



**POLITECHNIKA  
RZESZOWSKA**  
im. IGNACEGO ŁUKASIEWICZA

inż. Paweł Kowalski

---

**Projekt wielofunkcyjnej hali sportowej dla 9 tyś.  
widzów**

---

Promotor: prof. dr hab. inż. ALEKSANDER KOZŁOWSKI

---

**PRACA DYPLOMOWA  
MAGISTERSKA**

---

Rzeszów 2022

---

Katedra Konstrukcji Budowlanych



WYDZIAŁ  
BUDOWNICTWA,  
INŻYNIERII ŚRODOWISKA  
I ARCHITEKTURY  
POLITECHNIKI RZESZOWSKIEJ



Rok akademicki 2021/2022

**POLITECHNIKA RZESZOWSKA  
WYDZIAŁ BUDOWNICTWA, INŻYNIERII ŚRODOWISKA  
I ARCHITEKTURY**

Katedra (Zakład): Katedra Konstrukcji Budowlanych  
Kierunek, rodzaj i stopień studiów: budownictwo, studia stacjonarne II stopnia  
Imię i nazwisko dyplomanta: **Paweł KOWALSKI**

**TEMAT PRACY DYPLOMOWEJ MAGISTERSKIEJ**

**Projekt wielofunkcyjnej hali sportowej dla 9 tys. widzów**

Kierownik Katedry (Zakładu)

KIEROWNIK  
Katedry Konstrukcji Budowlanych

*[Podpis]*  
dr inż. Andrzej Słoczka, prof. PRz

(podpis i pieczęć)

Promotor: **Prof. dr hab. inż. Aleksander KOZŁOWSKI**

Data i miejsce wydania tematu: 12.10.2021 r.

Termin zakończenia pracy: 12.07.2022 r.

Promotor

*[Podpis]*

(podpis)

Temat pracy dyplomowej inżynierskiej:

*Projekt hali sportowej, my, licum*

Potwierdzam odbiór tematu pracy dyplomowej magisterskiej:

*12.10.2021, Kowalski Paweł*

(data i podpis studenta)



*Składam serdeczne podziękowania  
Panu prof. dr hab. inż. Aleksandrowi Kozłowskiemu,  
promotorowi niniejszego opracowania  
za poświęcony czas oraz cenne wskazówki.*

*Dziękuję również moim bliskim za wsparcie  
oraz wiarę na każdym etapie edukacji.*



# Spis treści

## I. PRZEGLĄD LITERATURY

<b>1. Opis stanu wiedzy w dziedzinie konstrukcji stalowych hal.....</b>	<b>13</b>
1.1. Wstęp.....	13
1.2. Wiadomości ogólne o konstrukcji hal .....	13
1.3. Rodzaje hal .....	14
1.4. Ustroje nośne hal-informacje ogólne.....	17
1.4.1. Wprowadzenie.....	17
1.4.2. Łukowe układy poprzeczne.....	19
1.5. Ustroje konstrukcyjne dużych rozpiętości.....	22
1.5.1. Konstrukcje belkowe .....	23
1.5.2. Konstrukcje ramowe.....	24
1.5.3. Ustroje przestrzenne (rusztowe).....	25
1.5.4. Konstrukcje wspornikowe .....	26
1.5.5. Ustroje strukturalne .....	27
1.5.6. Konstrukcje ciągnowe (wiszące).....	28
1.5.7. Ustroje łukowe.....	31
1.6. Hale widowiskowo-sportowe w Polsce .....	36
1.6.1. Hale widowiskowo - sportowe .....	36
1.6.2. Duże hale widowiskowo-sportowe.....	37
1.6.3. Duże hale widowiskowo-sportowe w województwie podkarpackim	38
1.6.4. Największa hala widowiskowo-sportowa w Polsce .....	39

## II. CZĘŚĆ OBLICZENIOWA

<b>2. Kształtowanie obiektu .....</b>	<b>41</b>
2.1. Wstęp - inspiracje konstrukcyjne.....	41
2.1.1. Hala targowa we Frankfurcie nad Menem (Niemcy).....	42
2.1.2. Hala sportowa w Tapioli koło Helsinek (Finlandia) .....	43
2.1.3. Centrum sportowo-rekreacyjne w Zgorzelcu (Polska).....	45
2.2. Boiska sportowe .....	46
2.3. Trybuna.....	47
2.3.1. Kształtowanie geometrii trybuny .....	47
2.3.2. Siedziska.....	49

2.3.3.	Wymiary trybuny .....	51
2.4.	Kształtowanie konstrukcji.....	54
2.4.1.	Konstrukcja słupów .....	54
2.4.2.	Dźwigar łukowy.....	54
2.4.3.	Przyjęcie geometrii obiektu .....	58
<b>3.</b>	<b>Opis techniczny .....</b>	<b>61</b>
3.1.	Podstawa formalna.....	61
3.2.	Przedmiot opracowania.....	61
3.3.	Dane wyjściowe .....	61
3.4.	Zakres projektu.....	61
3.5.	Ogólna koncepcja konstrukcji.....	62
3.6.	Opis poszczególnych ustrojów i elementów konstrukcyjnych .....	62
3.6.1.	Pozycie dachu (Poz. 1.).....	62
3.6.2.	Płatew (Poz. 2.).....	62
3.6.3.	Główny układ poprzeczny .....	63
3.6.4.	Stężenie połaciowe poprzeczne typu X (Poz. 5.).....	65
3.6.5.	Stężenie pionowe ścian podłużnych typu X (Poz. 6.).....	65
3.7.	Posadzki .....	65
3.7.1.	Posadzka sportowa elastyczna P1 .....	65
3.7.2.	Posadzka na gruncie P2 .....	65
3.7.3.	Posadzka zewnętrzna P3 .....	66
3.8.	Obciążenia przyjęte w projekcie .....	66
3.9.	Metoda obliczeń statycznych .....	66
3.10.	Materiały użyte do wykonania konstrukcji .....	66
3.11.	Wykaz elementów typowych zastosowanych w projekcie .....	67
3.12.	Warunki gruntowe z wyciągiem z badań geotechnicznych .....	67
3.13.	Wymagane klasy odporności pożarowej budowli i odporności ogniowej jej elementów .....	67
3.14.	Zabezpieczenie antykorozyjne .....	67
3.15.	Montaż elementów konstrukcji.....	67
<b>4.</b>	<b>Zestawienie obciążeń atmosferycznych.....</b>	<b>69</b>
4.1.	Wymiary i lokalizacja obiektu .....	69



4.2.	Obciążenie śniegiem.....	70
4.2.1.	Strefy obciążenia śniegiem.....	70
4.2.2.	Równomierne obciążenie śniegiem dachu: .....	71
4.2.3.	Nierównomierne obciążenie śniegiem dachu: .....	71
4.2.4.	Obciążenie śniegiem dachu .....	71
4.3.	Odziaływania wiatru.....	72
4.3.1.	Strefy obciążenia wiatrem .....	72
4.3.2.	Obciążenie wiatrem działającym prostopadle do ściany podłużnej hali ( $\theta=0^\circ$ ).....	73
4.3.3.	Obciążenie wiatrem działającym równoległe do ściany podłużnej hali ( $\theta=90^\circ$ ).....	76
4.3.4.	Odziaływania wiatru na powierzchnie wewnętrzne.....	78
4.3.5.	Obciążenie siłami tarcia .....	79
<b>5. Poz. 1.</b>	<b>Poszycie dachu .....</b>	<b>81</b>
5.1.	Schemat statyczny .....	81
5.2.	Zestawienie obciążeń.....	82
5.2.1.	Rozkład obciążenia na składowe równoległe i prostopadłe do powierzchni połaci dachu.....	82
5.3.	Obliczenia statyczne .....	83
5.3.1.	Stan graniczny nośności .....	83
5.3.2.	Stan graniczny użytkowalności .....	83
5.4.	Sprawdzenie stanów granicznych.....	83
5.4.1.	Stan graniczny nośności .....	83
5.4.2.	Stan graniczny użytkowalności .....	84
<b>6. Poz. 2.</b>	<b>Platew kratowa .....</b>	<b>85</b>
6.1.	Przyjęcie geometrii płatwi .....	85
6.2.	Schemat statyczny .....	87
6.3.	Zestawienie obciążeń.....	88
6.3.1.	Zestawienie obciążeń na 1m płatwi.....	88
6.3.2.	Rozkład obciążeń na składowe prostopadłe i równoległe względem osi przekroju.....	92
6.4.	Określenie zdolności poszycia do stężenia płatwi.....	92
6.5.	Obliczenia statyczne .....	93

6.5.1.	Kombinacje obciążeń.....	93
6.5.2.	Siły wewnętrzne.....	93
6.6.	Stan graniczny nośności.....	97
6.6.1.	Sytuacja projektowa trwała (faza eksploatacji) .....	97
6.6.2.	Sytuacja projektowa przejściowa (faza montażu).....	108
6.7.	Stan graniczny użyteczności.....	109
6.8.	Sprawdzenie nośności węzłów płatwi.....	110
6.8.1.	Sprawdzenie nośności węzła wewnętrznego B.....	110
6.8.2.	Sprawdzenie nośności węzła podporowego A.....	114
6.8.3.	Sprawdzenie nośności 6.8.3.1.6.8.3.2 pozostałych węzłów 6.8.3.3w ....	116
<b>7. Poz. 3.</b>	<b>Wiązar dachowy .....</b>	<b>119</b>
7.1.	Kształtowanie geometrii dźwigara.....	119
7.2.	Schemat statyczny.....	119
7.3.	Zestawienie obciążeń .....	119
7.3.1.	Oddziaływania stałe .....	120
7.3.2.	Oddziaływania zmienne.....	121
7.4.	Obliczenia statyczne. Kombinacje oddziaływań.....	126
7.4.1.	Stan graniczny nośności.....	126
7.4.2.	Stan graniczny użyteczności.....	127
7.5.	Sprawdzenie stanu granicznego nośności .....	128
7.5.1.	Obliczenie pasa górnego dźwigara .....	128
7.5.2.	Obliczanie pasa dolnego dźwigara.....	134
7.5.3.	Obliczanie krzyżulców dźwigara.....	140
7.5.4.	Obliczanie słupków dźwigara .....	144
7.6.	Sprawdzenie nośności węzłów dźwigara.....	147
7.6.1.	Sprawdzenie nośności węzła A.....	149
7.6.2.	Sprawdzenie nośności węzła B.....	151
7.6.3.	Sprawdzenie nośności węzła C.....	152
7.6.4.	Sprawdzenie nośności węzła D.....	153
7.6.5.	Sprawdzenie nośności węzła E .....	154
7.6.6.	Sprawdzenie nośności węzła F .....	155
7.7.	Połączenia montażowe .....	155
7.7.1.	Połączenie montażowe w pasie górnym .....	156

7.7.2. Połączenie montażowe w pasie dolnym.....	157
<b>8. Poz. 4. Konstrukcja wsporcza.....</b>	<b>159</b>
8.1. Schemat statyczny .....	159
8.2. Zestawienie obciążeń.....	159
8.3. Obliczenia statyczne .....	159
8.4. Sprawdzenie stanu granicznego nośności.....	159
8.4.1. Obliczanie słupa pionowego konstrukcji.....	159
8.4.2. Obliczanie słupa ukośnego konstrukcji .....	166
8.4.3. Obliczanie zastrzałów konstrukcji wsporczej .....	172
8.4.4. Obliczanie rygli konstrukcji wsporczej .....	176
8.5. Sprawdzenie nośności połączeń .....	179
8.5.1. Wymiarowanie połączenia A (podstawa słupa pionowego) .....	179
8.5.2. Wymiarowanie połączenia C, N i K (połączenie doczołowe rur)....	180
8.5.3. Wymiarowanie połączenia i (podstawa słupa ukośnego).....	181
8.5.4. Wymiarowanie połączenia G (połączenie słupa pionowego i słupa ukośnego) .....	181
8.5.5. Wymiarowanie połączenia F (głowica słupa) .....	182
8.5.6. Wymiarowanie połączenia B, D, E, J, L i M (połączenie rygli/zastrzałów ze słupem prostym/ ukośnym).....	190
<b>9. Poz.5. Stężenie połączeniowe poprzeczne T-1.....</b>	<b>191</b>
9.1. Schemat statyczny .....	191
9.2. Zestawienie obciążeń.....	192
9.2.1. Oddziaływania wiatru na ścianę szczytową .....	192
9.3. Obliczenia statyczne .....	193
9.4. Sprawdzenie stanu granicznego nośności.....	195
<b>10. Poz. 6. Tężnik pionowy ściany podłużnej .....</b>	<b>197</b>
10.1. Schemat statyczny .....	197
10.2. Zestawienie obciążeń.....	197
10.3. Obliczenia statyczne .....	198
10.4. Stan graniczny nośności .....	198
<b>Bibliografia .....</b>	<b>199</b>

<b>Spis tabel.....</b>	<b>203</b>
<b>Spis rysunków.....</b>	<b>205</b>
<b>Załączniki .....</b>	<b>213</b>
Załącznik 1: Wymiarowanie połączeń elementów konstrukcji w programie ARSA .....	213
Załącznik 2: Dokumentacja rysunkowa .....	213
Załącznik 3: Plakat .....	213

# I. PRZEGLĄD LITERATURY

## 1. Opis stanu wiedzy w dziedzinie konstrukcji stalowych hal

### 1.1. Wstęp

Tematem pracy dyplomowej magisterskiej jest „Projekt wielofunkcyjnej hali sportowej dla 9 tys. widzów”. Halą sportową nazywamy obiekt sportowy o wymiarach areny nie mniejszej niż 19x36 m. Hala widowiskowo-sportowa (wielofunkcyjna) to budynek o zwartej formie konstrukcyjnej. Zawiera w sobie pomieszczenie (hale), w którym umieszczone są miejsca dla widzów (widownię), powierzchnie, na której odbywają się zawody sportowe (np. boisko), występy, bankiery itp. Zazwyczaj pod widownią ustawioną amfiteatralnie umieszcza się zaplecze techniczno-gospodarczo-sanitarne tj. szatnie, natryski i inne pomieszczenia związane z pełnioną przez budynek funkcją. zamiennie w projekcie stosowane będą określenia: „hala”, „obiekt” i „wielofunkcyjna hala sportowa” [1][2][3].

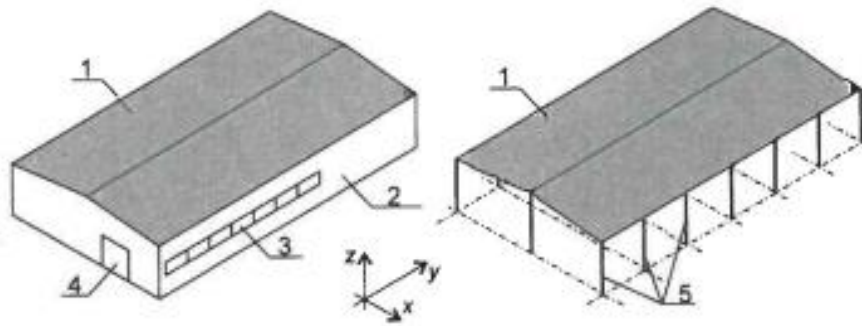
### 1.2. Wiadomości ogólne o konstrukcji hal

Hale to budynki najczęściej parterowe, z przestronnym wnętrzem, które mogą mieć jedną lub więcej naw. Cechują się ograniczeniem do minimum liczby podpór wewnętrznych oraz stosowaniem przykryć dachowych o znacznej rozpiętości. Projektując hale należy mieć na uwadze, aby było w niej jak najwięcej wydzielonej powierzchni użytkowej, która jest osłonięta ścianami zewnętrznymi i zadaszonej, co chroni ją przed wpływami czynników atmosferycznych, tj. śnieg, deszcz, wiatr, pył, grad, temperatura, itp. Niektóre części hal parterowych są wydzielone i ukształtowane jako wielokondygnacyjne (najczęściej o przeznaczeniu sanitarnym lub biurowym).

Ze względu na rodzaj obudowy można wyróżnić hale ze ścianami zewnętrznymi ocieplonymi lub nieocieplonymi wraz z dachem oraz wiatę – cechującą się całkowitym lub częściowym brakiem przegród zewnętrznych obudowanych dachem. Wymagania eksploatacyjne obiektu halowego decydują o jego kształcie i wielkości [1][2].

a) hala przemysłowa

b) wiata magazynowa



Rys. 1.1. Aksonometria hali i wiaty; 1-obudowa dachu; 2-obudowa ścian; 3-okna; 4-wrota; 5-słupy główne [1]

### 1.3. Rodzaje hal

Hale możemy podzielić na:

- Ze względu na przeznaczenie [1][2][3]:
  - obsługowe (zajezdnie, hangary, stacje obsługi),
  - przemysłowe (produkcyjne),
  - składowe (magazyny),
  - użyteczności publicznej (dworce kolejowe i lotnicze, handlowe, widowiskowe, sportowe).
- Ze względu na konstrukcje [3]:
  - brak wyraźnych układów poprzecznych – zalicza się do nich hale o przykryciu kratownicowym strukturalnym (materace kratowe) oraz hale magazynowe wysokiego składowania; do tego kryterium zaliczyć możemy układy mieszane typu tarczownicowego lub szedowego, których układy poprzeczne przenikają przez układy podłużne tworząc konstrukcje przykrycia hali,
  - wyraźnie zauważalne układy poprzeczne.
- Ze względu na rodzaj transportu wewnętrznego [3]:
  - bez transportu,
  - z transportem podwieszonym (z suwnicami podwieszonymi, belkami wciągników),
  - z transportem podpartym (z belkami podsuwnicowymi).

Hale składowe to obiekty magazynowe niskiego lub wysokiego składowania. Związane są z transportem, handlem, rezerwami wojskowymi lub państwowymi itp., ale w żadnym stopniu z zakładem przemysłowym. Ich głównym wyposażeniem są urządzenia przenośnikowe i dźwigowo-transportowe. Większa część tych obiektów

posiada takie same konstrukcje nośne co stosowane w halach przemysłowych, składające się z płaskich układów poprzecznych połączonych ze sobą stężeniami, płatwiami i ryglami ściennymi, które razem tworzą przestrzenny ustrój [2].



Rys. 1.2. Hala magazynowa wysokiego składowania [W1]

Hale przemysłowe to budynki projektowane i przeznaczone do realizacji określonego wcześniej celu o charakterze produkcyjnym. Może odbywać się w nich wytwarzanie, montowanie lub magazynowanie materiałów i wyrobów. Konstrukcja hali powinna być dostosowana do przeznaczenia, aby zapewnić optymalne i właściwe jej użytkowanie. Względy techniczno-ekonomiczne wpływają na wybór konstrukcji, odpowiedni schemat statyczny i siatkę słupów oraz na dobór odpowiednich wymiarów elementów i ich przekrojów. Należy pamiętać o tym, że podczas eksploatacji mogą wystąpić zmiany technologiczne, tj. zmiana przeznaczenia obiektu, zmiana branży produkcyjnej, rozbudowa czy też modernizacja, które to możliwości należy uwzględnić w fazie jej projektowania.

Duży wpływ na rozwiązania konstrukcyjne hal, ich kształt i cechy geometryczne ma technologia produkcji, transport suwnicowy wewnętrzny, oświetlenie, wentylacja i termoizolacyjność. Obiekty przemysłowe mogą być wyposażone w urządzenia technologiczne stałe jak i ruchome do których zaliczamy: suwnice podnośniki,

wysięgniki, taśmy, ciągi instalacyjne i transportowe. Urządzenia te mają zapewnić prawidłowy przebieg procesu produkcyjnego. [2]



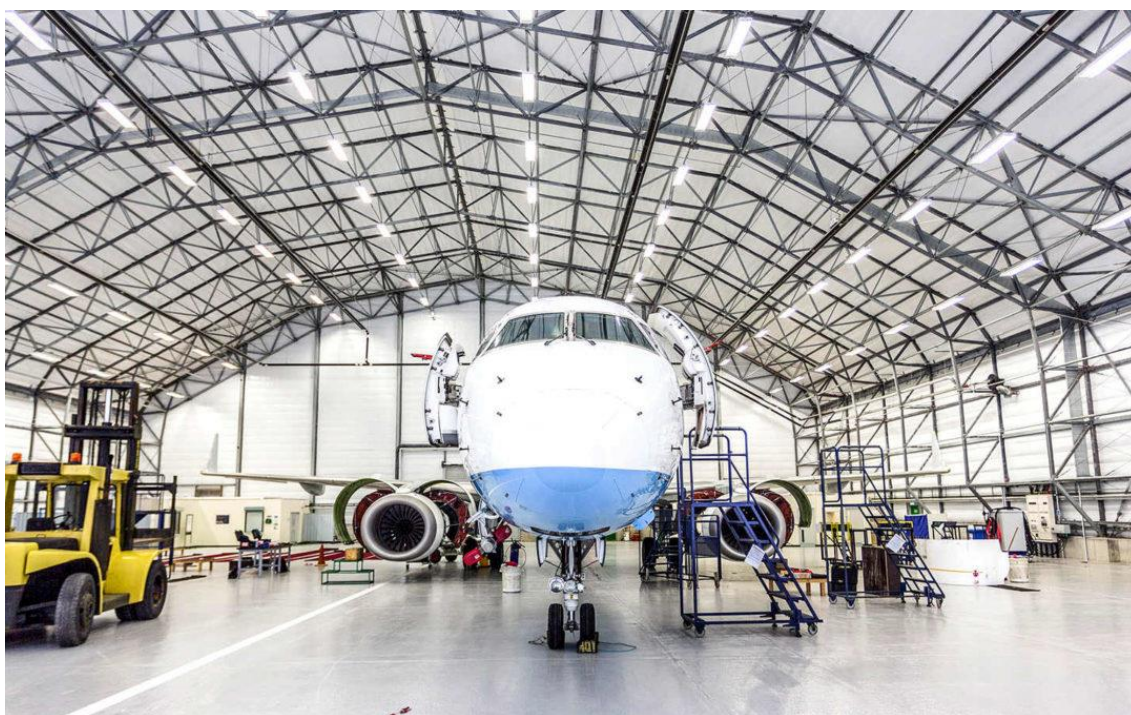
Rys. 1.3. Hala przemysłowa stalowa z dwiema suwnicami o udźwigu 8 i 12,5 tony [W2]

Hale użyteczności publicznej (konferencyjne, wystawowe, widowiskowe, sportowe), a także hale obsługowe (stacje obsługi samochodów, dworce kolejowe i autobusowe, lotnicze, zajezdnie, hangary, handlowo-usługowe) są bardzo zróżnicowane między sobą, jeśli chodzi o ich architekturę i konstrukcję układów nośnych. Funkcje tych obiektów stawiają przed nimi specjalne wymagania: architektoniczne (np. wygląd zewnętrzny, układ boisk itp.), konstrukcyjne (duże rozpiętości, urządzenia technologiczne), akustyczne, instalacyjne, przeciwpożarowe czy ewakuacyjne. Obiekty wyróżniają się oryginalnością i niepowtarzalnością, zarówno w aspekcie architektonicznym jak i w rozwiązaniach konstrukcyjnych, które w dużym stopniu odbiegają od rozwiązań stosowanych w halach przemysłowych. Każdy z tych obiektów należy projektować w indywidualny sposób na specjalne zamówienie użytkownika. Należy brać pod uwagę ich późniejsze przeznaczenie i sposób użytkowania [2].





Rys. 1.4. Hala widowisko – sportowa w Bobowej [W3]



Rys. 1.5. Hangar lotniczy [W4]

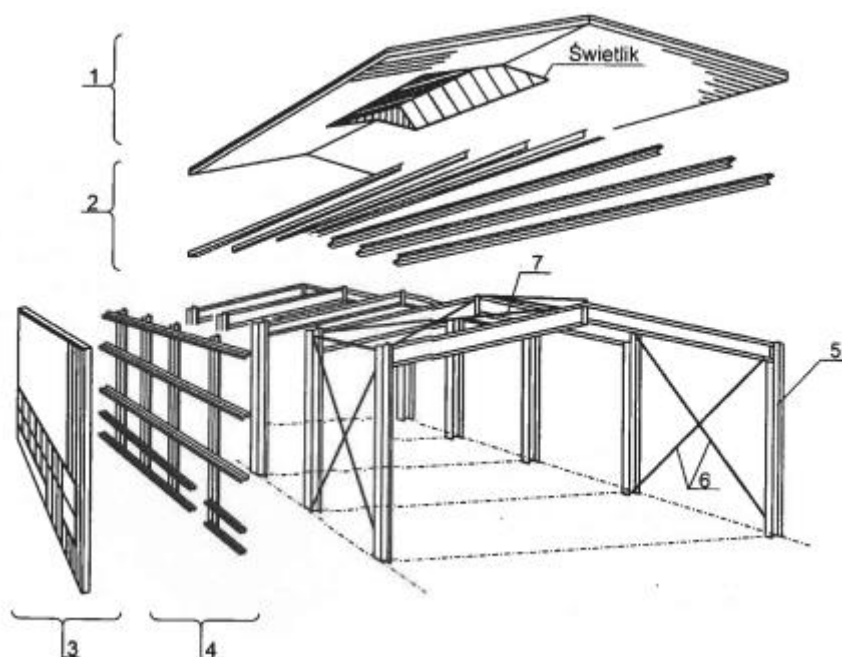
## **1.4. Ustroje nośne hal-informacje ogólne**

### **1.4.1. Wprowadzenie**

Ochrona wnętrza przed wpływami otoczenia ma znaczny wpływ na budowę strukturalną i rodzaj ustroju nośnego obiektu halowego. Wymagania dotyczące

izolacyjności cieplnej, wilgotnościowej i akustycznej przegród, wyposażenia ochrony przeciwpożarowej, oświetlenia i wentylacji, urządzeń transportowych wpływają na dobór rozwiązań konstrukcyjno – materiałowych hali i jej poszczególnych elementów.

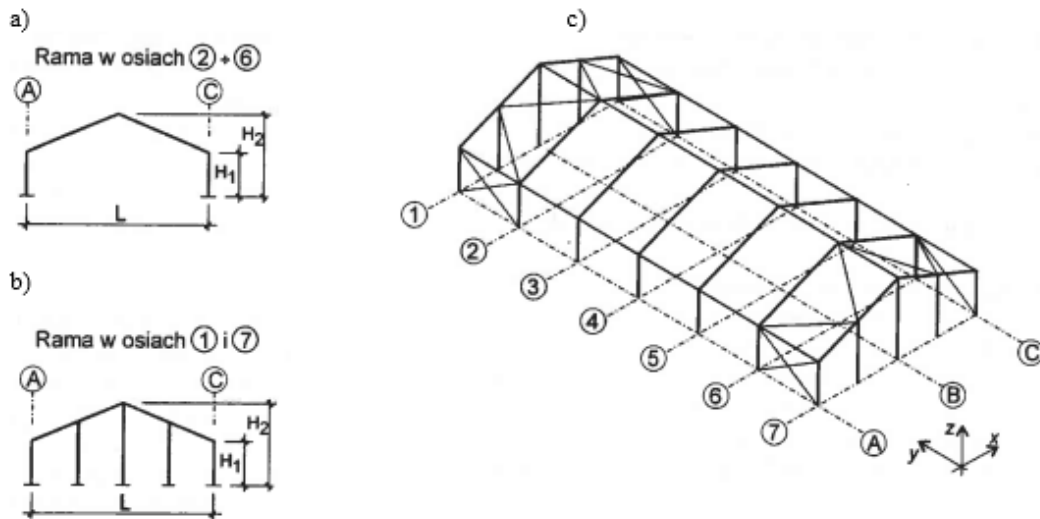
Budowę strukturalną typowego obiektu hali pokazano na Rys. 1.6. W widoku przedstawiono typowe elementy, które odgrywają znaczącą rolę konstrukcyjną lub związaną z wymaganiami użytkowania obiektu [1][2].



Rys. 1.6. Widok elementów składowych hali; 1-obudowa dachowa, 2-konstrukcja wsporcza obudowy dachowej, 3-obudowa ścienna, 4-konstrukcja wsporcza obudowy ściennej, 5-rama głównego układu nośnego (poprzecznego), 6-stężenie ścienne, 7- stężenie dachowe [1]

Przedstawiony schemat konstrukcji hali jest rozwiązaniem bardzo korzystnym. Geometria dachu i ścian umożliwia zastosowanie typowych rodzajów obudowy, a duże podobieństwo elementów konstrukcji pozwala na łatwą ich powtarzalność. Jak widać na Rys. 1.7 wszystkie wewnętrzne poprzeczne układy nośne (w osiach 2-6) są takie same pod względem geometrii, dodatkowo przejmują taką samą wielkość oddziaływań, sprowadza się do tego, że są wykonane z identycznych przekrojów poprzecznych.

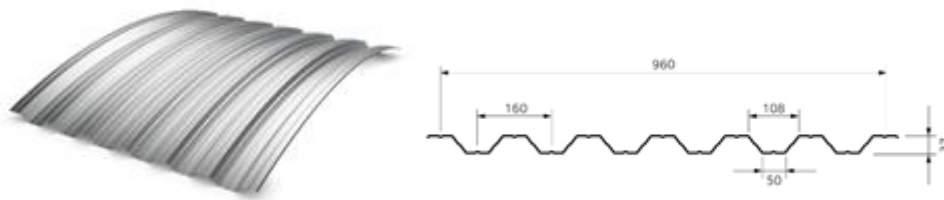
Tylko ramy skrajne (w osiach 1 i 7), w których słupy służą do mocowania obudowy ścian szczytowych projektowane są przy zastosowaniu innego schematu statycznego i przy nieco innych oddziaływań z dachu. Tak samo pozostałe elementy konstrukcji hali tj. np. płatwie, rygle czy stężenia mogą być zaprojektowane jako elementy powtarzalne, co ułatwia ich projektowanie [1].



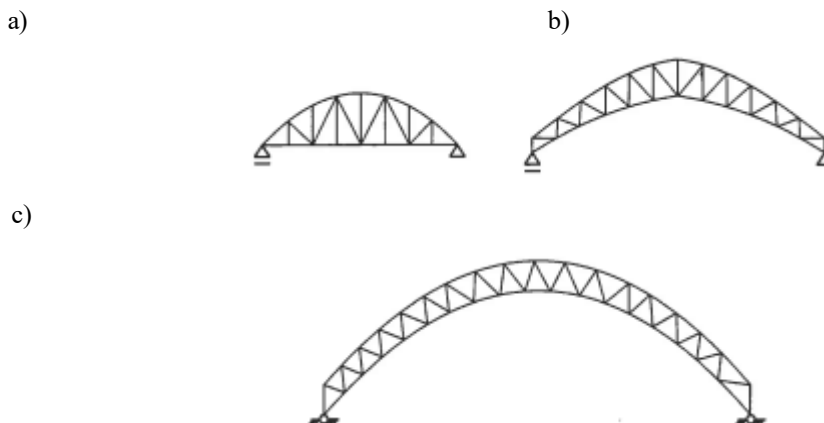
Rys. 1.7. Powtarzalność głównych układów poprzecznych, a) rama w osiach 2-6, b) rama w osiach 1 i 7, c) aksonometria szkieletu stalowego [1]

### 1.4.2. Łukowe układy poprzeczne

Oprócz słupowo-ryglowych układów poprzecznych stosuje się łukowe i przestrzenne układy nośne hal. Łukowe ustroje nośne mogą być powierzchniowe (łukowe blachy fałdowe Rys. 1.8) lub prętowe (Rys. 1.9). Zastosowanie tego typu układów może zmniejszyć zużycie stali (w stosunku to układów ramowych), a dodatkowo pozwoli uzyskać większe rozpiętości [2].

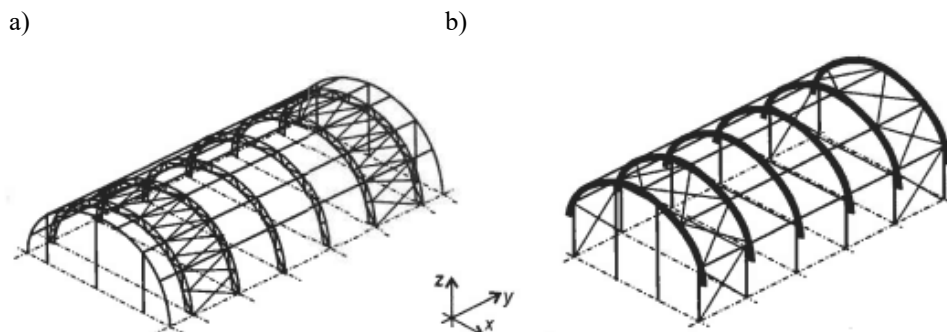


Rys. 1.8. Panel łukowy z blachy fałdowej [W5]



Rys. 1.9. Przykłady kratownic dachowych łukowych; a) i b) o zmiennych wysokościach, c) o stałej wysokości [1]

Prętowe, łukowe ustroje nośne mogą być przestrzenne (kratowe), w której węzły ustroju usytuowane są na krzywiznie łuku, ich pręty zaś proste lub płaskie (pełnościenne bądź kratowe) kształtowane zazwyczaj jako blachownice spawane lub dźwigary gięte z dwuteowników walcowanych, a także łuki złożone z kilku prostoliniowych elementów składowych [2].



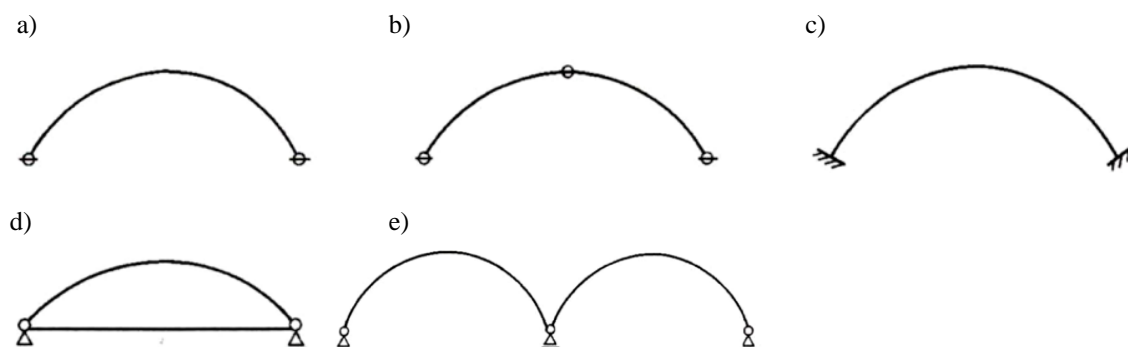
Rys. 1.10. Hale o konstrukcji łukowej; a) główny układ poprzeczny w postaci łuku kratowego, b) układ słupowo ryglowy, z łukowym ryglem i ze ściągami [1]

Mówiąc o łukowych ustrojach konstrukcyjnych należy by zdefiniować podstawowe elementy łuku zgodnie z Rys. 1.11.



Rys. 1.11. Elementy łuku [W6]

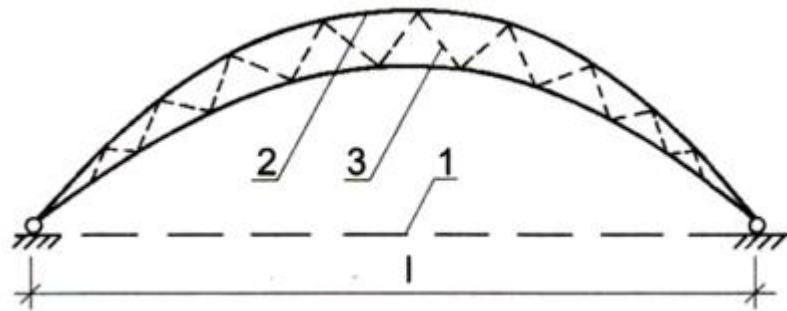
Najczęściej stosuje się schematy statyczne łuków: dwuprzegubowe (Rys. 1.12-a), trójprzegubowe (Rys. 1.12-b) i bezprzegubowe (Rys. 1.12-c). Łuki mogą być jedno- (Rys. 1.12 a-d) i wieloprzęsłowe (Rys. 1.12-e) [4].



Rys. 1.12. Schematy statyczne łuków [4]

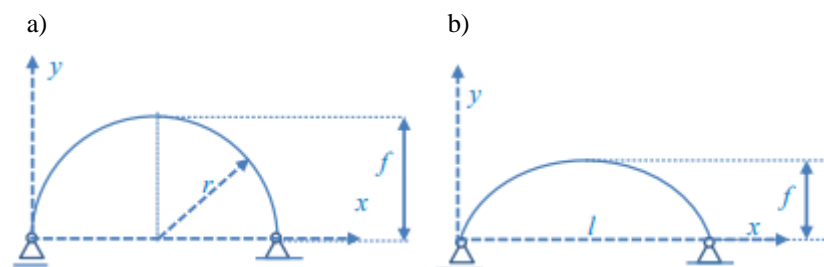
Najczęściej spotyka się łuki dwuprzegubowe, które są proste w wykonaniu i montażu. W łukach trójprzegubowych budowa trzeciego przegubu w kluczu komplikuje układ konstrukcyjny i utrudnia wykonanie przykrycia. Łuki bezprzegubowe mają korzystny rozkład momentów zginających i są zazwyczaj lżejsze, ale wymagają uwzględnienia wpływu zmiany temperatury oraz większych fundamentów. Przy słabych gruntach może być celowe przejście rozporu przez ściąg (Rys. 1.12-d). Ściąg może być wykorzystany do wstępnego sprężenia łuku.

Sprężając na przykład łuk kratowy z wiotkim pasem górnym, można w tym pasie otrzymać wstępną siłę rozciągającą redukującą lub nawet przewyższającą siłę ścisną od obciążenia eksploatacyjnego (Rys. 1.13). W zależności od potrzeb eksploatacyjnych ściąg może być wykonany ponad podporami łuku [4].



Rys. 1.13. Sprężenie łuku: 1-ciężno sprężające, 2-wiotki pas, 3-skratowanie [4]

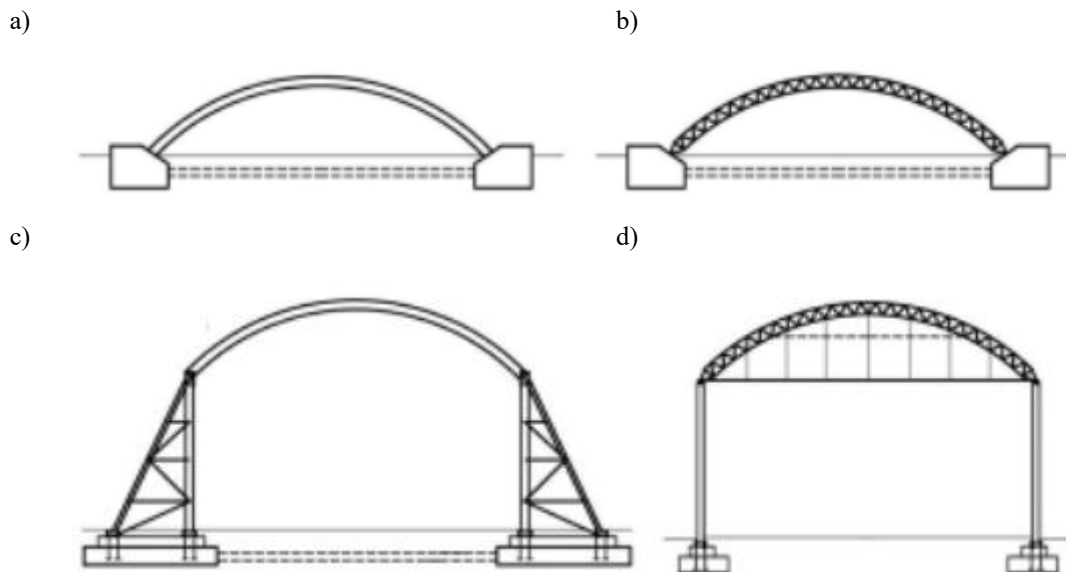
Kształtując łuk dąży się do uzyskania tzw. krzywej racjonalnej łuku, o kształcie osi dobranym z warunku minimum momentu zginającego. W praktyce najczęściej jednak stosuje się łuki o kształcie parabolicznym (Rys. 1.14-b). Rzadziej łuki kołowe elipsoidalnie (Rys. 1.14-a) [4].



Rys. 1.14. Rodzaje krzywizn łuku: a) łuk kołowy, b) łuk paraboliczny [W6]

W łukach kołowych, poprzez stałą krzywiznę, upraszcza się wykonanie elementów i węzłów łuku. W łukach opartych na poziomie terenu pomieszczenia położone w pobliżu podpór są trudne do wykorzystania przez ich małą wysokość (Rys. 1.15 a-b). Aby uniknąć

niedogodności łuki można opierać na pionowych słupach (układy ramowo-łukowe) zgodnie z rysunkiem Rys. 1.15 c-d.



Rys. 1.15. Oparcie łuków: a) i b) bezpośrednio na fundamencie, c) i d) na słupach [W7]

### 1.5. Ustroje konstrukcyjne dużych rozpiętości

Wraz z rozwojem technicznym budownictwa rosną możliwości i oczekiwania wznoszenia obiektów o coraz większych rozpiętościach, warunkowanych względami użytkowymi i architektonicznymi. Stal, w odróżnieniu od żelbetu umożliwia wznoszenie obiektów dużych rozpiętości. Dobre parametry wytrzymałościowe stali i wysoka niezawodność, stwarzają najszersze możliwości realizacji tego typu obiektów.

Konstrukcje o dużych rozpiętościach, to jest takich, które przykrywają duże wolne od podpór przestrzenie najczęściej znajdują zastosowanie w budownictwie przemysłowym, użyteczności publicznej i mostownictwie.

Zagadnienia związane z projektowaniem przykryć dużych rozpiętości napotykają się z coraz większymi wyzwaniami skierowanymi do konstruktorów, projektantów i wykonawców tychże konstrukcji. Dotyczy to w szczególności projektowania konstrukcji przy jednoczesnym zachowaniu stateczności i możliwości przejścia oddziaływań atmosferycznych takich jak obciążenie śniegiem i wiatrem.

Dominujący wpływ obciążenia ciężarem własnym w projektowaniu konstrukcji przykryć dużych rozpiętości jest istotny przy kształtowaniu konstrukcyjnym i architektonicznym obiektu. Konstrukcja powinna spełniać m.in. kryteria estetyki, efektywności i ekonomiczności.

Obiekt zaprojektowany efektywnie nazywa się konstrukcją zaprojektowaną zgodnie z obowiązującymi zasadami i stanem wiedzy, innowacyjną, często oryginalną. Jako ekonomiczną traktuje się konstrukcję spełniającą wymagania funkcjonalno-konstrukcyjne przy minimalnych kosztach na jej wykonanie, a później eksploatację. Ocena estetyki obiektu budowlanego jest dużym problemem, gdyż na walory estetyczne obiektu wpływa wiele czynników takich jak wkomponowanie obiektu w krajobraz, a także skala i proporcje konstrukcji. Uzyskanie rozwiązania spełniającego wszystkie kryteria jest skomplikowane.

W ubiegłych kilku dziesięcioleciach w całym świecie zaprojektowano i zbudowano wiele intrygujących rozwiązań przykryć dużych rozpiętości.

W przekryciach obiektów o dużych rozpiętościach, stosuje się:

- przekrycia z zastosowaniem:
  - belek (walcowane, ażurowe, blachownice, belki kratowe),
  - kratownic,
  - ram (układy ramowe),
  - łuków (pełnościennie i kratowe),
- przekrycia strukturalne,
- przekrycia ciągnowe.

Rozwiązania te są najbardziej powszechne, z uwagi na stosunkowo niskie koszty, możliwość typizacji, a przede wszystkim na rodzaje budynków, w których mogą być zastosowane, takich jak galerie handlowe, sklepy, hangary, teatry, sale wystawowe i obiekty sportowe (typu halowego) [5] [W8].

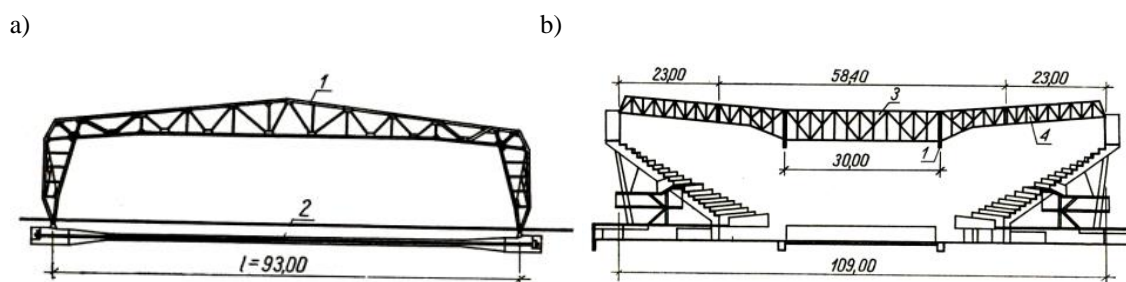
### **1.5.1. Konstrukcje belkowe**

Stosowanie tego typu konstrukcji jest uzasadnione, gdy podpory nie mogą przejąć poziomych sił podporowych. Przy zastosowaniu podparć jednogłęziowymi słupami stalowymi, słupami betonowymi czy ścianami murowanymi kiedy możliwości przeniesienia sił poziomych są ograniczone, jednym z najwłaściwszych rozwiązań konstrukcji dachu są dźwigary belkowe, ażurowe, walcowane i blachownice przy rozpiętościach do 50 m. Należy jednak pamiętać, że takie konstrukcje nie są ekonomiczne z punktu widzenia zużycia stali. Są natomiast tanie i proste w wytwarzaniu oraz przyjazne z punktu widzenia montażu na budowie [W8].

### 1.5.2. Konstrukcje ramowe

Na ogół kratownice lub o zmiennym przekroju ustroje ramowe stosowane przy większych rozpiętościach od 100 do 120 m. Znajdują one zastosowanie w konstrukcjach m.in. dużych hal sportowych i widowiskowych oraz hangarów lotniczych. Typowy układ ramowy dwuprzegubowy, zarówno kratowy jak i pełnościenny powoduje, że możliwe jest zastosowanie mało skomplikowanych oparcí na fundamentach, co wpływa na wymiary fundamentów i ułatwia zakotwienie. Pewną niedogodnością jest konieczność przekazania na fundamenty i przejście przez nie sił poziomych co znacznie ogranicza korzystny wpływ przegubowego oparcia na wymiary fundamentów albo prowadzi do zastosowania dodatkowych elementów w postaci np. ściągów podposadzkowych przejmujących te siły. Niekiedy stosuje się układy ramowe bezprzegubowe, pozwalające kosztem fundamentów zmniejszyć jednostkowe zużycie stali. Zastosowanie tego rozwiązania w przypadku ram pełnościennych pozwala na uzyskanie wysokości konstrukcji w kalenicy poniżej  $1/50$  rozpiętości, co jest korzystne z punktu wykorzystania kubatury budynku [W8].

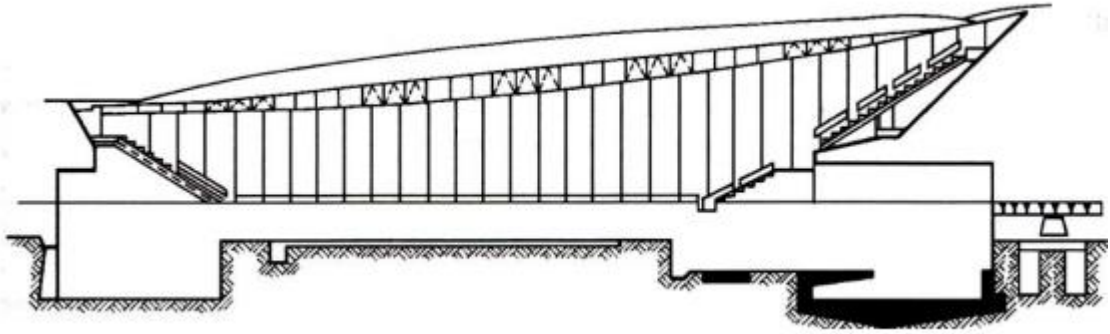
Na Rys. 1.16 przedstawiono halę sportową Wiener Stadthalle w Wiedniu (Austria). Obiekt o wymiarach 109x98 m składa się z dwóch kratowych ram dwuprzegubowych ze ściągiem (93 m) o rozstawie 30 m i ośmiu dwuspornikowych dźwigarów kratowych (58,4 m). Na końcu wsporników i ścian zewnętrznych opierają się dźwigary kratowe (23,0 m) [6].



Rys. 1.16. Hala sportowa Wiener Stadthalle w Wiedniu (Austria): a) przekrój poprzeczny, b) przekrój podłużny: 1-rama główna, 2-ściągi, 3-dźwigar wspornikowy, 4-dźwigar skrajny [6]

Na Rys. 1.17 przedstawiono halę widowiskowo-sportową Oliwia w Gdańsku (Polska). Konstrukcja obiektu składa się z dźwigarów o zmiennej wysokości (dwa pasy górne i dwudzielny pas dolny). Zakrzywiony pas dolny sprężono cięgnami. Konstrukcję stalową oparto na żelbetowych trybunach.



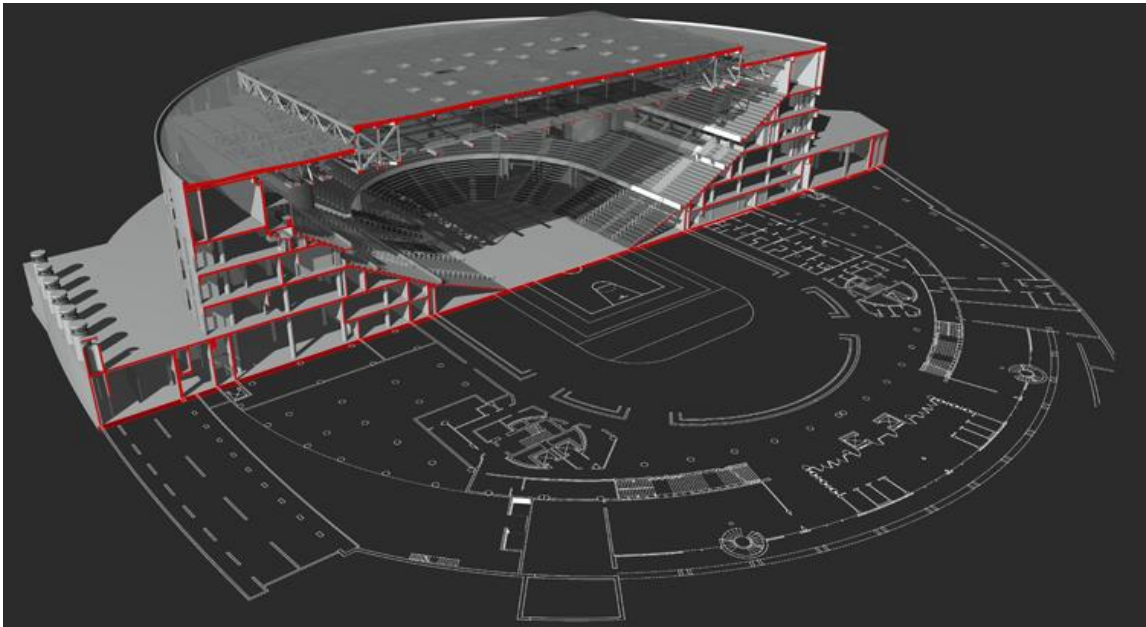


Rys. 1.17. Przekrój hali widowiskowej Oliwa w Gdańsku (Polska) [4]

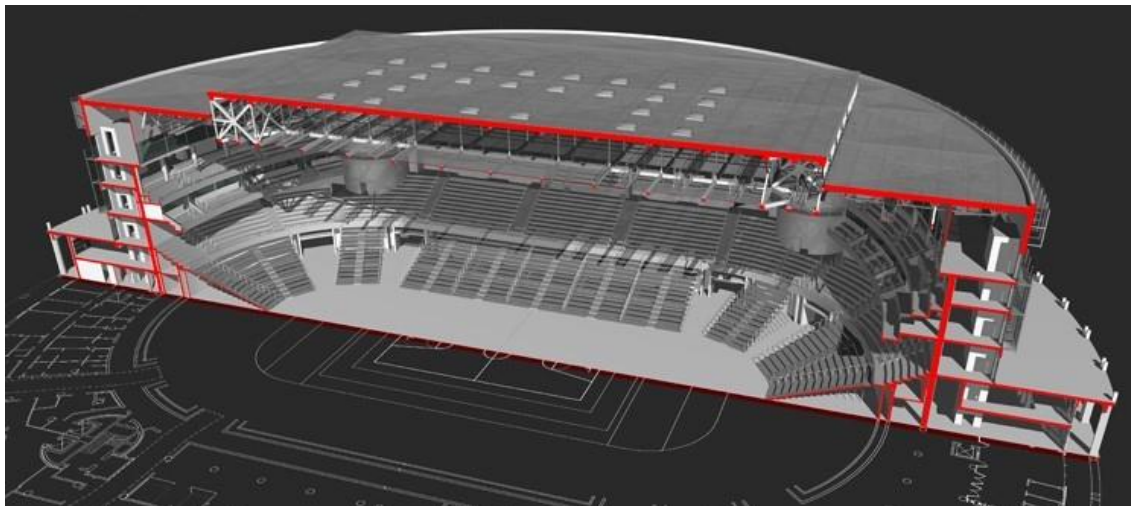
### 1.5.3. Ustroje przestrzenne (rusztowe)

Zazwyczaj układy ramowe, zarówno kratowe jak i pełnościennie projektowane również jako ustroje przestrzenne, umożliwiające uzyskać znaczne rozpiętości przy ograniczeniu liczby podpór wewnętrznych. Przykładem tego typu konstrukcji dachu jest Ergo Arena zlokalizowana na granicy miast Gdańska i Sopotu, będąca jedną z największych hal widowiskowo-sportowych w Polsce (Rys. 1.18). Środkowa część konstrukcji zadaszzenia (nad areną) została zaprojektowana jako przestrzenny ustrój kratowy oparty w narożach na czterech trzonach o rozstawie 66,6x70,6 m [W8].

a)



b)



Rys. 1.18. Hala widowisko-sportowa Ergo Arena: a) przekrój poprzeczny, b) przekrój podłużny [W9]

#### 1.5.4. Konstrukcje wspornikowe

Wspornikowe konstrukcje to zmodyfikowane układy ramowe stosowane w przypadku średniej wielkości stadionów. Są projektowane o wsięgach do 50 m jako kratownice, zazwyczaj o zmiennej wysokości. W przypadku większych wsięgów, wsporniki mogą być dodatkowo podwieszane linami do wystawionych powyżej poszycia słupów (funkcja masztów). W celu zwiększenia długości wsporników oraz ograniczeniu przekroju wsporników i słupów podpierających, układy wspornikowe są podpierane usytuowanymi wzdłuż trybun ramami lub łukami [W8].

a)



b)



c)



d)



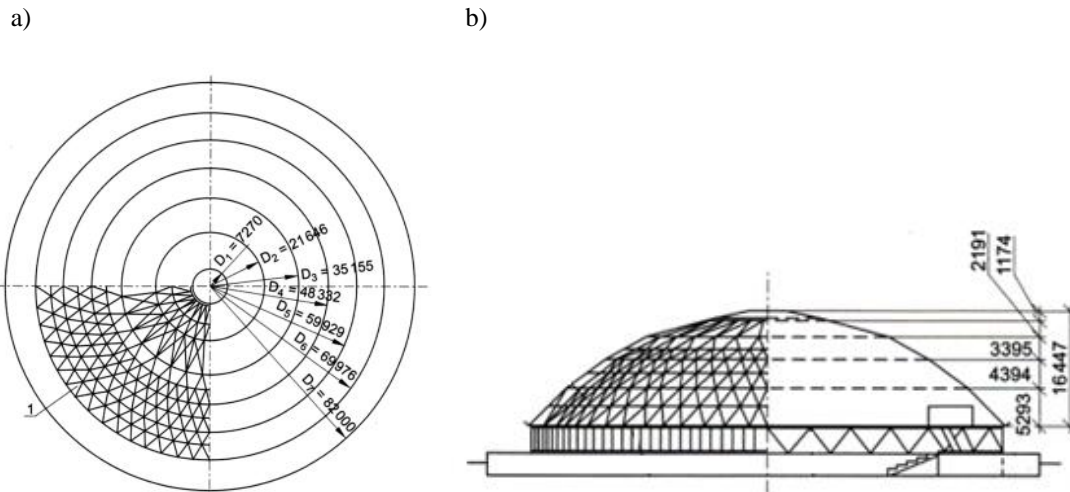
Rys. 1.19. Stadion Thomond Park w Limerick (Irlandia): a) przekrój poprzeczny przekrycia i trybun, b) szczegół podparcia łuku, c) widok łuku kratowego o przekroju trójkątnym o rozpiętości 150 m, d) widok podparcia łuku [5]

### 1.5.5. Ustroje strukturalne

Ustroje strukturalne są wzajemnie uzupełniającymi się ustrojami prętowymi, wykorzystującymi przestrzenną pracę poszczególnych elementów prętowych, charakteryzując się dużą sztywnością przy niskim zużyciu materiału. Siatki geometryczne przekryć strukturalnych mają powtarzalne moduły i regularny kształt. Pręty, które tworzą strukturę rozmieszczone są warstwami, gdzie elementy pomiędzy warstwami mają stałą długość, a wysokość przekroju jest zazwyczaj taka sama. Ustroje strukturalne możemy podzielić na jednowarstwowe (powłokowe), dwu- lub trójwarstwowe w układach jedno- i dwukrzywiznowych. Z uwagi na rodzaje węzłów i stosowanie jednogłęziowych prętów struktury, do tych typów konstrukcji stosuje się głównie kształtowniki rurowe okrągłe lub zamknięte kwadratowe [W8].

Na Rys. 1.20 przedstawiono hale sportowo-widowiskową „Stegu Arena” w Opolu (Polska). Obiekt został zaprojektowany na planie koła o promieniu  $R=69,97$  m. Wysokość to około 16,50 m. Na przykrycie zastosowano siatkę kopułową podzieloną na 5 współśrodkowych pasm.

Innym obiektem halowym, w którym zastosowano przykrycie strukturalne jest Hala Astrodome w Houston (USA) przedstawiona na Rys. 1.21. Elementy dachu tworzą diamentowy wzór o rozpiętości sięgającej 196 m.



Rys. 1.20. Hala sportowo-widowiskowa „Stegu Arena” w Opolu (Polska): a) rzut konstrukcji dachu, b) widok [6]



Rys. 1.21. Hala Astrodome w Houston (USA)-konstrukcja dachu [W10]

### 1.5.6. Konstrukcje cięgnowe (wiszące)

Konstrukcje cięgnowe są bardzo szybko rozwijającym się typem przekryć. Składają się one z pokrycia, układów cięgien, zakończeń i konstrukcji wsporczych. Umożliwiają realizację atrakcyjnych form architektonicznych oraz spełniają współczesne wymagania technologiczne. Należą do konstrukcji najbardziej korzystnych pod względem ekonomicznym takich obiektów jak stadiony czy duże obiekty sportowe. Umożliwiają bez podparć pośrednich uzyskać rozpiętość do 400 m.

Ustroje cięgnowe przekryć można podzielić na:

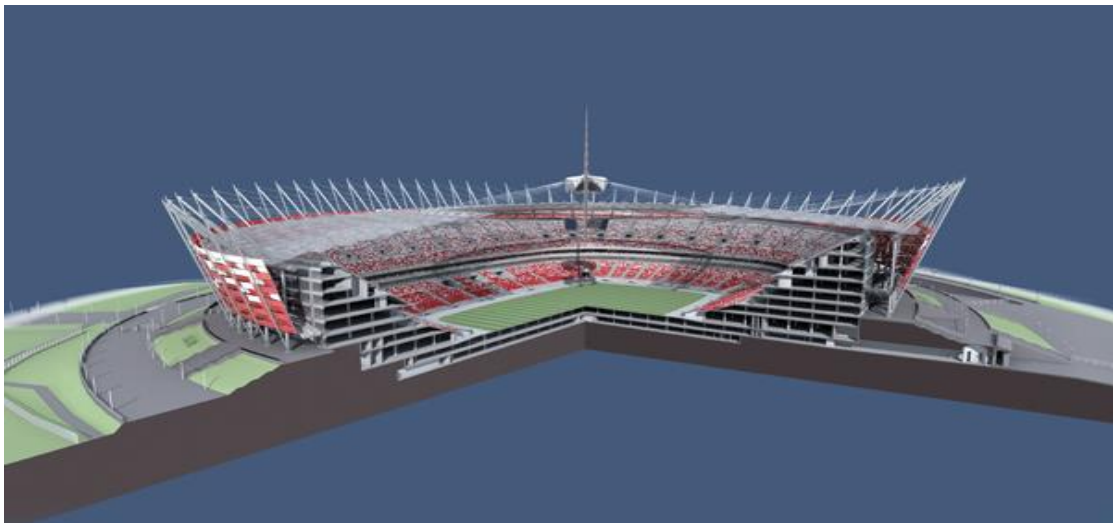
- cięgnowe płaskie,
- cięgnowe przestrzenne,
- cięgnowe typu zamkniętego,
- cięgnowe typu otwartego.

Rozwiązania te mogą być wzajemnie mieszane i stosowane wymiennie, w zależności od efektu architektonicznego.

Lekkie i wiotkie elementy linowe są podatne na drgania, a ich niewielkie przekroje skutkują znacznymi przemieszczeniami konstrukcji pod wpływem obciążeń grawitacyjnych i wiatru (łopotanie i duże przemieszczenia). Bardzo mała sztywność ustrojów linowych i niewielka masa wymuszają stosowanie elementów usztywniających połączeń dachowych, sztywnego pokrycia, dociążenia warstwami poszycia lub przy użyciu cięgien napinających, które umożliwiają wstępne sprężenie konstrukcji. Z uwagi na ssące działanie wiatru oraz oddziaływania dynamiczne na lekką konstrukcję rozwiązania takie są konieczne. Sprężenie cięgien pozwala na prawidłową pracę przy niesymetrycznych obciążeniach oraz umożliwia dodatkowo formowanie różnych kształtów dachów.

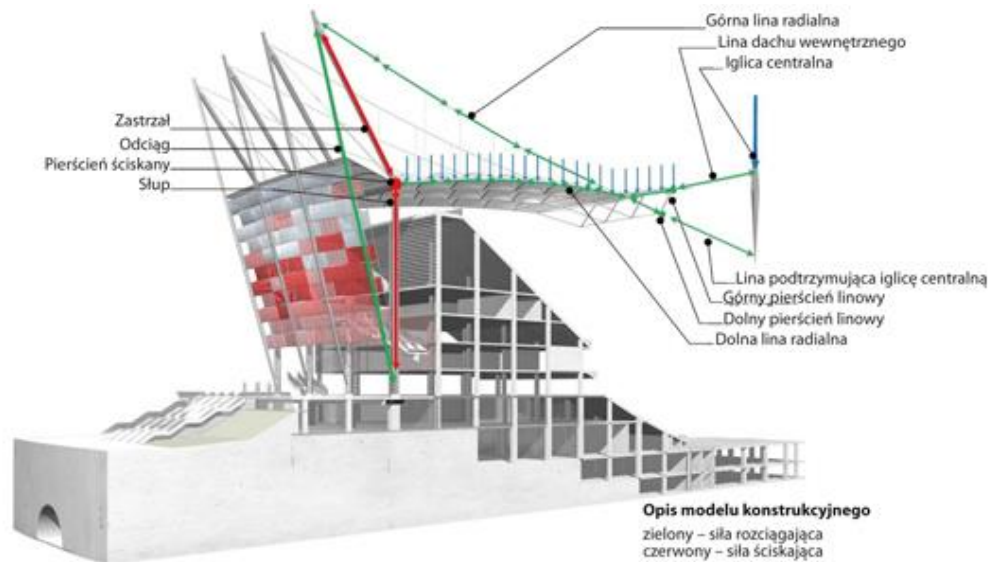
Najczęstszym kształtem tego rodzaju przekryć są dachy kołowe i owalne, stosowane na przekrycia aren sportowych i widowiskowych oraz stadionów. Stosuje się w nich cięgna z lin i prętów stalowych o wytrzymałości do  $2400 \text{ N/mm}^2$ .

Jednym z najbardziej rozpoznawalnych przekryć tego rodzaju w Polsce jest dach stadionu Narodowego z powierzchnią przekraczającą  $60\,000 \text{ m}^2$ , na którą użyto ponad 37 km lin stalowych [W8].



Rys. 1.22. Przekrój przez stadion [W11]

Sprężona konstrukcja eliptycznego dachu przypominająca koło rowerowe z napiętymi sprychami jest przestrzennym układem cięgnowym utrzymującym w części środkowej iglice o masie około 190 ton. Liny są podtrzymywane przez wieńczący koronę dachu stadionu, oparty na 72 rurowych słupach stalowych, obwodowy ring ściskany oraz podwieszony do 72 zastrzałów z odciągami zgodnie z Rys. 1.23 [W8][W11].



Rys. 1.23. Przekrój przez strukturę stadionu [W11]

Przykładem hali, w której zastosowano przekrycia cięgnowe jest Dorton Arena w Raleigh (USA). Zastosowano tam ustrój cięgnowy wielowęzłowy. Przekrycie jest typu zamkniętego. Siatka linowa została zawieszona między parabolicznymi łukami. Rozpór z łuków przejmują ściągi znajdujące się pod powierzchnią posadzki [W8].



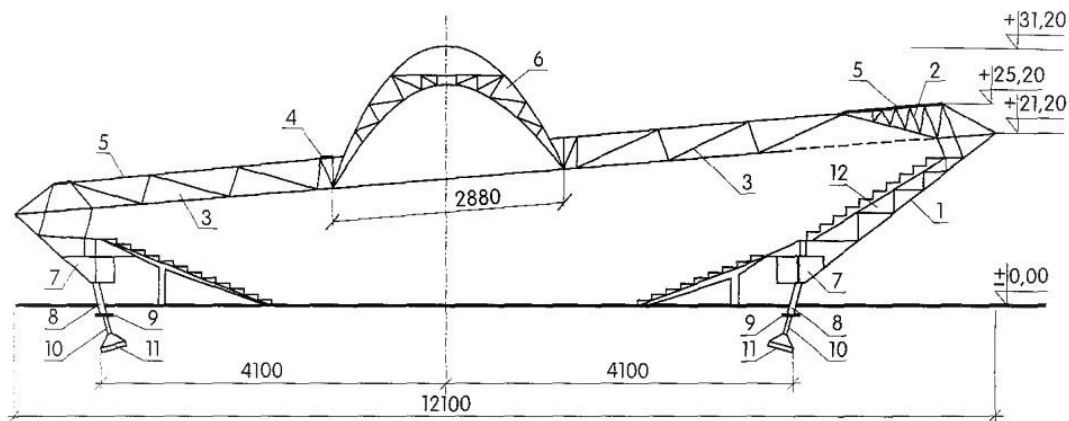
Rys. 1.24. „Paraboleum” Dorton Arena w Raleigh (USA), architekt Maciej Nowicki [W12]

Kolejnym z najbardziej rozpoznawalnych obiektów z zastosowanym przekryciem cięgnowym jest hala widowiskowo-sportowa „Spodek” w Katowicach (Polska). Obiekt o rzucie kołowym z pierścieniem zewnętrznym ściskającym i wewnętrznym rozciągającym.



Rys. 1.25. Hala widowiskowo-sportowa „Spodek” w Katowicach (Polska) [W13]

Obiekt ma kształt odwróconego stożka przeciętego płaszczyzną nachyloną pod kątem  $9^\circ$  do poziomu. Konstrukcje nośną dachu hali stanowią: zewnętrzny pierścień stalowy o średnicy 100 m oparty na obwodzie na 120 ukośnych wspornikach, stalowy pierścień wewnętrzny o średnicy 32 m, pełniącego funkcję dźwigara brzegowego kopuły obrotowej oraz 120 promieniście rozmieszczonych dźwigarów liniowo-prętowych łączących obydwie pierścienie ze sobą [7].



Rys. 1.26. Schemat konstrukcji hali widowiskowo-sportowej w Katowicach: 1-płaskie żebra kratowe, 2-wsporniki żebier w wyższej części hali, 3-dźwigary prętowo-linowe, 4-pierścień usztywniający pod kopułą, 5-obwodowy pierścień dachowy, 6-kopuła żebrowa, 7-skrzynkowy pierścień fundamentowy z betonu sprężonego, 8-żelbetowe słupy prefabrykowane, 9-pierścień pośredni fundamentowy, 10-słupy, 11-stopy fundamentowe [7]

### 1.5.7. Ustroje łukowe

Konstrukcje łukowe charakteryzują się odmiennym układem niż konstrukcje słupowo-ryglowe. Pozwalają one na uzyskanie podobnych, a nawet większych niż w przypadku

układów ramowych rozpiętości przy równoczesnym zmniejszeniu zużycia stali. Same łukowe ustroje nośne zostały opisane w podrozdziale 1.4.2 .

Tam, gdzie funkcja obiektu narzuca ciekawe rozwiązania i względy estetyczne są decydujące, czyli w większości zastosowań obiektów z przeznaczeniem widowiskowym, stosowane są rozwiązania mające wzbudzić podziw obserwatorów.

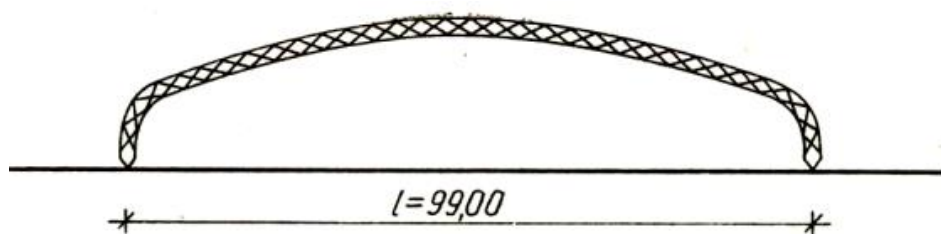
Konstrukcje łukowe stosowane są najczęściej w: hangarach, pawilonach wystawowych, halach sportowych, halach targowych, mostownictwie [5][W8].

Do bardziej znanych obiektów, w których zastosowano stalowe konstrukcje łukowe należą:

- **Pawilon wystawowy w Mediolanie (Włochy)**

- zastosowane łuki kratowe dwuprzegubowe,
- rozpiętość 99 m, strzałka łuku 20 m,
- wysokość łuku w zworniku 2 m.

a)



b)



Rys. 1.27. Pawilon wystawowy w Mediolanie: a) schemat łuku, b) fragment skratowania łuku [5]

- **Stadion w Nowym Jorku (USA)**

- rozpiętość łuku 325 m,
- wysokość łuku 75 m,
- długość 420 m,
- na łukach rozpięto przykrycia aluminiowe.



Rys. 1.28. Widok stadionu w Nowym Jorku (USA) [5]



- **Stadion Wembley w Londynie (Anglia)**
  - zastosowano łuk kratowy na stadionem,
  - rozpiętość łuku około 315 m,
  - wyniosłość łuku to 133 m.



Rys. 1.29. Stadion Wembley w Londynie (Anglia) [W14]

- **Most Bayonne Bridge w Stanach Zjednoczonych**
  - długość głównego przęsła 511 m,
  - wyniosłość łuku wynosi około 69 m.



Rys. 1.30. Most Bayonne Bridge w Stanach Zjednoczonych [W15]

- **Dworzec kolejowy Hauptbahnhof w Berlinie (Niemcy)**
  - przekrycie o długości 321 m łukami o rozpiętości od 46 do 66 i wysokości od 12 do 16 m.



Rys. 1.31. Szklany dach na konstrukcji łukowej nad peronem: widok ogólny przekrycia peronów [5]

- **Wielofunkcyjny kompleks sportowo-rekreacyjny „Rogers Centre” w Toronto (Kanada)**
  - ruchoma konstrukcja nośna dachu.



Rys. 1.32. Kompleks sportowo-rekreacyjny „Rogers Centre” w Toronto (Kanada) [W16]

- **Tropical Islands w Halbe (Niemcy)**
  - tropikalny park rozrywki mieszczący się w dawnej hali produkcyjnej sterowców,
  - obiekt ma 360 metrów długości, 210 metrów szerokości, 107 metrów wysokości i łączną pojemność 5,5 miliona metrów sześciennych.

a)



b)



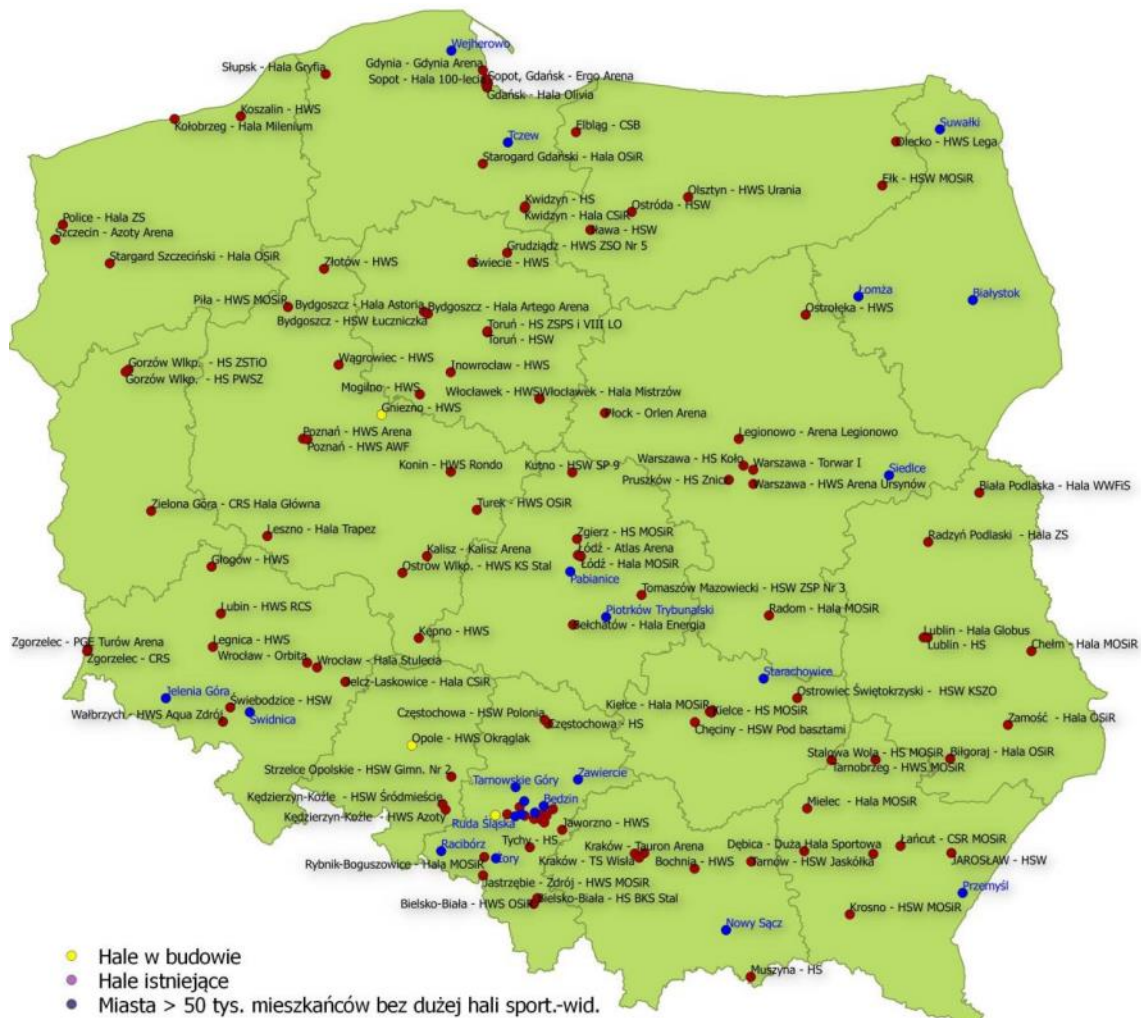
Rys. 1.33. Tropical Island w Halbe (Niemcy): a) widok kopuły od zewnątrz, b) widok konstrukcji od środka [W17]

## 1.6. Hale widowiskowo-sportowe w Polsce

Przeprowadzona diagnoza społeczna zapotrzebowania na infrastrukturę sportowo-rekreacyjną przez Ministerstwo Sportu i Turystyki wykazała, że stan nasycenia halami widowiskowo-sportowymi jest niewystarczający w pewnych regionach Polski [W18].

### 1.6.1. Hale widowiskowo - sportowe

Na Rys. 1.34 przedstawiono występowanie obiektów widowiskowo-sportowych w Polsce. Do tych hal zakwalifikowano te, których widownia liczy przynajmniej 900 miejsc siedzących. Na rysunku uwzględniono obiekty służące przede wszystkim najpopularniejszym halowym sportom olimpijskim (siatkówka, koszykówka, piłka ręczna) [W18].



Rys. 1.34. Rozmieszczenie hal sportowo-widowiskowych w Polsce [W18]

W województwie podlaskim, jako jedynym w kraju nie ma choćby jednej hali widowiskowo-sportowej, przez co budowa takiego obiektu np. w Białymstoku jest

działaniem uzasadnionym i istotnym z zakresu tworzenia warunków do rozwoju sportu na szczeblu lokalnym i regionalnym, a nawet ogólnopolskim [W18].

### 1.6.2. Duże hale widowiskowo-sportowe

W Polsce znajduje się 17 dużych hal sportowo-widowiskowych posiadających widownię o pojemności 5000 lub więcej miejsc siedzących zgodnie z Rys. 1.35 [W18].



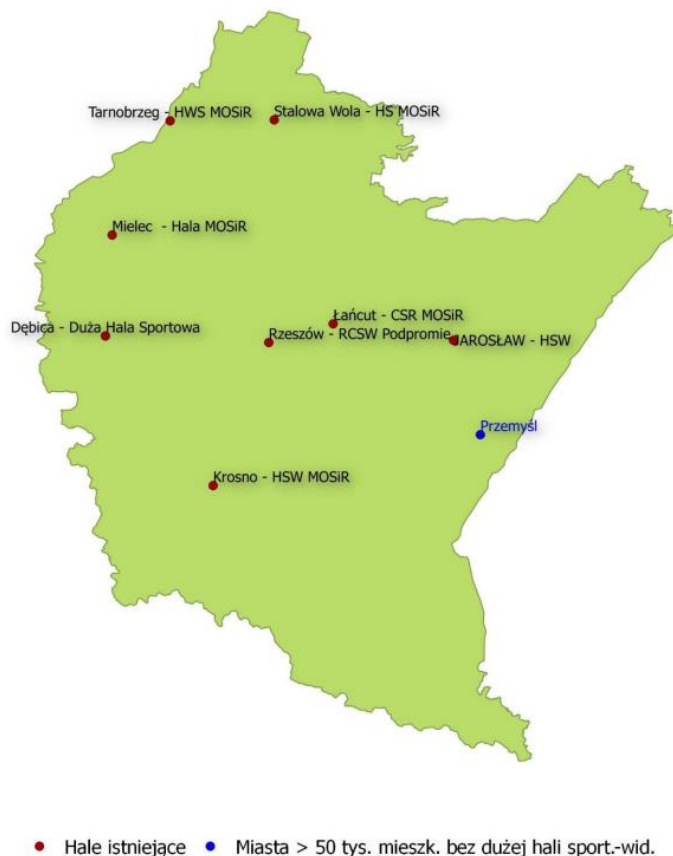
Rys. 1.35. Rozmieszczenie największych hal sportowo-widowiskowych w Polsce [W18]

Województwo podlaskie, warmińsko-mazurskie, podkarpackie nie posiadają obiektów sportowo-widowiskowych o pojemności trybuny stałej na minimum 5000 osób. Aktualne potrzeby mieszkańców miast w zakresie ogólnodostępnych, powszechnych obiektów sportu i imprez okolicznościowych są wysokie.

Odpowiedzią na zapotrzebowanie jest projekt dyplomowy pt. „Projekt wielofunkcyjnej hali sportowej dla 9 tys. widzów”. Lokalizację obiektu ustalono w województwie podkarpackim, dokładnie w mieście Przemyśl.

### 1.6.3. Duże hale widowiskowo-sportowe w województwie podkarpackim

W województwie podkarpackim miastem powyżej 50 tysięcy mieszkańców, które nie posiada dużej hali widowiskowo-sportowej jest Przemyśl [W18].



Rys. 1.36. Duże hale widowiskowo-sportowe na obszarze województwa podkarpackiego [W18]

Przemyśl jest to miasto, które posiada halę sportowo-widowiskową o pojemności 622 miejsc. W mieście funkcjonuje 1 klub sportowy reprezentujący wysoki poziom w sportach halowych – SRS Czuwaj (piłka ręczna mężczyzn – i liga) [W18].

Tabela 1.1. Zestawienie dużych hal widowiskowo-sportowych w województwie podkarpackim [W18]

Lp.	Nazwa hali	Miejscowość	Pojemność całkowita (miejsca siedzące)	Max ilość osób w hali
1	Duża Hala Sportowa	Dębica	1500	1500
2	HSW w Jarosławiu	Jarosław	1500	1500
3	HSW MOSiR Krosno	Krosno	2100	2100
4	CSR MOSiR Łańcut	Łańcut	1150	1150
5	Hala MOSiR Mielec	Mielec	1915	3915
6	RCSW „Podpromie”	Rzeszów	4304	4304
7	HS MOSiR Stalowa Wola	Stalowa Wola	1455	1455
8	HWS MOSiR Tarnobrzeg	Tarnobrzeg	2000	2000

#### 1.6.4. Największa hala widowiskowo-sportowa w Polsce

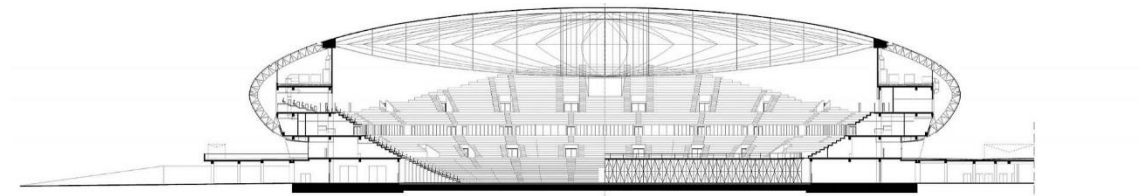
Tauron Arena Kraków to największa i najnowocześniejsza hala widowiskowo-sportowa w Polsce, pozwalająca na organizacje wydarzeń o różnym charakterze i skali. Wśród nich są wydarzenia sportowe i kulturalne: festiwale, koncerty, pokazy filmowe, musicale, pokazy cyrkowe, show na lodzie; gale, kongresy, imprezy branżowe i plenerowe. Obiekt wraz z halą rozgrzewkową tworzy kompleks sportowy [W12] [13].



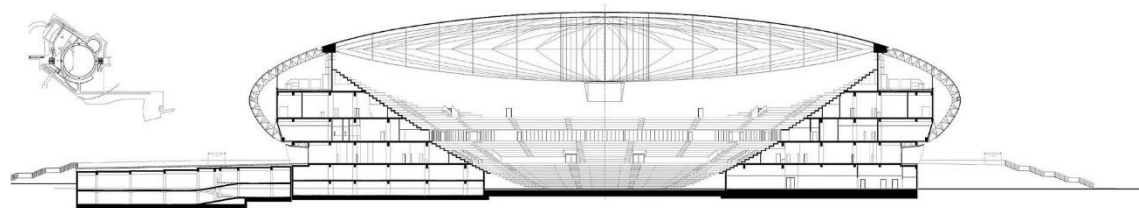
Rys. 1.37. Tauron Arena Kraków – widok zewnętrzny obiektu [W18]

Obiekt posiada trybunę stałą która może pomieścić 15000 widzów. Całkowita kubatura obiektu wynosi  $614\,510\text{ m}^3$ . Całkowita powierzchnia wynosi  $96\,815\text{ m}^2$ . Dach hali głównej ma konstrukcję cięgnowo - prętową opartą na zewnętrznym żelbetowym okręgu. Główny ustrój nośny zadaszenia tworzy układ dwudziestu dźwigarów rozłożonych promieniście w rozstawie  $9^\circ$ . Dźwigary składają się z kabli stanowiących pas górny i dolny oraz rozpierających je słupów o przekroju prostokątnym. Zakotwienia dźwigarów znajdują się z jednej strony w stalowym pierścieniu wewnętrznym o średnicy osiowej 10,4 m, a z drugiej strony w żelbetowym pierścieniu zewnętrznym o średnicy osiowej 128,4 m. Każdy dźwigar ma wysokość 15,0 m [W19].

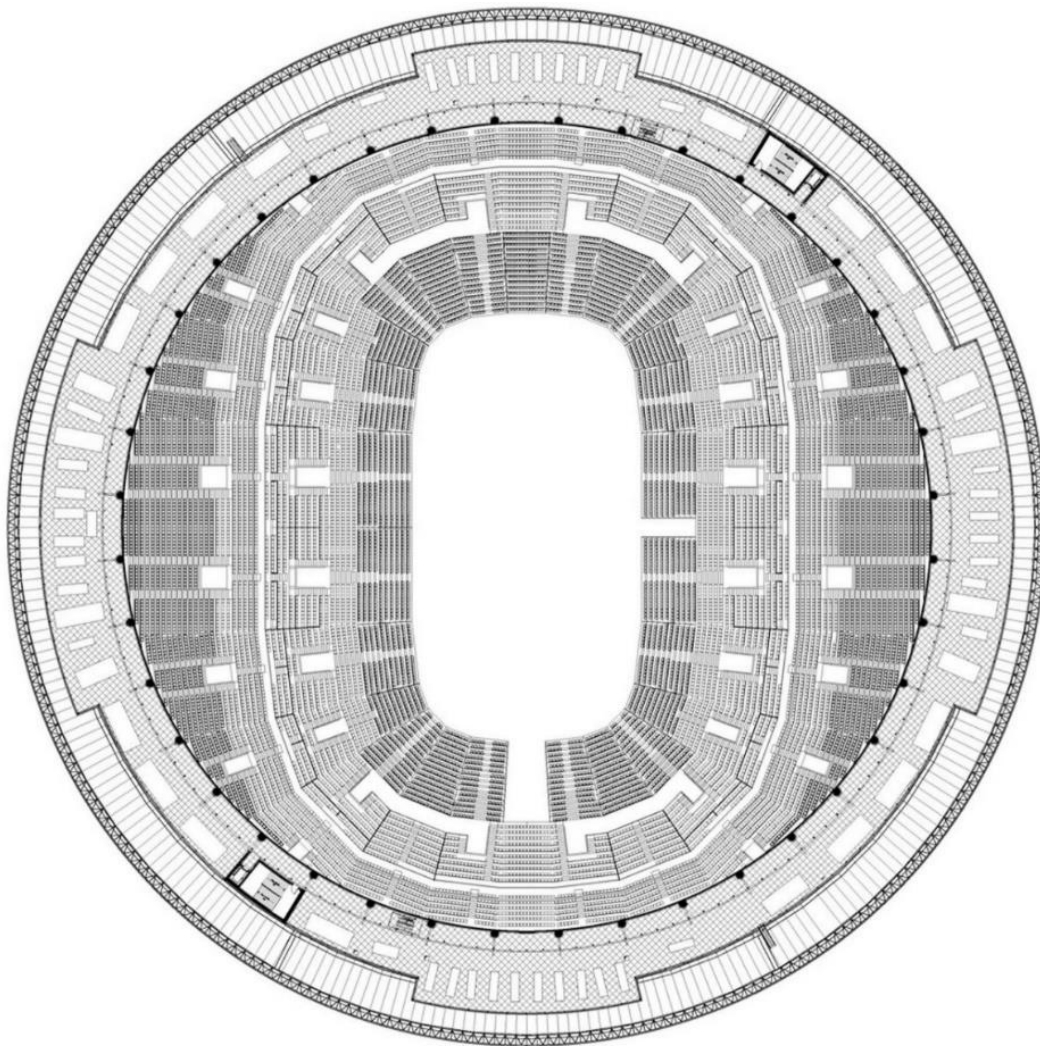
a)



b)



Rys. 1.38. Tauron Arena Kraków – przekrój obiektu: a) przekrój podłużny, b) przekrój poprzeczny [W20]



Rys. 1.39. Tauron Arena Kraków – rzut widowni [W20]



## II. CZĘŚĆ OBLICZENIOWA

### 2. Kształtowanie obiektu

#### 2.1. Wstęp - inspiracje konstrukcyjne

Źródłem inspiracji do projektowania, z których korzystają architekci i konstruktorzy jest bardzo wiele. Zgodnie z [W21] można wyróżnić:

- inspiracje stylami i porządkami architektonicznymi,
- inspiracje wynikające ze współzależności funkcji, konstrukcji i formy,
- inspiracje architektonicznymi forami konstrukcyjnymi,
- inspiracje matematyczne (wzory, wykresy, fałdowanie),
- inspiracje formami geometrycznymi,
- inspiracje potrzebami własnymi użytkownika.

Oglądanie gotowych rozwiązań może stać się źródłem nowych, a zarazem cennych pomysłów. Jeżeli umyślnie połączyć podpatrzone elementy z wielu dzieł, to będzie to trudne do odgadnięcia. Najważniejsza kwestia, jeżeli chodzi o realizację projektów jest konieczność dążenia do oryginalności i indywidualności [W21].

W pracy dyplomowej pt. „Projekt wielofunkcyjnej hali sportowej dla 9 tys. widzów” zaproponowano rozwiązanie konstrukcji wzorując się na kilku powstałych obiektach. Należą do nich:

- Hala targowa we Frankfurcie nad Menem (Niemcy),
- Hala sportowa w Tapioli koło Helsinek (Finlandia),
- Centrum sportowo-rekreacyjne w Zgorzelcu (Polska).

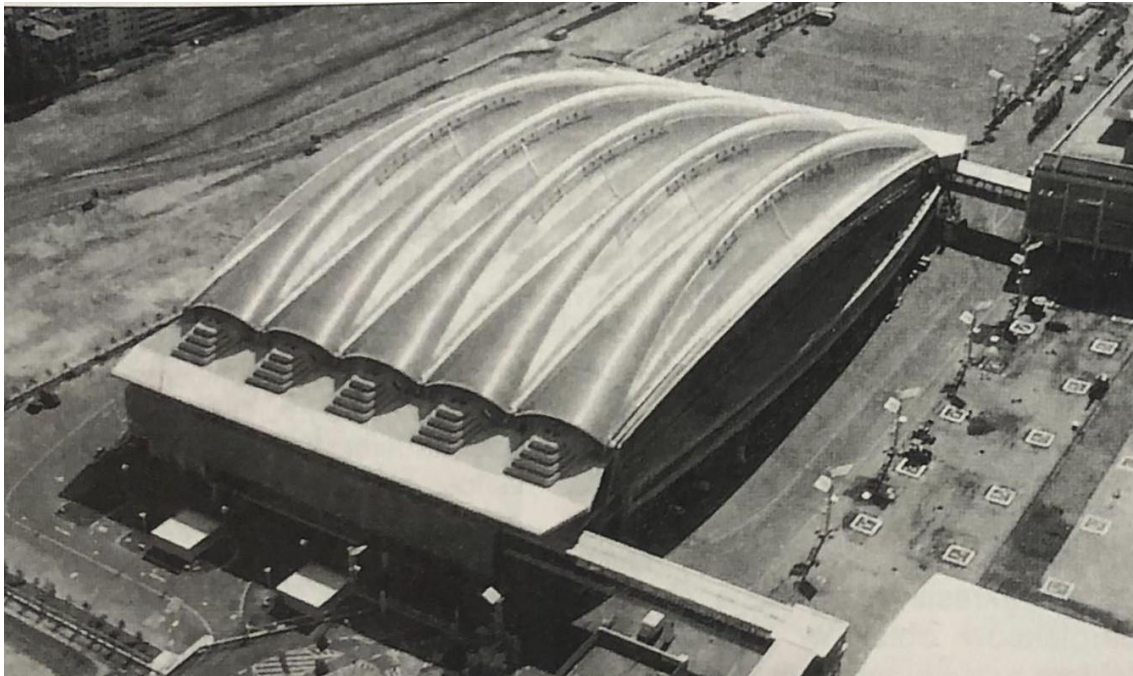
Konstrukcje budynku zaprojektowano mając na uwadze przeznaczenie hali – obiekt widowiskowo-sportowy, przystosowany do gier zespołowych tj.:

- siatkówka,
- koszykówka,
- piłka ręczna.

W obszarze kubatury projektowanego obiektu usytuowano trybunę stałą oraz znajdujące się pod nią zaplecze gospodarczo-sanitarne przystosowane do obsługi widzów.

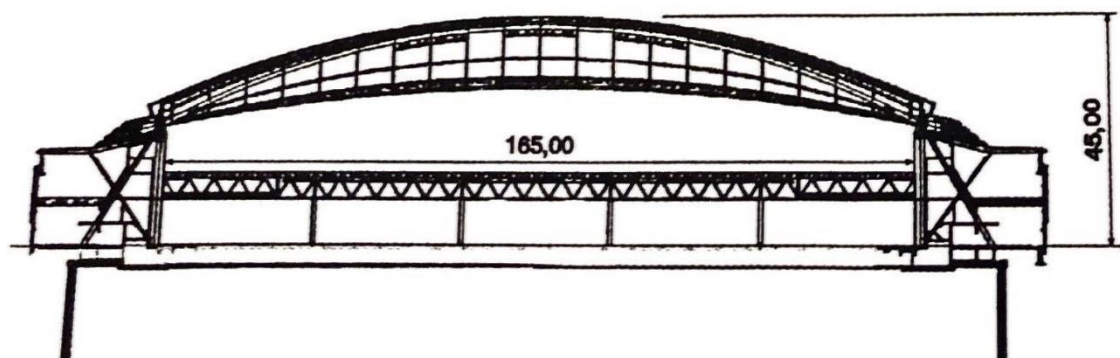
### 2.1.1. Hala targowa we Frankfurcie nad Menem (Niemcy)

We Frankfurcie nad Menem przeprowadzono rozbudowę targowiska w ramach których powstała hala targowa o powierzchni 39 000 m<sup>2</sup>. Obiekt posiada wymiary zewnętrzne 210x130 m i wysokość 45 m. Składa się z budynku obudowanego z 3 stron przybudówkami 4- i 5- kondygnacyjnymi, w których znajdują się m.in. biura i magazyny [7].



Rys. 2.1. Widok ukończonej hali targowej od strony północo-wschodniej [7]

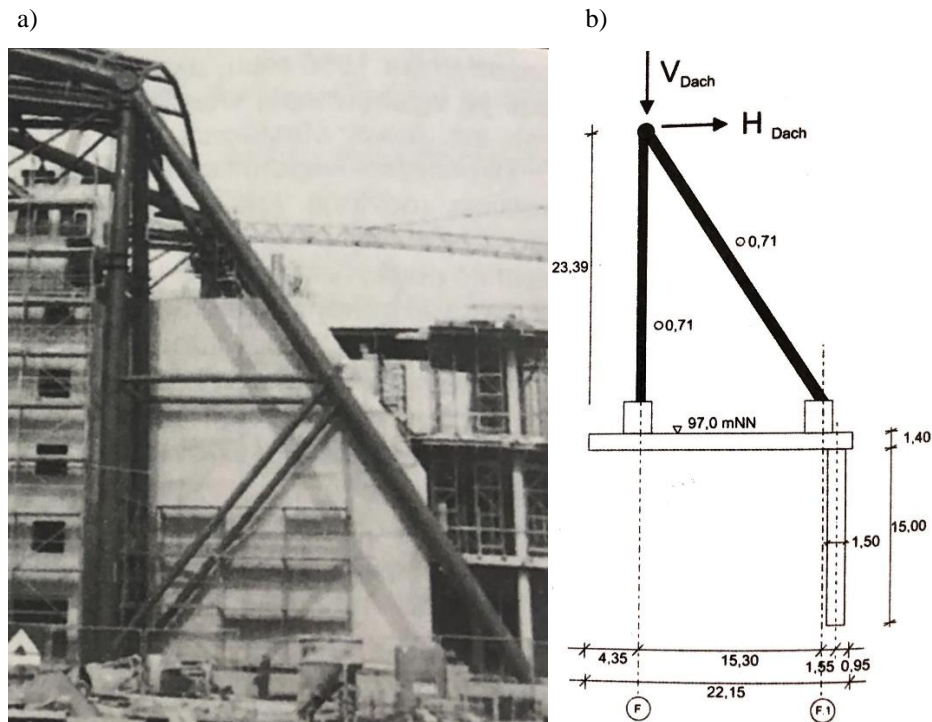
Hala jest obiektem dwukondygnacyjnym, w której można wyróżnić część parterową i górną, przykrytą stalową konstrukcją łukową o rozpiętości 165 m zgodnie z Rys. 2.2 [7].



Rys. 2.2. Przekrój podłużny hali [7]

Bezśłupowa łukowa konstrukcja dachu jest rozpiętości 165 m. Składa się ze swobodnie podpartych przestrzennych dźwigarów stalowych o sztywnych węzłach

spawanych przekazujących obciążenie bezpośrednio na kratowe przypory (tzw. A-Bock) [7].



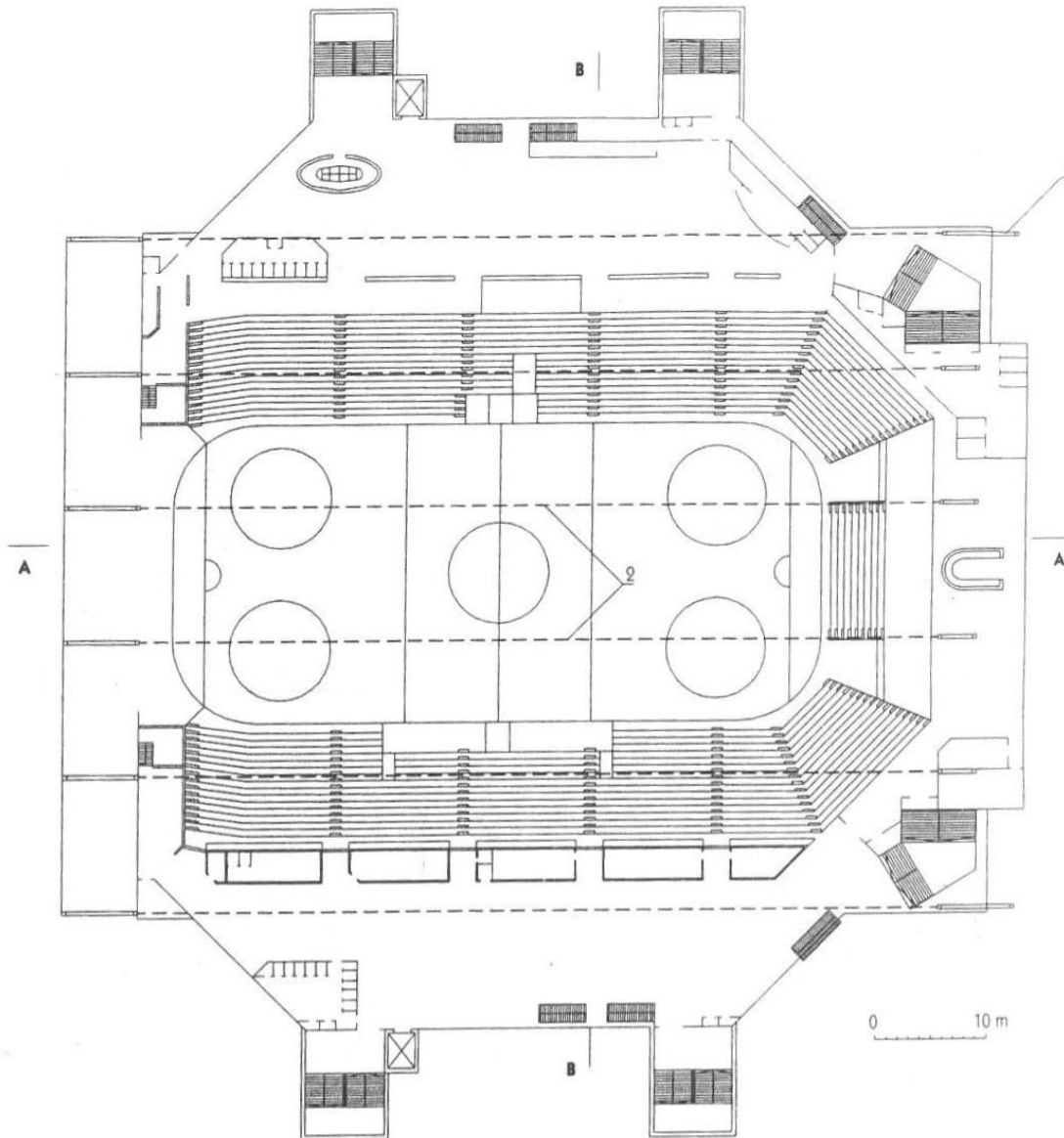
Rys. 2.3. Kratowe przypory A-Bock: a) widok, b) schemat obciążenia kratowych podpór dźwigara [7]

Problem przejścia rozporu łuków i przekazanie go na fundament przez kratowe podpory został rozwiązany przez zastosowanie odpowiednich fundamentów.

Konstrukcje podziemne zostały zaprojektowane jako płyty żelbetowe na palach, nazywane KPP, obciążone znacznymi siłami poziomymi [7].

### 2.1.2. Hala sportowa w Tapioli koło Helsinek (Finlandia)

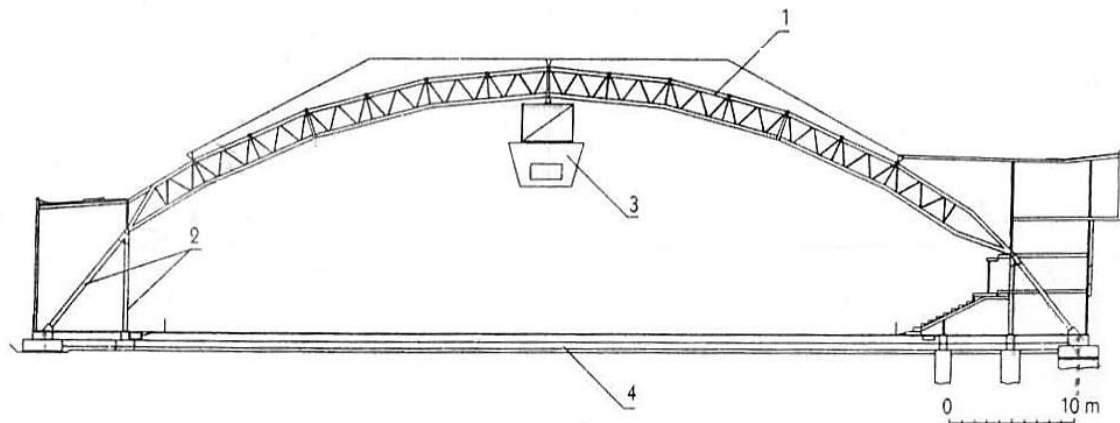
Hala widowiskowo-sportowa o szkielecie stalowym, w której znajduje się lodowisko. Obiekt może pomieścić 7300 osób. Architekci zrezygnowali z wyszukanych a zarazem kosztownych materiałów wykończeniowych. Jako elementy wystroju zostały wykorzystane detale konstrukcyjne [9].



Rys. 2.4. Rzut hali w poziomie pierwszego piętra: 1-trójkątna rama podpory; 2-kanaly ze sprężonymi cięgnami łączącymi podpory [9]

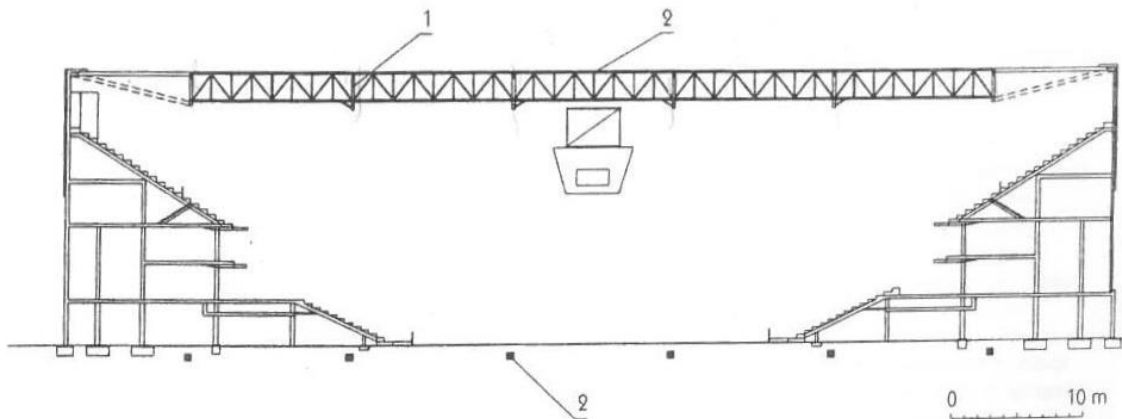
Szkielet konstrukcyjny składa się z sześciu łukowych dźwigarów kratowych o rozpiętości 73,57 m, połączonych kratowymi płatwiami o rozstawie co 5 m. Przy wymiarowaniu konstrukcji uwzględniono możliwość podwieszenia do przekrycia dodatkowych ciężarów, m.in. 25-tonowego zespołu ekranów [9].

Łuki są oparte przegubowo na podporach – trójkątnych ramach wykonanych z kształtowników walcowanych na gorąco, profili po ustawieniu wypełnionych betonem. Podpory usytuowane naprzeciwko siebie są połączone sprężonymi cięgnami ukrytymi w kanałach pod powierzchnią tafli lodowiska [9].



Rys. 2.5. Konstrukcja nośna łukowego przekrycia-przekrój pionowy podłużny A-A: 1-główny dźwigar nośny, 2-trojkatna rama podpory głównego dźwigara, 3-blok ekranów telewizyjnych, 4- sprężone cięgna łączące podpory [9]

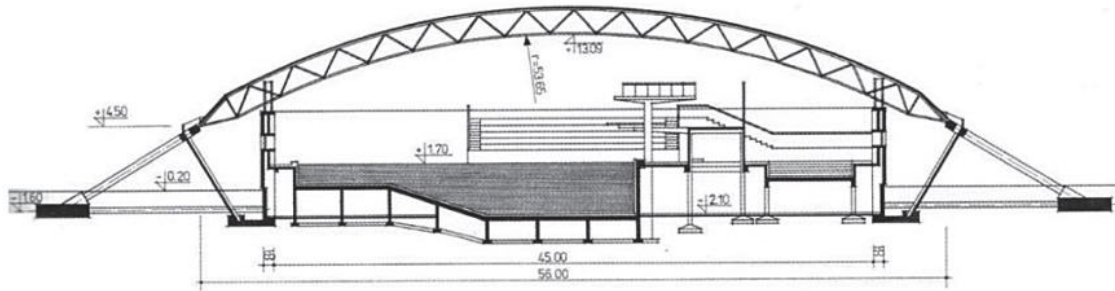
Szkielet konstrukcji pokryto trapezowymi blachami perforowanymi, powlekanymi sztucznym tworzywem stanowiącym wykończenie i ochronę antykorozyjną materiału. Blachy spełniały funkcje sufitu podwieszonego i posłużyły jako podłoże pod kolejne warstwy dachu [9].



Rys. 2.6. Konstrukcja trybun hali-przekrój pionowy poprzeczny B-B: 1-główny dźwigar nośny, 2-kratowa platew, 3-sprężone cięgna łączące podpory [9]

### 2.1.3. Centrum sportowo-rekreacyjne w Zgorzelcu (Polska)

Jeden z wielu obiektów zaprojektowanych przez profesora Stanisława Kusia. Konstrukcja dachu jest fałdowym łukiem przekazującym rozpór i reakcję na pochyle słupy, których fundament stanowi podziemna wzdłużna płyta fundamentowa zrównoważona z kolei prostopadłymi do niej sprężonymi cięgnami obetonowanymi. Obiekt został otwarty w 1986 roku [W22].



Rys. 2.7. Przekrój poprzeczny hali w Zgorzelcu [W22]

Obecnie obiekt pełni funkcje centrum sportowo – rekreacyjnego oferując turystom oraz mieszkańcom możliwość czynnego wypoczynku. W centrum odbywają się imprezy sportowe i rekreacyjne o zasięgu międzynarodowym.

Kompleks składa się z basenu krytego oraz hali widowiskowo - sportowej przystosowanej do rozgrywania meczów koszykówki, piłki siatkowej, ręcznej i halowej oraz walk bokserskich [W23].



Rys. 2.8. Widok obiektu [W23]

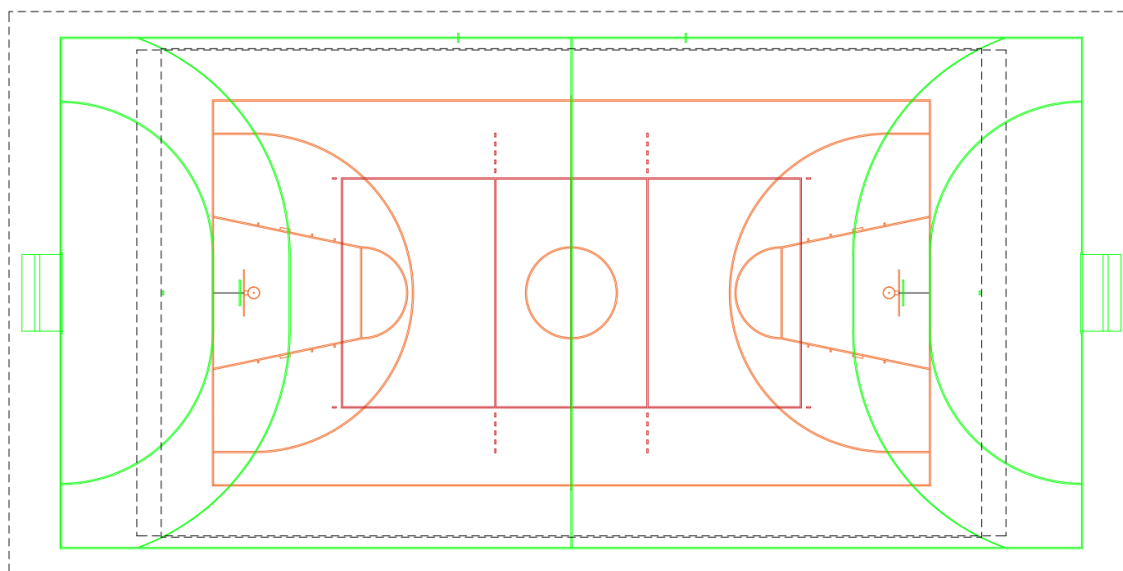
## 2.2. Boiska sportowe

Wymiary boisk przyjęto według przepisów odpowiednich organizacji sportowych zgodnie z Tabelą 2.1. W obiekcie przyjęto układ boisk zgodnie z Rys. 2.9.

Linia przerywaną zostały oznaczone dodatkowe strefy wolne od przeszkód.

Tabela 2.1. Wymiary boisk poszczególnych dyscyplin sportowych [W24][W25][W26]

Dyscyplina sportowa	Użytkowa powierzchnia sportowa netto		Szerokość dodatkowej strefy wolnej od przeszkód przy [m]:		Wysokość hali w świetle [m]
	Długość [m]	Szerokość [m]	Ścianach bocznych	Ścianach czołowych	
Siatkówka	18	9	5	8	12,5
Koszykówka	28	15	2	2	7
Piłka ręczna	40	20	0,5	2,0	7



Rys. 2.9. Przyjęty układ boisk: linia czerwona-siatkówka, linia pomarańczowa koszykówka, linia zielona-piłka ręczna, linia przerywana- strefa wolna od przeszkód

## 2.3. Trybuna

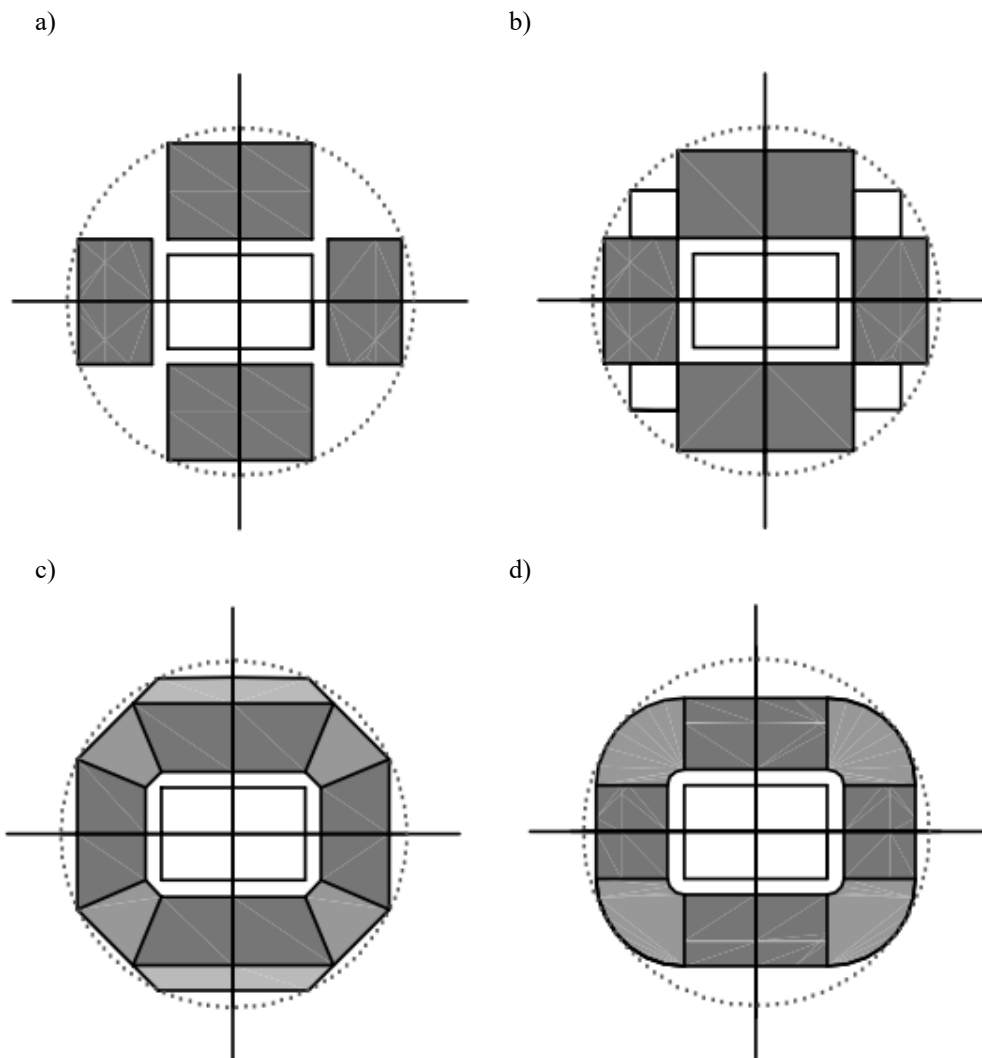
W obiekcie przyjęto trybunę stałą na 9000 widzów zgodnie z wytycznymi do tego typu konstrukcji.

### 2.3.1. Kształtowanie geometrii trybuny

Główną cechą wyróżniającą widownie obiektów sportowych jest kształt linii tworzących jej rzędów. W współczesnym budownictwie hal sportowych można wyróżnić dwa rodzaje. Widownie o łukowej geometrii planu rzędów i widownie, w których rzędy tworzą w rzucie poziomym linie proste, równoległe do linii bocznych pola boiska.

W przypadku widowni prostokreślnych, to głównym motywem decydującym o wyborze tego rozwiązania są względy kosztowe. Natomiast aspekty techniczno-ekonomiczne powodują, że w przypadku widowni łukowej odchodzi się od projektowania pełnej linii łukowej, zastępując odcinkami prostymi [10].

Do najbardziej popularnych należą trybuny pokazane na Rys. 2.10.



Rys. 2.10. Rzuty widowni o prostokątnej geometrii poziomej dla boisk prostokątnych: a) prostokątna z wolnymi narożnikami, b) prostokątna z narożnikami wypełnionymi budynkiem, c) wielokątowa ośmiokątna, d) prostokątna z narożnikami łukowymi [10]

W przypadku trybun przedstawionych na Rys. 2.10 a-b powstają cztery niezależne przestrzenie widowni, usytuowane równoległe do bocznych linii boiska, przy pozostawieniu naroży jako pustych lub wypełnionych innymi obiektami niż widownia.

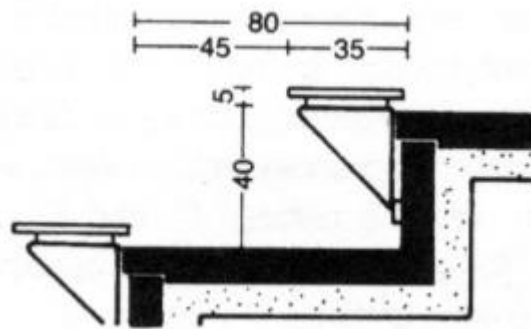
Rzuty przedstawione na Rys. 2.10 c-d różnią się od siebie sposobem rozwiązania strefy narożnej. W jednym przypadku (Rys. 2.10-c) realizuje się rzędy prostokątne, ustawione przekątniowo. Linie załamania dobiera się w taki sposób, by głębokość rzędów wszystkich segmentów widowni była taka sama. W drugim przypadku (Rys. 2.10-d) narożnik jest wypełniony widownią łukową, z płynnym przejściem rzędów prostokątnych w łukowe [10].



W celu ukształtowania geometrii trybuny przyjęto podstawowe zalecenia związane z zapotrzebowaniem na miejsca siedzące, które wynoszą:

- szerokość miejsca siedzącego: 0,5 m,
- głębokość miejsca siedzącego: 0,8 m,
- głębokość siedzenia: 0,35 m,
- przejście 0,45 m.

Na każde 750 miejsc siedzących musi przypadać 1 m szerokości drogi ewakuacyjnej. Dopuszczalna liczba miejsc w rzędzie po każdej stronie przejścia dla rzędów o małym i dużym pochyleniu wynosi odpowiednio 48 i 36 miejsc [11].



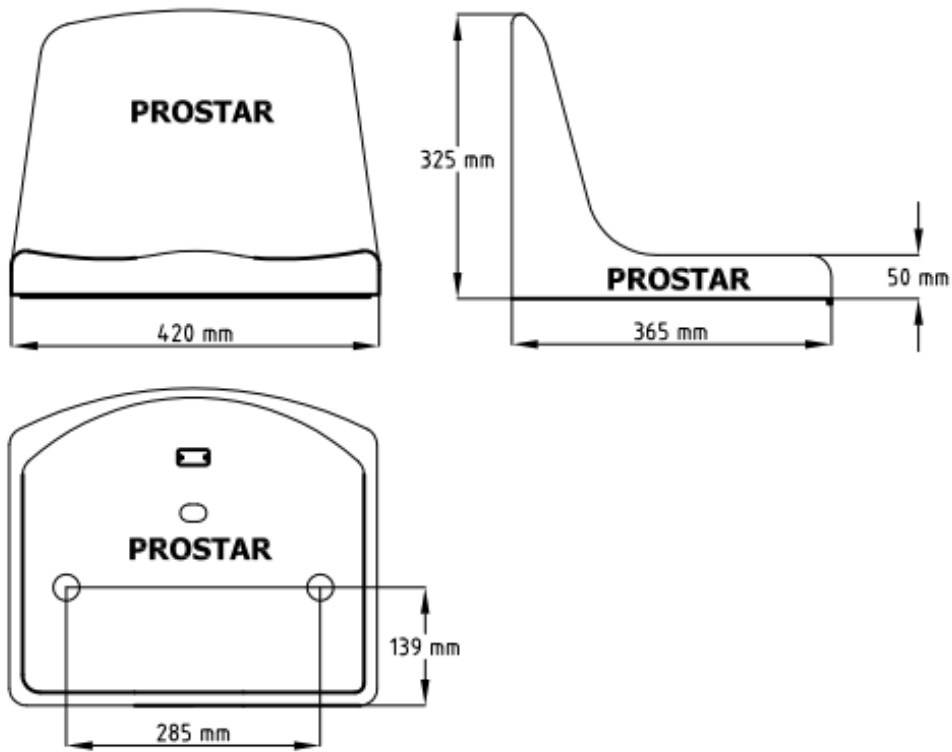
Rys. 2.11. Przykładowe rozwiązanie siedzisk na trybunie [11]

Dokładny projekt trybuny powinien zostać wykonany zgodnie z obowiązującymi wytycznymi zawartymi w rozporządzeniach omawiających szczegółowe wymagania dotyczące dojść, schodów, pochylni dla miejsc zgromadzeń.

Z uwagi na zakres konstrukcyjny pracy magisterskiej, przyjęto podstawowe dane do projektowania trybun.

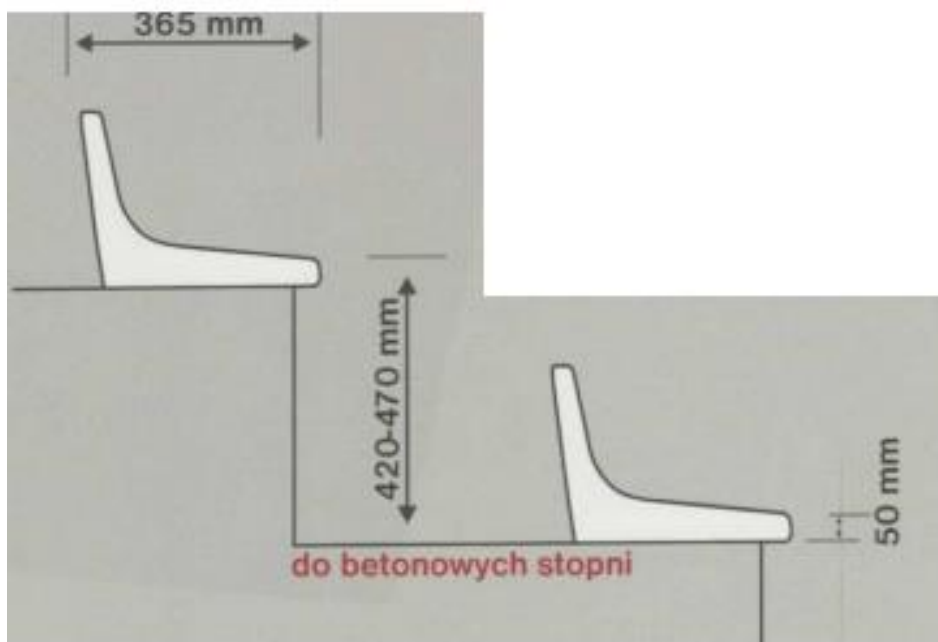
### 2.3.2. Siedziska

Przyjęto siedziska sportowe dla obiektów sportowych marki PROSTAR model W0-06. Powierzchnia siedzisk i oparcia jest gładka, dzięki ergonomicznemu wyprofilowaniu a także zaokrągleniu krawędzi bocznych i oparcia [W27].



Rys. 2.12. Wymiary siedziska [W27]

Producent zaleca kilka sposobów mocowanie krzesełek. W kształtowanej trybunie zaproponowano mocowanie siedziska do betonowych stopni zgodnie z Rys. 2.13.

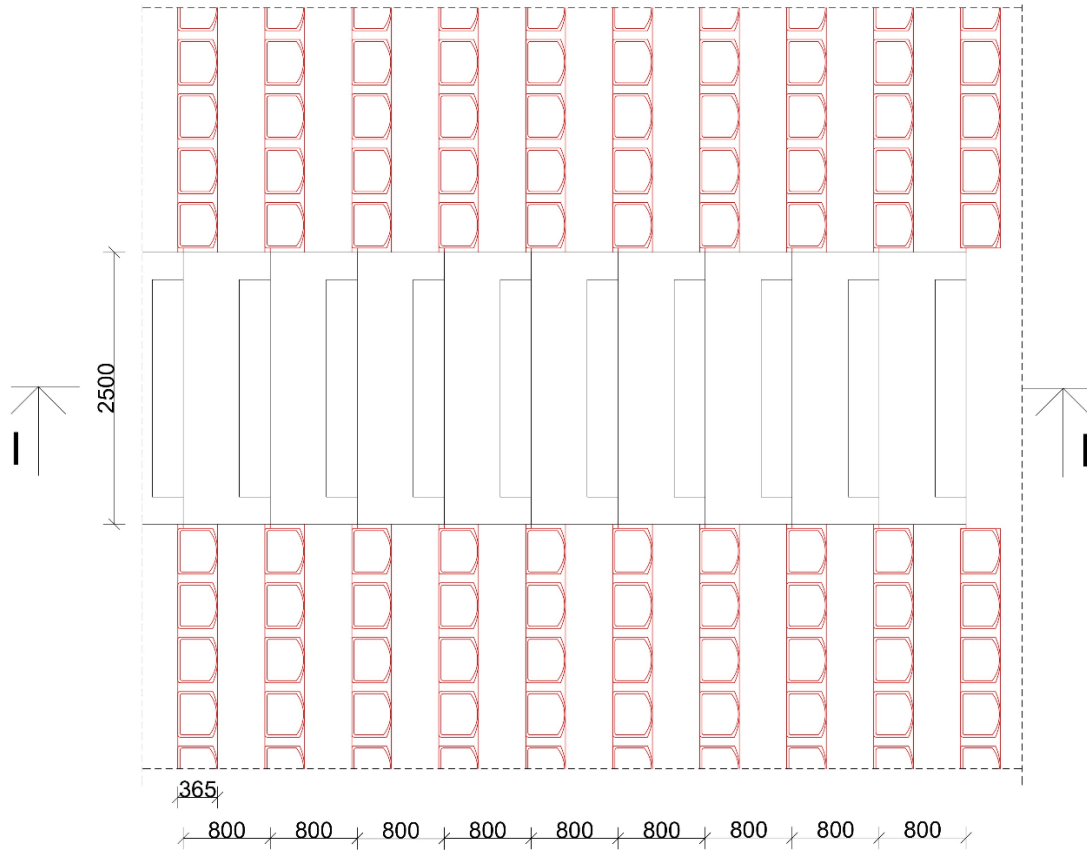


Rys. 2.13. Mocowanie krzesełek [W28]

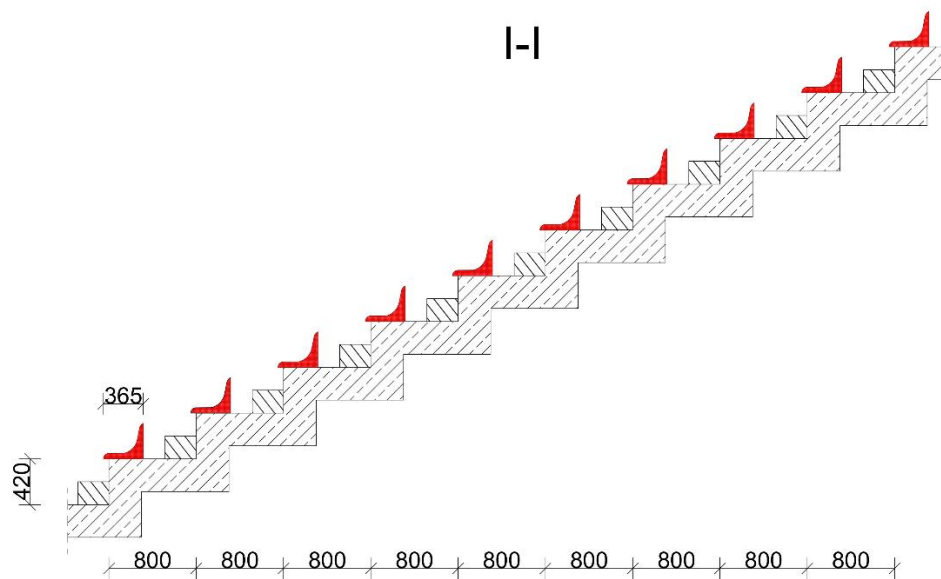
### 2.3.3. Wymiary trybuny

Przyjęte wymiary poszczególnych elementów konstrukcji trybuny pokazano na Rys. 2.14.

a)

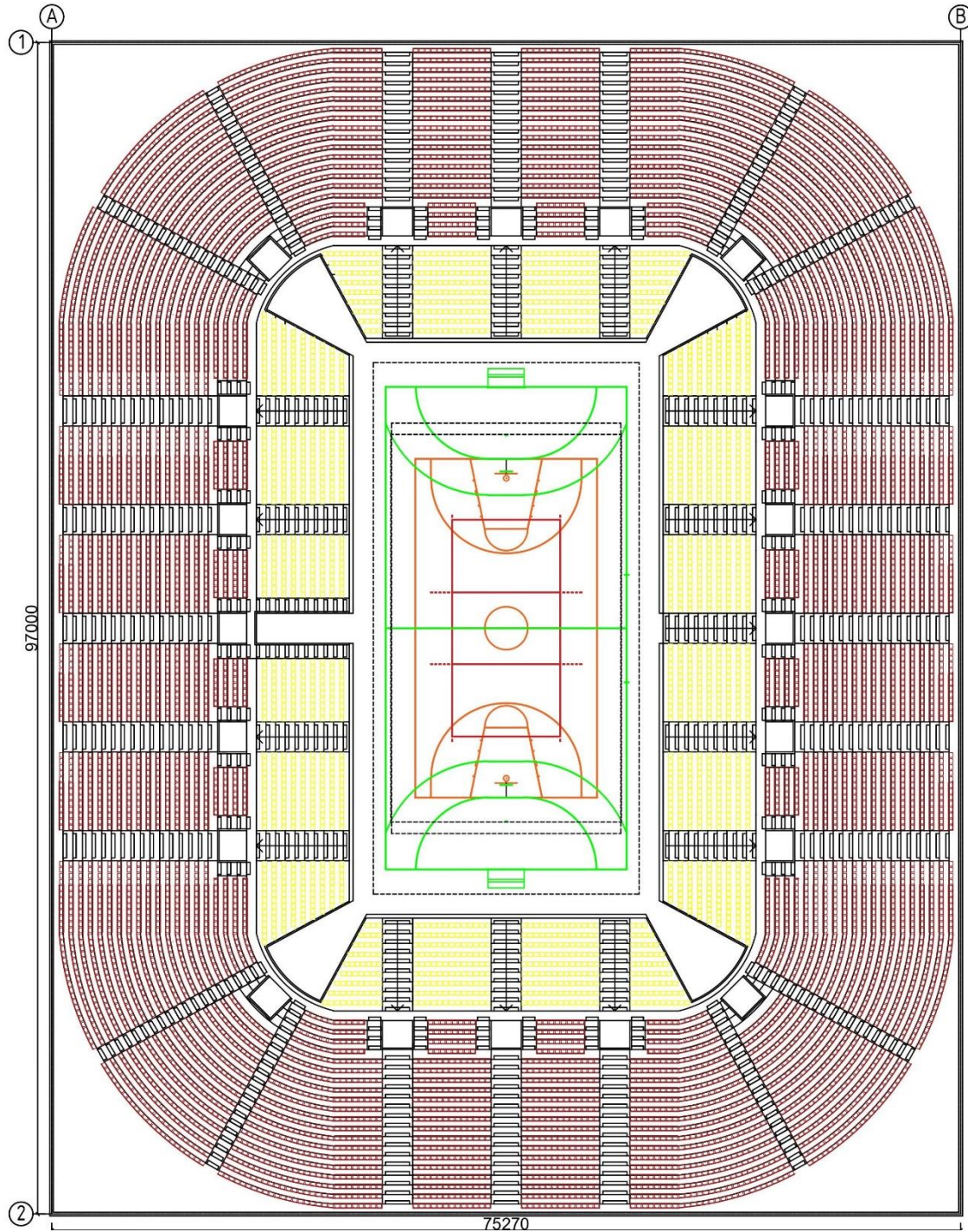


b)

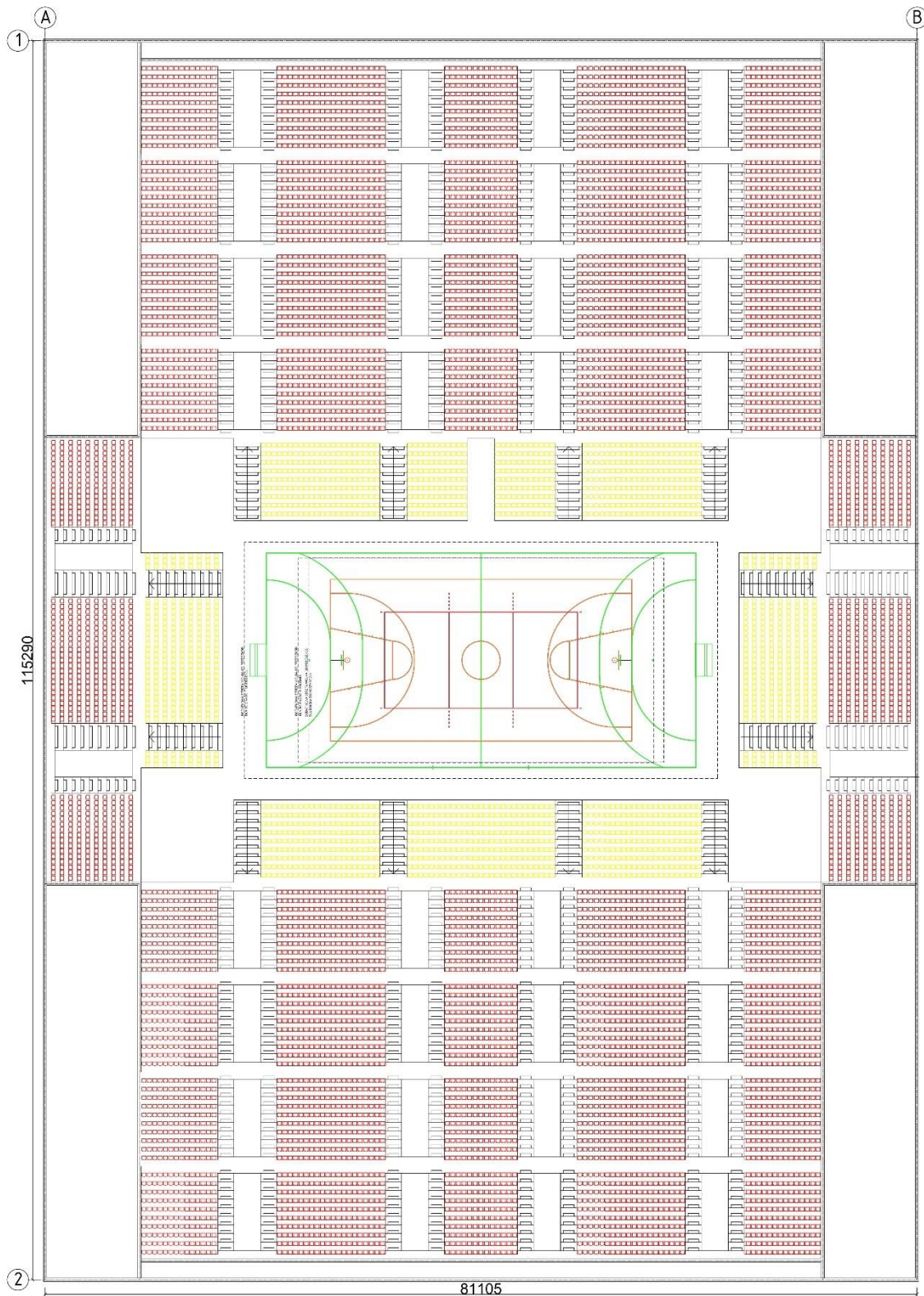


Rys. 2.14. Fragment przyjętej trybuny z wymiarami: a) rzut, b) przekrój

W projektowanym obiekcie zaproponowano 2 rozwiązania trybun z przeznaczeniem dla 9000 widzów. Wariant I – wersja prostokątna z narożnikami łukowymi (Rys. 2.15) oraz wariant II – wersja prostokątna z narożnikami wypełnionymi budynkiem (Rys. 2.16).



Rys. 2.15. Wariant I - rzut trybuny prostokątnej z narożnikami łukowymi



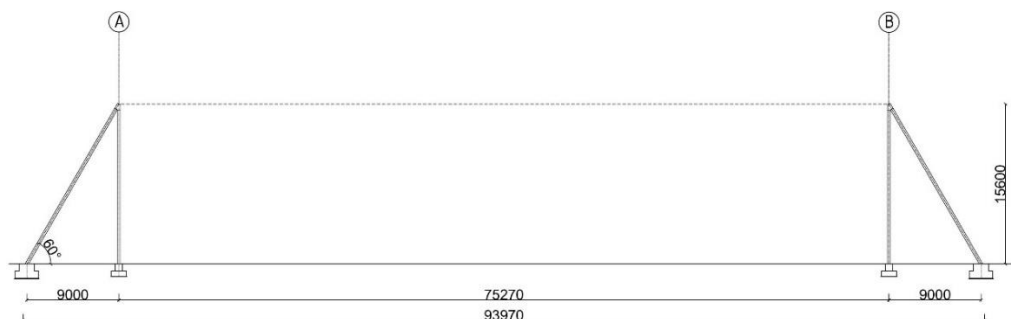
Rys. 2.16. Wariant II - rzut trybuny prostokątnej z narożnikami wypełnionymi budynkiem

Z uwagi na wymiary trybuny zdecydowano na kształtowanie konstrukcji dla wariantu I – trybuny prostokątnej z narożnikami łukowymi.

## 2.4. Kształtowanie konstrukcji

### 2.4.1. Konstrukcja słupów

W projektowanym obiekcie postawiono na zastosowanie układu ramowego, składającego się ze słupa i dodatkowej konstrukcji wsporczej, na której oparty jest dźwigar łukowy. Rozstaw układów ustalono na 9,7 m. Przyjęto, że konstrukcja wsporcza, będzie łączyć się słupem w węźle styku słupa z kratownicą zgodnie z Rys. 2.17.



Rys. 2.17. Wymiary układu ramowego przyjętego w konstrukcji

### 2.4.2. Dźwigar łukowy

W projektowany obiekcie zdecydowano się na konstrukcję łukową dźwigara podpartą na konstrukcji wsporczej. Dla rozpiętości wynoszącej  $l=75,27$  m rozpatrzono kilka wariantów łuku. Zdefiniowano wyniosłość łuku, którą wyznacza się z zależności:

- $\frac{f}{l} < \frac{1}{5} = 0,2 \rightarrow$  łuk płaski,
- $\frac{f}{l} > \frac{1}{5} = 0,2 \rightarrow$  łuk wyniosły.

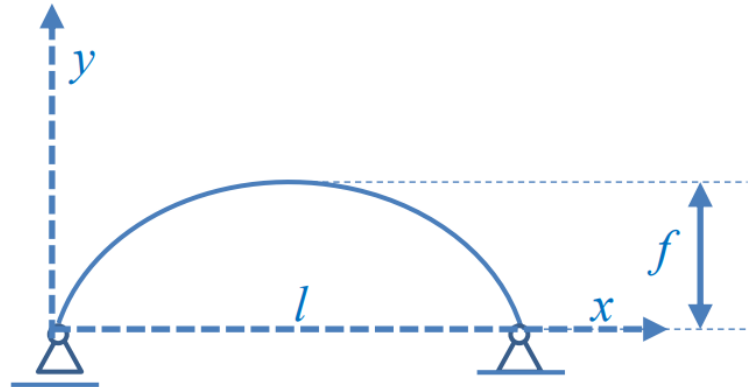
W Tabeli 2.1 zestawiono obliczone wyniosłości łuków (zgodnie z powyższymi wzorami) oraz sklasyfikowano łuk do odpowiedniej grupy.

Tabela 2.2. Klasyfikacja łuków w zależności od strzałki  $f$  dla stałej rozpiętości  $l$

Rozpiętość $l$ [m]	Strzałka $f$ [m]	Wyniosłość łuku [-]	
75,27	11,18	0,149	Łuki płaskie
	12	0,159	
	13	0,173	
	14	0,186	
	15	0,199	
	16	0,213	
	17	0,226	
	18	0,239	
	19	0,252	Łuki wyniosłe
	20	0,266	
	21	0,279	
	22	0,292	
	23	0,306	

Do wyznaczania krzywizn łuku posłużono się równaniem łuku parabolicznego, zgodnie ze wzorem:

$$y = \frac{4 \cdot f}{l^2} (l - x).$$



Rys. 2.18. Graficzne oznaczenie parametrów łuku do wyznaczenia krzywizn łuku [W6]

W Tabeli 2.3 i Tabeli 2.4 zestawiono wartości rzędnych punktów wyznaczonych w zależności od wzrostu odciętej punktu korzystając z powyższego wzoru.

Przykładowo: dla  $f=11,28$  m i wartości odciętej  $x=1$ ,

$$y = \frac{4 \cdot f}{l^2} (l - x) = \frac{4 \cdot 11,28}{75,27^2} (75,27 - 1) = 0,586 \text{ m.}$$

W celu usprawnienia obliczeń wykonano je przy użyciu arkusza kalkulacyjnego Excel.

Obliczenia przeprowadzono do osi symetrii krzywizny łuku (0,5l, gdzie l-rozpiętość łuku).

Tabela 2.3. Wartości rzędnych punktu dla łuków płaskich

Rozpiętość l [m]	75,27							
Strzałka f [m]	11,18	12	13	14	15	16	17	18
x [m]	Kształtowanie paraboli przy użyciu równania łuku parabolicznego							
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0,586	0,629	0,682	0,734	0,787	0,839	0,891	0,944
2	1,157	1,242	1,345	1,448	1,552	1,655	1,759	1,862
3	1,711	1,837	1,990	2,143	2,296	2,449	2,602	2,755
4	2,250	2,415	2,617	2,818	3,019	3,220	3,422	3,623
5	2,773	2,977	3,225	3,473	3,721	3,969	4,217	4,465
6	3,281	3,521	3,815	4,108	4,402	4,695	4,988	5,282
7	3,772	4,049	4,386	4,724	5,061	5,398	5,736	6,073
8	4,248	4,559	4,939	5,319	5,699	6,079	6,459	6,839
9	4,708	5,053	5,474	5,895	6,316	6,737	7,159	7,580
10	5,152	5,530	5,991	6,451	6,912	7,373	7,834	8,295

Rozpiętość l [m]	75,27							
Strzałka f [m]	11,18	12	13	14	15	16	17	18
x [m]	Kształtowanie paraboli przy użyciu równania łuku parabolicznego							
11	5,580	5,990	6,489	6,988	7,487	7,986	8,485	8,984
12	5,993	6,432	6,968	7,505	8,041	8,577	9,113	9,649
13	6,390	6,858	7,430	8,001	8,573	9,144	9,716	10,288
14	6,771	7,267	7,873	8,479	9,084	9,690	10,295	10,901
15	7,136	7,659	8,298	8,936	9,574	10,212	10,851	11,489
16	7,485	8,034	8,704	9,373	10,043	10,713	11,382	12,052
17	7,819	8,392	9,092	9,791	10,491	11,190	11,889	12,589
18	8,137	8,734	9,461	10,189	10,917	11,645	12,373	13,101
19	8,439	9,058	9,813	10,568	11,322	12,077	12,832	13,587
20	8,725	9,365	10,146	10,926	11,706	12,487	13,267	14,048
21	8,996	9,656	10,460	11,265	12,069	12,874	13,679	14,483
22	9,250	9,929	10,756	11,584	12,411	13,239	14,066	14,893
23	9,489	10,185	11,034	11,883	12,732	13,581	14,429	15,278
24	9,713	10,425	11,294	12,162	13,031	13,900	14,769	15,637
25	9,920	10,647	11,535	12,422	13,309	14,197	15,084	15,971
26	10,111	10,853	11,758	12,662	13,566	14,471	15,375	16,280
27	10,287	11,042	11,962	12,882	13,802	14,722	15,642	16,563
28	10,447	11,213	12,148	13,082	14,017	14,951	15,886	16,820
29	10,591	11,368	12,316	13,263	14,210	15,158	16,105	17,052
30	10,720	11,506	12,465	13,424	14,383	15,342	16,300	17,259
31	10,833	11,627	12,596	13,565	14,534	15,503	16,472	17,441
32	10,929	11,731	12,709	13,686	14,664	15,641	16,619	17,596
33	11,010	11,818	12,803	13,788	14,772	15,757	16,742	17,727
34	11,076	11,888	12,879	13,869	14,860	15,851	16,841	17,832
35	11,125	11,941	12,936	13,931	14,926	15,922	16,917	17,912
36	11,159	11,977	12,975	13,974	14,972	15,970	16,968	17,966
37	11,177	11,997	12,996	13,996	14,996	15,995	16,995	17,995
37,635	11,180	12,000	13,000	14,000	15,000	16,000	17,000	18,000

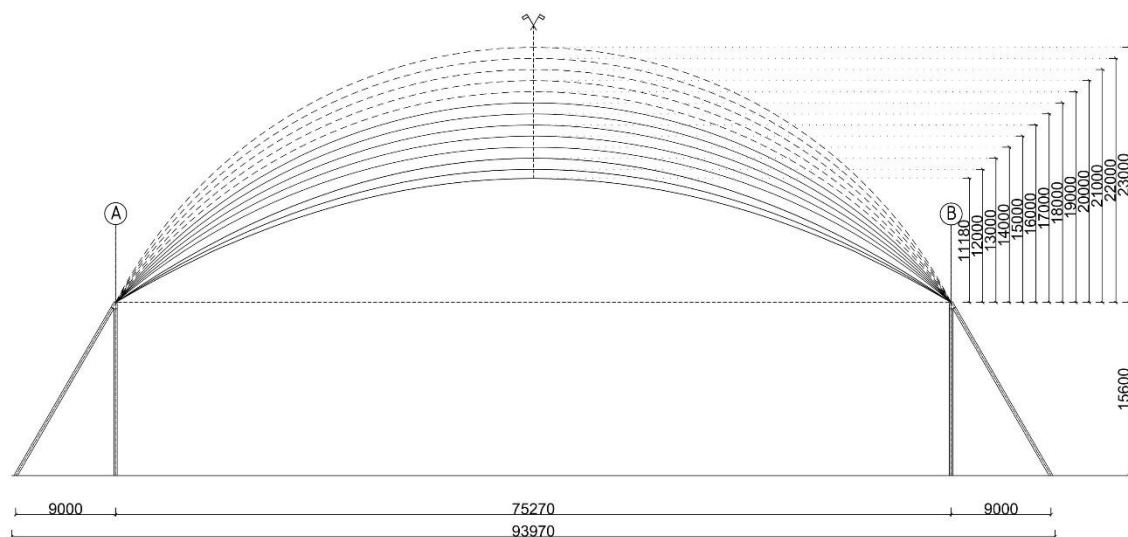


Tabela 2.4. Wartości rzędnych punktu dla łuków wyniosłych

Rozpiętość l [m]	75,27				
Strzałka f [m]	19	20	21	22	23
x [m]	Kształtowanie paraboli przy użyciu równania łuku parabolicznego				
0	0	0	0	0	0
1	0,996	1,049	1,101	1,154	1,206
2	1,966	2,069	2,173	2,276	2,380
3	2,908	3,061	3,215	3,368	3,521
4	3,824	4,025	4,227	4,428	4,629
5	4,713	4,961	5,209	5,457	5,705
6	5,575	5,869	6,162	6,456	6,749
7	6,411	6,748	7,085	7,423	7,760
8	7,219	7,599	7,979	8,359	8,739
9	8,001	8,422	8,843	9,264	9,685
10	8,756	9,216	9,677	10,138	10,599
11	9,484	9,983	10,482	10,981	11,480
12	10,185	10,721	11,257	11,793	12,329
13	10,859	11,431	12,002	12,574	13,145
14	11,507	12,112	12,718	13,323	13,929
15	12,127	12,766	13,404	14,042	14,680
16	12,721	13,391	14,060	14,730	15,399
17	13,288	13,987	14,687	15,386	16,086
18	13,828	14,556	15,284	16,012	16,740
19	14,342	15,097	15,851	16,606	17,361
20	14,828	15,609	16,389	17,170	17,950
21	15,288	16,093	16,897	17,702	18,506
22	15,721	16,548	17,376	18,203	19,030
23	16,127	16,976	17,824	18,673	19,522
24	16,506	17,375	18,244	19,112	19,981
25	16,858	17,746	18,633	19,520	20,408
26	17,184	18,088	18,993	19,897	20,802
27	17,483	18,403	19,323	20,243	21,163
28	17,755	18,689	19,624	20,558	21,493
29	18,000	18,947	19,894	20,842	21,789
30	18,218	19,177	20,136	21,095	22,053
31	18,409	19,378	20,347	21,316	22,285
32	18,574	19,552	20,529	21,507	22,484
33	18,712	19,697	20,681	21,666	22,651
34	18,823	19,813	20,804	21,795	22,785

Rozpiętość l [m]	75,27				
Strzałka f [m]	19	20	21	22	23
x [m]	Kształtowanie paraboli przy użyciu równania łuku parabolicznego				
35	18,907	19,902	20,897	21,892	22,887
36	18,964	19,962	20,960	21,958	22,957
37	18,995	19,994	20,994	21,994	22,993
37,635	19,000	20,000	21,000	22,000	23,000

Na podstawie danych z Tabeli 2.3 i Tabeli 2.4 ukształtowano łuki zgodnie z Rys. 2.19. Wraz ze wzrostem wyniosłości łuku wzrasta wysokość obiektu. Zgodnie z przeznaczeniem obiektu (obiekt widowiskowo-sportowy) postanowiono przyjąć łuk z strzałką  $f=11,18$  m. Jest ona wystarczająca do rozgrywania dyscyplin sportowych wewnątrz obiektu (minimalna wysokość przeszkody dla piłki siatkowej wynosi 12,5m), gdyż sama konstrukcja trybuny „wymusiła” wyniesienie dźwigarów na wysokość 15,6 m.



Rys. 2.19. Ukształtowane łuków: linia ciągła-łuki płaskie, linia przerywane - łuki wyniosłe

### 2.4.3. Przyjęcie geometrii obiektu

Po przyjęciu wymiarów trybun, słupów i konstrukcji wsporczej oraz łuku ustalono całkowite wymiary hali zgodnie z Rys. 2.20 i Rys. 2.21. Na podstawie kształtowania obiektu ustalono następujące wymiary:

- całkowita szerokość obiektu: 93,97 m,
- całkowita wysokość obiektu: 29,95 m,
- całkowita długość obiektu: 97,70 m.





## 3. Opis techniczny

### 3.1. Podstawa formalna

Podstawą formalną wykonania projektu jest temat nr **31** wydany przez Katedrę Konstrukcji Budowlanych Politechniki Rzeszowskiej w ramach pracy magisterskiej.

### 3.2. Przedmiot opracowania

Przedmiotem opracowania jest projekt budowlany, konstrukcyjny hali sportowej o konstrukcji stalowej.

### 3.3. Dane wyjściowe

Budynek zaprojektowano przyjmując następujące założenia:

- lokalizacja obiektu: Przemyśl,
- wymiary rzutu budynku w osiach słupów pionowych: 75,27 x 97,0 m,
- rozstaw głównych układów poprzecznych: 9,7 m,
- rozpiętość płatwi: 9,7 m,
- schemat statyczny płatwi: belka wolnopodparta,
- przyjęcie współdziałania poszycia dachu z konstrukcją,
- obiekt ocieplony,
- obliczenia wykonano metodą stanów granicznych, według obowiązujących norm.

### 3.4. Zakres projektu

Projekt budowlany obejmują:

- opis techniczny,
- obliczenia statyczne i sprawdzenie stanów granicznych zasadniczych elementów konstrukcyjnych hali, tj. poszycia dachu, płatwi kratowej, dźwigara łukowego, konstrukcji wsporczej, stężenia połaciowego poprzecznego oraz stężenia pionowego ściany podłużnej,
- rysunki zestawieniowe: rzut poziomy i przekrój podłużny w skali 1:200, przekroje poprzeczne w skali 1:200,
- rysunki montażowe: schematy montażowe, zestawienie elementów wysyłkowych, szczegóły montażowe,
- rysunki wykonawcze podstawowych elementów konstrukcji: płatwi kratowej, elementów wysyłkowych wiązara dachowego, konstrukcji wsporczej.

### 3.5. Ogólna koncepcja konstrukcji

Projektowana hala jest obiektem parterowym ocieplonym jednonawowym, przeznaczonym na cele użytkowe. Wymiary hali w rzucie poziomym, w osiach słupów pionowych wynoszą: 75,27 x 97,0 m. Konstrukcja hali składa się z:

- poszycia dachu (Poz. 1.),
- płatew o rozpiętości 9,7 m i rozstawie co 5,37 m (Poz. 2.),
- główny układ poprzeczny złożony z :
  - dźwigara kratowego łukowego o rozpiętości 75,27 m (Poz. 3.),
  - konstrukcji wsporczej o wysokości 17,0 m (Poz. 4.),
- stężeń połąciowych poprzecznych typu X (Poz. 5.),
- stężeń pionowych ścian podłużnych typu X (Poz. 6.).

Konstrukcje hali zaprojektowano na oddziaływania pionowe, do których zaliczają się oddziaływania stałe m.in. ciężar wyposażenia hali, ciężar własny konstrukcji oraz śniegu i oddziaływania pionowe wiatru. Przyjęto, że poziome oddziaływanie wiatru na ściany podłużne zostanie w całości przejęte przez „przybudówki” - konstrukcje niezależne od projektowanego ustroju. Stateczność hali w kierunku poprzecznym (w płaszczyźnie głównych układów poprzecznych) zapewniają ramy stalowe. Przenoszą one obciążenia pionowe działające w płaszczyźnie ramy, którymi są oddziaływania zebrane z połączeń dachu. W celu zapewnienia geometrycznej niezmienności i sztywności konstrukcji w kierunku podłużnym oraz przeniesienia sił działających prostopadle do ścian szczytowych hali, zastosowano tężniki w płaszczyźnie połączeń dachu oraz w płaszczyźnie ścian podłużnych.

### 3.6. Opis poszczególnych ustrojów i elementów konstrukcyjnych

#### 3.6.1. Pozycie dachu (Poz. 1.)

Zaprojektowano poszycie dachu z blachy fałdowej TR 93.260.1040 gr. 1,25 mm, firmy BALEXMETAL, ułożonej w pozycji „pozytyw” arkuszami jednoprzęsłowymi. Blacha przymocowana jest do pasa górnego płatwi (Poz. 2.) wkrętami w każdej dolnej fałdzie. Przyjęto współdziałanie poszycia dachu z płatwiami dachowymi (Poz. 2.) w fazie eksploatacji (sytuacji trwałej).

#### 3.6.2. Płatew (Poz. 2.)

Płatwie zaprojektowano jako kratowe, swobodnie podparte, o rozpiętości 9,7 m i wysokości 0,9 m, ustawione prostopadle do połączeń. Rozstaw płatwi wynosi 5,37 m.

Przyjęto, że w stadium eksploatacji (sytuacji trwałej) płatwie są zabezpieczone przed wyboczeniem pasa górnego z płaszczyzny przez blachę trapezową poszycia dachu (Poz. 1.). Zaprojektowano pas górny płatwi o przekroju RK 100x100x10, a pas dolny z kształtownika RK 80x80x4. Pierwszy krzyżulec od podpory wykonano z tego samego przekroju co pas dolny. Na pozostałe krzyżulce przyjęto kształtowniki RK 60x60x4. Wewnętrzne pręty skratowania połączone są z pasem górnym płatwi za pomocą spoiny pachwinowej grubości 5 mm. W węźle podporowym krzyżulec skrajny połączony jest z pasem górnym za pomocą blachy poziomej przy użyciu spoiny gr. 6 mm. Blacha pozioma przymocowana jest do pasa górnego spoiną pachwinową gr. 5 mm. Do połączenia płatwi z pasem górnym wiązara (Poz. 3.) przyjęto blachę poziomą gr. 10 mm, o wymiarach 80x220 mm i dwie śruby Huck-Lok C50LR-Br-16-20. W celu zapewnienia stateczności pasa dolnego zastosowano pionowe stężenie między płatwiowe w połowie rozpiętości płatwi.

### 3.6.3. Główny układ poprzeczny

Główny układ poprzeczny zaprojektowano jako ramowy, o rozpiętości 75,27 m i rozstawie co 9,7 m. Składa się z dźwigara łukowego opartych przegubowo na konstrukcji wsporczej utwierdzonej w fundamencie.

- **Wiązar łukowy (Poz. 3.)**

Wiązar łukowy o rozpiętości 75,27 m zaprojektowano z kształtowników zamkniętych, walcowanych na gorąco. Wysokość wiązara wynosi 2,0 m. Wiązar oparty jest przegubowo na głowicach konstrukcji wsporczej. Rozstaw węzłów w pasie górnym wynosi od 2,8-3,1 m, a w pasie dolnym 2,7-3,1 m w zależności od nachylenia dźwigara w kierunku podparcia. Pas górny wiązara zaprojektowano z kształtowników RK 250x250x10, natomiast pas dolny z RK 180x180x8. Pierwszy krzyżulec od podpory wykonano z tego samego przekroju co pas dolny. Przekrój krzyżulca przedskrajnego przyjęto z kształtownika RK 80x80x8, natomiast słupki z kształtowników RK 80x80x6.

Pręty skratowania połączone są z pasem górnym i pasem dolnym spoinami pachwinowymi gr. 10 mm. W przypadku słupków do połączenia z pasami zastosowano spoiny pachwinowe gr. 5 mm. W węźle pasa dolnego, w którym schodzą się dwa krzyżulce i słupek zastosowano do połączenia spoinę pachwinową gr. 5 mm.

W węźle podporowym pas górny jest przyspawany spoiną pachwinową gr. 10 mm do blachy o grubości 25 mm o wymiarach 400x400 mm.

Do połączenia wiaźara z konstrukcją wsporczą zastosowano 4 śruby M30 kl.12.9. Styk montażowy pasa górnego zaprojektowano jako doczołowy, składający się z dwóch blach o gr. 12 mm o wymiarach 390x320 mm. Do połączenia blach zastosowano 6 śrub M16 klasy 10.9. Przyjęto połączenie śrubowe kategorii E. W pasie dolnym zaprojektowano styk montażowy jak doczołowy. Przyjęto 6 śrub M20 klasy 10.9 oraz blachy czołowe o wymiarach 300x220 mm i o gr. 10 mm.

W celu zapewnienia stateczności pasa dolnego zastosowano stężenie pionowe w rozstawie równym rozstawu płatwi (Poz. 2.).

- **Konstrukcja wsporcza (Poz. 4.)**

Konstrukcje wsporczą zaprojektowano jako ramę obciążoną reakcją wiaźara, składającą się z dwóch kształtowników zamkniętych (słup pionowy i ukośny) połączonych ze sobą w głowicy pod kątem 28°. Rozpiętość konstrukcji przy podstawie w osiach słupów wynosi 9,0 m. Wysokość układu wynosi 17,0 m. Przekroje trzonów przyjęto z kształtowników RO 323,9x16 w rozstawie co 9,7 m. Słupy są połączone ze sobą w węźle głowicy słupa spoiną pachwinową o gr. 5 mm.

Skratowanie ramy zaprojektowano przy pomocy poziomych rygli oraz zastrzałów. Są one połączone z głównymi słupami przy użyciu spoiny gr. 5 mm wg rysunku wykonawczego. Rygle i zastrzały przyjęto z kształtowników RO 159x6,3.

Podstawę słupa pionowego zaprojektowano jako utwierdzoną składającą się z czterech żeber pionowych o wysokości 350 mm i grubości 15 mm połączonych ze słupem spoiną gr. 14 mm. Całość połączona jest z poziomą blachą grubości 30 mm i wymiarach 900x900 mm spoiną o gr. 12 mm. Do blachy przymocowana jest ostroga z kształtownika IPE 200 o długości 100 mm połączona spoiną o gr. 5 mm. Podstawa słupa przymocowana jest do fundamentu 4 kotwami M48 kl. 12.9. Podstawę słupa osadzono na warstwie podlewki cementowej o grubości 30 mm.

Podstawę słupa ukośnego zaprojektowano jako utwierdzoną składającą się z dwóch żeber pionowych o wysokości 280 mm i grubości 20 mm połączonych ze słupem spoiną o gr. 15 mm. Całość połączona jest z blachą poziomą o grubości 20 mm i wymiarach 650x650 mm spoiną o gr. 15 mm. F. Do blachy przymocowana jest ostroga z kształtownika IPE 200 o długości 100 mm połączona spoiną o gr. 5 mm. Podstawa słupa przymocowana jest do fundamentu 4 kotwami M42 kl. 10.9. Podstawę słupa osadzono na warstwie podlewki cementowej o grubości 30 mm.



Głowica konstrukcji wsporczej składa się z płytki centrującej o wymiarach przekroju 40x400 mm, opartej na blasze poziomej o grubości 25 mm i wymiarach 400x400 mm. Do blachy przymocowane jest żebro poziome o grubości 25 mm i wysokości 330 mm.

Elementy głowicy są połączone ze sobą spoiną pachwinową o gr. 15 mm.

Styki montażowe słupów zaprojektowano jako doczołowe składające się z dwóch blach o gr. 25 mm o średnicy 500 mm. Do połączenia blach zastosowano 8 śrub M 30 kl. 12. 9.

#### **3.6.4. Stężenie połaciowe poprzeczne typu X (Poz. 5.)**

Zaprojektowano stężenia połaciowe poprzeczne typu X (T-1). Usytuowano je na całej szerokości hali w skrajnych polach między sąsiednimi wiązarami w osiach 2–3 i 9–10. Krzyżulce zostaną skonstruowane z prętów okrągłych  $\Phi 20$ .

#### **3.6.5. Stężenie pionowe ścian podłużnych typu X (Poz. 6.)**

Przyjęto stężenia pionowe podłużne typu X (T-2). Umieszczono je w skrajnych polach między zewnętrznymi gałęziami słupów sąsiednich układów poprzecznych hali w osiach 2–3 i 9–10. Skratowanie stężenia będzie wykonane z prętów okrągłych  $\Phi 20$ .

##### Komentarz:

W konstrukcji hali sportowej przyjęto stężenia międzywiązarowe T–3 oraz międzypłatwiowe T–4. Zakres obliczeniowy pracy nie obejmuje ich obliczania.

### **3.7. Posadzki**

#### **3.7.1. Posadzka sportowa elastyczna P1**

Posadzkę wykonano z wylewki cementowej zbrojonej gr. 50 mm z betonu klasy C25/30, zatartą pod matę z granulatu gumowego gr. 10 mm i elastyczną warstwę poliuretanową gr. 4mm zabezpieczoną lakierem ochronnym gr. 1 mm. Wylewkę wykonano na warstwie styropianu gr. 30 mm oraz foli PE gr. 0,2 mm. Warstwy zostały wykonane na chudym betonie o gr. 100mm poprzedzonym podsypkom z piasku ubitą gr. 200 mm.

#### **3.7.2. Posadzka na gruncie P2**

Posadzkę wykonano z wylewki cementowej zbrojonej gr. 50 mm z betonu klasy C25/30, zatartą pod gres/terakotę gr. 12 mm. Wylewkę wykonano na warstwie styropianu gr. 30 mm oraz foli PE gr. 0,2 mm. Warstwy zostały wykonane na chudym betonie o gr. 100mm poprzedzonym podsypkom z piasku ubitą gr. 200 mm.

### 3.7.3. Posadzka zewnętrzna P3

Posadzkę wykonano z kostki brukowej betonowej gr. 80 mm w postaci opaski wokół obrysu ścian hali. Kostkę ułożono na podsypce z pisaku ubitego gr. 200 mm.

### 3.8. Obciążenia przyjęte w projekcie

Obliczenia przeprowadzono z uwzględnieniem obciążeń:

- stałych, wynikających z konstrukcji hali według [N2],
- zmiennych atmosferycznych:
  - obciążenia śniegiem według [N3].

Hala sportowa zlokalizowana jest w 3 strefie obciążenia śniegiem oraz w terenie normalnym ( $s_k = 1,2 \text{ kN/m}^2$ ).

- oddziaływania wiatru według [N4].

Hala sportowa zlokalizowana jest w 1 strefie obciążenia wiatrem (bazowa prędkość wiatru ( $v_{b,0} = 22 \text{ m/s}$ ) na terenie z niską roślinnością oraz pojedynczymi przeszkodami (kategoria terenu II).

- oddziaływania temperatury.

Długość budynku hali sportowej nie przekracza 150 m ( $L_{całkowite} = 97,7 \text{ m}$ ), a odległości między najdalszymi względem siebie podporami – słupami nie przekracza 60 m. W takim przypadku, przy projektowaniu jednokondygnacyjnych układów szkieletowych można pominąć w obliczeniach statycznych wpływ temperatury pochodzenia klimatycznego.

Kombinacje obciążeń w stanie granicznym nośności przyjęto według [N1]. Zakres pracy nie obejmował uwzględniania oddziaływań wyjątkowych.

### 3.9. Metoda obliczeń statycznych

We wszystkich układach nośnych przeprowadzono analizę sprężystą, według teorii i rzędu. Do uzyskania sił przekrojowych w prętach płatwi oraz głównego układu poprzecznego hali użyto program komputerowy Autodesk Robot Structural Analysis Professional.

### 3.10. Materiały użyte do wykonania konstrukcji

Wszystkie elementy konstrukcyjne zostały zaprojektowane ze stali S355 J2 o granicy plastyczności  $f_y=355 \text{ N/mm}^2$ . Przyjęto, że do wykonania połączeń spawanych zostaną wykorzystane elektrody typu E46 4B, a do połączeń śrubowych śruby klasy 10.8 i 12.9. Fundamenty przewidziano z betonu klasy C40/50.

### **3.11. Wykaz elementów typowych zastosowanych w projekcie**

Typowe są poszycie dachu (Poz. 1.) z blachy trapezowej TR 93.260.1040 gr. 1,25 mm, firmy BALEXMETAL.

### **3.12. Warunki gruntowe z wyciągiem z badań geotechnicznych**

Posadowienie hali nie wchodzi w zakres niniejszej pracy dyplomowej.

### **3.13. Wymagane klasy odporności pożarowej budowli i odporności ogniowej jej elementów**

Opracowanie odporności ogniowej elementów nie wchodzi w zakres niniejszej pracy dyplomowej.

### **3.14. Zabezpieczenie antykorozyjne**

Konstrukcje stalową należy zabezpieczyć antykorozyjnie w wytwórni poprzez pomalowanie farbą antykorozyjną. Przyjęty system powinien być dopuszczony do stosowania w budownictwie. Zalecany przykładowy system to: 1 warstwa podkładowa dwuskładnikowa epoksydowa z zawartością fosforanu cynku gr. 50  $\mu\text{m}$ .

### **3.15. Montaż elementów konstrukcji**

Montaż konstrukcji hali należy wykonywać według oddzielnego opracowania (projektu montażu).

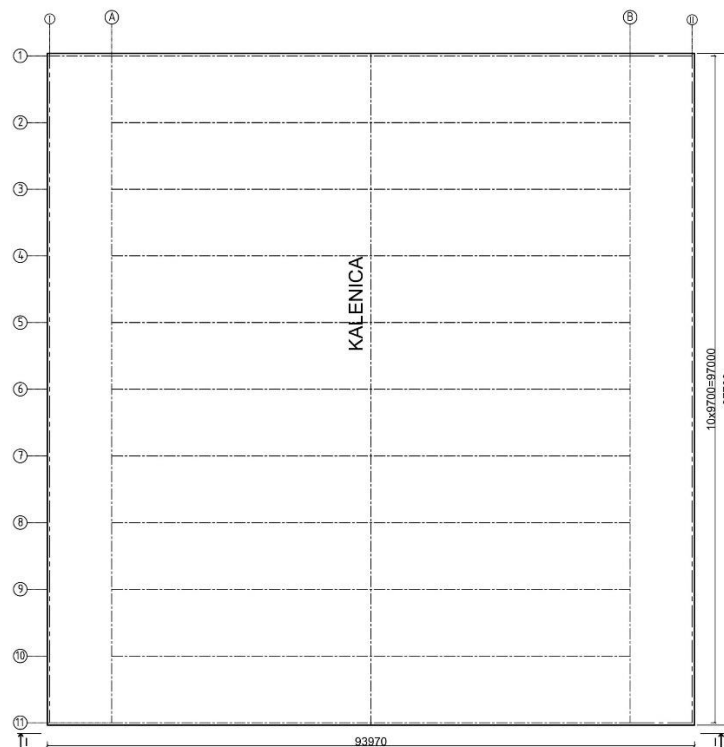


## 4. Zestawienie obciążeń atmosferycznych

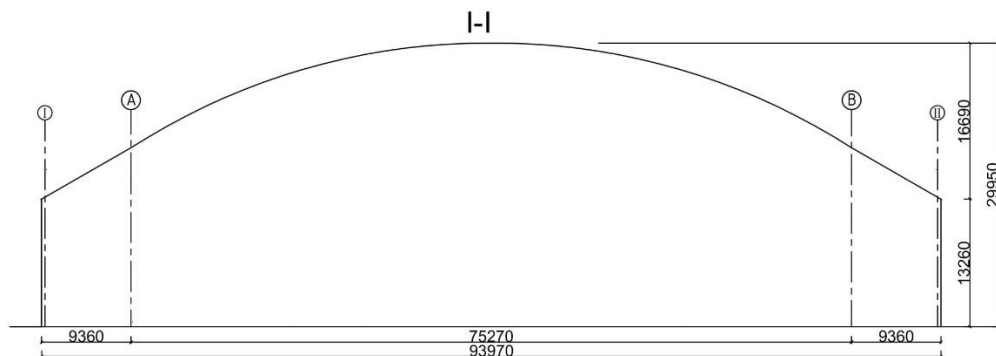
### 4.1. Wymiary i lokalizacja obiektu

Szerokość budynku:	$B_{\text{całkowite}}=93,97 \text{ m}$
Długość hali :	$L_{\text{całkowite}} =97,70 \text{ m}$
Wysokość maksymalna :	$H_{\text{całkowite}}=29,95 \text{ m}$
Wysokość ścian :	13,26 m
Rozstaw ram nośnych	9,70 m
Nachylenie połaci dachowej:	$\beta < 60^\circ$
Lokalizacja obiektu:	Przemysł

a)



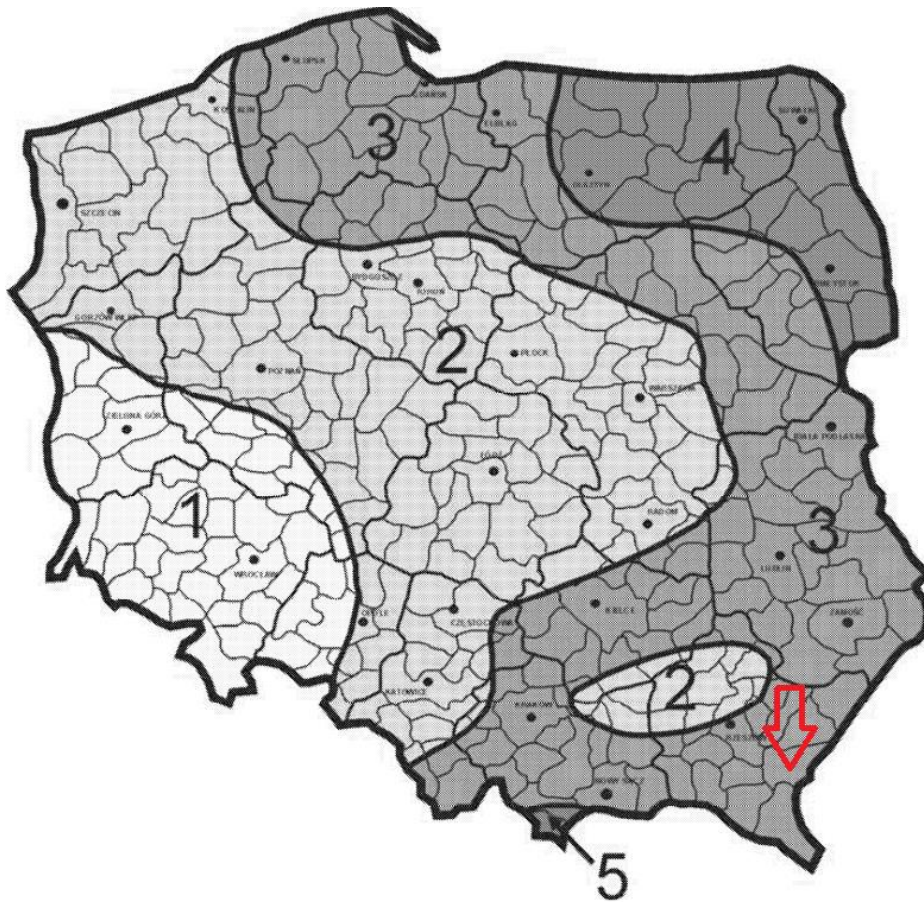
b)



Rys. 4.1. Wymiary budynku halowego do zestawienia obciążeń atmosferycznych: a) rzut, b) przekrój

## 4.2. Obciążenie śniegiem

### 4.2.1. Strefy obciążenia śniegiem



Rys. 4.2. Strefy obciążenia śniegiem gruntu w Polsce [N3]

Projektowany obiekt jest zlokalizowany w Przemyślu, w którym występuje 3 strefa obciążenia śniegiem zgodnie z [N3]. Wysokość terenu nad poziomem morza w obszarze lokalizacji obiektu:  $A=220$  m n.p.m., stąd wartość charakterystyczna obciążenia śniegiem gruntu oblicza się ze wzoru:

$$s_k = \max \left\{ \begin{array}{l} 0,006A - 0,6 = 0,006 \cdot 220 - 0,6 = 0,72 \frac{kN}{m^2} \\ 1,2 \frac{kN}{m^2} \end{array} \right. = 1,2 \frac{kN}{m^2} .$$

Zgodnie z Tablicą A.1 Sytuacje obliczeniowe i układy obciążeń dla różnych warunków lokalizacyjnych (klimatycznych) normy PN-EN 1991-1-3. przyjęto sytuacje obliczeniową normalną (przypadek A) oraz warunki wyjątkowe (przypadek B2- brak wyjątkowych opadów i brak wyjątkowych zamieci).

W obliczeniach przyjęto równomierny i nierównomierny układ obciążeń. Założono, że z uwagi na kształt dachu nie wystąpią wyjątkowe zaspasy śnieżne.

#### 4.2.2. Równomierne obciążenie śniegiem dachu:

Współczynnik ekspozycji:  $C_e=1,0$   
 Współczynnik termiczny:  $C_t=1,0$   
 Współczynnik kształtu dachu:  $\mu_i=\mu_1=0,8$  (dla dachów walcowych)  
 $s=\mu_1 C_e C_t s_k=0,8 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,2=0,96 \text{ kN/m}^2$

#### 4.2.3. Nierównomierne obciążenie śniegiem dachu:

- **Połać mniej obciążona:**

- Współczynnik kształtu dachu

$$\mu = 0,5 \cdot \mu_3 = 0,5 \cdot \left( 0,2 + 10 \cdot \frac{h}{b} \right) = 0,5 \cdot \left( 0,2 + 10 \cdot \frac{16,69}{93,97} \right) = 0,988$$

- Obciążenie charakterystyczne

$$s=\mu \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k=0,988 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,2=1,19 \text{ kN/m}^2$$

- **Połać dachowa bardziej obciążona:**

- Współczynnik kształtu dachu

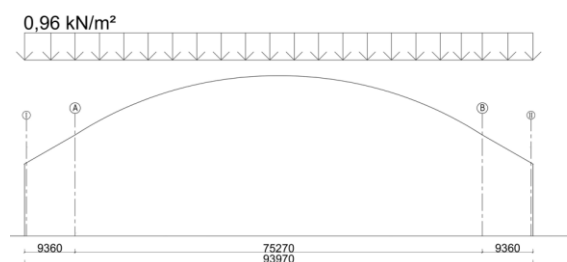
$$\mu_3 = 0,2 + 10 \cdot \left( \frac{h}{b} \right) = 0,2 + 10 \cdot \left( \frac{16,69}{93,97} \right) = 1,976$$

- Obciążenie charakterystyczne

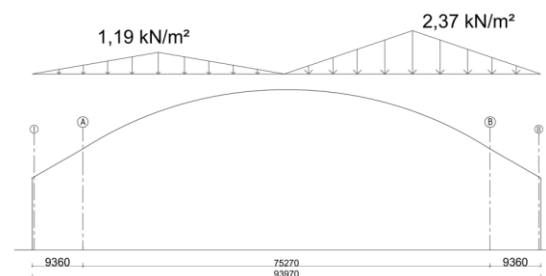
$$s=\mu_3 \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k=1,976 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,2=2,37 \text{ kN/m}^2$$

#### 4.2.4. Obciążenie śniegiem dachu

a)



b)



Rys. 4.3. Obciążenie śniegiem dachu: a) S1- układ równomierny, b) S2 - układ nierównomierny





◦ w przypadku ścian:  $H_{\text{całkowite}} = 29,95 \text{ m} < B_{\text{całkowite}} = 75,27 \text{ m}$  (lub  $L_{\text{całkowite}} = 97,70 \text{ m}$ )  $\rightarrow z_e = H_{\text{całkowite}} = 29,95 \text{ m}$

- Współczynnik ekspozycji:

$$\text{teren kategorii 3} \rightarrow C_e(z_e) = 1,9 \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^{0,26} = 1,9 \cdot \left(\frac{29,95}{10}\right)^{0,26} = 2,527$$

- Wartość szczytowa ciśnienia prędkości:

$$q_p(z_e) = c_e(z_e) \cdot q_b = 2,527 \cdot 302 = 763,15 \text{ N/m}^2 = 0,76315 \text{ kN/m}^2 \approx 0,763 \text{ kN/m}^2$$

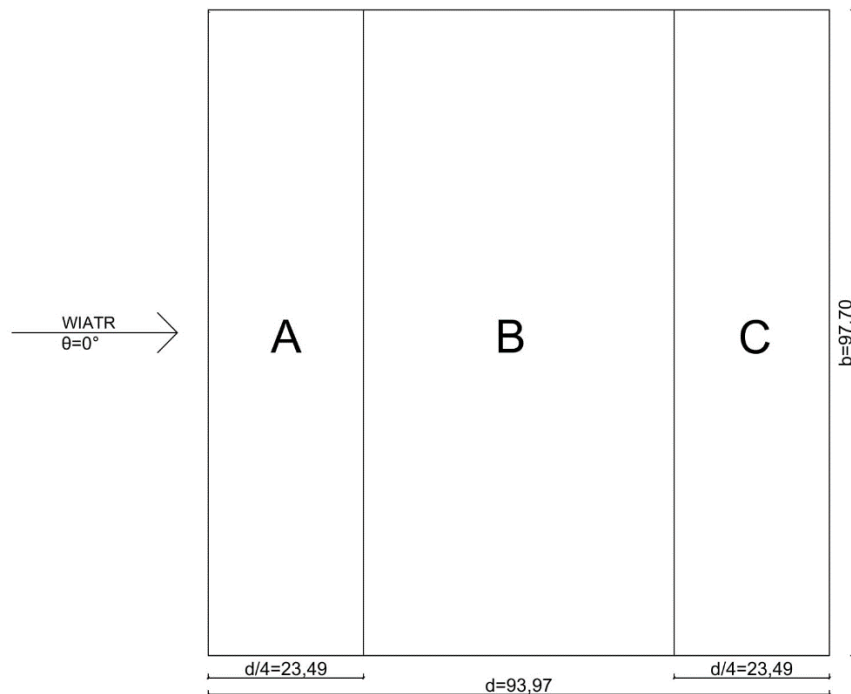
### 4.3.2. Obciążenie wiatrem działającym prostopadle do ściany podłużnej hali ( $\theta=0^\circ$ )

- **Dach:**

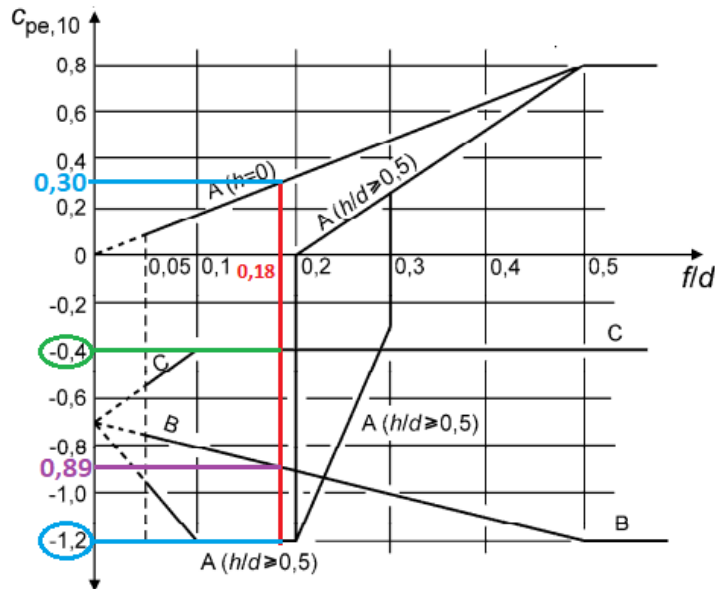
Wymiary przyjęto zgodnie z Rys. 4.1.

$$\frac{h}{d} = \frac{13,26}{93,97} = 0,14 \rightarrow 0 < \frac{h}{d} = 0,14 < 0,5$$

$$\frac{f}{d} = \frac{16,69}{93,97} = 0,18 \rightarrow \frac{f}{d} \leq 0,2$$



Rys. 4.5. Rozmieszczenie pól o różnych współczynnikach ciśnienia zewnętrznego na dachu, gdy wiatr wieje prostopadle do ściany podłużnej ( $\theta=0^\circ$ )



Rys. 4.6. Współczynniki ciśnienia zewnętrznego  $c_{pe,10}$  dachów łukowych o rzucie prostokąta [N4]

#### • Połąć-pole A

Wartość współczynnika wyznaczono z interpolacji liniowej zgodnie z Rys. 4.6.

$h$	$c_{pe}$
$0 \rightarrow$	$0,30$
$0,14 \rightarrow$	$c_{pe,10} = ?$
$0,5 \rightarrow$	$-1,2$

$$c_{pe,10} = 0,30 + \frac{0,14 - 0}{0,5 - 0} \cdot \frac{-1,2 - 0,3}{1} = -0,120$$

- współczynnik ciśnienia zewnętrznego:  $c_{pe}=c_{pe,10} = -0,120$
- ciśnienie wiatru na powierzchnię zewnętrzną

$$w_{e1} = q_p(z_e) \cdot c_{pe} = -0,120 \cdot 0,763 = -0,09156 \frac{kN}{m^2}$$

#### • Połąć-pole B

- współczynnik ciśnienia zewnętrznego:  $c_{pe}=c_{pe,10} = -0,89$
- ciśnienie wiatru na powierzchnię zewnętrzną

$$w_{e1} = q_p(z_e) \cdot c_{pe} = -0,89 \cdot 0,763 = -0,67907 \frac{kN}{m^2}$$

#### • Połąć-pole C

- współczynnik ciśnienia zewnętrznego:  $c_{pe}=c_{pe,10} = -0,4$
- ciśnienie wiatru na powierzchnię zewnętrzną

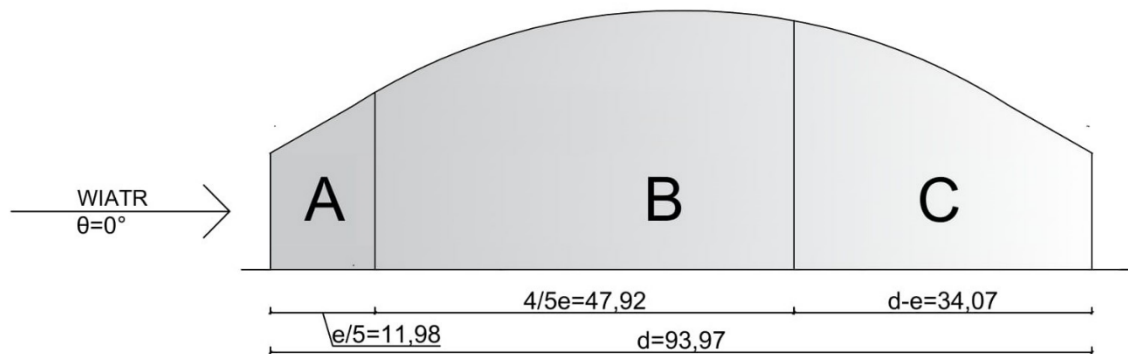
$$w_{e1} = q_p(z_e) \cdot c_{pe} = -0,4 \cdot 0,763 = -0,3052 \frac{kN}{m^2}$$

#### • Ściany:

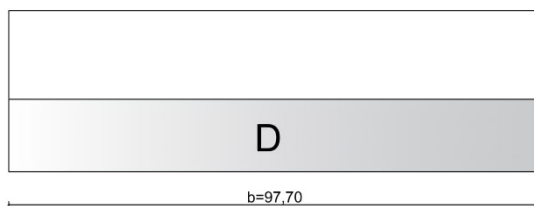
$$e = \min(b; 2h) = \min(97,70; 2 \cdot 29,95 = 59,9) = 59,9 \text{ m}$$

$e=59,9 \text{ m} \leq d=B_{\text{całkowite}}=97,97 \text{ m} \rightarrow$  trzy pola ciśnień na ścianach szczytowych.

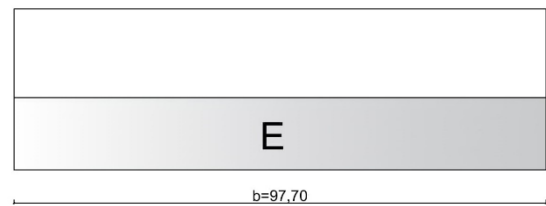
a)



b)



c)



Rys. 4.7. Rozmieszczenie pól o różnych współczynnikach ciśnienia zewnętrznego na ścianie szczytowej, gdy wiatr wieje prostopadle do ściany podłużnej ( $\theta=0^\circ$ ): a) ściana szczytowa, b) ściana podłużna- nawietrzna, c) ściana podłużna- zawietrzna

- **Pole A**

- współczynnik ciśnienia zewnętrznego:  $c_{pe}=c_{pe,10} = -1,2$  [N4]
- ciśnienie wiatru na powierzchnię zewnętrzną

$$w_{e1} = q_p(z_e) \cdot c_{pe} = -1,2 \cdot 0,763 = -0,916 \text{ kN/m}^2$$

- **Pole B**

- współczynnik ciśnienia zewnętrznego:  $c_{pe}=c_{pe,10} = -0,8$  [N4]
- ciśnienie wiatru na powierzchnię zewnętrzną

$$w_{e1} = q_p(z_e) \cdot c_{pe} = -0,80 \cdot 0,763 = -0,610 \text{ kN/m}^2$$

- **Pole C**

- współczynnik ciśnienia zewnętrznego:  $c_{pe}=c_{pe,10} = -0,5$  [N4]
- ciśnienie wiatru na powierzchnię zewnętrzną

$$w_{e1} = q_p(z_e) \cdot c_{pe} = -0,5 \cdot 0,763 = -0,382 \text{ kN/m}^2$$

- **Pole D**

- współczynnik ciśnienia zewnętrznego:  $c_{pe}=c_{pe,10} = 0,7$  [N4]
- ciśnienie wiatru na powierzchnię zewnętrzną

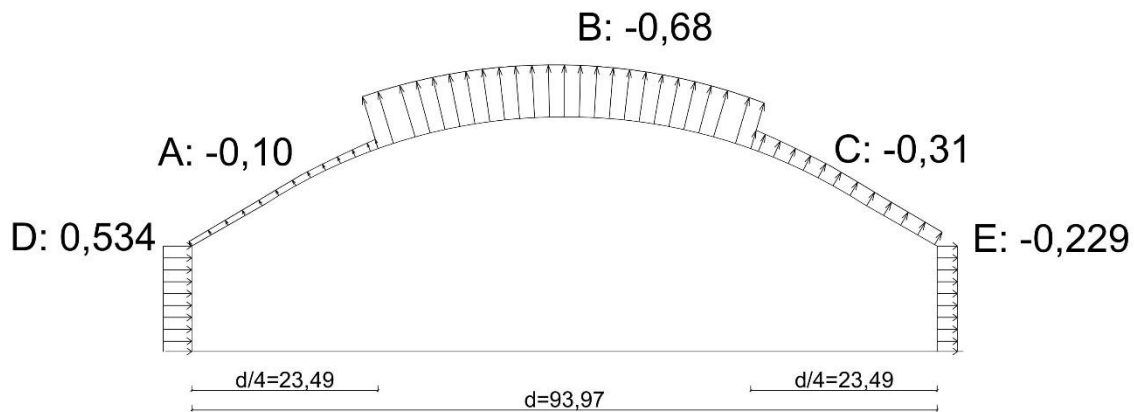
$$w_{e1} = q_p(z_e) \cdot c_{pe} = 0,7 \cdot 0,763 = 0,534 \text{ kN/m}^2$$

- **Pole E**

- współczynnik ciśnienia zewnętrznej:  $c_{pe}=c_{pe,10} = -0,3$  [N4]
- ciśnienie wiatru na powierzchnię zewnętrzną

$$w_{e1} = q_p(z_e) \cdot c_{pe} = -0,3 \cdot 0,763 = -0,229 \text{ kN/m}^2$$

- **Ciśnienie wiatru działające na dach i ściany dla kierunku prostopadłego do ściany podłużnej ( $\theta=0^\circ$ )**



Rys. 4.8. Ciśnienie wiatru działające dla kierunku prostopadłego do ściany podłużnej ( $\theta=0^\circ$ )

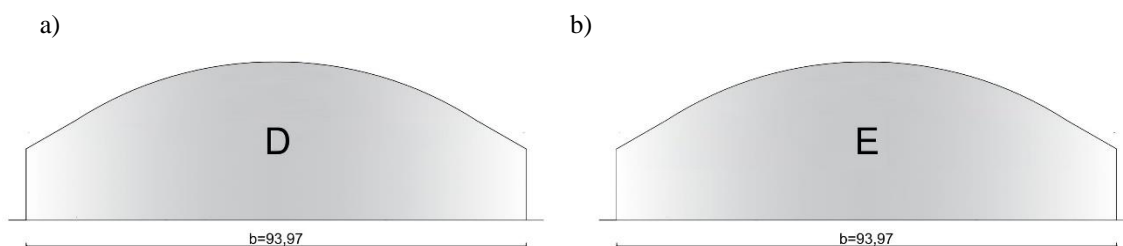
#### 4.3.3. Obciążenie wiatrem działającym równoległe do ściany podłużnej hali ( $\theta=90^\circ$ )

- **Ściany:**

$$h/d = H_{\text{całkowite}}/L_{\text{całkowite}} = 29,95/97,7 = 0,31 > 0,25$$

$$e = \min(b; 2h) = \min(75,27; 2 \cdot 29,95 = 59,9) = 59,9 \text{ m}$$

$e = 59,9 \text{ m} < d = 97,7 \text{ m} \rightarrow$  trzy pola ciśnień na ścianach podłużnych.



Rys. 4.9. Rozmieszczenie pól o różnych współczynnikach ciśnienia zewnętrznej na ścianie podłużnej, gdy wiatr wieje równoległe do ściany podłużnej ( $\theta=90^\circ$ )

- **Pole A**

- współczynnik ciśnienia zewnętrznej:  $c_{pe}=c_{pe,10} = -1,2$  [N4]
- ciśnienie wiatru na powierzchnię zewnętrzną

$$w_{e1} = q_p(z_e) \cdot c_{pe} = -1,2 \cdot 0,763 = -0,916 \text{ kN/m}^2$$

- **Pole B**

- współczynnik ciśnienia zewnętrznej:  $c_{pe}=c_{pe,10} = -0,8$  [N4]
- ciśnienie wiatru na powierzchnię zewnętrzną

$$w_{e1} = q_p(z_e) \cdot c_{pe} = -0,8 \cdot 0,763 = 0,610 \text{ kN/m}^2$$

- **Pole C**

- współczynnik ciśnienia zewnętrznej:  $c_{pe}=c_{pe,10} = -0,5$  [N4]
- ciśnienie wiatru na powierzchnię zewnętrzną

$$w_{e1} = q_p(z_e) \cdot c_{pe} = -0,5 \cdot 0,763 = -0,382 \text{ kN/m}^2$$

- **Pole D**

- współczynnik ciśnienia zewnętrznej:  $c_{pe}=c_{pe,10} = +0,70$  [N4]
- ciśnienie wiatru na powierzchnię zewnętrzną

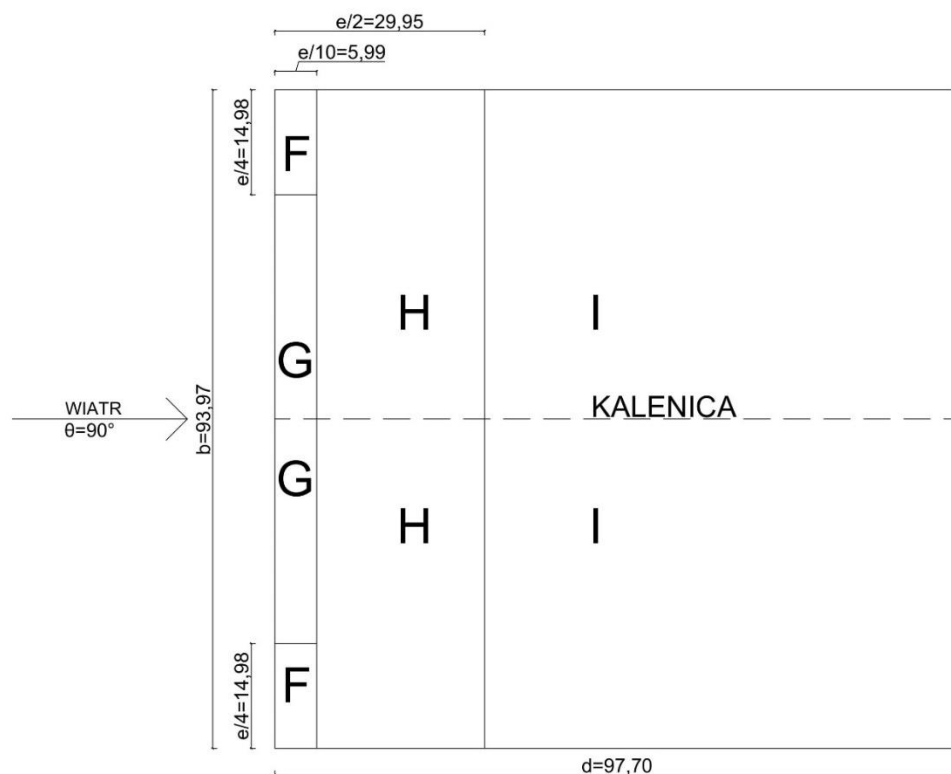
$$w_{e1} = q_p(z_e) \cdot c_{pe} = 0,70 \cdot 0,763 = 0,534 \text{ kN/m}^2$$

- **Pole E**

- współczynnik ciśnienia zewnętrznej:  $c_{pe}=c_{pe,10} = -0,30$  [N4]
- ciśnienie wiatru na powierzchnię zewnętrzną

$$w_{e1} = q_p(z_e) \cdot c_{pe} = -0,30 \cdot 0,763 = -0,229 \text{ kN/m}^2$$

- **Dach**



Rys. 4.10. Rozmieszczenie pól o różnych współczynnikach ciśnienia zewnętrznej na dach, gdy wiatr wieje równoległe do ściany podłużnej ( $\theta=90^\circ$ )

- **Pole F**

- współczynnik ciśnienia zewnętrznego:  $c_{pe}=c_{pe,10} = -1,3$  [N4]
- ciśnienie wiatru na powierzchnię zewnętrzną

$$w_{e1} = q_p(z_e) \cdot c_{pe} = -1,3 \cdot 0,763 = -0,992 \text{ kN/m}^2$$

- **Pole G**

- współczynnik ciśnienia zewnętrznego:  $c_{pe}=c_{pe,10} = -1,3$  [N4]
- ciśnienie wiatru na powierzchnię zewnętrzną

$$w_{e1} = q_p(z_e) \cdot c_{pe} = -1,3 \cdot 0,763 = -0,992 \text{ kN/m}^2$$

- **Pole H**

- współczynnik ciśnienia zewnętrznego:  $c_{pe}=c_{pe,10} = -0,6$  [N4]
- ciśnienie wiatru na powierzchnię zewnętrzną

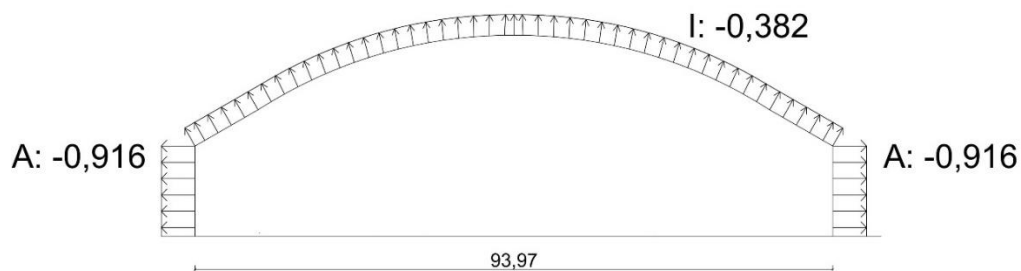
$$w_{e1} = q_p(z_e) \cdot c_{pe} = -0,6 \cdot 0,763 = -0,458 \text{ kN/m}^2$$

- **Pole I**

- współczynnik ciśnienia zewnętrznego:  $c_{pe}=c_{pe,10} = -0,5$  [N4]
- ciśnienie wiatru na powierzchnię zewnętrzną

$$w_{e1} = q_p(z_e) \cdot c_{pe} = -0,5 \cdot 0,763 = -0,382 \text{ kN/m}^2$$

- **Ciśnienie wiatru działające dla kierunku równoległego do ściany podłużnej ( $\theta=90^\circ$ )**

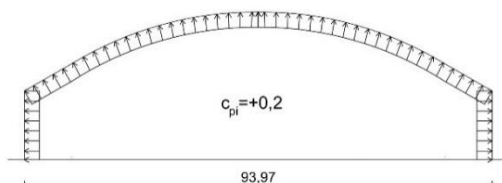


Rys. 4.11. Ciśnienie wiatru działające dla kierunku równoległego do ściany podłużnej ( $\theta=90^\circ$ )

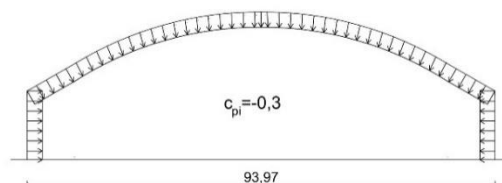
#### 4.3.4. Odziaływania wiatru na powierzchnie wewnętrzne

Przyjęto następujące współczynniki ciśnienia wewnętrznego:  $c_{pi}=+0,2$  oraz  $c_{pi}=-0,3$

a)



b)



Rys. 4.12. Współczynniki ciśnienia wewnętrznego: a) parcie, b) ssanie

### Ciśnienie wiatru na powierzchnie wewnętrzne

- **Parcie**

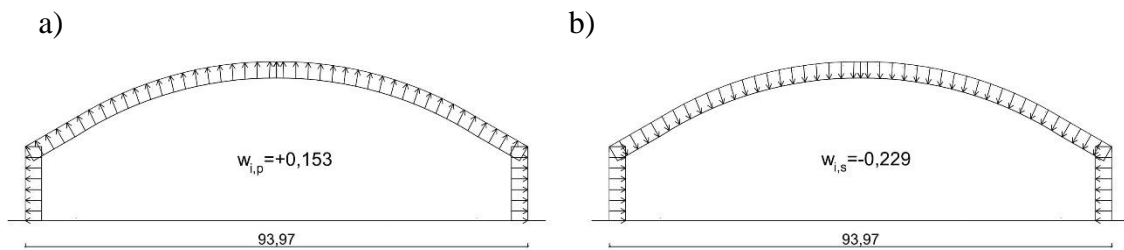
- współczynnik ciśnienia zewnętrznej:  $c_{pi} = +0,2$  [N4]
- ciśnienie wiatru na powierzchnię zewnętrzną

$$w_{e1} = q_p(z_e) \cdot c_{pi} = 0,2 \cdot 0,763 = 0,153 \text{ kN/m}^2$$

- **Ssanie**

- współczynnik ciśnienia zewnętrznej:  $c_{pi} = -0,3$  [N4]
- ciśnienie wiatru na powierzchnię zewnętrzną

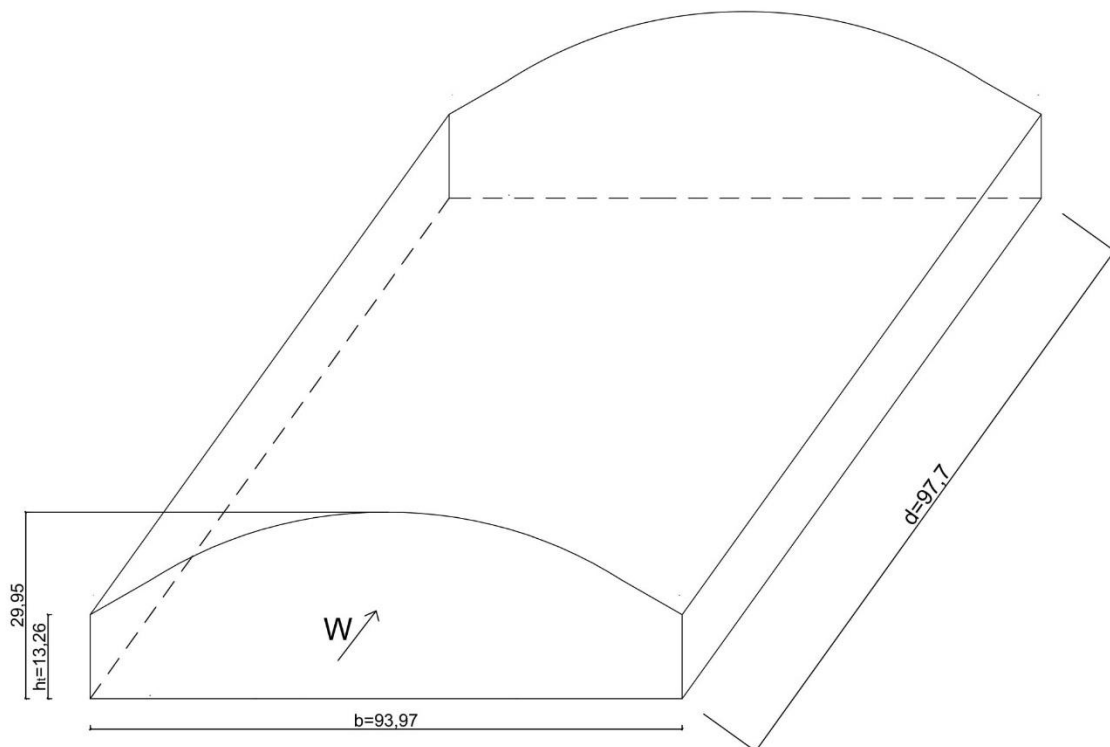
$$w_{e1} = q_p(z_e) \cdot c_{pi} = -0,3 \cdot 0,763 = -0,229 \text{ kN/m}^2$$



Rys. 4.13. Ciśnienie wiatru na powierzchnie wewnętrzne: a) parcie, b) ssanie

#### 4.3.5. Obciążenie siłami tarcia

$$\min(2b; 4h) = \min(2 \cdot 93,97 = 187,94; 4 \cdot 29,95 = 119,8) = 119,8 \text{ m}$$



Rys. 4.14. Powierzchnia odniesienia do obliczenia siły tarcia

- Suma powierzchni prostopadłych do kierunku wiatru:

$$A_{\perp} = 2 \cdot 0,5(13,26 + 29,95) \cdot 93,97 = 4060,44 \text{ mm}^2$$

- Suma powierzchni równoległych do kierunku wiatru:

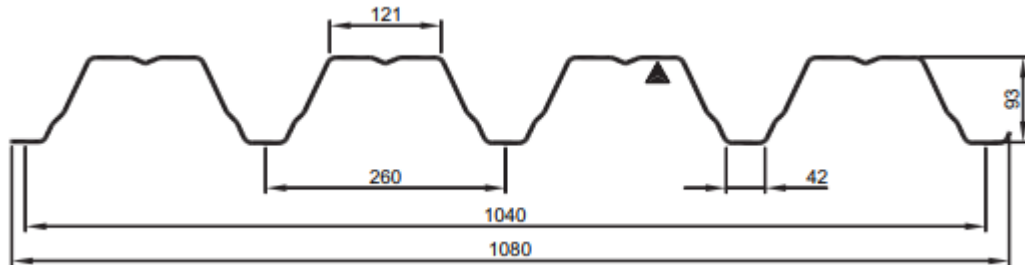
$$A_{\parallel} = (2 \cdot 18,61 + 75,27) \cdot 97,7 = 11771,87 \text{ m}^2$$

$$\frac{4 \cdot A_{\perp}}{A_{\parallel}} = \frac{4 \cdot 4060,44}{11771,87} = 1,38 > 1 \rightarrow \text{nie ma wpływu sił tarcia na konstrukcje.}$$



## 5. Poz. 1. Poszycie dachu

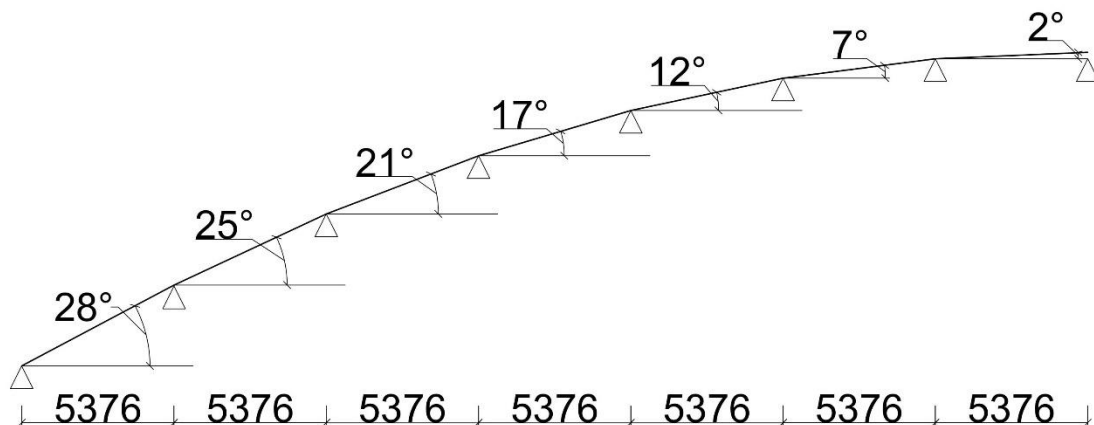
Poszycie dachu wykonano z blachy trapezowej TR 93.260.1040 o grubości 1,25 mm Firmy BALEXMETAL, ułożoną w pozycji POZYTYW o dopuszczalnym obciążeniu wynoszącym  $p_{d,lim} = 3,05 \text{ kN/m}^2$  ze stali S 320 GD o  $f_{yd} = 320 \text{ N/mm}^2$ ;  $f_u = 390 \text{ N/mm}^2$ .



Rys. 5.1. Blacha trapezowa TR 93.260.1040 gr. 1,25 mm [W29]

### 5.1. Schemat statyczny

Przyjęto ułożenie blachy trapezowej na płatwiach w pozycji „pozytyw” arkuszami jednoprzęsłowymi zgodnie z Rys. 4.2.



Rys. 5.2. Schemat statyczny poszycia dachu

Do dalszych obliczeń przyjęto następujące wartości:

- rozpiętość pojedynczego przęsła:  $L=5,376 \text{ m}$
- maksymalny kąt nachylenia połaci dachowej:  $\alpha=28^\circ$

## 5.2. Zestawienie obciążeń

- **Odziaływania stałe:**

Ciężar własny dachu

-membrana dachowa PCV gr. 1,5 mm	0,02 kN/m <sup>2</sup>
-wełna mineralna twarda gr. 200 mm 0,2·2,0	0,40 kN/m <sup>2</sup>
-folia PE gr. 0,25 mm	0,01 kN/m <sup>2</sup>
-blacha fałdowa TR 93.260.1040 gr. 1,25 mm (14,15 kg/m <sup>2</sup> )	0,139 kN/m <sup>2</sup>

$$g = 0,569 \text{ kN/m}^2$$

- **Odziaływania zmienne:**

Obciążenie śniegiem	$s = 0,96 \text{ kN/m}^2$
Obciążenie wiatrem	
-ssanie wiatru (pole B, $\theta = 0^\circ$ , $c_{pi} = +0,2$ )	$w_s = 0,763 \cdot (-0,89 - 0,2) = -0,832 \text{ kN/m}^2$
-parcie wiatru ( $c_{pi} = -0,3$ )	$w_p = 0,763 \cdot (-0,1 + 0,3) = 0,153 \text{ kN/m}^2$
Obciążenie użytkowe- dach kategoria H	$q = 0,40 \text{ kN/m}^2$

### 5.2.1. Rozkład obciążenia na składowe równoległe i prostopadłe do powierzchni połaci dachu

Tabela 5.1. Składowe obciążenia prostopadłego i równoległego do połaci dachu

	Składowa prostopadła do połaci dachu	Składowa równoległa do połaci dachu
Odziaływanie stałe	$g_z = g \cdot \cos \alpha$ $g_z = 0,569 \cdot \cos 28^\circ = 0,502 \text{ kN/m}^2$	$g_z = g \cdot \sin \alpha$ $g_z = 0,569 \cdot \sin 28^\circ = 0,267 \text{ kN/m}^2$
Odziaływanie śniegu	$s_z = s \cdot \cos^2 \alpha$ $s_z = 0,96 \cdot \cos^2 28^\circ = 0,748 \text{ kN/m}^2$	$s_z = s \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha$ $s_z = 0,96 \cdot \cos 28^\circ \cdot \sin 28^\circ = 0,212 \text{ kN/m}^2$
Odziaływanie wiatru	$w_{z,s} = -0,832 \text{ kN/m}^2$ $w_{z,p} = 0,153 \text{ kN/m}^2$	$w_{y,s} = w_{y,p} = 0$
Odziaływanie użytkowe	$q_z = q \cdot \cos^2 \alpha$ $q_z = 0,4 \cdot \cos^2 28^\circ = 0,312 \text{ kN/m}^2$	$q_z = q \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha$ $q_z = 0,4 \cdot \cos 28^\circ \cdot \sin 28^\circ = 0,166 \text{ kN/m}^2$

W dalszych obliczeniach rozpatrzono tylko składową prostopadłą do połaci dachu ze względu na charakter dominujący.

### 5.3. Obliczenia statyczne

Zgodnie z punktem 3.3.2(1) normy PN-EN 1991-1-1 dla dachów kategorii H nie wymaga się uwzględniania jednocześnie oddziaływań wiatru, obciążenia śniegiem i obciążenia użytkowego.

#### 5.3.1. Stan graniczny nośności

Kombinacje oddziaływań dociążających (grawitacyjnych)

Kombinacja K1:

$$\rho_{d,1} = \xi \cdot \gamma_{G,sup} \cdot g_z + \gamma_Q \cdot S_z + \gamma_Q \cdot \psi_0 \cdot W_{z,p}$$

$$\rho_{d,1} = 0,85 \cdot 1,35 \cdot 0,502 + 1,5 \cdot 0,748 + 1,5 \cdot 0,6 \cdot 0,153 = 1,823 \text{ kN/m}^2$$

Kombinacje oddziaływań unoszących

Kombinacja K2:

$$\rho_{d,2} = \gamma_{G,inf} \cdot g_z + \gamma_Q \cdot W_{z,s} = 1,0 \cdot 0,502 + 1,5 \cdot (-0,832) = -0,746 \text{ kN/m}^2$$

#### 5.3.2. Stan graniczny użyteczności

Kombinacja charakterystyczna

Kombinacja K3:

$$\rho_k = g_z + s_z + \psi_{0,1} \cdot W_{z,p} = 0,502 + 0,748 + 0,6 \cdot 0,153 = 1,342 \text{ kN/m}^2$$

### 5.4. Sprawdzenie stanów granicznych

#### 5.4.1. Stan graniczny nośności

- **obciążenie grawitacyjne**

Na podstawie danych z ograniczone obciążenie obliczeniowe blachy fałdowej TR 93.260.1040 o grubości 1,25 mm ustawionej w pozycji „pozytyw” o schemacie belki jednoprzęsłowej, o rozpiętości przęsła 5,40 m wynosi  $\rho_{lim,Rd} = 3,05 \text{ kN/m}^2$ , stąd:

$$\rho_{lim,Rd} = 3,05 \text{ kN/m}^2 > \rho_{d,1} = 1,823 \text{ kN/m}^2 \rightarrow \text{Warunek nośności spełniony.}$$

- **obciążenie unoszące**

Na podstawie danych z katalogu technicznego 0 ustalono graniczne obciążenie obliczeniowe blachy fałdowej TR 93.260.1040 o grubości 1,25 mm ustawionej w pozycji „pozytyw” o schemacie belki jednoprzęsłowej, o rozpiętości przęsła 5,40 m, która wynosi

$$\rho_{lim,Rd} = 2,67 \text{ kN/m}^2, \text{ stąd:}$$

$$\rho_{lim,Rd} = 2,67 \text{ kN/m}^2 > \rho_{d,2} = 0,746 \text{ kN/m}^2 \rightarrow \text{Warunek nośności spełniony.}$$

#### 5.4.2. Stan graniczny użyteczności

Na podstawie danych z katalogu technicznego ustalono graniczne obciążenie charakterystyczne blachy fałdowej TR 93.260.1040 o grubości 1,25 mm ustawionej w pozycji „pozytyw” o schemacie belki jednoprzęsłowej, o rozpiętości przęsła 5,40 m i strzałce ugięcia L/150 wynosi  $\rho_{lim,k}=1,41 \text{ kN/m}^2$ , stąd :

$\rho_{lim,k}=1,41 \text{ kN/m}^2 > \rho_k=1,342 \text{ kN/m}^2 \rightarrow$  Warunek spełniony.

## 6. Poz. 2. Płatew kratowa

### 6.1. Przyjęcie geometrii płatwi

Płatwie stalowe mogą być projektowane jako pełnościennie elementy z kształtowników walcowanych na gorąco lub profili giętych na zimno. W przypadku dużych rozpiętości lub obciążeń stosuje się płatwie kratowe. Niniejszej pracy zdecydowano na zastosowanie płatwi kratowych o pasach równoległych z kształtowników rurowych.

Wysokość konstrukcyjną ustala się najczęściej o wartości [1]:

$$h = \left( \frac{1}{10} \div \frac{1}{15} \right) L,$$

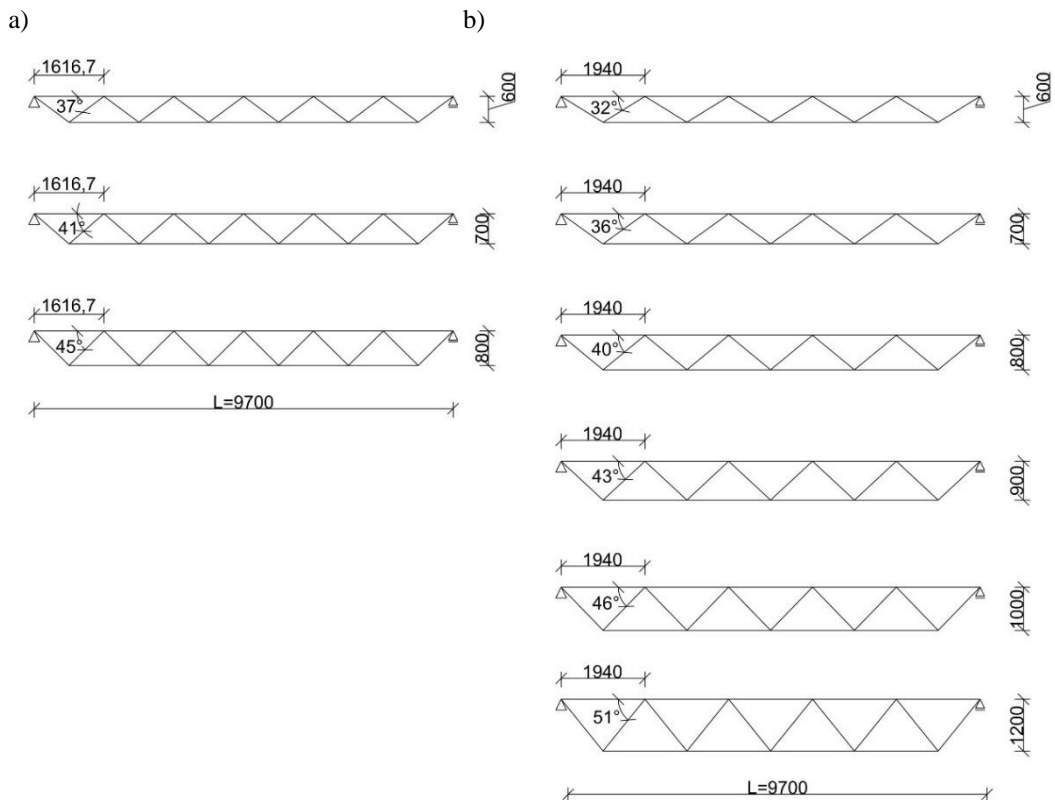
gdzie L-rozpiętość płatwi.

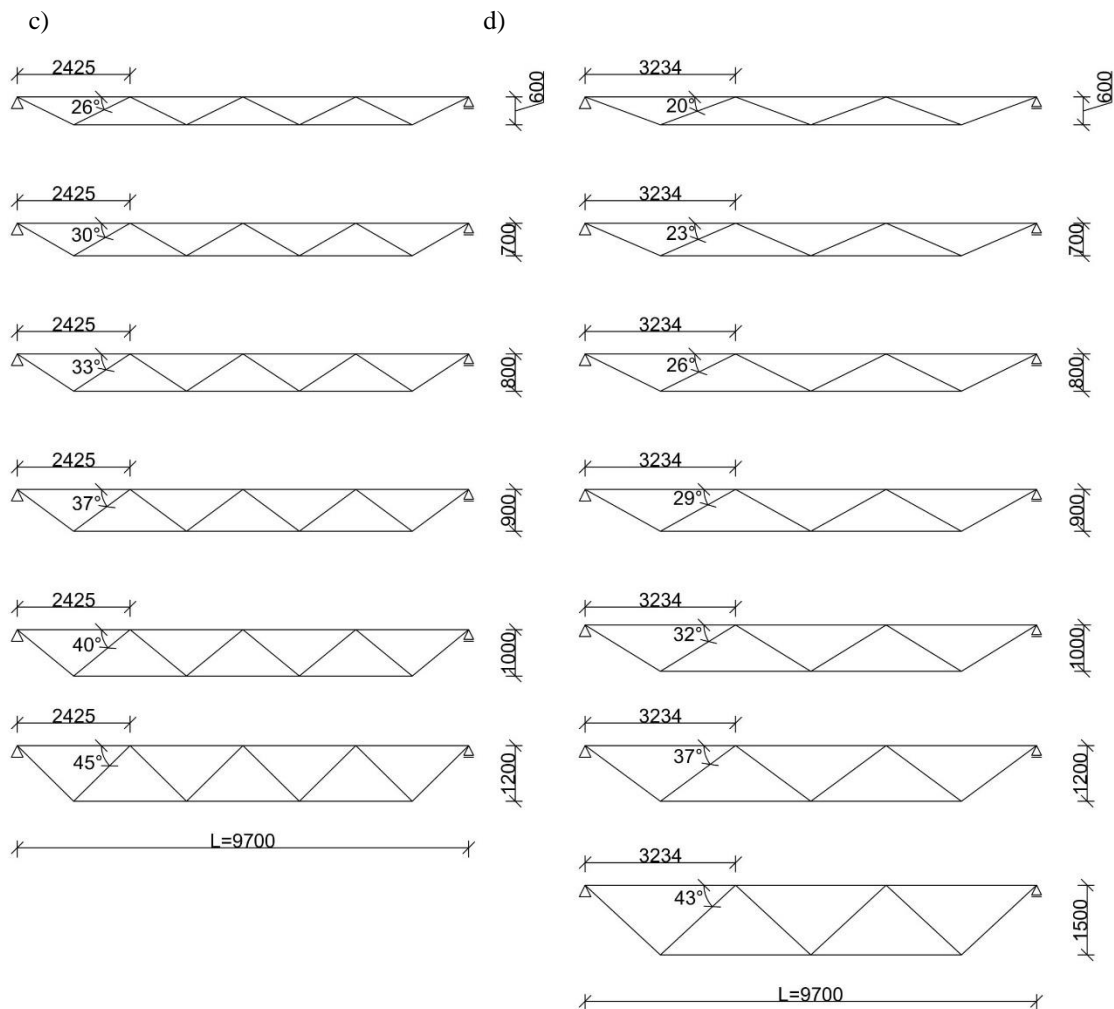
Dla ustalonej rozpiętości płatwi wynoszącej  $L=9,7$  m wyznaczono przedział zalecanych wysokości płatwi zgodnie ze wzorem:

$$h = \left( \frac{1}{10} \div \frac{1}{15} \right) L = \left( \frac{1}{10} \div \frac{1}{15} \right) \cdot 9,7 = 0,97 \div 0,65 \text{ m.}$$

Nachylenie krzyżulców powinno zawierać się w przedziale od 30 – 45°.

Na podstawie ustalonej rozpiętości płatwi zaproponowano kilka rozwiązań płatwi z zmieniającą się wysokością, rozstawem węzłów krzyżulców oraz kątem nachylenia krzyżulców zgodnie z Rys. 6.1 a-d.





Rys. 6.1. Warianty płatwi w zależności od wysokości, kąta nachylenia krzyżulców oraz rozstawu węzłów krzyżulców: a) dla rozstawu węzłów 1616,7 mm, b) dla rozstawu węzłów 1940 mm, c) dla rozstawu węzłów 2425 mm, d) dla rozstawu węzłów 3234 mm

Przedstawione rozwiązania na Rys. 6.1 a-d pokazują przykładowe geometrie płatwi kratowej dla zadanej rozpiętości.

Należy pamiętać o tym, że obciążenie ciągle przyłożone z pokrycia dachowego do pasa górnego powoduje zginanie z siłą osiową, natomiast pas dolny i skratowanie pracują na siłę osiową. Ma to znaczenie w przyjęciu rozstawu węzłów, które wpływają na długości wyboczeniowe elementów kratownicy.

Przy doborze przekroju płatwi należy również sugerować czynnikami mającymi wpływ na wykonawstwo połączeń. W przypadku kształtowników zamkniętych w normie [N6] znajduje się szereg wytycznych mający istotny wpływ na geometrie węzłów kratownicy.

Jednym z głównych kryterium doboru przekroju płatwi było zachowanie zalecanych proporcji wymiarów geometrycznych elementu konstrukcyjnego.

Przyjęto przekrój płatwi o rozstawie węzłów 1940 mm, wysokości 900 mm oraz kącie nachylenia krzyżulców 43°.

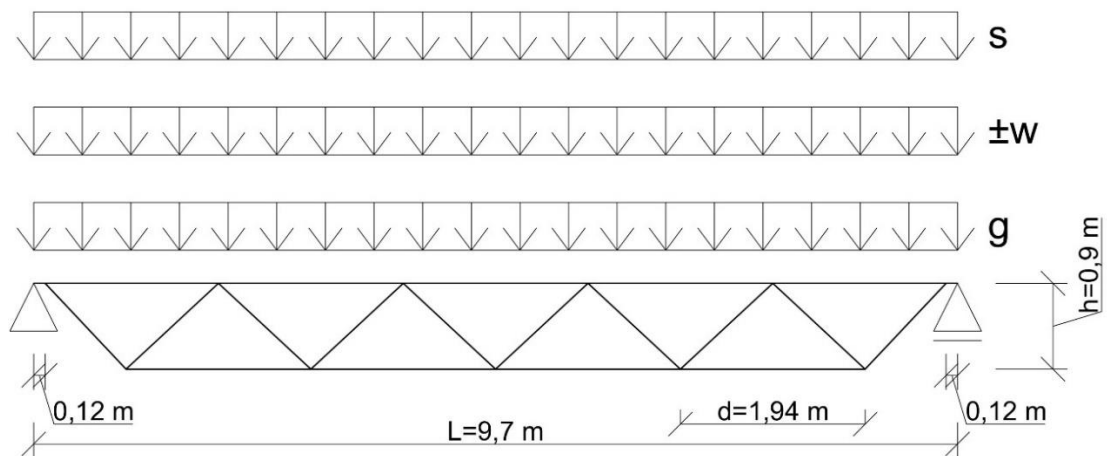
## 6.2. Schemat statyczny

- Przyjęto

Wymiary geometryczne płatwi:

- rozpiętość płatwi: 9,7 m,
- wysokość płatwi: 0,9 m,
- rozstaw płatwi: 5,376 m,
- rozstaw węzłów: 1,94 m.

Z uwagi na oparcie płatwi na dźwigarze kratowym (pasie górnym) postanowiono krzyżulec skrajny płatwi połączyć z pasem górnym w odległości 0,12 m od podpory.



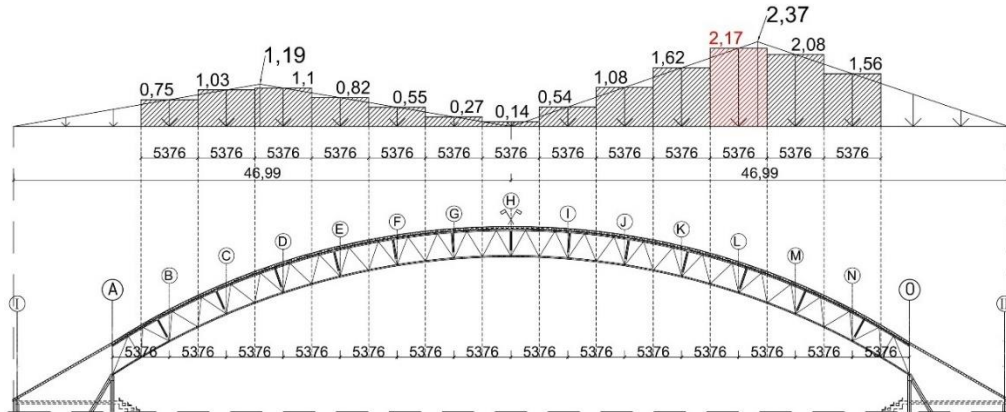
Rys. 6.2. Schemat statyczny płatwi





$$s=0,96 \cdot b=0,96 \cdot 5,376= 5,16 \text{ kN/m}$$

b)



Rys. 6.4. Obciążenie śniegiem dachu przypadające na płatwę (w kN/m<sup>2</sup>): a) równierne obciążenie śniegiem dachu, b) nierównierne obciążenie śniegiem dachu

Z uwagi na obciążenie śniegiem rozpatrzono jako najbardziej niekorzystny przypadek przy uwzględnieniu obciążenia nierównomiernego dachu. Wartość obciążenia oszacowano zgodnie z Rys. 6.4 -b. Z uwagi na liniowy rozkład obciążenia do szacowania wartości obciążenia śniegiem wyznaczono wartość wzrostową obciążenia na 1 m.

dla obciążenia większego (po prawej stronie):

$$\frac{2,37}{46,99/2} = \frac{x}{1,0} \rightarrow x = \frac{2,37 \cdot 1,0}{46,99/2} = 0,1 \rightarrow \text{wzrost obciążenia co 1m wynosi } 0,1 \text{ kN/m}^2.$$

dla obciążenia mniejszego (po lewej stronie):

$$\frac{1,19}{46,99/2} = \frac{x}{1,0} \rightarrow x = \frac{1,19 \cdot 1,0}{46,99/2} = 0,051 \rightarrow \text{wzrost obciążenia co 1m wynosi } 0,051 \text{ kN/m}^2.$$

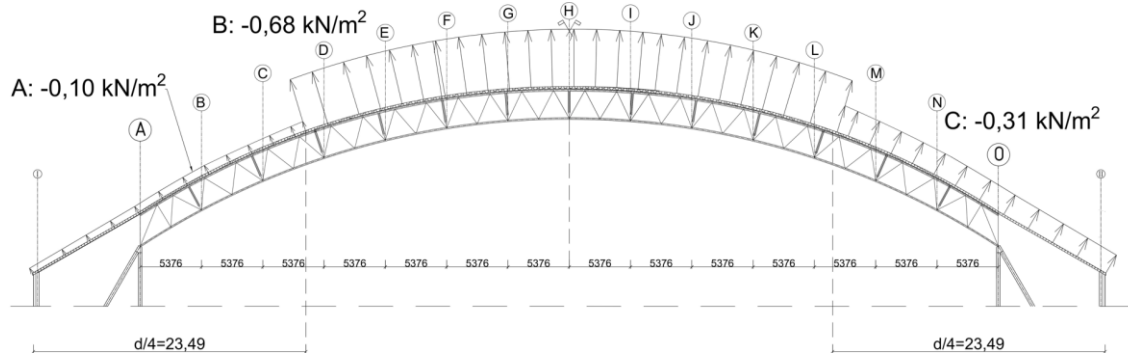
Tabela 6.1. Zestawienie obciążeń śniegiem przypadające na płatwę z uwagi na jej położenie

Położenie płatwi (oś)	b [m]	s <sub>1</sub> [kN/m <sup>2</sup> ]	s [kN/m]
B	5,376	0,75	4,03
C		1,03	5,54
D		1,10	5,91
E		0,82	4,41
F		0,55	2,96
G		0,27	1,45
H		0,14	0,75
I		0,54	2,90
J		1,08	5,81
K		1,62	8,71
L		2,17	<b>11,67</b>
M		2,08	11,18
N		1,56	8,39

Dla maksymalnego obciążenia śniegiem:

$$s=2,17 \cdot b=2,17 \cdot 5,376= \mathbf{11,67 \text{ kN/m}}$$

- Odziaływanie wiatru
  - gdy wiatr wieje prostopadle do ściany podłużnej



Rys. 6.5. Obciążenie ssaniem wiatru płatwi gdy wiatr wieje prostopadle do ściany podłużnej

Wartości zestawione w Tabeli 6.2 wyznaczone zgodnie ze wzorami:

$$d = \frac{b}{\cos \alpha}$$

$$w_s = w \cdot d$$

Tabela 6.2. Zestawienie obciążeń wiatrem przypadające na płatew z uwagi na jej położenie

Położenie płatwi (oś)	$\alpha$ [°]	b [m]	d [m]	w [kN/m <sup>2</sup> ]	w <sub>s</sub> [kN/m]
B	28	5,376	6,089	-0,10	-0,61
C	25		5,932	-0,10	-0,59
D	21		5,759	-0,39	-2,25
E	17		5,622	-0,68	<b>-3,82</b>
F	12		5,496	-0,68	-3,74
G	7		5,416	-0,68	-3,68
H	2		5,379	-0,68	-3,66
I	7		5,416	-0,68	-3,68
J	12		5,496	-0,68	-3,74
K	17		5,622	-0,68	<b>-3,82</b>
L	21		5,759	-0,50	-2,88
M	25		5,932	-0,31	-1,84
N	28		6,089	-0,31	-1,89

Do maksymalnego obciążenia wiatrem przypadającego na płatew dodano obciążenie wewnętrzne (4.3.4) i ostatecznie otrzymano:

$$w_s = -3,82 + (-0,153) = \mathbf{3,97 \text{ kN/m}}$$

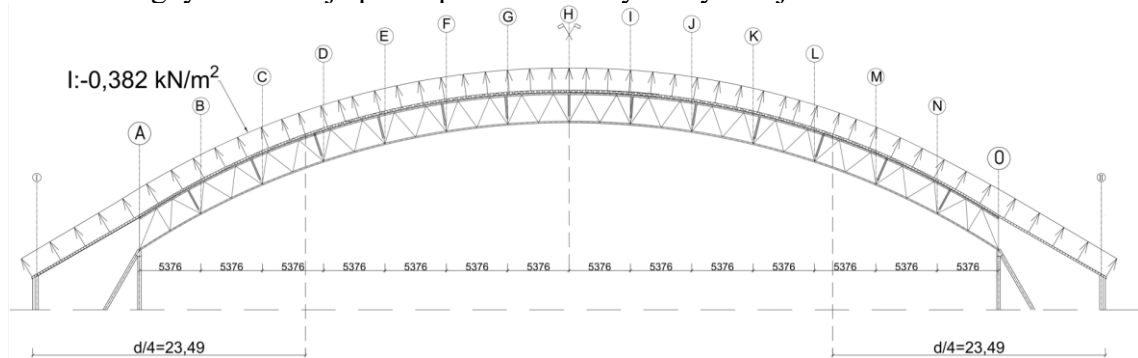
Wartość obciążenia wiatrem dla płatwi w osi D przyjęto jako średnia arytmetyczna oddziaływań A i B i wynosi:

$$\frac{-0,10+(-0,68)}{2} = -0,595 \approx -0,60$$

Wartość obciążenia wiatrem dla płatwi w osi M przyjęto jako średnia arytmetyczna oddziaływań B i C i wynosi:

$$\frac{-0,68+(-0,31)}{2} = -0,495 \approx -0,50$$

- gdy wiatr wieje prostopadle do ściany szczytowej



Rys. 6.6. Obciążenie ssaniem wiatru płatwi gdy wiatr wieje prostopadle do ściany szczytowej

Wartości  $d$  i  $w_s$  wyznaczano zgodnie z powyższymi wzorami i zestawiono w Tabeli 6.3.

Tabela 6.3. Zestawienie obciążeń wiatrem przypadające na płatwę z uwagi na jej położenie

Położenie płatwi (oś)	$\alpha$ [°]	$b$ [m]	$d$ [m]	$w$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$w_s$ [kN/m]
B	28	5,376	6,089	-0,382	<b>-2,33</b>
C	25		5,932	-0,382	-2,27
D	21		5,759	-0,382	-2,20
E	17		5,622	-0,382	-2,15
F	12		5,496	-0,382	-2,10
G	7		5,416	-0,382	-2,07
H	2		5,379	-0,382	-2,05
I	7		5,416	-0,382	-2,07
J	12		5,496	-0,382	-2,10
K	17		5,622	-0,382	-2,15
L	21		5,759	-0,382	-2,20
M	25		5,932	-0,382	-2,27
N	28		6,089	-0,382	<b>-2,33</b>

Do maksymalnego obciążenia wiatrem przypadającego na płatwę dodano obciążenie wewnętrzne (Oddziaływania wiatru na powierzchnie wewnętrzne 4.3.4) i ostatecznie otrzymano:

$$w_s = -2,33 + (-0,153) = \mathbf{2,48 \text{ kN/m}}$$

Z uwagi na rozkład obciążeń wiatru oraz na różne nachylenie płatwi przyjęto, że najbardziej niekorzystne oddziaływanie wiatru przypada na płatew w osi E ( lub oś L) dla przypadku, gdy wiatr wieje prostopadle do ściany podłużnej.

### 6.3.2. Rozkład obciążeń na składowe prostopadle i równoległe względem osi przekroju

- **Oddziaływania stałe**

Tabela 6.4. Rozkład obciążeń na składowe

	Dla $\alpha= 2^\circ$		Dla $\alpha= 28^\circ$	
	$\cos 2^\circ=0,999$	$\sin 2^\circ=0,035$	$\cos 28^\circ=0,883$	$\sin 28^\circ=0,469$
$g=5,292 \text{ [kN/m]}$	$g_z \text{ [kN/m]}$	$g_y \text{ [kN/m]}$	$g_z \text{ [kN/m]}$	$g_y \text{ [kN/m]}$
Składowa „z”	<b>5,287</b>	-	4,673	-
Składowa „y”	-	0,185	-	2,482

$$g_z = g \cdot \cos \alpha$$

$$g_y = g \cdot \sin \alpha$$

- **Oddziaływania zmienne**

- Obciążenie śniegiem

Tabela 6.5. Rozkład obciążeń na składowe

	Dla $\alpha= 2^\circ$		Dla $\alpha= 28^\circ$	
	$\cos 2^\circ=0,999$	$\sin 2^\circ=0,035$	$\cos 28^\circ=0,883$	$\sin 28^\circ=0,469$
$s=11,67 \text{ [kN/m]}$	$s_z \text{ [kN/m]}$	$s_y \text{ [kN/m]}$	$s_z \text{ [kN/m]}$	$s_y \text{ [kN/m]}$
Składowa „z”	<b>11,658</b>	-	10,305	-
Składowa „y”	-	0,408	-	5,473

$$s_z = s \cdot \cos \alpha$$

$$s_y = s \cdot \sin \alpha$$

- Obciążenie wiatrem

$$w_{s,z} = w_s = -3,97 \text{ kN/m}$$

$$w_{s,y} = 0$$

### 6.4. Określenie zdolności poszycia do stężenia płatwi

Przyjęto, że blacha fałdowa spełnia warunki poszycia współdziałającego. Założono, że płatew będzie obciążona jedynie składową obciążenia prostopadłą do poszycia (składową „z”).

## 6.5. Obliczenia statyczne

### 6.5.1. Kombinacje obciążeń

- Kombinacja K1 (obciążenie dociążające; g+s, ↓↓):

$$p_{z,d} = \gamma_{G,sup} \cdot g_z + \gamma_{Q,1} \cdot \psi_0 \cdot s_z$$

$$p_{z,d} = 1,35 \cdot 5,287 + 1,5 \cdot 0,5 \cdot 11,658 = 15,88 \text{ kN/m}$$

$$p_{z,d} = \xi_j \cdot \gamma_{G,sup} \cdot g_z + \gamma_{Q,1} \cdot s_z$$

$$p_{z,d} = 0,85 \cdot 1,35 \cdot 5,287 + 1,5 \cdot 11,658 = 23,55 \text{ kN/m}$$

Jako bardziej niekorzystny przypadek obciążenia dla kombinacji K1 przyjęto przypadek drugi.

- Kombinacja K2 (obciążenie unoszące; g-w, ↓↑):

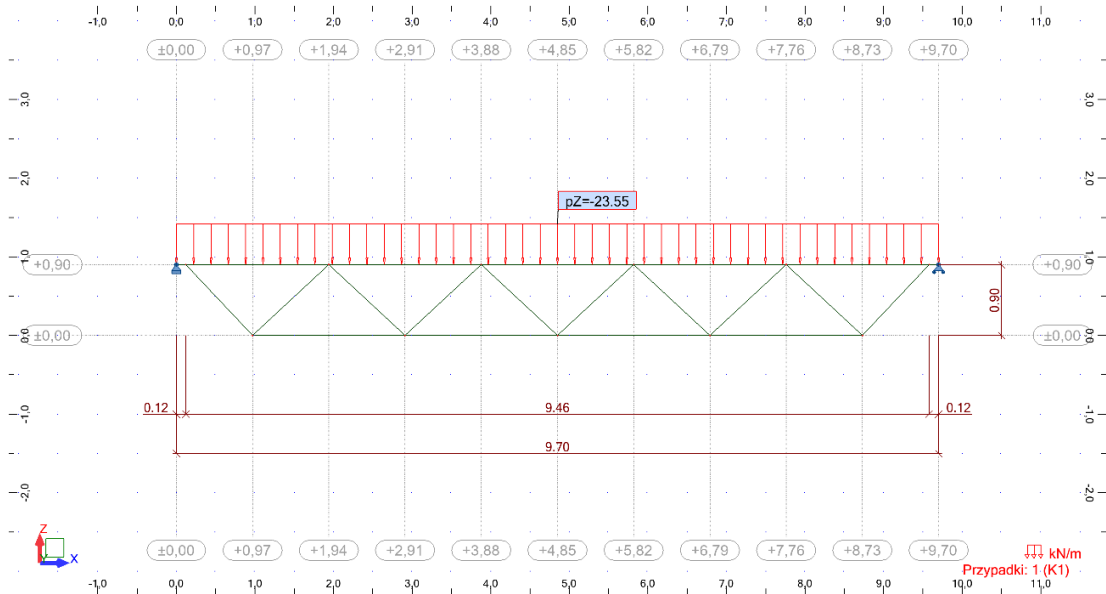
$$p_{z,d} = \gamma_{G,inf} \cdot g_z - \gamma_{Q,1} \cdot w_{s,z}$$

$$p_{z,d} = 1,0 \cdot 5,287 - 1,5 \cdot 3,97 = -0,67 \text{ kN/m}$$

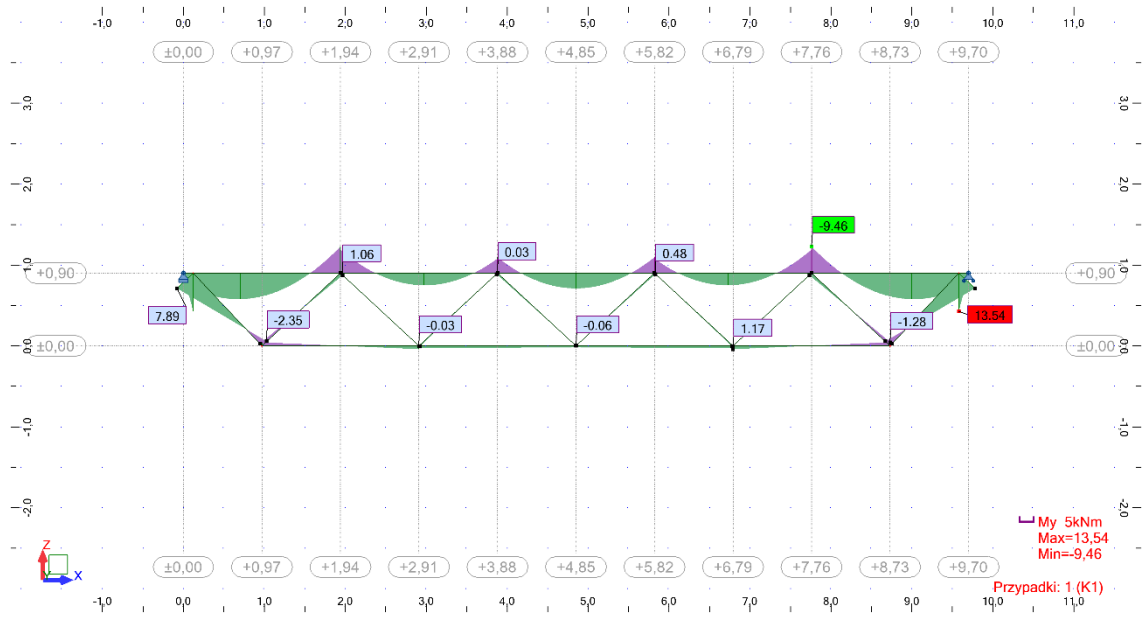
### 6.5.2. Siły wewnętrzne

Siły wewnętrzne obliczono przy użyciu programu komputerowego ARSA. Obliczone rozkłady sił wewnętrznych dla kombinacji K1 pokazano na Rys. 6.7 a-d, a dla kombinacji K2 na Rys. 6.8 a-d

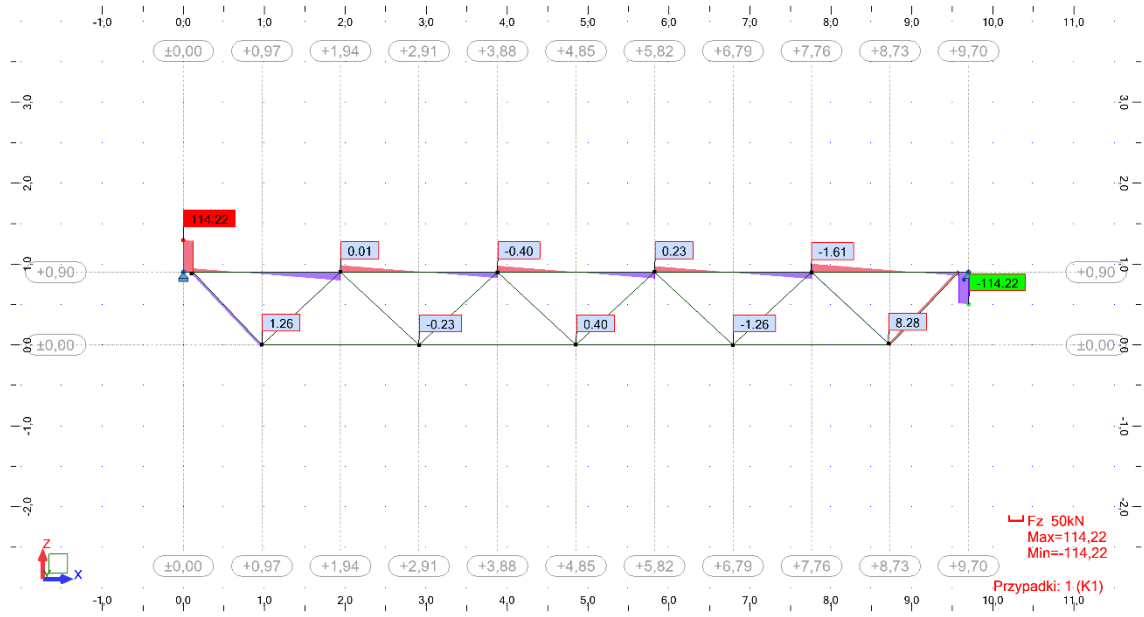
a)



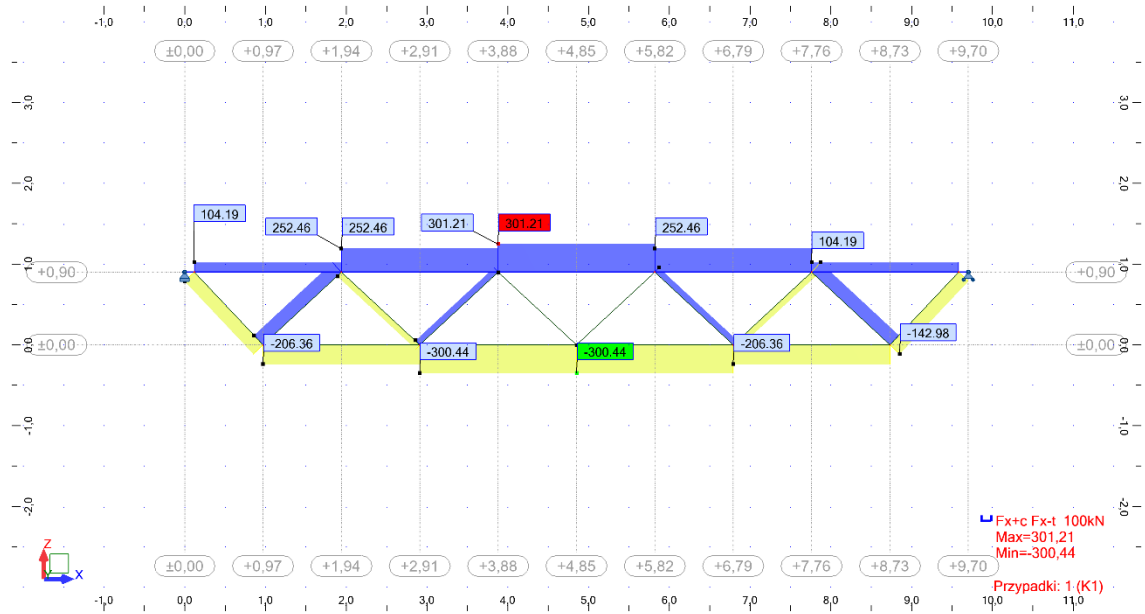
b)



c)



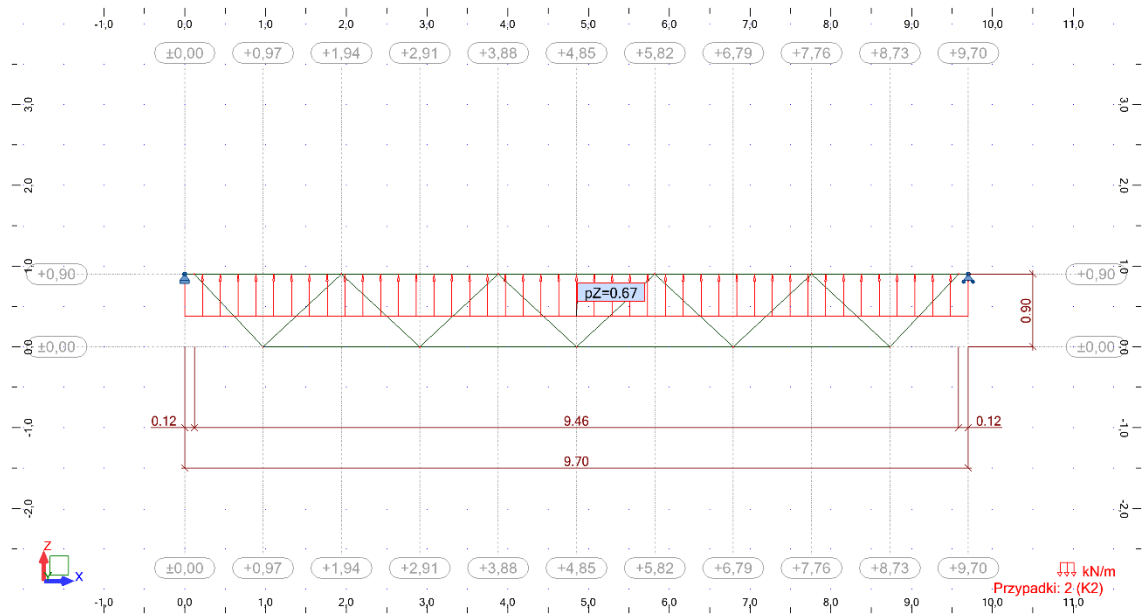
d)



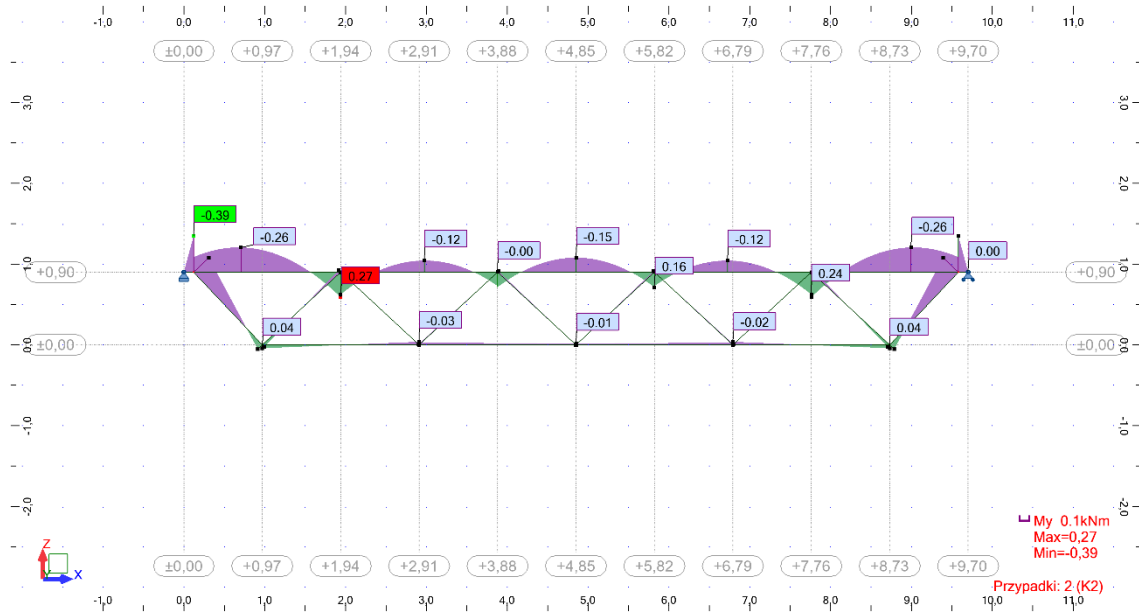
Rys. 6.7. Wyniki obliczeń statycznych - Kombinacja K1: a) schemat statyczny, b) momenty zginające, c) siły poprzeczne, d) siły podłużne

- Dla K2

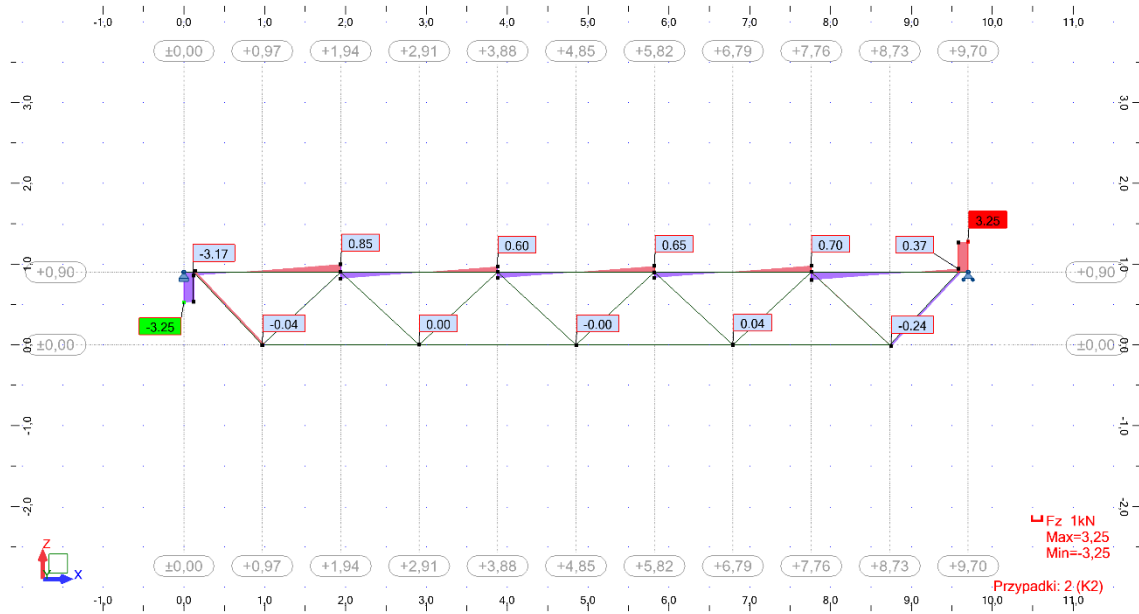
a)



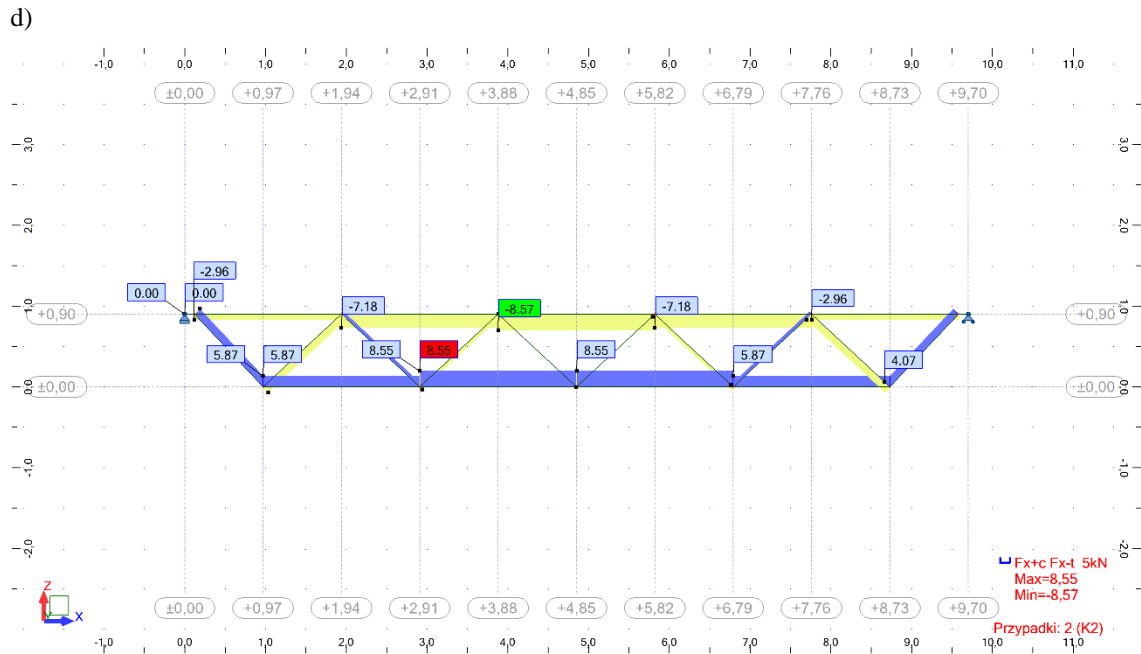
b)



c)







Rys. 6.8. Wyniki obliczeń statycznych - Kombinacja K2: a) schemat statyczny, b) momenty zginające, c) siły poprzeczne, d) siły podłużne

- Zestawienie wyników

Tabela 6.6. Zestawienie wyników

	Dla K1	Dla K2
$M_{y,Ed}$ [kNm]	13,54	0,39
$V_{z,Ed}$ [kN]	114,22	3,25
$F_g$ [kN]	-301,21	8,57
$F_d$ [kN]	300,44	-8,55
$K$ [kN]	-140,87	4,01

## 6.6. Stan graniczny nośności

### 6.6.1. Sytuacja projektowa trwała (faza eksploatacji)

#### ➤ Pas górny

- Siły wewnętrzne

max moment zginający:  $M_{y,Ed} = 13,54 \text{ kNm}$

max siła tnąca:  $V_{z,Ed} = 114,22 \text{ kN}$

max siła ściskająca:  $N_{c,Ed} = 301,21 \text{ kN}$

max siła rozciągająca:  $N_{t,Ed} = 8,57 \text{ kN}$

- **Charakterystyki geometryczne przekroju**

Przyjęto kształtownik RK 100x100x5

$$h=b=100 \text{ mm}$$

$$t=5 \text{ mm}$$

$$A=1870 \text{ mm}^2$$

$$I_y=I_z=279 \cdot 10^4$$

$$W_{pl,y}=W_{pl,z}=64,59 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

$$i_y=i_z=39 \text{ mm}$$

- **Parametry mechaniczne stali**

$$t_{\max}=t_f=7,1 \text{ mm} < 40 \text{ mm} \rightarrow f_y=355 \text{ MPa}$$

$$f_u=510 \text{ MPa}$$

- **Określenie klasy przekroju**

-współczynnik  $\varepsilon$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{355}} = 0,81$$

-smukłość ścianki rury

$$\frac{c}{t} = \frac{h-3t}{t} = \frac{100-3 \cdot 5}{5} = 17,0 < 33\varepsilon = 33 \cdot 0,81 = 26,73 \rightarrow \text{klasa 1}$$

Kształtownik spełnia wymagania klasy 1.

- **Sprawdzenie nośności przekroju na zginanie**

-obliczenie nośności przekroju

$$M_{y,Rd} = M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{64,59 \cdot 10^3 \cdot 355}{1,0} = 22,93 \cdot 10^6 \text{ Nmm} = 22,93 \text{ kNm}$$

-sprawdzenie warunku nośności

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} = \frac{13,54}{22,93} = 0,59 < 1,0$$

Warunek nośności spełniony.

- **Sprawdzenie nośności przekroju na ścinanie**

-obliczenie pole przekroju czynnego przy ścinaniu

$$A_V = \frac{A \cdot h}{b+h} = \frac{1870 \cdot 100}{100+100} = 935 \text{ mm}^2$$

-obliczenie nośności przekroju na ścinanie

Ponieważ:

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{h-3t}{t} = \frac{100-3 \cdot 5}{5} = 17,0 < 72 \frac{\varepsilon}{\eta} = 72 \cdot \frac{0,81}{1,0} = 58,32$$

więc

$$V_{c,Rd} = V_{pl,Rd} = A_V \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 935 \cdot \frac{355}{1,0} = 191,64 \text{ N} = 191,64 \text{ kN}$$

-sprawdzenie warunku nośności

$$\frac{V_{z,Ed}}{V_{c,Rd}} = \frac{114,22}{191,64} = 0,60 < 1,0$$

Warunek nośności spełniony.

◦ **Sprawdzenie nośności przekroju na ściskanie**

-obliczenie nośności przekroju

$$N_{c,Rd} = \frac{Af_y}{\gamma_{M0}} = \frac{1870 \cdot 355}{1,0} = 663,85 \cdot 10^3 \text{ N} = 663,85 \text{ kN}$$

-sprawdzenie warunku nośności

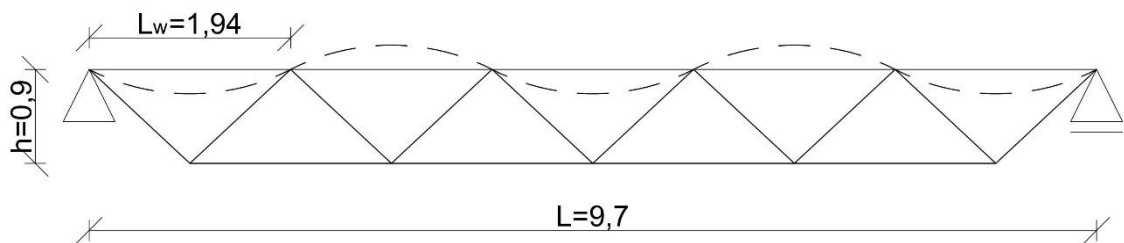
$$\frac{N_{c,Ed}}{N_{c,Rd}} = \frac{301,21}{663,85} = 0,45 < 1,0$$

Warunek nośności spełniony.

◦ **Nośność elementu z uwzględnieniem stateczności**

- Nośność na wyboczenie w płaszczyźnie kratownicy

-długość wyboczeniowa



Rys. 6.9. Długość wyboczeniowa pasa górnego płatwi w płaszczyźnie kratownicy

dla kształtowników zamkniętych:  $L_{cr} = 0,9 \cdot L_w$

gdzie :  $L_w$ - odległość między węzłami (teoretyczna)

$$L_{cr,y} = 0,9L_w = 0,9 \cdot 1,94 = 1,746 \text{ m}$$

-wartość odniesienia do wyznaczenia smukłości względnej

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{\varepsilon}{f_y}} = 93,9\varepsilon = 93,9 \cdot 0,81 = 76,06$$

-smukłość względna

$$\bar{\lambda}_y = \frac{L_{cr,y}}{i_y} \cdot \frac{1}{\lambda_1} = \frac{1746}{39} \cdot \frac{1}{76,06} = 0,59$$

-parametr imperfekcji

krzywa wyboczeniowa „a”  $\rightarrow \alpha=0,21$

-parametr krzywej niestateczności

$$\phi = 0,5[1 + \alpha_y(\lambda_y - 0,2) + \lambda_y^2] = 0,5[1 + 0,21 \cdot (0,59 - 0,20) + 0,59^2] = 0,72$$

-współczynnik wyboczeniowy

$$\chi_y = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda^2}} = \frac{1}{0,72 + \sqrt{0,72^2 - 0,59^2}} = 0,88$$

-nośność elementu

$$N_{b,Rd} = \chi \cdot \frac{Af_y}{\gamma_{M0}} = 0,88 \cdot \frac{1870 \cdot 355}{1,0} = 584,19 \cdot 10^3 \text{ N} = 584,19 \text{ kN}$$

-sprawdzenie warunku nośności

$$\frac{N_{c,Ed}}{N_{b,Rd}} = \frac{301,21}{584,19} = 0,52 < 1,0$$

Warunek nośności spełniony.

◦ **Nośność na wyboczenie z płaszczyzny kratownicy**

-długość wyboczeniowa

$L_{cr,z} = 0,183 \text{ m}$  (rozstaw łączników mocujących blache fałdową do pasa górnego płatwi)

-wartość odniesienia do wyznaczenia smukłości względnej

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{\varepsilon}{f_y}} = 93,9\varepsilon = 93,9 \cdot 0,81 = 76,06$$

-smukłość względna

$$\bar{\lambda}_z = \frac{L_{cr,z}}{i_z} \cdot \frac{1}{\lambda_1} = \frac{183}{39} \cdot \frac{1}{76,06} = 0,062$$

Ponieważ  $\bar{\lambda}_z < 0,2$  nośność elementu sprowadza się do nośności przekroju ( $\chi_z = 1,0$ )

-nośność elementu

$$N_{b,Rd} = \chi \cdot \frac{Af_y}{\gamma_{M0}} = 1,0 \cdot \frac{1870 \cdot 355}{1,0} = 663,85 \cdot 10^3 \text{ N} = 663,85 \text{ kN}$$

-sprawdzenie warunku nośności

$$\frac{N_{c,Ed}}{N_{b,Rd}} = \frac{301,21}{663,85} = 0,45 < 1,0$$

Warunek nośności spełniony.

◦ **Nośność elementu przy zwichrzeniu**

Element niepodatny na zwichrzenie  $\rightarrow \chi_{LT} = 1,0$

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot \frac{W_y f_y}{\gamma_{M1}} = 1,0 \cdot \frac{64,59 \cdot 10^3 \cdot 355}{1,0} = 22,93 \cdot 10^6 \text{ Nmm} = 22,93 \text{ kNm}$$

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{b,Rd}} = \frac{7,89}{22,93} = 0,34 < 1,0$$

Warunek nośności spełniony.

◦ **Nośność elementu zginającego i ściskanego**

-współczynnik interakcji

Do wyznaczenia współczynników interakcji wykorzystano metodę 2 według załącznika B (element niewrażliwy na deformacje skrętną). Współczynnik równoważnego stałego momentu  $C_{my}$  (oś zginania y-y, kierunek podparcia z-z).

$$\alpha_s = \frac{M_s}{M_h} = \frac{9,46}{-13,54} = -0,70$$

$$C_{my} = 0,1 - 0,8 \cdot \alpha_s = 0,1 - 0,8 \cdot (-0,70) = 0,66 > 0,4$$

-nośności charakterystyczne przekroju:

przy ściskaniu:

$$N_{Rk} = A \cdot f_y = 1870 \cdot 355 = 663,85 \cdot 10^3 N = 663,85 \text{ kN}$$

przy zginaniu:

$$M_{Rk} = W_{pl,y} \cdot f_y = 64,59 \cdot 10^3 \cdot 355 = 22,93 \cdot 10^6 Nmm = 22,93 \text{ kNm}$$

$$\min \left\{ \begin{array}{l} C_{my} \left[ 1 + (\lambda_y - 0,2) \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right] \\ C_{my} \left[ \left[ 1 + 0,8 \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right] \right] \end{array} \right.$$

$$k_{yy} = \min \left\{ \begin{array}{l} 0,66 \cdot \left[ 1 + (0,59 - 0,2) \cdot \frac{301,21}{0,88 \cdot \frac{663,85}{1,0}} \right] = 0,79 \\ 0,66 \cdot \left[ \left[ 1 + 0,8 \cdot \frac{301,21}{0,88 \cdot \frac{663,85}{1,0}} \right] \right] = 0,93 \end{array} \right. = 0,93$$

$$k_{zy} = 0,6 \cdot k_{yy} = 0,6 \cdot 0,93 = 0,56$$

-sprawdzenie nośności elementu ściskanego i zginanego

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{Rk}}{\gamma_{M1}}} = \frac{301,21}{0,88 \cdot \frac{663,85}{1,0}} + 0,93 \cdot \frac{13,54}{1,0 \cdot \frac{22,93}{1,0}} = 0,52 + 0,55 \approx 1,0 < 1,0$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{Rk}}{\gamma_{M1}}} = \frac{301,21}{1,0 \cdot \frac{663,85}{1,0}} + 0,56 \cdot \frac{13,54}{1,0 \cdot \frac{22,93}{1,0}} = 0,45 + 0,33 = 0,78 < 1,0$$

Warunek nośności spełniony.

➤ **Pas dolny**

◦ **Sily wewnętrzne**

-max siła ściskająca:  $N_{c,Ed} = 8,55 \text{ kN}$

-max siła rozciągająca:  $N_{t,Ed} = 300,44 \text{ kN}$

- **Charakterystyki geometryczne przekroju**

Przyjęto kształtownik RO 80x80x4

$$h = b = 80 \text{ mm}$$

$$t = 4 \text{ mm}$$

$$A = 1200 \text{ mm}^2$$

$$I_y = I_z = 114 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

$$W_{pl,y} = W_{pl,z} = 33,07 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

$$i_y = i_z = 31 \text{ mm}$$

- **Parametry mechaniczne stali**

$$t_{\max} = t_f = 4 \text{ mm} < 40 \text{ mm} \rightarrow f_y = 355 \text{ MPa}$$

$$f_u = 510 \text{ MPa}$$

- **Sprawdzenie nośności przekroju na rozciąganie**

-obliczenie nośności przekroju

$$N_{t,Rd} = \frac{Af_y}{\gamma_{M0}} = \frac{1200 \cdot 355}{1,0} = 426,0 \cdot 10^3 \text{ N} = 426,0 \text{ kN}$$

-sprawdzenie warunku nośności

$$\frac{N_{t,Ed}}{N_{t,Rd}} = \frac{300,44}{426,0} = 0,71 < 1,0$$

Warunek nośności spełniony.

- **Sprawdzenie nośności przekroju na ściskanie**

- określenie klasy przekroju

-współczynnik  $\varepsilon$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{355}} = 0,81$$

-smukłość ścianki rury

$$\frac{c}{t} = \frac{h-3t}{t} = \frac{80-3 \cdot 4}{4} = 17,0 < 33\varepsilon = 33 \cdot 0,81 = 26,73 \rightarrow \text{klasa 1}$$

Kształtownik spełnia wymagania klasy 1.

-obliczenie nośności przekroju

$$N_{c,Rd} = \frac{Af_y}{\gamma_{M0}} = \frac{1200 \cdot 355}{1,0} = 426,0 \cdot 10^3 \text{ N} = 426,0 \text{ kN}$$

-sprawdzenie warunku nośności

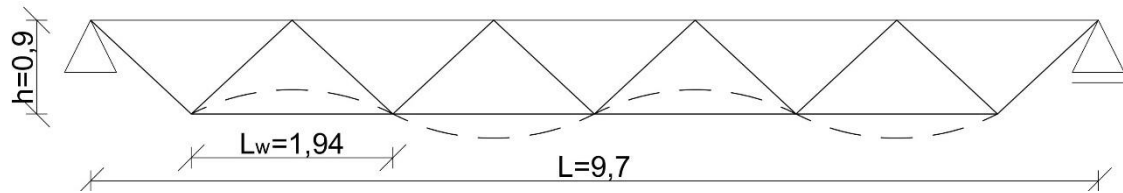
$$\frac{N_{c,Ed}}{N_{c,Rd}} = \frac{8,55}{426,0} = 0,02 < 1,0$$

Warunek nośności spełniony.

- **Nośność elementu z uwzględnieniem stateczności**

- Nośność na wyboczenie w płaszczyźnie kratownicy

-długość wyboczeniowa



Rys. 6.10. Długość wyboczeniowa pasa dolnego płatwi w płaszczyźnie kratownicy

dla kształtowników zamkniętych:  $L_{cr}=0,9 \cdot L_w$

gdzie :  $L_w$  - odległość między węzłami (teoretyczna)

$$L_{cr,y}=0,9L_w=0,9 \cdot 1,94=1,746 \text{ m}$$

-wartość odniesienia do wyznaczenia smukłości względnej

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{\varepsilon}{f_y}} = 93,9\varepsilon = 93,9 \cdot 0,81 = 76,06$$

-smukłość względna

$$\bar{\lambda}_y = \frac{L_{cr,y}}{i_y} \cdot \frac{1}{\lambda_1} = \frac{1746}{31} \cdot \frac{1}{76,06} = 0,74$$

-parametr imperfekcji

krzywa wyboczeniowa „a”  $\rightarrow \alpha=0,21$

-parametr krzywej niestateczności

$$\phi=0,5[1+\alpha_y(\lambda_y - 0,2) + \lambda_y^2]=0,5[1+0,21 \cdot (0,74-0,20)+0,74^2] = 0,83$$

-współczynnik wyboczeniowy

$$\chi_y = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda^2}} = \frac{1}{0,83 + \sqrt{0,83^2 - 0,74^2}} = 0,83$$

-nośność elementu

$$N_{b,Rd} = \chi \cdot \frac{Af_y}{\gamma_{M0}} = 0,83 \cdot \frac{1200 \cdot 355}{1,0} = 353,58 \cdot 10^3 \text{ N} = 353,58 \text{ kN}$$

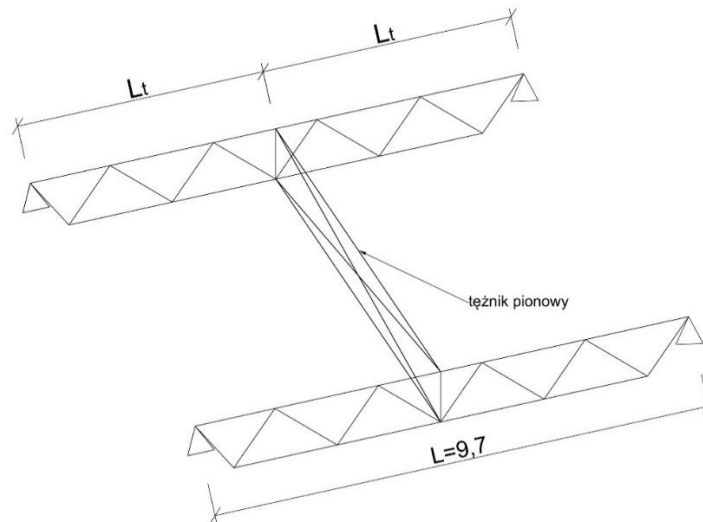
-sprawdzenie warunku nośności

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} = \frac{8,55}{353,58} = 0,024 < 1,0$$

Warunek nośności spełniony.

- Nośność na wyboczenie z płaszczyzny kratownicy

-długość wyboczeniowa



Rys. 6.11. Długość wyboczeniowa pasa dolnego płatwi z płaszczyzny kratownicy

$$L_{cr,z} = \frac{L}{2} = L_t = 4,85 \text{ (rozstaw tężników pionowych (montażowych) płatwi)}$$

-wartość odniesienia do wyznaczenia smukłości względnej

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{\varepsilon}{f_y}} = 93,9\varepsilon = 93,9 \cdot 0,81 = 76,06$$

-smukłość względna

$$\bar{\lambda}_z = \frac{L_{cr,z}}{i_z} \cdot \frac{1}{\lambda_1} = \frac{4850}{31} \cdot \frac{1}{76,06} = 2,06$$

-parametr imperfekcji

krzywa wyboczeniowa „a” →  $\alpha=0,21$

-parametr krzywej niestateczności

$$\phi = 0,5[1 + \alpha_y(\lambda_z - 0,2) + \lambda_z^2] = 0,5[1 + 0,21 \cdot (2,06 - 0,20) + 2,06^2] = 2,82$$

-współczynnik wyboczeniowy

$$\chi_z = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda_z^2}} = \frac{1}{2,82 + \sqrt{2,82^2 - 2,06^2}} = 0,211$$

-nośność elementu

$$N_{b,Rd} = \chi \cdot \frac{Af_y}{\gamma_{M0}} = 0,211 \cdot \frac{1200 \cdot 355}{1,0} = 89,89 \cdot 10^3 \text{ N} = 89,89 \text{ kN}$$

-sprawdzenie warunku nośności

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} = \frac{8,55}{89,89} = 0,1 < 1,0$$

Warunek nośności spełniony.



➤ **Skratowanie**

◦ **Sily wewnętrzne**

max siła ściskająca:  $N_{c,Ed} = 140,87$

max siła rozciągająca:  $N_{t,Ed} = 4,01$

◦ **Charakterystyki geometryczne przekroju**

Przyjęto kształtownik RK 60x60x4

$h = b = 60 \text{ mm}$

$t = 4 \text{ mm}$

$A = 879 \text{ mm}^2$

$I_y = I_z = 45,40 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$

$W_{pl,y} = W_{pl,z} = 17,64 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$

$i_y = i_z = 23 \text{ mm}$

◦ **Parametry mechaniczne stali**

$t_{\max} = t_f = 4 \text{ mm} < 40 \text{ mm} \rightarrow f_y = 355 \text{ MPa}$

$f_u = 510 \text{ MPa}$

◦ **Określenie klasy przekroju**

-współczynnik  $\varepsilon$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{355}} = 0,81$$

-smukłość ścianki rury

$$\frac{c}{t} = \frac{h-3t}{t} = \frac{60-3 \cdot 4}{4} = 12,0 < 33\varepsilon = 33 \cdot 0,81 = 26,73 \rightarrow \text{klasa 1}$$

Kształtownik spełnia wymagania klasy 1.

◦ **Sprawdzenie nośności przekroju na ściskanie**

-obliczenie nośności przekroju

$$N_{c,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{879 \cdot 355}{1,0} = 312,05 \cdot 10^3 \text{ N} = 312,05 \text{ kN}$$

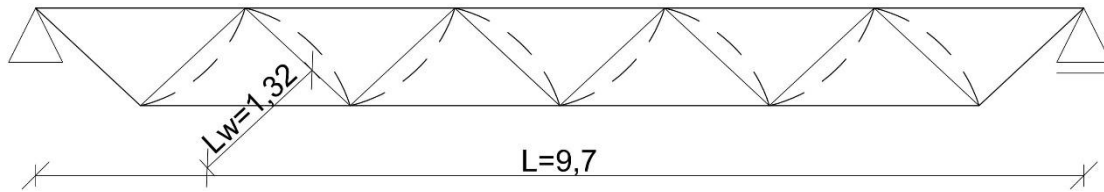
-sprawdzenie warunku nośności

$$\frac{N_{c,Ed}}{N_{c,Rd}} = \frac{140,87}{312,05} = 0,45 < 1,0$$

Warunek nośności spełniony.

- **Nośność elementu z uwzględnieniem stateczności**
  - **Nośność na wyboczenie w płaszczyźnie kratownicy**

-długość wyboczeniowa



Rys. 6.12. Długość wyboczeniowa krzyżulca z płaszczyźnie kratownicy

dla kształtowników zamkniętych:  $L_{cr}=0,9 \cdot L_w$

gdzie :  $L_w$  - odległość między węzłami (teoretyczna)

$$L_{cr,y}=0,9 \cdot L_w=0,9 \cdot 1,32=1,19 \text{ m}$$

-wartość odniesienia do wyznaczenia smukłości względnej

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{\varepsilon}{f_y}} = 93,9\varepsilon = 93,9 \cdot 0,81 = 76,06$$

-smukłość względna

$$\bar{\lambda}_y = \frac{L_{cr,y}}{i_y} \cdot \frac{1}{\lambda_1} = \frac{1190}{23} \cdot \frac{1}{76,06} = 0,68$$

-parametr imperfekcji

krzywa wyboczeniowa „a”  $\rightarrow \alpha=0,21$

-parametr krzywej niestateczności

$$\phi=0,5[1+\alpha_y(\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2]=0,5[1+0,21 \cdot (0,68-0,20)+0,68^2] =0,78$$

-współczynnik wyboczeniowy

$$\chi_y = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = \frac{1}{0,78 + \sqrt{0,78^2 - 0,68^2}} = 0,86$$

-nośność elementu

$$N_{b,Rd} = \chi_y \cdot \frac{Af_y}{\gamma_{M0}} = 0,86 \cdot \frac{879 \cdot 355}{1,0} = 268,36 \cdot 10^3 \text{ N} = 268,36 \text{ kN}$$

-sprawdzenie warunku nośności

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} = \frac{140,87}{268,36} = 0,52 < 1,0$$

Warunek nośności spełniony.

- **Nośność na wyboczenie z płaszczyzny kratownicy**

-długość wyboczeniowa

dla kształtowników zamkniętych:  $L_{cr,z}=L_w$

gdzie :  $L_w$  - odległość między węzłami (teoretyczna)

$$L_{cr,z}=1,32 \text{ m}$$

-wartość odniesienia do wyznaczenia smukłości względnej

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{\varepsilon}{f_y}} = 93,9\varepsilon = 93,9 \cdot 0,81 = 76,06$$

-smukłość względna

$$\bar{\lambda}_z = \frac{L_{cr,z}}{i_z} \cdot \frac{1}{\lambda_1} = \frac{1320}{23} \cdot \frac{1}{76,06} = 0,75$$

-parametr imperfekcji

krzywa wyboczeniowa „a”  $\rightarrow \alpha=0,21$

-parametr krzywej niestateczności

$$\phi=0,5[1+\alpha_z(\lambda_z - 0,2) + \lambda_y^2]=0,5\cdot[1+0,21\cdot(0,75-0,20)+0,75^2] = 0,84$$

-współczynnik wyboczeniowy

$$\chi_z = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda^2}} = \frac{1}{0,84 + \sqrt{0,84^2 - 0,75^2}} = 0,82$$

-nośność elementu

$$N_{b,Rd} = \chi_z \cdot \frac{Af_y}{\gamma_{M0}} = 0,82 \cdot \frac{879 \cdot 355}{1,0} = 255,88 \cdot 10^3 \text{ N} = 255,88 \text{ kN}$$

-sprawdzenie warunku nośności

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} = \frac{140,87}{255,88} = 0,55 \leq 1,0$$

Warunek nośności spełniony.

◦ **Sprawdzenie nośności przekroju na rozciąganie**

-obliczenie nośności przekroju

$$N_{t,Rd} = \frac{Af_y}{\gamma_{M0}} = \frac{879 \cdot 355}{1,0} = 312,05 \cdot 10^3 \text{ N} = 312,05 \text{ kN}$$

-sprawdzenie warunku nośności

$$\frac{N_{t,Ed}}{N_{t,Rd}} = \frac{4,01}{312,05} = 0,013 < 1,0$$

Warunek nośności spełniony.

➤ **Weryfikacja przekrojów w programie ARSA**

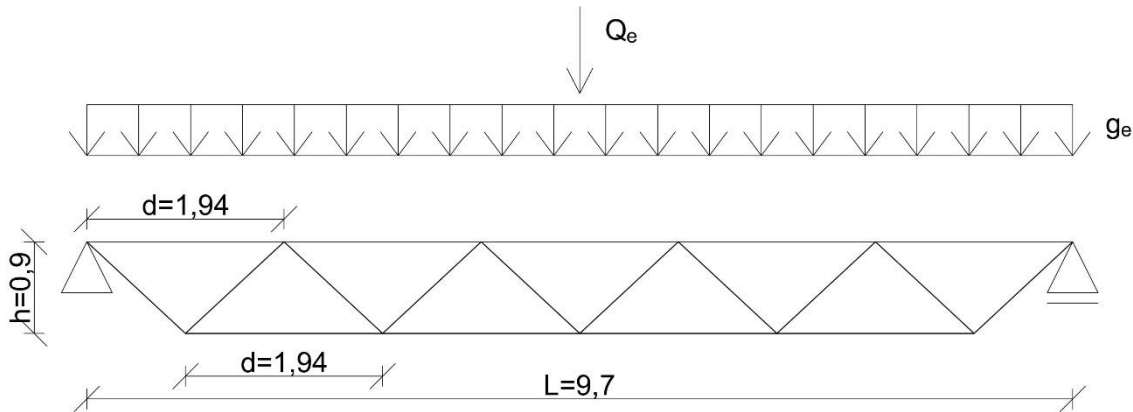
W celu weryfikacji obliczeń ręcznych przeprowadzono analizę kratownicy w programie ARSA. Dla elementów kratownicy wprowadzono odpowiednie długości wyboczeniowe zgodnie z założonymi w obliczeniach ręcznych. Rezultaty obliczeń w oprogramowaniu przedstawiono na Rys. 6.13.

Pręt	Profil	Materiał	Lay	Laz	Wyteż.	Przypadek
<b>Grupa : 1 Pas górny</b>						
1 Pręt_1	RK 100x100x5	S 355	50.23	4.66	0.85	1 K1
<b>Grupa : 2 Krzyżulce</b>						
11 Krzyżulce_11	RK 60x60x4	S 355	52.27	58.08	0.62	1 K1
<b>Grupa : 3 Pas dolny</b>						
14 Pas dolny _14	RK 80x80x4	S 355	8.69	20.08	0.78	1 K1

Rys. 6.13. Przyjęte przekroje kratownicy w analizie

### 6.6.2. Sytuacja projektowa przejściowa (faza montażu)

- **Schemat statyczny**



Rys. 6.14. Schemat statyczny płatwi-faza montażu

- **Zestawienie obciążeń**

- **Odziaływanie stałe:**

-ciężar blachy fałdowej (z pozycji 6.3.1):  $0,139 \cdot d = 0,139 \cdot 6,089 = 0,846 \text{ kN/m}$

-ciężar własny płatwi

wraz z stężeniami dachowymi (z pozycji 6.3.1):  $0,3 \text{ kN/m}$

$$g_e = 1,146 \text{ kN/m}$$

- **Obciążenia zmienne:**

-obciążenie montażowe (osoba pracująca na dachu)  $Q_e = 1,0 \text{ kN}$

- **Obliczenia statyczne**

Siły wewnętrzne

$$M_{e,Ed} = \frac{\gamma_G \cdot g_e \cdot L^2}{8} + \frac{\gamma_Q \cdot Q_e \cdot L}{4} = \frac{1,35 \cdot 1,146 \cdot 9,7^2}{8} + \frac{1,5 \cdot 1,0 \cdot 9,7}{4} =$$

$$= 18,20 + 3,64 = 21,84 \text{ kNm}$$

$$F_{g,e} = \frac{M_{e,Ed}}{h} = \frac{21,84}{0,9} = 24,27 \text{ kN}$$

W sytuacji przejściowej wyteżenie prętów płatwi jest mniejsze niż w sytuacji trwałej, lecz zmieniają się warunki podparcia pasa górnego (brak stężenia blachą fałdową). Sprawdzenia wymaga jedynie pas górny na wyoboczenie z płaszczyzny kratownicy.

- **Sprawdzenie pasa górnego**

- Siły wewnętrzne

-max siła ściskająca:  $N_{c,Ed} = F_{g,e} = 24,27 \text{ kN}$

- **Nośność na wyboczenie z płaszczyzny kratownicy**

-długość wyboczeniowa

$$L_{cr,z} = L_t = \frac{L}{2} = \frac{9,7}{2} = 4,85$$

-wartość odniesienia do wyznaczenia smukłości względnej

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{\varepsilon}{f_y}} = 93,9\varepsilon = 93,9 \cdot 0,81 = 76,06$$

-smukłość względna

$$\bar{\lambda}_z = \frac{L_{cr,z}}{i_z} \cdot \frac{1}{\lambda_1} = \frac{4850}{36} \cdot \frac{1}{76,06} = 1,77$$

-parametr imperfekcji

krzywa wyboczeniowa „a”  $\rightarrow \alpha=0,21$

-parametr krzywej niestateczności

$$\phi = 0,5[1 + \alpha_y(\lambda_z - 0,2) + \lambda_y^2] = 0,5[1 + 0,21 \cdot (1,77 - 0,20) + 1,77^2] = 2,23$$

-współczynnik wyboczeniowy

$$\chi_z = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = \frac{1}{2,23 + \sqrt{2,23^2 - 1,77^2}} = 0,27$$

-nośność elementu

$$N_{b,Rd} = \chi_z \cdot \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} = 0,27 \cdot \frac{1870 \cdot 355}{1,0} = 179,24 \cdot 10^3 \text{ N} = 179,24 \text{ kN}$$

-sprawdzenie warunku nośności

$$\frac{N_{c,Ed}}{N_{b,Rd}} = \frac{24,27}{179,24} = 0,14 < 1,0$$

Warunek nośności spełniony.

## 6.7. Stan graniczny użyteczności

- zastępczy moment bezwładności

$$I = k \cdot \frac{A_g \cdot A_d}{(A_g + A_d)} \cdot h^2 = 0,9 \cdot \frac{1870 \cdot 1200}{(1870 + 1200)} \cdot 900^2 = 532,86 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

- ugięcie płaty

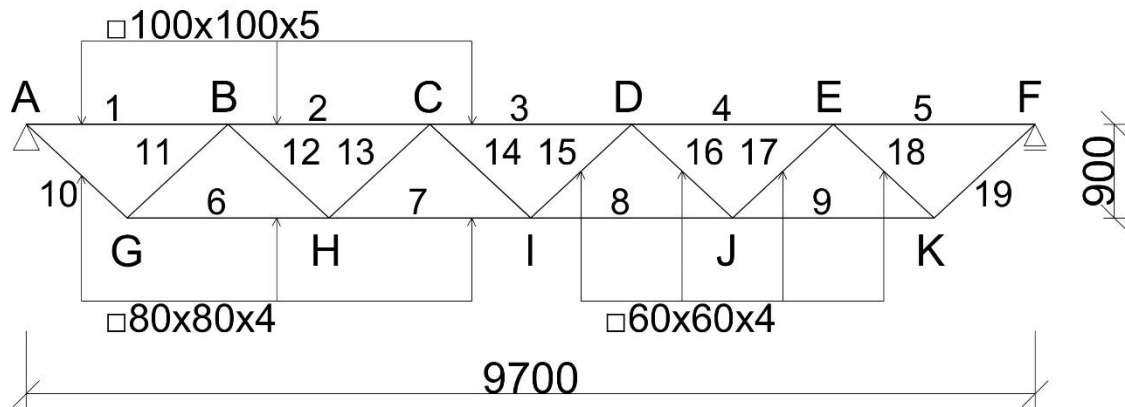
$$p_{z,k} = g_z + s_z = 5,287 + 11,658 = 16,945 \text{ kN/m}$$

$$w_{max} = w_z = \frac{5}{384} \cdot \frac{p_{z,k} \cdot L^4}{EI} = \frac{5}{384} \cdot \frac{16,945 \cdot 9700^4}{210000 \cdot 532,86 \cdot 10^6} = 17,5 \text{ mm}$$

$$w_{lim} = \frac{L}{200} = \frac{9700}{200} = 48,5 \text{ mm} > w_{max} = 17,5 \text{ mm} \rightarrow \text{Warunek został spełniony.}$$

## 6.8. Sprawdzenie nośności węzłów płatwi

Wszystkie połączenia (poza węzłem podporowym) przyjęto jako połączenia typu K, ukształtowane z odstępem. Na Rys. 6.15 przedstawiono oznaczenie węzłów oraz przyjęte numery prętów. W Tabeli 6.7. przedstawiono charakterystyki prętów kratownicy wraz z występującymi w nich siłami wewnętrznymi.



Rys. 6.15. Oznaczenie węzłów w płatwi kratowej

Tabela 6.7. Charakterystyki prętów oraz zestawienie sił w prętach

Pręt	Długość [mm]	Wymiary przekroju [mm]	Siła podłużna [kN]
1	1940	□100x100x5	-104,19
2	1940	□100x100x5	-252,46
3	1940	□100x100x5	-301,21
6	1940	□80x80x4	206,36
7	1940	□80x80x4	300,44
10	1323	□80x80x4	142,98
11	1323	□60x60x4	-140,87
12	1323	□60x60x4	62,90
13	1323	□60x60x4	-65,24
14	1323	□60x60x4	0,67

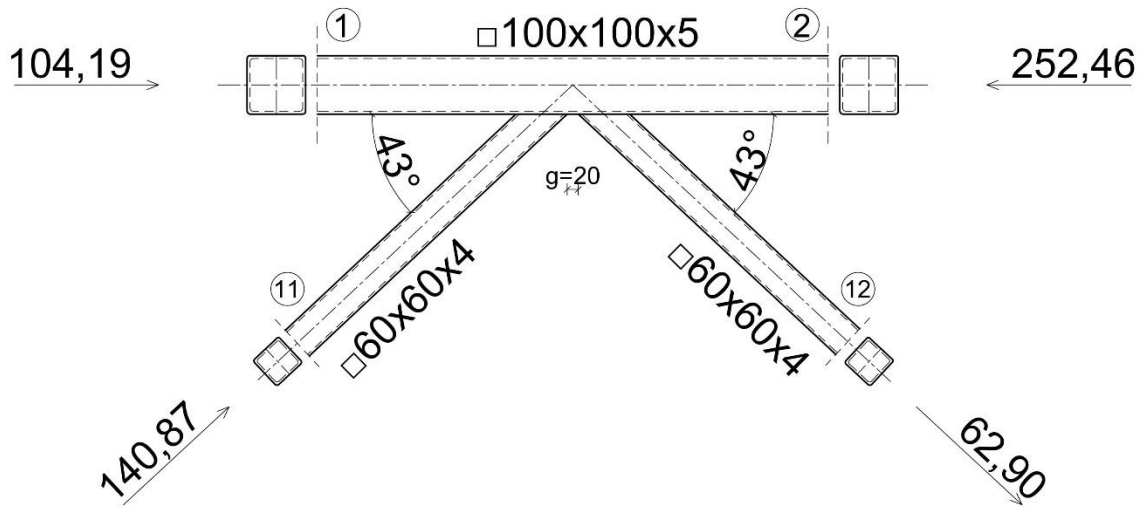
### 6.8.1. Sprawdzenie nośności węzła wewnętrznego B

- dane geometryczne przekrojów kształtowników

pas: RK 100x100x5 :  $A_1 = 1870 \text{ mm}^2$

krzyżulce: RK 60x60x4:  $A_{11} = A_{12} = 879 \text{ mm}^2$

$\theta_1 = \theta_2 = 43^\circ$



Rys. 6.16. Węzeł wewnętrzny płatwi typu K z odstępem

- **Zakres ważności formuł nośności węzłów spawanych (warunki konstrukcyjne)**

Analizę przeprowadzono zgodnie z Tablicą 7.8 i Tablicą 7.9 normy [N6].

$$\frac{b_i}{b_0} \geq 0,35 \rightarrow \frac{b_1}{b_0} = \frac{b_2}{b_0} = \frac{60}{100} = 0,60 \leq 0,8$$

$$\frac{b_i}{b_0} \geq 0,1 + 0,01 \frac{b_1}{t_0} \rightarrow \frac{b_1}{b_0} = \frac{b_2}{b_0} = \frac{60}{100} = 0,60 > 0,1 + 0,01 \frac{100}{5} = 0,30$$

$$\frac{b_i}{t_i} \leq 50 \rightarrow \frac{b_1}{t_1} = \frac{b_2}{t_2} = \frac{60}{4} = 15,0 \leq 50$$

Przekroje prętów klasy 1 < 2

$$0,5 \leq \frac{b_0}{b_0} \leq 2,0 \rightarrow 0,5 \leq \frac{100}{100} = 1,0 \leq 2,0$$

$$0,5 \leq \frac{b_i}{b_i} \leq 2,0 \rightarrow 0,5 \leq \frac{b_1}{b_1} = \frac{b_2}{b_2} = \frac{60}{60} = 1,0 \leq 2,0$$

$$\frac{b_0}{t_0} \leq 50 \rightarrow \frac{100}{5} = 20 \leq 50$$

Przekroje prętów klasy 1 < 2

$$\beta = \frac{b_1 + b_2 + h_1 + h_2}{4b_0} = \frac{60 + 60 + 60 + 60}{4 \cdot 100} = \frac{240}{400} = 0,60$$

$$\frac{g}{b_0} \geq 0,5(1 - \beta) \rightarrow \frac{20}{100} = 0,20 \geq 0,5 \cdot (1 - 0,6) = 0,20$$

$$\frac{g}{b_0} \leq 1,5(1 - \beta) \rightarrow \frac{20}{100} = 0,20 \leq 1,5 \cdot (1 - 0,57) = 0,60$$

$$g \geq t_1 + t_2 \rightarrow 20 \text{ mm} \geq 4,0 + 4,0 = 8,0 \text{ mm}$$

$$0,6 \leq \frac{b_1 + b_2}{2b_i} \leq 1,3 \rightarrow 0,6 \leq \frac{60 + 60}{2 \cdot 60} = 1,0 \leq 1,3$$

$$\frac{b_0}{t_0} \geq 15 \rightarrow \frac{100}{5,0} = 20 \geq 15$$

- **Nośność obliczeniowa węzła płatwi**

- Zniszczenie przystykowe pasa

$$N_{i,Rd} = \frac{8,9\gamma^{0,5}k_n f_{y0} t_0^2 \left(\frac{b_1+b_2}{2b_0}\right)}{\sin \theta_i \gamma_{M5}}$$

$$\gamma = 0,5 \frac{b_0}{t_0} = 0,5 \cdot \frac{100}{5} = 10,0$$

$$\sigma_{0,Ed} = \frac{N_0}{A_0} = \frac{253500}{1870} = 135,56 \text{ N/mm}^2$$

$$n = \frac{\left(\frac{\sigma_{0,Ed}}{f_{y0}}\right)}{\gamma_{M5}} = \frac{\left(\frac{135,56}{355}\right)}{1,0} = 0,38$$

$$k_n = 1,3 - 0,4 \frac{n}{\beta} = 1,3 - 0,4 \cdot \frac{0,38}{0,60} = 1,05 \text{ lecz } k_n \leq 1,0$$

przyjęto  $k_n = 1,0$

- Nośność węzła pod krzyżulcem ściskanym

$$N_{1,Rd} = \frac{8,9\gamma^{0,5}k_n f_{y0} t_0^2 \left(\frac{b_1+b_2}{2b_0}\right)}{\sin \theta_i \gamma_{M5}} = \frac{8,9 \cdot 10,0^{0,5} \cdot 1,0 \cdot 355 \cdot 5,0^2 \left(\frac{60+60}{2 \cdot 100}\right)}{\sin 43 \cdot 1,0}$$

$$N_{1,Rd} = 219,75 \cdot 10^3 \text{ N} = 219,75 \text{ kN}$$

$$\frac{N_1}{N_{1,Rd}} = \frac{140,87}{219,75} = 0,64$$

- Nośność węzła pod krzyżulcem rozciąganym

$$N_{2,Rd} = N_{1,Rd} = 219,75 \text{ kN}$$

$$\frac{N_2}{N_{2,Rd}} = \frac{62,90}{219,75} = 0,29$$

- **Ścięcie pasa**

$$N_{i,Rd} = \frac{f_{y0} A_v}{\sqrt{3} \cdot \sin \theta_i} / \gamma_{M5}$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{4g^2}{3t_0^2}}} = \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{4 \cdot 20^2}{3 \cdot 5^2}}} = 0,21$$

$$A_v = (2b_0 + \alpha b_0)t_0 = (2 \cdot 100 + 0,21 \cdot 100) \cdot 5 = 1105 \text{ mm}^2$$

Nośność węzła pod krzyżulcem ściskanym

$$N_{1,Rd} = \frac{f_{y0} A_v}{\sqrt{3} \cdot \sin \theta_i} / \gamma_{M5} = \frac{355 \cdot 1105}{\sqrt{3} \cdot \sin 43} / 1,0 = 332,08 \cdot 10^3 \text{ N} = 332,08 \text{ kN}$$

$$\frac{N_1}{N_{1,Rd}} = \frac{140,87}{332,08} = 0,42$$

- Nośność węzła pod krzyżulcem rozciąganym

$$N_{2,Rd} = \frac{f_{y0} A_v}{\sqrt{3} \cdot \sin \theta_i} / \gamma_{M5} = \frac{355 \cdot 1105}{\sqrt{3} \cdot \sin 43} / 1,0 = 332,08 \cdot 10^3 \text{ N} = 332,08 \text{ kN}$$



$$\frac{N_2}{N_{2,Rd}} = \frac{62,90}{332,08} = 0,19$$

- nośność pasa w obszarze węzła

$$N_{0,Rd} = \frac{(A_0 - A_v) f_{y0} + A_v f_{y0} \sqrt{1 - \left(\frac{V_{Ed}}{V_{pl,Rd}}\right)^2}}{\gamma_{M5}}$$

$$V_{Ed} = N_{Ed,1} \cdot \sin \theta_i = 140,87 \cdot \sin 43^\circ = 95,30 \text{ kN}$$

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{M0}} = \frac{1105 \frac{355}{\sqrt{3}}}{1,0} = 226,48 \cdot 10^3 \text{ N} = 226,48 \text{ kN}$$

$$N_{0,Rd} = \frac{(1870 - 1105) \cdot 355 + 1105 \cdot 355 \sqrt{1 - \left(\frac{95,30}{226,48}\right)^2}}{1,0} = 627,43 \cdot 10^3 \text{ N} = 627,43 \text{ kN}$$

$$N_{0,Rd} = 627,43 \text{ kN} > 252,84 - 64,64 \cdot \cos 43^\circ = 305,57 \text{ kN}$$

- **Zniszczenie pręta skratowania**

$$N_{i,Rd} = f_{yi} t_i (2b_i - 4t_i + b_i + b_{eff}) / \gamma_{M5}$$

$$b_{eff} = \frac{10}{b_0} \frac{f_{y0} t_0}{f_{yi} t_i} b_i = \frac{10}{b_0} \frac{f_{y0} t_0}{f_{y1} t_1} b_1 = \frac{10}{b_0} \frac{f_{y0} t_0}{f_{y2} t_2} b_2 = \frac{10}{\frac{100}{5}} \cdot \frac{355 \cdot 5}{355 \cdot 4} \cdot 60 = 37,5 < b_i$$

- Krzyżulec ściskany

$$N_{1,Rd} = \frac{f_{yi} t_i (2b_i - 4t_i + b_i + b_{eff})}{\gamma_{M5}} = \frac{355 \cdot 4 \cdot (2 \cdot 60 - 4 \cdot 4 + 60 + 60)}{1,0} = 318,08 \cdot 10^3 \text{ N}$$

$$N_{1,Rd} = 318,08 \text{ kN}$$

$$\frac{N_1}{N_{1,Rd}} = \frac{140,87}{318,08} = 0,44$$

- Krzyżulec rozciągany

$$N_{2,Rd} = N_{1,Rd} = 318,08 \text{ kN}$$

$$\frac{N_2}{N_{2,Rd}} = \frac{62,90}{318,08} = 0,20$$

- **Przebiecie pasa**

$$N_{i,Rd} = \frac{\frac{f_{y0} t_0}{\sqrt{3} \cdot \sin \theta_i} \left( \frac{2b_i}{\sin \theta_i} + b_i + b_{e,p} \right)}{\gamma_{M5}}$$

$$b_{e,p} = \frac{10}{b_0 t_0} b_i = \frac{10}{b_0 t_0} b_i = \frac{10}{b_0 t_0} b_i = \frac{10}{100 \cdot 5} \cdot 60 = 1,2$$

- Krzyżulec ściskany

$$N_{1,Rd} = \frac{\frac{f_{y0} t_0}{\sqrt{3} \cdot \sin \theta_i} \left( \frac{2b_i}{\sin \theta_i} + b_i + b_{e,p} \right)}{\gamma_{M5}} = \frac{355 \cdot 5 \left( \frac{2 \cdot 60}{\sin 43^\circ} + 60 + 1,2 \right)}{1,0} = 356,36 \cdot 10^3 \text{ N}$$

$$\frac{N_1}{N_{1,Rd}} = \frac{140,87}{356,36} = 0,40$$

- Krzyżulec rozciągany

$$N_{2,Rd} = N_{1,Rd} = 356,36 \text{ kN}$$

$$\frac{N_2}{N_{2,Rd}} = \frac{62,90}{356,36} = 0,18$$

- **Nośność spoin**

Sprawdzenie nośności spoin można wykonać w sposób uproszczony, przyjmując, że nośność spoin jest nie mniejsza niż nośność łączonych elementów.

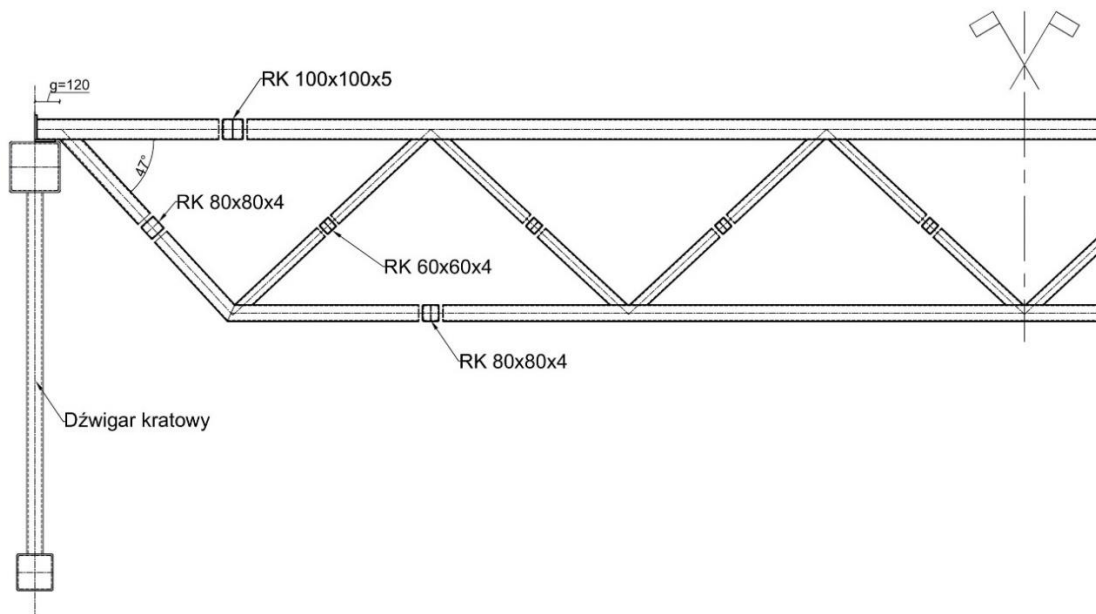
$$\Sigma a \geq \sqrt{2} \cdot \beta_w \frac{f_y}{\gamma_{M2}} \cdot t_1 = \sqrt{2} \cdot 0,8 \cdot \frac{355}{\frac{1,0}{490}} \cdot 4 = 3,28 \text{ mm}$$

Przyjęto spoiny grubości  $a=5,0 \text{ mm}$

Z uwagi na wartość kąta rozwartego równego  $\alpha = 180^\circ - 43^\circ = 137^\circ > 120^\circ$  w połączeniu pasa z krzyżulcem płatwi zdecydowano się na zastosowanie w kącie rozwartym spoiny czołowej z pełnym przetopem.

### 6.8.2. Sprawdzenie nośności węzła podporowego A

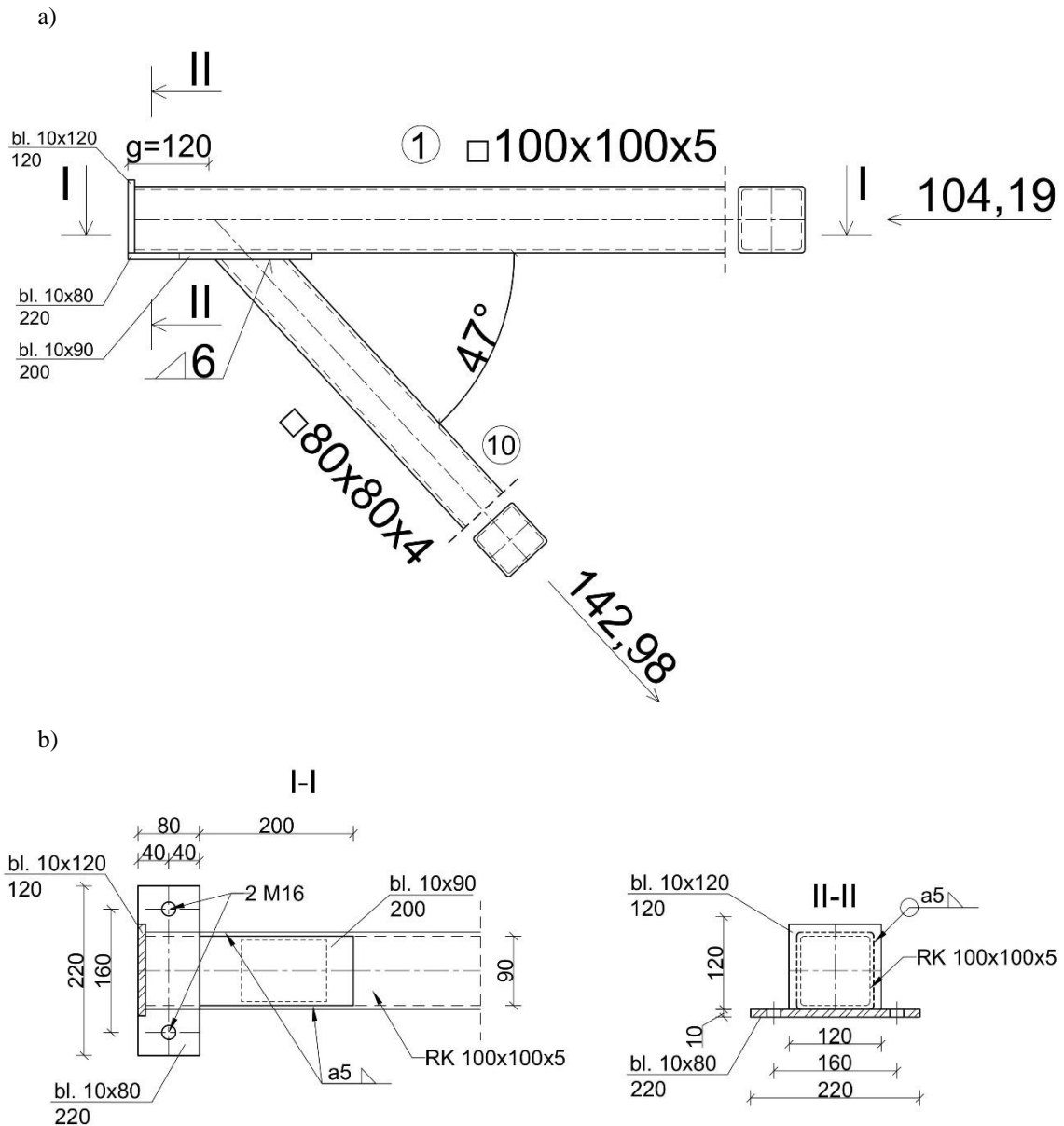
Przyjęto geometrie połączenia zgodnie z Rys. 6.17.



Rys. 6.17. Oparcie płatwi na dźwigarze kratowym

Do połączenia płatwi z pasem górnym przyjęto konstrukcyjnie po dwie śruby. Przyjęto, że blachy będą połączone spoiną 5mm.

W obliczeniach węzła pominięto siłę ściskającą, wynikającą z udziału płatwi w stężeniu dźwigara kratowego.



Rys. 6.18. Węzeł podporowy płatwi: a) widok podparcia, b) szczegóły I-I i II-II

pas: RK 100x100x5 :  $A_1 = 1870 \text{ mm}^2$

krzyżulec: RK 80x80x4:  $A_{10} = 1200 \text{ mm}^2$

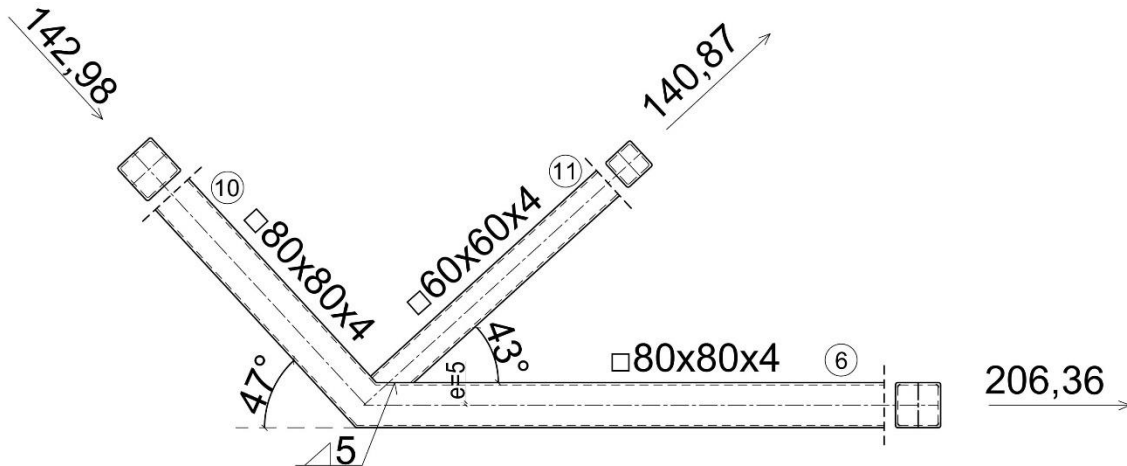
$\theta_1 = 47^\circ$

Obliczenie węzła łączącego pas górny z krzyżulcem wykonano przy użyciu funkcji „Wymiarowanie stali → Połączenia” w programie ARSA. Notka obliczeniowa tego połączenia znajduje się w Załączniku 1.

### 6.8.3. Sprawdzenie nośności pozostałych węzłów

- Węzeł G

Przyjęto, że węzeł H jest połączeniem typu K, w którym dwa pręty skratowania (ściskany i rozciągany) są połączone z jednym elementem pasa. Pręty przecinają się w węźle w sposób mimośrodkowy ( $e_0 = 5 \text{ mm}$ ).



Rys. 6.19. Węzeł wewnętrzny płatwi typu K

pas: RK 80x80x4 :  $A_6 = 1200 \text{ mm}^2$

krzyżulec: RK 60x60x4:  $A_{11} = 879 \text{ mm}^2$

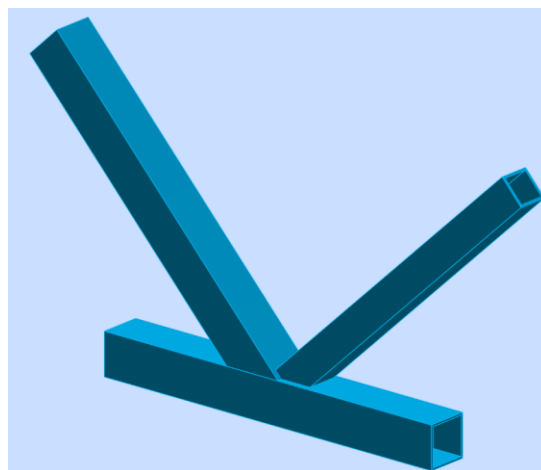
RK 80x80x4:  $A_{10} = 1200 \text{ mm}^2$

$\theta_1 = 47^\circ$

$\theta_2 = 43^\circ$

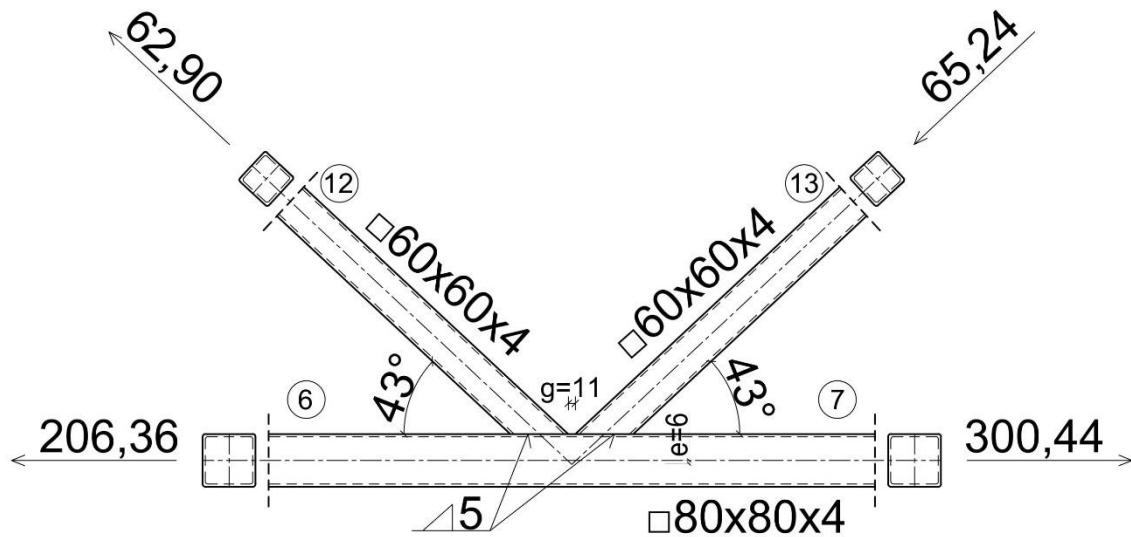
$e_0 = 5 \text{ mm}$

Obliczenie węzła wykonano przy użyciu funkcji „Wymiarowanie stali → Połączenia” w programie ARSA. Notka obliczeniowa tego połączenia znajduje się w Załączniku 1.



Rys. 6.20. Widok węzła w programie ARSA

- Węzeł H



Rys. 6.21. Węzeł wewnętrzny płatwi typu K

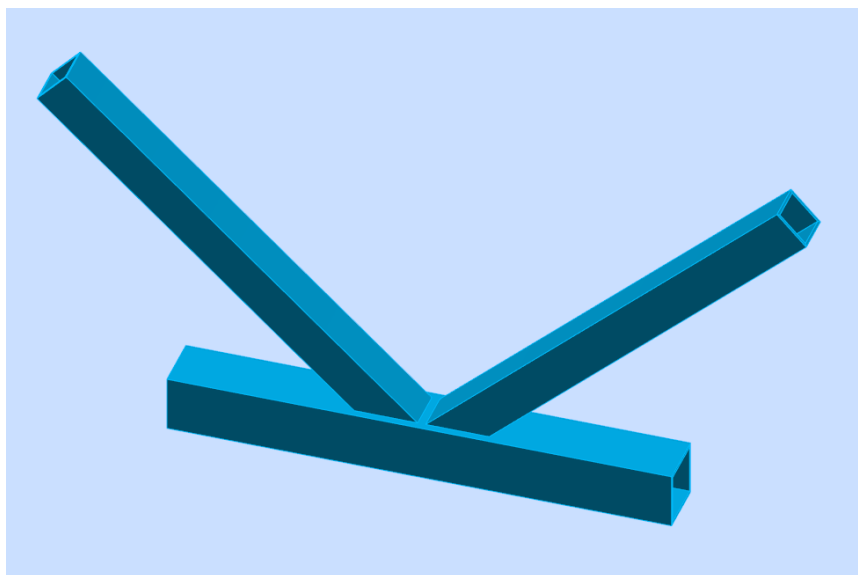
pas: RK 80x80x4 :  $A_6 = A_7 = 1200 \text{ mm}^2$

krzyżulce: RK 60x60x4:  $A_{12} = A_{13} = 879 \text{ mm}^2$

$\theta_1 = \theta_2 = 43^\circ$

$e_0 = 6 \text{ mm}$

Obliczenie węzła wykonano przy użyciu funkcji „Wymiarowanie stali → Połączenia” w programie ARSA. Notka obliczeniowa tego połączenia znajduje się w Załączniku 1.



Rys. 6.22. Widok węzła w programie ARSA



## 7. Poz. 3. Wiązar dachowy

### 7.1. Kształtowanie geometrii dźwigara

W obiekcie przyjęto łukowy dźwigar kratowy. Wysokość konstrukcyjną dla łuków płaskich ustala się najczęściej o wartości [4]:

$$h = \left(\frac{1}{50} \div \frac{1}{80}\right)L,$$

gdzie L-rozpiętość dźwigara.

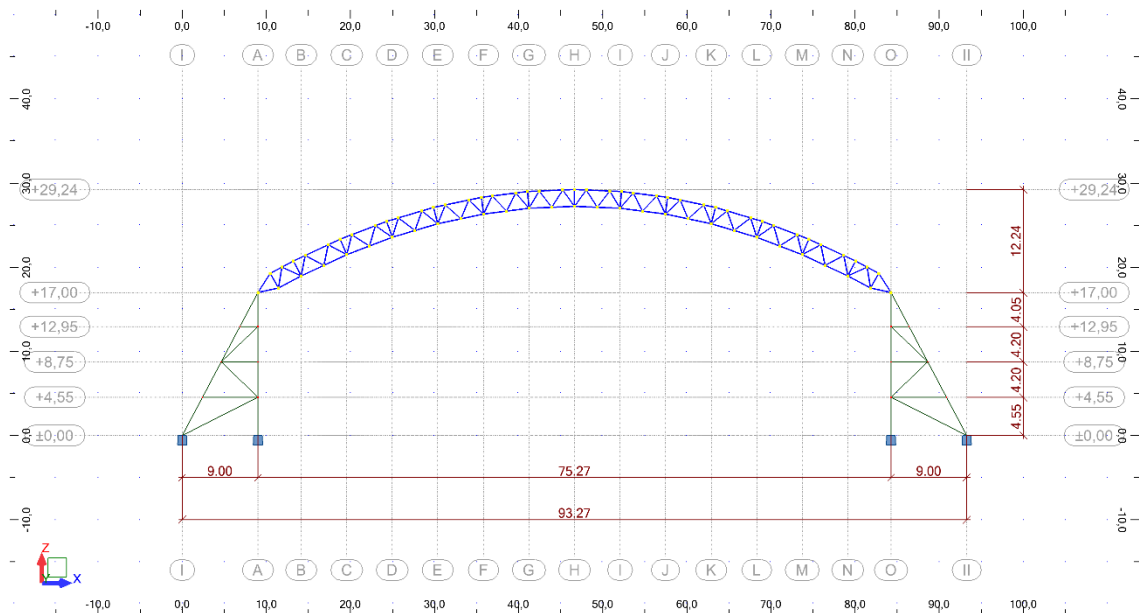
Dla ustalonej rozpiętości kratownicy wynoszącej  $L=75,27$  m wyznaczono przedział zalecanych wysokości dźwigara zgodnie z wzorem:

$$h = \left(\frac{1}{50} \div \frac{1}{80}\right)L = \left(\frac{1}{50} \div \frac{1}{80}\right) \cdot 75,27 = 1,51 \div 0,94 \text{ m.}$$

Postanowiono przyjąć przekrój o wysokości  $h = 2,0$  m.

### 7.2. Schemat statyczny

Schematem statycznym głównego układu poprzecznego hali jest rama - wiązar łukowy oparty przegubowo na konstrukcji wsporczej wg Rys. 7.1.

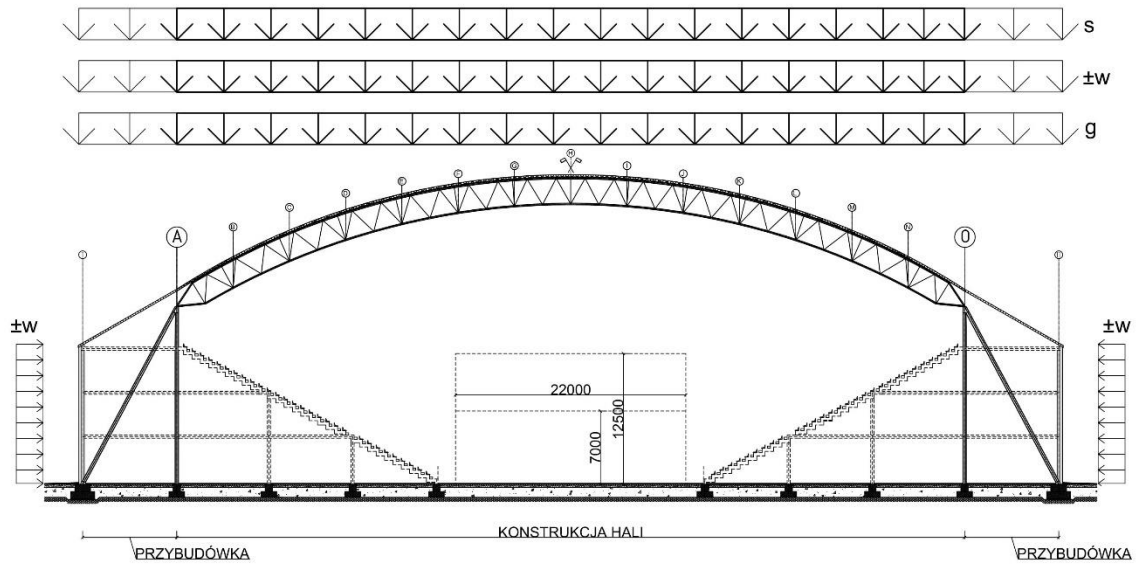


Rys. 7.1. Schemat statyczny głównego układu poprzecznego hali

### 7.3. Zestawienie obciążeń

Zestawienie obciążenia przeprowadzono dla układu w osi 2 i zebrano obciążenie z pasma o szerokości  $l = 9,7$  m. Przyjęto, że konstrukcja zostanie zaprojektowana na obciążenie stałe oraz przypadające obciążenie śniegiem i wiatrem zebrane z dachu.

Obciążenie wiatru z ścian podłużnych zostanie przeniesione przez ściany niezależne od głównej konstrukcji.

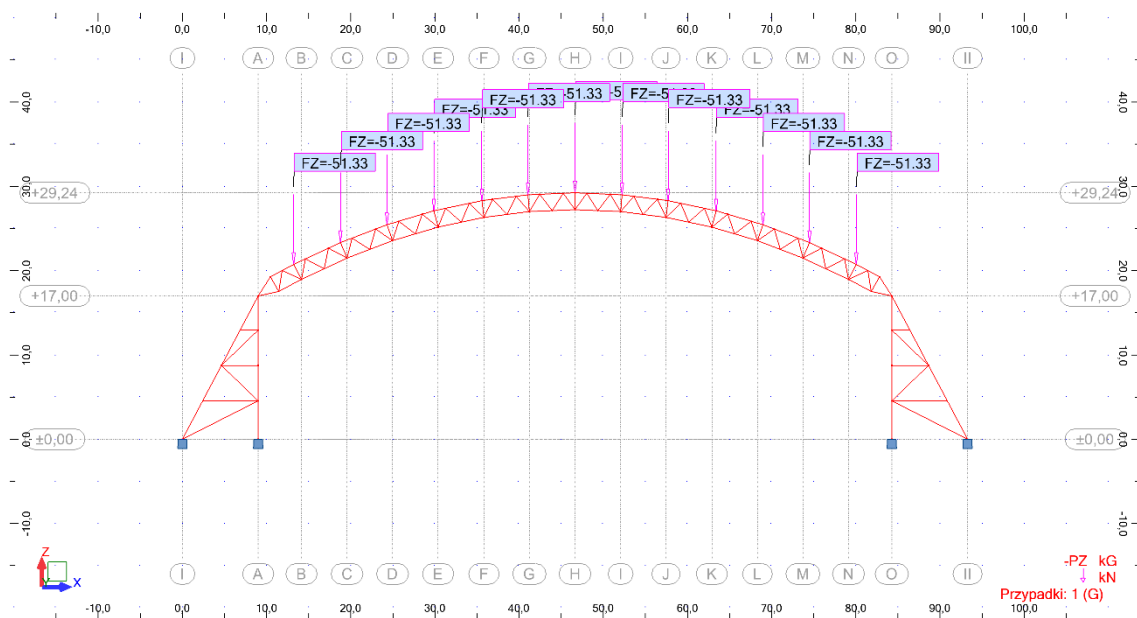


Rys. 7.2. Przyjęte przypadające obciążenia na konstrukcje hali

### 7.3.1. Oddziaływania stałe

-Obciążenie przekazywane z płatwi (6.3.1)  $5,287 \cdot 1 = 5,287 \cdot 9,7 = 51,33 \text{ kN}$

-Ciężar własny wiązara oraz słupów uwzględniono w programie komputerowym



Rys. 7.3. Obciążenia stałe – G

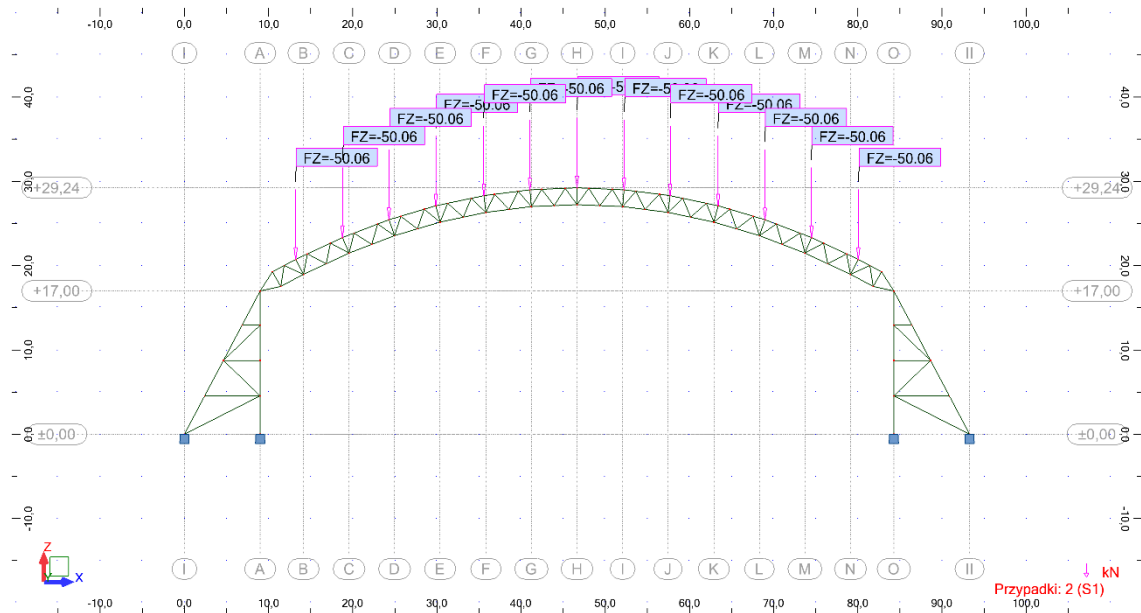


### 7.3.2. Oddziaływania zmienne

- **Równomierne obciążenie śniegiem dachu**

$$S_1 = s \cdot l$$

$$S_1 = 5,16 \cdot l = 5,16 \cdot 9,7 = 50,06 \text{ kN}$$



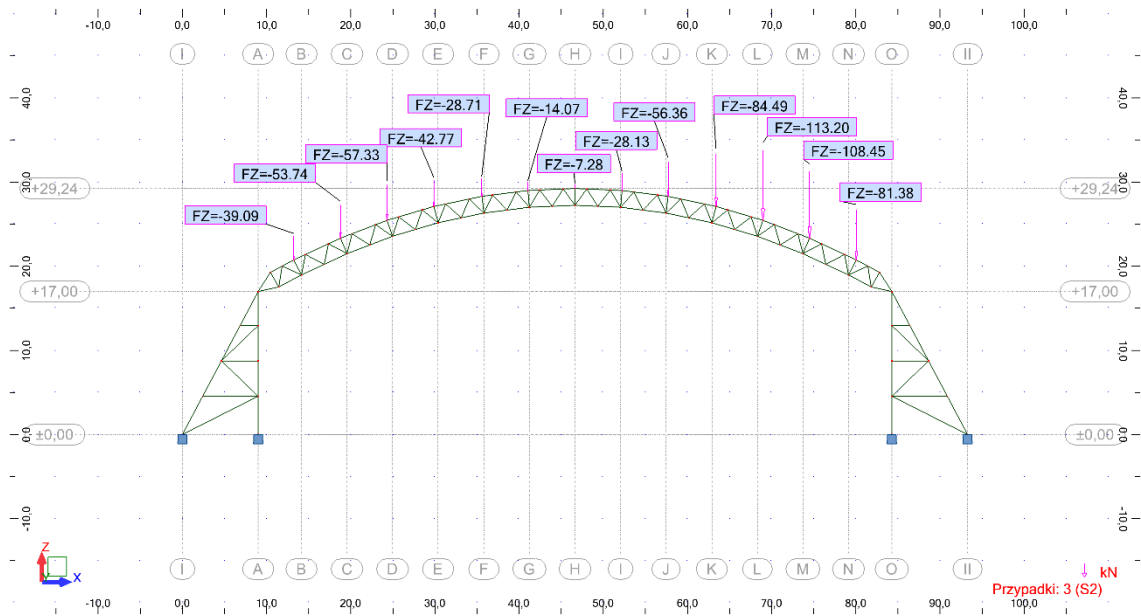
Rys. 7.4. Równomierne obciążenie śniegiem – S1

- **Nierównomierne obciążenie śniegiem dachu**

Tabela 7.1. Zestawienie obciążeń śniegiem przypadające na dźwigar z płatwi z uwagi na jej położenie

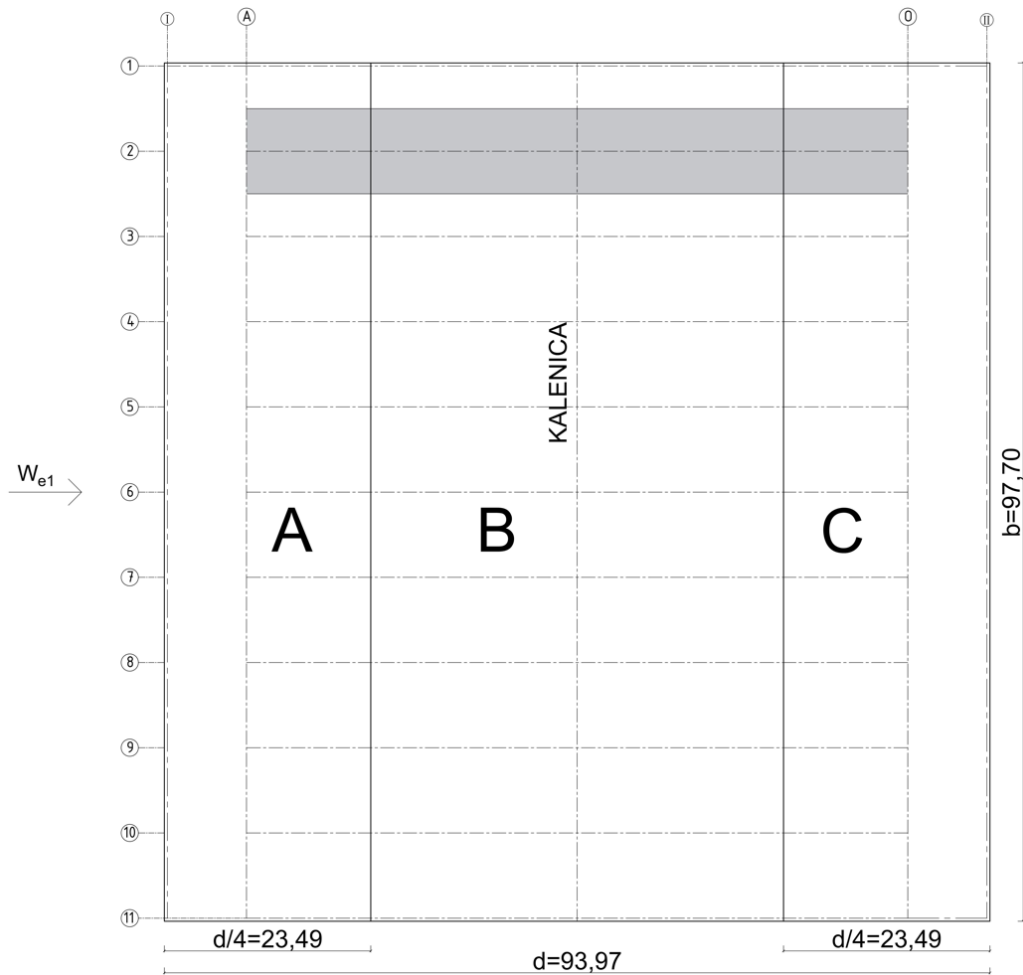
Położenie płatwi (oś)	s [kN/m]	l [m]	S <sub>2</sub> [kN]
B	4,03	9,7	39,09
C	5,54		53,74
D	5,91		57,33
E	4,41		42,77
F	2,96		28,71
G	1,45		14,07
H	0,75		7,28
I	2,90		28,13
J	5,81		56,36
K	8,71		84,49
L	11,67		113,20
M	11,18		108,45
N	8,39	81,38	

$$S_2 = s \cdot l$$



Rys. 7.5. Nierównomierne obciążenie śniegiem – S2

- **Oddziaływania wiatru na powierzchnie zewnętrzne**
  - gdy wiatr wieje prostopadle do ściany podłużnej

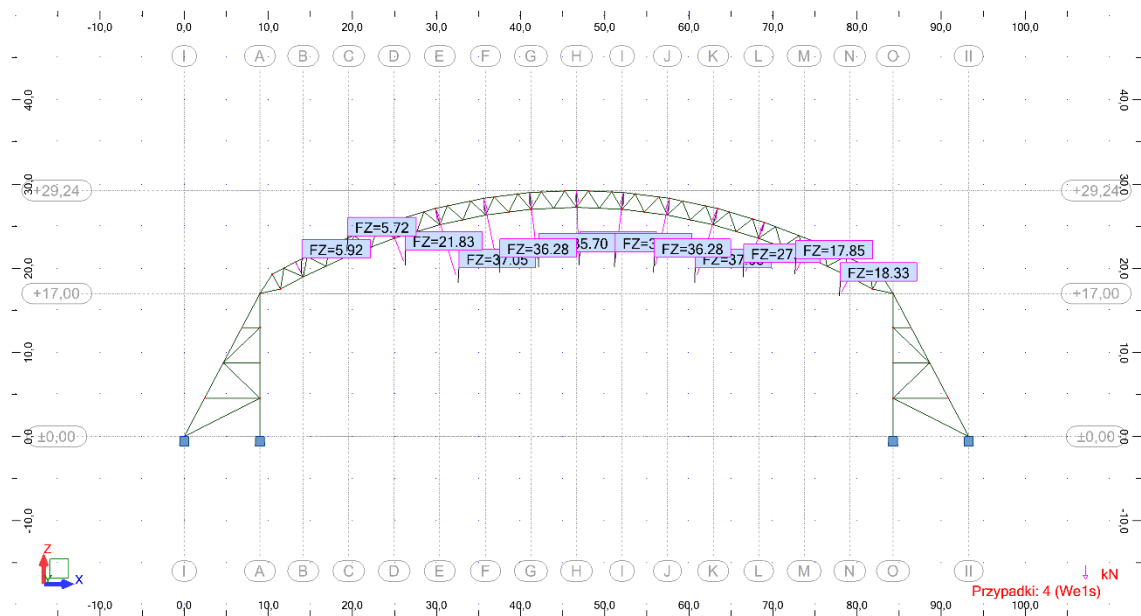


Rys. 7.6. Oddziaływanie wiatru prostopadle do ściany podłużnej

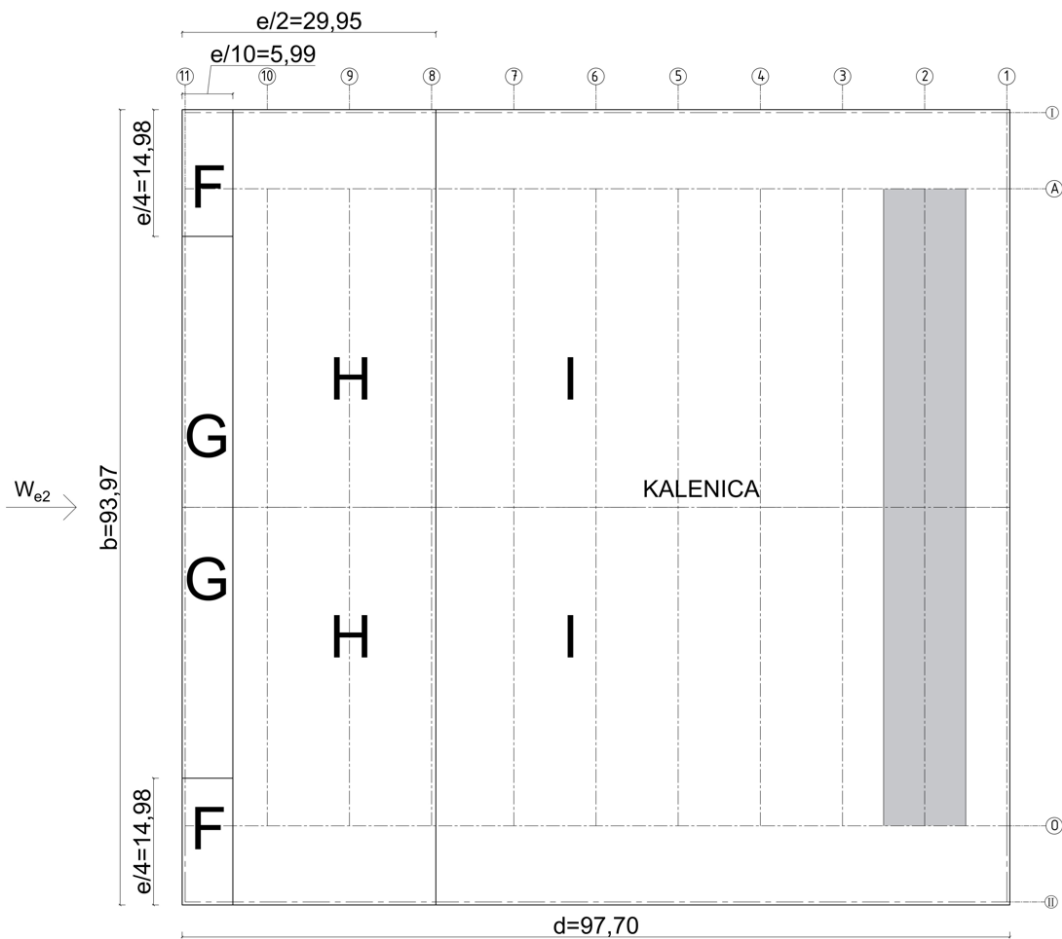
Tabela 7.2. Zestawienie obciążeń wiatrem przypadające na dźwigar z płatwi z uwagi na jej położenie

Położenie płatwi (oś)	$w_s$ [kN/m]	$l$ [m]	$W_{e1s}$ [kN]
B	-0,61	9,7	-5,92
C	-0,59		-5,72
D	-2,25		-21,83
E	-3,82		-37,05
F	-3,74		-36,28
G	-3,68		-35,70
H	-3,66		-35,50
I	-3,68		-35,70
J	-3,74		-36,28
K	-3,82		-37,05
L	-2,88		-27,94
M	-1,84		-17,85
N	-1,89		-18,33

$$W_{e1s} = w_s \cdot l$$

Rys. 7.7. Odziaływanie wiatru na powierzchnie zewnętrzne gdy wiatr wieje prostopadle do ściany podłużnej –  $W_{e1s}$

- gdy wiatr wieje prostopadle do ściany szczytowej

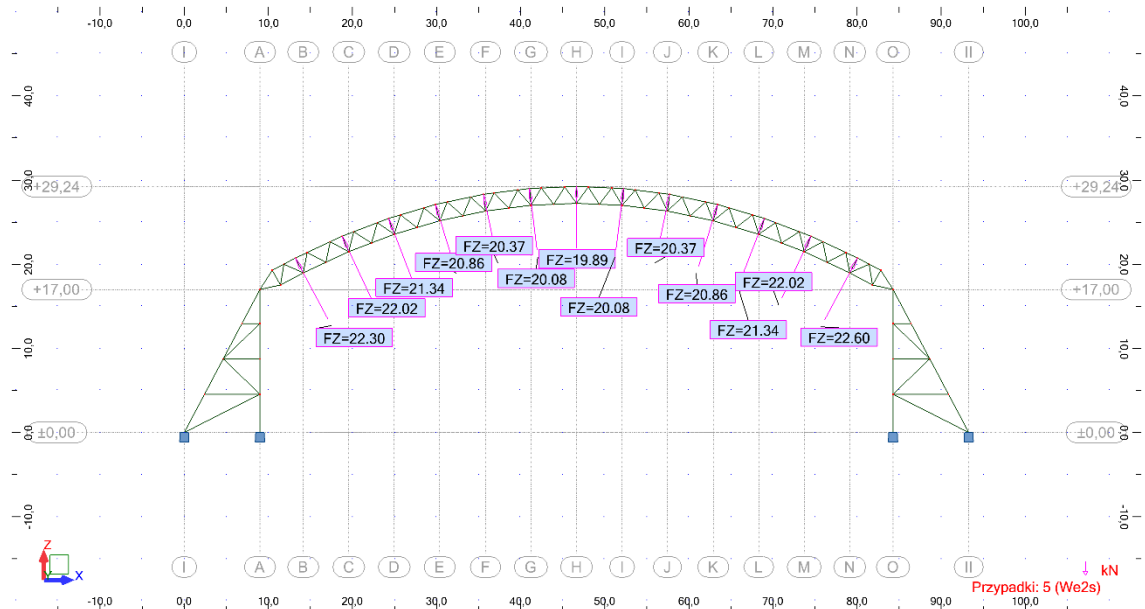


Rys. 7.8. Odziaływanie wiatru prostopadle do ściany szczytowej

Tabela 7.3. Zestawienie obciążeń wiatrem przypadające na płatwę z uwagi na jej położenie

Położenie płatwi (oś)	$w_s$ [kN/m]	$l$ [m]	$W_{e2s}$ [kN]
B	-2,33	9,7	-22,60
C	-2,27		-22,02
D	-2,20		-21,34
E	-2,15		-20,86
F	-2,10		-20,37
G	-2,07		-20,08
H	-2,05		-19,89
I	-2,07		-20,08
J	-2,10		-20,37
K	-2,15		-20,86
L	-2,20		-21,34
M	-2,27		-22,02
N	-2,33		-22,60

$$W_{e2s} = w_s \cdot l$$

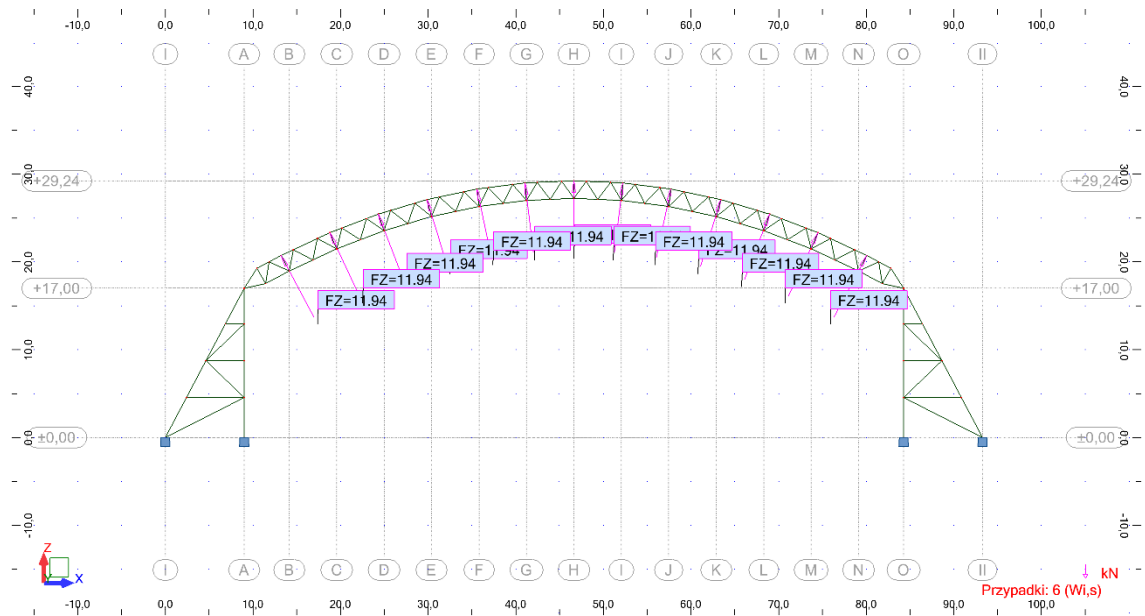


Rys. 7.9. Odziaływanie wiatru na powierzchnie zewnętrzne gdy wiatr wieje prostopadle do ściany szczytowej -  $W_{e2s}$

◦ Odziaływanie wiatru na powierzchnie wewnętrzne

▪ Dach (ssanie):

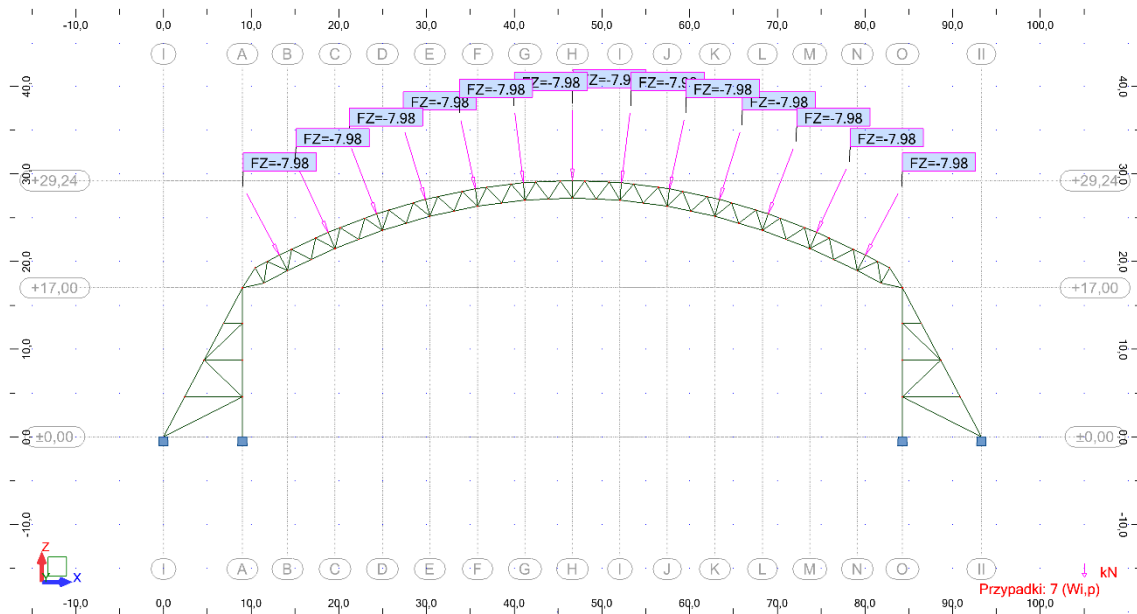
$$W_{i,s} = w_{i,s} \cdot l \cdot d = -0,229 \cdot 9,7 \cdot 5,376 = -11,94 \text{ kN}$$



Rys. 7.10. Odziaływanie wiatru na powierzchnie zewnętrzne  $W_{i,s}$  - ssanie

▪ Dach (parcie):

$$W_{i,p} = w_{i,p} \cdot l \cdot d = +0,153 \cdot 9,7 \cdot 5,376 = +7,98 \text{ kN}$$



Rys. 7.11. Oddziaływanie wiatru na powierzchnie zewnętrzne  $W_{i,p}$  - parcie

## 7.4. Obliczenia statyczne. Kombinacje oddziaływań

### 7.4.1. Stan graniczny nośności

Przyjęto kombinacje oddziaływań mniej korzystne spośród podanych poniżej:

-obciążenia stałe są niekorzystne (kombinacje oddziaływań dociążających)

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j,sup} \cdot G_{k,j} + \gamma_{Q,1} \cdot \psi_{0,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,1} \cdot Q_{k,i}; i$$

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

-obciążenia stałe są korzystne (kombinacje obciążeń unoszących):

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

przy czym :  $\gamma_{G,j,sup} = 1,35$ ;  $\gamma_{G,j,inf} = 1,0$ ;  $\gamma_{Q,1} = 1,50$  lub  $0$ ;  $\xi_j = 0,85$ ;

$\psi_{0,1} = 0,5$  dla śniegu oraz  $0,6$  dla wiatru.

Oddziaływania zewnętrzne wiatru  $W_{e1s}$  i  $W_{e2s}$  sumowano z odpowiednimi oddziaływaniami wewnętrznymi  $W_{i,p}$  lub  $W_{is}$  dla uzyskania najbardziej niekorzystnego efektu. W projektowanej konstrukcji występują tylko obciążenia ssące dachu przez co w kombinacjach realizowano przypadek niekorzystny (kombinacje oddziaływań unoszących) dla schematów obciążeń  $W_{e1s}$ ,  $W_{e2s}$  oraz  $W_{is}$  oraz oddziaływania korzystne (kombinacje obciążeń dociążających) z uwzględnieniem oddziaływania wewnętrznego (parcia)  $W_{i,p}$ :

- Kombinacje oddziaływań**

KOMB 1:	$0,85 \cdot 1,35 \cdot G + 1,5 \cdot S1$
KOMB 2:	$0,85 \cdot 1,35 \cdot G + 1,5 \cdot S2$
KOMB 3:	$0,85 \cdot 1,35 \cdot G + 1,5 \cdot (W_{e1s} + W_{ip}) + 1,5 \cdot 0,5 \cdot S1$
KOMB 4:	$1,00 \cdot G + 1,5 \cdot (W_{e1s} + W_{is})$
KOMB 5:	$1,00 \cdot G + 1,5 \cdot (W_{e2s} + W_{is})$

### 7.4.2. Stan graniczny użytkowości

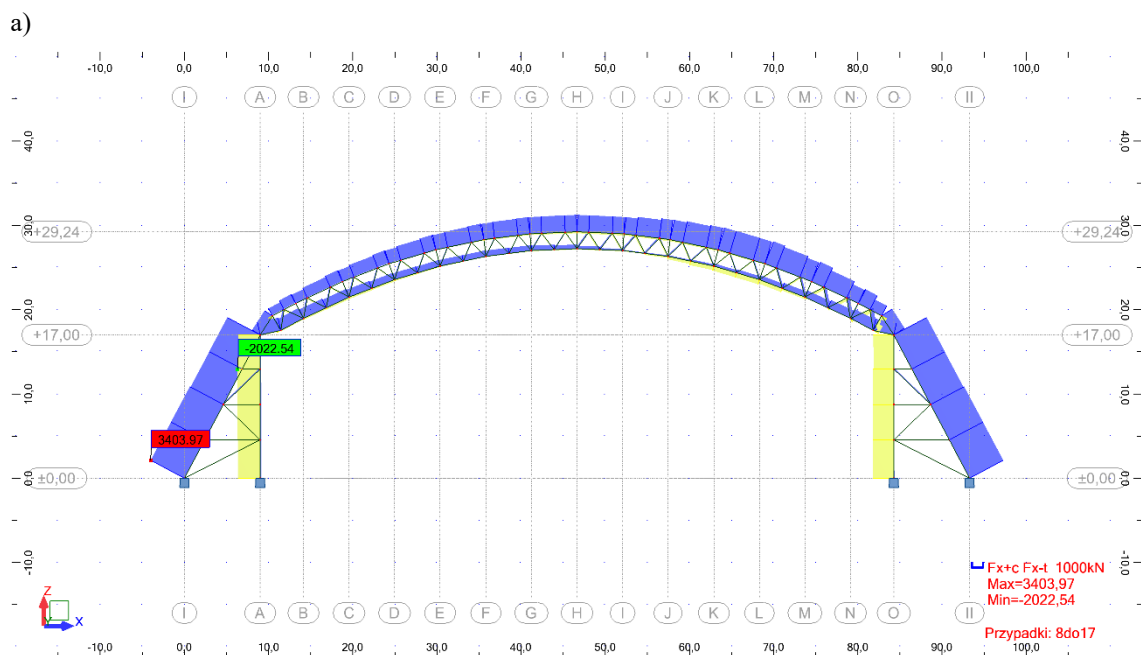
Kombinacje charakterystyczne

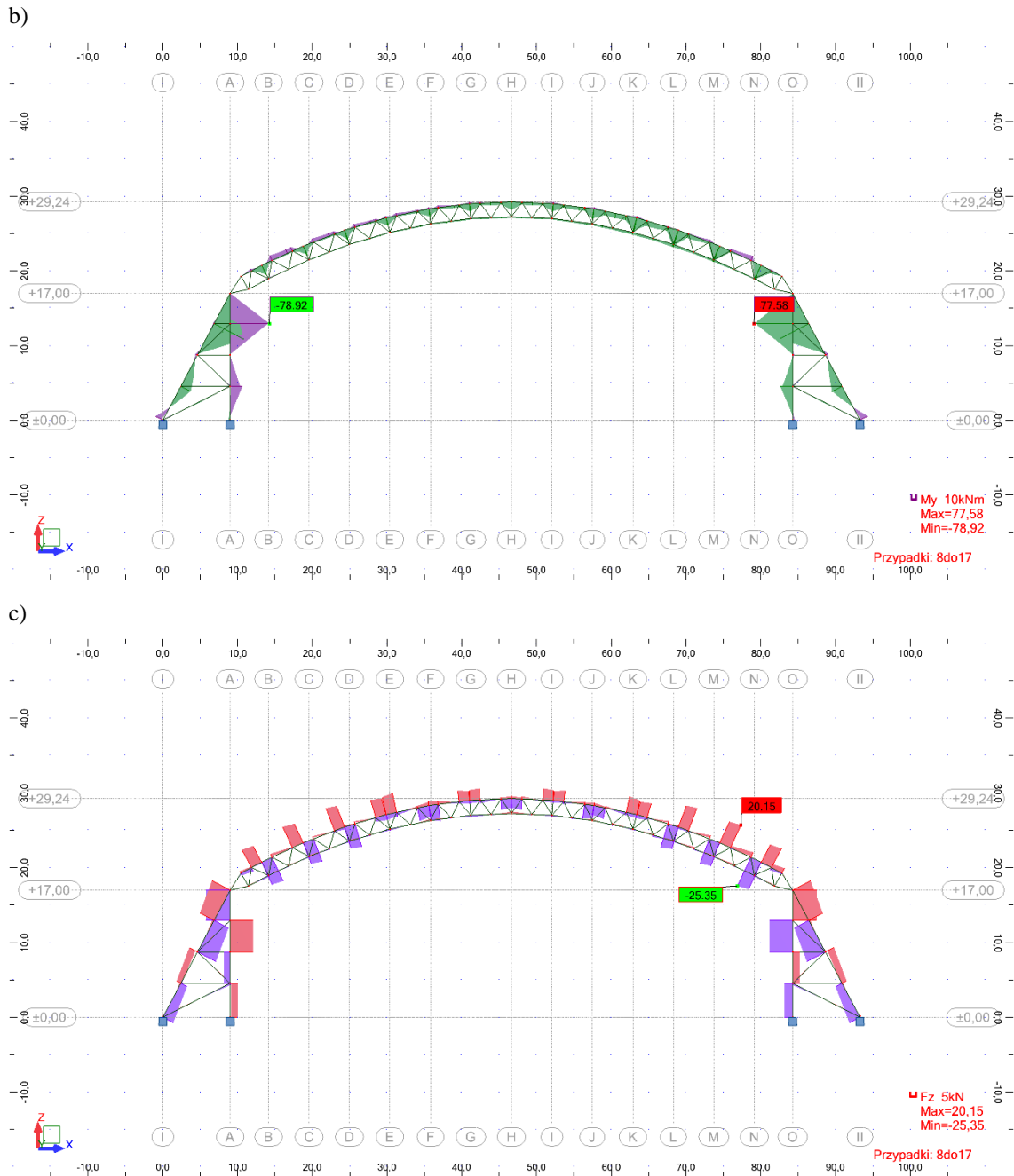
$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$$

KOMB 6:	$G + (W_{e1s} + W_{is})$
KOMB 7:	$G + (W_{e2s} + W_{is})$
KOMB 8:	$G + S1$
KOMB 9:	$G + S2$
KOMB 10:	$G + S2 + 0,6 \cdot (W_{e2s} + W_{ip})$

Do wyznaczenia sił przekrojowych w prętach głównego układu poprzecznego hali użyto program komputerowy ARSA. Pas dolny i górny wiaźara modelowano jako ciągły. Przyjęto przegubowe połączenia słupków i krzyżulców z pasami. Dźwigar oparty jest przegubowo na głowicy konstrukcji wsporczej utwierdzonej w fundamencie. Do obliczeń zastosowano analizę I rzędu, bez uwzględnienia imperfekcji, co jest dopuszczalne w przypadku jednokondygnacyjnych układów przechyłowych.

- Otrzymane maksymalne siły dla Kombinacji





Rys. 7.12. Wyniki obliczeń statycznych - Kombinacje: a) siły podłużne b) momenty zginające, c) siły poprzeczne

## 7.5. Sprawdzenie stanu granicznego nośności

### 7.5.1. Obliczenie pasa górnego dźwigara

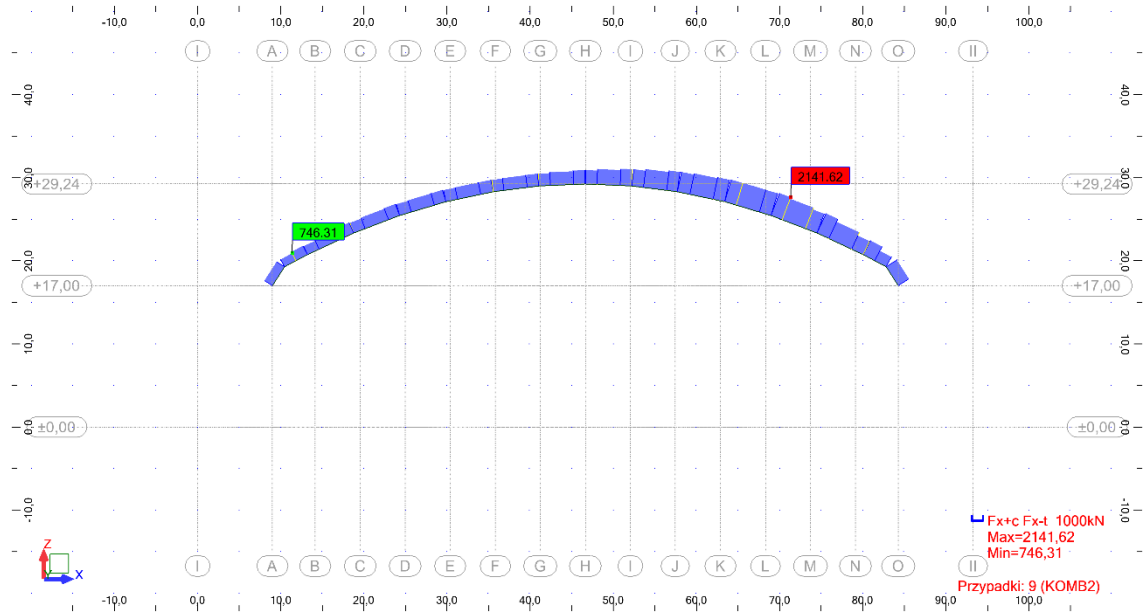
Maksymalne siły przekrojowe w elemencie uzyskane dla kombinacji obciążeń:

$$\text{KOMB 2} \rightarrow 0,85 \cdot 1,35 \cdot G + 1,5 \cdot S2$$

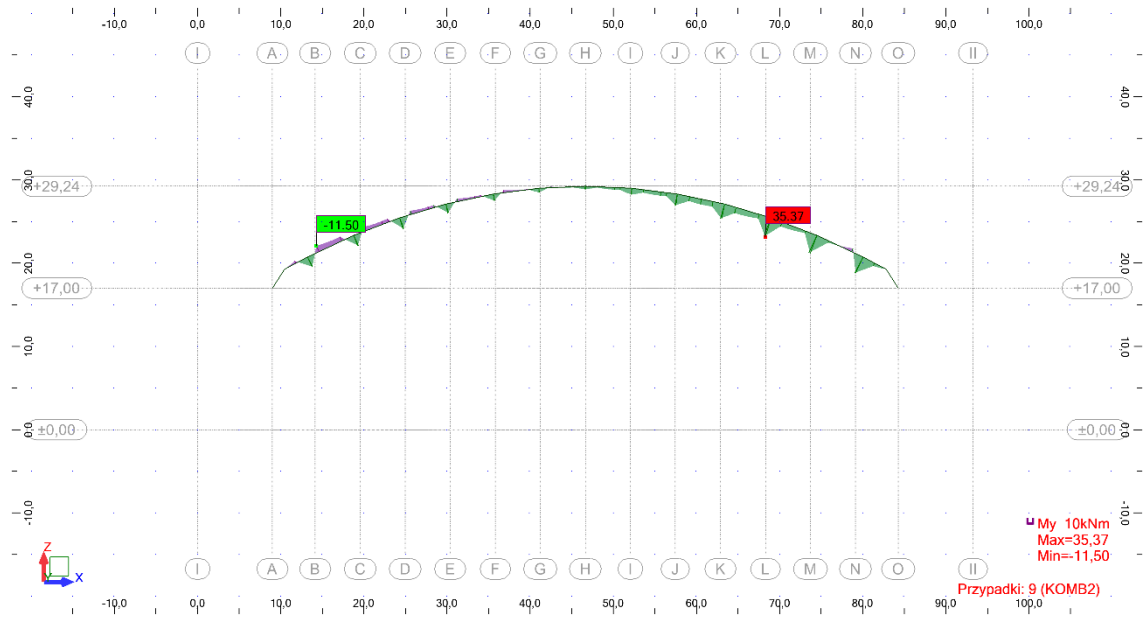
Korzystając z funkcji selekcji w ARSA wyznaczano siły tylko dla pasa górnego zgodnie z Rys. 7.13.

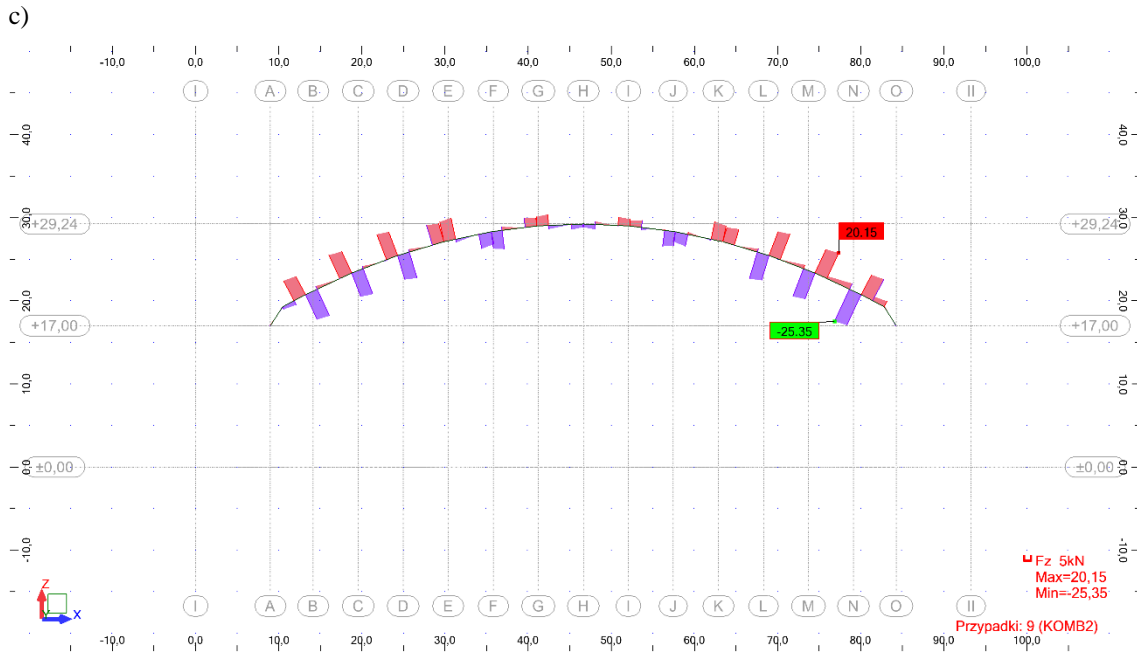


a)



b)





Rys. 7.13. Wyniki obliczeń statycznych dla pasa górnego – KOMB2: a) siły podłużne b) momenty zginające c) siły tnące

- **Siły wewnętrzne**

max moment zginający:  $M_{y,Ed} = 35,37 \text{ kNm}$

max siła tnąca:  $V_{z,Ed} = 25,35 \text{ kN}$

max siła ściskająca:  $N_{c,Ed} = 2141,62 \text{ kN}$

- **Charakterystyki geometryczne pasa górnego**

Przyjęto kształtownik RK 250x250x10

$h = b = 250 \text{ mm}$

$t = 10 \text{ mm}$

$A = 9490 \text{ mm}^2$

$I_y = I_z = 9055 \cdot 10^4$

$W_{pl,y} = W_{pl,z} = 832,79 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$

$i_y = i_z = 98 \text{ mm}$

- **Parametry mechaniczne stali**

$t_{\max} = t_f = 10 \text{ mm} < 40 \text{ mm} \rightarrow f_y = 355 \text{ MPa}$

$f_u = 510 \text{ MPa}$

- **Określenie klasy przekroju**

-współczynnik  $\varepsilon$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{355}} = 0,81$$

-smukłość ścianki rury

$$\frac{c}{t} = \frac{h-3t}{t} = \frac{250-3 \cdot 10}{10} = 22,0 < 33\varepsilon = 33 \cdot 0,81 = 26,73 \rightarrow \text{klasa 1}$$

Kształtownik spełnia wymagania klasy 1.

◦ **Sprawdzenie nośności przekroju na zginanie**

-obliczenie nośności przekroju

$$M_{y,Rd} = M_{pl,Rd} = \frac{W_{ply} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{832,79 \cdot 10^3 \cdot 355}{1,0} = 295,64 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

$$M_{y,Rd} = M_{pl,Rd} = 295,64 \text{ kNm}$$

-sprawdzenie warunku nośności

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} = \frac{25,35}{295,64} = 0,09 < 1,0$$

Warunek nośności spełniony.

◦ **Sprawdzenie nośności przekroju na ścinanie**

-obliczenie pole przekroju czynnego przy ścinaniu

$$A_V = \frac{A \cdot h}{b+h} = \frac{9490 \cdot 250}{250+250} = 4745 \text{ mm}^2$$

-obliczenie nośności przekroju na ścinanie

ponieważ

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{h-3t}{t} = \frac{250-3 \cdot 10}{10} = 22,0 < 72 \frac{\varepsilon}{\eta} = 72 \cdot \frac{0,81}{1,0} = 58,32$$

więc

$$V_{c,Rd} = V_{pl,Rd} = A_V \frac{f_y}{\gamma_{M0} \sqrt{3}} = 4745 \cdot \frac{355}{1,0} = 972,53 \cdot 10^3 \text{ N} = 970,53 \text{ kN}$$

-sprawdzenie warunku nośności

$$\frac{V_{z,Ed}}{V_{c,Rd}} = \frac{25,35}{970,53} = 0,03 < 1,0$$

Warunek nośności spełniony.

◦ **Sprawdzenie nośności przekroju na ściskanie**

-obliczenie nośności przekroju

$$N_{c,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{9490 \cdot 355}{1,0} = 3368,95 \cdot 10^3 \text{ N} = 3368,95 \text{ kN}$$

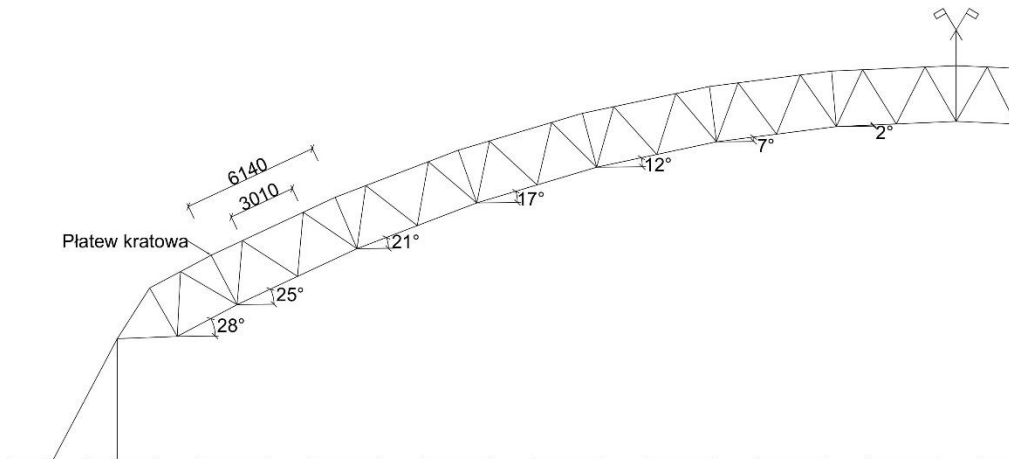
-sprawdzenie warunku nośności

$$\frac{N_{c,Ed}}{N_{c,Rd}} = \frac{2141,62}{3368,95} = 0,64 < 1,0$$

Warunek nośności spełniony.

- **Nośność elementu z uwzględnieniem stateczności**
  - Nośność na wyboczenie w płaszczyźnie kratownicy

-długość wyboczeniowa



Rys. 7.14. Długości wyboczeniowe pręta kratownicy

dla kształtowników zamkniętych:  $L_{cr} = L_w$

gdzie :  $L_w$ - odległość między węzłami

$$L_{cr,y} = L_w = 3,01m$$

-wartość odniesienia do wyznaczenia smukłości względnej

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{\varepsilon}{f_y}} = 93,9\varepsilon = 93,9 \cdot 0,81 = 76,06$$

-smukłość względna

$$\bar{\lambda}_y = \frac{L_{cr,y}}{i_y} \cdot \frac{1}{\lambda_1} = \frac{3010}{98} \cdot \frac{1}{76,06} = 0,40$$

-parametr imperfekcji

krzywa wyboczeniowa „a”  $\rightarrow \alpha=0,21$

-parametr krzywej niestateczności

$$\phi = 0,5[1 + \alpha_y(\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2] = 0,5[1 + 0,21 \cdot (0,40 - 0,20) + 0,40^2] = 0,60$$

-współczynnik wyboczeniowy

$$\chi_y = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = \frac{1}{0,60 + \sqrt{0,60^2 - 0,40^2}} = 0,96$$

-nośność elementu

$$N_{b,Rd} = \chi \cdot \frac{Af_y}{\gamma_{M0}} = 0,96 \cdot \frac{9490 \cdot 355}{1,0} = 3234,19 \cdot 10^3 \text{ N} = 3234,19 \text{ kN}$$

-sprawdzenie warunku nośności

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} = \frac{2141,62}{3234,19} = 0,66 < 1,0 \rightarrow \text{warunek spełniony.}$$

◦ **Nośność na wyboczenie z płaszczyzny kratownicy**

-długość wyboczeniowa

$$L_{cr,z} = 6,14 \text{ m (zgodnie z Rys. 6.13.)}$$

-wartość odniesienia do wyznaczenia smukłości względnej

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{\varepsilon}{f_y}} = 93,9\varepsilon = 93,9 \cdot 0,81 = 76,06$$

-smukłość względna

$$\bar{\lambda}_z = \frac{L_{cr,z}}{i_z} \cdot \frac{1}{\lambda_1} = \frac{6140}{98} \cdot \frac{1}{76,06} = 0,82$$

-parametr imperfekcji

krzywa wyboczeniowa „a”  $\rightarrow \alpha=0,21$

-parametr krzywej niestateczności

$$\phi = 0,5[1 + \alpha_z(\lambda_z - 0,2) + \lambda_z^2] = 0,5[1 + 0,21 \cdot (0,82 - 0,2) + 0,82^2] = 0,89$$

-współczynnik wyboczeniowy

$$\chi_z = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda^2}} = \frac{1}{0,89 + \sqrt{0,89^2 - 0,82^2}} = 0,81$$

-nośność elementu

$$N_{b,Rd} = 0,81 \cdot \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} = 0,78 \cdot \frac{9490 \cdot 355}{1,0} = 2627,78 \cdot 10^3 \text{ N} = 2627,78 \text{ kN}$$

-sprawdzenie warunku nośności

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} = \frac{2141,62}{2627,78} = 0,82 < 1,0$$

Warunek nośności spełniony.

◦ **Nośność elementu przy zwichrzeniu**

Element niepodatny na zwichrzenie  $\rightarrow \chi_{LT} = 1,0$

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot \frac{W_y f_y}{\gamma_{M1}} = 1,0 \cdot \frac{832,79 \cdot 10^3 \cdot 355}{1,0} = 295,64 \cdot 10^6 \text{ Nmm} = 295,64 \text{ kNm}$$

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{b,Rd}} = \frac{25,35}{295,64} = 0,09 < 1,0$$

Warunek nośności spełniony.

◦ **Nośność elementu zginającego i ściskanego**

-współczynnik interakcji

Do wyznaczenia współczynników interakcji wykorzystano metodę 2 według załącznika B (element niewrażliwy na deformacje skrętną). Współczynnik równoważnego stałego momentu  $C_{my}$  (oś zginania y-y, kierunek podparcia z-z).

$$\alpha_s = \frac{M_s}{M_h} = \frac{11,50}{-35,37} = -0,33 \quad C_{my} = 0,1 - 0,8 \cdot \alpha_s = 0,1 - 0,8 \cdot (-0,33) = 0,36$$

-ności charakterystyczne przekroju:

przy ściskaniu:

$$N_{Rk} = A \cdot f_y = 9490 \cdot 355 = 3368,95 \cdot 10^3 N = 3368,95 \text{ kN}$$

przy zginaniu:

$$M_{Rk} = W_{pl,y} \cdot f_y = 832,79 \cdot 10^3 \cdot 355 = 295,64 \cdot 10^6 Nmm = 295,64 \text{ kNm}$$

$$k_{yy} = \min \left\{ \begin{array}{l} C_{my} \left[ 1 + (\lambda_y - 0,2) \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right] \\ C_{my} \left[ \left[ 1 + 0,8 \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right] \right] \end{array} \right.$$

$$k_{yy} = \min \left\{ \begin{array}{l} 0,36 \cdot \left[ 1 + (0,40 - 0,2) \cdot \frac{2141,62}{0,96 \cdot \frac{3368,95}{1,0}} \right] = 0,41 \\ 0,36 \cdot \left[ \left[ 1 + 0,8 \cdot \frac{2141,62}{0,96 \cdot \frac{3368,95}{1,0}} \right] \right] = 0,55 \end{array} \right. = 0,41$$

$$k_{zy} = 0,6 \cdot k_{yy} = 0,6 \cdot 0,41 = 0,25$$

-sprawdzenie nośności elementu ściskanego i zginanego

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{Rk}}{\gamma_{M1}}} = \frac{2141,62}{0,96 \cdot \frac{3368,95}{1,0}} + 0,41 \cdot \frac{25,35}{1,0 \cdot \frac{295,64}{1,0}} = 0,66 + 0,04 = 0,70 < 1,0$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{Rk}}{\gamma_{M1}}} = \frac{2141,62}{0,81 \cdot \frac{3368,95}{1,0}} + 0,25 \cdot \frac{25,35}{1,0 \cdot \frac{295,64}{1,0}} = 0,78 + 0,02 = 0,80 < 1,0$$

Warunek nośności spełniony.

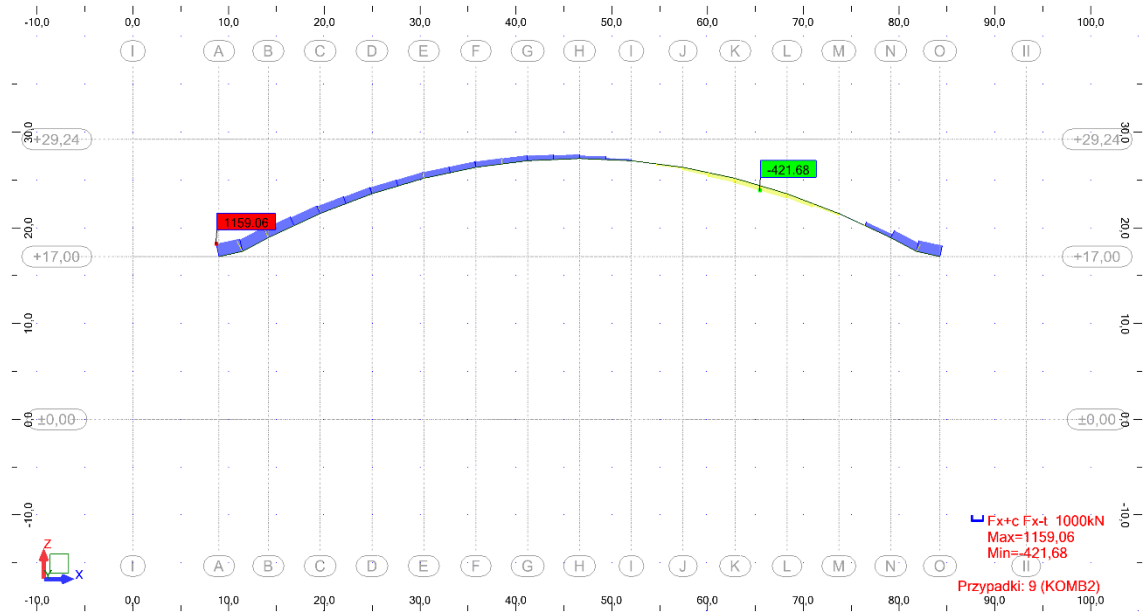
### 7.5.2. Obliczanie pasa dolnego dźwigara

Maksymalne siły przekrojowe w elemencie uzyskane dla kombinacji obciążeń:

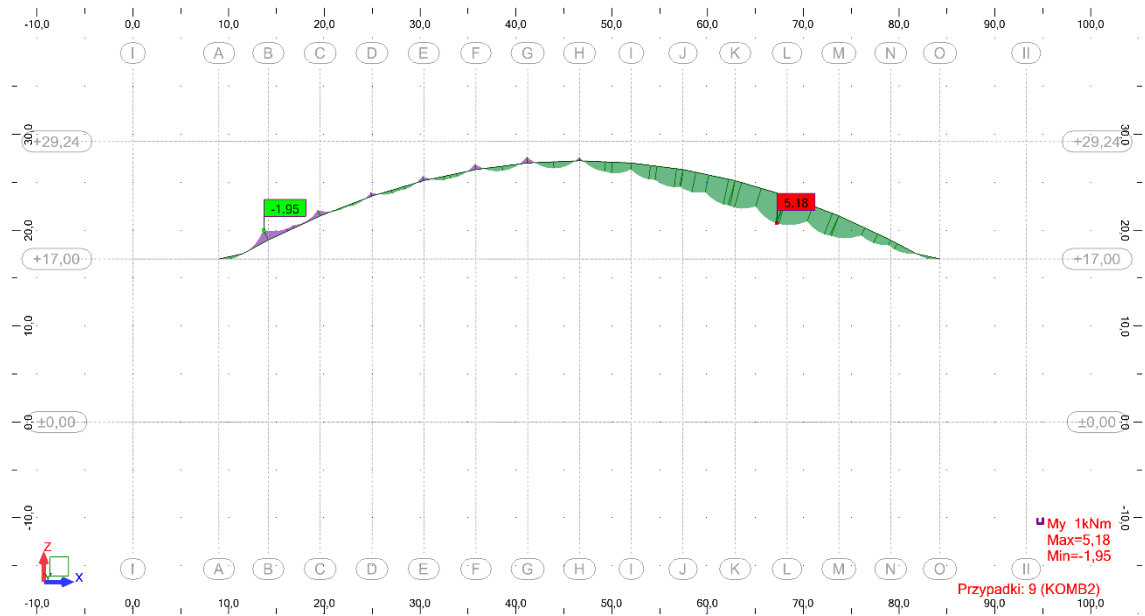
$$\text{KOMB 2} \rightarrow 0,85 \cdot 1,35 \cdot G + 1,5 \cdot S2$$

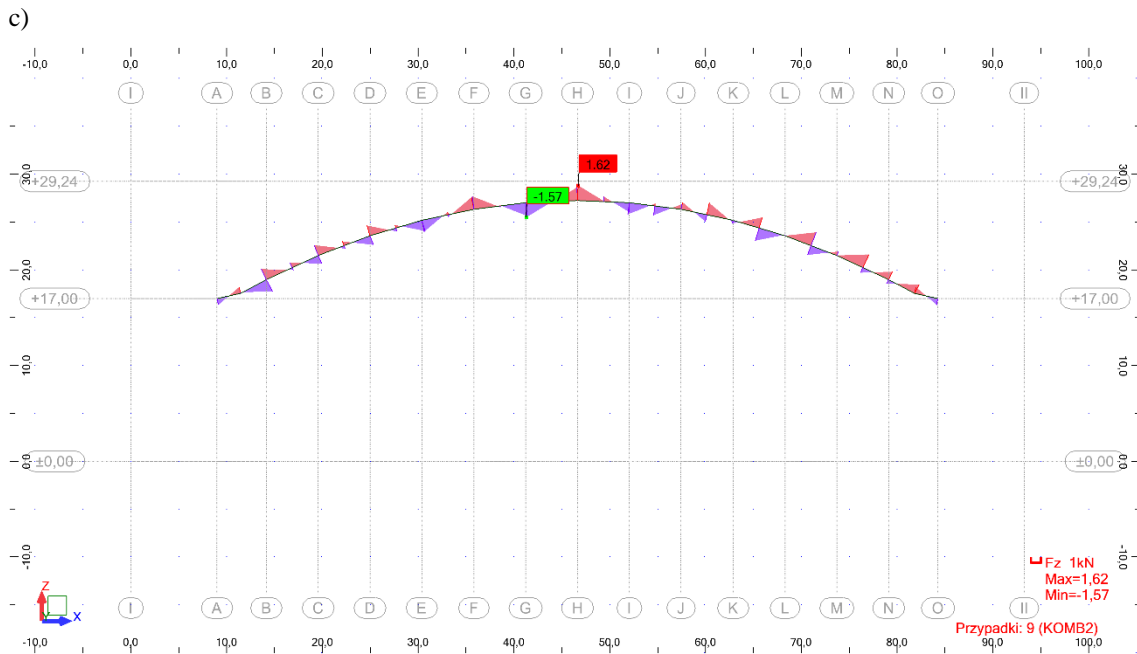
Korzystając z funkcji selekcji w ARSA wyznaczano siły tylko dla pasa dolnego zgodnie z Rys. 7.15.

a)



b)





Rys. 7.15. Wyniki obliczeń statycznych dla pasa dolnego – KOMB 2 : a) siły podłużne b) momenty zginające c) siły tnące

- **Siły wewnętrzne**

max siła rozciągająca:  $N_{t,Ed} = 421,68 \text{ kN}$

max siła ściskająca:  $N_{c,Ed} = 1159,06 \text{ kN}$

max moment zginający:  $M_{y,Ed} = 5,18 \text{ kNm}$

max siła tnąca:  $V_{z,Ed} = 1,62 \text{ kN}$  → z uwagi na znikomą wartość pominięto sprawdzenie warunku na ścinanie

- **Charakterystyki geometryczne przekroju**

Przyjęto kształtownik RK 180x180x8

$h = b = 180 \text{ mm}$

$t = 8 \text{ mm}$

$A = 5440 \text{ mm}^2$

$I_y = I_z = 2661,0 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$

$W_{pl,y} = W_{pl,z} = 340,68 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$

$i_y = i_z = 70 \text{ mm}$

- **Parametry mechaniczne stali**

$t_{\max} = t_f = 8 \text{ mm} < 40 \text{ mm} \rightarrow f_y = 355 \text{ MPa}$

$f_u = 510 \text{ MPa}$



◦ **Sprawdzenie nośności przekroju na zginanie**

-obliczenie nośności przekroju

$$M_{y,Rd} = M_{pl,Rd} = \frac{W_{ply} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{340,68 \cdot 10^3 \cdot 355}{1,0} = 120,94 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

$$M_{y,Rd} = M_{pl,Rd} = 120,94 \text{ kNm}$$

-sprawdzenie warunku nośności

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} = \frac{5,18}{120,94} = 0,04 < 1,0$$

Warunek nośności spełniony.

◦ **Sprawdzenie nośności przekroju na rozciąganie**

-obliczenie nośności przekroju

$$N_{t,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{5440 \cdot 355}{1,0} = 1931,20 \cdot 10^3 \text{ N} = 1931,20 \text{ kN}$$

-sprawdzenie warunku nośności

$$\frac{N_{t,Ed}}{N_{t,Rd}} = \frac{421,68}{1931,20} = 0,22 < 1,0$$

Warunek nośności spełniony.

◦ **Sprawdzenie nośności przekroju na ściskanie**

-określenie klasy przekroju

-współczynnik  $\varepsilon$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{355}} = 0,81$$

-smukłość ścianki rury

$$\frac{c}{t} = \frac{h-3t}{t} = \frac{180-3 \cdot 8}{8} = 19,5 < 33\varepsilon = 33 \cdot 0,81 = 26,73 \rightarrow \text{klasa 1}$$

Kształtownik spełnia wymagania klasy 1.

-obliczenie nośności przekroju

$$N_{c,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{5440 \cdot 355}{1,0} = 1931,20 \cdot 10^3 \text{ N} = 1931,20 \text{ kN}$$

-sprawdzenie warunku nośności

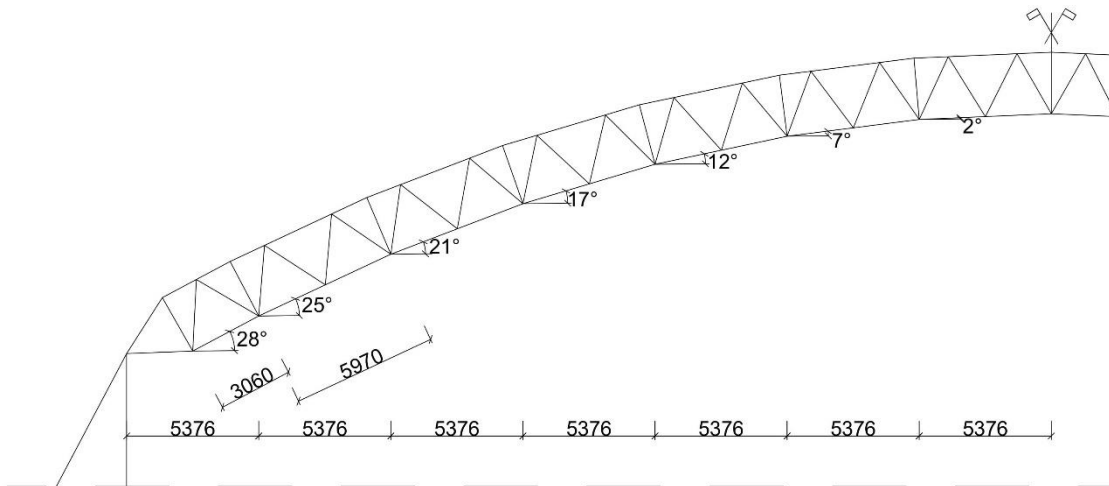
$$\frac{N_{c,Ed}}{N_{c,Rd}} = \frac{1159,06}{1931,20} = 0,60 < 1,0$$

Warunek nośności spełniony.

- **Nośność elementu z uwzględnieniem stateczności**

- Nośność na wyboczenie w płaszczyźnie kratownicy

-długość wyboczeniowa



Rys. 7.16. Długość wyboczeniowa pasa dolnego dźwigara

dla kształtowników zamkniętych:  $L_{cr}=L_w$

gdzie :  $L_w$  - odległość między węzłami (teoretyczna)

$$L_{cr,y}=L_w=3,06 \text{ m}$$

-wartość odniesienia do wyznaczenia smukłości względnej

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{\varepsilon}{f_y}} = 93,9\varepsilon = 93,9 \cdot 0,81 = 76,06$$

-smukłość względna

$$\bar{\lambda}_y = \frac{L_{cr,y}}{i_y} \cdot \frac{1}{\lambda_1} = \frac{3060}{70} \cdot \frac{1}{76,06} = 0,57$$

-parametr imperfekcji

krzywa wyboczeniowa „a”  $\rightarrow \alpha=0,21$

-parametr krzywej niestateczności

$$\phi=0,5[1+\alpha_y(\lambda_y - 0,2) + \lambda_y^2]=0,5[1+0,21 \cdot (0,57-0,20)+0,57^2] =0,70$$

-współczynnik wyboczeniowy

$$\chi_y = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda^2}} = \frac{1}{0,70 + \sqrt{0,70^2 - 0,57^2}} = 0,90$$

-nośność elementu

$$N_{b,Rd} = \chi \cdot \frac{Af_y}{\gamma_{M0}} = 0,90 \cdot \frac{5440 \cdot 355}{1,0} = 1738,08 \cdot 10^3 \text{ N} = 1738,08 \text{ kN}$$

-sprawdzenie warunku nośności

$$\frac{N_{c,Ed}}{N_{b,Rd}} = \frac{1159,06}{1738,08} = 0,67 < 1,0 \rightarrow \text{Warunek nośności spełniony.}$$

- Nośność na wyboczenie z płaszczyzny kratownicy

-długość wyboczeniowa (zgodnie z Rys. 6.16.)

$L_{cr,z} = 5,97$  (pręty zmniejszające długość wyboczeniową przy płatwi)

-wartość odniesienia do wyznaczenia smukłości względnej

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{\varepsilon}{f_y}} = 93,9\varepsilon = 93,9 \cdot 0,81 = 76,06$$

-smukłość względna

$$\bar{\lambda}_z = \frac{L_{cr,z}}{i_z} \cdot \frac{1}{\lambda_1} = \frac{5970}{70} \cdot \frac{1}{76,06} = 1,12$$

-parametr imperfekcji

krzywa wyboczeniowa „a”  $\rightarrow \alpha=0,21$

-parametr krzywej niestateczności

$$\phi = 0,5[1 + \alpha_y(\lambda_z - 0,2) + \lambda_y^2] = 0,5[1 + 0,21 \cdot (1,12 - 0,20) + 1,12^2] = 1,22$$

-współczynnik wyboczeniowy

$$\chi_z = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda^2}} = \frac{1}{1,22 + \sqrt{1,22^2 - 1,12^2}} = 0,59$$

-nośność elementu

$$N_{b,Rd} = \chi \cdot \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} = 0,59 \cdot \frac{5440 \cdot 355}{1,0} = 1139,41 \cdot 10^3 \text{ N} = 1139,41 \text{ kN}$$

-sprawdzenie warunku nośności

$$\frac{N_{c,Ed}}{N_{b,Rd}} = \frac{1159,06}{1139,41} = 1,01 \approx 1,0 \leq 1,0$$

Warunek nośności spełniony.

- **Nośność elementu przy zwichrzeniu**

Element niepodatny na zwichrzenie  $\rightarrow \chi_{LT} = 1,0$

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot \frac{W_y f_y}{\gamma_{M1}} = 1,0 \cdot \frac{340,68 \cdot 10^3 \cdot 355}{1,0} = 120,94 \cdot 10^6 \text{ Nmm} = 120,94 \text{ kNm}$$

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{b,Rd}} = \frac{5,18}{120,94} = 0,04 < 1,0$$

Warunek nośności spełniony.

- **Nośność elementu zginającego i ściskanego**

-współczynnik interakcji

Do wyznaczenia współczynników interakcji wykorzystano metodę 2 według załącznika B (element niewrażliwy na deformacje skrętną). Współczynnik równoważnego stałego momentu  $C_{my}$  (oś zginania y-y, kierunek podparcia z-z).

$$a_s = \frac{M_s}{M_h} = \frac{1,95}{-5,18} = -0,38$$

$$C_{my} = 0,1 - 0,8 \cdot \alpha_s = 0,1 - 0,8 \cdot (-0,38) = 0,40$$

-ności charakterystyczne przekroju:

przy ściskaniu:

$$N_{Rk} = A \cdot f_y = 5440 \cdot 355 = 1931,20 \cdot 10^3 N = 1931,20 \text{ kN}$$

przy zginaniu:

$$M_{Rk} = W_{pl,y} \cdot f_y = 340,68 \cdot 10^3 \cdot 355 = 120,94 \cdot 10^6 Nmm = 120,94 \text{ kNm}$$

$$\min \begin{cases} C_{my} \left[ 1 + (\lambda_y - 0,2) \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right] \\ C_{my} \left[ \left[ 1 + 0,8 \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right] \right] \end{cases}$$

$$k_{yy} = \min \begin{cases} 0,36 \cdot \left[ 1 + (0,57 - 0,2) \cdot \frac{1159,06}{0,90 \cdot \frac{1931,20}{1,0}} \right] = 0,45 \\ 0,36 \cdot \left[ \left[ 1 + 0,8 \cdot \frac{1159,06}{0,90 \cdot \frac{1931,20}{1,0}} \right] \right] = 0,55 \end{cases} = 0,45$$

$$k_{zy} = 0,6 \cdot k_{yy} = 0,6 \cdot 0,45 = 0,27$$

-sprawdzenie nośności elementu ściskanego i zginanego

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{Rk}}{\gamma_{M1}}} = \frac{1159,06}{0,90 \cdot \frac{1931,20}{1,0}} + 0,45 \cdot \frac{5,21}{1,0 \cdot \frac{120,94}{1,0}} = 0,67 + 0,02 = 0,69 < 1,0$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{Rk}}{\gamma_{M1}}} = \frac{1159,06}{0,59 \cdot \frac{1931,20}{1,0}} + 0,22 \cdot \frac{5,18}{1,0 \cdot \frac{120,94}{1,0}} = 1,017 + 0,009 \approx 1,0 < 1,0$$

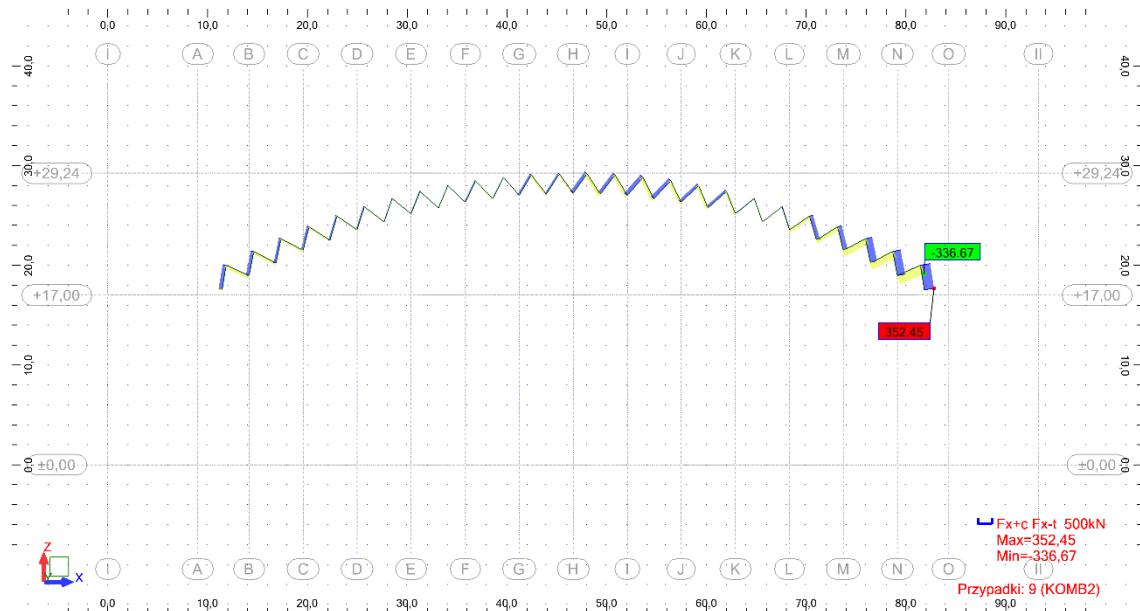
Warunek nośności spełniony.

### 7.5.3. Obliczanie krzyżulców dźwigara

Siły przekrojowe w elemencie uzyskane z kombinacji obciążeń

$$\text{KOMB 2} \rightarrow 0,85 \cdot 1,35 \cdot G + 1,5 \cdot S2$$

Korzystając z funkcji selekcji w ARSA wyznaczano siły tylko dla krzyżulców zgodnie z Rys. 7.17.



Rys. 7.17. Wyniki obliczeń statycznych dla krzyżulców – KOMB 2: siły podłużne

- **Siły wewnętrzne**

max siła ściskająca:  $N_{c,Ed} = 352,45 \text{ kN}$

max siła rozciągająca:  $N_{t,Ed} = 336,67 \text{ kN}$

- **Charakterystyki geometryczne przekroju**

Przyjęto kształtownik RK 80x80x8

$h=b= 80 \text{ mm}$

$t=8,0 \text{ mm}$

$A=2240 \text{ mm}^2$

$I_y=I_z= 189 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$

$W_{pl,y}=W_{pl,z}=56,12 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$

$i_y=i_z=29 \text{ mm}$

- **Parametry mechaniczne stali**

$t_{\max}=t_f=8,0 \text{ mm} < 40 \text{ mm} \rightarrow f_y=355 \text{ MPa}$

$f_u=510 \text{ MPa}$

- **Określenie klasy przekroju**

-współczynnik  $\epsilon$

$$\epsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{355}} = 0,81$$

-smukłość ścianki rury

$$\frac{c}{t} = \frac{h-3t}{t} = \frac{80-3 \cdot 8,0}{8,0} = 7,0 < 33\epsilon = 33 \cdot 0,81 = 26,73 \rightarrow \text{klasa 1}$$

Kształtownik spełnia wymagania klasy 1.

- **Sprawdzenie nośności przekroju na ściskanie**

-obliczenie nośności przekroju

$$N_{c,Rd} = \frac{Af_y}{\gamma_{M0}} = \frac{2240 \cdot 355}{1,0} = 795,2 \cdot 10^3 \text{ N} = 795,2 \text{ kN}$$

-sprawdzenie warunku nośności

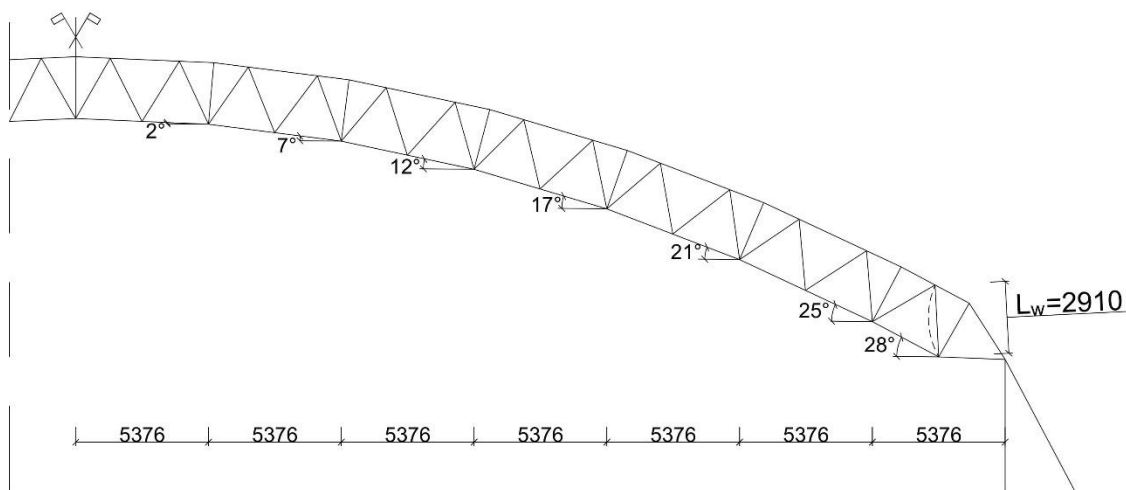
$$\frac{N_{c,Ed}}{N_{c,Rd}} = \frac{352,45}{795,2} = 0,44 < 1,0$$

Warunek nośności spełniony.

- **Nośność elementu z uwzględnieniem stateczności**

- **Nośność na wyboczenie w płaszczyźnie kratownicy**

-długość wyboczeniowa



Rys. 7.18. Długość wyboczeniowa krzyżulca w płaszczyźnie kratownicy

dla kształtowników zamkniętych:  $L_{cr} = 0,9 \cdot L_w$

gdzie :  $L_w$  - odległość między węzłami (teoretyczna)

$$L_{cr,y} = 0,9 \cdot L_w = 0,9 \cdot 2,91 = 2,62 \text{ m}$$

-wartość odniesienia do wyznaczenia smukłości względnej

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{\varepsilon}{f_y}} = 93,9\varepsilon = 93,9 \cdot 0,81 = 76,06$$

-smukłość względna

$$\bar{\lambda}_y = \frac{L_{cr,y}}{i_y} \cdot \frac{1}{\lambda_1} = \frac{2620}{29} \cdot \frac{1}{76,06} = 1,19$$

-parametr imperfekcji

krzywa wyboczeniowa „a”  $\rightarrow \alpha = 0,21$

-parametr krzywej niestateczności

$$\phi = 0,5[1 + \alpha_y(\lambda_y - 0,2) + \lambda_y^2] = 0,5 \cdot [1 + 0,21 \cdot (1,19 - 0,20) + 1,19^2] = 1,31$$

-współczynnik wyboczeniowy

$$\chi_y = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda^2}} = \frac{1}{1,31 + \sqrt{1,31^2 - 1,19^2}} = 0,54$$

-nośność elementu

$$N_{b,Rd} = \chi_y \cdot \frac{Af_y}{\gamma_{M0}} = 0,54 \cdot \frac{2240 \cdot 355}{1,0} = 429,41 \cdot 10^3 \text{ N} = 429,41 \text{ kN}$$

-sprawdzenie warunku nośności

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} = \frac{352,45}{429,41} = 0,82 < 1,0$$

Warunek nośności spełniony.

◦ **Nośność na wyboczenie z płaszczyzny kratownicy**

-długość wyboczeniowa

dla kształtowników zamkniętych:  $L_{cr,z} = L_w$

gdzie :  $L_w$  - odległość między węzłami (teoretyczna)

$$L_{cr,z} = 2,91 \text{ m}$$

-wartość odniesienia do wyznaczenia smukłości względnej

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{\varepsilon}{f_y}} = 93,9\varepsilon = 93,9 \cdot 0,81 = 76,06$$

-smukłość względna

$$\bar{\lambda}_z = \frac{L_{cr,z}}{i_z} \cdot \frac{1}{\lambda_1} = \frac{2910}{29} \cdot \frac{1}{76,06} = 1,32$$

-parametr imperfekcji

krzywa wyboczeniowa „a”  $\rightarrow \alpha = 0,21$

-parametr krzywej niestateczności

$$\phi = 0,5[1 + \alpha_z(\lambda_z - 0,2) + \lambda_z^2] = 0,5 \cdot [1 + 0,21 \cdot (1,32 - 0,20) + 1,32^2] = 1,49$$

-współczynnik wyboczeniowy

$$\chi_z = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda^2}} = \frac{1}{1,49 + \sqrt{1,49^2 - 1,32^2}} = 0,46$$

-nośność elementu

$$N_{b,Rd} = \chi_z \cdot \frac{Af_y}{\gamma_{M0}} = 0,46 \cdot \frac{2240 \cdot 355}{1,0} = 365,79 \cdot 10^3 \text{ N} = 365,79 \text{ kN}$$

-sprawdzenie warunku nośności

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} = \frac{352,45}{365,79} = 0,96 \leq 1,0$$

Warunek nośności spełniony.

◦ **Sprawdzenie nośności przekroju na rozciąganie**

-obliczenie nośności przekroju

$$N_{t,Rd} = \frac{Af_y}{\gamma_{Mo}} = \frac{2240 \cdot 355}{1,0} = 795,20 \cdot 10^3 \text{ N} = 795,20 \text{ kN}$$

-sprawdzenie warunku nośności ,

$$\frac{N_{t,Ed}}{N_{t,Rd}} = \frac{336,67}{795,20} = 0,42 < 1,0$$

Warunek nośności spełniony

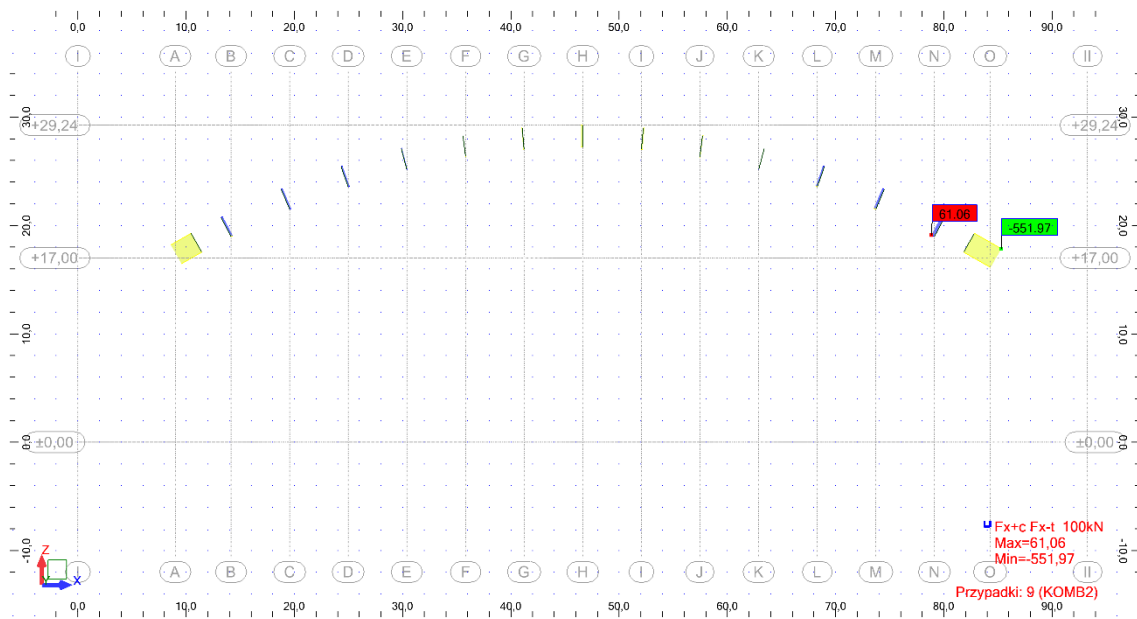
### 7.5.4. Obliczanie słupków dźwigara

Siły przekrojowe w elemencie uzyskane z kombinacji obciążeń

$$\text{KOMB 2} \rightarrow 0,85 \cdot 1,35 \cdot G + 1,5 \cdot S2$$

Korzystając z funkcji selekcji w ARSA wyznaczano siły tylko dla krzyżulców zgodnie z

Rys. 7.19.



Rys. 7.19. Wyniki obliczeń statycznych dla pasa górnego – KOMB2: siły podłużne

◦ **Siły wewnętrzne**

max siła ściskająca:  $N_{c,Ed} = 61,06 \text{ kN}$

max siła rozciągająca:  $N_{t,Ed} = 551,97 \text{ kN}$

◦ **Charakterystyki geometryczne przekroju**

Przyjęto kształtownik RK 80x80x6

$h=b= 80 \text{ mm}$

$t=6 \text{ mm}$

$A=1740 \text{ mm}^2$



$$I_y=I_z= 156 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

$$W_{pl,y}=W_{pl,z}=45,79 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

$$i_y=i_z=30 \text{ mm}$$

- **Parametry mechaniczne stali**

$$t_{\max}=t_f= 6 \text{ mm} < 40 \text{ mm} \rightarrow f_y=355 \text{ MPa}$$

$$f_u=510 \text{ MPa}$$

- **Określenie klasy przekroju**

-współczynnik  $\varepsilon$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{355}} = 0,81$$

-smukłość ścianki rury

$$\frac{c}{t} = \frac{h-3t}{t} = \frac{80-3 \cdot 6}{6} = 10,33 < 33\varepsilon = 33 \cdot 0,81 = 26,73 \rightarrow \text{klasa 1}$$

Kształtownik spełnia wymagania klasy 1.

- **Sprawdzenie nośności przekroju na ściskanie**

-obliczenie nośności przekroju

$$N_{c,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{1740 \cdot 355}{1,0} = 617,7 \cdot 10^3 \text{ N} = 617,7 \text{ kN}$$

-sprawdzenie warunku nośności

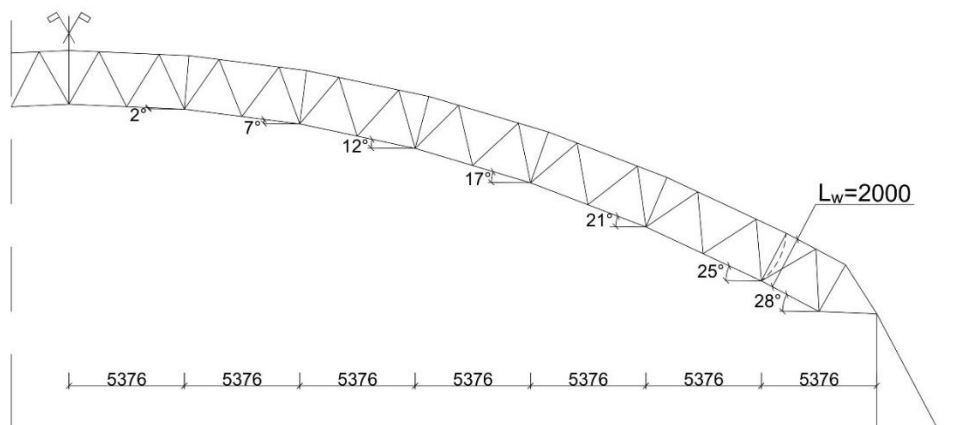
$$\frac{N_{c,Ed}}{N_{c,Rd}} = \frac{61,06}{617,7} = 0,10 < 1,0$$

Warunek nośności spełniony.

- **Nośność elementu z uwzględnieniem stateczności**

- **Nośność na wyboczenie w płaszczyźnie kratownicy**

-długość wyboczeniowa



Rys. 7.20. Długość wyboczeniowa słupka w płaszczyźnie kratownicy

dla kształtowników zamkniętych:  $L_{cr}=0,9 \cdot L_w$

gdzie :  $L_w$  - odległość między węzłami (teoretyczna)

$$L_{cr,y}=0,9 \cdot L_w=0,9 \cdot 2,0=1,8 \text{ m}$$

-wartość odniesienia do wyznaczenia smukłości względnej

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{\varepsilon}{f_y}} = 93,9\varepsilon = 93,9 \cdot 0,81 = 76,06$$

-smukłość względna

$$\bar{\lambda}_y = \frac{L_{cr,y}}{i_y} \cdot \frac{1}{\lambda_1} = \frac{1800}{30} \cdot \frac{1}{76,06} = 0,79$$

-parametr imperfekcji

krzywa wyboczeniowa „a”  $\rightarrow \alpha=0,21$

-parametr krzywej niestateczności

$$\phi=0,5[1+\alpha_y(\lambda_y - 0,2) + \lambda_y^2]=0,5[1+0,21 \cdot (0,79-0,20)+0,79^2] =0,87$$

-współczynnik wyboczeniowy

$$\chi_y = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda^2}} = \frac{1}{0,87 + \sqrt{0,87^2 - 0,79^2}} = 0,81$$

-nośność elementu

$$N_{b,Rd} = \chi_y \cdot \frac{Af_y}{\gamma_{M0}} = 0,81 \cdot \frac{1740 \cdot 355}{1,0} = 500,34 \cdot 10^3 \text{ N} = 500,34 \text{ kN}$$

-sprawdzenie warunku nośności

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} = \frac{61,06}{500,37} = 0,12 < 1,0$$

Warunek nośności spełniony

◦ **Nośność na wyboczenie z płaszczyzny kratownicy**

-długość wyboczeniowa

dla kształtowników zamkniętych:  $L_{cr,z}=L_w$

gdzie :  $L_w$  - odległość między węzłami (teoretyczna)

$$L_{cr,z}=2,0 \text{ m}$$

-wartość odniesienia do wyznaczenia smukłości względnej

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{\varepsilon}{f_y}} = 93,9\varepsilon = 93,9 \cdot 0,81 = 76,06$$

-smukłość względna

$$\bar{\lambda}_z = \frac{L_{cr,z}}{i_z} \cdot \frac{1}{\lambda_1} = \frac{2000}{30} \cdot \frac{1}{76,06} = 0,88$$

-parametr imperfekcji

krzywa wyboczeniowa „a”  $\rightarrow \alpha=0,21$

-parametr krzywej niestateczności

$$\phi = 0,5[1 + \alpha_z(\lambda_z - 0,2) + \lambda_y^2] = 0,5 \cdot [1 + 0,21 \cdot (0,88 - 0,2) + 0,88^2] = 0,96$$

-współczynnik wyboczeniowy

$$\chi_z = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda^2}} = \frac{1}{0,96 + \sqrt{0,96^2 - 0,88^2}} = 0,74$$

-nośność elementu

$$N_{b,Rd} = \chi_z \cdot \frac{Af_y}{\gamma_{M0}} = 0,74 \cdot \frac{1740 \cdot 355}{1,0} = 457,10 \cdot 10^3 \text{ N} = 457,10 \text{ kN}$$

-sprawdzenie warunku nośności

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} = \frac{61,06}{457,10} = 0,13 \leq 1,0$$

Warunek nośności spełniony.

◦ **Sprawdzenie nośności przekroju na rozciąganie**

-obliczenie nośności przekroju

$$N_{t,Rd} = \frac{Af_y}{\gamma_{M0}} = \frac{1740 \cdot 355}{1,0} = 617,70 \cdot 10^3 \text{ N} = 617,70 \text{ kN}$$

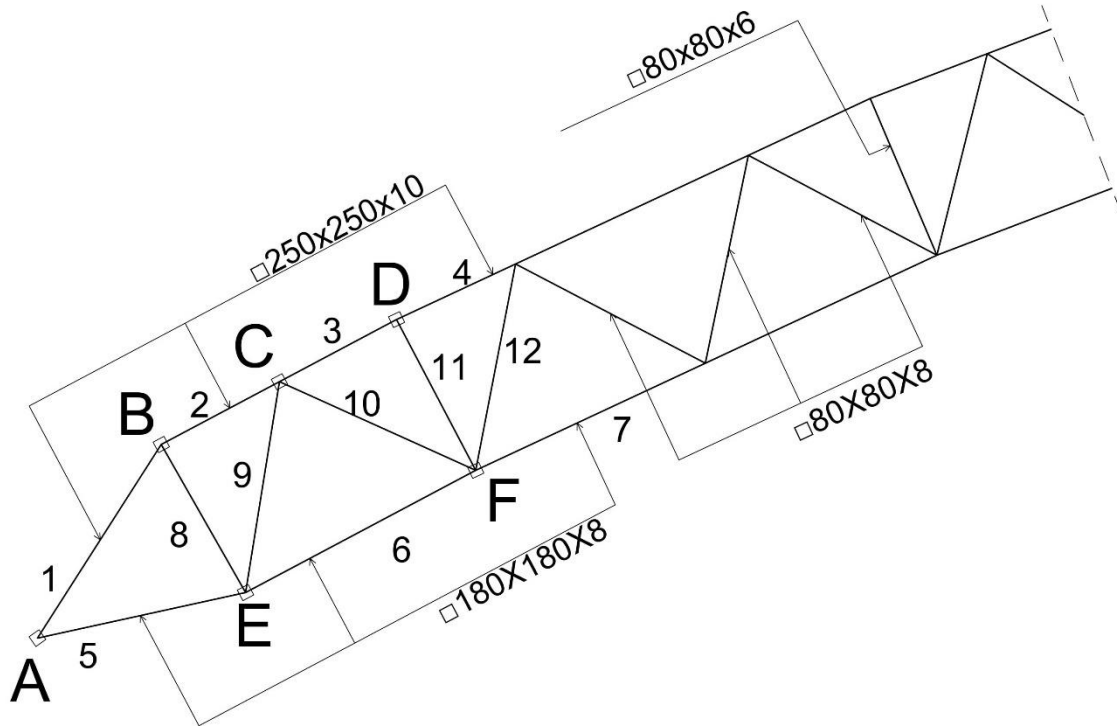
-sprawdzenie warunku nośności

$$\frac{N_{t,Ed}}{N_{t,Rd}} = \frac{551,97}{617,70} = 0,89 < 1,0$$

Warunek nośności spełniony.

## 7.6. Sprawdzenie nośności węzłów dźwigara

W ramach wymiarowania węzłów dźwigara kratowego przeprowadzono obliczenia dla węzłów najbardziej wyężonych zlokalizowanych zgodnie z Rys. 7.21.

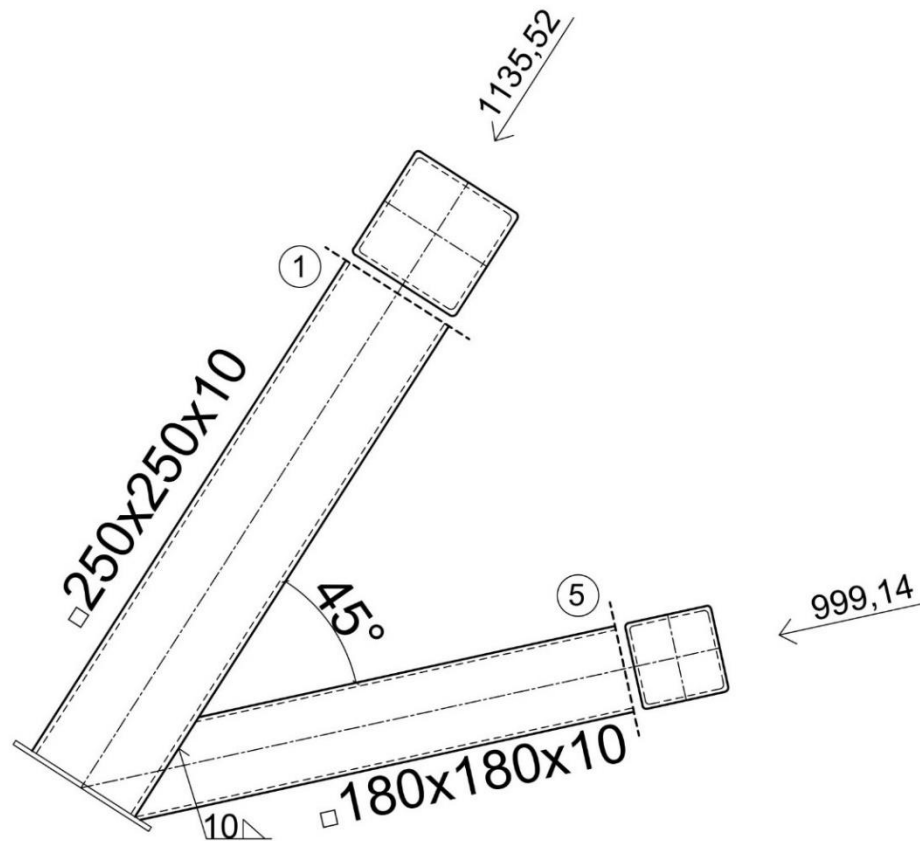


Rys. 7.21. Przyjęte do wymiarowania węzły dźwigara

Tabela 7.4. Charakterystyki prętów oraz zestawienie sił w prętach

Pręt	Długość [mm]	Wymiary przekroju [mm]	Siła podłużna [kN]
1	2700	□250x250x10	-1135,2
2	1650	□250x250x10	-1003,56
3	1510	□250x250x10	-1420,96
4	6140	□250x250x10	-1333,67
5	2500	□180x180x10	-999,14
6	3060	□180x180x10	-921,05
7	6030	□180x180x10	-728,32
8	2000	□80x80x6	551,97
9	2530	□80x80x8	336,67
10	2510	□80x80x8	-351,88
11	2000	□80x80x6	-60,75
12	2590	□80x80x8	163,80

## 7.6.1. Sprawdzenie nośności węzła A



Rys. 7.22. Schemat węzła podporowego A

- Dane geometryczne węzła

pas: RK 250x250x10 :  $A_1 = 9490 \text{ mm}^2$

krzyżulec: RK 180x180x10:  $A_5 = 5440 \text{ mm}^2$

$\theta_1 = 45^\circ$

- Zakres ważności formuł nośności węzłów spawanych (warunki konstrukcyjne)

$$0,25 < \beta = \frac{b_1}{b_0} = \frac{180}{250} = 0,72 < 0,85$$

$$\frac{b_i}{t_i} = \frac{80}{4} = 20 \leq 35$$

$$15 < \frac{b_0}{t_0} = \frac{180}{10} = 18 < 35$$

$$\frac{d_0}{t_0} \geq 15 \rightarrow \frac{250}{10,0} = 25 \geq 15$$

- Określenie nośności węzła

$$v = \frac{b_0}{2t_0} = \frac{250}{2 \cdot 10} = 12,5$$

$$n' = \frac{N_{0,p}}{A_0 \cdot f_0} = \frac{-1135\,520}{9490 \cdot 305} = -0,39$$

$$f(n') = 1 + 0,3n' - 0,3(n')^2 = 1 + 0,3 \cdot (-0,39) - 0,3(-0,39)^2$$

$$f(n') = 0,84$$

$$N_{Rj1} = \frac{f_0 t_0^2}{\sin \theta_1} (2,8 + 14,2\beta^2) v^{0,2} f(n')$$

$$N_{Rj1} = \frac{305 \cdot 10^2}{0,71} (2,8 + 14,2 \cdot 0,72^2) \cdot 12,5^{0,2} \cdot 0,84 = 6076,47 \text{ kN}$$

◦ Sprawdzenie nośności węzła

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rj1}} = \frac{1135,52}{6076,47} = 0,19$$

• Sprawdzenie nośności spoin

$$\tau = \frac{N_r}{al_w} \sqrt{\left(\frac{\sin \theta}{\alpha_1}\right)^2 + \left(\frac{\cos \theta}{\alpha_1}\right)^2} < f_d$$

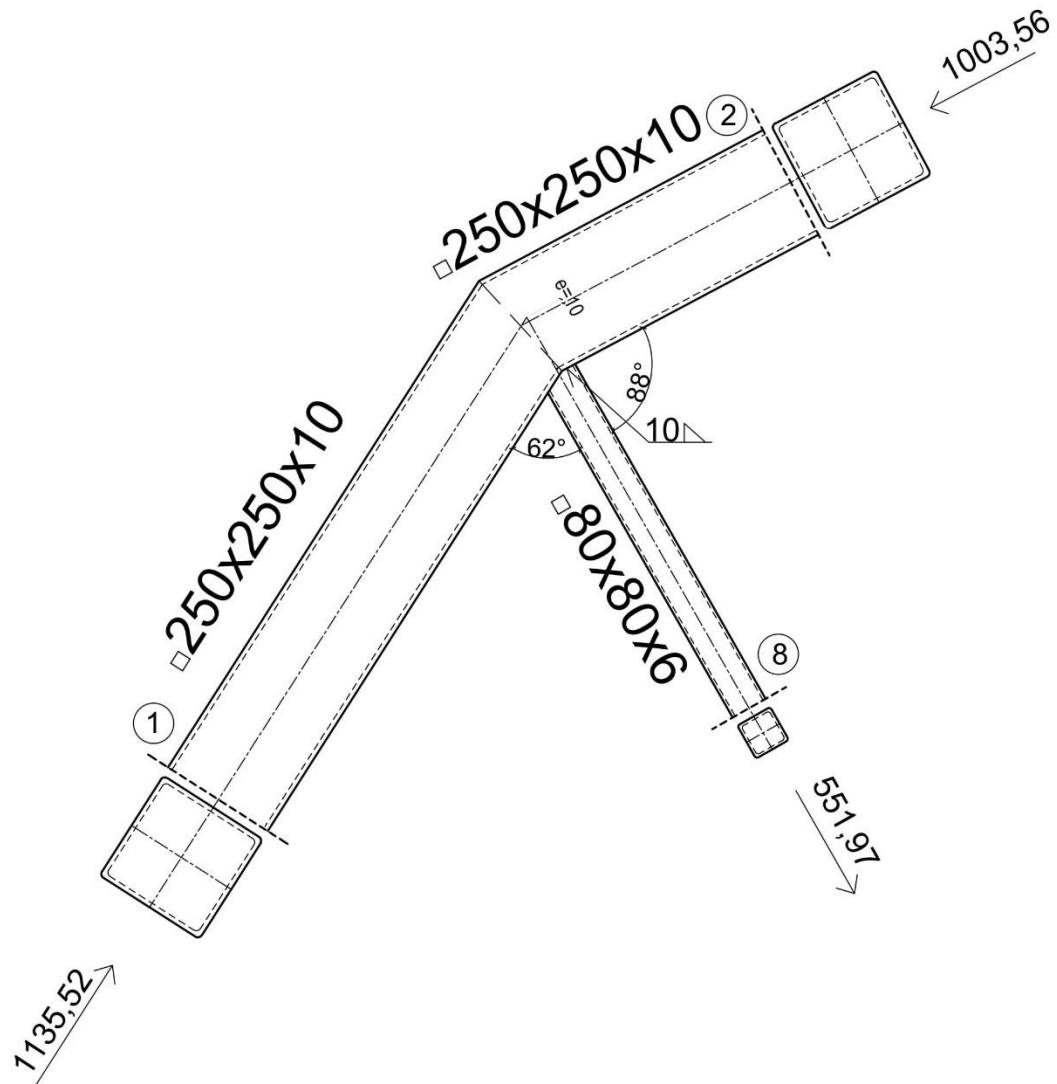
$$l_w = \frac{2h_1}{\sin \theta_1} + 2b_1 = \frac{2 \cdot 180}{\sin 45} + 2 \cdot 180 = 869,12 \text{ mm}$$

$$\tau = \frac{N_r}{al_w} \sqrt{\left(\frac{\sin \theta}{\alpha_1}\right)^2 + \left(\frac{\cos \theta}{\alpha_{\parallel}}\right)^2}$$

$$\tau = \frac{1135\,520}{10 \cdot 869,12} \cdot \sqrt{\left(\frac{\sin 45}{0,8}\right)^2 + \left(\frac{\cos 45}{0,7}\right)^2} = 175,37 < 305$$

### 7.6.2. Sprawdzenie nośności węzła B

Przyjęto, że węzeł B jest połączeniem typu K, w którym dwa pręty (pasy) są połączone z jednym elementem skratowania. Pręty przecinają się w węźle w sposób mimośrodowy ( $e_0 = 10 \text{ mm}$ ). Geometrie połączenia pokazano na Rys. 7.23.



Rys. 7.23. Schemat węzła B

- Dane geometryczne węzła

pas: RK 250x250x10 :  $A_2 = 9490 \text{ mm}^2$

krzyżulec: RK 80x80x6:  $A_8 = 1740 \text{ mm}^2$

RK 250x250x10 :  $A_1 = 9490 \text{ mm}^2$

$\theta_1 = 66^\circ$

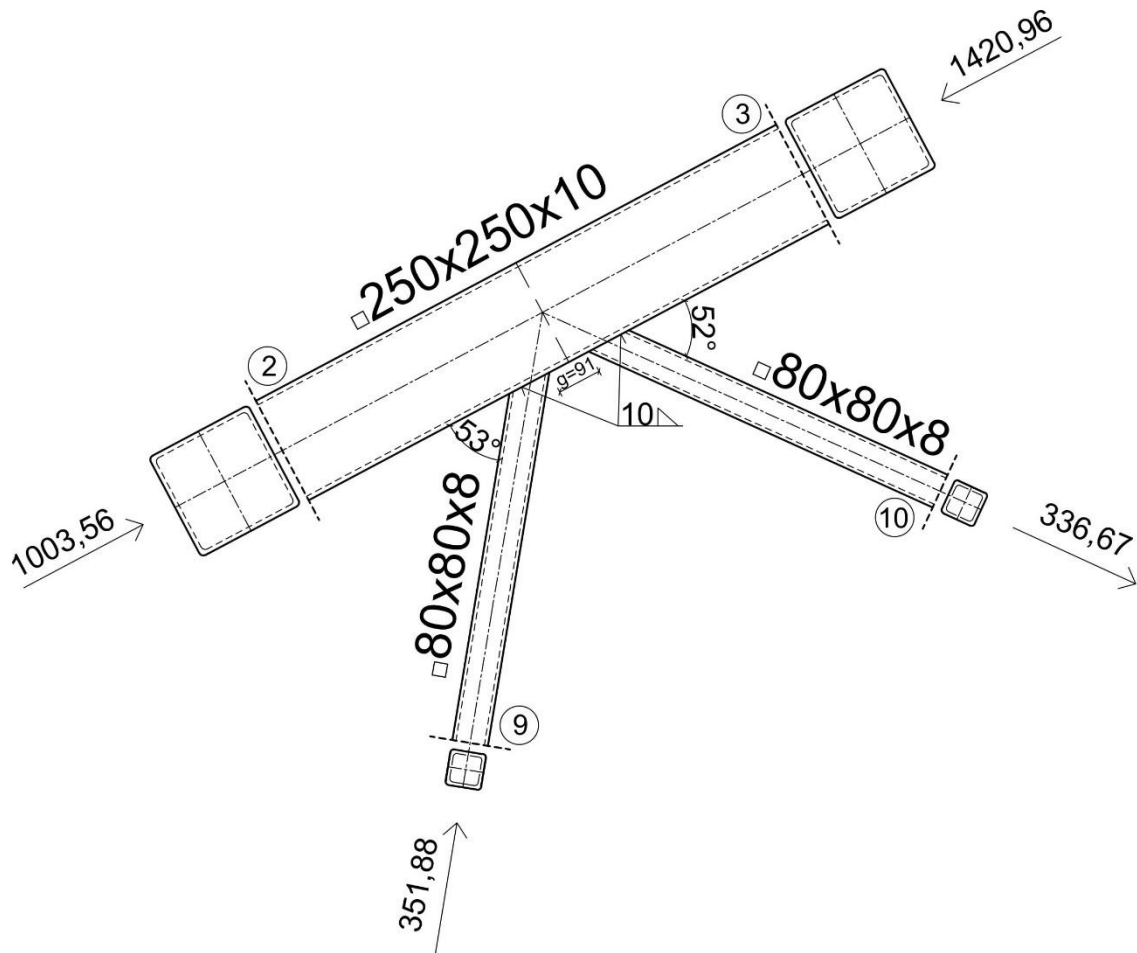
$\theta_2 = 88^\circ$

$e_0 = 10 \text{ mm}$

Obliczenie węzła wykonano przy użyciu funkcji „Wymiarowanie stali → Połączenia” w programie ARSA. Notka obliczeniowa tego połączenia znajduje się w Załączniku 1.

### 7.6.3. Sprawdzenie nośności węzła C

Przyjęto, że węzeł C jest połączeniem typu K, w którym dwa krzyżulce są połączone z pasem zgodnie z Rys. 7.24.



Rys. 7.24. Schemat węzła C

- Dane geometryczne węzła

pas: RK 250x250x10 :  $A_2 = A_3 = 9490 \text{ mm}^2$

krzyżulce: RK 80x80x8:  $A_9 = A_{10} = 2240 \text{ mm}^2$

$$\theta_1 = 53^\circ$$

$$\theta_2 = 52^\circ$$

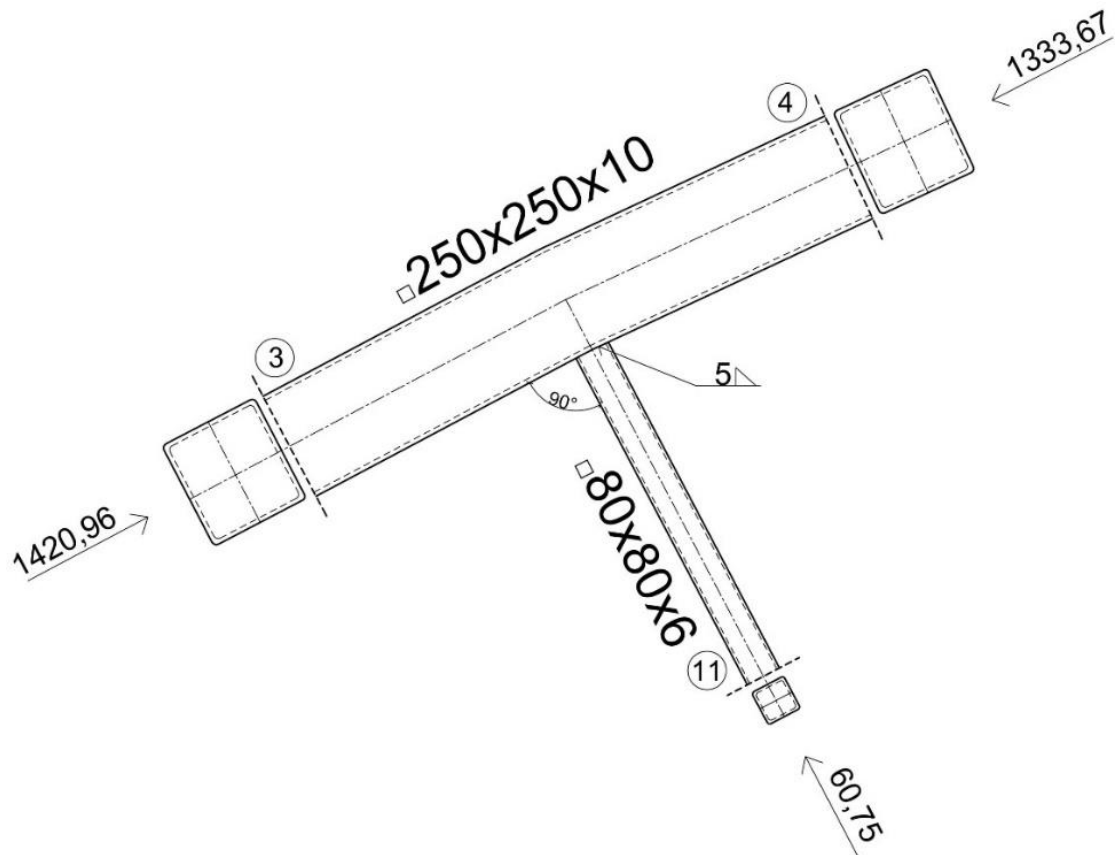
$$g = 91 \text{ mm}$$

Obliczenie węzła wykonano przy użyciu funkcji „Wymiarowanie stali → Połączenia” w programie ARSA. Notka obliczeniowa tego połączenia znajduje się w Załączniku 1.



#### 7.6.4. Sprawdzenie nośności węzła D

Przyjęto, że węzeł D jest połączeniem typu T, w którym pas jest połączony z słupkiem zgodnie z Rys. 7.25.



Rys. 7.25. Schemat węzła D

- Dane geometryczne węzła

pas: RK 250x250x10 :  $A_3 = A_4 = 9490 \text{ mm}^2$

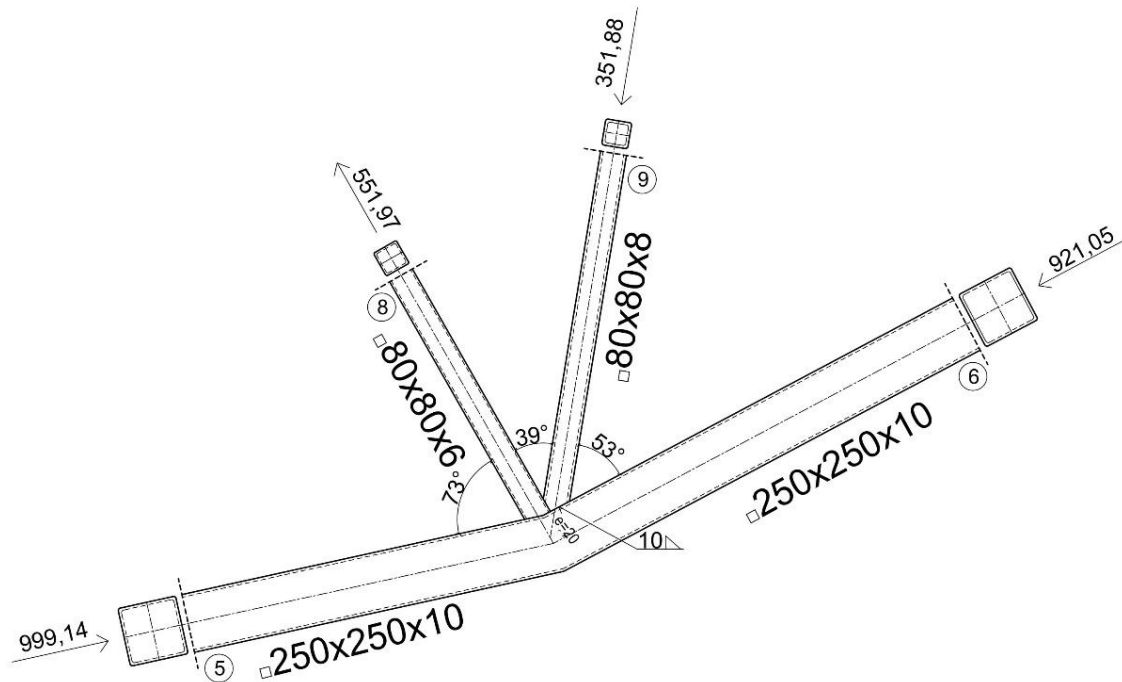
słupki: RK 80x80x6:  $A_{11} = 1740 \text{ mm}^2$

$\theta_1 = 90^\circ$

Obliczenie węzła wykonano przy użyciu funkcji „Wymiarowanie stali → Połączenia” w programie ARSA. Notka obliczeniowa tego połączenia znajduje się w Załączniku 1.

### 7.6.5. Sprawdzenie nośności węzła E

Przyjęto, że węzeł E jest połączeniem typu K, w którym dwa pręty (pasy) są połączone z elementami skratowania (słupkiem i krzyżulcem). Pręty przecinają się w węźle w sposób mimośrodkowy ( $e_0 = 20 \text{ mm}$ ) zgodnie z Rys. 7.26.



Rys. 7.26. Schemat węzła E

- Dane geometryczne węzła

pas: RK 250x250x10 :  $A_5 = A_6 = 9490 \text{ mm}^2$

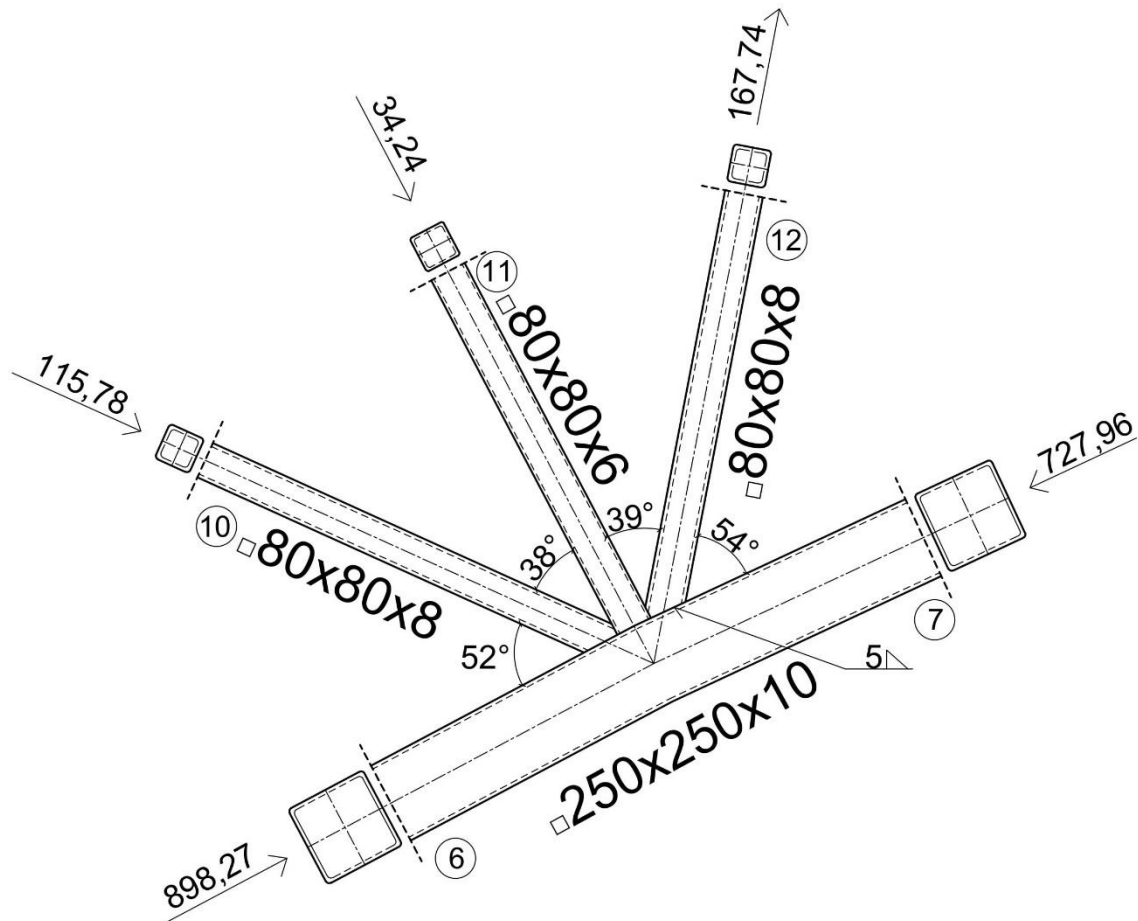
słupek: RK 80x80x6:  $A_8 = 1740 \text{ mm}^2$

krzyżulec: RK 80x80x8:  $A_9 = 2240 \text{ mm}^2$

Obliczenie węzła wykonano przy użyciu funkcji „Wymiarowanie stali → Połączenia” w programie ARSA. Notka obliczeniowa tego połączenia znajduje się w Załączniku 1.

### 7.6.6. Sprawdzenie nośności węzła F

Przyjęto, że węzeł F jest połączeniem typu KT, w którym pas jest połączony z elementami skratowania (słupkiem i krzyżulcami) zgodnie z Rys. 7.27.



Rys. 7.27. Schemat węzła F

- Dane geometryczne węzła

pas: RK 250x250x10 :  $A_6 = A_7 = 9490 \text{ mm}^2$

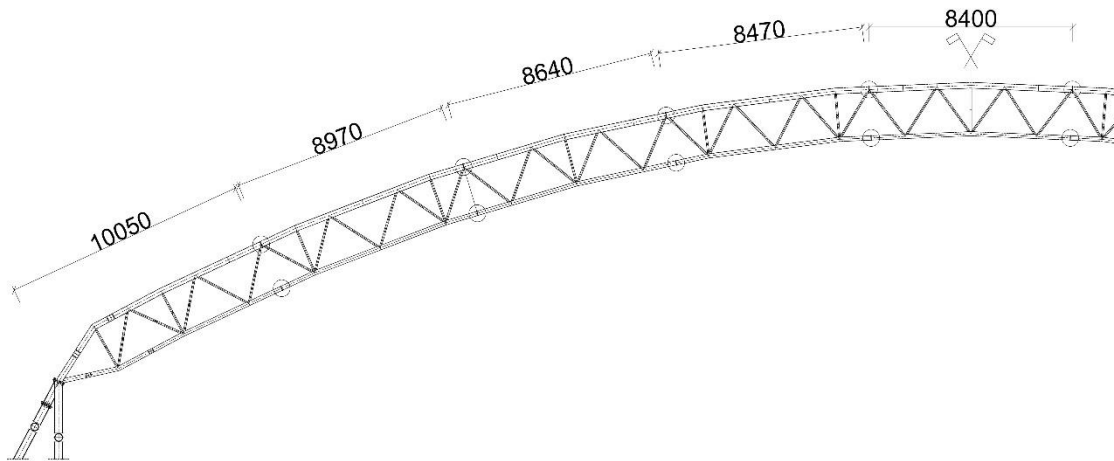
słupek: RK 80x80x6:  $A_{11} = 1740 \text{ mm}^2$

krzyżulce: RK 80x80x8:  $A_{10} = A_{12} = 2240 \text{ mm}^2$

Obliczenie węzła wykonano przy użyciu funkcji „Wymiarowanie stali → Połączenia” w programie ARSA. Notka obliczeniowa tego połączenia znajduje się w Załączniku 1.

## 7.7. Połączenia montażowe

We wiązarze dachowym zastosowano styki montażowe zlokalizowane według Rys. 7.28. Połączenia zaprojektowano jak połączenia doczołowe kategorii E zgodnie z [N6]. Do połączenia zastosowano śruby wysokiej wytrzymałości. Obliczenia styków wykonano przy użyciu programu ARSA.

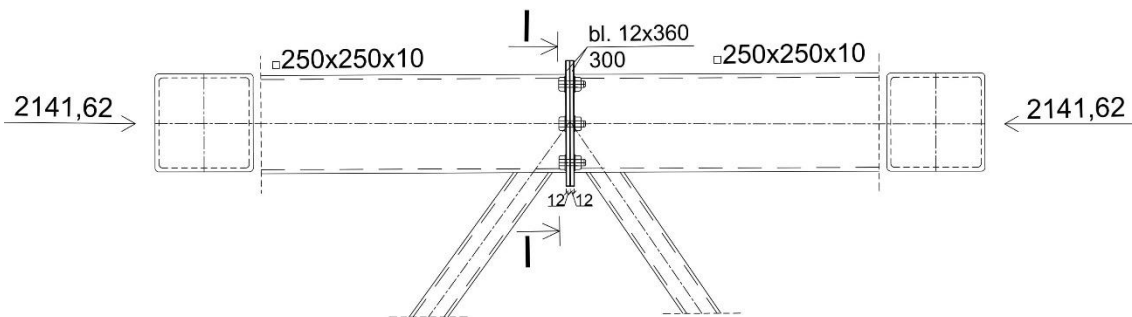


Rys. 7.28. Styki montażowe w dźwigarze kratowym

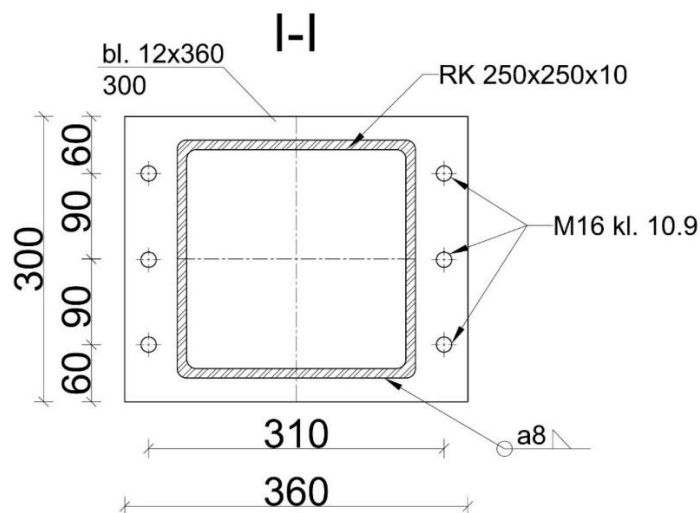
### 7.7.1. Połączenie montażowe w pasie górnym

W pasie górnym zaprojektowano połączenie doczołowe. Przyjęto 6 śrub M16 klasy 10.9 oraz blachy czołowe 12 mm ze stali S355. Rozwiązanie węzła przedstawiono na Rys. 7.29. Wymiarowanie połączenia wykonano przy użyciu programu ARSA.

a)



b)

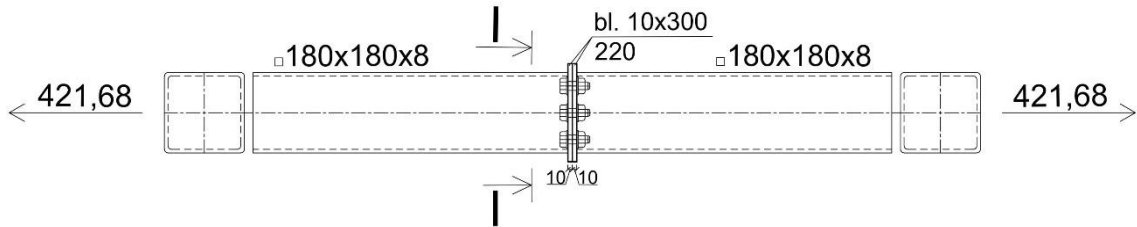


Rys. 7.29. Styk montażowy pasa górnego wiązara: a) widok, b) szczegół I-I

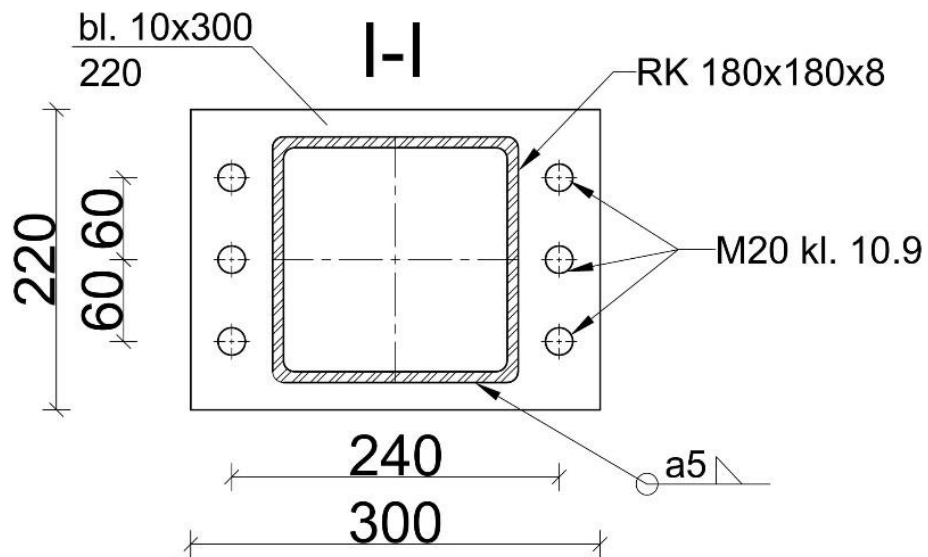
### 7.7.2. Połączenie montażowe w pasie dolnym

W pasie dolnym zaprojektowano połączenie doczołowe. Przyjęto 6 śrub M20 klasy 10.9 oraz blachy czołowe 10 mm ze stali S355. Rozwiązanie węzła przedstawiono na Rys. 7.30. Wymiarowanie połączenia wykonano przy użyciu programu ARSA.

a)



b)



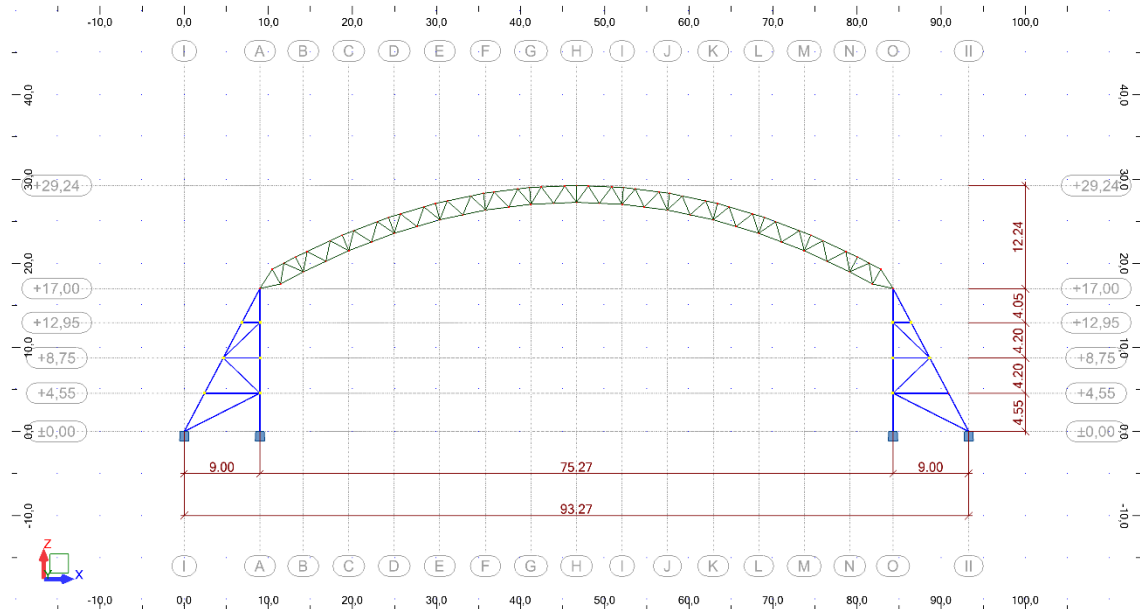
Rys. 7.30. Styk montażowy pasa dolnego wiazara: a) widok, b) szczegół I-I



## 8. Poz. 4. Konstrukcja wsporcza

### 8.1. Schemat statyczny

Schematem statycznym głównego układu poprzecznego hali jest dźwigar oparty przegubowo na głowicy konstrukcji wsporczej utwierdzonej w fundamencie.



Rys. 8.1. Schemat statyczny głównego układu poprzecznego hali

### 8.2. Zestawienie obciążeń

Zestawienie obciążeń jak w punkcie 7.3.

### 8.3. Obliczenia statyczne

Obliczenia statyczne wykonano w programie obliczeniowym ARSA dla kombinacji przedstawionych w punkcie 7.4.

### 8.4. Sprawdzenie stanu granicznego nośności

#### 8.4.1. Obliczanie słupa pionowego konstrukcji

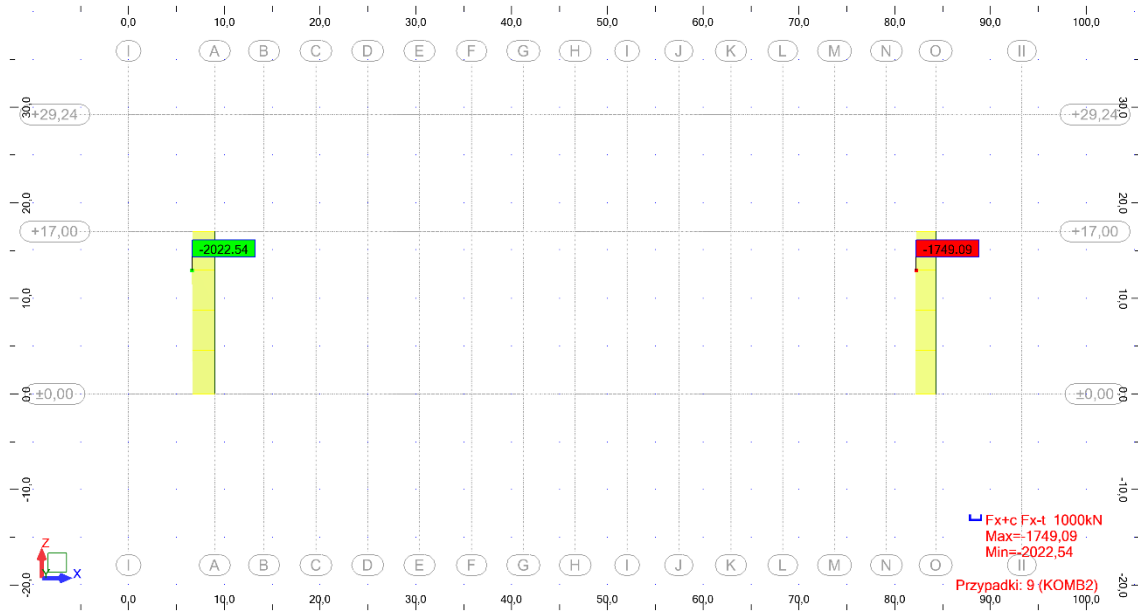
Maksymalne siły przekrojowe w elemencie uzyskane dla kombinacji obciążeń:

$$\text{KOMB 2} \rightarrow 0,85 \cdot 1,35 \cdot G + 1,5 \cdot S_2$$

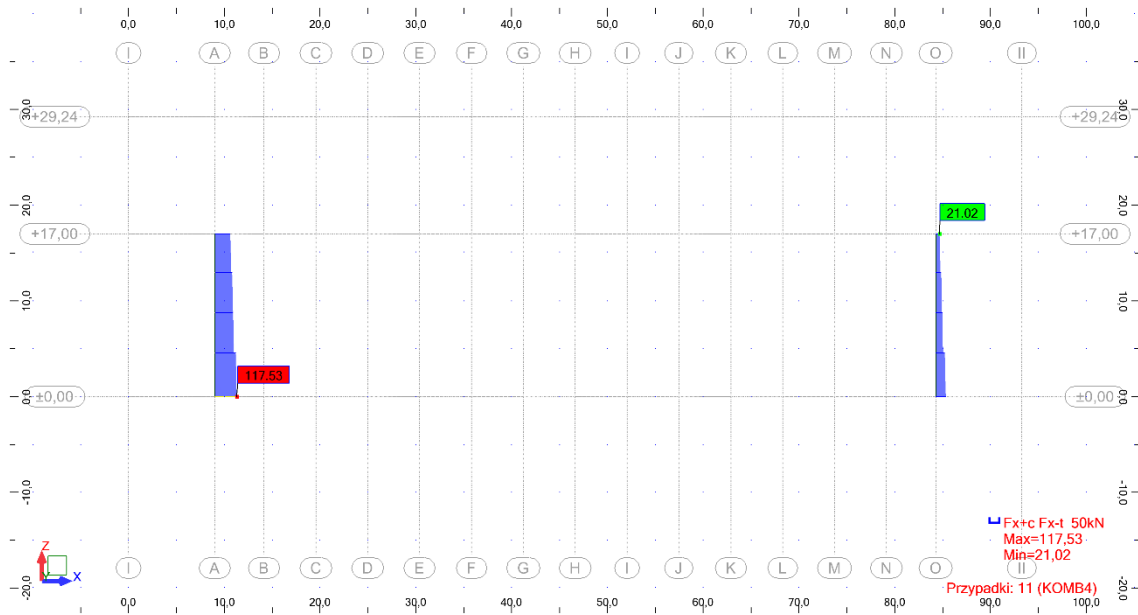
$$\text{KOMB 4} \rightarrow 1,00 \cdot G + 1,5 \cdot (W_{e1s} + W_{is})$$

Korzystając z funkcji selekcji w ARSA wyznaczano siły tylko dla słupa pionowego zgodnie z Rys. 8.2.

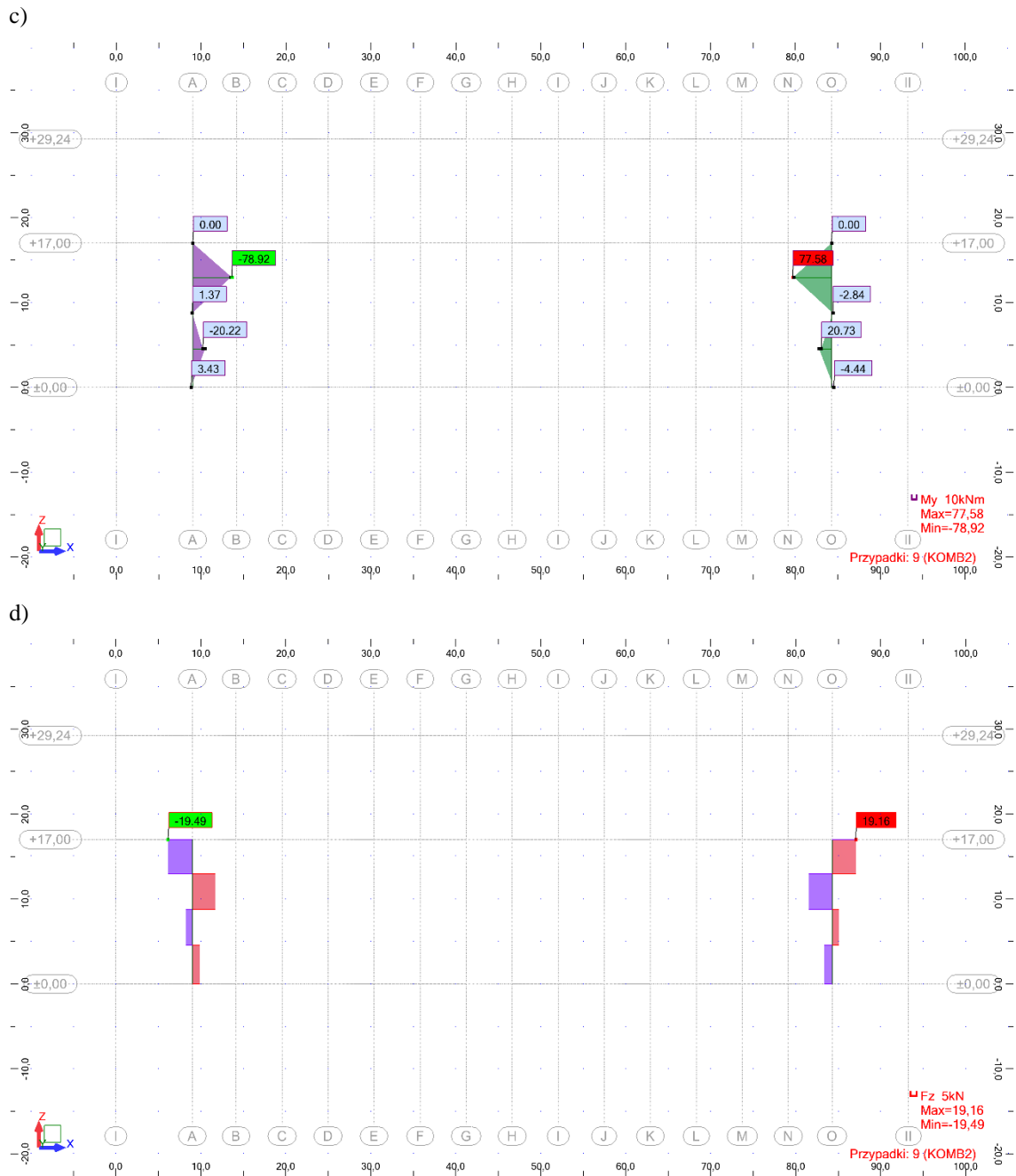
a)



b)







Rys. 8.2. Wyniki obliczeń statycznych dla słupa pionowego: a) KOMB 2 - siły podłużne (rozciąganie), c) KOMB 2 - momenty zginające, b) KOMB 4 - siły podłużne (ściskanie), d) KOMB 2 - siły tnące

- **Sily wewnętrzne**

max siła rozciągająca:  $N_{t,Ed} = 2022,54 \text{ kN}$

max siła ściskająca:  $N_{c,Ed} = 117,53 \text{ kN}$

max moment zginający:  $M_{y,Ed} = 78,92 \text{ kNm}$

max siła tnąca:  $V_{z,Ed} = 19,49 \text{ kN}$

- **Charakterystyki geometryczne słupa pionowego**

Przyjęto kształtownik RO 323,9x16

$$d=h= b= 323,9 \text{ mm}$$

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

$$A=15500 \text{ mm}^2$$

$$I_y=I_z= 18390 \cdot 10^4$$

$$W_{pl,y}=W_{pl,z}=1518,20 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

$$i_y=i_z=109 \text{ mm}$$

- **Parametry mechaniczne stali**

$$t_{\max}=t_f=16 \text{ mm} < 40 \text{ mm} \rightarrow f_y=355 \text{ MPa}$$

$$f_u=510 \text{ MPa}$$

- **Określenie klasy przekroju**

-współczynnik  $\varepsilon$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{355}} = 0,81$$

-smukłość ścianki rury

$$\frac{c}{t} = \frac{h-3t}{t} = \frac{323,9-3 \cdot 16}{16} = 17,24 < 33\varepsilon = 33 \cdot 0,81 = 26,73 \rightarrow \text{klasa 1}$$

Kształtownik spełnia wymagania klasy 1.

- **Sprawdzenie nośności przekroju na rozciąganie**

-obliczenie nośności przekroju

$$N_{t,Rd} = \frac{Af_y}{\gamma_{M0}} = \frac{15500 \cdot 355}{1,0} = 5502,50 \cdot 10^3 \text{ N} = 5502,50 \text{ kN}$$

-sprawdzenie warunku nośności

$$\frac{N_{t,Ed}}{N_{t,Rd}} = \frac{2022,54}{5502,50} = 0,37 < 1,0$$

Warunek nośności spełniony.

- **Sprawdzenie nośności przekroju na zginanie**

-obliczenie nośności przekroju

$$M_{y,Rd} = M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{1518,2 \cdot 10^3 \cdot 355}{1,0} = 538,96 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

$$M_{y,Rd} = M_{pl,Rd} = 538,96 \text{ kNm}$$

-sprawdzenie warunku nośności

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} = \frac{78,92}{539,96} = 0,15 < 1,0 \rightarrow \text{warunek nośności spełniony.}$$

- **Sprawdzenie nośności przekroju na ściskanie**

-określenie klasy przekroju

-współczynnik  $\varepsilon$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{355}} = 0,81$$

-smukłość ścianki rury

$$\frac{c}{t} = \frac{h-3t}{t} = \frac{323,9-3 \cdot 16}{16} = 17,24 < 33\varepsilon = 33 \cdot 0,81 = 26,73 \rightarrow \text{klasa 1}$$

Kształtownik spełnia wymagania klasy 1.

-obliczenie nośności przekroju

$$N_{c,Rd} = \frac{Af_y}{\gamma_{M0}} = \frac{15500 \cdot 355}{1,0} = 5502,5 \cdot 10^3 \text{ N} = 5502,5 \text{ kN}$$

-sprawdzenie warunku nośności

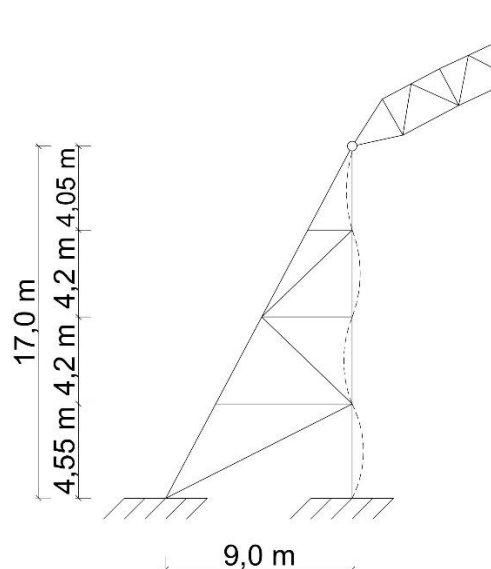
$$\frac{N_{c,Ed}}{N_{c,Rd}} = \frac{117,53}{5502,5} = 0,02 < 1,0$$

Warunek nośności spełniony.

- **Nośność elementu z uwzględnieniem stateczności**

- Nośność na wyboczenie w płaszczyźnie słupa

-długość wyboczeniowa



Rys. 8.3. Długość wyboczeniowa słupa w płaszczyźnie

dla kształtowników zamkniętych:  $L_{cr}=L_w$

gdzie :  $L_w$  - odległość między węzłami (teoretyczna)

$L_{cr,y}=L_w=4,55 \text{ m}$

-wartość odniesienia do wyznaczenia smukłości względnej

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{\varepsilon}{f_y}} = 93,9\varepsilon = 93,9 \cdot 0,81 = 76,06$$

-smukłość względna

$$\bar{\lambda}_y = \frac{L_{cr,y}}{i_y} \cdot \frac{1}{\lambda_1} = \frac{4550}{109} \cdot \frac{1}{76,06} = 0,55$$

-parametr imperfekcji

krzywa wybozeniowa „a” →  $\alpha=0,21$

-parametr krzywej niestateczności

$$\phi=0,5[1+\alpha_y(\lambda_y - 0,2) + \lambda_y^2]=0,5[1+0,21\cdot(0,55-0,20)+0,55^2] = 0,69$$

-współczynnik wybozeniowy

$$\chi_y = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda^2}} = \frac{1}{0,69 + \sqrt{0,69^2 - 0,55^2}} = 0,90$$

-nośność elementu

$$N_{b,Rd} = \chi \cdot \frac{Af_y}{\gamma_{M0}} = 0,90 \cdot \frac{15500 \cdot 355}{1,0} = 4952,25 \cdot 10^3 \text{ N} = 4952,25 \text{ kN}$$

-sprawdzenie warunku nośności

$$\frac{N_{c,Ed}}{N_{b,Rd}} = \frac{117,53}{4952,25} = 0,024 < 1,0$$

Warunek nośności spełniony.

- Nośność na wybozenie z płaszczyzny kratownicy

-długość wybozeniowa (zgodnie z Rys. 6.16.)

$$L_{cr,z} = 17,0 \text{ m}$$

-wartość odniesienia do wyznaczenia smukłości względnej

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{\varepsilon}{f_y}} = 93,9\varepsilon = 93,9 \cdot 0,81 = 76,06$$

-smukłość względna

$$\bar{\lambda}_z = \frac{L_{cr,z}}{i_z} \cdot \frac{1}{\lambda_1} = \frac{17000}{109} \cdot \frac{1}{76,06} = 2,05$$

-parametr imperfekcji

krzywa wybozeniowa „a” →  $\alpha=0,21$

-parametr krzywej niestateczności

$$\phi=0,5[1+\alpha_y(\lambda_z - 0,2) + \lambda_z^2]=0,5[1+0,21\cdot(2,05-0,20)+2,05^2] = 2,80$$

-współczynnik wybozeniowy

$$\chi_z = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda^2}} = \frac{1}{2,80 + \sqrt{2,80^2 - 2,05^2}} = 0,21$$

-nośność elementu

$$N_{b,Rd} = \chi \cdot \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} = 0,21 \cdot \frac{15500 \cdot 355}{1,0} = 1155,53 \cdot 10^3 \text{ N} = 1155,53 \text{ kN}$$

-sprawdzenie warunku nośności

$$\frac{N_{c,Ed}}{N_{b,Rd}} = \frac{117,53}{1155,53} = 0,10 \leq 1,0$$

Warunek nośności spełniony.

◦ **Nośność elementu przy zwężeniu**

Element niepodatny na zwężenie  $\rightarrow \chi_{LT} = 1,0$

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot \frac{W_y f_y}{\gamma_{M1}} = 1,0 \cdot \frac{1518,20 \cdot 10^3 \cdot 355}{1,0} = 538,96 \cdot 10^6 \text{ Nmm} = 538,96 \text{ kNm}$$

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{b,Rd}} = \frac{78,92}{538,96} = 0,15 < 1,0$$

Warunek nośności spełniony.

◦ **Nośność elementu zginającego i ściskanego**

-współczynnik interakcji

Do wyznaczenia współczynników interakcji wykorzystano metodę 2 według załącznika B (element niewrażliwy na deformacje skrętną). Współczynnik równoważnego stałego momentu  $C_{my}$  (oś zginania y-y, kierunek podparcia z-z).

$$\alpha_s = \frac{M_s}{M_h} = \frac{20,22}{-78,92} = -0,26$$

$$C_{my} = 0,1 - 0,8 \cdot \alpha_s = 0,1 - 0,8 \cdot (-0,26) = 0,31$$

-nośności charakterystyczne przekroju:

przy ściskaniu:

$$N_{Rk} = A \cdot f_y = 15500 \cdot 355 = 5502,5 \cdot 10^3 \text{ N} = 5502,5 \text{ kN}$$

przy zginaniu:

$$M_{Rk} = W_{pl,y} \cdot f_y = 1518,2 \cdot 10^3 \cdot 355 = 538,96 \cdot 10^6 \text{ Nmm} = 538,96 \text{ kNm}$$

$$\min \left\{ \begin{array}{l} C_{my} \left[ 1 + (\lambda_y - 0,2) \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right] \\ C_{my} \left[ \left[ 1 + 0,8 \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right] \right] \end{array} \right.$$

$$k_{yy} = \min \left\{ \begin{array}{l} 0,30 \cdot \left[ 1 + (0,57 - 0,2) \cdot \frac{117,53}{0,90 \cdot \frac{5502,5}{1,0}} \right] = 0,30 \\ 0,30 \cdot \left[ \left[ 1 + 0,8 \cdot \frac{117,53}{0,90 \cdot \frac{5502,5}{1,0}} \right] \right] = 0,31 \end{array} \right. = 0,30$$

$$k_{zy} = 0,6 \cdot k_{yy} = 0,6 \cdot 0,30 = 0,18$$

-sprawdzenie nośności elementu ściskanego i zginanego

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{Rk}}{\gamma_{M1}}} = \frac{117,53}{0,90 \cdot \frac{5502,5}{1,0}} + 0,30 \cdot \frac{78,92}{1,0 \cdot \frac{538,96}{1,0}} = 0,02 + 0,04 = 0,06 < 1,0$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{Rk}}{\gamma_{M1}}} = \frac{117,53}{0,90 \cdot \frac{5502,5}{1,0}} + 0,18 \cdot \frac{78,92}{1,0 \cdot \frac{538,96}{1,0}} = 0,02 + 0,03 = 0,05 < 1,0$$

Warunek nośności spełniony.

- **Nośność elementu zginającego i rozciąganego**

$$\frac{N_{t,Ed}}{N_{t,Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{Rk}} = \frac{2022,54}{5502,5} + \frac{78,92}{538,96} = 0,37 + 0,15 = 0,52 < 1,0$$

Warunek nośności spełniony.

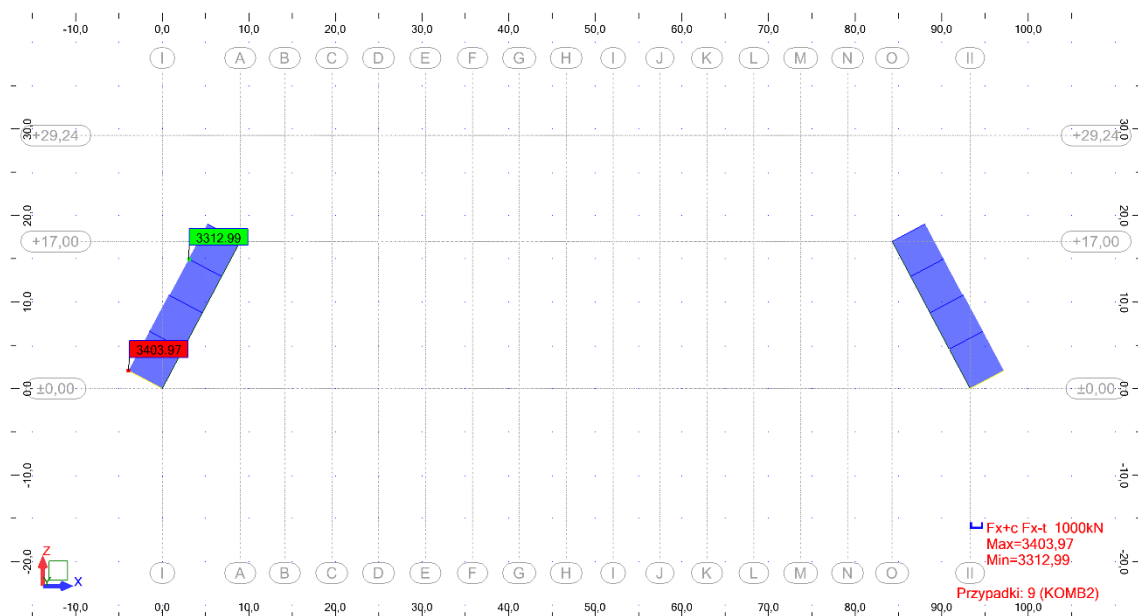
### 8.4.2. Obliczanie słupa ukośnego konstrukcji

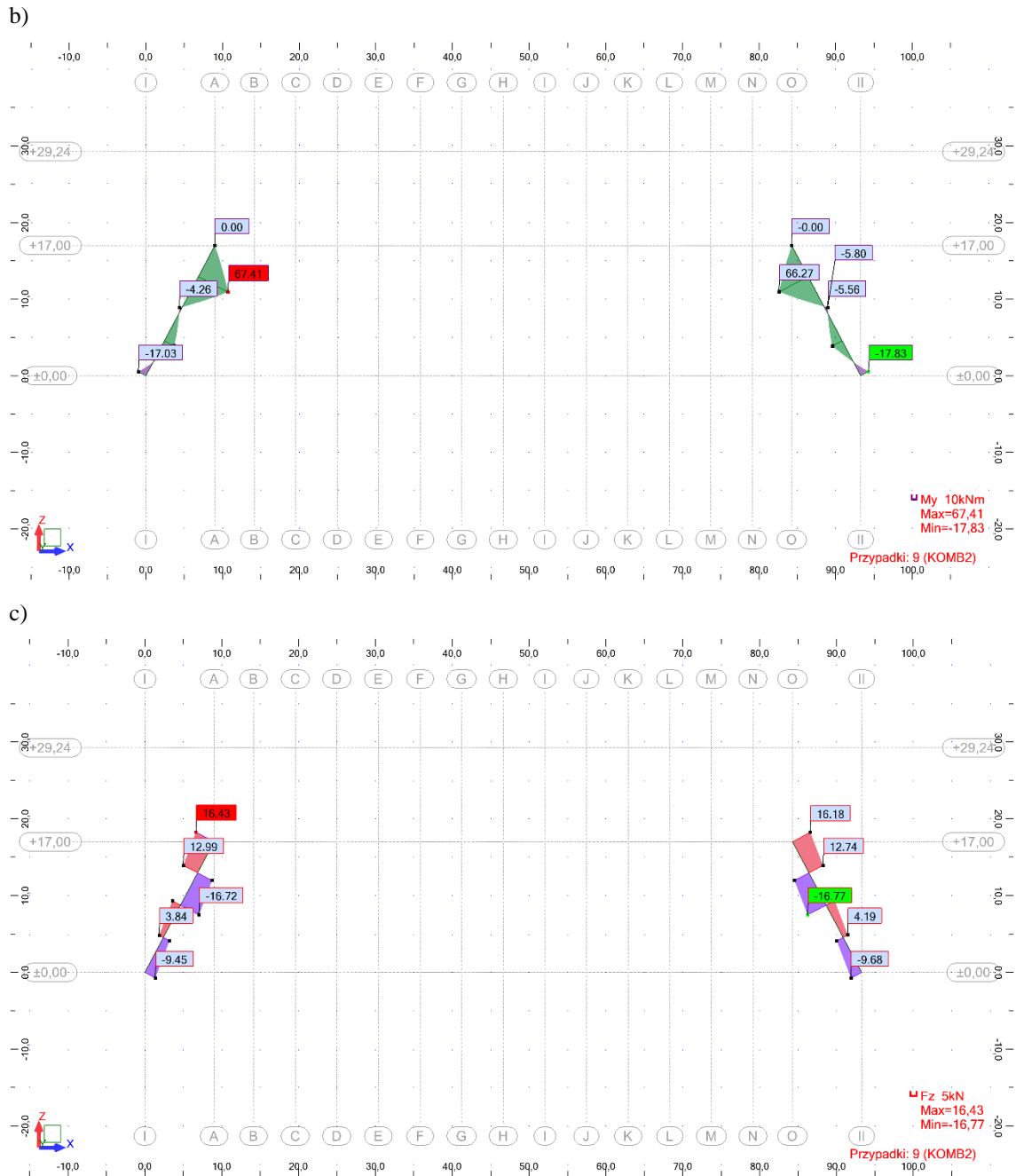
Maksymalne siły przekrojowe w elemencie uzyskane z kombinacji obciążeń

$$\text{KOMB 2} \rightarrow 0,85 \cdot 1,35 \cdot G + 1,5 \cdot S2$$

Korzystając z funkcji selekcji w ARSA wyznaczano siły tylko dla słupa ukośnego zgodnie z Rys. 8.4.

a)





Rys. 8.4. Wyniki obliczeń statycznych dla słupa ukośnego – KOMB4: a) siły podłużne b) momenty zginające c) siły tnące

- **Siły wewnętrzne**

max siła ściskająca:  $N_{c,Ed} = 3403,97 \text{ kN}$

max moment zginający:  $M_{y,Ed} = 67,41 \text{ kNm}$

max siła tnąca:  $V_{z,Ed} = 16,77 \text{ kN}$

- **Charakterystyki geometryczne pasa górnego**

Przyjęto kształtownik RO 323,9x16

$$d=h= b= 323,9 \text{ mm}$$

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

$$A=15500 \text{ mm}^2$$

$$I_y=I_z= 18390 \cdot 10^4$$

$$W_{pl,y}=W_{pl,z}=1518,20 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

$$i_y=i_z=109 \text{ mm}$$

- **Parametry mechaniczne stali**

$$t_{\max}=t_f=16 \text{ mm} < 40 \text{ mm} \rightarrow f_y=355 \text{ MPa}$$

$$f_u=510 \text{ MPa}$$

- **Określenie klasy przekroju**

-współczynnik  $\varepsilon$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{355}} = 0,81$$

-smukłość ścianki rury

$$\frac{c}{t} = \frac{h-3t}{t} = \frac{323,9-3 \cdot 16}{16} = 17,24 < 33\varepsilon = 33 \cdot 0,81 = 26,73 \rightarrow \text{klasa 1}$$

Kształtownik spełnia wymagania klasy 1.

- **Sprawdzenie nośności przekroju na zginanie**

-obliczenie nośności przekroju

$$M_{y,Rd} = M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{1518,2 \cdot 10^3 \cdot 355}{1,0} = 538,96 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

$$M_{y,Rd} = M_{pl,Rd} = 538,96 \text{ kNm}$$

-sprawdzenie warunku nośności

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} = \frac{67,41}{538,96} = 0,13 < 1,0$$

Warunek nośności spełniony.

- **Sprawdzenie nośności przekroju na ścinanie**

-obliczenie pole przekroju czynnego przy ścinaniu

$$A_V = \frac{A \cdot h}{b+h} = \frac{15500 \cdot 323,9}{323,9+323,9} = 7750 \text{ mm}^2$$



-obliczenie nośności przekroju na ścinanie

ponieważ

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{h-3t}{t} = \frac{323,9-3 \cdot 16}{16} = 17,24 < 72 \frac{\varepsilon}{\eta} = 72 \cdot \frac{0,81}{1,0} = 58,32$$

więc

$$V_{c,Rd} = V_{pl,Rd} = A_V \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 7750 \cdot \frac{355}{1,0} = 1588,43 \cdot 10^3 \text{ N} = 1588,43 \text{ kN}$$

-sprawdzenie warunku nośności

$$\frac{V_{z,Ed}}{V_{c,Rd}} = \frac{16,77}{1588,43} = 0,01 < 1,0$$

Warunek nośności spełniony.

◦ **Sprawdzenie nośności przekroju na ściskanie**

-obliczenie nośności przekroju

$$N_{c,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{15500 \cdot 355}{1,0} = 5502,5 \cdot 10^3 \text{ N} = 5502,5 \text{ kN}$$

-sprawdzenie warunku nośności

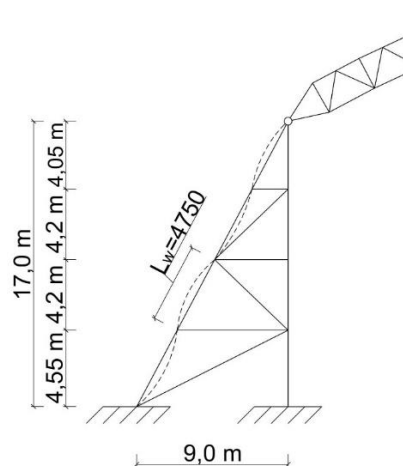
$$\frac{N_{c,Ed}}{N_{c,Rd}} = \frac{3403,97}{5502,5} = 0,62 < 1,0$$

Warunek nośności spełniony.

◦ **Nośność elementu z uwzględnieniem stateczności**

- Nośność na wyboczenie w płaszczyźnie kratownicy

-długość wyboczeniowa



Rys. 8.5. Długość wyboczeniowa słupa ukośnego w płaszczyźnie

dla kształtowników zamkniętych:  $L_{cr} = L_w$

gdzie :  $L_w$ - odległość między węzłami

$$L_{cr,y} = L_w = 4,75 \text{ m}$$

-wartość odniesienia do wyznaczenia smukłości względnej

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{\varepsilon}{f_y}} = 93,9\varepsilon = 93,9 \cdot 0,81 = 76,06$$

-smukłość względna

$$\bar{\lambda}_y = \frac{L_{cr,y}}{i_y} \cdot \frac{1}{\lambda_1} = \frac{4750}{109} \cdot \frac{1}{76,06} = 0,57$$

-parametr imperfekcji

krzywa wybozeniowa „a” →  $\alpha=0,21$

-parametr krzywej niestateczności

$$\phi = 0,5[1 + \alpha_y(\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2] = 0,5[1 + 0,21 \cdot (0,57 - 0,20) + 0,57^2] = 0,70$$

-współczynnik wybozeniowy

$$\chi_y = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = \frac{1}{0,70 + \sqrt{0,70^2 - 0,57^2}} = 0,90$$

-nośność elementu

$$N_{b,Rd} = \chi \cdot \frac{Af_y}{\gamma_{M0}} = 0,90 \cdot \frac{15500 \cdot 355}{1,0} = 4952,25 \cdot 10^3 \text{ N} = 4952,25 \text{ kN}$$

-sprawdzenie warunku nośności

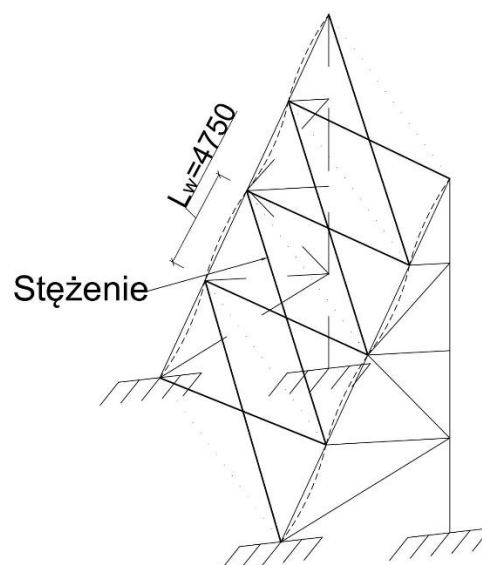
$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} = \frac{3403,97}{4952,25} = 0,69 < 1,0$$

Warunek nośności spełniony.

- **Nośność na wyboczenie z płaszczyzny kratownicy**

-długość wybozeniowa

$L_{cr,z} = 4,75 \text{ m}$  (zmniejszenie długości przez stężenie)



Rys. 8.6. Długość wybozeniowa z płaszczyzny

-wartość odniesienia do wyznaczenia smukłości względnej

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{\varepsilon}{f_y}} = 93,9\varepsilon = 93,9 \cdot 0,81 = 76,06$$

-smukłość względna

$$\bar{\lambda}_z = \frac{L_{cr,z}}{i_z} \cdot \frac{1}{\lambda_1} = \frac{4750}{109} \cdot \frac{1}{76,06} = 0,57$$

-parametr imperfekcji

krzywa wyboczeniowa „a”  $\rightarrow \alpha=0,21$

-parametr krzywej niestateczności

$$\phi = 0,5[1 + \alpha_z(\lambda_z - 0,2) + \lambda_z^2] = 0,5[1 + 0,21 \cdot (0,57 - 0,2) + 0,57^2] = 0,70$$

-współczynnik wyboczeniowy

$$\chi_z = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda^2}} = \frac{1}{0,70 + \sqrt{0,70^2 - 0,57^2}} = 0,90$$

-nośność elementu

$$N_{b,Rd} = 0,90 \cdot \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} = 0,87 \cdot \frac{15500 \cdot 355}{1,0} = 4952,25 \cdot 10^3 \text{ N} = 4952,25 \text{ kN}$$

-sprawdzenie warunku nośności

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} = \frac{3403,97}{4952,25} = 0,69 < 1,0$$

Warunek nośności spełniony.

◦ **Nośność elementu przy zwichrzeniu**

Element niepodatny na zwichrzenie  $\rightarrow \chi_{LT} = 1,0$

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot \frac{W_y f_y}{\gamma_{M1}} = 1,0 \cdot \frac{1518,20 \cdot 10^3 \cdot 355}{1,0} = 538,96 \cdot 10^6 \text{ Nmm} = 538,96 \text{ kNm}$$

Warunek nośności spełniony.

◦ **Nośność elementu zginającego i ściskanego**

-współczynnik interakcji

Do wyznaczenia współczynników interakcji wykorzystano metodę 2 według załącznika B (element niewrażliwy na deformacje skrętną). Współczynnik równoważnego stałego momentu  $C_{my}$  (oś zginania y-y, kierunek podparcia z-z).

$$\alpha_s = \frac{M_s}{M_h} = \frac{17,03}{-67,41} = -0,25$$

$$C_{my} = 0,1 - 0,8 \cdot \alpha_s = 0,1 - 0,8 \cdot (-0,25) = 0,30$$

-nośności charakterystyczne przekroju:

przy ściskaniu:

$$N_{Rk} = A \cdot f_y = 15500 \cdot 355 = 5502,5 \cdot 10^3 \text{ N} = 5502,5 \text{ kN}$$

przy zginaniu:

$$M_{Rk} = W_{pl,y} \cdot f_y = 1518,2 \cdot 10^3 \cdot 355 = 538,96 \cdot 10^6 \text{ Nmm} = 538,96 \text{ kNm}$$

$$\min \begin{cases} C_{my} \left[ 1 + (\lambda_y - 0,2) \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right] \\ C_{my} \left[ \left[ 1 + 0,8 \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right] \right] \end{cases}$$

$$k_{yy} = \min \begin{cases} 0,30 \cdot \left[ 1 + (0,57 - 0,2) \cdot \frac{3403,97}{0,90 \cdot \frac{5502,5}{1,0}} \right] = 0,38 \\ 0,30 \cdot \left[ \left[ 1 + 0,8 \cdot \frac{3403,97}{0,90 \cdot \frac{5502,5}{1,0}} \right] \right] = 0,46 \end{cases} = 0,38$$

$$k_{zy} = 0,6 \cdot k_{yy} = 0,6 \cdot 0,38 = 0,23$$

-sprawdzenie nośności elementu ściskanego i zginanego

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{Rk}}{\gamma_{M1}}} = \frac{3403,97}{0,90 \cdot \frac{5502,5}{1,0}} + 0,38 \cdot \frac{67,41}{1,0 \cdot \frac{538,96}{1,0}} = 0,69 + 0,05 = 0,74 < 1,0$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{Rk}}{\gamma_{M1}}} = \frac{3403,97}{0,90 \cdot \frac{5502,5}{1,0}} + 0,23 \cdot \frac{67,41}{1,0 \cdot \frac{538,96}{1,0}} = 0,69 + 0,03 = 0,72 < 1,0$$

Warunek nośności spełniony.

### 8.4.3. Obliczanie zastrzałów konstrukcji wsporczej

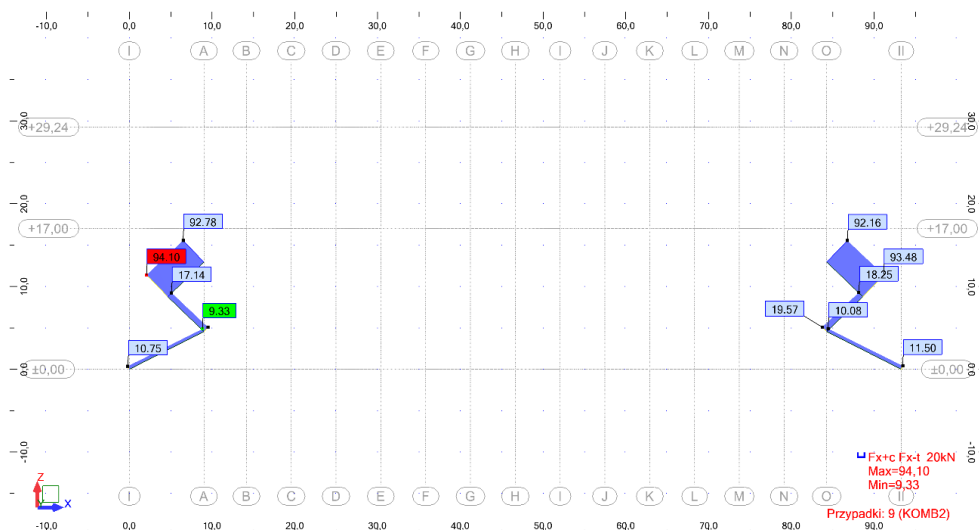
Maksymalne siły przekrojowe w elemencie uzyskane dla kombinacji obciążeń:

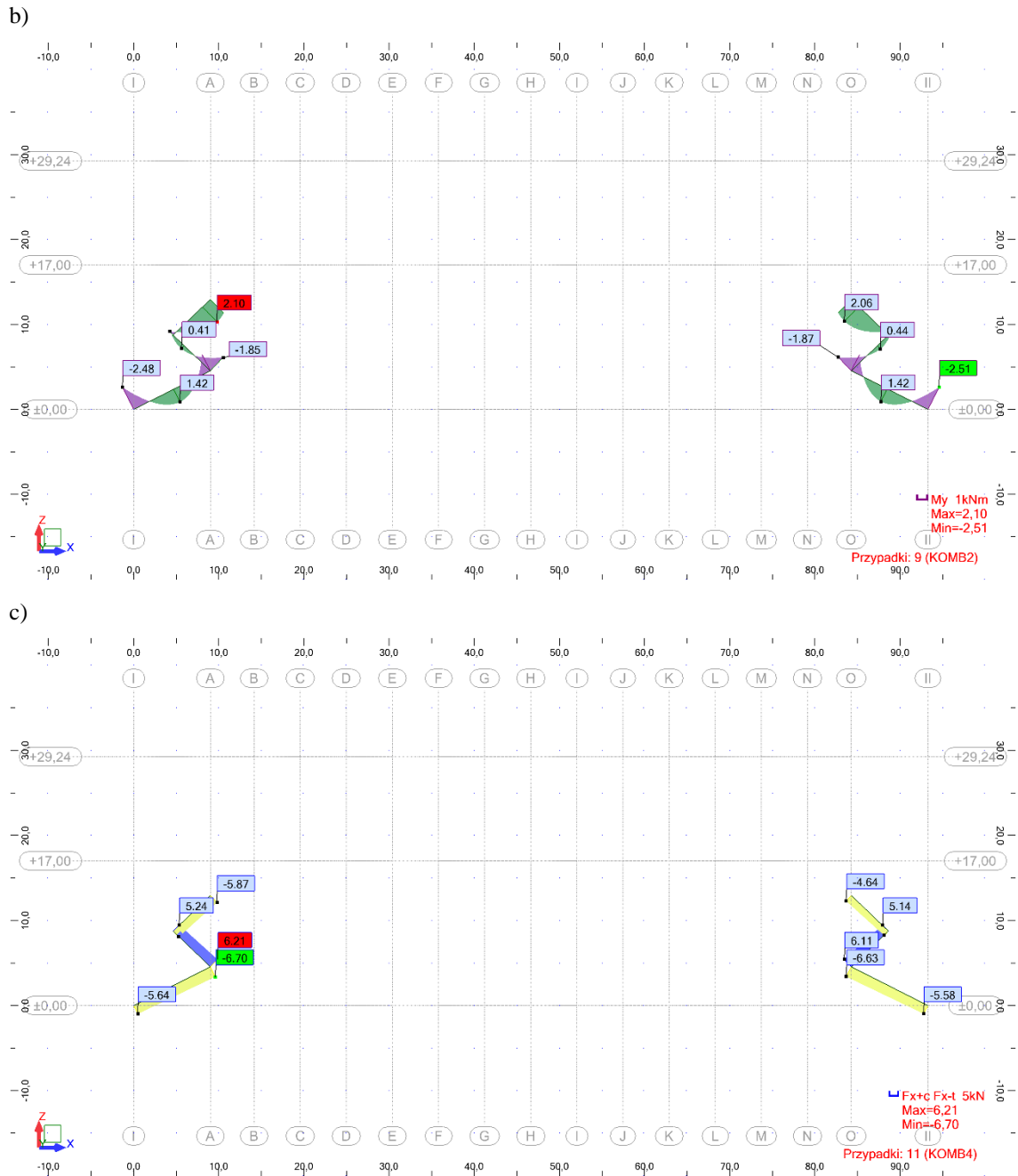
$$\text{KOMB 2} \rightarrow 0,85 \cdot 1,35 \cdot G + 1,5 \cdot S_2$$

$$\text{KOMB 4} \rightarrow 1,00 \cdot G + 1,5 \cdot (W_{e1s} + W_{is}) \text{ (max siła rozciągająca)}$$

Korzystając z funkcji selekcji w ARSA wyznaczano siły tylko dla pasa dolnego zgodnie z Rys. 8.7.

a)





Rys. 8.7. Wyniki obliczeń statycznych dla zastrzałów a) KOMB 4 - siły podłużne, b) KOMB2 - momenty zginające, c) KOMB 4 - podłużne (rozciąganie)

- **Siły wewnętrzne**

max siła ściskająca:  $N_{c,Ed} = 94,10 \text{ kN}$

max moment zginający:  $M_{y,Ed} = 2,48 \text{ kNm}$  → ze względu na znikomą wartość pominięto w dalszych obliczeniach

max siła rozciągająca:  $N_{t,Ed} = 6,70 \text{ kN}$

- **Charakterystyki geometryczne przekroju**

Przyjęto kształtownik RO 159x6,3

$$h = b = 159 \text{ mm}$$

$$t = 6,3 \text{ mm}$$

$$A = 3020 \text{ mm}^2$$

$$I_y = I_z = 882 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

$$W_{pl,y} = W_{pl,z} = 146,98 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

$$i_y = i_z = 54 \text{ mm}$$

- **Parametry mechaniczne stali**

$$t_{\max} = t_f = 6,3 \text{ mm} < 40 \text{ mm} \rightarrow f_y = 355 \text{ MPa}$$

$$f_u = 510 \text{ MPa}$$

- **Sprawdzenie nośności przekroju na rozciąganie**

-obliczenie nośności przekroju

$$N_{t,Rd} = \frac{Af_y}{\gamma_{M0}} = \frac{3020 \cdot 355}{1,0} = 1072,1 \cdot 10^3 \text{ N} = 1072,1 \text{ kN}$$

-sprawdzenie warunku nośności

$$\frac{N_{t,Ed}}{N_{t,Rd}} = \frac{6,70}{1072,1} = 0,006 < 1,0$$

Warunek nośności spełniony.

- **Sprawdzenie nośności przekroju na ściskanie**

**-określenie klasy przekroju**

-współczynnik  $\varepsilon$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{355}} = 0,81$$

-smukłość ścianki rury

$$\frac{c}{t} = \frac{h-3t}{t} = \frac{159-3 \cdot 6,3}{6,3} = 22,24 < 33\varepsilon = 33 \cdot 0,81 = 26,73 \rightarrow \text{klasa 1}$$

Kształtownik spełnia wymagania klasy 1.

-obliczenie nośności przekroju

$$N_{c,Rd} = \frac{Af_y}{\gamma_{M0}} = \frac{3020 \cdot 355}{1,0} = 1072,1 \cdot 10^3 \text{ N} = 1072,1 \text{ kN}$$

-sprawdzenie warunku nośności

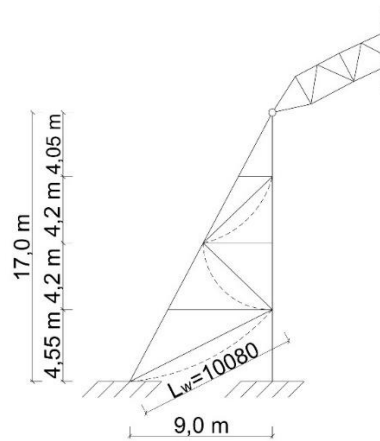
$$\frac{N_{c,Ed}}{N_{c,Rd}} = \frac{94,10}{1072,1} = 0,09 < 1,0$$

Warunek nośności spełniony.

- **Nośność elementu z uwzględnieniem stateczności**

- Nośność na wyboczenie w płaszczyźnie kratownicy

-długość wyboczeniowa



Rys. 8.8. Długość wyboczeniowa pasa dolnego dźwigara

dla kształtowników zamkniętych:  $L_{cr}=L_w$

gdzie :  $L_w$  - odległość między węzłami (teoretyczna)

$$L_{cr,y}=L_w=10,08 \text{ m}$$

-wartość odniesienia do wyznaczenia smukłości względnej

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{\varepsilon}{f_y}} = 93,9\varepsilon = 93,9 \cdot 0,81 = 76,06$$

-smukłość względna

$$\bar{\lambda}_y = \frac{L_{cr,y}}{i_y} \cdot \frac{1}{\lambda_1} = \frac{10080}{54} \cdot \frac{1}{76,06} = 2,45$$

-parametr imperfekcji

krzywa wyboczeniowa „a”  $\rightarrow \alpha=0,21$

-parametr krzywej niestateczności

$$\phi=0,5[1+\alpha_y(\lambda_y - 0,2) + \lambda_y^2]=0,5[1+0,21 \cdot (2,45-0,20)+2,45^2] = 3,74$$

-współczynnik wyboczeniowy

$$\chi_y = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda^2}} = \frac{1}{3,74 + \sqrt{3,74^2 - 2,45^2}} = 0,15$$

-nośność elementu

$$N_{b,Rd} = \chi \cdot \frac{Af_y}{\gamma_{M0}} = 0,15 \cdot \frac{3020 \cdot 355}{1,0} = 160,82 \cdot 10^3 \text{ N} = 160,82 \text{ kN}$$

-sprawdzenie warunku nośności

$$\frac{N_{c,Ed}}{N_{b,Rd}} = \frac{94,10}{160,82} = 0,59 < 1,0$$

Warunek nośności spełniony.

- Nośność na wyoboczenie z płaszczyzny kratownicy

Długości wyoboczeniowe zastrzału zarówno w płaszczyźnie, jak i z płaszczyzny są sobie równe. Skoro  $i_y = i_z$  to pominięto sprawdzenie stateczności elementu względem osi z (przy tej samej krzywej wyoboczeniowej).

#### 8.4.4. Obliczanie rygli konstrukcji wsporczej

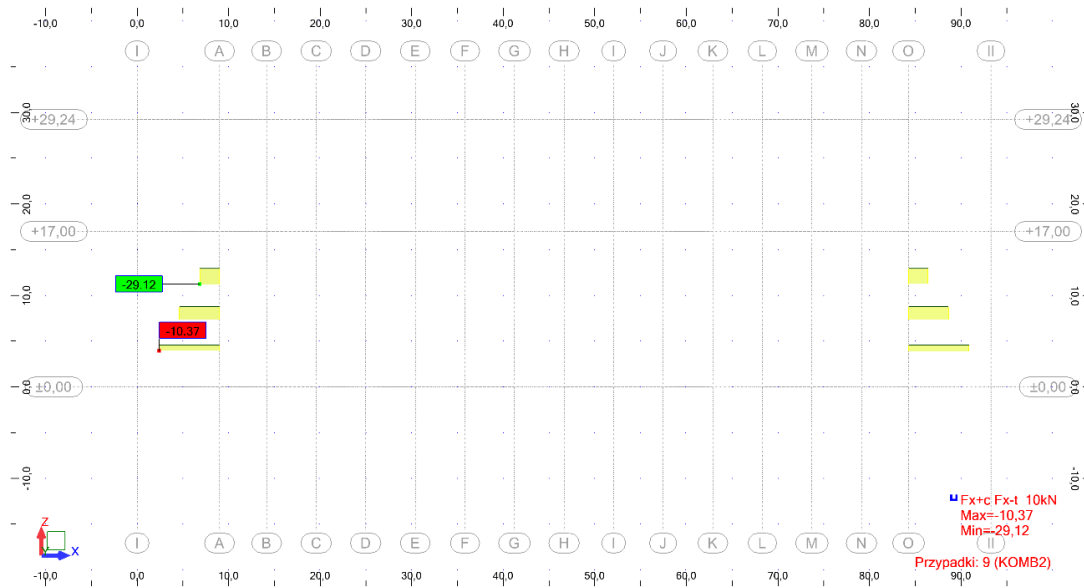
Maksymalne siły przekrojowe w elemencie uzyskane dla kombinacji obciążeń:

$$\text{KOMB 2} \rightarrow 0,85 \cdot 1,35 \cdot G + 1,5 \cdot S2$$

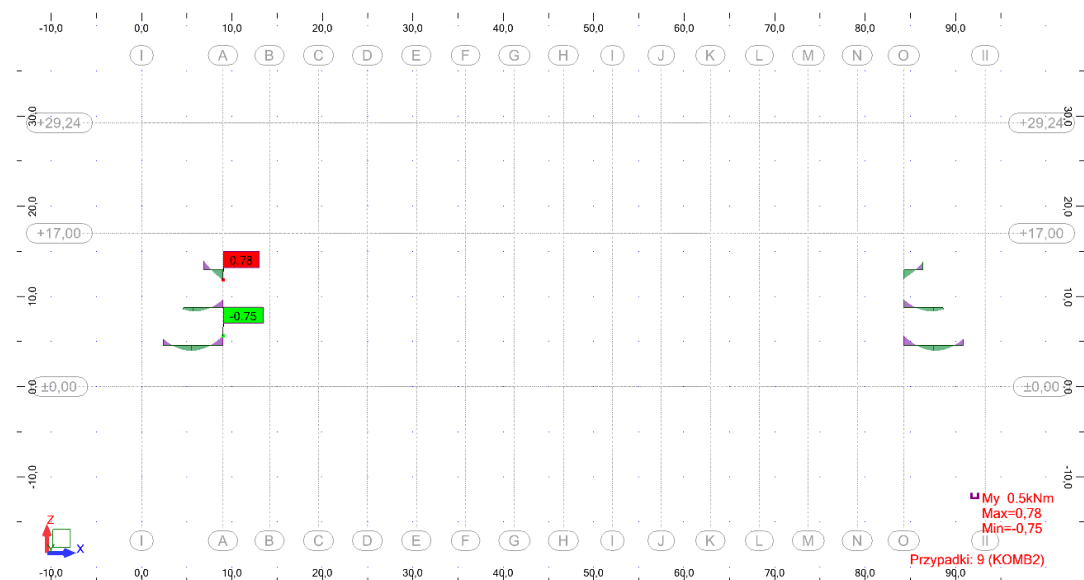
$$\text{KOMB 4} \rightarrow 1,00 \cdot G + 1,5 \cdot (W_{e1s} + W_{is}) \text{ (max siła ściskająca)}$$

Korzystając z funkcji selekcji w ARSA wyznaczano siły tylko dla pasa dolnego zgodnie z Rys. 8.9.

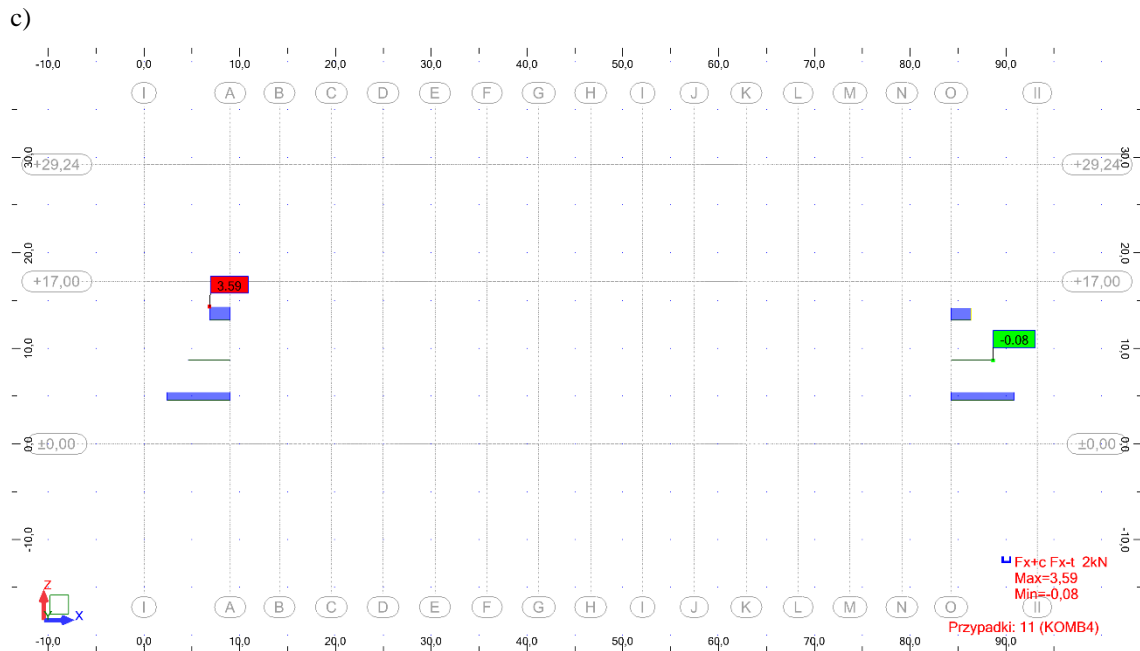
a)



b)







Rys. 8.9. Wyniki obliczeń statycznych dla zastrzałów a) KOMB 2 - siły podłużne (rozciąganie), b) KOMB2 - momenty zginające, c) KOMB 4 – podłużne (ściskanie)

- **Siły wewnętrzne**

max siła rozciągająca:  $N_{t,Ed} = 29,12 \text{ kN}$

max siła ściskająca:  $N_{c,Ed} = 3,59 \text{ kN} \rightarrow$  ze względu na znikomą wartość pominięto w dalszych obliczeniach

max moment zginający:  $M_{y,Ed} = 0,78 \text{ kNm} \rightarrow$  ze względu na znikomą wartość pominięto w dalszych obliczeniach

- **Charakterystyki geometryczne słupa pionowego**

Przyjęto kształtownik RO 159x6,3

$d=h= b= 159 \text{ mm}$

$t=6,3 \text{ mm}$

$A=3020 \text{ mm}^2$

$I_y=I_z= 882 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$

$W_{pl,y}=W_{pl,z}=146,98 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$

$i_y=i_z=54 \text{ mm}$

- **Parametry mechaniczne stali**

$t_{\max}=t_f=6,3 \text{ mm} < 40 \text{ mm} \rightarrow f_y=355 \text{ MPa}$

$f_u=510 \text{ MPa}$

- **Określenie klasy przekroju**

-współczynnik  $\varepsilon$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{355}} = 0,81$$

-smukłość ścianki rury

$$\frac{c}{t} = \frac{h-3t}{t} = \frac{159-3 \cdot 6,3}{6,3} = 22,24 < 33\varepsilon = 33 \cdot 0,81 = 26,73 \rightarrow \text{klasa 1}$$

Kształtownik spełnia wymagania klasy 1.

- **Sprawdzenie nośności przekroju na rozciąganie**

-obliczenie nośności przekroju

$$N_{t,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{3020 \cdot 355}{1,0} = 1072,1 \cdot 10^3 \text{ N} = 1072,1 \text{ kN}$$

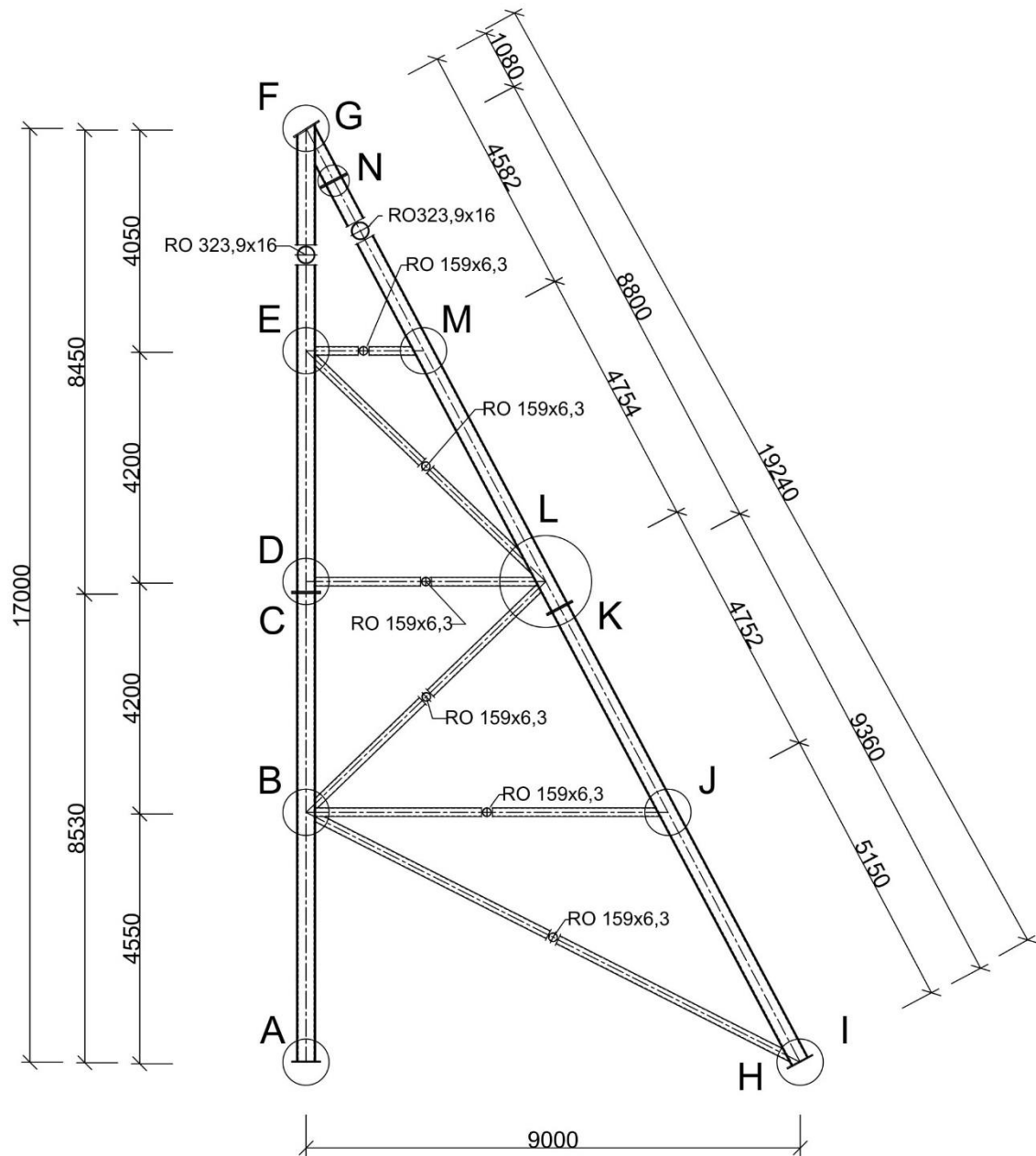
-sprawdzenie warunku nośności

$$\frac{N_{t,Ed}}{N_{t,Rd}} = \frac{29,12}{1072,1} = 0,03 < 1,0$$

Warunek nośności spełniony.

## 8.5. Sprawdzenie nośności połączeń

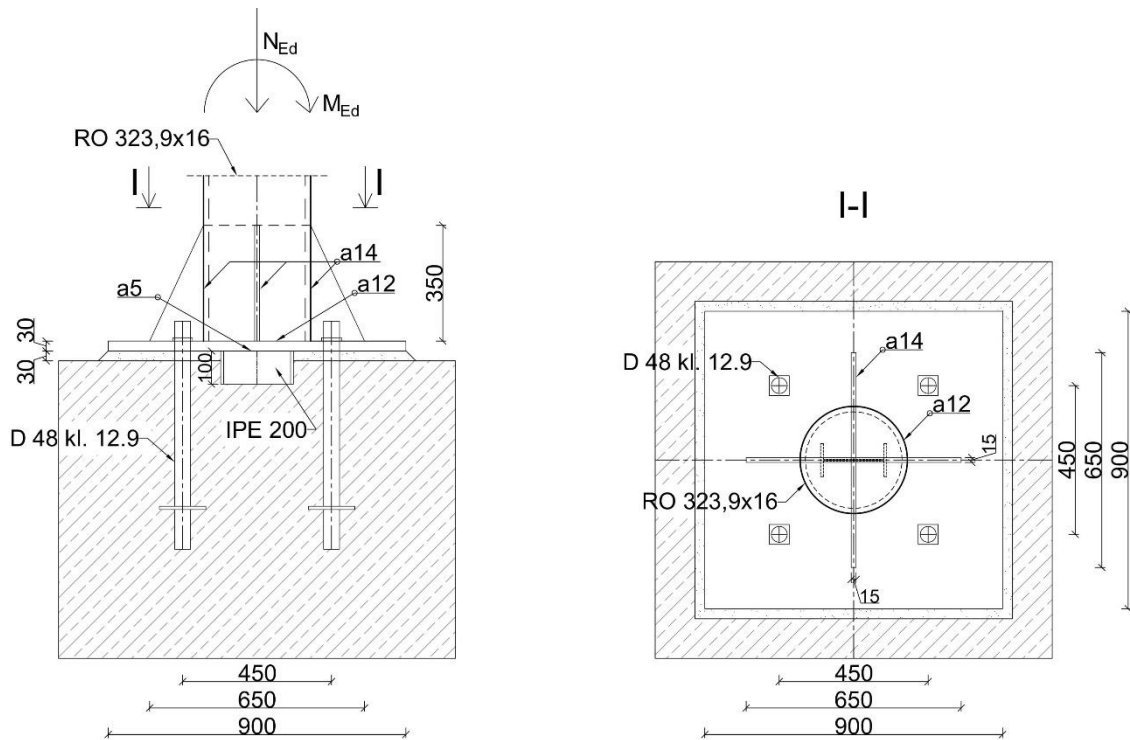
W ramach wymiarowania węzłów konstrukcji podpierającej dźwigar kratowy wyróżniono typy połączeń zgodnie z Rys. 8.10.



Rys. 8.10. Występowanie połączeń w konstrukcji wsporczej

### 8.5.1. Wymiarowanie połączenia A (podstawa słupa pionowego)

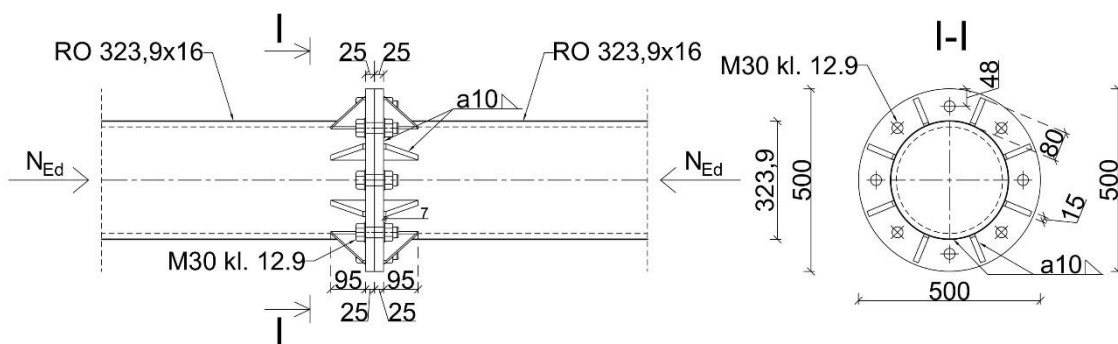
Podstawę słupa zaprojektowano zgodnie z przyjętym schematem statycznym – utwierdzenie w fundamencie. Wymiarowanie podstawy słupa pionowego wykonano przy użyciu programu ARSA. Notka obliczeniowa tego połączenia znajduje się w Załączniku 1. Otrzymane rezultaty przedstawiono na Rys. 8.11.



Rys. 8.11. Widok połączenia podstawy słupa pionowego w programie ARSA

### 8.5.2. Wymiarowanie połączenia C, N i K (połączenie doczołowe rur)

Z uwagi na montaż elementu przewidziano podział słupa pionowego na elementy wysyłkowe. Połączenie zostało zlokalizowane zgodnie z Rys. 8.11. Wymiarowanie zostało przeprowadzone w programie ARSA. Notka obliczeniowa tego połączenia znajduje się w Załączniku 1. Otrzymane rezultaty geometrii połączenia przedstawiono na Rys. 8.12.



Rys. 8.12. Widok połączenia doczołowego słupa w programie ARSA

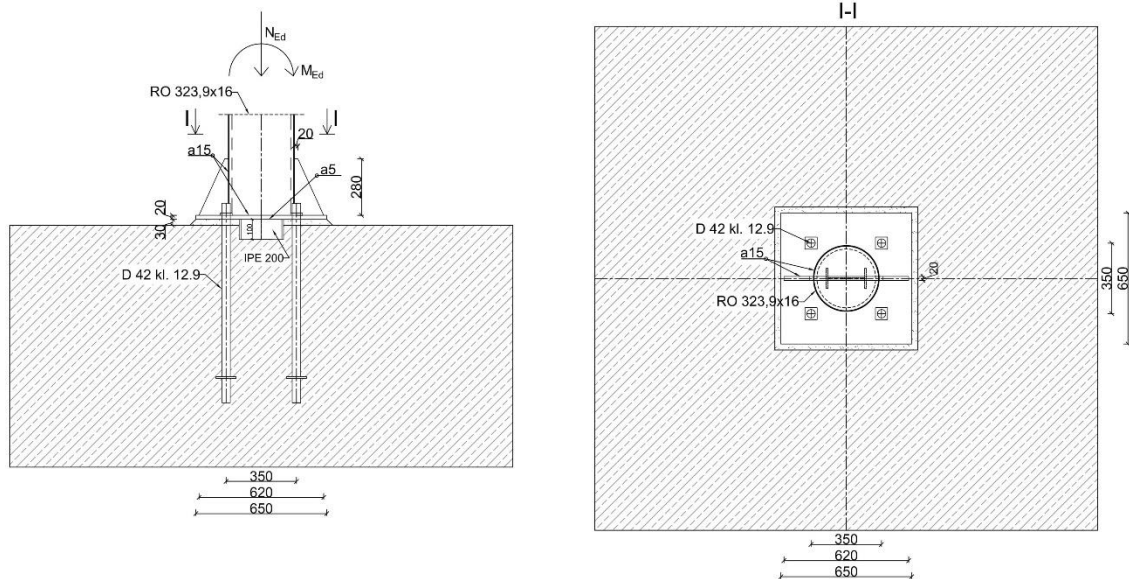
W wymiarowanej konstrukcji występuje kilka połączeń doczołowych rur oznaczonych literą C, N, K zgodnie z Rys. 8.11. Postanowiono do wszystkich tych typów przyjąć geometrię połączenia zgodnie z Rys. 8.12. W Tabeli 8.1 przedstawiono siły występujące w danym połączeniu oraz ich wytyczenie.

Tabela 8.1. Siły występujące w połączeniach

Lokalizacja połączenia	Siła $N_{Ed}$ [kN]	Nośność połączenia [kN]	Wyężenie połączenia
C	2011,23	5502,50 (rozciąganie)	0,75
N	-3348,22	5502,50 (ściskanie)	0,71
K	-3395,02	5502,50 (ściskanie)	0,64

### 8.5.3. Wymiarowanie połączenia i (podstawa słupa ukośnego)

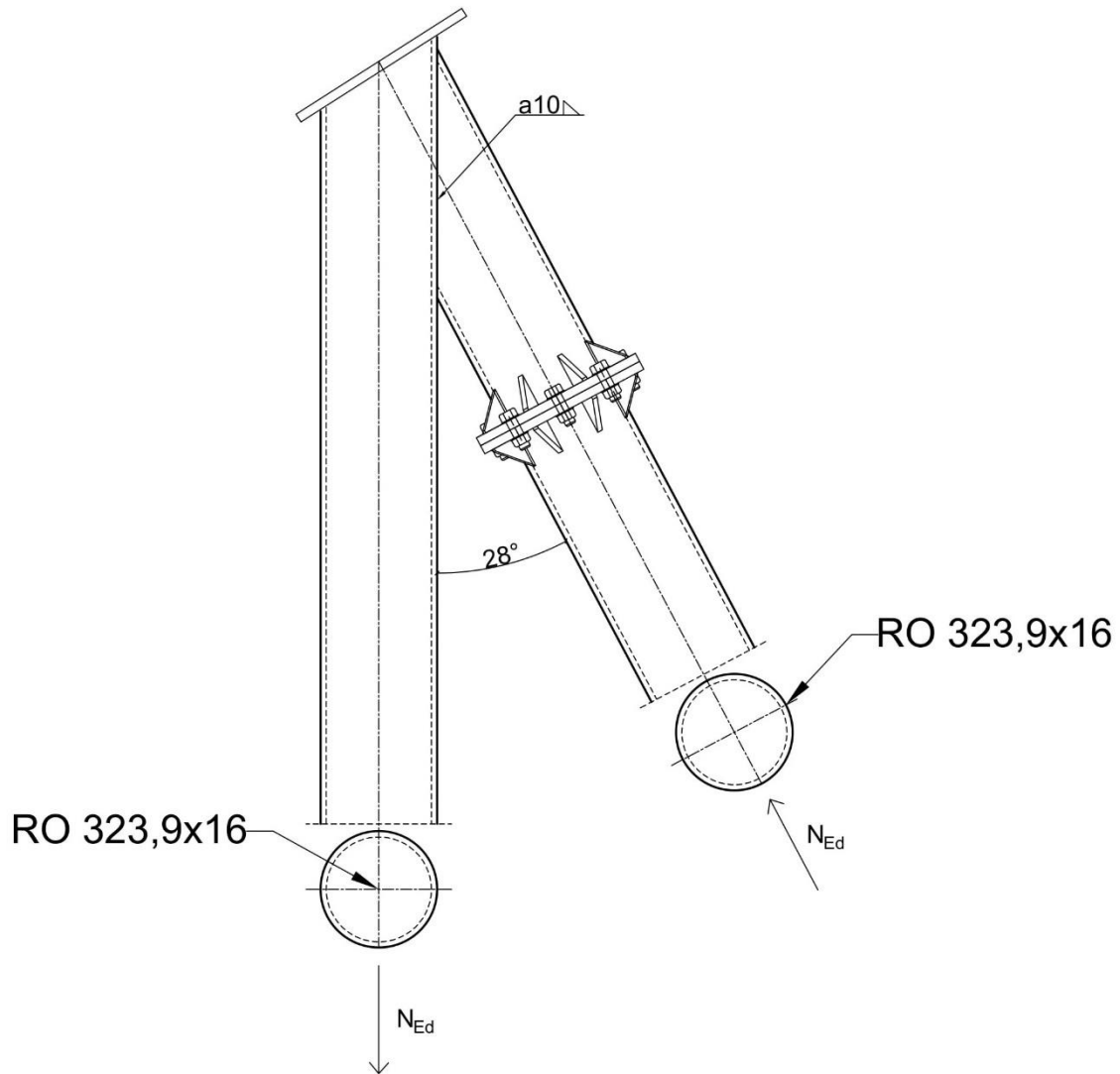
Podstawę słupa ukośnego zaprojektowano zgodnie z przyjętym schematem statycznym – utwierdzenie w fundamencie. Wymiarowanie podstawy słupa wykonano przy użyciu programu ARSA. Notka obliczeniowa tego połączenia znajduje się w Załączniku 1. Otrzymane rezultaty przedstawiono na Rys. 8.13.



Rys. 8.13. Widok połączenia podstawy słupa ukośnego w programie ARSA

### 8.5.4. Wymiarowanie połączenia G (połączenie słupa pionowego i słupa ukośnego)

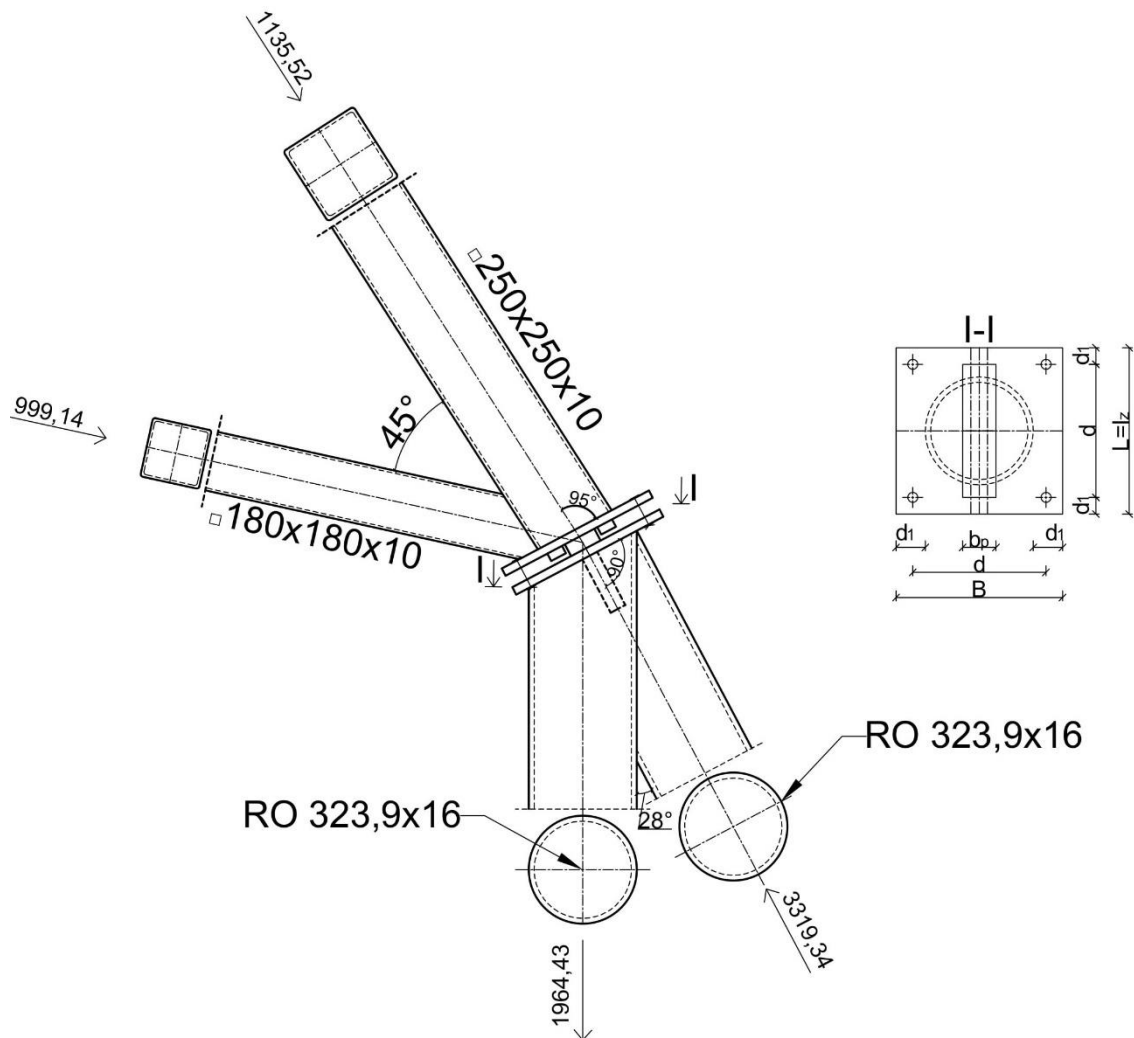
Przyjęto, że połączenie G jest połączeniem spawanym typu Y, w którym pas (słup pionowy) jest połączony z krzyżulcem (słup ukośny) za pomocą spoiny zgodnie z Rys. 8.14. Weryfikacje połączenia wykonano przy użyciu opcji wymiarowania połączeń w programie ARSA. Notka obliczeniowa tego połączenia znajduje się w Załączniku 1.



Rys. 8.14. Połączenie słupa pionowego i słupa ukośnego

### 8.5.5. Wymiarowanie połączenia F (głowica słupa)

Przyjęto geometrie połączenia zgodnie z Rys. 8.15. Głowice słupów o przekroju rurowym zaprojektowano przy użyciu płytki centrującej opartej na blasze poziomej. Konstrukcje wymiarowano na maksymalną siłę osiową (ściskającą) o wartości  $N_{Ed} = 3319,34 \text{ kN}$ .



Rys. 8.15. Widok głowicy słupów

- **Żebro poziome**

- Przyjęcie długości żebra pionowego

Długość  $l_z$  żebra pionowego przyjęto równą średnicy  $d$  przekroju poprzecznego trzonu, zwiększoną o naddatek  $d_1$  niezbędny do prawidłowego wykonania spoiny pachwinowej, łączącej żebro z rurowym trzonem słupa.

Przyjęto:

$$d_1 = 15 \text{ mm}$$

$$l_z = d + 2d_1 = 323,9 + 2 \cdot 15 = 353,9 \text{ mm} \rightarrow \text{przyjęto } l_z = 400 \text{ mm}$$

- Wyznaczenie grubości żebra pionowego

Grubość żebra pionowego  $t_z$  wyznaczano z warunku nośności na docisk, według wzoru:

$$t_z \geq \frac{N_{Ed}}{l_z f_{jd}} = \frac{3319,34 \cdot 10^3}{400 \cdot 355} = 23,38 \text{ mm}$$

Przyjęto  $t_z = 25 \text{ mm}$

- Wyznaczenie wysokości żebra pionowego

Wysokość żebra pionowego  $h_z$  wyznaczono jako wartość maksymalną z warunku nośności żebra na ścinanie oraz warunku nośności spoin łączących żebro z trzonem słupa.

Nośność żebra na ścinanie:

$$h_z \geq \frac{N_{Ed} \sqrt{3} \gamma_{M0}}{2 t_z f_y} = \frac{3319,34 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{3} \cdot 1,0}{2 \cdot 25 \cdot 355} = 323,90 \text{ mm}$$

Nośność spoin pachwinowych:

Przyjęcie grubości spoin:

$$0,2 \cdot 25 = 5 \text{ mm} \leq a \leq 0,7t = 0,7 \cdot 16 = 11,2 \text{ mm}$$

Przyjęto  $a = 11 \text{ mm}$

Wyznaczenie długości spoin:

$$l_z \geq \frac{N_{Ed} \sqrt{3} \beta_w \gamma_{M2}}{n f_{ua}} = \frac{3319,34 \cdot 10^3 \cdot 0,7 \cdot 1,25}{4 \cdot 490 \cdot 11} = 134,7 \text{ mm}$$

Przyjęto  $h_z = 330 \text{ mm}$

- **Blacha pozioma**

- Przyjęcie grubości blachy poziomej

Ze względów konstrukcyjnych przyjęto blachę poziomą o grubości  $t_b = 25 \text{ mm}$ .

- Przyjęcie szerokości i długości blachy poziomej

Szerokość blachy poziomej

$$B = d + 2d_1 = 323,9 + 2 \cdot 15 = 353,9 \text{ mm}$$

Długość blachy poziomej

$$L = h + 2d_1 = 323,9 + 2 \cdot 15 = 353,9 \text{ mm}$$

Ostatecznie przyjęto

$$B = L = 400 \text{ mm}$$

- **Płytki centrująca**

- Przyjęcie grubości płytki centrującej

Ze względów konstrukcyjnych przyjęto płytkę centrującą o grubości  $t_p = 40 \text{ mm}$ .

- Przyjęcie długości płytki centrującej

Ze względów konstrukcyjnych przyjęto płytkę centrującą o długości równej długości żebra pionowego  $l_p = l_z = 400 \text{ mm}$ .

- Wyznaczenie szerokości płytki centrującej

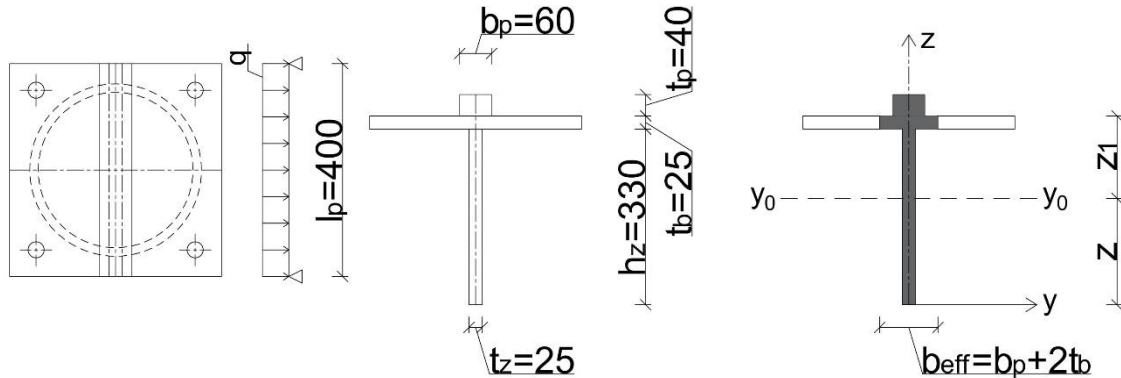
Szerokość płytki centrującej  $b_p$  wyznaczono z warunku nośności na docisk.



$$b_p \geq \frac{N_{Ed}}{l_p f_{jd}} = \frac{3319,34 \cdot 10^3}{400 \cdot 355} = 23,38 \text{ mm}$$

Przyjęto  $b_p = 60 \text{ mm}$

- Sprawdzenie nośności przekroju zastępczego



Rys. 8.16. Przekrój zastępczy

- Wyznaczenie szerokości efektywnej  $b_{eff}$  blachy poziomej

$$b_{eff} = b_p + 2t_b = 60 + 2 \cdot 25 = 110 \text{ mm}$$

- Wyznaczenie pól powierzchni przekrojów:

Płytki centrującej:

$$A_1 = t_p b_p = 40 \cdot 60 = 2400 \text{ mm}^2$$

Blachy poziomej

$$A_2 = t_b b_{eff} = 25 \cdot 110 = 2750 \text{ mm}^2$$

Żebra pionowego

$$A_3 = t_z h_z = 25 \cdot 330 = 8250 \text{ mm}^2$$

Wyznaczenie momentów statycznych względem osi  $y - y$  przekrojów:

Płytki centrującej

$$S_{1y} = A_1 (h_z + t_b + 0,5t_p) = 2400(330 + 25 + 0,5 \cdot 40) = 900000 \text{ mm}^3$$

Blachy poziomej

$$S_{2y} = A_2 (h_z + 0,5t_b) = 2750(330 + 0,5 \cdot 25) = 941875 \text{ mm}^3$$

Żebra pionowego

$$S_{3y} = A_3 0,5h_z = 8250 \cdot 0,5 \cdot 330 = 1361250 \text{ mm}^3$$

- Wyznaczenie pola powierzchni przekroju zastępczego

$$A = A_1 + A_2 + A_3 = 2400 + 2750 + 8250 = 13400 \text{ mm}^2$$

- Wyznaczenie momentu statycznego względem osi  $y - y$  przekroju zastępczego

$$S_y = S_{1y} + S_{2y} + S_{3y} = 900000 + 941875 + 1361250 = 3203125 \text{ mm}^3$$

- Wyznaczenie położenia środka ciężkości przekroju zastępczego (odległość z od osi  $y - y$  do osi  $y_0 - y_0$ )

$$z = \frac{S_y}{A} = \frac{3203125}{13400} = 239,04 \text{ mm}$$

- Wyznaczenie momentów bezwładności względem osi  $y_0 - y_0$

$$I_{1y_0} = \frac{b_p t_p^3}{12} + A_1 (h_z + t_b + 0,5 t_p - z)^2$$

$$I_{1y_0} = \frac{60 \cdot 40^3}{12} + 2400 \cdot (330 + 25 + 0,5 \cdot 40 - 239,04)^2 = 38398211,84 \text{ mm}^4$$

$$I_{2y_0} = \frac{b_{eff} t_b^3}{12} + A_2 (h_z + 0,5 t_b - z)^2$$

$$I_{2y_0} = \frac{110 \cdot 25^3}{12} + 2750 \cdot (330 + 0,5 \cdot 25 - 239,04)^2 = 29579151,1 \text{ mm}^4$$

$$I_{3y_0} = \frac{t_z h_z^3}{12} + A_3 (z - 0,5 h_z)^2$$

$$I_{3y_0} = \frac{25 \cdot 330^3}{12} + 8250 \cdot (239,04 - 0,5 \cdot 330)^2 = 120094603,2 \text{ mm}^4$$

- Wyznaczenie momentu bezwładności względem osi  $y_0 - y_0$  przekroju zastępczego

$$I_{y_0} = I_{1y_0} + I_{2y_0} + I_{3y_0} = 38398211,84 + 29579151,1 + 120094603,2$$

$$I_{y_0} = 188071966,1 \text{ mm}^4$$

- Wyznaczenie wskaźnika wytrzymałości względem osi  $y_0 - y_0$  przekroju zastępczego

$$W_{e1} = \frac{I_{y_0}}{z} = \frac{188071966,1}{239,04} = 786780,31 \text{ mm}^3 = 786,78 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

- Wyznaczenie momentu statycznego względem osi  $y_0 - y_0$  przekroju płytki centrującej

$$S_{1y_0} = A_1 (h_z + t_b + 0,5 t_p - z) = 2400 \cdot (330 + 25 + 0,5 \cdot 40 - 239,04)$$

$$S_{1y_0} = 326304 \text{ mm}^3$$

- Wyznaczenie momentu statycznego względem osi  $y_0 - y_0$  przekroju płytki centrującej i blachy poziomej

$$S_{2y_0} = S_{1y_0} + A_2 (h_z + 0,5 t_b - z)$$

$$S_{2y_0} = 326304 + 2750 \cdot (330 + 0,5 \cdot 25 - 239,04) = 610819 \text{ mm}^3$$

- Wyznaczenie nośności przekroju zastępczego na zginanie

$$M_{c,Rd} = W_{y,el} f_y = 786,78 \cdot 10^3 \cdot 355 = 279,31 \cdot 10^6 \text{ Nmm} = 279,31 \text{ kNm}$$

- Wyznaczenie pola powierzchni przekroju  $A_v$  czynnego przy ścinaniu

$$A_v = t_z h_z = 25 \cdot 330 = 8250 \text{ mm}^2$$

- Wyznaczenie nośności przekroju zastępczego na ścinanie

$$V_{c,Rd} = V_{pl,Rd} = \frac{A_v \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{M0}} = \frac{8250 \cdot \frac{355}{\sqrt{3}}}{1,0} = 1690,91 \cdot 10^3 \text{ N} = 1690,91 \text{ kN}$$

- Wyznaczenie zastępczego obciążenia równomiernie rozłożonego (od siły  $N_{Ed}$ )

$$q = \frac{N_{Ed}}{l_p} = \frac{3319,34 \cdot 10^3}{400} = 8298,4 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

- Maksymalny moment zginający w przekroju zastępczym

$$M_{Ed} = \frac{ql_p^2}{8} = \frac{8298,4 \cdot 400^2}{8} = 165,97 \cdot 10^6 \text{ Nmm} = 165,97 \text{ kNm}$$

- Maksymalna siła poprzeczna w przekroju zastępczym

$$V_{Ed} = \frac{ql_p}{2} = \frac{8298,4 \cdot 400}{2} = 1659,7 \cdot 10^3 \text{ N} = 1659,70 \text{ kN}$$

- Sprawdzenie nośności przekroju na zginanie

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} = \frac{165,97}{279,31} = 0,59$$

- Sprawdzenie nośności przekroju na ścinanie

$$\frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} = \frac{1659,70}{1690,91} = 0,98$$

- **Sprawdzenie spoin pachwinowych łączących płytkę centrującą z blachą poziomą**

Przyjęte grubości spoin:

$$0,2 \cdot t_p = 0,2 \cdot 40 = 8 \text{ mm} \leq a \leq 0,7 t_b = 0,7 \cdot 25 = 17,5 \text{ mm}$$

Przyjęto  $a = 15 \text{ mm}$

Przyjęcie długości odcinków spoin:

$$l_{w1} = 400 \text{ mm} \geq 40 \text{ mm}$$

Pole powierzchni spoin:

$$A_w = 2al_{w1} = 2 \cdot 15 \cdot 400 = 12000 \text{ mm}^2$$

- Sprawdzenie nośności spoiny

Przyjęto, że 75% obciążenia przenosi się przez docisk, a spoiny przenoszą pozostałe 25%.

- Wyznaczenie naprężeń normalnych

$$\sigma = \frac{0,25 \cdot N_{Ed}}{A_w} = \frac{0,25 \cdot 3319,34 \cdot 10^3}{12000} = 69,15 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

- Wyznaczenie naprężeń składowych

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{\sigma}{\sqrt{2}} = \frac{69,15}{\sqrt{2}} = 48,90 \frac{N}{mm^2}$$

- Wyznaczenie naprężeń stycznych pochodzących od siły rozwarstwiającej

$$\tau_{\parallel} = \frac{V_{Ed} \cdot S_{1y0}}{2a \cdot I_{y0}} = \frac{1659,7 \cdot 10^3 \cdot 326304}{2 \cdot 15 \cdot 188071966,1} = 95,99 \text{ MPa}$$

- Sprawdzenie nośności spoiny

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot (\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} = \sqrt{48,90^2 + 3 \cdot (48,90^2 + 95,99^2)} = 192,89 \text{ MPa}$$

$$192,89 \text{ MPa} \leq \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}} = \frac{490}{0,8 \cdot 1,1} = 556,82 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\perp} = 48,90 \text{ MPa} \leq 0,9 \cdot \frac{f_u}{\gamma_{M2}} = 0,9 \cdot \frac{490}{1,1} = 400,91 \text{ MPa}$$

Warunek nośności spełniony.

- **Sprawdzenie spoin pachwinowych łączących blachę poziomą z żebrzem pionowym**

Przyjęte grubości spoin:

$$0,2 \cdot t_z = 0,2 \cdot 25 = 5 \text{ mm} \leq a \leq 0,7 t_b = 0,7 \cdot 25 = 17,5 \text{ mm}$$

Przyjęto  $a = 15 \text{ mm}$

Przyjęcie długości odcinków spoin:

$$l_{w1} = d - 2t = 400 - 2 \cdot 16 = 368 \text{ mm} \geq 40 \text{ mm}$$

Pole powierzchni spoin:

$$A_w = 2al_{w1} = 2 \cdot 15 \cdot 368 = 11040 \text{ mm}^2$$

- Sprawdzenie nośności spoiny

Przyjęto, że 75% obciążenia przenosi się przez docisk, a spoiny przenoszą pozostałe 25%.

- Wyznaczenie naprężeń normalnych

$$\sigma = \frac{0,25 \cdot N_{Ed}}{A_w} = \frac{0,25 \cdot 3319,34 \cdot 10^3}{11040} = 75,17 \frac{N}{mm^2}$$

- Wyznaczenie naprężeń składowych

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{\sigma}{\sqrt{2}} = \frac{75,17}{\sqrt{2}} = 53,15 \frac{N}{mm^2}$$

- Wyznaczenie naprężeń stycznych pochodzących od siły rozwarstwiającej

$$\tau_{\parallel} = \frac{V_{Ed} \cdot S_{2y0}}{2a \cdot I_{y0}} = \frac{1659,7 \cdot 10^3 \cdot 610819}{2 \cdot 15 \cdot 188071966,1} = 179,68 \text{ MPa}$$

Sprawdzenie nośności spoiny

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot (\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} = \sqrt{53,15^2 + 3 \cdot (53,15^2 + 179,68^2)} = 323,96 \text{ MPa}$$

$$323,96 \text{ MPa} \leq \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}} = \frac{490}{0,8 \cdot 1,1} = 556,82 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\perp} = 53,15 \text{ MPa} \leq 0,9 \cdot \frac{f_u}{\gamma_{M2}} = 0,9 \cdot \frac{490}{1,1} = 400,91 \text{ MPa}$$

Warunek nośności spełniony

- **Sprawdzenie nośności połączenia dźwigara kratowego z głowicą słupa**

Blachę podstawy węzła podporowego wiazara połączono z głowicą słupa za pomocą 4 śrub M 30 kl.12.9 .

Aby uprościć, sprawdzono jedynie nośność śrub na jednoczesne rozciąganie oraz ścinanie. Do obliczeń wzięto siły przekrojowe dla słupa występujące w przegubie dla:

$$\text{KOMB 2} \rightarrow 0,85 \cdot 1,35 \cdot G + 1,5 \cdot S2$$

Siły przekrojowe uzyskane z tej kombinacji wynoszą:

-siła rozciągająca:  $N_{t,Ed} = 1964,43 \text{ kN}$

-siła poprzeczna:  $V_{Ed} = 19,49 \text{ kN}$

- Nośność śruby jednociętej na ścinanie:

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha \cdot f_{ub} \cdot A}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 \cdot 1200 \cdot 707}{1,25} = 407,23 \cdot 10^3 \text{ N} = 407,23 \text{ kN}$$

- Nośność łączników na rozciąganie

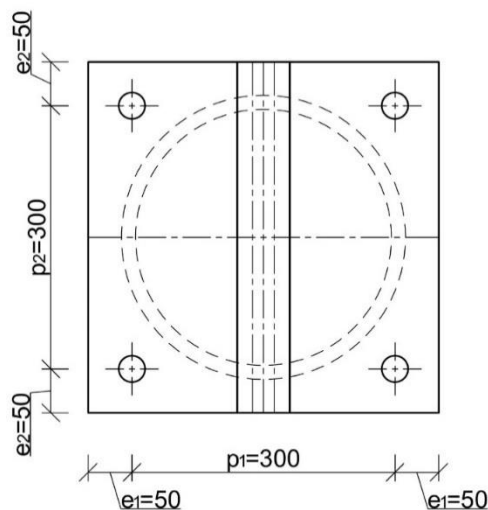
$$F_{t,Rd} = \frac{k_2 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 \cdot 1200 \cdot 561}{1,25} = 484,70 \cdot 10^3 \text{ N} = 484,7 \text{ kN}$$

- Warunek interakcyjny:

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4 \cdot F_{t,Rd}} = \frac{19,49/4}{120,6} + \frac{1964,43/4}{1,4 \cdot 484,7} = 0,04 + 0,72 = 0,76 < 1,0$$

Nośność śrub zapewniona.

- **Sprawdzenie poprawności rozmieszczenia łączników**



Rys. 8.17. Rozmieszczenie śrub w połączeniu głowicy

$$e_1 = 50 \text{ mm} > 1,2d_0 = 1,2 \cdot 33 = 39,6 \text{ mm}$$

$$e_2 = 50 \text{ mm} > 1,2d_0 = 1,2 \cdot 33 = 39,6 \text{ mm}$$

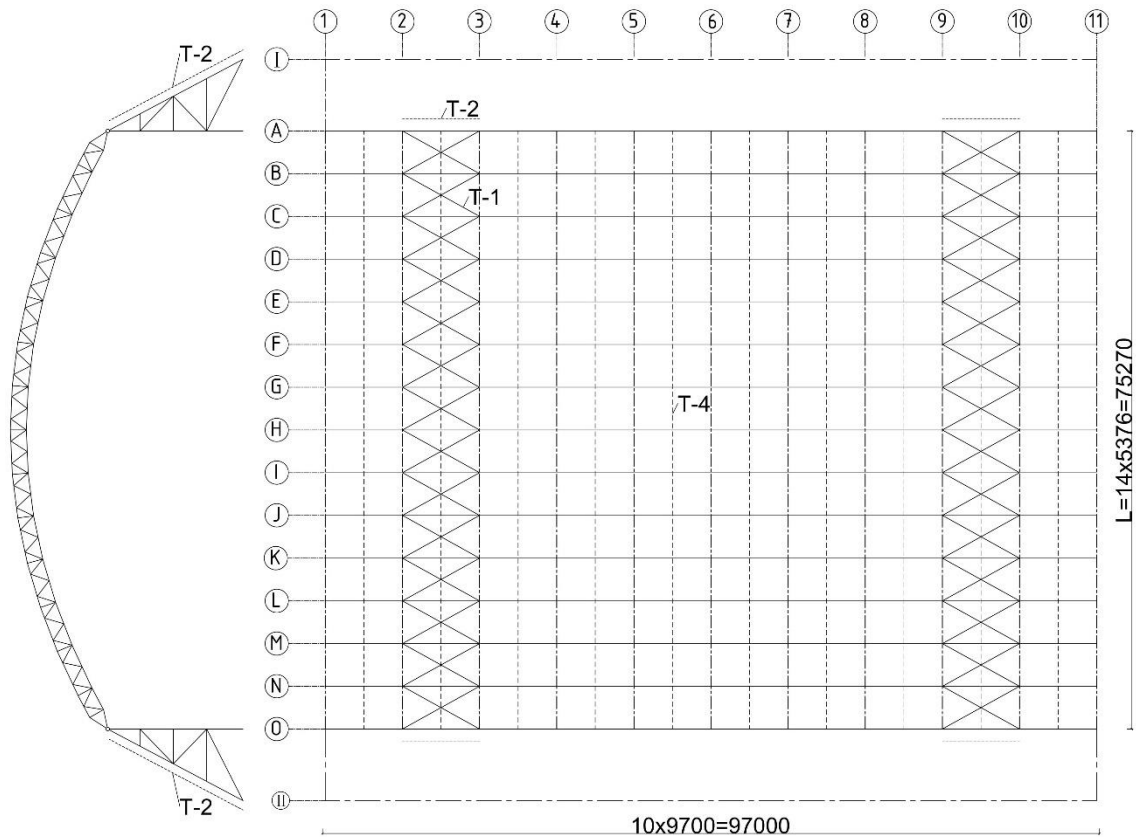
$$p_1 = 300 \text{ mm} > 2,2d_0 = 2,2 \cdot 33 = 72,6 \text{ mm}$$

$$p_2 = 300 \text{ mm} > 2,2d_0 = 2,2 \cdot 33 = 72,6 \text{ mm}$$

#### **8.5.6. Wymiarowanie połączenia B, D, E, J, L i M (połączenie rygli/zastrzałów ze słupem prostym/ ukośnym)**

Przyjęto, że rygle/zastrzały będą połączone ze sobą spoiną 5 mm wykonaną na placu budowy. Weryfikację połączeń wykonano w programie ARSA. Notka obliczeniowa tego połączenia znajduje się w Załączniku 1. Z obliczeń wynika, że nośność połączeń ze spoiną 5 mm jest zapewniona.

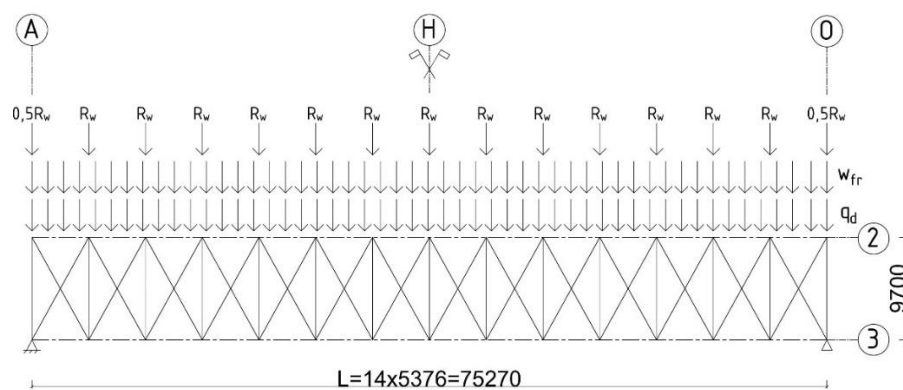
## 9. Poz.5. Stężenie połączeniowe poprzeczne T-1



Rys. 9.1. Rozmieszczenie stężeń połączeniowych w konstrukcji hali

### 9.1. Schemat statyczny

Rozpatrzono tężnik połączeniowy poprzeczny między osiami 2 i 3. Jego schemat statyczny pokazano na Rys. 9.2. Pasy stanowią pasy górne głównego układu poprzecznego (RK 250x250x10), słupkami są pasy górne płatwi (RK 100x100x5), pręty skratowania zaprojektowano z prętów  $\Phi 20$



Rys. 9.2. Schemat statyczny tężnika połączeniowego poprzecznego

## 9.2. Zestawienie obciążeń

Przy wyznaczaniu tężnika przyjęto:

- rozpatrzono obciążenie od wiatru działającego prostopadle do ściany szczytowej,
- wielkość sił ściskających w pasie rygla obliczono dla kombinacji oddziaływań od ciężaru własnego i działania wiatru prostopadle do ściany podłużnej,
- oddziaływania od sił tarcia wiatru rozłożono na dwa tężniki połaciowe poprzeczne występujące w hali.

### 9.2.1. Oddziaływania wiatru na ścianę szczytową

- Ściana nawietrzna (pole D,  $c_{pi}=+0,2$ )

$$w_p = (0,70 - 0,2) \cdot 0,763 = 0,38 \text{ kN/m}^2$$

- Ściana nawietrzna (Pole E,  $c_{pi}=+0,2$ )

$$w_s = (-0,3 - 0,2) \cdot 0,763 = -0,38 \text{ kN/m}^2$$

- Obciążenie wypadkowe

$$w = w_p - w_s = 0,38 - (-0,38) = 0,76 \text{ kN/m}^2$$

- Średnie obciążenie na jedną ścianę (z uwzględnieniem współczynnika  $\gamma_Q=1,5$ )

$$w_d = 1,5 \frac{0,76}{2} = 0,57 \text{ kN/m}^2$$

- Górna reakcja słupa ściany szczytowej

Obciążenie zebrane z obszaru o rozmiarach połowy wysokości ściany szczytowej i rozstawu słupków ściany szczytowej.

$$R_w = 0,5 \cdot \frac{29,24}{2} \cdot 5,376 = 39,30 \text{ kN}$$

- Obciążenie stężenia od sił tarcia wiatru

$$w_{fr} = F_{fr} \cdot \frac{\gamma_Q}{L} \cdot \frac{1}{n}$$

$$F_{fr} = 0 \rightarrow \text{nie występuję w konstrukcji zgodnie z pkt. 0}$$

$$w_{fr} = 0 \text{ kN}$$

- Równoważna siła stabilizująca

- Maksymalna siła ściskająca w pasie górnym głównego układu poprzecznego (pkt. 7.5.1)

$$N_{c,Ed} = 2141,63 \text{ kN}$$

$$M_{y,Ed} = 35,37 \text{ kNm}$$



$$N_{Ed,f} = \frac{N_{Ed}}{2} + \frac{M_{Ed}}{h-t} = \frac{2141,63 \cdot 10^3}{2} + \frac{35,37 \cdot 10^6}{250-10} = 1218,19 \cdot 10^3 N$$

$$= 1218,19 \text{ kN}$$

$$\alpha_m = \sqrt{0,5 \cdot \left(1 + \frac{1}{m}\right)} = \sqrt{0,5 \cdot \left(1 + \frac{1}{6}\right)} = 0,76$$

- Strzałka wstępnej imperfekcji łukowej

$$e_0 = \alpha_m \cdot \frac{L}{500} = 0,76 \cdot \frac{75270}{500} = 114,41 \text{ mm}$$

- Przyjęto, że całkowite ugięcie tężnika nie przekroczy wartości

$$\delta_q \leq \frac{L}{500} = \frac{75270}{500} = 150,54 \text{ mm}$$

Równoważna siła stabilizująca:

$$q_d = \sum N_{Ed} \cdot 8 \cdot \frac{e_0 + \delta_q}{L^2} = 6 \cdot 1218,19 \cdot 10^3 \cdot 8 \cdot \frac{114,41 + 150,64}{75270^2} = 2,74 \text{ kN/m}$$

- Ugięcie stężenia od sił wiatru i równoważnej siły stabilizującej
  - Moment bezwładności tężnika

$$\text{Pole przekroju pasa górnego: } A_f = 9490 \text{ mm}^2$$

$$I_{eff} = 0,9 \cdot h^2 \cdot \frac{A_f}{2} = 0,9 \cdot 250^2 \cdot \frac{9490}{2} = 2,67 \cdot 10^{11} \text{ mm}^4$$

Ugięcie tężnika od równoważnej siły stabilizującej i sił tarcia wiatru

$$\delta_d = \frac{5}{384} \cdot \frac{(q_d + w_{fr}) \cdot L^4}{E \cdot I_{eff}} = \frac{5}{384} \cdot \frac{(2,31 + 0) \cdot 75270^4}{210000 \cdot 2,67 \cdot 10^{11}} = 17,22 \text{ mm}$$

Ugięcie tężnika od obciążenia reakcjami słupków ściany szczytowej

$$\delta_w = \frac{23}{648} \cdot \frac{R_w L^3}{E \cdot I_{eff}} = \frac{23}{648} \cdot \frac{39,30 \cdot 10^3 \cdot 75270^3}{210000 \cdot 2,67 \cdot 10^{11}} = 10,61 \text{ mm}$$

Całkowite ugięcie tężnika

$$\delta = \delta_d + \delta_w$$

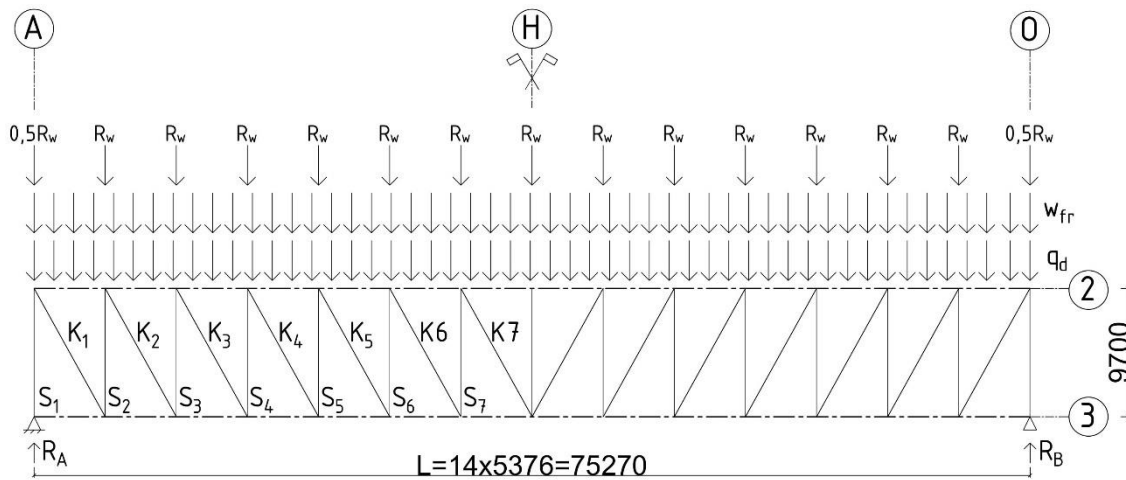
$$\delta = \delta_d + \delta_w = 17,22 + 10,61 = 27,83 \text{ mm} < \frac{L}{2500} = \frac{75270}{2500} = 30,11 \text{ mm}$$

Założenie co do ugięcia jest poprawne

### 9.3. Obliczenia statyczne

W obliczeniach statycznych przyjęto, że pręty skratowania przejmują tylko podłużne siły rozciągające. W przypadku ściskania pręty ulegają wyboczeniu.

Przyjęty do obliczeń układ prętów skratowania pokazano na Rys. 9.3.



Rys. 9.3. Przyjęty do obliczeń układ prętów skratowania

- Reakcja podporowa

$$R_A = 1,5R_w + 0,5 \cdot (w_{fr} + q_d) \cdot L = 1,5 \cdot 39,30 + 0,5 \cdot (0 + 2,31) \cdot 75,27$$

$$= 145,89 \text{ kN}$$

- Siły w prętach stężenia

- Siły w pasach

$$P_d = P_g = \pm \frac{(R_A - 0,5 \cdot R_w) \cdot \frac{L}{3} + 0,125 \cdot (w_{fr} + q_d) \cdot L^2}{h}$$

$$P_d = P_g = \pm \frac{(149,59 - 0,5 \cdot 39,30) \cdot \frac{75,27}{3} + 0,125 \cdot (0 + 2,31) \cdot 75,27^2}{9,7} = \pm 504,76 \text{ kN}$$

- Siły w słupkach

$$S_1 = R_A = 149,59 \text{ kN}$$

$$S_2 = R_A - 0,5R_w - 0,5 \cdot 2,5 \cdot (w_{fr} + q_d)$$

$$S_2 = 149,59 - 0,5 \cdot 39,30 - 0,5 \cdot 2,5 \cdot (0 + 2,31) = 127,05 \text{ kN}$$

- Siły w krzyżulcach

$$\cos \alpha = \frac{9700}{\sqrt{9700^2 + 5376^2}} = 0,875$$

$$K_1 = \frac{R_A - 0,5 \cdot R_w - (w_{fr} - q_d) \cdot 0,5 \cdot 2,5}{\cos \alpha} = \frac{149,59 - 0,5 \cdot 39,30 - (0 - 2,31) \cdot 0,5 \cdot 2,5}{0,875} = 151,80 \text{ kN}$$

### 9.4. Sprawdzenie stanu granicznego nośności

Jako pręty skratowania z pasem górnym wiązarów przyjęto pręt okrągły  $\Phi 20$ .

Mocowanie końca odbywa się za pomocą śruby M20 kl. 10.9.

- Dane

- Śruba M20 kl. 10.9

$d=20$  mm

$A=314$  mm<sup>2</sup>

$f_{yb}=450$  MPa

$f_{ub}=1000$  MPa

$\gamma_{M2} = 1,25$

- Pręt okrągły  $\Phi 20$

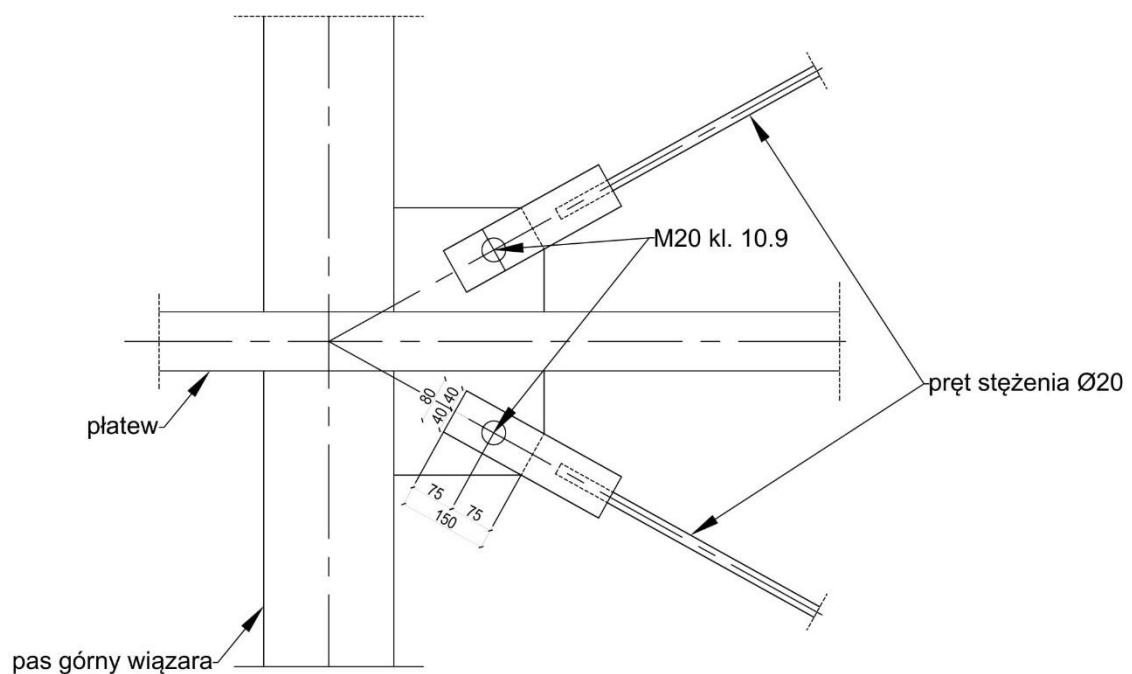
$d=20$  mm

$d_0=22$  mm

- Płaskownik

$t=12$  mm

$b=80$  mm



Rys. 9.4. Połączenie prętów tężnika z pasem górnym wiązara

- Sprawdzenie poprawności rozmieszczenia łączników

$$e_1 = 75 \text{ mm} > 1,2d_0 = 1,2 \cdot 22 = 26,4 \text{ mm}$$

$$e_2 = 40 \text{ mm} > 1,2d_0 = 1,2 \cdot 22 = 26,4 \text{ mm}$$

- Nośność śruby na ścinanie

Płaszczyzna ścinania przechodzi przez gwintowaną część śruby  $\alpha_v = 0,6$

$$F = F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v f_{ub} A}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 \cdot 1000 \cdot 314}{1,25} = 150,72 \text{ kN}$$

- Nośność śruby na docisk

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

$$k_1 = \min \left\{ \begin{array}{l} 2,8 \cdot \frac{e_2}{d_0} - 1,7 = 2,8 \cdot \frac{40}{22} - 1,7 = 3,39 \\ 2,5 \end{array} \right. = 2,5$$

$$\alpha_b = \min \left\{ \begin{array}{l} \alpha_d = \frac{e_2}{3d_0} = \frac{40}{3 \cdot 22} = 0,61 \\ \frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{1000}{450} = 2,22 \\ 1,0 \end{array} \right. = 0,61$$

$$F = F_{b,Rd} = \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 \cdot 0,61 \cdot 490 \cdot 20 \cdot 20}{1,25} = 239,12 \text{ kN}$$

W pojedynczym złączu zakładkowym z jednym szeregiem śrub nośność obliczeniowa śruby na docisk jest ograniczona warunkiem

$$F = F_{b,Rd} \leq \frac{1,5 f_u d t}{\gamma_{M2}} = \frac{1,5 \cdot 490 \cdot 20 \cdot 20}{1,25} = 235,2 \text{ kN}$$

Ostatecznie przyjęto

$$F = F_{b,Rd} = 235,2 \text{ kN}$$

- Nośność płaskownika na rozerwanie wynosi

$$A_{net} = (b - d_0) t = (80 - 22) \cdot 12 = 696 \text{ mm}^2$$

$$N_{u,Rd} = \frac{0,9 A_{net} f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 \cdot 696 \cdot 490}{1,25} = 245,55 \text{ kN}$$

Ostatecznie wartość siły rozciągającej, przenoszonej przez połączenie wynosi

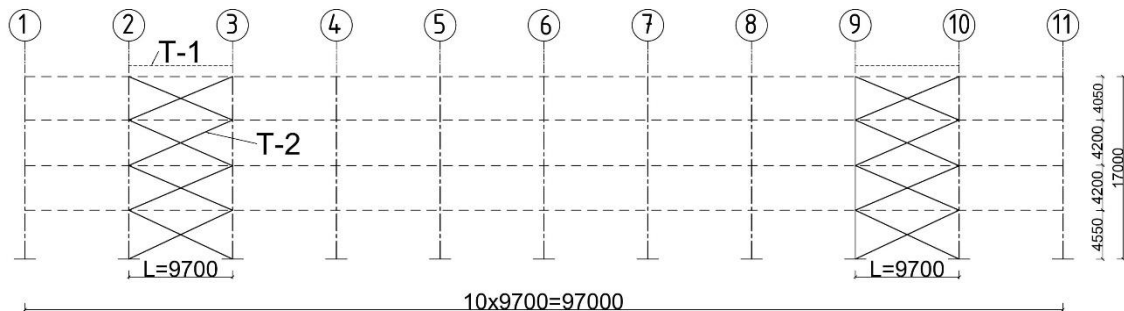
$$N_{u,Rd} = F_{v,Rd} = 150,72 \text{ kN}$$

- Sprawdzenie warunku

$$\frac{N_{Ed}}{N_{u,Rd}} = \frac{151,80}{150,72} = 1,007 \approx 1,0 \rightarrow \text{warunek spełniony.}$$

## 10. Poz. 6. Tężnik pionowy ściany podłużnej

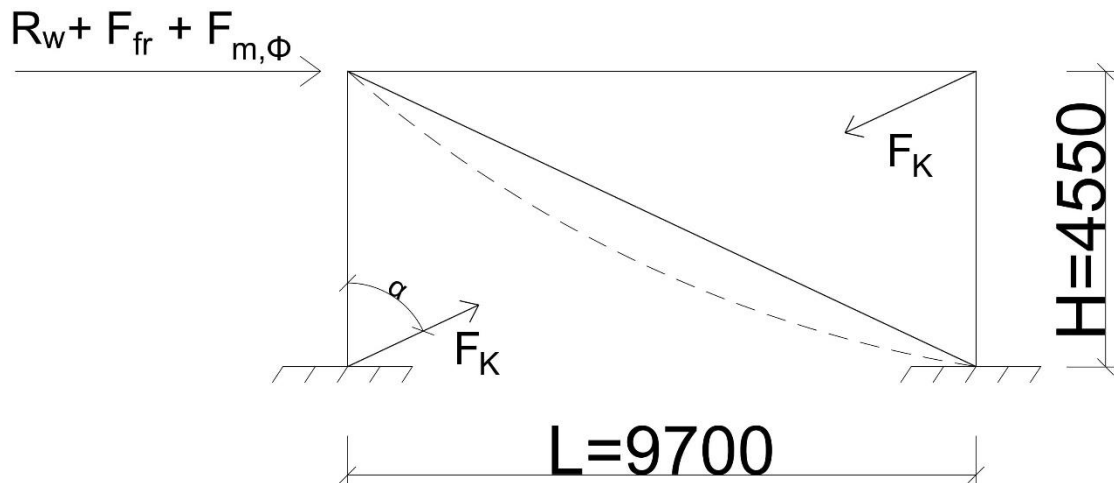
Przyjęto stężenia pionowe podłużne typu X. Umieszczono je w skrajnych polach między słupami sąsiednich układów poprzecznych hali w osiach 2-3 i 9 i 10.



Rys. 10.1. Rozmieszczenie stężeń ściany podłużnej w konstrukcji hali

### 10.1. Schemat statyczny

Skratowanie zostanie wykonane z prętów wiotkich, które podczas ściskania wyboczą się sprężyste i nie będą uwzględniane przy obliczaniu nośności. Przyjmuje się tylko pręty rozciągnięte. Schemat statyczny tężnika przedstawiono Rys. 10.2.



Rys. 10.2. Schemat statyczny stężenia pionowego podłużnego

### 10.2. Zestawienie obciążeń

- Oddziaływanie z tężnika połaciowego poprzecznego (reakcja tylko od oddziaływania wiatru)

$$R_A(w) = 1,5R_w + 0,5 \cdot L \cdot w_{fr} = 1,5 \cdot 39,30 + 0,5 \cdot 75,27 \cdot 0 = 58,95 \text{ kN}$$

- Obciążenie tężnika od sił tarcia wiatru (obciążenie ściany podłużnej, z uwzględnieniem współczynnika  $\gamma_Q = 1,5$ )

$$F_{fr} = 0 \text{ kN}$$

- Oddziaływania imperfekcji przechyłowej słupów

- Siła ściskająca w słupie (pkt. 8.4.2)

$$N_{Ed,f} = \frac{N_{Ed}}{2} + \frac{M_{Ed}}{h-t_f} = \frac{3403,97 \cdot 10^3}{2} + \frac{67,41 \cdot 10^6}{298,5-12,5} = 1937,68 \cdot 10^3 N = 1937,38 kN$$

$$\alpha_m = \sqrt{0,5 \cdot \left(1 + \frac{1}{m}\right)} = \sqrt{0,5 \cdot \left(1 + \frac{1}{6}\right)} = 0,76$$

$$\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{h}} = \frac{2}{\sqrt{17}} = 0,49$$

- Globalna imperfekcja przechyłowa

$$\phi = \phi_0 \alpha_h \alpha_m = \frac{1}{200} \cdot 0,49 \cdot 0,76 = 1,86 \cdot 10^{-3} rad$$

- Siła pozioma od imperfekcji słupów

$$\phi \sum N_{Ed} = 1,86 \cdot 10^{-3} \cdot 0,49 \cdot 0,76 \cdot 1937,38 = 1,34 kN$$

- Siła pozioma  $\sum F_m$ , wynikająca ze stabilizacji słupów ściany podłużnej za pomocą stężeń ściany podłużnej:

$$\sum F_m = 8 \cdot a \cdot \sum N_{Ed} \cdot \frac{e_0 + \delta_q}{L^2}$$

W obliczeniach przyjęto  $\delta_q = 0$ ,  $L = 10925$  mm.

$$e_0 = \alpha_m \cdot \frac{L}{500} = 0,76 \cdot \frac{17000}{500} = 25,84 mm$$

$$a = \frac{4550 + 4200 + 4200 + 4050}{2} = 8500 mm$$

$$\sum F_m = 8 \cdot a \cdot \sum N_{Ed} \cdot \frac{e_0 + \delta_q}{L^2} = 8 \cdot 8500 \cdot 6 \cdot 1937,38 \cdot \frac{25,84 + 0}{17000^2} = 70,68 kN$$

### 10.3. Obliczenia statyczne

Przyjęto, że tężniki przejmują tylko podłużne siły rozciągające.

Siła w prętach skratowania

$$\cos \alpha_2 = \frac{9700}{\sqrt{9700^2 + 4550^2}} = 0,91$$

$$K_2 = \frac{R_A(w) + \phi \sum N_{Ed} + F_{fr} + \sum F_m}{\cos \alpha_2} = \frac{58,95 + 1,34 + 0 + 70,68}{0,91} = 143,92 kN$$

### 10.4. Stan graniczny nośności

Jako pręty skratowania przyjęto pręt okrągły  $\Phi 20$  w układzie identycznym jak w stężeniu połączonym poprzecznym T-1.

- Nośność połączenia:

$$N_{u,Rd} = F_{v,Rd} = 150,72 kN$$

- Sprawdzenie warunku

$$\frac{N_{Ed}}{N_{u,Rd}} = \frac{143,92}{150,72} = 0,95 \rightarrow \text{warunek spełniony}$$

## Bibliografia

### Książki i artykuły

- [1] Kozłowski A., *Konstrukcje stalowe. Przykłady obliczeń według PN-EN 1993-1. Część pierwsza. Wybrane elementy i połączenia.*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2009
- [2] Biegus A., *Stalowe budynki halowe.*, Wydawnictwo Arkady, Warszawa 2003, 2004
- [3] Kurzawa, *Stalowe konstrukcje prętowe obciążone statycznie i dynamicznie: Elementy konstrukcji hal przemysłowych oraz obiektów użyteczności publicznej. Część I.*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2010
- [4] Łubiński M., Żółtowski W.: *Konstrukcje metalowe. Część II.*, Arkady, Warszawa, 2008.
- [5] Kobiela S., *Przekrycia stalowe dużych rozpiętości*, Warsztat pracy projektanta konstrukcji, Szczyrk, 7-10 marca 2012, tom I, str. 1-128.
- [6] Borusiewicz W.: *Konstrukcje budowlane dla architektów.* Arkady, Warszawa, 1973.
- [7] Buczkowski W. *Budownictwo ogólne. Konstrukcje budynków. Tom 4.* Arkady, Warszawa, 2009, str. 571
- [8] *Inżynieria i Budownictwo* Nr 1/2003 ,str. 56
- [9] *Murator Plus* Wrzesień 1999 ,str. 43-46
- [10] Pelczarski Z.: *Widownie współczesnych stadionów. Determinanty i problemy projektowe.*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, Białystok 2018
- [11] Neufert E.: *Podręcznik projektowania architektoniczno-budowlanego.* Arkady, Warszawa, 2010

### Źródła internetowe

- [W1] <https://cobouw.pl/hale-magazynowe/>; Dostępność: 28.04.2022.
- [W2] <https://www.halestalowe.com.pl/hale-produkcyjne/>; Dostępność: 28.04.2022.
- [W3] <http://autograf-studio.pl/portfolio/hala-300-projekt-obiektu-rekreacyjno-sportowego-w-bobowej/>; Dostępność: 28.04.2022.
- [W4] <https://rubbpolska.pl/blog/5-powodow-dla-ktorych-ocieplane-hangary-lotnicze-rubb-sa-bezkonkurencyjne/>; Dostępność: 28.04.2022.
- [W5] <https://construction.arcelormittal.com/pl-pl/produkt/dach/blachy-lukowe-nosne/floline-40/>; Dostępność: 28.04.2022

- [W6] <http://staff.uz.zgora.pl/krurbans/dydaktyczne/%C5%81uk.pdf>; Dostępność: 28.04.2022
- [W7] <https://inzynerbudownictwa.pl/konstrukcje-stalowe-hal-wielkopowierzchniowych/>; Dostępność: 28.04.2022
- [W8] <https://docplayer.pl/67856790-Konstrukcje-stalowe-o-duzych-rozpietosciach.html>; Dostępność: 11.05.2022
- [W9] <https://ergoarena.pl/arena/>; Dostępność: 11.05.2022
- [W10] <https://www.britannica.com/topic/Astrodome>; Dostępność: 11.05.2022
- [W11] <http://inzynerbudownictwa.pl/stadion-narodowy-w-warszawie-konstrukcja-stalowa-linowa-i-dach-cz-i/>; Dostępność: 11.05.2022
- [W12] [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a2/Dorton\\_Arena\\_West\\_Side.JPG](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a2/Dorton_Arena_West_Side.JPG); Dostępność: 13.05.2022
- [W13] <http://www.spodekkatowice.pl/pl/wiadomosci/hala-spodek-w-katowicach-majuz-49-lat,1834.html>; Dostępność: 11.05.2022
- [W14] <http://www.hellosport.pl/PL-H5/1/17/obiekty-sportowestadion-wembley-w-londynie.html>; Dostępność: 13.05.2022
- [W15] <https://www.budowle.pl/najdluzsze-mosty-lukowe>; Dostępność: 29.04.2022
- [W16] <http://torontosnews.blogspot.com/2014/05/the-25th-anniversary-of-rogers-centre.html>; Dostępność: 29.04.2022
- [W17] [https://pl.wikipedia.org/wiki/Tropical\\_Islands](https://pl.wikipedia.org/wiki/Tropical_Islands); Dostępność: 11.05.2022
- [W18] <https://www.gov.pl/attachment/502fdff0-a903-4320-9295-5625cf6dacc4>  
Dostępność: 29.04.2022
- [W19] [https://www.tauronarenakrakow.pl/content/uploads/2020/03/TAURON-Arena-Krak%C3%B3w-Katalog-2018\\_lekki.pdf](https://www.tauronarenakrakow.pl/content/uploads/2020/03/TAURON-Arena-Krak%C3%B3w-Katalog-2018_lekki.pdf); Dostępność: 29.04.2022
- [W20] <https://www.architekturaibiznes.pl/tauron-arena-krakow-sportowy-energetyk,2421.html>; Dostępność: 29.04.2022
- [W21] [https://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-256ad0f2-a935-4c1e-bcd9-146d42ab4478/c/Kossak\\_A\\_Zrodla\\_6\\_2021.pdf](https://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-256ad0f2-a935-4c1e-bcd9-146d42ab4478/c/Kossak_A_Zrodla_6_2021.pdf); Dostępność: 25.05.2022
- [W22] [https://www.inzynieriaibudownictwo.pl/images/Kronika/inzynieria-7-8\\_60-lat-Kusia.pdf](https://www.inzynieriaibudownictwo.pl/images/Kronika/inzynieria-7-8_60-lat-Kusia.pdf); Dostępność: 25.05.2022
- [W23] <https://przygodaznysa.eu/vt-tourist-attr/centrum-sportowo-rekreacyjne-w-zgorzelcu-sp-z-o-o/>; Dostępność: 25.05.2022



- [W24] <https://www.pzps.pl/pl/zwiazek/przepisy/przepisy-sportowo-organizacyjne/71-warunki-gry-i-wyposazenia-objektu-sportowego>; Dostępność: 30.04.2022
- [W25] [https://pzkosz.pl/m/files/290911/oficjalne%C2%AD\\_przepisy\\_gry\\_w\\_koszykowke\\_2010.pdf](https://pzkosz.pl/m/files/290911/oficjalne%C2%AD_przepisy_gry_w_koszykowke_2010.pdf); Dostępność: 30.04.2022
- [W26] [https://zprp.pl/wp-content/uploads/2016/12/Przepisy\\_gry\\_pilka\\_reczna\\_2016.pdf](https://zprp.pl/wp-content/uploads/2016/12/Przepisy_gry_pilka_reczna_2016.pdf); Dostępność: 30.04.2022
- [W27] <https://prostar.pl/oferta/krzeselka-na-stadion-wo-06>; Dostęp: 30.04.2022
- [W28] <https://trybunysportowe.pl/wp-content/uploads/2019/05/Krzes%5%82o-kube%5%82kowe-model-WO-06.pdf>; Dostępność: 30.04.2022
- [W29] [http://baleks.eu/files/\\_s/bk/0g/i9/07\\_08\\_2014\\_blachy\\_trapezowe\\_PL.pdf](http://baleks.eu/files/_s/bk/0g/i9/07_08_2014_blachy_trapezowe_PL.pdf), str. 57 i str. 59; Dostępność: 14.05.2022

## **Normy i wytyczne do projektowania**

- [N1] PN-EN 1990:2004, Eurokod 0: Podstawy projektowania konstrukcji.
- [N2] PN-EN 1991-1-1:2004, Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-1: Oddziaływania ogólne. Ciężar objętościowy, ciężar własny, obciążenia użytkowe w budynkach.
- [N3] PN-EN 1991-1-3:2005, Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-3: Oddziaływania ogólne – Obciążenie śniegiem.
- [N4] PN-EN 1991-1-4:2008, Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-4: Oddziaływania ogólne – Oddziaływanie wiatru.
- [N5] PN-EN 1993-1-1:2007, Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- [N6] PN-EN 1993-1-8:2006, Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-8: Projektowanie węzłów



## Spis tabel

Tabela 1.1. Zestawienie dużych hal widowiskowo-sportowych w województwie podkarpackim [W18] .....	38
Tabela 2.1. Wymiary boisk poszczególnych dyscyplin sportowych [W24][W25][W26] .....	47
Tabela 2.2. Klasyfikacja łuków w zależności od strzałki $f$ dla stałej rozpiętości $l$ .....	54
Tabela 2.3. Wartości rzędnych punktu dla łuków płaskich .....	55
Tabela 2.4. Wartości rzędnych punktu dla łuków wyniosłych .....	57
Tabela 5.1. Składowe obciążenia prostopadłego i równoległego do połaci dachu .....	82
Tabela 6.1. Zestawienie obciążeń śniegiem przypadające na płatew z uwagi na jej położenie .....	89
Tabela 6.2. Zestawienie obciążeń wiatrem przypadające na płatew z uwagi na jej położenie .....	90
Tabela 6.3. Zestawienie obciążeń wiatrem przypadające na płatew z uwagi na jej położenie .....	91
Tabela 6.4. Rozkład obciążeń na składowe .....	92
Tabela 6.5. Rozkład obciążeń na składowe .....	92
Tabela 6.6. Zestawienie wyników .....	97
Tabela 6.7. Charakterystyki prętów oraz zestawienie sił w prętach .....	110
Tabela 7.1. Zestawienie obciążeń śniegiem przypadające na dźwigar z płatwi z uwagi na jej położenie .....	121
Tabela 7.2. Zestawienie obciążeń wiatrem przypadające na dźwigar z płatwi z uwagi na jej położenie .....	123
Tabela 7.3. Zestawienie obciążeń wiatrem przypadające na płatew z uwagi na jej położenie .....	124
Tabela 7.4. Charakterystyki prętów oraz zestawienie sił w prętach .....	148
Tabela 8.1. Siły występujące w połączeniach .....	181



## Spis rysunków

Rys. 1.1. Aksonometria hali i wiaty; 1-obudowa dachu; 2-obudowa ścian; 3-okna; 4-wrota; 5-słupy główne [1].....	14
Rys. 1.2. Hala magazynowa wysokiego składowania [W1].....	15
Rys. 1.3. Hala przemysłowa stalowa z dwiema suwnicami o udźwigu 8 i 12,5 tony [W2].....	16
Rys. 1.4. Hala widowisko – sportowa w Bobowej [W3].....	17
Rys. 1.5. Hangar lotniczy [W4] .....	17
Rys. 1.6. Widok elementów składowych hali; 1-obudowa dachowa, 2-konstrukcja wsporcza obudowy dachowej, 3-obudowa ścienna, 4-konstrukcja wsporcza obudowy ściennej, 5-rama głównego układu nośnego (poprzecznego), 6-stężenie ścienne, 7-stężenie dachowe [1].....	18
Rys. 1.7. Powtarzalność głównych układów poprzecznych, a) rama w osiach 2-6, b) rama w osiach 1 i 7, c) aksonometria szkieletu stalowego [1] .....	19
Rys. 1.8. Panel łukowy z blachy fałdowej [W5] .....	19
Rys. 1.9. Przykłady kratownic dachowych łukowych; a) i b) o zmiennych wysokościach, c) o stałej wysokości [1] .....	19
Rys. 1.10. Hale o konstrukcji łukowej; a) główny układ poprzeczny w postaci łuku kratowego, b) układ słupowo ryglowy, z łukowym rygłem i ze ściągami [1].....	20
Rys. 1.11. Elementy łuku [W6] .....	20
Rys. 1.12. Schematy statyczne łuków [4] .....	20
Rys. 1.13. Sprężenie łuku: 1-ciężno sprężające, 2-wiotki pas, 3-skratowanie [4] .....	21
Rys. 1.14. Rodzaje krzywizn łuku: a) łuk kołowy, b) łuk paraboliczny [W6] .....	21
Rys. 1.15. Oparcie łuków: a) i b) bezpośrednio na fundamencie, c) i d) na słupach [W7].....	22
Rys. 1.16. Hala sportowa Wiener Stadthalle w Wiedniu (Austria): a) przekrój poprzeczny, b) przekrój podłużny: 1-rama główna, 2-ściąg, 3-dźwigar wspornikowy, 4-dźwigar skrajny [6].....	24
Rys. 1.17. Przekrój hali widowiskowej Oliwa w Gdańsku (Polska) [4].....	25
Rys. 1.18. Hala widowisko-sportowa Ergo Arena: a) przekrój poprzeczny, b) przekrój podłużny [W9].....	26

Rys. 1.19. Stadion Thomond Park w Limerick (Irlandia): a) przekrój poprzeczny przekrycia i trybun, b) szczegół podparcia łuku, c) widok łuku kratowego o przekroju trójkątnym o rozpiętości 150 m, d) widok podparcia łuku [5].....	27
Rys. 1.20. Hala sportowo-widowiskowa „Stegu Arena” w Opolu (Polska): a) rzut konstrukcji dachu, b) widok [6] .....	28
Rys. 1.21. Hala Astrodome w Houston (USA)-konstrukcja dachu [W10] .....	28
Rys. 1.22. Przekrój przez stadion [W11].....	29
Rys. 1.23. Przekrój przez strukturę stadionu [W11] .....	30
Rys. 1.24. „Paraboleum” Dorton Arena w Raleigh (USA), architekt Maciej Nowicki [W12] .....	30
Rys. 1.25. Hala widowiskowo-sportowa „Spodek” w Katowicach (Polska) [W13] .....	31
Rys. 1.26. Schemat konstrukcji hali widowiskowo-sportowej w Katowicach: 1-płaskie żebra kratowe, 2-wsporniki żeber w wyższej części hali, 3-dźwigary prętowo-linowe, 4-pierścień usztywniający pod kopułą, 5-obwodowy pierścień dachowy, 6-kopuła żebrowa, 7-skrzynkowy pierścień fundamentowy z betonu sprężonego, 8-żelbetowe słupy prefabrykowane, 9-pierścień pośredni fundamentowy, 10-słupy, 11-stopy fundamentowe [7].....	31
Rys. 1.27. Pawilon wystawowy w Mediolanie: a) schemat łuku, b) fragment skratowania łuku [5].....	32
Rys. 1.28. Widok stadionu w Nowym Jorku (USA) [5] .....	32
Rys. 1.29. Stadion Wembley w Londynie (Anglia) [W14].....	33
Rys. 1.30. Most Bayonne Bridge w Stanach Zjednoczonych [W15].....	33
Rys. 1.31. Szklany dach na konstrukcji łukowej nad peronem: widok ogólny przekrycia peronów [5].....	34
Rys. 1.32. Kompleks sportowo-rekreacyjny „Rogers Centre” w Toronto (Kanada) [W16].....	34
Rys. 1.33. Tropical Island w Halbe (Niemcy): a) widok kopuły od zewnątrz, b) widok konstrukcji od środka [W17].....	35
Rys. 1.34. Rozmieszczenie hal sportowo-widowiskowych w Polsce [W18].....	36
Rys. 1.35. Rozmieszczenie największych hal sportowo-widowiskowych w Polsce [W18].....	37
Rys. 1.36. Duże hale widowiskowo-sportowe na obszarze województwa podkarpackiego [W18].....	38
Rys. 1.37. Tauron Arena Kraków – widok zewnętrzny obiektu [W18].....	39

Rys. 1.38. Tauron Arena Kraków – przekrój obiektu: a) przekrój podłużny, b) przekrój poprzeczny [W20].....	40
Rys. 1.39. Tauron Arena Kraków – rzut widowni [W20] .....	40
Rys. 2.1. Widok ukończonej hali targowej od strony północo-wschodniej [7].....	42
Rys. 2.2. Przekrój podłużny hali [7] .....	42
Rys. 2.3. Kratowe przypory A-Bock: a) widok, b) schemat obciążenia kratowych podpór dźwigara [7] .....	43
Rys. 2.4. Rzut hali w poziomie pierwszego piętra: 1-trojkatna rama podpory; 2-kanaly ze sprężonymi cięgnami łączącymi podpory [9] .....	44
Rys. 2.5. Konstrukcja nośna łukowego przekrycia-przekrój pionowy podłużny A-A: 1-główny dźwigar nośny, 2-trojkatna rama podpory głównego dźwigara, 3-blok ekranów telewizyjnych, 4- sprężone cięgna łączące podpory [9] .....	45
Rys. 2.6. Konstrukcja trybun hali-przekrój pionowy poprzeczny B-B: 1-główny dźwigar nośny, 2-kratowa płatew, 3-sprężone cięgna łączące podpory [9] .....	45
Rys. 2.7. Przekrój poprzeczny hali w Zgorzelcu [W22].....	46
Rys. 2.8. Widok obiektu [W29] .....	46
Rys. 2.9. Przyjęty układ boisk: linia czerwona-siatkówka, linia pomarańczowa koszykówka, linia zielona-piłka ręczna, linia przerywana- strefa wolna od przeszkód .	47
Rys. 2.10. Rzuty widowni o prostokątnej geometrii poziomej dla boisk prostokątnych: a) prostokątna z wolnymi narożnikami, b) prostokątna z narożnikami wypełnionymi budynkiem, c) wielokątowa ośmiokątna, d) prostokątna z narożnikami łukowymi [10]	48
Rys. 2.11. Przykładowe rozwiązanie siedzisk na trybunie [11] .....	49
Rys. 2.12. Wymiary siedziska [W18] .....	50
Rys. 2.13. Mocowanie krzesełek [W19].....	50
Rys. 2.14. Fragment przyjętej trybuny z wymiarami: a) rzut, b) przekrój .....	51
Rys. 2.15. Wariant I - rzut trybuny prostokątnej z narożnikami łukowymi.....	52
Rys. 2.16. Wariant II - rzut trybuny prostokątnej z narożnikami wypełnionymi budynkiem .....	53
Rys. 2.17. Wymiary układu ramowego przyjętego w konstrukcji.....	54
Rys. 2.18. Graficzne oznaczenie parametrów łuku do wyznaczenia krzywizn łuku [W6] .....	55
Rys. 2.19. Ukształtowane łuków: linia ciągła-łuki płaskie, linia przerywane - łuki wyniosłe .....	58

Rys. 2.20. Rzut obiektu – przyjęte wymiary konstrukcji hali widowiskowo – sportowej .....	59
Rys.2.21.Przekrój konstrukcji-przyjęte wymiary konstrukcji hali widowiskowo-sportowej .....	59
Rys. 4.1. Wymiary budynku halowego do zestawienia obciążeń atmosferycznych: a) rzut, b) przekrój .....	69
Rys. 4.2. Strefy obciążenia śniegiem gruntu w Polsce [N3] .....	70
Rys. 4.3. Obciążenie śniegiem dachu: a) S1- układ równomierny, b) S2 - układ nierównomierny .....	71
Rys. 4.4. Podział Polski na strefy obciążenia wiatrem [N4] .....	72
Rys. 4.5. Rozmieszczenie pól o różnych współczynnikach ciśnienia zewnętrznego na dachu, gdy wiatr wieje prostopadle do ściany podłużnej ( $\theta=0^\circ$ ) .....	73
Rys. 4.6. Współczynniki ciśnienia zewnętrznego $c_{pe,10}$ dachów łukowych o rzucie prostokąta [N4].....	74
Rys. 4.7. Rozmieszczenie pól o różnych współczynnikach ciśnienia zewnętrznego na ścianie szczytowej, gdy wiatr wieje prostopadle do ściany podłużnej ( $\theta=0^\circ$ ): a) ściana szczytowa, b) ściana podłużna- nawietrzna, c) ściana podłużna- zawietrzna .....	75
Rys. 4.8. Ciśnienie wiatru działające dla kierunku prostopadłego do ściany podłużnej ( $\theta=0^\circ$ ) .....	76
Rys. 4.9. Rozmieszczenie pól o różnych współczynnikach ciśnienia zewnętrznego na ścianie podłużnej, gdy wiatr wieje równoległe do ściany podłużnej ( $\theta=90^\circ$ ).....	76
Rys. 4.10. Rozmieszczenie pól o różnych współczynnikach ciśnienia zewnętrznego na dach, gdy wiatr wieje równoległe do ściany podłużnej ( $\theta=90^\circ$ ).....	77
Rys. 4.11. Ciśnienie wiatru działające dla kierunku równoległego do ściany podłużnej ( $\theta=90^\circ$ ) .....	78
Rys. 4.12. Współczynniki ciśnienia wewnętrznego: a) parcie, b) ssanie .....	78
Rys. 4.13. Ciśnienie wiatru na powierzchni wewnętrzne: a) parcie, b) ssanie.....	79
Rys. 4.14. Powierzchnia odniesienia do obliczenia siły tarcia.....	79
Rys. 5.1. Blacha trapezowa TR 93.260.1040 gr. 1,25 mm [W29] .....	81
Rys. 5.2. Schemat statyczny poszycia dachu .....	81
Rys. 6.1. Warianty płatwi w zależności od wysokości, kąta nachylenia krzyżulców oraz rozstawu węzłów krzyżulców: a) dla rozstawu węzłów 1616,7 mm, b) dla rozstawu	



węzłów 1940 mm, c) dla rozstawu węzłów 2425 mm, d) dla rozstawu węzłów 3234 mm .....	86
Rys. 6.2. Schemat statyczny płatwi .....	87
Rys. 6.3. Schemat obciążenia płatwi kratowej umieszczonej prostopadle do połaci dachu .....	88
Rys. 6.4. Obciążenie śniegiem dachu przypadające na płatew (w kN/m <sup>2</sup> ): a) równomierne obciążenie śniegiem dachu, b) nierównomierne obciążenie śniegiem dachu.....	89
Rys. 6.5. Obciążenie ssaniem wiatru płatwi gdy wiatr wieje prostopadle do ściany podłużnej.....	90
Rys. 6.6. Obciążenie ssaniem wiatru płatwi gdy wiatr wieje prostopadle do ściany szczytowej.....	91
Rys. 6.7. Wyniki obliczeń statycznych - Kombinacja K1: a) schemat statyczny, b) momenty zginające, c) siły poprzeczne, d) siły podłużne .....	95
Rys. 6.8. Wyniki obliczeń statycznych - Kombinacja K2: a) schemat statyczny, b) momenty zginające, c) siły poprzeczne, d) siły podłużne .....	97
Rys. 6.9. Długość wyboczeniowa pasa górnego płatwi w płaszczyźnie kratownicy .....	99
Rys. 6.10. Długość wyboczeniowa pasa dolnego płatwi w płaszczyźnie kratownicy..	103
Rys. 6.11. Długość wyboczeniowa pasa dolnego płatwi z płaszczyzny kratownicy....	104
Rys. 6.12. Długość wyboczeniowa krzyżulca z płaszczyźnie kratownicy .....	106
Rys. 6.13. Przyjęte przekroje kratownicy w analizie.....	108
Rys. 6.14. Schemat statyczny płatwi-faza montażu.....	108
Rys. 6.15. Oznaczenie węzłów w płatwi kratowej .....	110
Rys. 6.16. Węzeł wewnętrzny płatwi typu K z odstępem .....	111
Rys. 6.17. Oparcie płatwi na dźwigarze kratowym .....	114
Rys. 6.18. Węzeł podporowy płatwi: a) widok podparcia, b) szczegół I-I i II-II.....	115
Rys. 6.19. Węzeł wewnętrzny płatwi typu K.....	116
Rys. 6.20. Widok węzła w programie ARSA .....	116
Rys. 6.21. Węzeł wewnętrzny płatwi typu K.....	117
Rys. 6.22. Widok węzła w programie ARSA.....	117
Rys. 7.1. Schemat statyczny głównego układu poprzecznego hali .....	119
Rys. 7.2. Przyjęte przypadające obciążenia na konstrukcje hali.....	120
Rys. 7.3. Obciążenia stałe – G .....	120
Rys. 7.4. Równomierne obciążenie śniegiem – S1 .....	121
Rys. 7.5. Nierównomierne obciążenie śniegiem – S2 .....	122

---

Rys. 7.6. Oddziaływanie wiatru prostopadle do ściany podłużnej.....	122
Rys. 7.7. Oddziaływanie wiatru na powierzchnie zewnętrzne gdy wiatr wieje prostopadle do ściany podłużnej – $W_{e1s}$ .....	123
Rys. 7.8. Oddziaływanie wiatru prostopadle do ściany szczytowej.....	124
Rys. 7.9. Oddziaływanie wiatru na powierzchnie zewnętrzne gdy wiatr wieje prostopadle do ściany szczytowej - $W_{e2s}$ .....	125
Rys. 7.10. Oddziaływanie wiatru na powierzchnie zewnętrzne $W_{is}$ - ssanie.....	125
Rys. 7.11. Oddziaływanie wiatru na powierzchnie zewnętrzne $W_{ip}$ - parcie .....	126
Rys. 7.12. Wyniki obliczeń statycznych - Kombinacje: a) siły podłużne b) momenty zginające, c) siły poprzeczne.....	128
Rys. 7.13. Wyniki obliczeń statycznych dla pasa górnego – KOMB2: a) siły podłużne b) momenty zginające c) siły tnące .....	130
Rys. 7.14. Długości wybozeniowe pręta kratownicy .....	132
Rys. 7.15. Wyniki obliczeń statycznych dla pasa dolnego – KOMB 2 : a) siły podłużne b) momenty zginające c) siły tnące .....	136
Rys. 7.16. Długość wybozeniowa pasa dolnego dźwigara.....	138
Rys. 7.17. Wyniki obliczeń statycznych dla krzyżulców – KOMB 2: siły podłużne ...	141
Rys. 7.18. Długość wybozeniowa krzyżulca w płaszczyźnie kratownicy.....	142
Rys. 7.19. Wyniki obliczeń statycznych dla pasa górnego – KOMB2: siły podłużne..	144
Rys. 7.20. Długość wybozeniowa słupka w płaszczyźnie kratownicy.....	145
Rys. 7.21. Przyjęte do wymiarowania węzły dźwigara.....	148
Rys. 7.22. Schemat węzła podporowego A .....	149
Rys. 7.23. Schemat węzła B .....	151
Rys. 7.24. Schemat węzła C .....	152
Rys. 7.25. Schemat węzła D.....	153
Rys. 7.26. Schemat węzła E .....	154
Rys. 7.27. Schemat węzła F .....	155
Rys. 7.28. Styki montażowe w dźwigarze kratowym .....	156
Rys. 7.29. Styk montażowy pasa górnego wiazara: a) widok, b) szczegół I-I.....	156
Rys. 7.30. Styk montażowy pasa dolnego wiazara: a) widok, b) szczegół I-I.....	157
Rys. 8.1. Schemat statyczny głównego układu poprzecznego hali .....	159
Rys. 8.2. Wyniki obliczeń statycznych dla słupa pionowego: a) KOMB 2 - siły podłużne (rozciąganie), c) KOMB 2 - momenty zginające, b) KOMB 4 - siły podłużne (ściskanie), d) KOMB 2 - siły tnące .....	161

Rys. 8.3. Długość wyboczeniowa słupa w płaszczyźnie .....	163
Rys. 8.4. Wyniki obliczeń statycznych dla słupa ukośnego – KOMB4: a) siły podłużne b) momenty zginające c) siły tnące.....	167
Rys. 8.5. Długość wyboczeniowa słupa ukośnego w płaszczyźnie.....	169
Rys. 8.6. Długość wyboczeniowa z płaszczyzny.....	170
Rys. 8.7. Wyniki obliczeń statycznych dla zastrzałów a) KOMB 4 - siły podłużne, b) KOMB2 - momenty zginające, c) KOMB 4 – podłużne (rozciąganie).....	173
Rys. 8.8. Długość wyboczeniowa pasa dolnego dźwigara .....	175
Rys. 8.9. Wyniki obliczeń statycznych dla zastrzałów a) KOMB 2 - siły podłużne (rozciąganie), b) KOMB2 - momenty zginające, c) KOMB 4 – podłużne (ściskanie)	177
Rys. 8.10. Występowanie połączeń w konstrukcji wsporczej .....	179
Rys. 8.11. Widok połączenia podstawy słupa pionowego w programie ARSA	180
Rys. 8.12. Widok połączenia doczołowego słupa w programie ARSA .....	180
Rys. 8.13. Widok połączenia podstawy słupa ukośnego w programie ARSA .....	181
Rys. 8.14. Połączenie słupa pionowego i słupa ukośnego.....	182
Rys. 8.15. Widok głowicy słupów .....	183
Rys. 8.16. Przekrój zastępczy .....	185
Rys. 8.17. Rozmieszczenie śrub w połączeniu głowicy .....	189
Rys. 9.1. Rozmieszczenie stężeń połączeniowych w konstrukcji hali.....	191
Rys. 9.2. Schemat statyczny tężnika połączeniowego poprzecznego .....	191
Rys. 9.3. Przyjęty do obliczeń układ prętów skratowania .....	194
Rys. 9.4. Połączenie prętów tężnika z pasem górnym wiązara .....	195
Rys. 10.1. Rozmieszczenie stężeń ściany podłużnej w konstrukcji hali .....	197
Rys. 10.2. Schemat statyczny stężenia pionowego podłużnego .....	197



# Załączniki

## **Załącznik 1: Wymiarowanie połączeń elementów konstrukcji w programie ARSA**

### **Załącznik 2: Dokumentacja rysunkowa**

#### **Rysunki zestawieniowe:**

Rys. 1. Rzut konstrukcji dachu; 1:200

Rys. 2. Przekrój I – I; 1:200

Rys. 3. Przekrój II – II; 1:200

#### **Rysunki montażowe:**

Rys. 4. Schemat montażowy I; 1:200

Rys. 5. Schemat montażowy II – przekrój I-I; 1:200

Rys. 6. Schemat montażowy III – przekrój II-II; 1:200

Rys. 7. Szczegóły montażowe; 1:20

#### **Rysunki robocze:**

Rys. 8. Płatew kratowa P-K 1; 1:10

Rys. 9a. Konstrukcja wsporcza K-W; 1:100

Rys. 9b. Konstrukcja wsporcza K-W (rygle +zastrzały); 1:100

Rys. 10. Wiązar W-1; 1:50

Rys. 11. Wiązar W-2; 1:50

Rys. 12. Wiązar W-3; 1:50

Rys. 13. Wiązar W-4; 1:50

Rys. 14. Wiązar W-5; 1:50

### **Załącznik 3: Plakat**



POLITECHNIKA RZESZOWSKA IM. I. ŁUKASIEWICZA  
Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury  
Katedra Konstrukcji Budowlanych

Rzeszów, 2022

**STRESZCZENIE PRACY DYPLOMOWEJ MAGISTERSKIEJ  
PROJEKT WIELOFUNKCYJNEJ HALI SPORTOWEJ DLA 9 TYŚ.  
WIDZÓW**

Autor: inż. Paweł Kowalski

Opiekun: prof. dr hab. inż. Aleksander Kozłowski

Słowa kluczowe: hala, konstrukcja, stal, połączenia, trybuna

Przedmiotem pracy magisterskiej jest wykonanie konstrukcji stalowej wielofunkcyjnej hali sportowej przeznaczonej na pobyt 9000 widzów. Konstrukcje budynku zaprojektowano mając na uwadze przeznaczenie hali – obiekt widowiskowo – sportowy przystosowany do gier zespołowych tj.: siatkówka, koszykówka, piłka ręczna. W obszarze kubatury projektowanego obiektu usytuowano trybunę stałą oraz znajdujące się pod nią zaplecze gospodarczo – sanitarne do obsługi widzów. Do głównych elementów konstrukcyjnych hali należą: poszycie dachu, płatew kratowa, dźwigar łukowy oraz konstrukcja wsporcza. Na podstawie sił wewnętrznych uzyskanych z analizy modeli płaskich wykonanych w programie Autodesk Robot Structural Analysis, wykonano obliczenia statyczno-wytrzymałościowe poszczególnych elementów konstrukcji oraz połączeń.

I. LUKASIEWICZ RZESZOW UNIVERSITY OF TECHNOLOGY Rzeszów, 2022  
Faculty of Civil and Environmental Engineering and Architecture  
Department of Building Structures

**DIPLOMA THESIS MS ABSTRACT  
PROJECT OF A MULTIFUNCTIONAL SPORTS HALL FOR 9 THOUSAND  
SPECTATORS**

Author: inż. Paweł Kowalski

Supervisor: prof. dr hab. inż. Aleksander Kozłowski

Keywords: hall, structure, steel, links, stand

The aim of the thesis was to design a steel construction of a multifunctional sports hall destined for 9000 spectators. The project was prepared considering its purpose – a sports and entertainment venue adapter to team sports, i.e. volleyball, basketball or handball. A permanent stand as well as a sanitary and maintenance facility for serving audience were included in the facility's cubic area. The main structural elements are: roof covering, lattice purlin, arch girder and support structure. Based on internal forces derived from flat model analyses performed in Autodesk Robot Structural Analysis software, a series of structural calculations was carried out, with its subject being particular construction elements and links.





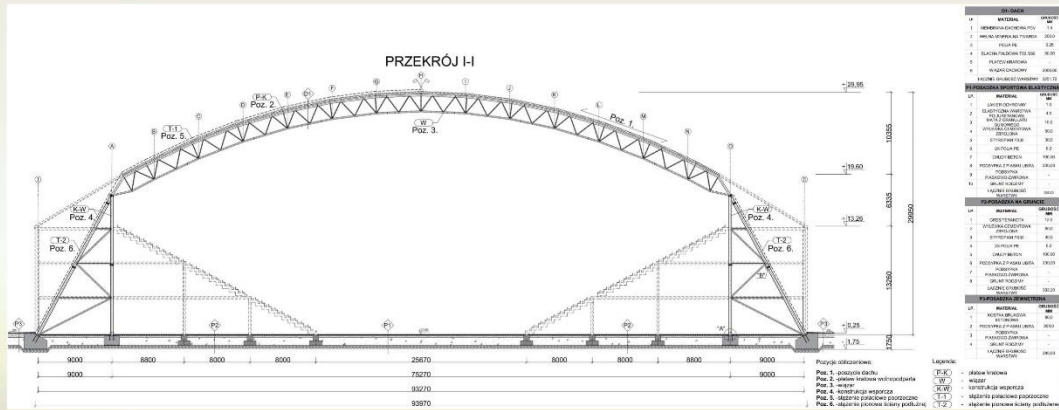




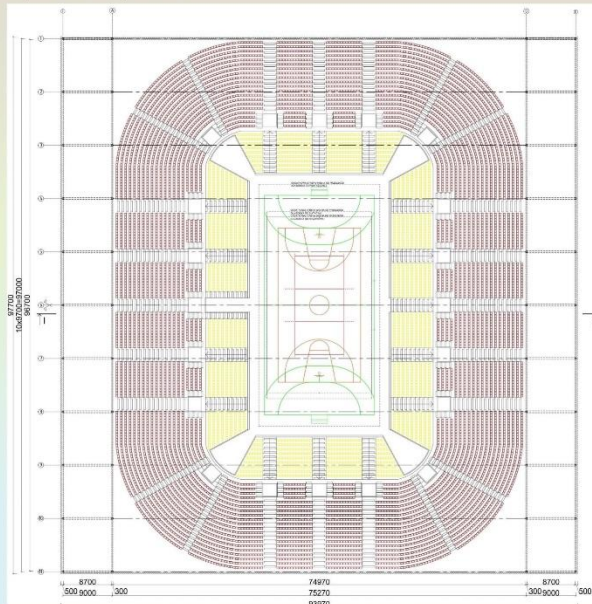
**PRACA DYPLOMOWA MAGISTERSKA**

**PROJEKT WIELOFUNKCYJNEJ HALI SPORTOWEJ DLA 9 TYŚ. WIDZÓW**

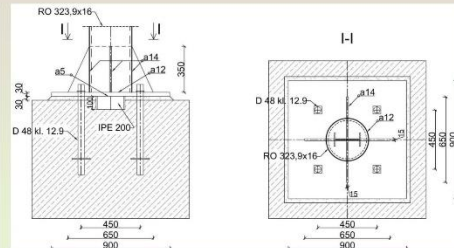
Przedmiotem pracy magisterskiej jest projekt wielofunkcyjnej hali sportowej o konstrukcji stalowej przeznaczonej na pobyt dla 9000 widzów. Do głównych elementów konstrukcyjnych hali należą: poszycie dachu, płatew kratowa, dźwigar łukowy oraz konstrukcja wsporcza. Na podstawie sił wewnętrznych uzyskanych z analizy modeli płaskich wykonanych w programie Autodesk Robot Structural Analysis, wykonano obliczenia statyczno-wytrzymałościowe poszczególnych elementów konstrukcji.



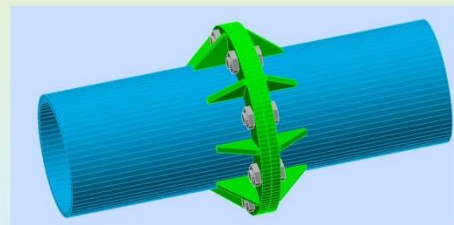
Rys. 1. Przekrój I-I hali



Rys. 2. Rzut obiektu



Rys. 3. Szczegół "A" - podstawa słupa pionowego



Rys. 4. Szczegół "B" - połączenie doczołowe słupów ukośnych