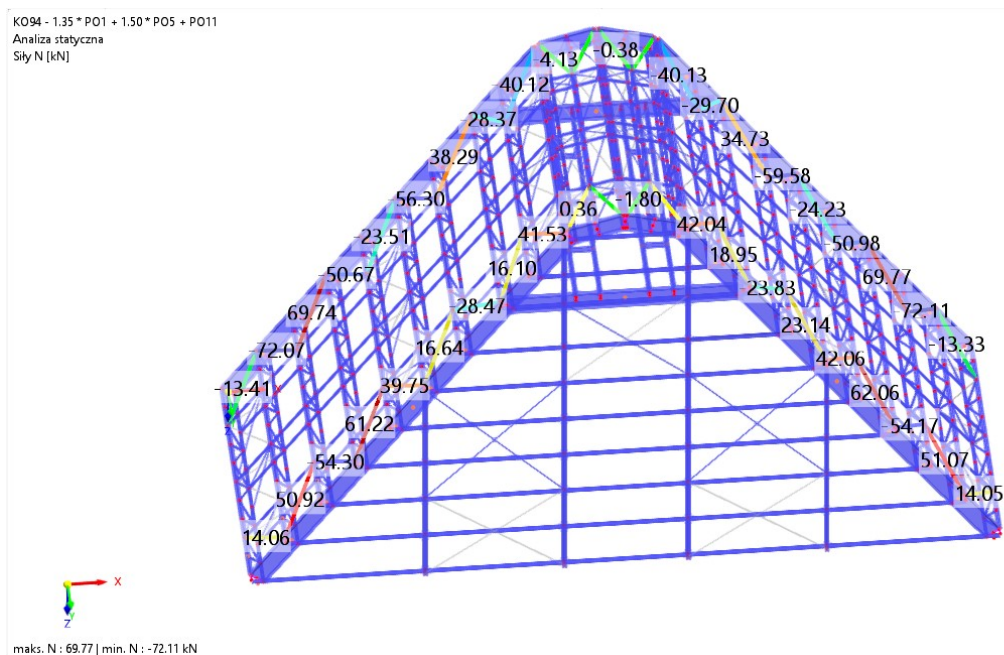
PO13 - siła dst
Obciążenia [kN]
Analiza statyczna
Siły N [kN]

N : Nie wybrano obiektu



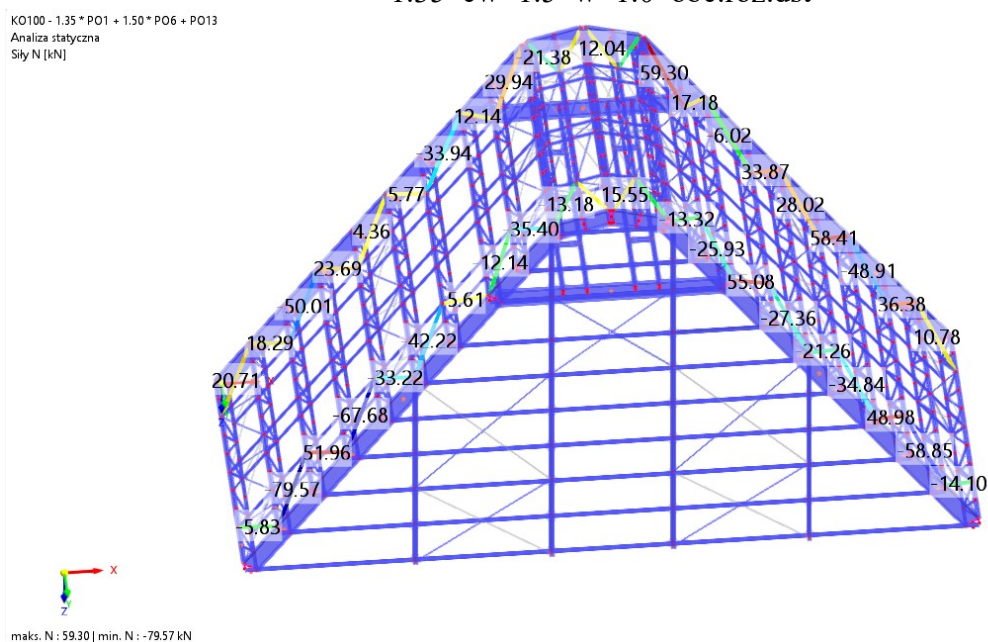
Rys. 77 Obciążenie siłą skupioną destabilizującą

K094 - 1.35 * P01 + 1.50 * P05 + P011
 Analiza statyczna
 Siły N [kN]



Rys. 78 Kombinacja wywołująca największe rozciąganie
 $1.35 \cdot cw + 1.5 \cdot w + 1.0 \cdot obc. roz. dst$

K0100 - 1.35 * P01 + 1.50 * P06 + P013
 Analiza statyczna
 Siły N [kN]

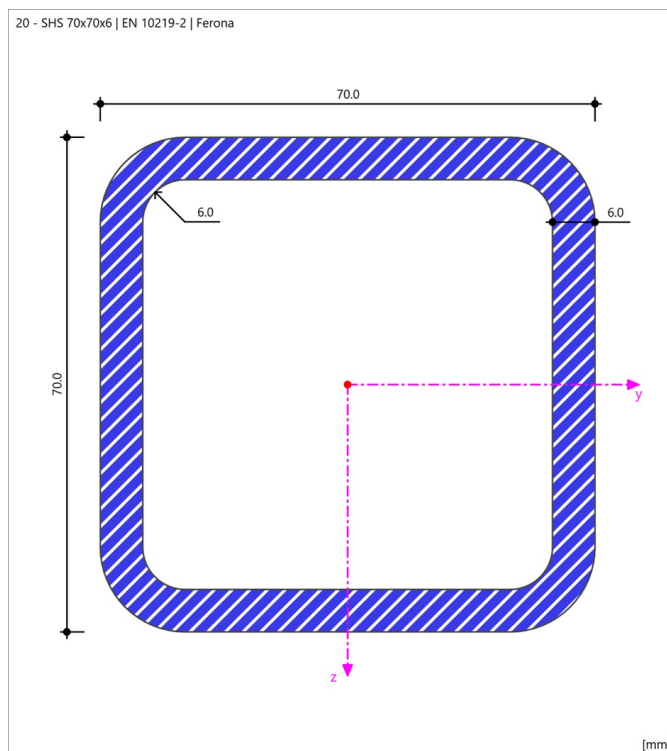


Rys. 79 Kombinacja wywołująca największe ściskanie $1.35 \cdot cw + 1.5 \cdot w + 1.0 \cdot siła dst.$

Wartości ekstremalnych sił osiowych w stężeniach połaciowych poprzecznych dla wybranej kombinacji: $N_{Ed,1} = 79.57 \text{ kN}$ - ściskanie; $N_{Ed,2} = 69.77 \text{ kN}$ - rozciąganie

4.7.3 Wymiarowanie stężeń

Stężenia połączeniowe poprzeczne zostały zaprojektowane jako elementy o przekroju SHS 70x70x6.



Rys. 80 Rysunek przekroju poprzecznego stężeń połączeniowych

$A = 14.40 \text{ cm}^2$ - pole przekroju poprzecznego

$W_{pl} = 33.80 \text{ cm}^3$ - wskaźnik plastyczny na zginanie

$I_y = 95.20 \text{ cm}^4$ - moment bezwładności przekroju

$f_y = 355 \text{ MPa}$ - granica plastyczności stali

Obliczeniowa nośność przekroju na ściskanie i rozciąganie

$$N_{Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{14.40 \text{ cm}^2 \cdot 355 \text{ MPa}}{1} = 511.2 \text{ kN}$$

Warunki Nośności:

$$1) \text{ Ściskanie } \frac{N_{Ed,1}}{N_{Rd}} = \frac{79.57 \text{ kN}}{511.2 \text{ kN}} = 0.16 \leq 1.0 - \text{warunek spełniony}$$

$$2) \text{ Rozciąganie } \frac{N_{Ed,2}}{N_{Rd}} = \frac{69.77 \text{ kN}}{511.2 \text{ kN}} = 0.14 \leq 1.0 - \text{warunek spełniony}$$

Sprawdzenie wyboczenia elementu:

Stężenia nie są zabezpieczone w żaden sposób przed wyboczeniem, dlatego ich długość teoretyczna jest równa długości wyboczeniowej.

$$L_{cr} = 3.358 \text{ m}$$

Korzystając ze wzoru Eulera mogą wyznaczyć siłę krytyczną:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 * E * I_y}{L_{cr}^2} = \frac{3.142^2 * 210 \text{ GPa} * 95.20 \text{ cm}^4}{(3.358 \text{ m})^2} = 174.982 \text{ kN}$$

$$\chi_y = \frac{1}{\varphi + \sqrt{\varphi^2 - \lambda_y^2}} = \frac{1}{2.119 + \sqrt{2.119^2 - 1.709^2}} = 0.297 < 1.0$$

gdzie:

$$\varphi = 0.5 * \left(1 + \alpha * (\lambda_y - 0.2) + \lambda_y^2 \right) = 0.5 * \left(1 + 0.21 * (1.709 - 0.2) + 1.709^2 \right) = 2.119$$

Ponieważ: kształtownik rurowy wykończony na gorąco, stal s355 - **krzywa wyboczenia a**
Parametr krzywej wyboczenie: $\alpha = 0.21$

Smukłość względna wyboczenia giętnego:

$$\lambda_y = \sqrt{\frac{A * f_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{14.40 \text{ cm}^2 * 355 \text{ MPa}}{174.982 \text{ kN}}} = 1.709$$

Nośność na wyboczenie elementu ściskanego:

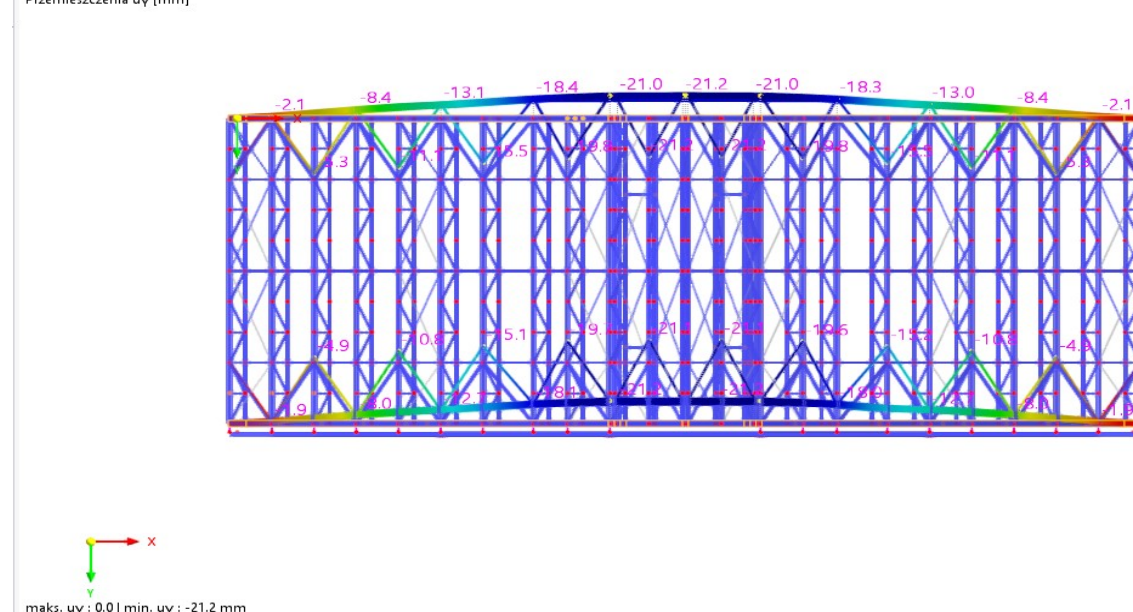
$$N_{b,Rd} = \frac{\chi_y * A * f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0.297 * 84.50 \text{ cm}^2 * 355 \text{ MPa}}{1} = 889.609 \text{ kN}, \text{ gdzie } \gamma_{M1} = 1$$

Warunek nośności:

$$\frac{N_{Ed,1}}{N_{b,Rd}} = \frac{79.57 \text{ kN}}{889.609 \text{ kN}} = 0.0894 \leq 1.0 - \text{warunek spełniony}$$

4.7.4 Stan Graniczny Użytkowości

PO5 - WIATR OD CZOŁA
Analiza statyczna
Przemieszczenia u_y [mm]



Rys. 81 Deformacja układu

Ugięcie dopuszczalne:

$$w_{\text{dop}} = \frac{L}{150} = \frac{2.35 \text{ m}}{150} = 15.667 \text{ mm, gdzie } L = 2.35 \text{ m - rozstaw pomiędzy stężeniami}$$

Ugięcie maksymalne:

$$w_{\text{max}} = 21 \text{ mm} - 18.4 \text{ mm} = 2.6 \text{ mm}$$

$$\frac{w_{\text{max}}}{w_{\text{dop}}} = \frac{2.6 \text{ mm}}{15.667 \text{ mm}} = 0.166 \leq 1.0$$

4.8 Pozycja 6 - Stężenia ściany szczytowej

4.8.1 Wyznaczenie sił od imperfekcji

Siła od imperfekcji przechyłowej:

$$H_m = \varphi * m * N_{\text{Ed}} = 0.00191 * 4 * 53.63 \text{ kN} = 0.410 \text{ kN}$$

gdzie:

$$\varphi = \varphi_0 * \alpha_m * \alpha_h = 0.005 * 0.791 * 0.484 = 0.00191$$

$$\varphi_0 = \frac{1}{200} = 0.005 - \text{wartość podstawowa}$$

$$\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{\frac{h}{1 \text{ m}}}} = \frac{2}{\sqrt{\frac{17.08 \text{ m}}{1 \text{ m}}}} = 0.484, \text{ gdzie } h = L = 17.08 \text{ m} - \text{wysokość słupa}$$

$$\alpha_m = \sqrt{0.5 * \left(1 + \frac{1}{m}\right)} = \sqrt{0.5 * \left(1 + \frac{1}{4}\right)} = 0.791$$

$$m = 4$$

$$N_{\text{Ed}} = N_{\text{Ed}} = 53.63 \text{ kN} - \text{siła osiowa w słupie}$$

Imperfekcja łukowa:

$$q = \frac{8 * m * N_{\text{Ed}} * e_0}{L^2} = \frac{8 * 4 * 53.63 \text{ kN} * 0.0683 \text{ m}}{(17.08 \text{ m})^2} = 0.402 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

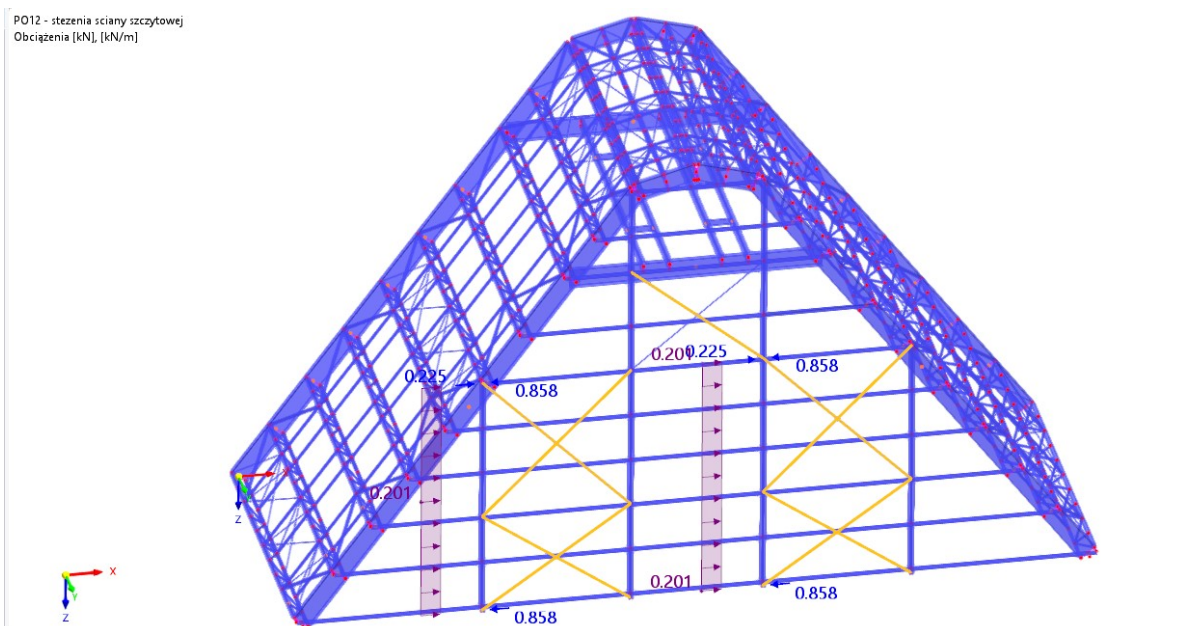
gdzie:

$L = 17.08 \text{ m}$ - długość słupa

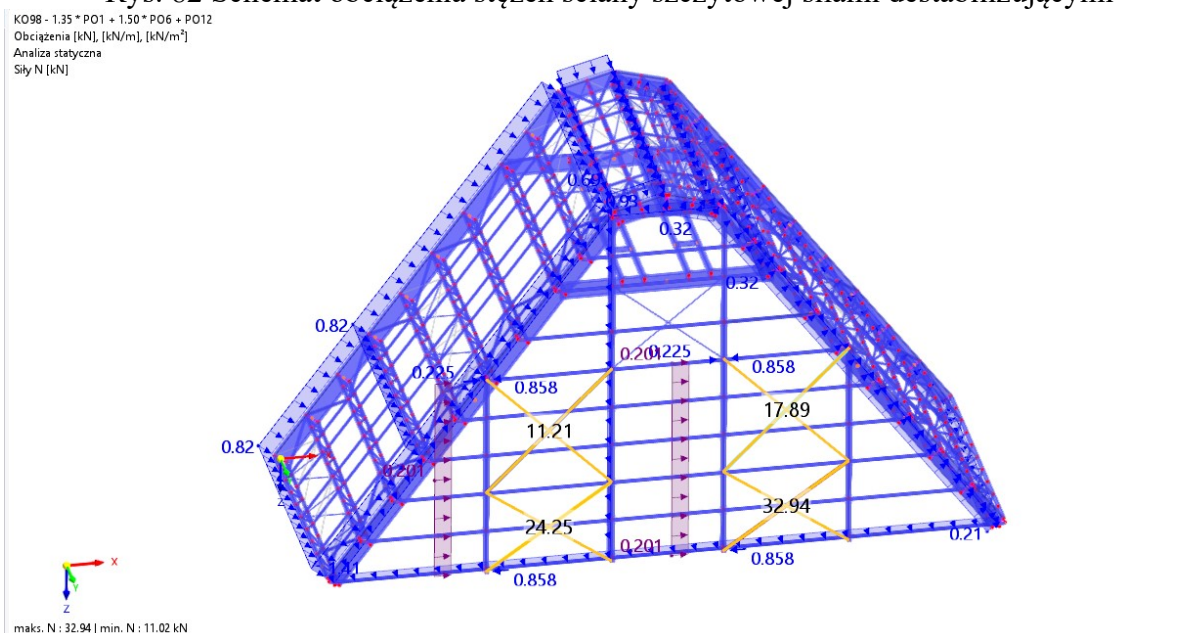
$$e_0 = \frac{L}{250} = \frac{17.08 \text{ m}}{250} = 0.0683 \text{ m} - \text{zależne od krzywej wyboczenia (a)}$$

Siła równoważąca:

$$F = \frac{4 * N_{\text{Ed}} * e_0}{L} = \frac{4 * 53.63 \text{ kN} * 0.0683 \text{ m}}{17.08 \text{ m}} = 0.858 \text{ kN}$$



Rys. 82 Schemat obciążenia stężeń ściany szczytowej siłami destabilizującymi



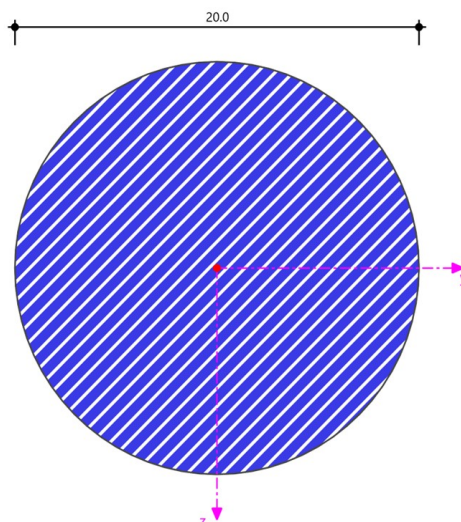
Rys. 83 Kombinacja wywołująca największe rozciąganie w stężeniach ściany szczytowej
 $1.35 \cdot cw + 1.5 \cdot w + 1.0 \cdot \text{siły dst.}$

Maksymalna siła rozciągająca stężenie prętowe $N_{Ed} = 32.94 \text{ kN}$

4.8.2 Wymiarowanie stężeń prętowych

Przekrój pełny $\phi 20$

14 - R 20 | EN 10060:2003 | ArcelorMittal (2018)



Rys. 84 Rysunek przekroju poprzecznego pręta $\phi 20$

$A_0 = 3.14 \text{ cm}^2$ - pole przekroju poprzecznego

$f_y = 355 \text{ MPa}$ - granica plastyczności

$\gamma_{M2} = 1.25$ - współczynnik bezpieczeństwa

Nośność przekroju stężenia w miejscu gwintu (śruby rzymskiej):

$$N_{pl,Rd} = \frac{0.9 \cdot A_0 \cdot f_y}{\gamma_{M2}} = \frac{0.9 \cdot 3.14 \text{ cm}^2 \cdot 355 \text{ MPa}}{1.25} = 80.258 \text{ kN}$$

Warunek nośności:

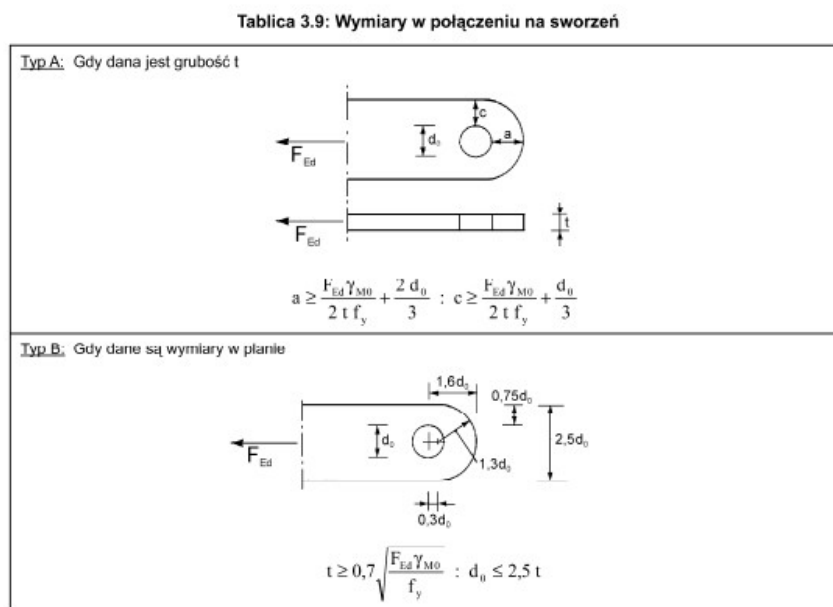
$$\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} = \frac{32.94 \text{ kN}}{80.258 \text{ kN}} = 0.410 \leq 1.0 - \text{warunek spełniony}$$

4.9 Wymiarowanie połączeń

4.9.1 Wymiarowanie przegubowego połączenia na sworzeń

Wymiarowanie połączenia na sworzeń przeprowadzone jest zgodnie z rozdziałem 3.13 normy [PN-EN 1993-1-8].

Dobór wymiarów elementu:



Rys. 85 Wymiary elementu wg. [7]

Połączenie projektowane jest na największą siłę osiową, której wartość wynosi:
 $F_{Ed} = 607.44 \text{ kN}$ - jest to siła występująca w wymiarowanym ryglu ramy głównej.

Gatunek stali blachy: S355JR, granica plastyczności: $f_y = 355 \text{ MPa}$, gdy $t \leq 40 \text{ mm}$

Wytrzymałość na rozciąganie: $f_u = 510 \text{ MPa}$, gdy $t \leq 40 \text{ mm}$

Gatunek stali sworznia: S355JR, granica plastyczności: $f_y = 335 \text{ MPa}$, gdy $t > 40 \text{ mm}$

Wytrzymałość na rozciąganie: $f_u = 470 \text{ MPa}$, gdy $t > 40 \text{ mm}$

Współczynniki częściowe:

$$\gamma_{M0} = 1.0; \gamma_{M2} = 1.25$$

Dobór minimalnej grubości blach:

$$t_1 = 0.7 * \sqrt{\frac{F_{Ed} * \gamma_{M0}}{f_y}} = 0.7 * \sqrt{\frac{607.44 \text{ kN} * 1}{355 \text{ MPa}}} = 28.956 \text{ mm} \rightarrow t = 36 \text{ mm}$$

Dobór średnicy sworznia:

$$d \leq 2.5 * t = 2.5 * 36 \text{ mm} = 90 \text{ mm} \rightarrow d = 52 \text{ mm} - \text{średnica sworznia}$$

$$d_0 = d + 2 \text{ mm} = 52 \text{ mm} + 2 \text{ mm} = 54 \text{ mm} - \text{średnica otworu}$$

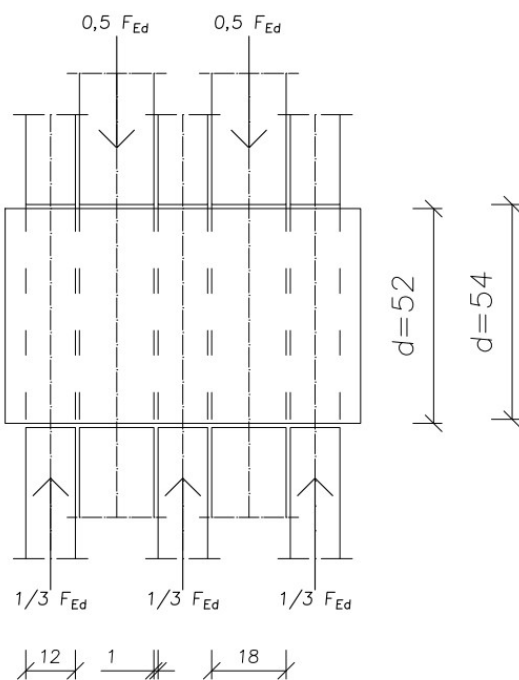
Dobór pozostałych wymiarów:

$$1) 2.5 * d_0 = 2.5 * 54 \text{ mm} = 135 \text{ mm}$$

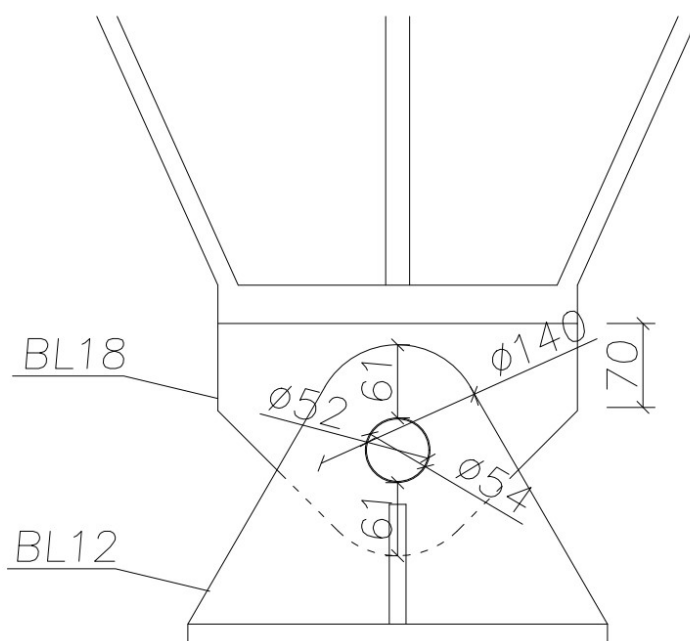
$$2) a \geq \frac{F_{Ed} * \gamma_{M0}}{2 * t * f_y} + \frac{2 * d_0}{3} = \frac{607.44 \text{ kN} * 1.0}{2 * 36 \text{ mm} * 355 \text{ MPa}} + \frac{2 * 54 \text{ mm}}{3} = 59.765 \text{ mm}$$

$$3) c \geq \frac{F_{Ed} * \gamma_{M0}}{2 * t * f_y} + \frac{d_0}{3} = \frac{607.44 \text{ kN} * 1.0}{2 * 36 \text{ mm} * 355 \text{ MPa}} + \frac{54 \text{ mm}}{3} = 41.765 \text{ mm}$$

$$a = 12 \text{ mm}; b = 18 \text{ mm}; c = 1 \text{ mm}$$



Rys. 86 Szkic połączenia w przekroju



Rys. 87 Szkic połączenia w widoku z boku

Obliczeniowa nośność sworznia:

- Nośność sworznia na ścinanie w jednej płaszczyźnie:

$$F_{v,Rd} = \frac{0.6 * f_u * A}{\gamma_{M2}} = \frac{0.6 * 470 \text{ MPa} * 2123.717 \text{ mm}^2}{1.25} = 479.110 \text{ kN}$$

, gdzie:

$$A = \frac{\pi * d^2}{4} = \frac{3.142 * (52 \text{ mm})^2}{4} = 2123.717 \text{ mm}^2 - \text{pole przekroju sworznia}$$

$$1) \frac{\frac{F_{Ed}}{3}}{F_{v,Rd}} = \frac{\frac{607.44 \text{ kN}}{3}}{479.110 \text{ kN}} = 0.423 \leq 1.0 - \text{warunek spełniony}$$

Nośność na docisk blachy i sworznia:

$$F_{b,Rd} = \frac{1.5 * t * d * f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{1.5 * 36 \text{ mm} * 52 \text{ mm} * 355 \text{ MPa}}{1.0} = 996.84 \text{ kN}$$

$$1) \frac{F_{Ed}}{F_{b,Rd}} = \frac{607.44 \text{ kN}}{996.84 \text{ kN}} = 0.609 \leq 1.0 - \text{warunek spełniony}$$

Moment zginający sworzeń:

$$M_{Ed} = \left(\frac{F_{Ed}}{8} \right) * (6 * c + 3 * a + 2 * b) =$$

$$\left(\frac{607.44 \text{ kN}}{8} \right) * (6 * 1 \text{ mm} + 3 * 12 \text{ mm} + 2 * 18 \text{ mm}) = 5.923 \text{ kNm}$$

Nośność sworznia na zginanie:

$$M_{Rd} = \frac{1.5 * W_{el} * f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{1.5 * 13804.158 \text{ mm}^3 * 335 \text{ MPa}}{1.0} = 6.937 \text{ kNm}$$

gdzie:

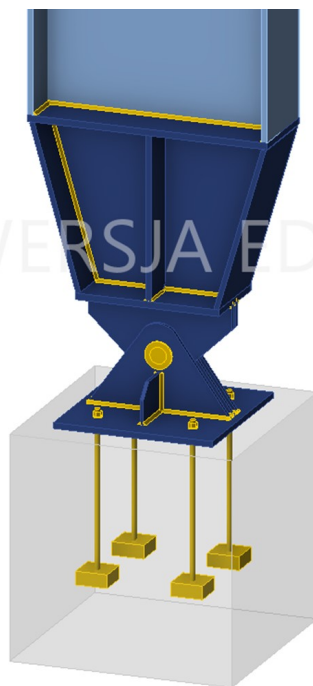
$$W_{el} = \frac{\pi * d^3}{32} = \frac{3.142 * (52 \text{ mm})^3}{32} = 13804.158 \text{ mm}^3 - \text{wskaźnik na zginanie}$$

$$1) \frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} = \frac{5.923 \text{ kNm}}{6.937 \text{ kNm}} = 0.854 \leq 1.0 \text{ warunek spełniony}$$

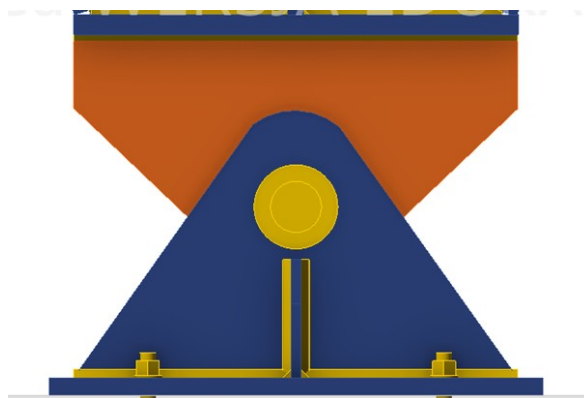
Nośność sworznia przy ścinaniu i zginaniu:

$$\left(\frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} \right)^2 + \left(\frac{\frac{F_{Ed}}{3}}{F_{v,Rd}} \right)^2 = \left(\frac{5.923 \text{ kNm}}{6.937 \text{ kNm}} \right)^2 + \left(\frac{\frac{607.44 \text{ kN}}{3}}{479.110 \text{ kN}} \right)^2 = 0.908$$

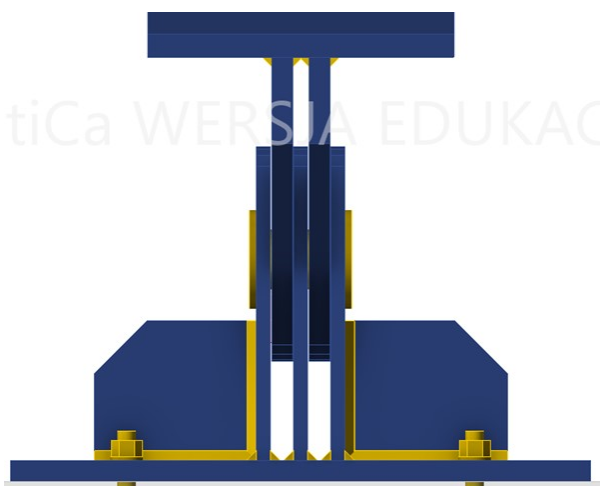
W celu sprawdzenia obliczeń tradycyjnych, zamodelowano badane połączenie w programie IdeaStatiCa, służącym do obliczeń połączeń konstrukcji stalowych i betonowych.



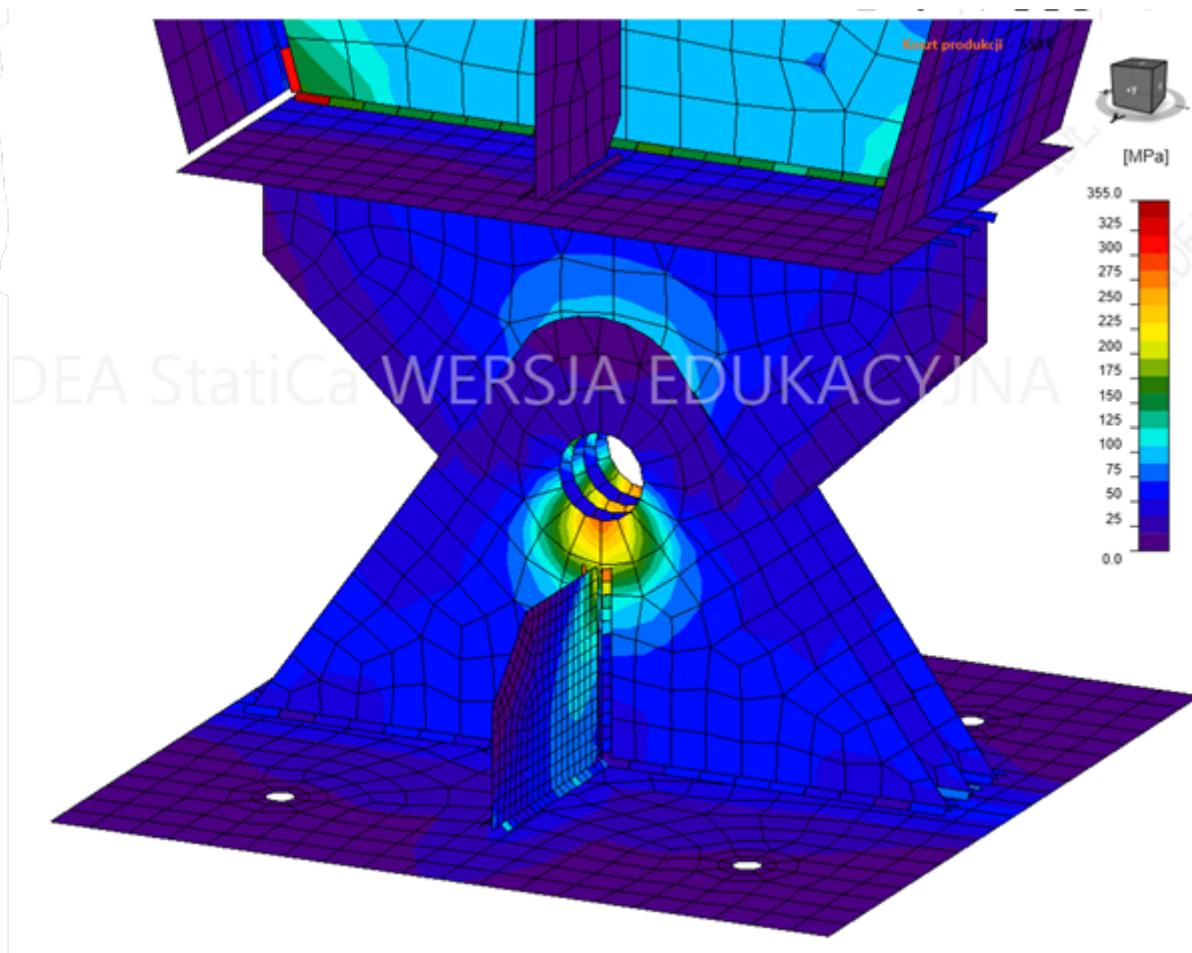
Rys. 88 Model badanego połączenia



Rys. 89 Detal sworznia



Rys. 90 Widok z boku



Rys. 91 Mapa naprężeń w połączeniu

Sprawdzenie sworzni dla efektu ekstremalnego obciążenia

	Status	Pozycja	Klasa	Obciążenia	$F_{v,Ed}$ [kN]	M_{Ed} [kNm]	$F_{v,Rd}$ [kN]	$F_{b,Rd}$ [kN]	M_{Rd} [kNm]	U_{ts} [%]	U_{tb} [%]	U_{tsb} [%]
>	✓	P5	D52 S 355	LE1	203.2	2.8	499.5	332.3	7.4	61.2	38.1	31.1

Rys. 92 Fragment wyciągu z obliczeń dla sworzni w programie obliczeniowym

4.9.2 Wymiarowanie sztywnego połączenia doczołowego pomostu roboczego z ryglem ramy

Dobór wymiarów geometrycznych wg [9]:

Minimalna grubość blachy czołowej, minimalizująca ryzyko wystąpienia efektu dźwigni:

$$t_{\min} = d * \left(\frac{R_m}{1000 \text{ MPa}} \right)^{\left(\frac{1}{3} \right)} = 20 \text{ mm} * \left(\frac{800 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{1000 \text{ MPa}} \right)^{\left(\frac{1}{3} \right)} = 18.566 \text{ mm},$$

gdzie:

$d = 20 \text{ mm}$ - średnica trzpienia śruby M20

$$R_m = 800 \frac{N}{mm^2} - \text{minimalna wytrzymałość śruby na rozciąganie}$$

Przyjmuję blachę o grubości $t = 20$ mm

Warunki konstrukcyjne:

1) Min. odległość śrub od krawędzi blachy:

$$1.2 * d_0 = 1.2 * 22 \text{ mm} = 26.4 \text{ mm},$$

gdzie:

$$d_0 = d + 2 \text{ mm} = 20 \text{ mm} + 2 \text{ mm} = 22 \text{ mm} - \text{otwór dla śruby M20}$$

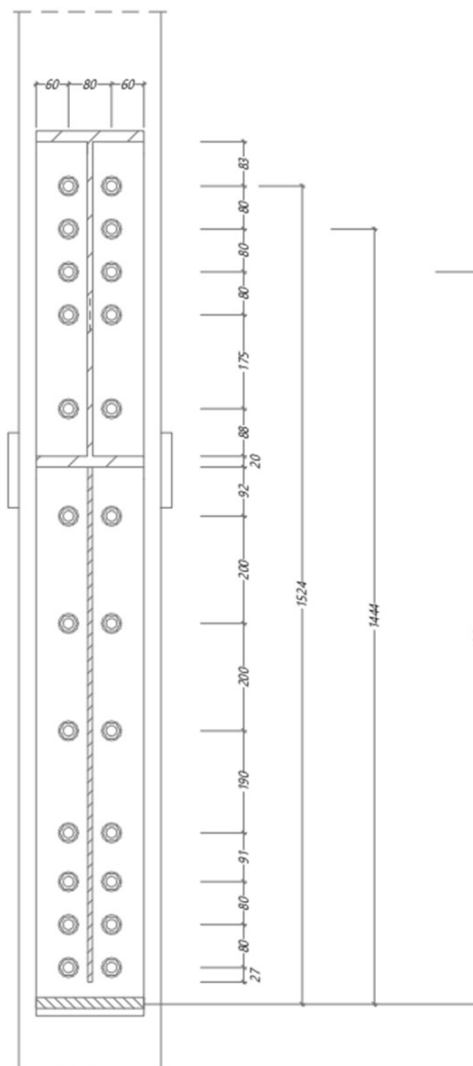
2) Maksymalny rozstaw osiowy rzędów śrub:

$$\min(14 * t, 200 \text{ mm}) = \min(14 * 20 \text{ mm}, 200 \text{ mm}) = 200 \text{ mm}$$

3) Minimalny rozstaw osiowy śrub:

$$2.4 * d_0 = 2.4 * 22 \text{ mm} = 52.8 \text{ mm}$$

Warunki konstrukcyjne są spełnione



Rys. 93 Szkic projektowanego połączenia

Nośności śrub:

$S_{Rt} = 132 \text{ kN}$ - nośność obliczeniowa śruby na rozciąganie (M20 8.8)

$S_{R,r} = 0.85 * S_{Rt} = 0.85 * 132 \text{ kN} = 112.2 \text{ kN}$ - nośność śrub z warunku rozwarcia styku

Doczołowe połączenie zginane momentem M powinno spełniać warunek

$$M \leq M_{Rj},$$

gdzie:

$$M_{Rj} = S_{Rt} * (m_1 * \omega_{t1} * y_1 + m_2 * \omega_{t2} * y_2 + m_3 * \omega_{t3} * y_3) =$$

$$132 \text{ kN} * (2 * 1 * 1524 \text{ mm} + 2 * 0.8 * 1444 \text{ mm} + 2 * 0.6 * 1364 \text{ mm}) = 923.4 \text{ kNm}$$

Części składowe:

$m_1 = 2$ - liczba śrub w 1-szym szeregu

$m_2 = 2$

$m_3 = 2$

$\omega_{t1} = 1$ - uśredniona dla 1-szego szeregu współczynnik rozdziału obciążenia wg tab 7.4 [9]

$\omega_{t2} = 0.8$

$\omega_{t3} = 0.6$

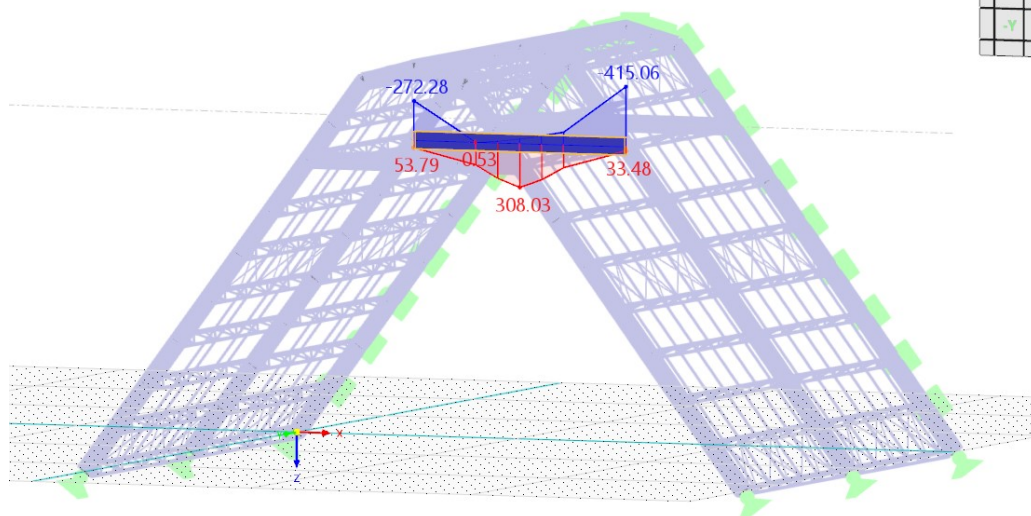
$y_1 = 1524 \text{ mm}$ - ramię działania sił w śrubach 1-szego szeregu względem potencjalnej osi obrotu

$y_2 = 1444 \text{ mm}$

$y_3 = 1364 \text{ mm}$

Warunek nośności z warunku zerwania śrub:

iowa - Równ. 6.10a i 6.10b



Rys. 94 Obwiednia momentów zginających w podeście roboczym - $M_{Ed} = 415.1 \text{ kNm}$

$$1) \frac{M_{Ed}}{M_{Rj}} = \frac{415.1 \text{ kNm}}{923.4 \text{ kNm}} = 0.45 \leq 1.0 - \text{warunek spełniony}$$

Warunek nośności z warunku rozwarcia styku:

$$M_{Rj} = S_{R,r} * \left[m_1 * \omega_{r1} * y_1 + m_2 * \omega_{r2} * \left(\frac{y_{2,red}^2}{y_1} \right) + m_3 * \omega_{r3} * \left(\frac{y_{3,red}^2}{y_1} \right) \right] =$$

$$112.2 \text{ kN} * \left[2 * 0.9 * 1524 \text{ mm} + 2 * 0.6 * \left(\frac{(1319 \text{ mm})^2}{1524 \text{ mm}} \right) + 2 * 0.6 * \left(\frac{(1239 \text{ mm})^2}{1524 \text{ mm}} \right) \right]$$

$$= 597.1 \text{ kNm}$$

gdzie:

$\omega_{r1} = 0.9$ - uśredniona dla 1-szego szeregu współczynnik rozdziału obciążenia wg tab 7.4 [9]

$\omega_{r2} = 0.6$

$\omega_{r3} = 0.6$

$y_{2,red} = y_2 - \frac{h}{6} = 1444 \text{ mm} - \frac{750 \text{ mm}}{6} = 1319 \text{ mm}$ - zredukowane ramię działania siły ze względu na wysokość elementu $> 400 \text{ mm}$

$y_{3,red} = y_3 - \frac{h}{6} = 1364 \text{ mm} - \frac{750 \text{ mm}}{6} = 1239 \text{ mm}$

Warunek nośności:

$$1) \frac{M_{Ed}}{M_{Rj}} = \frac{415.1 \text{ kNm}}{597.1 \text{ kNm}} = 0.695 \leq 1.0 - \text{warunek spełniony}$$

Sprawdzenie ryzyka wystąpienia efektu dźwigni wg rozdziału 6.6 [10]

$$\text{Grubość obliczeniowa blachy: } t_0 = 2 * \sqrt{\frac{c * S_{Rt}}{b_s * f_d}} = 2 * \sqrt{\frac{16 \text{ mm} * 132 \text{ kN}}{72 \text{ mm} * 305 \text{ MPa}}} = 19.614 \text{ mm}$$

gdzie:

$f_d = 305 \text{ MPa}$ - wytrzymałość obliczeniowa stali wg. PN-90/B-3200

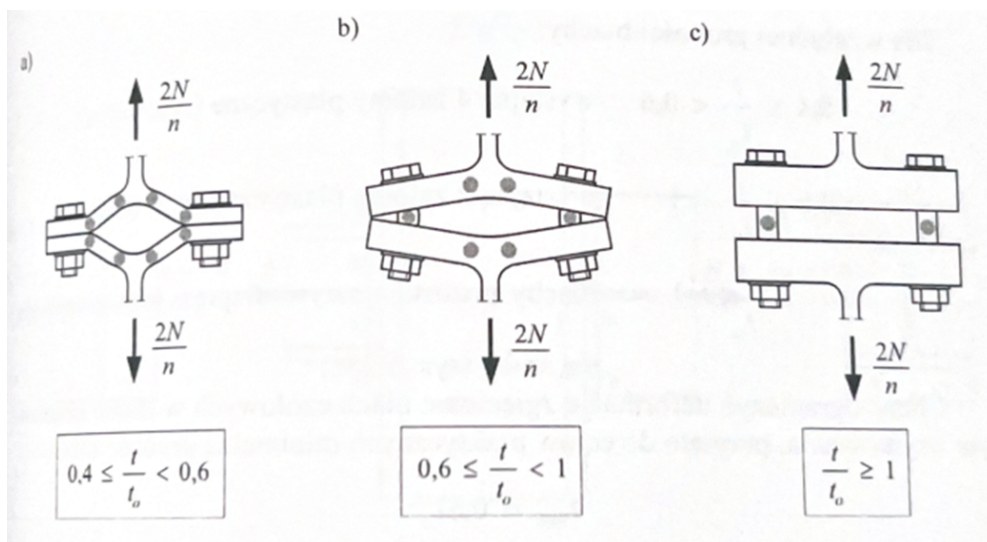
$b_s = \min(80 \text{ mm}, 2 * (16 \text{ mm} + 20 \text{ mm})) = 72 \text{ mm}$ - szerokość współpracująca

$c = 16 \text{ mm}$ - odległość krawędzi otworu od środka

Sprawdzenie warunku formy zniszczenia:

$$\frac{t}{t_0} = \frac{20 \text{ mm}}{19.614 \text{ mm}} = 1.020 \geq 1.0 - \text{efekt dźwigni nie występuje.}$$

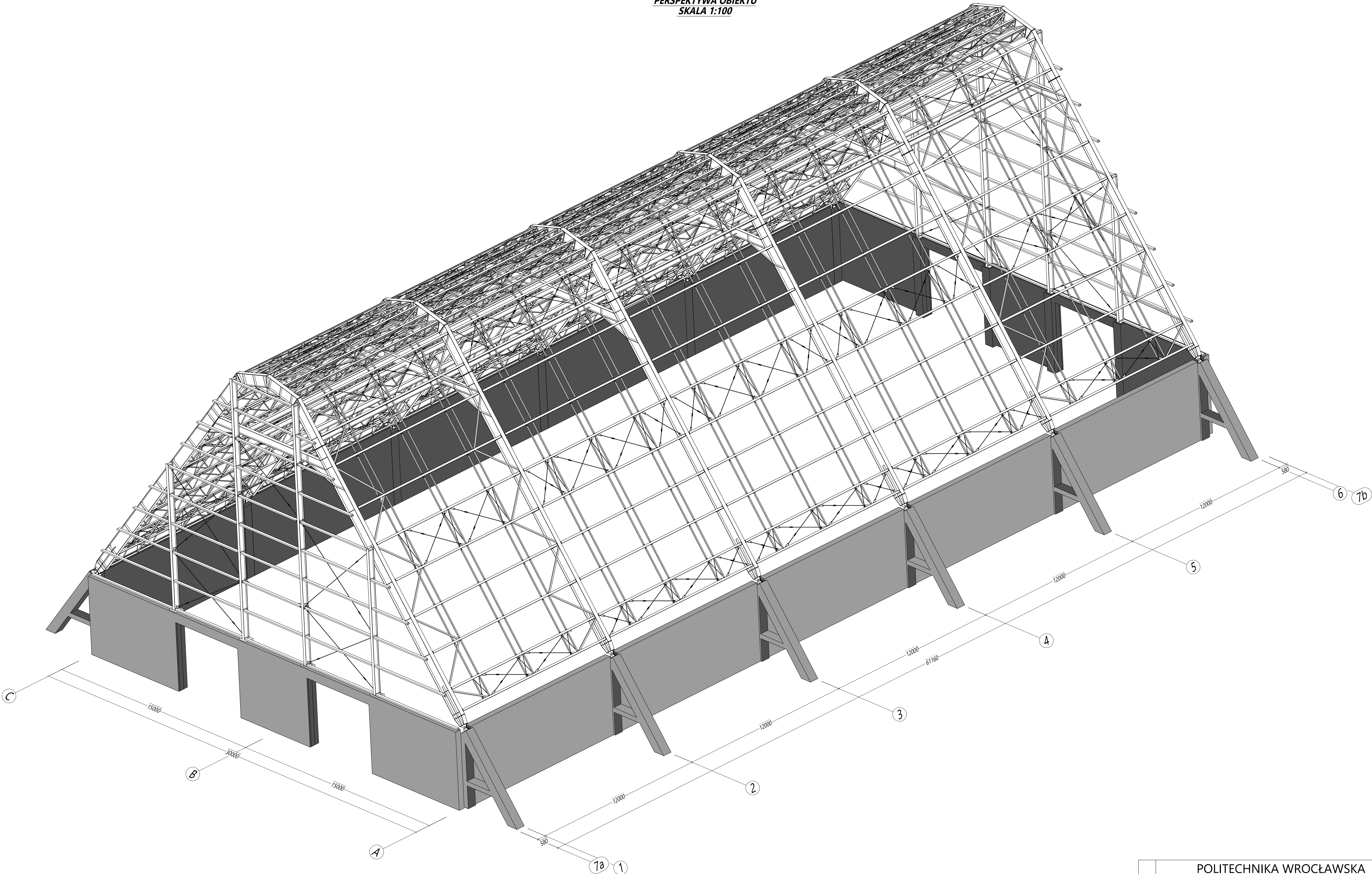
Połączenie ulega zniszczeniu przez zerwanie śrub. Prawdopodobna forma zniszczenia została przedstawiona na Rys. c.



Rys. 95 Formy zniszczenia połączenia doczołowego wg [10]

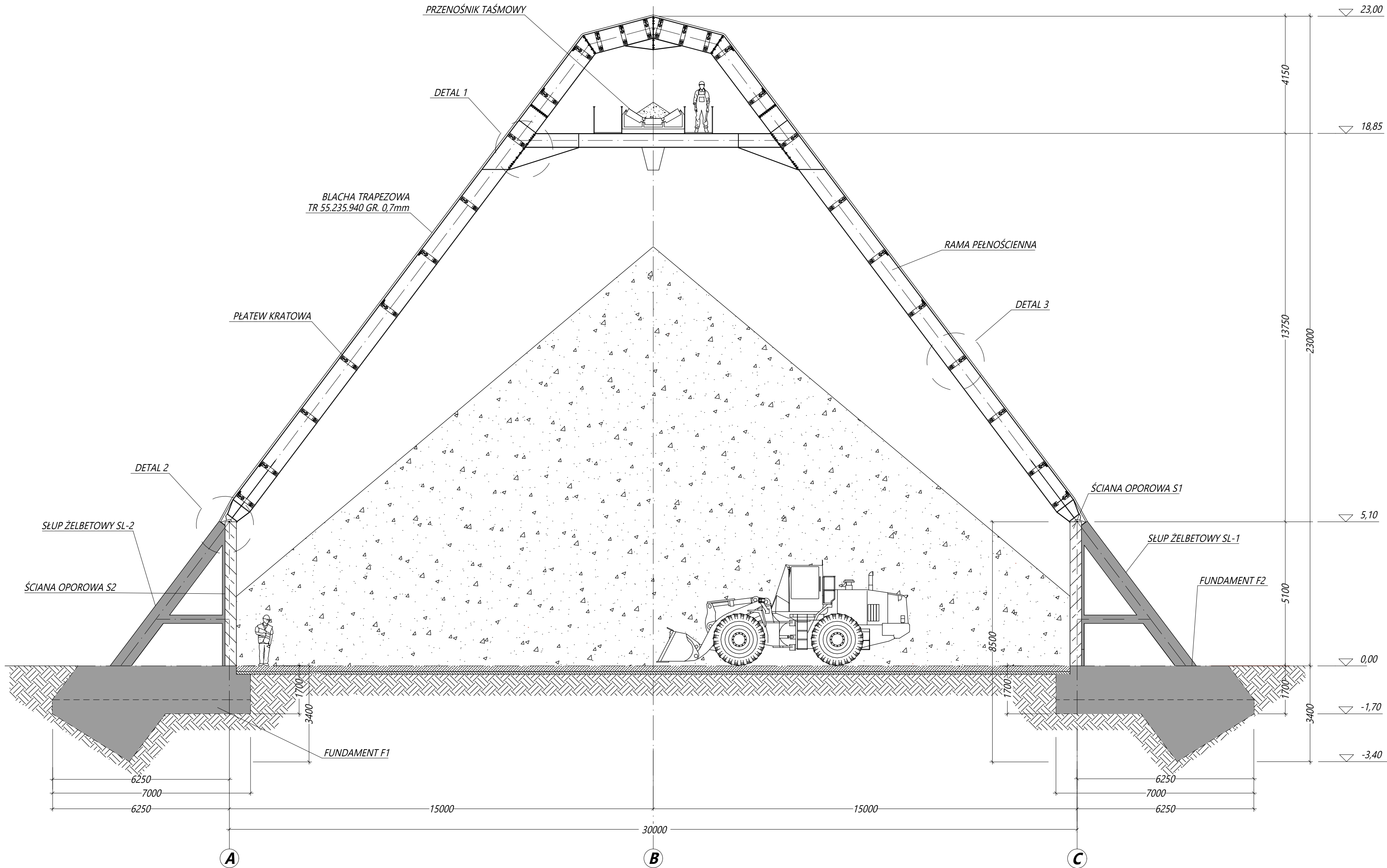
W połączeniu nie uwzględniono wpływu siły poprzecznej V . Na podstawie literatury [9] zakłada się, że przenosi się ona przez tarcie między blachami czołowymi i stolik podporowy wykonstruowany pod skosem rygla podestu roboczego.

PERSPEKTYWA OBIEKTU
SKALA 1:100



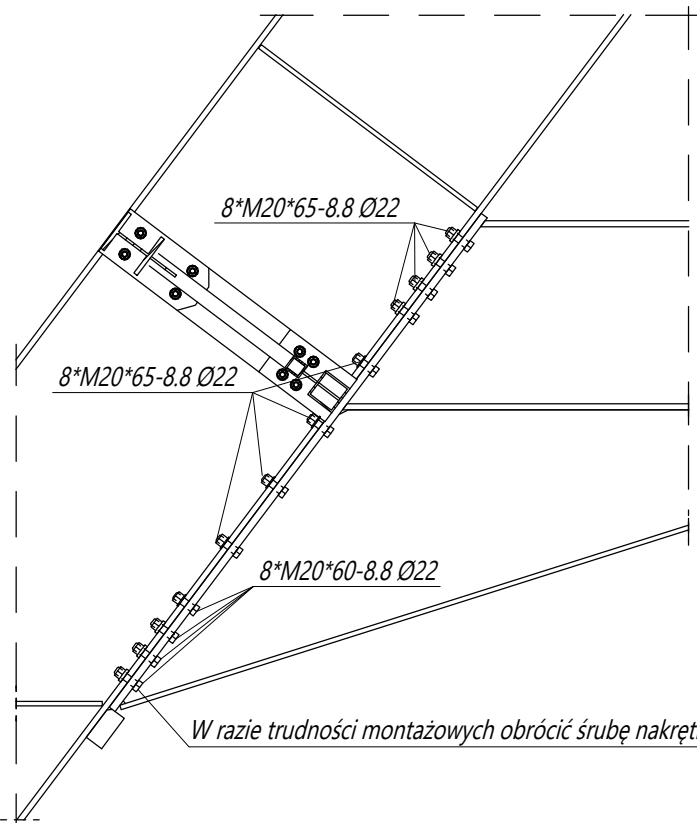
POLITECHNIKA WROCŁAWSKA					
WYDZIAŁ BUDOWNICTWA LĄDOWEGO I WODNEGO					
PROJEKT:	PROJEKT KONSTRUKCJI STALOWEJ HALI SKŁADOWANIA WAPNA				
NAZWA RYS.:	PERSPEKTYWA OBIEKTU				
RYSOWAŁ:	Filip Łukasik (265110)	PODPIS:		SKALA	NR RYS.
PROMOTOR:	dr inż. Krzysztof Marcinczak	PODPIS:		1:100	1
RECENZENT:	dr inż. Maciej Kozuch	PODPIS:			
DATA I WERSJA:	05.01.2025 wersja rysunku v1.0				

PRZĘKRÓJ POPRZECZNY
SKALA 1:100

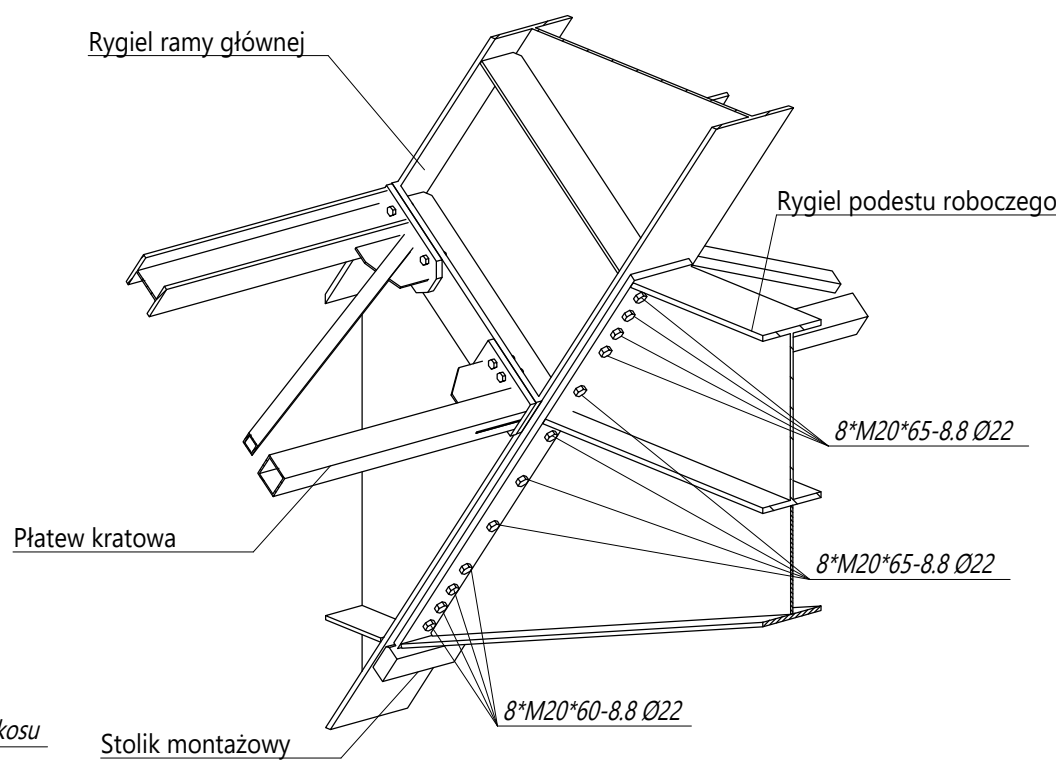


DETAL 1 - POŁĄCZENIE RYGŁA RAMY Z BELKĄ PODESTU
SKALA 1:20

WIDOK Z PRZODU

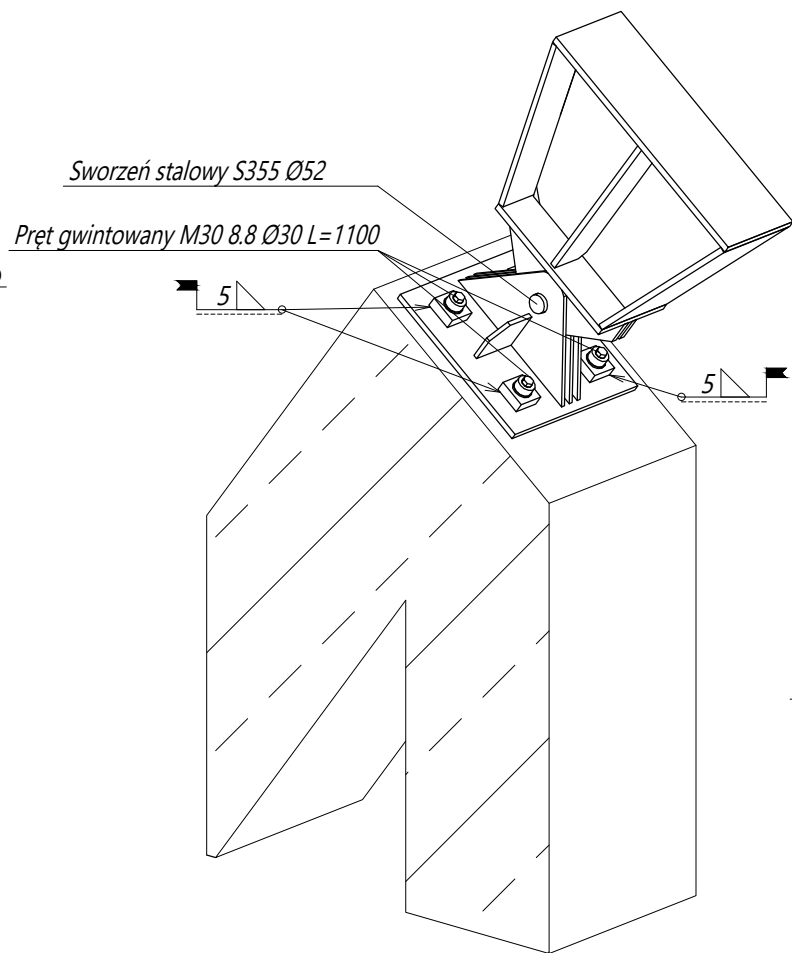


PERSPEKTYWA

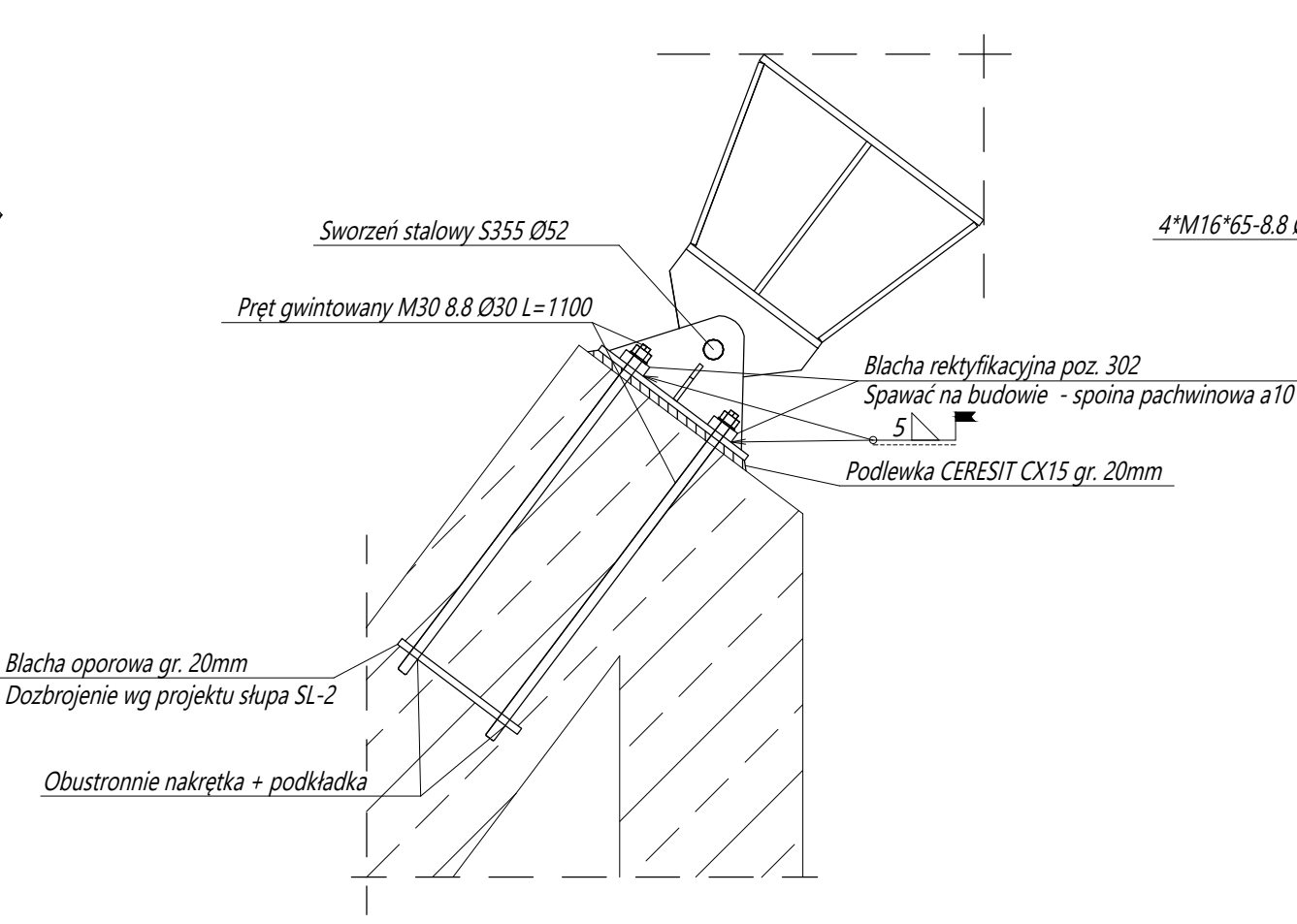


DETAL 2 - SWORZNIOWE POŁĄCZENIE RYGŁA ZE SŁUPEM
SKALA 1:20

PERSPEKTYWA

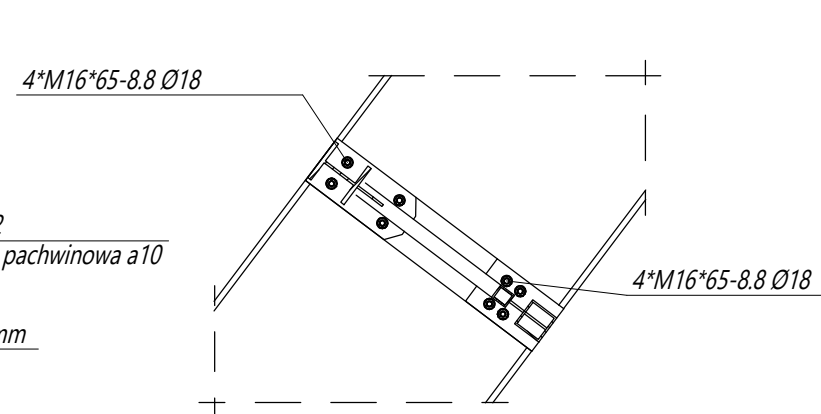


WIDOK Z PRZODU

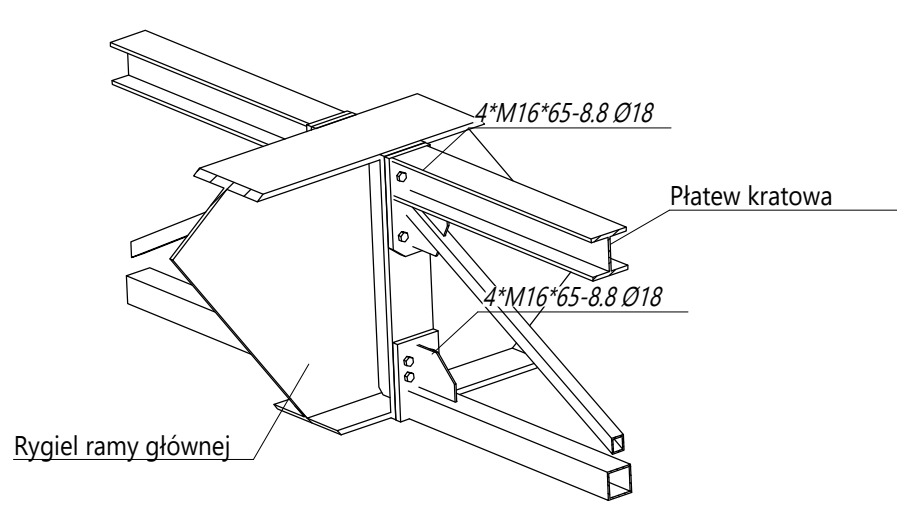


DETAL 3 - POŁĄCZENIE RYGŁA RAMY Z PŁATWIĄ KRATOWĄ
SKALA 1:20

WIDOK Z PRZODU

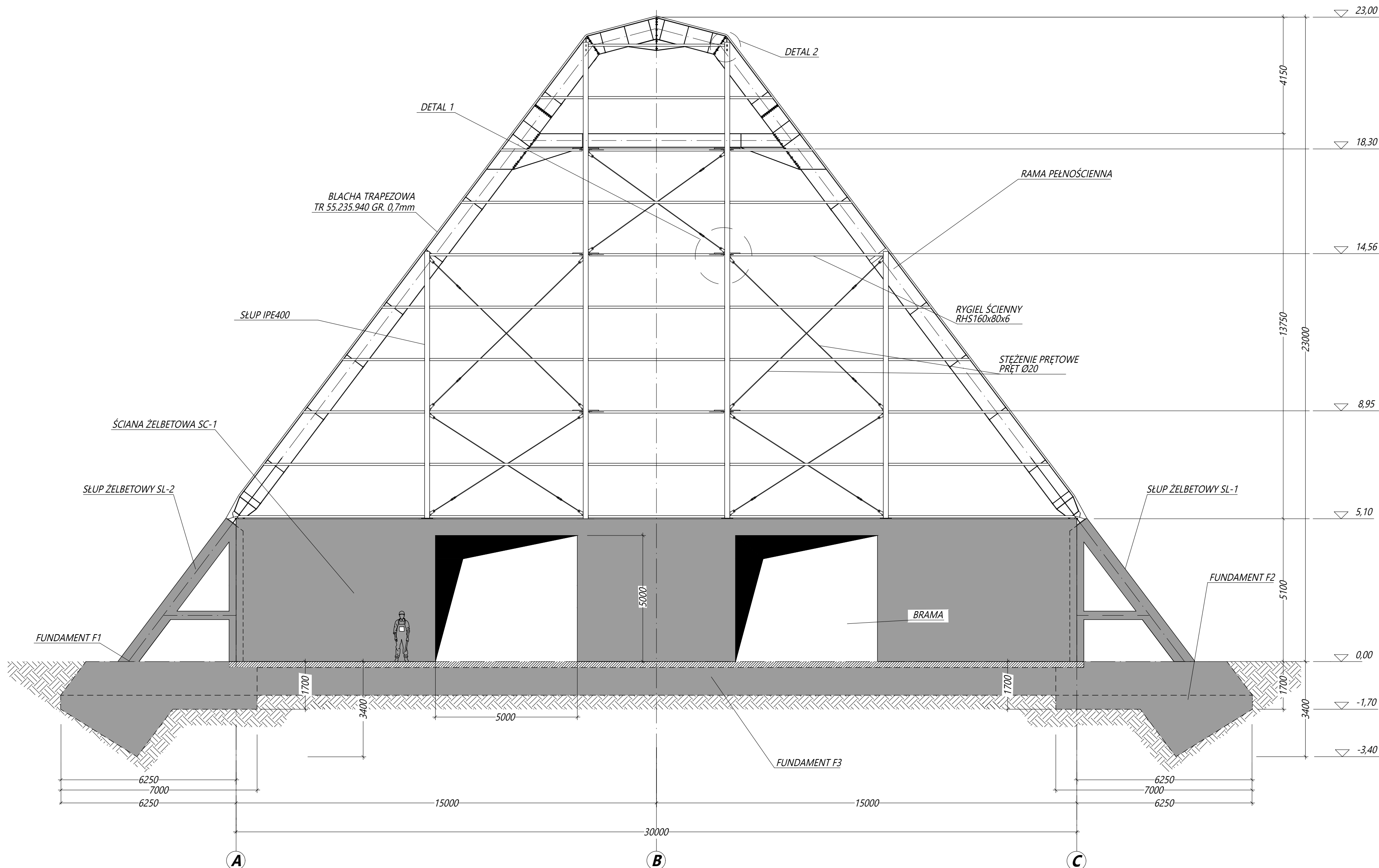


PERSPEKTYWA

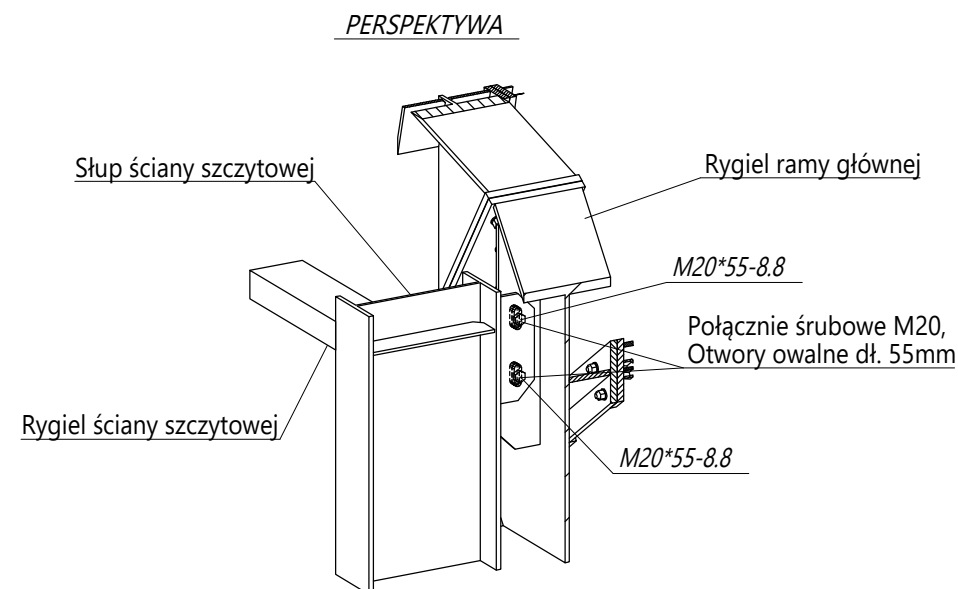
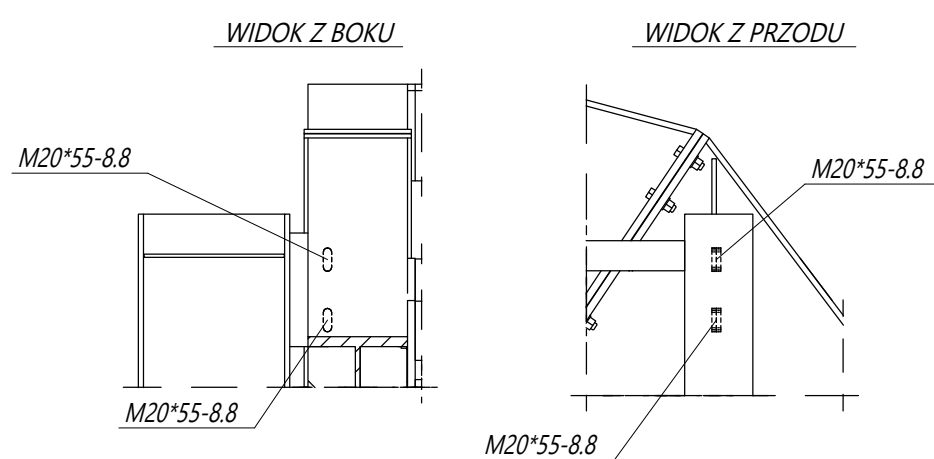


POLITECHNIKA WROCŁAWSKA						
WYDZIAŁ BUDOWNICTWA LĄDOWEGO I WODNEGO						
PROJEKT:		PROJEKT KONSTRUKCJI STALOWEJ HALI SKŁADOWANIA WAPNA				
NAZWA RYS.:		PRZĘKRÓJ POPRZECZNY				
RYSOWAŁ:		Filip Łukasik (265110)		PODPIS:	SKALA	NR RYS.
PROMOTOR:		dr inż. Krzysztof Marcinczak		PODPIS:	1:100	2
RECENZENT:		dr inż. Maciej Kozuch		PODPIS:	1:20	
DATA I WERSJA:		05.01.2025 wersja rysunku v1.0				

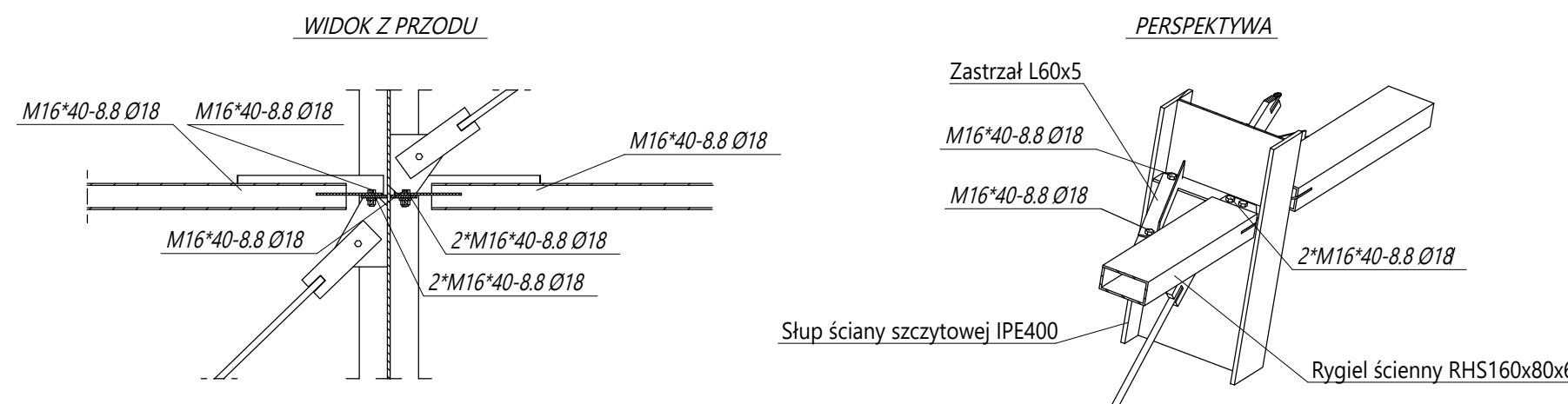
WIDOK ŚCIANY SZCZYTOWEJ
SKALA 1:100



DETAL NR 1 SKALA 1:20
POŁĄCZENIE SŁUPA ŚCIANY SZCZYTOWEJ
Z RYGIEŁ RAMY GŁÓWNEJ

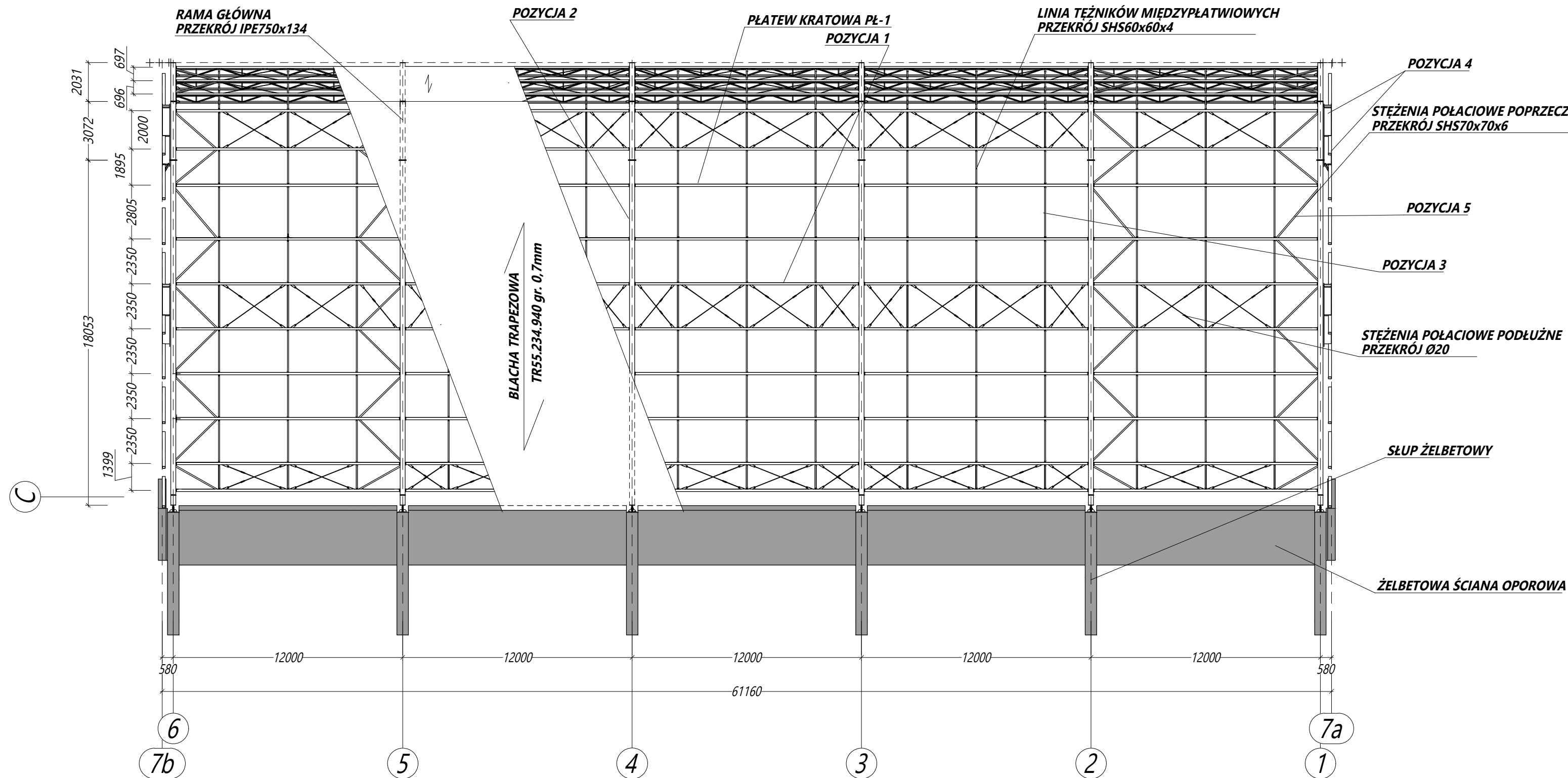


DETAL NR 2 SKALA 1:20
ZASTRZAŁ SŁUPA ŚCIANY SZCZYTOWEJ

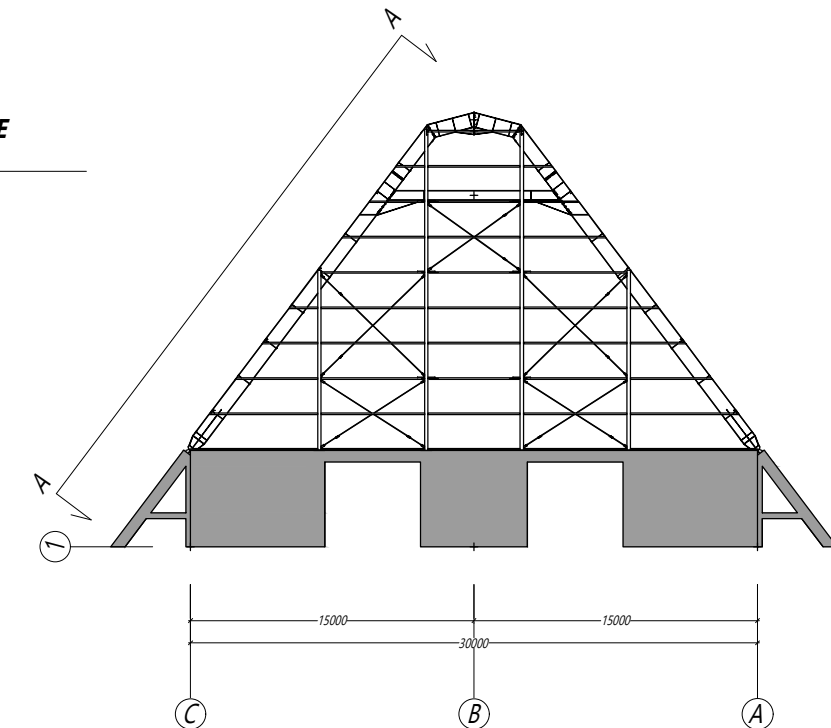


	POLITECHNIKA WROCŁAWSKA					
	WYDZIAŁ BUDOWNICTWA LĄDOWEGO I WODNEGO					
PROJEKT:	PROJEKT KONSTRUKCJI STALOWEJ HALI SKŁADOWANIA WAPNA					
NAZWA RYS.:	WIDOK ŚCIANY SZCZYTOWEJ					
RYSOWAŁ:	Filip Łukasik (265110)		PODPIS:	SKALA	NR RYS.	3
PROMOTOR:	dr inż. Krzysztof Marcinczak		PODPIS:		1:100	
RECENZENT:	dr inż. Maciej Kozuch		PODPIS:		1:20	
DATA I WERSJA:	05.01.2025 wersja rysunku v1.0					

PRZEKRÓJ A-A JEDNEJ POŁĄCZ DACHOWEJ
SKALA 1:200



WIDOK PRZEKROJU

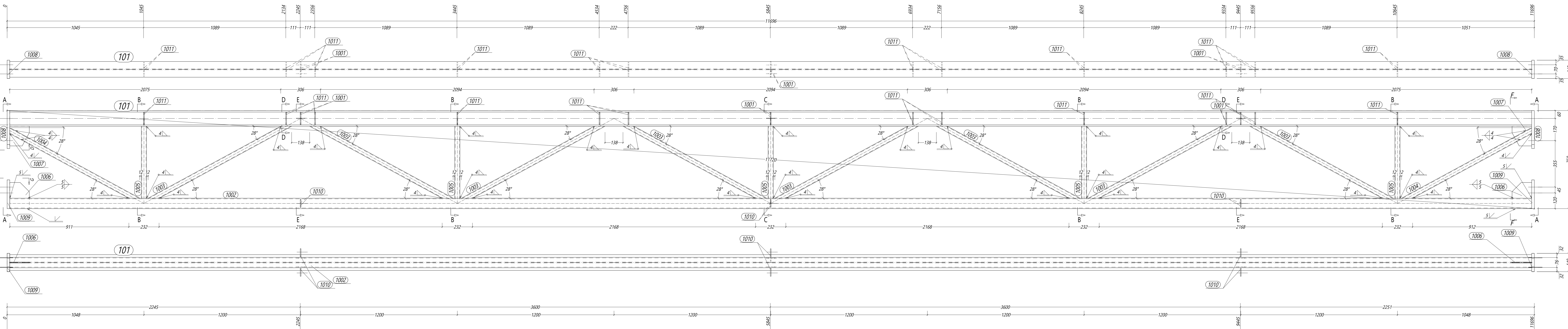


ZESTAWIENIE POZYCJI OBLICZENIOWYCH

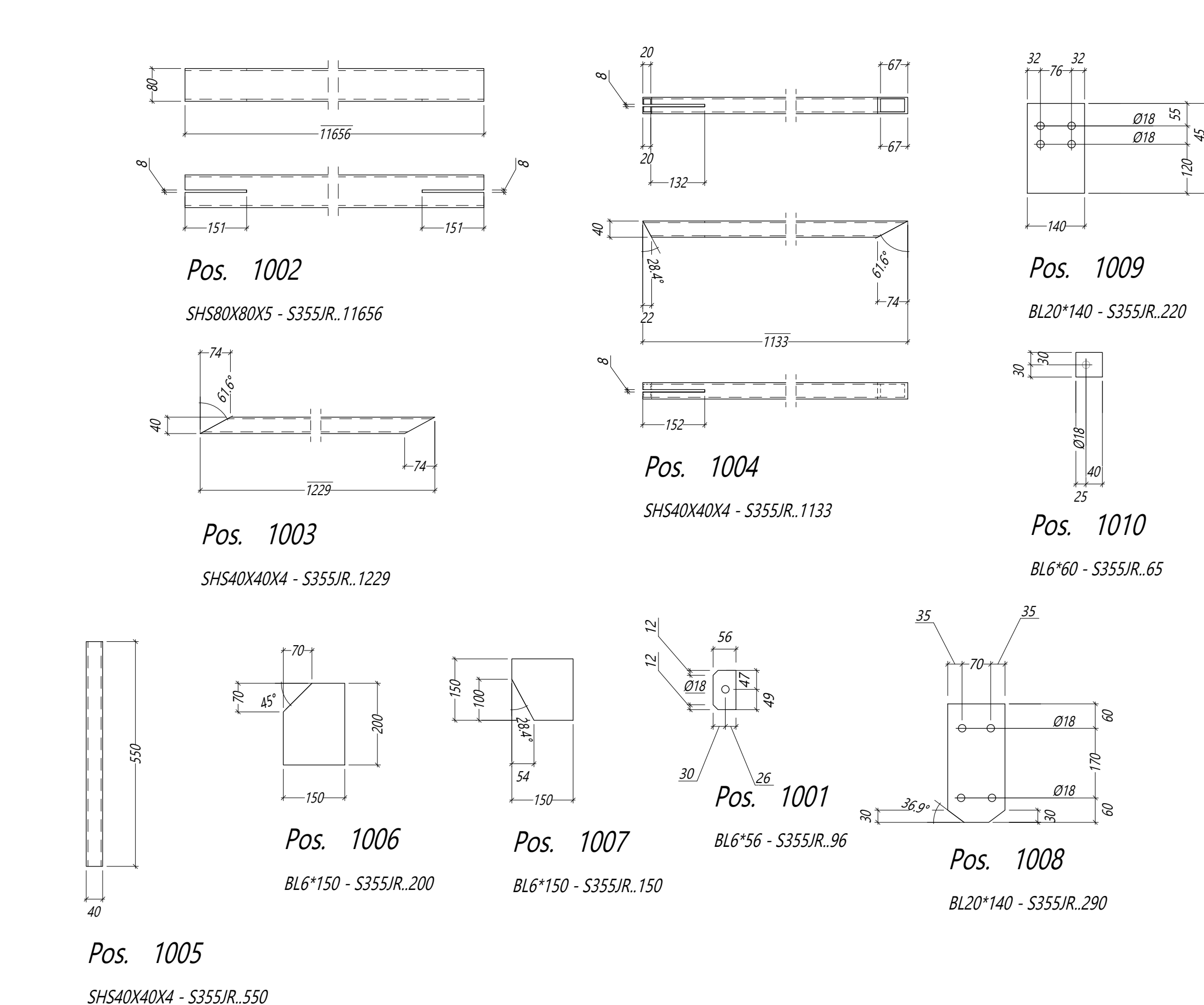
- Pozycja 1 - Płatów kratowa
- Pozycja 2 - Rama główna
- Pozycja 3 - Podwieszenia płatwi (tężniki)
- Pozycja 4 - Elementy ściany szczytowej
- Pozycja 5 - Stężenia połaciowe poprzeczne

	POLITECHNIKA WROCŁAWSKA				
	WYDZIAŁ BUDOWNICTWA LĄDOWEGO I WODNEGO				
PROJEKT:	PROJEKT KONSTRUKCJI STALOWEJ HALI SKŁADOWANIA WAPNA				
NAZWA RYS.:	PRZEKRÓJ POŁACI DACHOWEJ				
RYSOWAŁ:	Filip Łukasik (265110)	PODPIS:		SKALA	NR RYS.
PROMOTOR:	dr inż. Krzysztof Marcinczak	PODPIS:		1:200	4
RECENZENT:	dr inż. Maciej Kozuch	PODPIS:			
DATA I WERSJA:	05.01.2025 wersja rysunku v1.0				

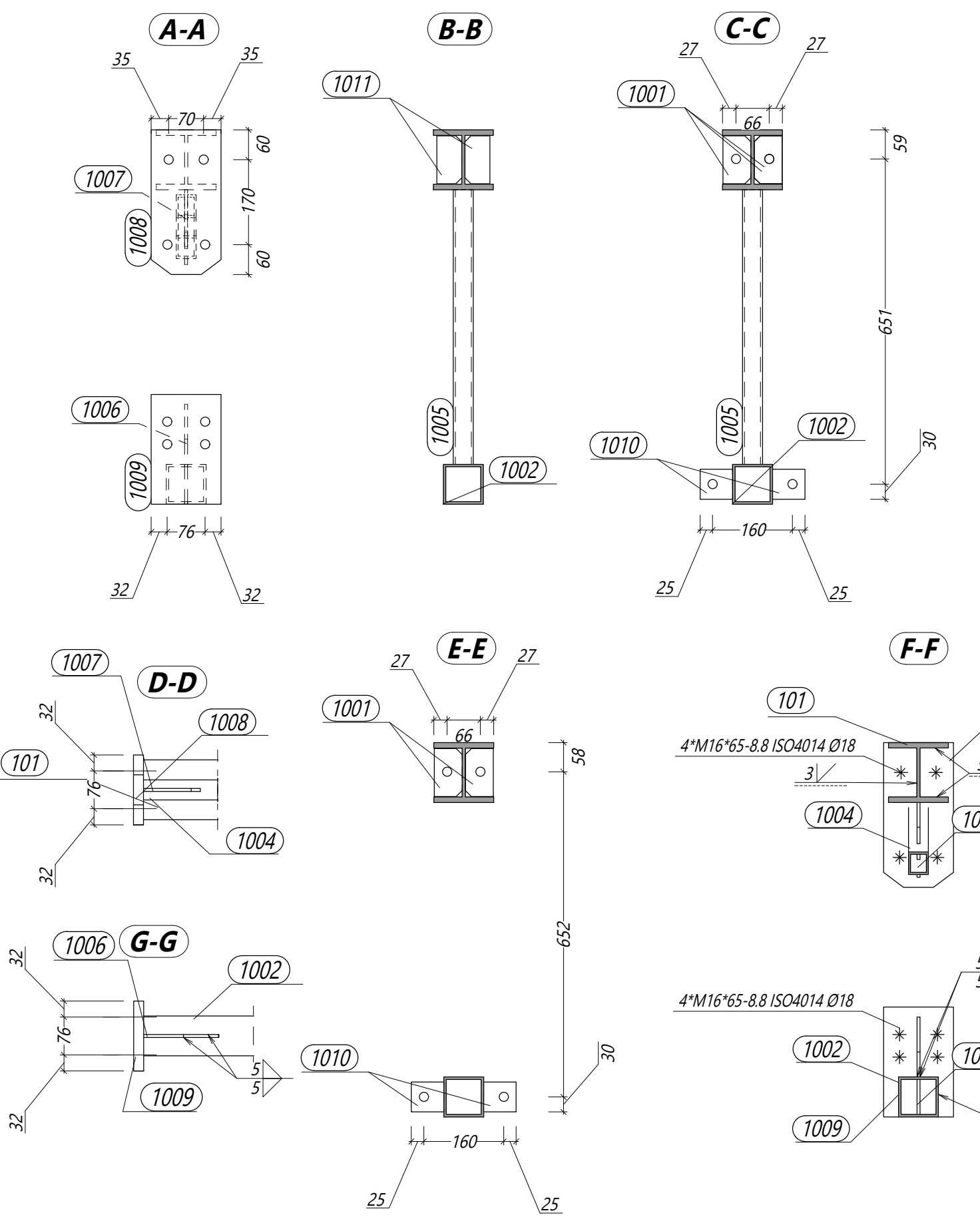
ELEMENT WYSYŁKOWY PL-1
SKALA 1:10



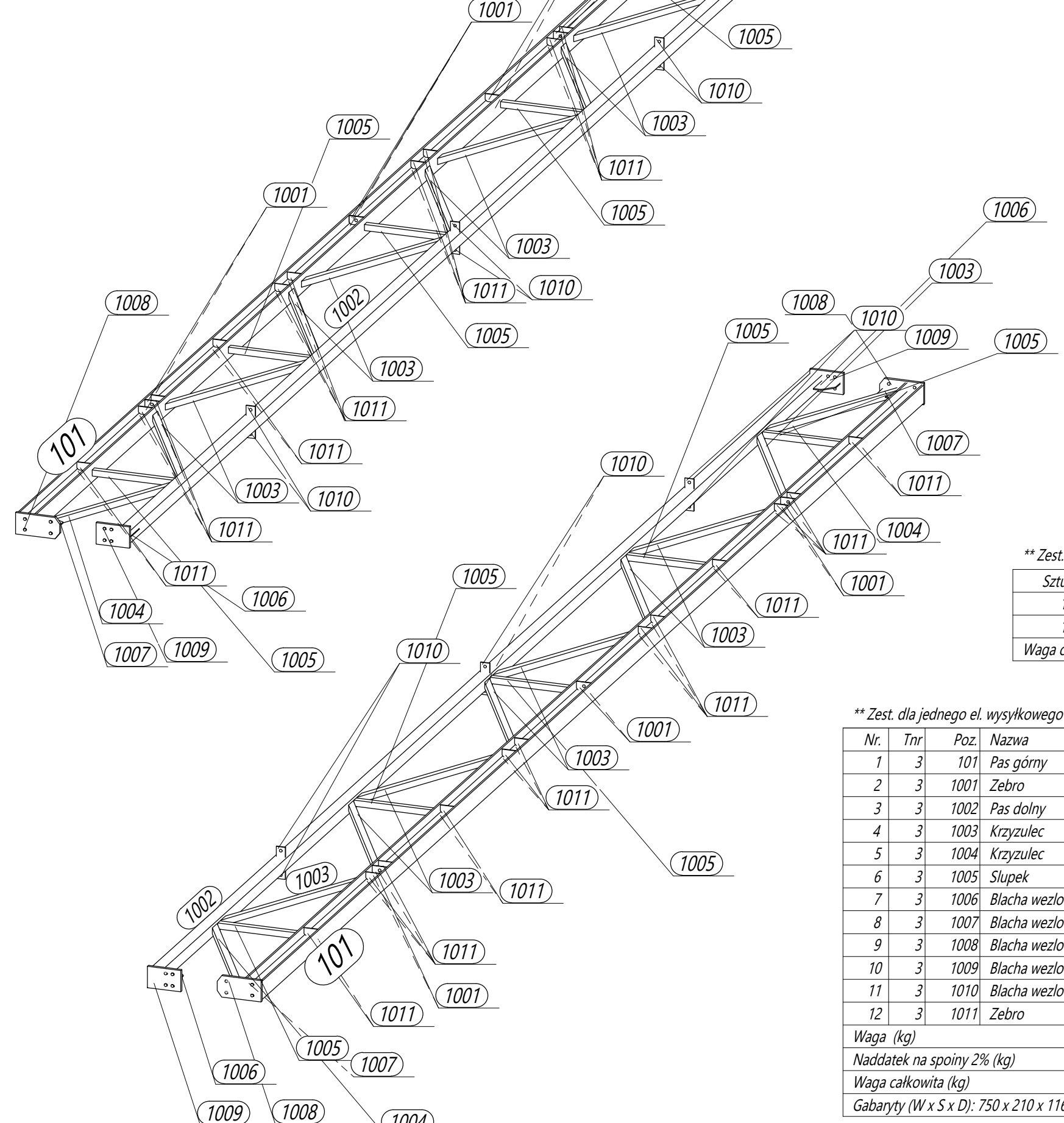
PROFILE
SKALA 1:10



PRZESKROJE
SKALA 1:10



PERSPEKTYWY ELEMENTU WYSYŁKOWEGO
SKALA 1:30



** Zest. śrub dla jednego el. wysyłkowego- Poz. 101

Sztuk	Śruby	Norma	Klasa	Waga	Ozn.
16	M16*65	4014	8.8	2.81	Montażowe
12	M16*40	4014	8.8	1.99	Montażowe
Waga całkowita (kg)				4.80	

** Zest. dla jednego el. wysyłkowego- Poz. 101

Nr.	Tnr	Poz.	Nazwa	Sztuk	Profil	Materiał	Długość	Waga	Ozn.
1	3	101	Pas górny	1	HEB120	S355JR	11656	311.2	
2	3	1001	Zebro	7	BL6*56	S355JR	96	1.8	
3	3	1002	Pas dolny	1	SHS80X80X5	S355JR	11656	138.7	
4	3	1003	Krzyżulec	8	SHS40X40X4	S355JR	1229	45.2	
5	3	1004	Krzyżulec	2	SHS40X40X4	S355JR	1133	10.4	
6	3	1005	Ślupka	5	SHS40X40X4	S355JR	550	12.6	
7	3	1006	Błacha węzłowa	2	BL6*150	S355JR	200	2.8	
8	3	1007	Błacha węzłowa	2	BL6*150	S355JR	150	2.1	
9	3	1008	Błacha węzłowa	2	BL20*140	S355JR	290	12.7	
10	3	1009	Błacha węzłowa	2	BL20*140	S355JR	220	9.7	
11	3	1010	Błacha węzłowa	6	BL6*60	S355JR	65	1.1	
12	3	1011	Zebro	24	BL6*50	S355JR	96	5.4	
Waga (kg)								553.7	
Nadatek na spoiny 2% (kg)								11.3	
Waga całkowita (kg)								565.0	
Gabaryty (W x S x D): 750 x 210 x 11696 (mm)									

UWAGI: 1. INFORMACJE WYKONAWCZE:
-kategoria produkcji PC2 wg PN-EN 1090-2
-klasa wykonania EXC2 wg PN-EN 1090-2
-poziom jakości złączy B wg PN-EN ISO 5817
-ostre kąwędzie zaokrąglić r=2 mm

2. SPÓINY:
-spoiny nieopieczane wykonać jako pachwinowe na całej długości przylegania elementów w zakresie grubości:
a=0,7mm (dla pojedynczej spoiny pachwinowej)
a=0,5mm (dla podwójnej spoiny pachwinowej)
-kontrola wizualna spoin 100%
-wszystkie technologiczne styki dozwolowe pomiędzy kształtownikami ustalać z projektantem
-wszystkie spoiny ciągłe i szczelne

3. ZABEZPIECZENIA ANTYKOROZYJNE:
3.1 PRZYGOTOWANIE POWIERZCHNI:
-powierzchnie oczyszczać metodami mechanicznymi do stopnia czystości co najmniej Sa 2 1/2 wg PN-EN ISO 8501-1
-połączenia spawne powinny być czyste, bez porów, oczyszczane bezpośrednio po spawaniu
-bezpośrednio przed malowaniem podłozę należy odfilić
-powierzchnia do malowania powinna być odfiltrowana, sucha i czysta

3.2 MALOWANIE:
-kategoria korozyjności atmosfery C3 wg PN-ISO 12944
-wymagana trwałość systemu malarskiego M wg PN-EN ISO 12944
-pieniwa warstwa - farba alikidowa S3.06 o grubości 80µm
-druga warstwa - farba alikidowa SB o grubości 40µm

[illegible]

Technical drawing of a shaft with the following dimensions and specifications:

- Overall length: 15262
- Overall diameter: $\varnothing 264$
- End flange thickness: 92
- Internal hole diameter: $\varnothing 80$
- Internal hole length: 80
- Internal hole offset from end: 80
- Internal hole offset from end: 80
- Internal hole offset from end: 175
- Internal hole offset from end: 200
- Internal hole offset from end: 200
- Internal hole offset from end: 200
- Internal hole offset from end: 190
- Internal hole offset from end: 91
- Internal hole offset from end: 80

A diagram of a rectangular plate. The horizontal dimension is labeled 264 and the vertical dimension is labeled 750.

BL16*264 - S355JR..529

A rectangle is shown with a width of 264 and a height of 450. The width is indicated by a horizontal dimension line at the bottom, and the height is indicated by a vertical dimension line on the right side.

BL18*262 - S355JR..450

Technical drawing of a mechanical part, likely a shaft or pipe, showing dimensions in millimeters. The drawing includes a side view and a cross-sectional view. The side view shows a total length of 750 mm, with a section of 120 mm at the bottom. The cross-sectional view shows a diameter of Ø18 mm and a wall thickness of 4.5 mm. Other dimensions include 76 mm, 32 mm, 60 mm, 170 mm, 355 mm, and 140 mm.

BL50*100 - S355JR..244

BL12*124 - S355JR..889

BL12*124 - S355JR..228

BL12*512 - S355JR..717

BL20*384 - S355JR..750

20

45°

20

20

20

116

512

BL16*116 - S355JR..512

BL12*124 - S355JR..717

Technical drawing of a rectangular frame with dimensions and callouts. The frame has a total width of 170 and a total height of 355. The top horizontal member is 60 high, and the bottom horizontal member is 45 high. The vertical members are 120 wide. The frame is divided into three vertical sections by two vertical lines. Callouts point to various parts: (201) points to the bottom horizontal member, (207) points to the top horizontal member, (203) points to the left vertical member, (204) points to the right vertical member, and (205) points to the central vertical member. Dimensions are indicated with arrows and numbers: 170 (total width), 355 (total height), 60 (top member height), 45 (bottom member height), 120 (vertical member width), 6 (left member width), 6 (right member width), and 6 (central member width).

Technical drawing of a rectangular frame. The overall height is 355, divided into 170 and 119. The overall width is 60, divided into 45 and 15. Callouts 2013, 2008, and 2001 point to different parts of the frame.

Diagram of a 2013-201 I-beam section. The top flange is labeled 2013 and the web is labeled 201. The total width is 92, and the web width is 80.

3.2 MALOWANIE:
-kategoria korozyjności atmosfery C3 wg PN-ISO 12944
-wymagana trwałość systemu malarskiego M wg PN-EN ISO 12944
-pierwsza warstwa - farba alkidowa S3.06 o grubości 80µm
-druga warstwa
- farba alkidowa SB o grubości 40µm

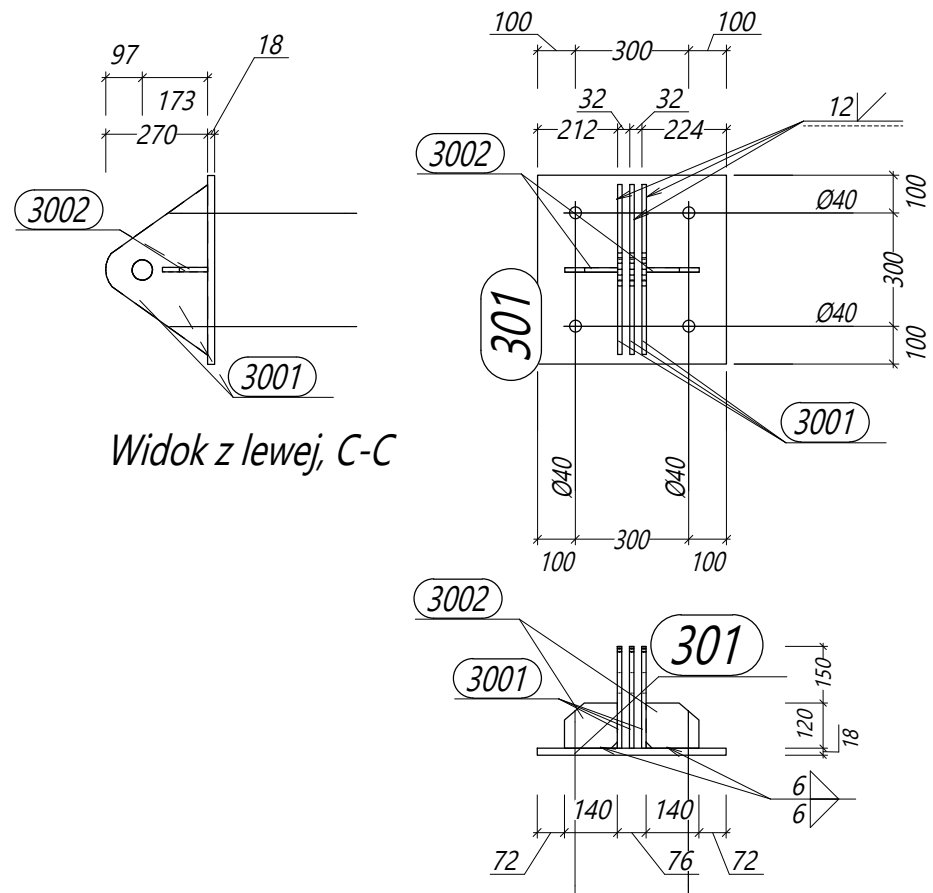
Nr.	Trr	Poz.	Nazwa	Sztuk	Profil	Materiał	Długość	Waga	Ozn.
1	4	201	Rygiel	1	1PE750*134	S355JR	17480	2340,5	
2	4	2001	Blacha	1	BL12*512	S355JR	717	34,6	
3	4	2002	Blacha	1	BL20*384	S355JR	750	45,2	
4	4	2003	Blacha	1	BL20*264	S355JR	750	31,1	
5	4	2004	Blacha	2	BL16*264	S355JR	529	35,1	
6	4	2005	Blacha	1	BL20*264	S355JR	450	18,7	
7	4	2006	Blacha	2	BL18*262	S355JR	450	33,3	
8	4	2007	Blacha	16	BL20*140	S355JR	750	263,8	
9	4	2011	Zebro	2	BL12*124	S355JR	1387	32,4	
10	4	2012	Zebro	2	BL12*124	S355JR	889	20,8	
11	4	2013	Zebro	18	BL12*124	S355JR	717	150,8	
12	4	2014	Zebro	2	BL12*124	S355JR	360	8,4	
13	4	2015	Zebro	2	BL12*124	S355JR	228	5,3	
14	4	2016	Zebro	2	BL16*116	S355JR	512	14,9	
15	4	2017	Blacha	1	BL50*100	S355JR	244	9,6	

Waga (kg)	3044.5
Nadatek na spoiny 2% (kg)	60.9
Waga całkowita (kg)	3105.4
Gabaryty (W x S x D): 801 x 12314 x 18313 (mm)	

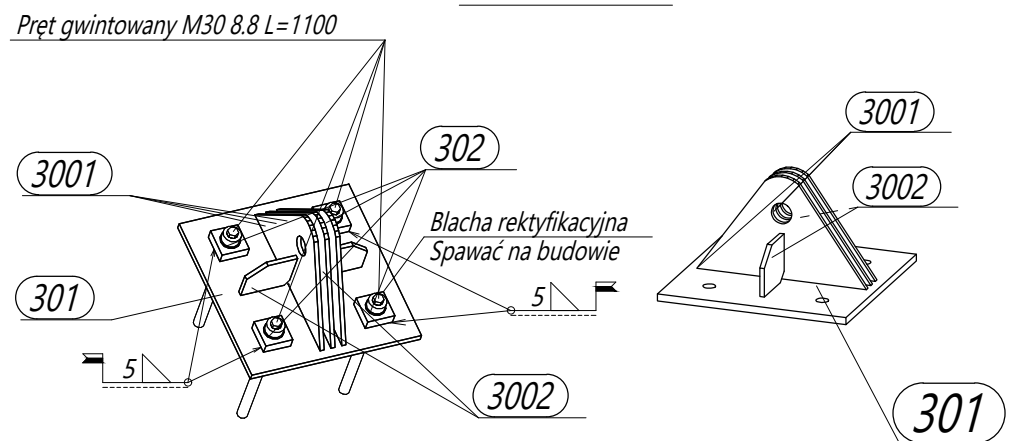
WYDZIAŁ BUDOWNICTWA LĄDOWEGO I WODNEGO

PROJEKT:	PROJEKT KONSTRUKCJI STALOWEJ HALI SKŁADOWANIA WAPNA				
NAZWA RYS.:	RYSUNEK WARSZATOWY RYGLA R-1				
RYSOWAŁ:	Filip Łukasik (265110)	PODPIS:	SKALA	NR RYS.	6
PROMOTOR:	dr inż. Krzysztof Marcinczak	PODPIS:	1:20		
RECENZENT:	dr inż. Maciej Kozuch	PODPIS:	1:50		
DATA I WERSJA:	05.01.2025wersja rysunku v1.0				

ELEMENT WYSYŁKOWY P-1
SKALA 1:20



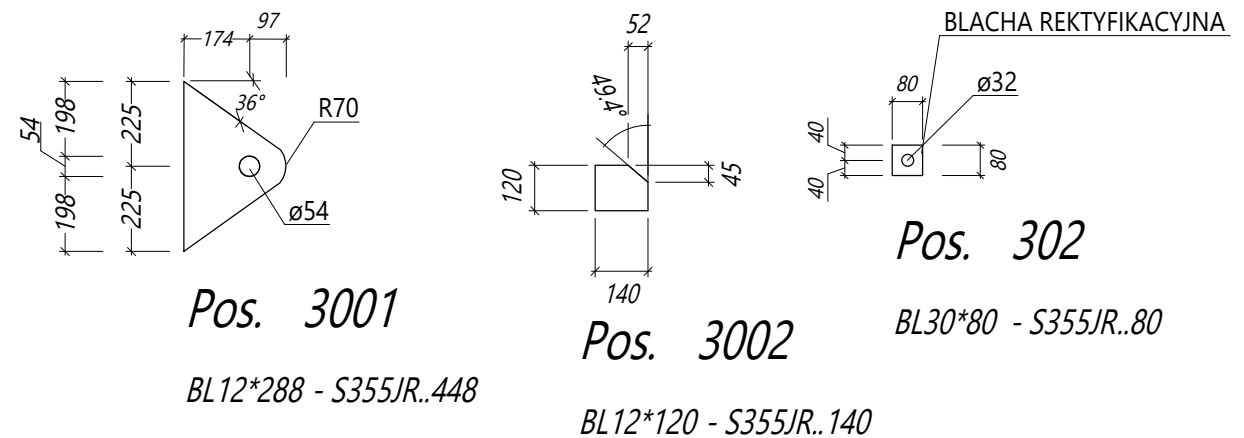
PERSPEKTYWY
SKALA 1:20



****Zest. dla jednego el. wysyłkowego- Poz. 301 P-1**

Nr.	Tnr	Poz.	Nazwa	Sztuk	Profil	Materiał	Długość	Waga	Ozn.
1	5	301	Plate	1	BL18*500	S235JR	500	35.3	
2	5	3001	BLACHA PODPORY	3	BL12*288	S355JR	448	36.5	
3	5	3002	BLACHA PODPORY	2	BL12*120	S355JR	140	3.2	
4	5	302	BLACHA	4	BL30*80	S355JR	80	6.0	
Waga całkowita (kg)								81.0	
Naddatek na spoiny 1.8% (kg)								1.5	
Waga całkowita (kg)								82.5	
Gabaryty (W x S x D): 500 x 288 x 500 (mm)									

PROFILE
SKALA 1:20



UWAGI: 1. INFORMACJĘ WYKONAWCZE:

- kategoria produkcji PC2 wg PN-EN 1090-2
- klasa wykonania EXC2 wg PN-EN 1090-2
- poziom jakości złączy B wg PN-EN ISO 5817
- ostre krawędzie zaokrąglić $r=2\text{ mm}$

2. *SPOINY:*

- spoiny nieopisane wykonać jako pachwinowe na całej długości przylegania elementów w zakresie grubości:
 $a=0,7t_{min}$ (dla pojedynczej spoiny pachwinowej)
 $a=0,5t_{min}$ (dla podwójnej spoiny pachwinowej)
- kontrola wizualna spoin 100%
- wszystkie technologiczne styki doczołowe pomiędzy kształtownikami ustalać z projektantem
- wszystkie spoiny ciągłe i szczelne

3. ZABEZPIECZENIA ANTYKOROZYJNE:

3.1 PRZYGOTOWANIE POWIERZCHNI:

- powierzchnie oczyszczać metodami mechanicznymi do stopnia czystości co najmniej Sa 2 1/2 wg PN-EN ISO 8501-1
- połączenia spawane powinny być ciągłe, bez porów, oczyszczane bezpośrednio po spawaniu
- bezpośrednio przed malowaniem podłoże należy odpylić
- powierzchnia do malowania powinna być odtłuszczona, sucha i czysta

3.2 MALOWANIE:

- kategoria korozyjności atmosfery C3 wg PN-ISO 12944
- wymagana trwałość systemu malarskiego M wg PN-EN ISO 12944
- pierwsza warstwa - farba alkidowa S3.06 o grubości 80µm
- druga warstwa
- farba alkidowa SB o grubości 40µm

POLITECHNIKA WROCŁAWSKA	
WYDZIAŁ BUDOWNICTWA LĄDOWEGO I WODNEGO	
PROJEKT:	PROJEKT KONSTRUKCJI STALOWEJ HALI SKŁADOWANIA WAPNA
NAZWA RYS.:	RYSUNEK WARSZTATOWY PODSTAWY PRZEGUBOWEJ P-1
RYSOWAŁ:	Filip Łukasik (265110) PODPIS: SKALA NR RYS.
PROMOTOR:	dr inż. Krzysztof Marcinczak PODPIS: 1:20 rowspan="2">7
RECENZENT:	dr inż. Maciej Kożuch PODPIS:
DATA I WERSJA:	05.01.2025 wersja rysunku v1.0