

POLITECHNIKA BIAŁOSTOCKA

WYDZIAŁ BUDOWNICTWA I NAUK O ŚRODOWISKU

PRACA DYPLOMOWA INŻYNIERSKA

TEMAT: PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU DLA STEROWCÓW
Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

WYKONAWCA: KRZYSZTOF SŁOMA

OPIEKUN PRACY DYPLOMOWEJ: DR INŻ. MARCIN GRYNIEWICZ

BIAŁYSTOK 2025 ROK

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

Karta dyplomowa

POLITECHNIKA BIAŁOSTOCKA Wydział Budownictwa i Nauk o Środowisku	Studia stacjonarne stacjonarne/niestacjonarne studia I stopnia studia I stopnia/studia II stopnia	Nr albumu studenta 112692
		Rok akademicki 2024/2025
		Kierunek studiów Budownictwo Specjalność Konstrukcje budowlane
Krzysztof Słoma Imiona i nazwisko studenta		
TEMAT PRACY DYPLOMOWEJ: Projekt odtwórczy konstrukcji wojskowego hangaru dla sterowców z okresu I Wojny Światowej.		
Zakres pracy: 1. Przegląd literatury lub konsultacje w zakresie historycznych danych dotyczących budowy baz sterowcowych na terenie województwa podlaskiego. 2. Próba odtworzenia ogólnej geometrii konstrukcji wybranego obiektu hangarowego na podstawie zgromadzonych materiałów. W przypadku braku szczegółów zaproponować znane obecnie rozwiązania. 3. Obliczenia statyczne przy założeniu obecnych warunków i norm projektowych z ewentualnym uwzględnieniem szczegółowych danych archiwalnych (jeżeli istnieją). Zakłada się wykonanie przestrzennego modelu obliczeniowego w wybranym oprogramowaniu komputerowym. 4. Sprawdzenie nośności głównych elementów konstrukcyjnych zgodnie z zaleceniami Eurokodu 3. W przypadku niespełnienia nośności zaproponować alternatywne rozwiązanie. 5. Przygotowanie rysunków wykonawczych konstrukcji stalowej.		
Słowa kluczowe (max 5): konstrukcja stalowa, hangar, projekt odtwórczy, obiekt historyczny		
 dr inż. Marcin Gryniiewicz imiona i nazwisko, stopień opiekuna pracy dyplomowej i podpis		

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

Subject of diploma thesis

Project of a reconstruction of a military airship hangar from World War I.

SUMMARY

The subject of this engineering thesis was the project of reconstruction of a military hangar for airships from the First World War era. It was developed in accordance with current regulations and construction standards. The thesis includes a literature review on the construction of hangars from World War I, historical and archival materials of the hangar structure from Pietrasze Forest, the recreated main structure layout, static calculations of the structural elements, their dimensioning, and details of the hangar joints modeled in Tekla Structures software.

The airship hangar was designed in its original location as a freestanding structure consisting of 20 main frames and the back wall. Its function is a military facility for the stationing, operation, and maintenance of Albatros II and Astra combat airships.

The main structural system is a two-part truss frame. The lower part of the structure, called the "trestle" consists of circular hollow sections CHS273.0x12.5 and a beam in the form of HEA280 section, on which the upper arched truss is supported. The upper arched truss is composed of lower chords made of HEA200 section, upper chords made of HEB220 section, while the diagonals and posts are made of square tubes with sections SHS100x4.5 and SHS100x6.3. The upper arched truss is divided into 8 independent segments connected end-to-end. The purlin beams (HEA140 sections) connected to the transverse frames are pinned using shear plates. The supporting columns of the structure are connected to the foundation bases as pinned supports.

The roof of the hangar is covered with "12-pound" (5 kg) sheets painted in ochre (maroon) color, the walls are clad with 1-inch boards painted with gray oil paint and up to a height of 4 meters, with special fireproof impregnation. All structural elements are designed with steel S275J0.

To assist in determining the internal forces necessary for dimensioning the structure, the RFEM 6 software was used for static and strength analysis. Additionally, a detailed analysis of wind impact on the hangar was carried out using the RWIND module, which simulates by placing the structure in a numerical wind tunnel. Based on the obtained internal forces and the most unfavorable design situation, the main elements of the hangar were dimensioned. Finally,

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

the steel connections load-bearing capacity was designed and verified. All required conditions regarding limit states of load-bearing capacity - ULS and serviceability - SLS were met for all structural elements and connections. Additionally, a detailed 3D model of the hangar structure was created in the Tekla Structures software, presenting all designed elements, connections, and the overall 3D shape of the building. All calculation procedures were carried out in accordance with the current design standards - Eurocodes. The thesis also includes workshop documentation in the form of structural elements details drawings and general assembly drawings of the structure (layouts).

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

Spis treści

1. Wstęp	8
1.1. Cel i przedmiot pracy	9
1.2. Zakres pracy	10
2. Studia literaturowe, prace terenowe i konsultacje	11
2.1. Historia wojskowych baz sterowcowych	11
2.2. Wojskowa baza sterowców w Lesie Pietrasze	13
2.3. Prace terenowe w Lesie Pietrasze.....	15
2.4. Identyfikacja geometrii odtwarzanego hangaru	21
2.5. Układ konstrukcyjny oryginalnego hangaru dla sterowców	27
2.6. Schemat statyczny konstrukcji	30
3. Opis techniczny	31
3.1. Przedmiot opracowania	31
3.2. Dane wyjściowe.....	31
3.3. Zakres projektu	32
3.4. Ogólna koncepcja konstrukcji	32
3.5. Opis poszczególnych elementów konstrukcyjnych.....	33
3.6. Metoda obliczeń statycznych.....	37
3.7. Materiały użyte do wykonania konstrukcji	37
4. Obliczenia statyczne	38
4.1. Oddziaływania stałe.....	38
4.2. Obciążenia zmienne.....	39
4.3. Analiza obciążenia wiatrem w programie RFEM 6.....	57
4.4. Kombinacje obciążeń	65
5. Analiza	66
5.1. Wybór metody analizy stateczności konstrukcji.....	66
5.2. Dane do analizy	66

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

5.3. Przekroje elementów	68
5.4. Właściwości stali konstrukcyjnej	75
5.5. Przebieg analizy konstrukcji.....	75
5.6. Wyniki przeprowadzonej analizy	76
6. Wymiarowanie elementów konstrukcji nośnej hangaru.....	78
6.1. Wymiarowanie pasa górnego kratownicy.....	78
6.2. Wymiarowanie pasa dolnego kratownicy	93
6.3. Wymiarowanie słupków części kratownicowej konstrukcji.....	104
6.4. Wymiarowanie krzyżulca części kratownicowej konstrukcji.....	107
6.5. Wymiarowanie słupa nośnego dolnej części konstrukcji hangaru	111
6.6. Wymiarowanie krzyżulca i słupka dolnej części kratownicowej konstrukcji – pod oparciem łuku kratownicowego	120
6.7. Wymiarowanie belek łączących dolne części głównych układów ramowych	128
6.8. Wymiarowanie belek łączących górne kratownice odtwarzanego hangaru	133
7. Wymiarowanie połączeń elementów konstrukcji stalowe.....	139
7.1. Styk ciągły doczołowy (kalenicowy) pasa górnego kratownicowego łuku konstrukcji hangaru.	139
7.2. Styk ciągły doczołowy pasa dolnego kratownicowego łuku konstrukcji hangaru.....	147
7.3. Styk ciągły doczołowy pasa górnego kratownicy łukowej. Połączenie elementów łuku kratowego.	153
7.4. Połączenie prętów rygla kratowego – słupka i krzyżulców z pasem dolnym kratownicy	160
7.5. Połączenie pasa dolnego kratownicy łukowej z belką dolnej części konstrukcji hangaru tak zwanym „kozłem”.	169
7.6. Połączenie krzyżulca kratownicy łukowej z belką dolnej części konstrukcji hangaru tak zwanym „kozłem”.	176
8. Szczegóły konstrukcyjne wykonane za pomocą oprogramowania BIM	189
Podsumowanie	202

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

Literatura i źródła historyczne.....	204
Akty ustawodawcze i obowiązujące normy projektowe	205
Strony internetowe.....	206
Załączniki	207
1. Notka obliczeniowa z programu RFEM 6 – wymiarowanie połączenia słupa nośnego z fundamentem hangaru	207
2. Rysunki zbiorcze połączeń hangaru	207
3. Rysunki zespołów wysyłkowych.....	207
4. Rysunki zestawcze hangaru – widoki wraz z przekrojami	207

1. Wstęp

Na przestrzeni dekad stal stała się podstawowym materiałem konstrukcyjnym większości nowo powstających konstrukcji budowlanych. Jest ona nieodłącznym elementem, każdego nowego budynku czy to w postaci elementów nośnych konstrukcji (słupy, belki), czy w postaci zbrojenia w konstrukcjach żelbetowych a także w połączeniach konstrukcji drewnianych. Tak powszechne wykorzystywanie stali w budownictwie wynika z jej cech fizycznych. Stal jako materiał konstrukcyjny posiada wiele zalet. Przede wszystkim są to bardzo dobre właściwości mechaniczne jako materiału, jej odporność na działanie różnych obciążeń, duża ciągliwość, odporność na kruche pękanie oraz pękanie lamelarne (rozwarstwiające). Wszystkie wyżej wymienione cechy materiałowe pozwalają stosować stal do różnego rodzaju konstrukcji budowlanych. Lekkość tych konstrukcji spowodowana jest przyjmowaniem smukłych przekrojów poprzecznych elementów w porównaniu do innych materiałów budowlanych takich jak żelbet i drewno. Powoduje to, że w większych inwestycjach typu hangary, hale czy konstrukcje mostowe to właśnie stal stanowi główny wybór jako materiał konstrukcyjny. Co więcej, stal charakteryzuje się jednym z najwyższych stosunków wytrzymałości i zdolności do przenoszenia obciążenia do masy całej konstrukcji. Cecha ta pozwala na wznoszenie wysokich, szeroko rozpiętych lub bardzo smukłych konstrukcji bez ryzyka utraty ich stabilności i trwałości. Jest to parametr decydujący podczas projektowania konstrukcji typu hangary dla samolotów lub nawet sterowców. Ze względu na swe olbrzymie wymiary projektowany hangar musi być odpowiednio wytrzymały i zdolny przenieść obciążenie wygenerowane od wiatru, śniegu, ale też samego ciężaru własnego budynku ze względu na swoje rozmiary. W pewnych okresach rozwoju naszej cywilizacji pomimo wiedzy na temat zalet stali zamiennie, kiedy stawała się materiałem deficytowym, wykorzystywano drewno, a profili stalowych używano do łączenia poszczególnych elementów konstrukcyjnych. Prawdopodobnie z taką sytuacją, związaną z przygotowaniami do prowadzenia działań wojennych mieli do czynienia projektanci hangaru sterowców zbudowanego przed wybuchem I wojny światowej na terenie obecnego Lasu Pietrasze w Białymstoku.

Wg relacji historyków [L2], niewielu mieszkańców z tego regionu zdaje sobie sprawę, że na tym obszarze stacjonowały sterowce i że były wykorzystywane w celach wojskowych. Prawie nikt z białostoczan nie zdaje sobie sprawy, że ponad sto lat temu w pobliskim Lesie

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

Pietrasze powstała baza sterowcowa, która była miejscem obsługi i stacjonowania carskich sterowców. Podczas wstępnych prac badawczych dotyczących tytułowej bazy, według dostępnych źródeł archiwalnych oraz wspomnień najstarszych mieszkańców osiedla Pietrasze, konstrukcja hangaru miała być stalowa. Sądzone tak na podstawie wspomnień o pozostałościach kratownic hangaru sterowcowego z okresu międzywojennego, które miały znajdować się jeszcze wiele lat po I wojnie światowej na terenie Lasu Pietrasze. Uważano, że skoro były tak trwałe, to musiały być wykonane z metalu, tak jak późniejsze hale przemysłowe. Zakładano, że układy ramowe w postaci dwóch kratownic górnej i dolnej oraz wielka brama wejściowa do hangaru były ustrojami stalowymi. Jednak z biegiem czasu oraz z każdym kolejnym pozyskanym źródłem archiwalnym [L2] odnaleziono potwierdzenie, że oryginalna wersja hangaru, która została zbudowana tuż przed wybuchem I wojny światowej w Lesie Pietrasze była konstrukcją drewnianą. W niniejszej pracy inżynierskiej skupiono się na odtworzeniu konstrukcji hangaru jako konstrukcji stalowej, zgodnie z oryginalnym zakresem pracy ustalonym przed rozpoczęciem szczegółowych badań historycznych. Zaproponowano rozwiązania zgodne z obecną technologią oraz normami projektowymi, lecz jednak wciąż w oparciu o odkrytą konstrukcję oryginalną. Cała geometria hangaru oraz gabaryty poszczególnych elementów konstrukcyjnych zostały zachowane i są zgodne z koncepcją pierwotnej konstrukcji. Podczas przygotowywania materiałów historycznych potrzebnych do napisania pracy inżynierskiej udało się pozyskać różne źródła archiwalne jak i historyczne. Są to między innymi mapy, informacje o hangarach budowanych w Rosji oraz zdjęcia obrazujące wygląd hangaru w Lesie Pietrasze. Wszystkie materiały źródłowe były pomocne w uzyskaniu odtworzonej konstrukcji hangaru, wiernej oryginałowi.

1.1. Cel i przedmiot pracy

W ostatnich latach można zaobserwować rosnącą liczbę entuzjastów historii regionalnej, skupiających się w stowarzyszeniach czy projektach. Znajomość dziejów własnego regionu niesie za sobą wiele korzyści. Przede wszystkim jest to budowanie tożsamości i poczucia przynależności mieszkańców do danej społeczności. Dzięki informacjom zgromadzonym przez autora serwisu internetowego Sterowce Pietrasze i Wiatr [L2, L3], który od lat bada historię bazy sterowców na Pietraszach i z którym nawiązano współpracę w ramach niniejszej pracy inżynierskiej, powstał wspólny grunt działań mających na celu zgłębienie tematu jakim stała się „Baza Sterowców” w Lesie Pietrasze. Owocem tych działań jest niniejsza

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

praca inżynierska mająca na celu odtworzenie konstrukcji jednego z najważniejszych obiektów na jej terenie.

Wybrany temat pracy inżynierskiej pozwala poszerzyć wiedzę o dawnych konstrukcjach hangarów dla sterowców. Wymaga zapoznania się z dość złożoną pracą tych konstrukcji, założeniami do obliczeń inżynierskich z czasów I wojny światowej i porównania ich z dzisiejszymi normami do projektowania. Jednak najważniejszym zadaniem jest odtworzenie i zwymiarowanie stalowej konstrukcji wielkogabarytowego hangaru z wykorzystaniem oprogramowania do analiz inżynierskich. Zwieńczeniem prac nad pracą inżynierską będzie szczegółowy model 3D konstrukcji, zamodelowanej w programie TEKLA Structures.

1.2. Zakres pracy

1. Przegląd literatury lub konsultacje w zakresie historycznych danych dotyczących budowy baz sterowcowych na terenie województwa podlaskiego.
2. Próba odtworzenia ogólnej geometrii konstrukcji wybranego obiektu hangarowego na podstawie zgromadzonych materiałów. W przypadku braku szczegółów zaproponować znane obecne rozwiązania.
3. Obliczenia statyczne przy założeniu obecnych warunków i norm projektowych z ewentualnym uwzględnieniem szczegółowych danych archiwalnych (jeżeli istnieją). Zakłada się wykonanie przestrzennego modelu obliczeniowego w wybranym oprogramowaniu komputerowym.
4. Sprawdzenie nośności głównych elementów konstrukcyjnych zgodnie z zaleceniami Eurokodu 3. W przypadku niespełnienia nośności zaproponować alternatywne rozwiązanie.
5. Przygotowanie rysunków wykonawczych konstrukcji stalowej.

2. Studia literaturowe, prace terenowe i konsultacje

2.1. Historia wojskowych baz sterowcowych

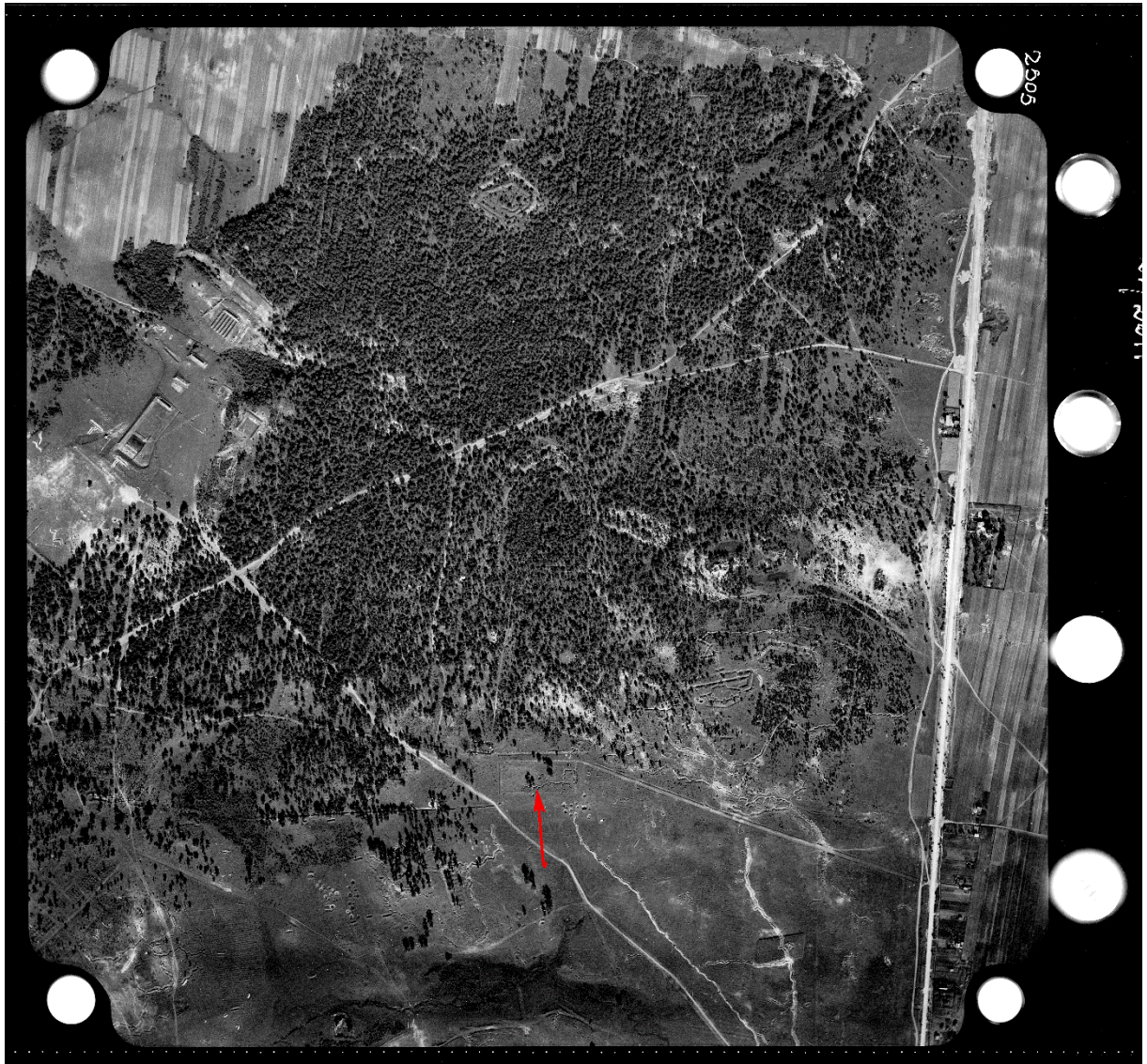
Carska bojowa baza sterowców na terenie dzisiejszego Lasu Pietrasze znajdującego się tuż przy Białymstoku w latach 1913 – 1915 powstała na terenie ówczesnego poligonu carskiej 16 Dywizji Piechoty. Została ona wybudowana w okresie poprzedzającym wybuch I wojny światowej. Z pozyskanych materiałów źródłowych [L1] ustalono, że początek budowy hangaru nastąpił 1 stycznia 1913 r. a jej oddanie do służby nastąpiło 6 miesięcy później. Ostatnim etapem budowy hangaru było wbudowanie żelaznych wrót, które miały być dostarczone nie później niż 8 miesięcy po rozpoczęciu budowy. Wszystko rozpoczęło się w 1907 roku, kiedy Ministerstwo Wojny zajmujące się wszystkimi kwestiami związanymi z baloniarstwem – dzisiejszym lotnictwem rozpoczęło rozwój i budowę pierwszych rosyjskich sterowców. Została powołana w tym celu specjalna Komisja Baloniarska przy Głównym Zarządzie Inżynieryjnym, pod przewodnictwem wojskowego inżyniera-profesora Wojskowej Akademii Inżynieryjnej W. L. Kirpiczowa. Rosyjska inżynieria lotnicza oraz faktyczny rozwój sterowców rozpoczął się w momencie wysłania wojskowego inżyniera Wsiewołoda Aleksandrowicza Zaszczuka w celu opracowania dokumentacji wyjaśniającej organizację baloniarstwa na zachodzie. Jego zadaniem było zgromadzenie informacji dotyczących stanu rozwoju lotnictwa dotyczących wyposażenia lotnisk, instrumentów obsługi naziemnej, urządzeń mechanicznych, hangarów, a więc wszystkiego co może okazać się niezbędne do wybudowania rosyjskiej wersji zachodniego sterowca i jego późniejszej obsługi naziemnej. Po powrocie i szczegółowym omówieniu wszystkich dotychczas zgromadzonych materiałów, podjęto decyzję o budowie pierwszego półsztywnego sterowca oraz wszystkich niezbędnych obiektów do jego obsługi, tj. hangaru, magazynów gazu (wodoru) i innych budowli naziemnych dla „aeronautyki” (dzisiejszego lotnictwa). „Sterowiec Szkoleniowy/Ćwiczebny” z 1908 roku oraz sterowiec „Łabędź” zapoczątkowały budowę szeregu następnych sterowców, które później stacjonowały w bazie sterowców w Lesie Pietrasze. W roku 1912 carska Komisja Aeronautyczna opracowała szczegółową specyfikację hangarów dla sterowców, a następnie ogłosiła konkurs na zaprojektowanie i budowę takiej budowli o konstrukcji drewnianej. Metal nabierał wówczas coraz większego znaczenia z punktu widzenia produkcji broni, stawał się dobrem deficytowym, z tego powodu już wtedy do budowy hangarów używano drewna. W latach poprzedzających wybuch I wojny światowej największym doświadczeniem

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

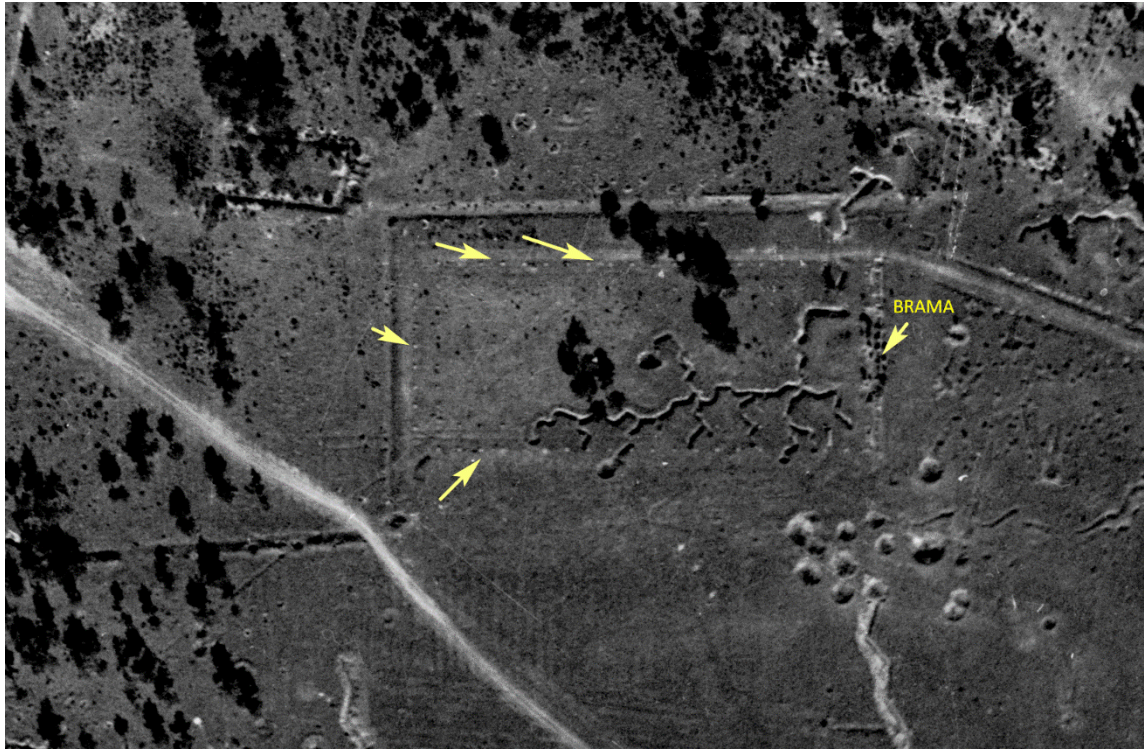
w konstruowaniu tych budowli dysponowali Niemcy, którzy stworzyli kilka systemów budowy hangarów. Zaproszenia do udziału w konkursie wysłano do wszystkich firm zajmujących się budową drewnianych hangarów za granicą takich, jak: Arthur Müller, Stefan i wielu innych. Równolegle dowódcom carskich wojsk zasugerowano nakłonienie rosyjskich inżynierów do wzięcia udziału w tym konkursie. Przesłane zgłoszenia obejmowały siedem szkiców projektów opracowanych wyłącznie przez zagraniczne firmy. Tylko jeden projekt powstał w Rosji. Jego autorem okazał się wojskowy inżynier pułkownik Wsiewołod Aleksandrowicz Zaszczuk, który na co dzień był współpracownikiem Głównego Zarządu Inżynieryjnego. Komisja Inżynieryjna, rozpatrując przedstawione projekty, uznała projekt inż. Zaszczuka za najlepszy i zaproponowała mu opracowanie projektu w sposób bardziej szczegółowy, uwzględniający zarówno koszty jak i sposób prowadzenia prac, a następnie zleciła jego wykonanie.

Prace budowlane podjęto jednocześnie we wszystkich czterech miejscach. Hangary zostały oddane do użytku zgodnie z zaplanowanym terminarzem robót, jednak wielkie żelazne bramy wjazdowe udało się zamontować jedynie w jednej lokalizacji. W pozostałych były one tylko gotowe jedynie częściowo, gdyż czekano na dostawę kolejnych elementów konstrukcyjnych niezbędnych do ich ukończenia. W carskiej Rosji w przededniu wybuchu I wojny światowej istniało 8 hangarów. Podczas wojny drewniane hangary w Brześciu, Białymstoku i Kownie zostały niestety zniszczone. Poligon na którym wzniesiono białostocki hangar zajmował część ówczesnych Pietrasz oraz Jaroszkówki – Bagnówki. Był to teren zupełnie inny niż dzisiejszy Las Pietrasze. Rozległość terenu oraz pozostałości po bazie sterowcowej możemy dostrzec na mapie archiwalnej Rys. 2.1. udostępnionej przez autora serwisu „Sterowce Pietrasze i Wiatr” [L2].

2.2. Wojskowa baza sterowców w Lesie Pietrasze



Rys. 2.1. Mapa źródłowa przedstawiająca teren Lasu Pietrasze oraz pozostałości po bazie sterowcowej. Zdjęcie pochodzi z 1949 r. (Centralne Archiwum Wojskowe [L5])



Rys. 2.2. Mapa źródłowa przedstawiająca teren Lasu Pietrasze oraz pozostałości po bazie sterowcowej w powiększeniu. Dodatkowe zaznaczenie elementów hangaru na mapie. Zdjęcie pochodzi z 1949 r. (Centralne Archiwum Wojskowe [L5])

Baza sterowcowa zajmowała powierzchnię około 0,8/1 ha (około 10 000 m²), obejmowało to również pobliskie lasy, łąki i nieużytki położone po obu stronach obecnej ulicy Wysockiego. Powierzchnia samego hangaru wynosiła dokładnie 6584,4 m². Na terenie bazy znajdował się hangar według terminologii rosyjskiej nosił on nazwę „eling”, dźwig oraz urządzenia umożliwiające tankowanie oraz magazynowanie wodoru, benzyny do silników spalinowych napędzających sterowiec, wszelkie narzędzia niezbędne do przeprowadzania okresowych napraw oraz inne materiały techniczne wykorzystywane do utrzymania sterowca jak i samej bazy. Pozostałościami w Lesie Pietrasze potwierdzającymi, że ten hangar został zbudowany i faktycznie istniał w tamtym miejscu są wkopane w grunt betonowe (żelbetowe) podkłady fundamentowe. W sumie było ich aż 100 sztuk, stanowiły one jedne z najważniejszych elementów konstrukcyjnych hangaru, to one przenosiły obciążenie z elementów kratowych hangaru na grunt. Pierwszym etapem niniejszej pracy inżynierskiej były prace badawcze polegające na odpowiedzeniu na pytanie czym są bloki betonowe wkopane w grunt. Po odbyciu szeregu spotkań terenowych w Lesie Pietrasze oraz pozyskaniu materiałów archiwalnych ustalono, że są to fundamenty odtwarzanej konstrukcji.

2.3. Prace terenowe w Lesie Pietrasze



Rys. 2.3. Fundament (zewnątrzny) odtwarzanego hangaru – źródło własne



Rys. 2.4. Fundament (zewnątrzny) odtwarzanego hangaru, wkopany w ziemię
– źródło własne

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ



Rys. 2.5. Fundament (wewnętrzny) odtwarzanego hangaru, – źródło własne



Rys. 2.6. Fundament (wewnętrzny) odtwarzanego hangaru, wkopany w ziemię
– źródło własne



Rys. 2.7. Prace terenowe w Lesie Pietrasze. Odnajdywanie bloków betonowych wkopanych w ziemię – źródło własne



Rys. 2.8. Tunel techniczny z wymiarami – źródło własne



Rys. 2.9. Tunel techniczny przy bramie wjazdowej do hangaru – źródło własne

W tabeli 2.1. zestawiono odbyte fizyczne prace terenowe oraz ich cele w ramach badania pozostałości po bazie sterowcowej w Lesie Pietrasze. Dzięki nim, został stworzony szczegółowy rysunek ukazujących siatkę konstrukcyjną hangaru (patrz rysunki techniczne załączone do pracy). Są na nim zaznaczone wszystkie odkryte fundamenty hangaru (ustalone na podstawie lokalizacji wystających części ponad grunt, (Rys. 2.3 oraz Rys. 2.5), ich prawdopodobne wymiary oraz geometria, układ poprzeczny konstrukcji oraz jej najważniejsze gabaryty. Warto wspomnieć, że podczas jednej z wypraw natknięto się na struktury będące prawdopodobnie kanałami technicznymi do napraw i napełniania sterowców gazem (Rys. 2.5 oraz Rys. 2.6) . Znajdowały się one tuż przed potencjalną lokalizacją bramy wjazdowej do hangaru.

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

Tabela. 2.1. Wykaz spotkań – badań terenowych do pracy inżynierskiej w Lesie Pietrasze

Badania terenowe - praca dyplomowa "Projekt odtwórczy wojskowego hangaru dla sterowców z okresu I Wojny Światowej".			
L.P.	Data	Ilość godzin [h]	Cel spotkania
1	13 kwietnia 2024	2	Zapoznanie z tematem, pierwsze rozeznanie z terenem, na którym znajdował się hangar dla sterowców
2	13 czerwca 2024	4	Znakowanie istniejących pozostałości podpór betonowych w terenie, przygotowanie wstępnego rysunku układu i wymiarów podpór, zliczanie odnalezionych pozostałości hangaru
3	14 czerwca 2024	3	Pomiary geodezyjne, zbieranie punktów geodezyjnych i tworzenie siatki punktów, zorientowanie siatki w terenie
4	5 lipca 2024	7	Pomiary terenowe z zastosowaniem metod klasycznych tj. taśma miernicza (budowlana), metrówka, linijka
5	12 lipca 2024	7	Dalsze pomiary terenowe, poszukiwanie zakopanych podpór betonowych, zbieranie wymiarów, odległości tworzenie siatki punktów,
6	3 sierpnia 2024	4	Badania terenowe, poszukiwanie pozostałości po bramie wjazdowej do hangaru, badanie i pomiary "tuneli", betonowych łuków, betonowych belek prawdopodobnie pozostałości bramy wjazdowej do hangaru
7	5 października 2024	5	Dalsze poszukiwania terenowe, sprawdzanie i weryfikowanie powstałych hipotez na podstawie znalezionych materiałów archiwalnych, map archeologicznych oraz książki o konstrukcjach hangarów z I wojny światowej
8	12 października 2024	5	Poszukiwanie drugiej linii podpór betonowych, zbieranie wymiarów jednocześnie porównując z materiałami archiwalnymi, zrozumienie zorientowania hangaru w badanym terenie, jego orientacja, umiejscowienie na dzisiejszej mapie, zorientowanie wejścia oraz tylnej części budynku
SUMA Σ =		37	h

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

Podczas prac terenowych dokonano szczegółowych pomiarów odległości między kolejnymi znajduwanymi fundamentami hangaru.



Rys. 2.10. Pomiary terenowe bloków betonowych oraz poszczególnych ich rozstawów –
źródło własne



Rys. 2.11. Tunel techniczny przy bramie wjazdowej do hangaru – źródło własne

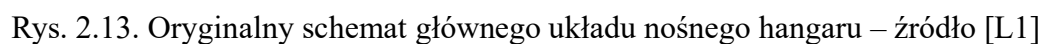
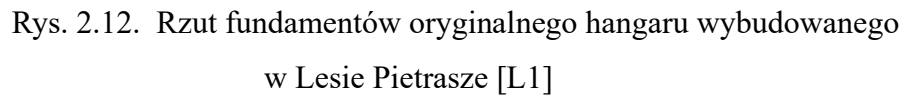
PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

Na podstawie tych oto pomiarów porównywano uzyskane wartości (odstępny) (Rys. 2.10 oraz Rys. 2.11.) oraz geometrię fundamentów z archiwalnymi materiałami i źródłami historycznymi. Celem, było znalezienie jak największej liczby podobieństw i wskazówek, które pomogłyby w ustaleniu całkowitych wymiarów hangaru. Po przeanalizowaniu źródeł [L1, L2] oraz wyników z prac terenowych udało się stworzyć szkic pokazujący faktyczne rozmieszczenie wszystkich fundamentów konstrukcji, ich wymiary, geometrię i kształt. Dzięki uzyskanym notatkom oraz rysunkowi siatki rozmieszczenia fundamentów uzyskano potwierdzenie, że hangar w Lesie Pietrasze faktycznie został wybudowany oraz w okresie I Wojny Światowej stacjonowały tam bojowe sterowce Albatros II oraz Astra.

2.4. Identyfikacja geometrii odtwarzanego hangaru

Opracowując projekty hangarów inż. Wsiewołod Zaszczyk przeprowadził wiele skomplikowanych obliczeń dotyczących wytrzymałości i odporności konstrukcji na warunki atmosferyczne. Przyjmowano, że hangar musi wytrzymać następujące obciążenia: ciężar śniegu na 1 m² poziomego rzutu dachu wynoszący 75 kg, ciśnienie wiatru, wiejącego pod kątem 10° do poziomu, wynoszące 120 kg/m² [L1]. W ówczesnych czasach również brano pod uwagę zapas wytrzymałości konstrukcji – odpowiednich współczesnych współczynników bezpieczeństwa dla materiałów i obciążeń. Podczas projektowania elementów konstrukcyjnych z drewna zapas wytrzymałości był pięciokrotny, natomiast podczas projektowania elementów stalowych (żelaznych) zapas wytrzymałości – trzykrotny. Uwzględniano też takie czynniki jak przemarzanie fundamentów, gromadzono też i analizowano wiedzę na temat wad i błędów konstrukcyjnych występujących w istniejących hangarach, głównie niemieckich. Oryginalny projekt przewidywał, że wysokość hangaru w najwyższym miejscu będzie wynosiła 30 m. Szerokość na wysokości 18 metrów określono na 40 metrów. Projektowana długość miała wynosić 105 metrów, w przypadku białostockiego hangaru została ona jednak później zwiększona do 123,6 m, a w jednym z pozostałych hangarów aż do 142 metrów. Finalnie zaprojektowano konstrukcję o następujących wymiarach: długość 123,6 m (odległość osiowa między pierwszym a ostatnim układem poprzecznym hangaru), szerokość zewnętrzna 53,10 m, natomiast szerokość wewnętrzna to 40,10 m, a wysokość całej konstrukcji to 33,7 m – najwyżej położony punkt hangaru. Na podstawie badań terenowych uzyskany rzut fundamentów hangaru (patrz rysunki techniczne załączone do pracy inżynierskiej) porównano z materiałami historycznymi [L1, L2]. Pomiary terenowe oraz wykonany rysunek odpowiadają

wszystkimi rozstawami oraz geometrią budynku wymiarom oryginalnym odtwarzanej konstrukcji. Jest to potwierdzenie, że wszystkie początkowe założenia dotyczące funkcji, geometrii i przeznaczenia betonowych bloków wkopanych w ziemię jako fundamenty wielkiego hangaru dla sterowców miały odzwierciedlenie w przeszłości.



PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

Fotografie Rys. 2.12 oraz Rys. 2.13 przedstawiają rysunki techniczne konstrukcji hangaru. Pochodzą one z rosyjskiej książki [L1], w której opisano budowę hangarów w tym tytułowego w Lesie Pietrasze. Na pierwszym zdjęciu (Rys. 2.12) ukazano układ fundamentów wraz z niezbędnymi wymiarami oraz rozstawami. Wyniki prac terenowych oraz powstałe rysunki są dokładnym odzwierciedleniem pierwotnego budynku. Na kolejnym rysunku tj. (Rys. 2.13), przedstawiony został przekrój poprzeczny połowy układu konstrukcyjnego oryginalnego budynku. Na jego podstawie odtworzona rama kratownicowa jest zgodna ze wszystkimi zasadami konstrukcyjnymi oraz wymiarami, które stosowano projektując owy hangar. Zasady te szczegółowo opisano w podrozdziale 2.5.

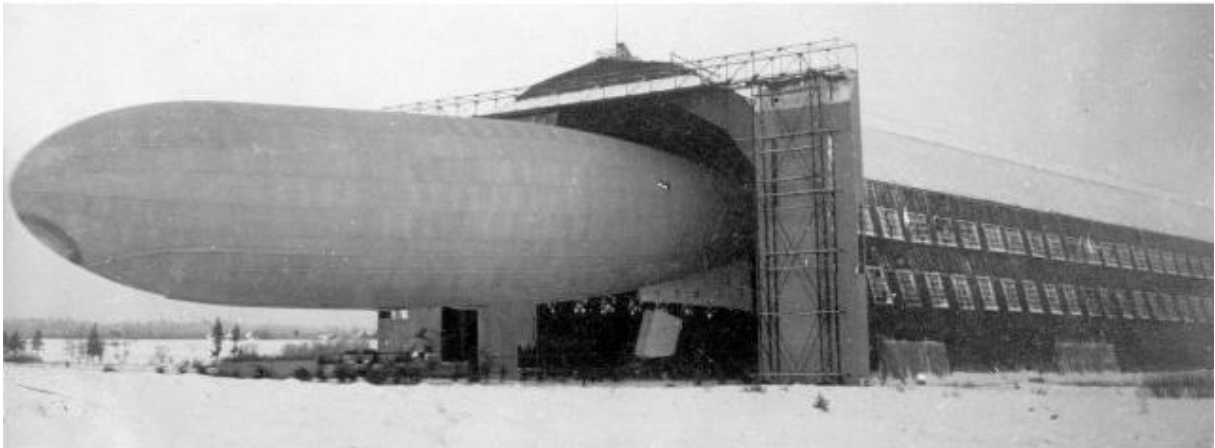
Przystępując do budowy hangaru badano także układ wiatrów. Był to kluczowy element wpływający na warunki projektowe głównej bramy wjazdowej będącej osobną konstrukcją dołączaną do przodu budynku. W przypadku Białegostoku hangar umieszczono na osi wschód-zachód, a wlot do hangaru zaprojektowano po jego wschodniej stronie [L1].

Planując prace budowlane kierowano się szczególną dbałością o stronę ekonomiczną przedsięwzięcia, uwzględniając przy projektowaniu wykorzystanie zestandaryzowanych elementów drewnianych dostępnych na lokalnej „gieldzie drewna” oraz miejscowych zasobów leśnych. W przypadku Pietrasz był to teren częściowo zalesiony (drewno ścinano zimą), budulec mógł być więc pozyskiwany na miejscu lub w najbliższej okolicy, np. w Puszczy Knyszyńskiej. Obróbką drewna zajmowano się bezpośrednio na placu budowy, tuż przed składaniem kolejnych elementów konstrukcyjnych budynku. Hangar był konstrukcją drewnianą wraz z żelaznymi połączeniami. Główny układ konstrukcyjny stanowiły tzw. „kozły”. Były to okrągłe bale drewniane tworzące dolną kratownicę. Na górnej belce „kozła” opierała się natomiast górna kratownica konstrukcji. Wszystkie ramy posadowione były na betonowych fundamentach w formie trapezowatych, wkopanych w ziemię foremnych brył, 50 większych i 50 mniejszych. Zdjęcia odnalezionych fundamentów pokazano powyżej (Rys. 2.3 do Rys. 2.11.). Wykorzystywano również liczne metalowe zworniki, przeguby, nakładki, pręty i śruby. Wszystkie te materiały wykorzystane zostały do skonstruowania dokładnych połączeń w miejscach charakterystycznych ram hangaru. Budowlę pokryto „12-funtową blachą żelazną” pomalowaną w kolorze ochry (bordowym), ściany były obite 1-calowymi deskami pomalowanymi szarym lakierem olejnym oraz do wysokości 4 metrów, specjalnym impregnatem ogniotrwałym. W bocznych skośnych ścianach hangaru zainstalowano okna umieszczone w długich rzędach. Ich szyby zgodnie z pierwotnym

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

projektem miały zostać pomalowane od środka farbą chromową. Powierzchnia szklenia w stosunku do powierzchni podłogi wynosiła około 15%. Jednak na podstawie uzyskanej dokumentacji archiwalnej [L1] nie jest możliwe odwzorowanie rozmieszczenia okien w bocznych ścianach hangaru ze względu na brak wymiarów okien oraz ich rozmieszczenia. Wewnątrz hangaru miał zostać umieszczony przenośny dźwig znajdujący się umieszczony na ruchomej platformie. Wysokość udźwigu wynosiła około 4 m. Dwuskrzydłową frontową przesuwную bramę o wysokości 28,5 m otwierano ręcznie (potrzebny był do tego celu zespół 3-4 osób). Zimą jednak lub przy silnym wietrze uruchomiano także specjalne mechaniczne wyciągarki ułatwiające w jej otwieraniu ze względu na rozmiary konstrukcji. Szerokość otwarcia obu skrzydeł bramy miała umożliwiać dostępność do całego prześwitu hangaru. Wszystko spowodowane było rozmiarami stacjonującego w środku sterowca [L1].

Podobne bazy znajdowały się w Kownie, Grodnie, Lidzie, Brześciu Litewskim, Łucku, Berdyczowie. Zdjęcie umieszczone poniżej, przedstawia proces cumowania jednego z latających olbrzymów – Astry do bliźniaczego hangaru znajdującego się w Brześciu - Rys. 2.14.



Rys. 2.14. Bliźniacza konstrukcja hangaru znajdującego się w Brześciu Litewskim
– źródło [L2]

Obsługiwały one loty 20 carskich sterowców. Sterowce, które stacjonowały w Lesie Pietrasze w okresie przejściowym, ale również i na stałe to „Zwiastun Burzy” (Bureviestnik/Perseval PL-14) - skonstruowany i zakupiony w Niemczech w roku 1913, Astra-konstrukcja hiszpańsko-francuska z 1913 r. i „Albatros II” (wyprodukowany w 1911 roku w Koppino k. Petersburga/uzbrojony w 1912, powłokę wyprodukowało Towarzystwo Rosyjsko-Amerykańskiej Manufaktury Gumi. Olbrzymie rozmiary odtwarzanego hangaru

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

wynikają z wielkości cumujących w nim statków powietrznych. Dane dotyczące sterowca stacjonującego w bazie w Lesie Pietrasze są następujące: Albatros II. Jego długość wynosiła 77 m, wysokość mierzona łącznie z pokładem bojowym - 22 m, średnica powłoki (konstrukcji nośnej) - 14,8 m. Objętość dwóch balonów umieszczonych wewnątrz powłoki wynosiła 2400 metrów sześciennych, każdy po 1200 metrów sześciennych. Maksymalna wysokość lotu Albatrosa sięgała 2000 m, maksymalny zasięg-1000 km. Całkowity udźwig: 10,8 tony. Masa powłoki: 2,8 tony. Ładowność 7,2 tony (benzyna 1,48 tony, olej 180 kg, załoga 10 osób, 3 karabiny maszynowe Maxim z amunicją (każdy 3000 naboju) -120 kg, balast wodny i piaskowy –1 tona [L1,L2].

Na podstawie wspomnień dowódców służących w „Pietraskiej” bazie sterowcowej ustalono, że sterowce startujące z Pietrasz początkowo wykonywały loty ćwiczebne. Po wybuchu wojny ich głównymi zadaniami stały się misje bojowe oraz zwiadowcze. Ich dowódcami byli wybitni rosyjscy konstruktorzy wojskowi, projektanci samolotów i sterowców: inżynier sztabkapitan Afanasij Iwanowicz Szabskij oraz sztabkapitan Borys Wasiljewicz Gołubow. Ostatnimi misjami bojowymi w roku 1915 dowodził Rosjanin o polskich korzeniach, podporucznik awansowany w czasie wojny do stopnia sztabkapitana Robert Lwowicz Niżewski. Na tych sterowcach swoje szlify wojskowe, jako zastępca dowódcy zdobywał także Hipolit Łossowski, który po odzyskaniu niepodległości przez Polskę współtworzył wojska lotnicze II RP [L1,L2].

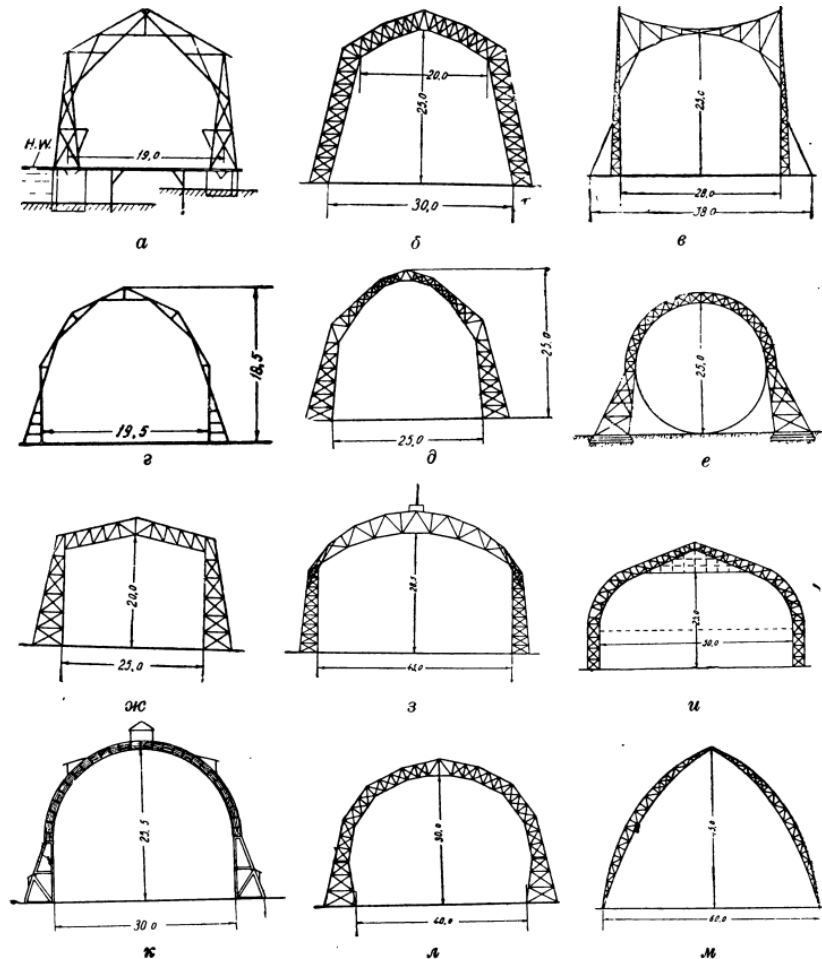
Sterowiec Albatros II był wysyłany na misje zwiadowcze w okolice Olsztyna, używano go do zrzucania bomb na niemieckie wojska atakujące twierdzę Osowiec.

Spośród „białostockich” sterowców najbardziej udaną misję bojową w maju 1915 przeprowadziła załoga sterowca Astra, który podczas nocnego lotu zrzuciła 21 dwupudowych bomb na dworzec kolejowy w Ełku (wówczas Lyck) [L2].

Informacjom zawarte w rosyjskiej książce [L1] o budowie hangarów według nomenklatury rosyjskiej „ellingów” postawiono przypuszczenie, że tak naprawdę każda wybudowana konstrukcja charakteryzowała się indywidualnymi oraz unikalnymi cechami. Miały one także zupełnie inne układy konstrukcyjne. Dostosowywane były do aktualnych potrzeb wynikających z modelu stacjonowanego sterowca, otoczenia oraz warunków gruntowych podłoża, w którym miał powstać hangar. Aby lepiej zobrazować ewolucję, jaką przeszły konstrukcje hangarów dla sterowców na przestrzeni lat kiedy powstawały oraz różnorodność stosowanych wtedy poprzecznych układów konstrukcyjnych zaprezentowaną

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

poniższy rysunek (Rys. 2.15.) gdzie doskonale widać niepowtarzalność oraz niezwykłość budowanych hangarów.



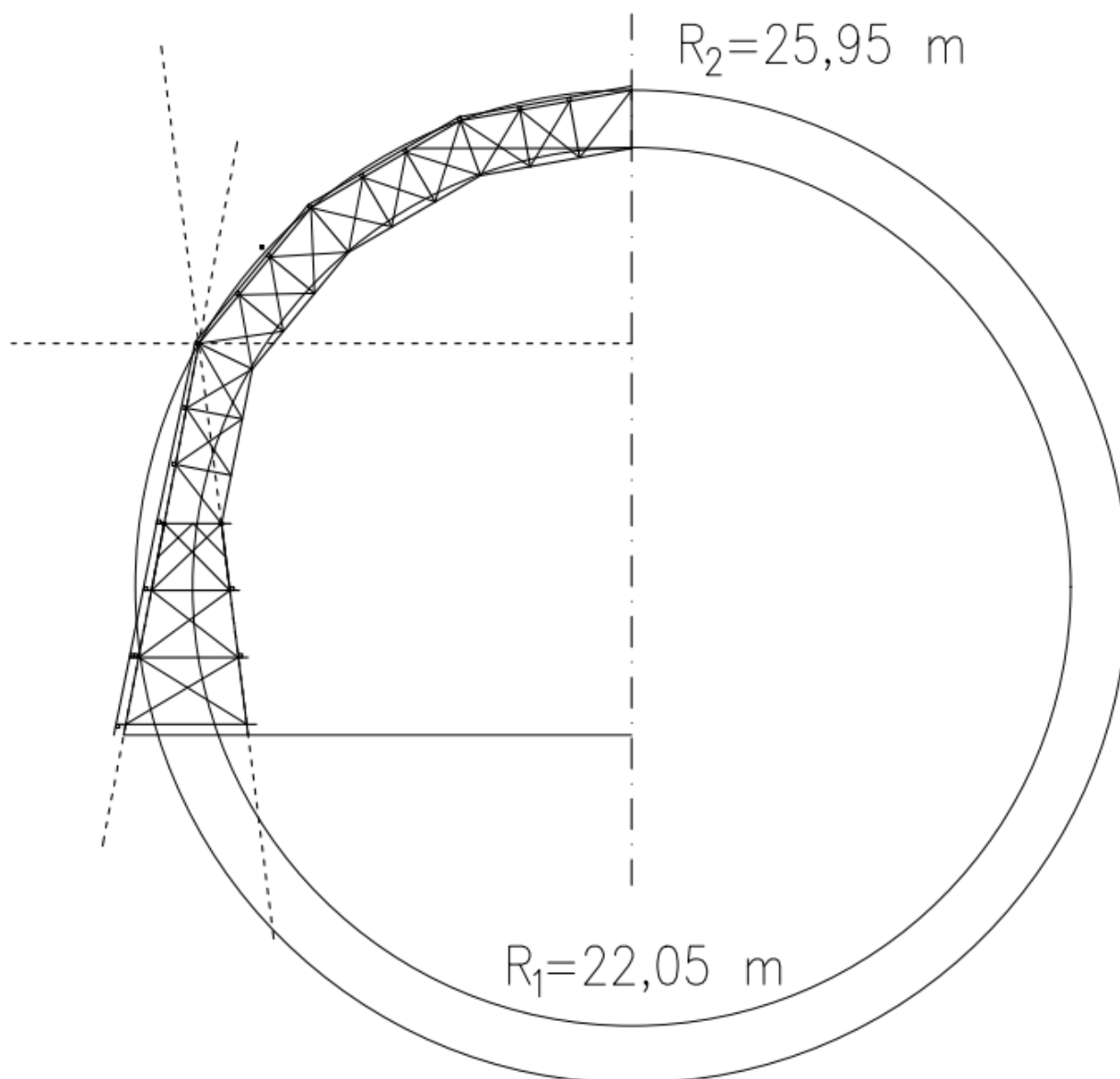
Rys. 2.15. Rodzaje układów konstrukcyjnych podczas budowy hangarów – źródło [L1]

Zamieszczona powyżej fotografia (Rys. 2.15) jest kolejnym potwierdzeniem, że odtworzona geometria oraz sam wygląd układu poprzecznego hangaru została zaprojektowana przez ówczesnych rosyjskich inżynierów i wybudowana w Lesie Pietrasze.

Wszystkie zgromadzone powyżej materiały pozwoliły na stworzenie dokładnego modelu 3D konstrukcji. Jedynym brakującym elementem w dokumentacji archiwalnej [L1, L2] była konstrukcja tylnej ściany konstrukcji. Na podstawie dokumentacji historycznej ustalono, że tylna brama budynku są budową odpowiadała głównemu układowi poprzecznemu ram hangaru zatem w odtworzonym modelu zostało zaproponowane rozwiązanie zgodne z wytycznymi znalezionymi w książce o konstrukcja rosyjskich hangarów [L1].

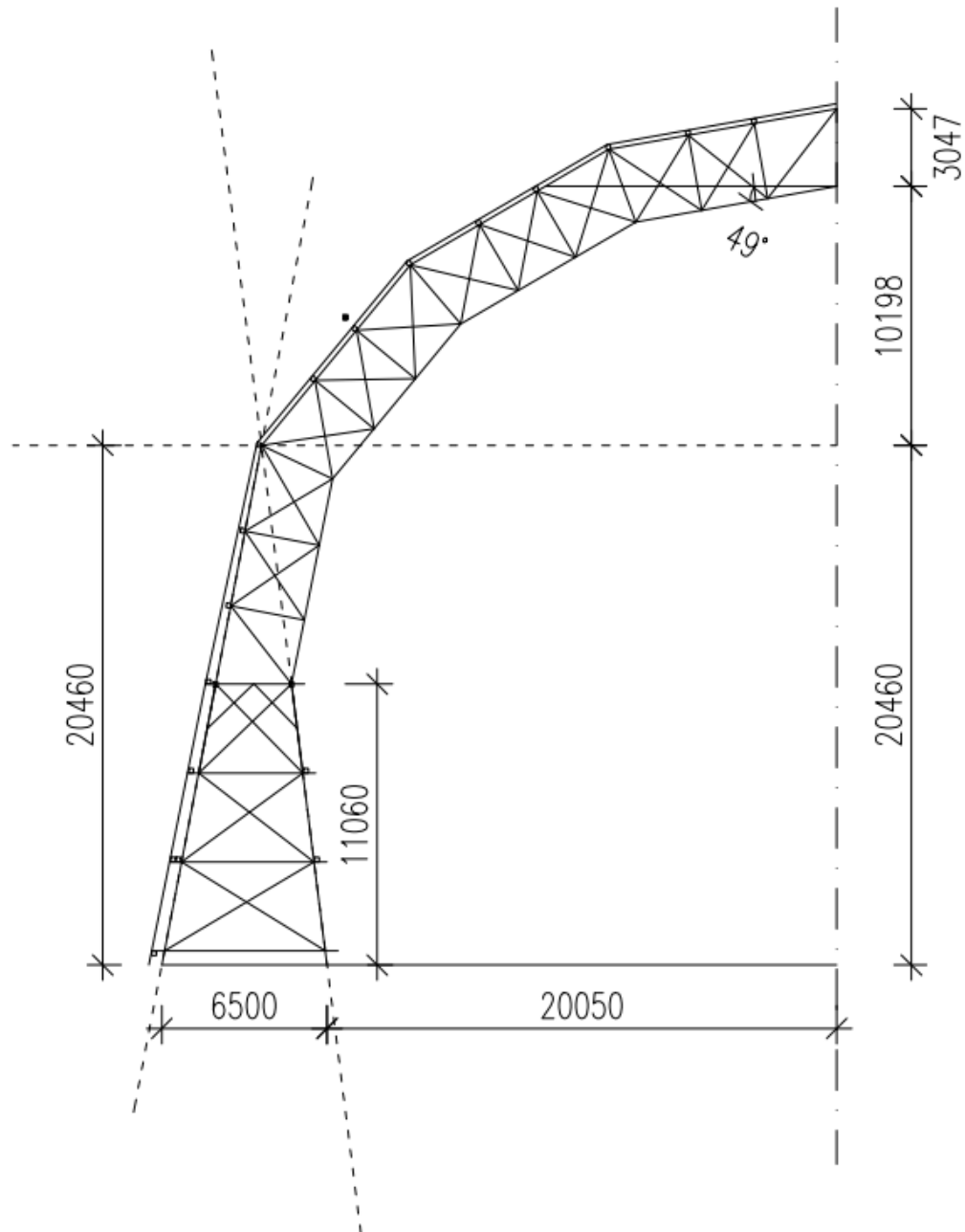
2.5. Układ konstrukcyjny oryginalnego hangaru dla sterowców

Główny układ konstrukcyjny hangaru podzielony był dwa segmenty. Dolna część konstrukcji występowała w postaci okrągłych bali nachylonych pod kątem $10,85^\circ$ [L1]. Kąt nachylenia zewnętrznej nogi kozłów był natomiast kontynuacją pasa górnego łuku kratownicowego hangaru. Osie prętów kozłów i dochodzącego do nich łuku przecinały się w jednym wspólnym punkcie. W celu zmniejszenia działającego rozporu na punkty podparcia łuku na belce dolnej części konstrukcji, czyli „kozła” podczas opracowywania geometrii łuku wybrano taką w kształcie półkola z obniżeniem jego środka ciężkości. Łuk kratownicowy górnej części układu nośnego został skonstruowany geometrycznie za pomocą wykreślenia okręgów o odpowiednich promieniach. Zewnętrzny pas górny kratownicy łukowej został wykreślony na okręgu o promieniu 25,95 m, natomiast pas wewnętrzny – pas dolny kratownicy łukowej na okręgu o promieniu 22,05 m. Same pasy składały się z dwóch równych odcinków prostoliniowych trzeci natomiast był nieco dłuższy o około 30/40 cm. Najważniejszym wymaganiem postawionym konstruktorom było zachowanie szerokości hangaru wynoszącej w każdym jego miejscu 40 m na wysokości 18 m od ziemi, ze względu na rozmiary sterowca, który miał stacjonować w tej bazie. Rysunki (Rys. 2.16 oraz Rys. 2.17) przedstawiają kolejne procesy podczas konstruowania geometrii połowy ramy głównego układu poprzecznego odtwarzanego hangaru. Wszystkie zasady konstrukcyjne jakich się trzymano, wymiary oraz punkty przyłożenia zostały zachowane i odwzorowane zgodnie z pierwowzorem.



Rys. 2.16. Proces konstruowania geometrycznego głównego układu nośnego
– źródło własne

Rama hangaru – połowa



Rys. 2.17. Połowa głównego układu konstrukcyjnego hangaru wraz z najważniejszymi wymiarami – źródło własne

2.6. Schemat statyczny konstrukcji

Schemat statyczny oryginalnej konstrukcji drewnianej hangaru to trójprzegubowy łuk kratowy podparty na dolnej części kratowej konstrukcji, czyli drewnianym „koźle”. W odtwarzanej stalowej wersji hangaru przyjęty schemat statyczny to sztywna rama kratownicowa połączona przegubowo z kolejnymi układami poprzecznymi.. Jako połączenie konstrukcji hangaru z fundamentami przyjęto podparcie przegubowe nieprzesuwne bez występujących dodatkowych momentów zginających w połączeniu czyli również połączenie przegubowe.

3. Opis techniczny

3.1. Przedmiot opracowania

Przedmiotem opracowania jest odtwórczy projekt wojskowego hangaru dla sterowców z okresu I Wojny Światowej. Odtwarzana konstrukcja składa się z 20 łukowych ram kratownicowych wraz z tylną ścianą konstrukcji. Obiekt jest obiektem przeznaczenia wojskowego do stacjonowania oraz serwisowania sterowców typu Astra lub Albatros II.

3.2. Dane wyjściowe

Bazując na przeprowadzonych badaniach i ustaleniach, budynek odtworzono przyjmując następujące założenia projektowe:

- Lokalizacja obiektu: Las Pietrasze, Białystok,
 - Obciążenie śniegiem – strefa śniegowa III,
 - Obciążenie wiatrem – strefa wiatrowa I,
 - Normowe przemarzanie gruntu – 1,2 m,
- Wymiary rzutu budynku w osiach słupów: 53,10 m x 123,60 m,
- Rozstaw głównych układów poprzecznych: 6,18 m,
- Kratownica łukowa części górnej oparta w sposób sztywny na dolnej części konstrukcji tj. „koźle”,
- Wysokość słupów dolnej konstrukcji „koźła”: 11,5 m,
- Wysokość słupów tylnej ściany hangaru: 19,06 m,
- Rozpiętość płatwi łączącej poszczególne układy ramowe: 6,18 m,
- Schemat statyczny płatwi: belka wolnopodparta,
- Poszycie dachu z 12-funtowych żelaznych blach,
- Obudowa ścian z 1-calowej boazerii pomalowanej na zewnątrz szarym olejnym lakierem, szyby natomiast wewnątrz pomalowane farbą chromową,
- Obiekt ze względu na swój charakter nieocieplony,
- Obliczenia wykonano metodą stanów granicznych według obowiązujących norm – Eurokodów.

3.3. Zakres projektu

Projekt konstrukcji hangaru na sterowce obejmuje:

- Opis techniczny,
- Obliczenia statyczne i sprawdzenie stanów granicznych zasadniczych elementów konstrukcyjnych odtwarzanego hangaru dla sterowców tj.:
 - a) słupów nośnych dolnej części konstrukcji,
 - b) krzyżulców i słupków dolnej części konstrukcji,
 - c) pasa górnego oraz pasa dolnego górnej łukowej kratownicy,
 - d) słupków oraz krzyżulców górnej łukowej kratownicy konstrukcji,
 - e) płatwi łączących ramy między sobą,
 - f) oraz belek łączących dolną część konstrukcji tzw. „kozła”,
- Model BIM konstrukcji nośnej,
- Rysunki wykonawcze konstrukcji stalowej hangaru.

3.4. Ogólna koncepcja konstrukcji

Odtwarzany hangar dla sterowców jest obiektem dużych gabarytów, parterowym, nieocieplonym, przeznaczonym jako miejsce stacjonowania oraz serwisowania sterowców służących w bazie wojskowej. Wymiary hangaru w rzucie poziomym, w osiach fundamentów oraz słupów wynoszą: 53,10 m x 123,60 m.

Konstrukcja hangaru składa się z:

- głównych powtarzalnych układów ram kratowych, na które składa się dolna część konstrukcji w postaci stalowego „kozła”. Jest to dolna kratownica konstrukcji zbudowana z rur okrągłych CHS273,0x12,5 oraz belki głównej HEA280, na której opierać się będzie górna część konstrukcji ramowej czyli kratownicowa łukowa. Kratownica łukowa składa się z 8 niezależnych segmentów kratowych łączonych ze sobą za pomocą zaprojektowanego połączenia doczołowego,
- płatwi łączących układy ramowe ze sobą. Są one połączone z kolejnymi ramami kratowymi w sposób przegubowy za pomocą zaprojektowanych pełnych blach ścinanych,
- stężeń połaciowych i podłużnych ścian w postaci gładkiego, wiotkiego pręta o średnicy 20 mm, skręconego śrubą rzymską D25,

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

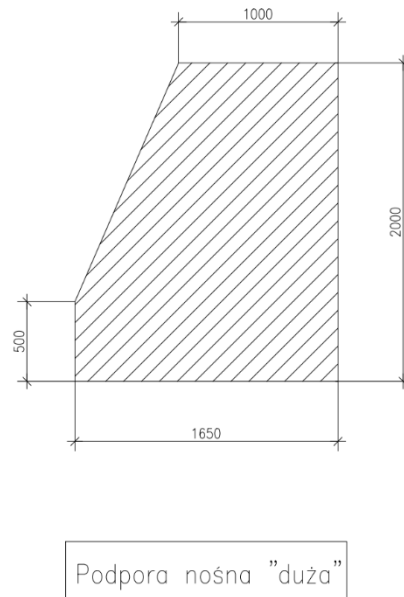
- belek będących kształtownikami HEA140 łączących dolną część konstrukcji czyli tzw. „kozioł” z kolejnymi układami.

Płaski układ poprzeczny hangaru jest samonośny w kierunku poprzecznym. Zapewnia to przyjęty układ statyczny głównej ramy kratownicowej konstrukcji. Przenosi ona obciążenia pionowe oraz poziome działające w płaszczyźnie rami, którymi są oddziaływania zbierane z połaci dachu oraz ścian podłużnych hangaru. W celu zapewnienia geometrycznej niezmienności i sztywności konstrukcji zastosowano dodatkowe stężenia boczne łączące dodatkowo dwie sąsiednie ramy w kierunku podłużnym oraz przeniesienia w płaszczyźnie połaci dachu oraz płaszczyznach ścian podłużnych. Stężenia występują na początku hangaru, w środku oraz na końcu budynku.

3.5. Opis poszczególnych elementów konstrukcyjnych

Fundamenty

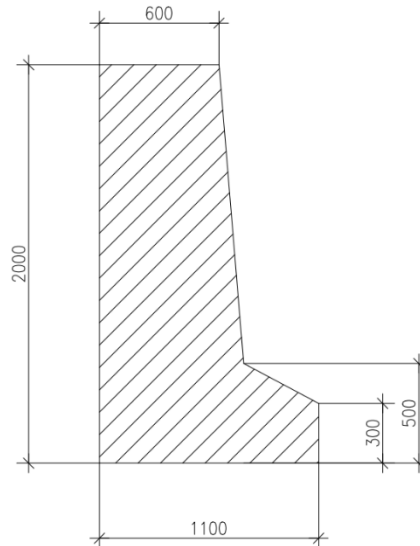
Pod słupy nośne dolnej części konstrukcji czyli tzw. „kozła”, przewidziano dwa rodzaje fundamentów. Fundamenty pod słupy zewnętrzne są w postaci trapezowych bloków betonowych. Beton klasy C30/37, zbrojenie prętami ze stali B500SP.



Rys. 3.1. Geometria zewnętrznej stopy fundamentowej hangaru – źródło własne

Fundamenty pod słupy wewnętrzne w postaci również trapezowych bloków betonowych jednak o innej geometrii. Beton klasy C30/37, zbrojenie stalą B500SP.

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ



Podpora wewnętrzna "mała"

Rys. 3.2. Geometria wewnętrznej stopy fundamentowej hangaru – źródło własne

Słupy nośne

Słupy nośne dolnej części konstrukcji zostały wykonane na wzór oryginalnej konstrukcji z rury okrągłej CHS273,0x12,5. Gatunek stali z jakiej wykonano słupy to S275J0. Słupy pełnią rolę pasów górnych i dolnych, dolnego „kozła”, zatem w miejscach dochodzących krzyżulców i słupków są one dodatkowo stężone. Dochodzące słupki i krzyżulce do słupów wykonano z kształtownika w postaci rury okrągłej CHS139,7x6,3. Połączone są za pomocą spoiny o grubości 5 mm. Połączenie słupa z belką główną „kozła” zaprojektowane również jako spawane. Grubość zastosowanej spoiny to 8 mm. Belka główna dolnej części konstrukcji tzw. „kozła” to kształtownik HEA280. W miejscach oparcia łuku kratowego górnej części konstrukcji występują żebra w postaci usztywniania o grubości 10 mm. Połączenia zaprojektowano jako doczołowe. Blacha czołowa połączenia ma grubość 12 mm, natomiast śruby to 4xM16. Połączenie słupów z fundamentami konstrukcji zaprojektowano jako połączenie przegubowe.

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

Górne kratownice łukowe konstrukcji

Kratownice górnej części konstrukcji hangaru zostały zaprojektowane z: pasów dolnych z kształownika HEA200, pasów górnych z kształownika HEB220, krzyżulców z kształownika w postaci rury kwadratowej SHS100x6,3 oraz słupków z kształownika w postaci rury kwadratowej SHS100x4,5. Wszystkie elementy kratownicy połączone są za pomocą spawu. Spoina pachwinowa obwodowa wokół krzyżulców ma grubość 5 mm, natomiast spoina pachwinowa obwodowa wokół słupków kratownicy ma grubość 4 mm. Górny łuk kratownicowy składa się z 8 niezależnych kratownicowych segmentów. Każdy z nich będzie połączony zaprojektowanym połączeniem doczołowym – blacha doczołowa 12 mm, śruby 4xM16. W punkcie kalenicowym konstrukcji również zaprojektowano połączenie doczołowe jednak na zdecydowanie większe obciążenie. Blacha czołowa ma grubość 20 mm a śruby są to 6xM22 przy połączeniu pasów górnych kratownicy, natomiast przy pasach dolnych kratownicy blacha czołowa ma grubość 12 mm, a śruby to 2xM20. Cały układ dodatkowo łączą stężenia zapobiegające odginaniu się kratownicy z płaszczyzny układu ze względu na ciężar własny kratownicy oraz przenoszone obciążenia. Stężenia mocowane są do środka pasa górnego jak i również pasa dolnego kratownic.

Belki łączące dolną część konstrukcji

Belki łączące dolną część konstrukcji czyli tzw. „koziół” zaprojektowano z kształownika HEA140, połączonego przegubowo z kolejnymi układami konstrukcyjnymi hangaru. Połączenie to dwustronna blacha ścinana, grubość blachy to 10 mm, a śruby to 4xM12.

Belki łączące górną część konstrukcji - płatwie

Płatwie dachowe zostały wykonane również z kształowników dwuteowych walcowanych na gorąco HEA140 o schemacie belki wolnopodpartej w rozstawie co 6,18 m. Połączenie płatwi będzie wykonane przegubowo w postaci blachy ścinanej przyspawanej do pasów górnych kratownic czyli kształownika HEB220 i połączone za pomocą dwóch śrub M14. To na nich będą mocowane arkusze blachy żelaznej o wymiarach 1,40x0,71 m.

Stężenia połaciowe i ścienne hangaru

Zaprojektowano stężenia biegnące po całej konstrukcji hangaru stalowego. Są to stężenia wiotkie w postaci pręta gładkiego o średnicy 20 mm łączonego za pomocą śruby

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

rymskiej D25. Rozmieszczone zostaną w skrajnych polach hangaru oraz na jego środku. Stężenia łączą trzy układy ramowe ze sobą. Zostały zastosowane w miejscach, gdzie również w oryginalnej konstrukcji hangaru występowały stężenia przeciwwiatrowe.

Obudowa hangaru

Okładzina wykonana zostanie z 1-calowej boazerii (wraz z podkonstrukcją – oryglowaniem drewnianym), pomalowanej na zewnątrz w kolorze ochry - bordowym. Dodatkowo wszystkie drewniane części hangaru czyli jego obudowa ścienna zostanie zaimpregnowana płomieniobojem. Jest to opatentowany w przed I wojną światową środek do ochrony drewna przed ogniem. W bocznych ścianach znajdują się dodatkowo po dwie furtki z każdej strony.

Okna z zamkniętymi ramami, z powierzchnią szklenia w stosunku do powierzchni podłogi wynoszącą około 15%. Szyby powinny pomalowane wewnątrz farbą chromową.

Aby zachować zgodność z oryginałem, dach hangaru pokryty jest 12-funtowymi płytami żelaznymi jest to odpowiednik 5 kg według obowiązujących jednostek SI, pomalowany na czarno. Bardzo popularnym rozwiązaniem stosowanym w carskiej Rosji były dachy pokrywane właśnie arkuszami blach żelaznych. Pokrywano tym większość konstrukcji zaczynając na budownictwie jednorodzinnym (domach wolnostojących), budownictwie przemysłowym (halach magazynowych), a kończąc – na budowie hangarów (drewnianych, stalowych a także posiadających betonowe ramy wjazdowe). Żelazna blacha dachowa występowała w postaci arkuszy o wymiarach 1,40 x 0,71 m. W konstrukcji dachu zastosowano deski w postaci krawędziaków o przekroju 14x14 cm, które ułożone były wzdłuż całego budynku w rozstawie co 2,60 m. Pełniły one funkcję kontrłat. Ze względu na wymiary arkuszy blachy żelaznej, podczas budowy hangaru tj. układania poszycia dachu budynku zgęszczono rozkład kontrłat o połowę czyli do 1,30 m. Dodatkowo w konstrukcji poszycia wykorzystano łąty drewniane w postaci belek drewnianych o przekroju kwadratowym 7x7 cm.

Ze względu na materiały historyczne zastosowana blacha żelazna jest grubości 1,5 mm, w postaci arkuszy o wymiarach 1,40x0,71 m.

Tylna ściana hangaru

Tylna ściana hangaru składa się z dolnej części konstrukcji kratownicowej w postaci „koźłów” jednak o większym rozmiarze. Długość słupa nośnego wynosi 19,06 m. Połączone są ze sobą belkami w postaci kształtownika HEA140 połączonego przegubowo dokładnie

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

w taki sam sposób jak cała konstrukcja. Górna część ściany tylnej składa się z kształtowników HEA200, będących słupami opierającymi się na ostatniej ramie kratownicowej głównego układu nośnego hangaru. Zostały połączone doczołowo wraz z usztywnieniem wykonanym z blachy, ze względu na cięcie skośne oraz występujące w połączeniu siły wewnętrzne. Górne belki stężące ściany tylne hangaru zaprojektowano jako kształtowniki dwuteowe walcowane na gorąco typu HEA160, również połączone w sposób przegubowy z górnymi częściami słupów ściany. Każda belka posiada dodatkowo dospawany kątownik L100x6, który będzie podstawą do przymocowania drewnianej obudowy hangaru.

3.6. Metoda obliczeń statycznych

We wszystkich układach nośnych konstrukcji przeprowadzono analizę sprężystą, według teorii I rzędu. Dodatkowo, w celu sprawdzenia stateczności całej konstrukcji została przeprowadzona globalna analiza wyboczeniowa w programie obliczeniowym RFEM 6. Obliczenia, oraz wymiarowanie głównego układu nośnego konstrukcji zostało przeprowadzone w sposób analityczny. Do uzyskania sił przekrojowych w prętach głównego układu poprzecznego hangaru wykorzystano moduł do analizy statyczno-wytrzymałościowej konstrukcji Dlubal RFEM 6. Co więcej, przeprowadzono do celów porównawczych zaawansowaną symulację przepływu wiatru oddziałującego na hangar, ze względu na jego nietypową geometrię oraz nachylenie ścian. Użyto do tego celu komponentu RWIND służącego do analizy konstrukcji w cyfrowym tunelu aerodynamicznym przy przepływie stacjonarnym jak i przepływie przejściowym.

3.7. Materiały użyte do wykonania konstrukcji

Wszystkie elementy konstrukcyjne zaprojektowano ze stali S275J0 o granicy plastyczności $f_y = 275 \text{ N/mm}^2$. Przyjęto, że do wykonania połączeń śrubowych zastosowane będą śruby klasy 8.8 oraz klasy 10.9. Fundamenty przewidziano z betonu klasy C30/37.

4. Obliczenia statyczne

4.1. Oddziaływania stałe

Zestawienie obciążeń stałych sporządzono zgodnie z normą PN-EN 1991-1-1 [N2] i przedstawiono w tabeli poniżej. W trakcie zbierania dokumentów archiwalnych odnaleziono informacje dotyczące pierwotnych materiałów użytych do budowy odtwarzanego hangaru. Dzięki temu zebrano obciążenia zgodnie z materiałami użytymi w oryginalnym hangarze (elementy wykończenia budynku) [L1].

Oddziaływania stałe – obciążenia od ciężaru dachu

Tabela. 4.1. Obciążenia od poszczególnych warstw dachu

L.P	Rodzaj obciążenia	Wartość charakterystyczna obciążenia $\left[\frac{kN}{m^2}\right]$	
1.	Arkusze blachy z żelaza. Grubość arkuszy – 1,50 mm. Układane pionowo na łątach o rozstawie 50 cm . Ciężar objętościowy żelaza wynosi 78,75 kN/m ³	$78,75 \frac{kN}{m^3} \cdot 0,0015 m$ $= 0,118 \frac{kN}{m^2}$	0,118
2.	Drewniane łąty w postaci belek kwadratowych 7x7 cm, drewno sosnowe, rozstaw 50 cm,	$\frac{6 \frac{kN}{m^3} \cdot 0,07 m \cdot 0,07 m}{0,50 m}$ $= 0,059 \frac{kN}{m^2}$	0,059
3.	Drewniane kontrłąty stanowiące ruszt dachu w postaci belek kwadratowych 20x20 cm, drewno sosnowe, rozstaw 1,30 m – obciążenie uwzględnione w programie RFEM 6 – ciężar własny elementów drewnianych	$\frac{6 \frac{kN}{m^3} \cdot 0,20 m \cdot 0,20 m}{1,30 m}$ $= 0,185 \frac{kN}{m^2}$	0,185
4.	Czarna farba zabezpieczająca powierzchnię arkuszy blachy przed korozją. Jako farby używano smoły. Grubość warstwy zabezpieczającej wynosiła około 0,20 mm.	$11,00 \frac{kN}{m^3} \cdot 0,0002 m$ $= 0,0022 \frac{kN}{m^2}$	0,0022
		RAZEM = Σ =	0,364
		OBCIĄŻENIE UWZGLĘDNIONE W RFEMIE 6 = Σ =	0,179

4.2. Obciążenia zmienne

Obciążenia zmienne – użytkowe

W analizowanej konstrukcji odbudowywanego hangaru na sterowce uwzględnia się dodatkowe obciążenie zmienne pochodzące od instalacji elektrycznej, podwieszanych lamp świetlnych oraz od kominów wentylacyjnych występujących na połaci dachu hangaru.

Obciążenie zostało uwzględnione na podstawie źródeł archiwalnych mówiących o wentylacji znajdującej się na dachu hangaru ze względu na przetrzymywany w środku sterowiec, który napęczniał był łatwopalnym gazem - wodorem. Obciążenie przyjmuje się na poziomie $0,10 \text{ kN/m}^2$ równomiernie rozłożone na połaci dachu.

Obciążenia zmienne – śnieg

Obciążenie śniegiem w sytuacji trwałej i przejściowej zostało wyznaczone na podstawie PN-EN 1991-1-3 [N3]. Projektowana konstrukcja hangaru, znajduje się w Lesie Pietrasze, tj. Białymstoku. Według obowiązującej normy [N3] – mapy ukazującej podział Polski na strefy obciążenia śniegiem gruntu, Białystok leży w IV strefie śniegowej.

Na podstawie mapy lokalizacyjnej znajdującej się w programie RFEM 6 odczytano dokładne współrzędne geograficzne terenu, na którym znajdował się odtwarzany hangar oraz jego wysokość n.p.m. Szerokość geograficzna to $53,168^\circ$, długość geograficzna to $23,125^\circ$, natomiast wysokość to 172 m n.p.m.

Wg. Rys. NB.1 oraz tab. NB.1 [3] wartość charakterystyczna obciążenia śniegiem gruntu dla IV strefy śniegowej wynosi:

$$s_k = 1,60 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Obciążenie śniegiem w sytuacji trwałej i przejściowej według PN-EN 1991-1-3 [N3] ustalamy następująco:

$$s = \mu_i \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k \quad (4.1)$$

gdzie: μ_i - współczynnik kształtu dachu, s_k - wartość charakterystyczna obciążenia śniegiem gruntu w kN/m^2 , C_e - współczynnik ekspozycji, C_t - współczynnik termiczny,

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

Do wyznaczenia obciążenia śniegiem dachu należy stosować współczynnik ekspozycji C_e . Na podstawie dostępnych informacji źródłowych, a w szczególności mapy archeologicznej ukazującej umiejscowienie bazy na terenie Pietrasz, współczynnik ekspozycji przyjmuje się na poziomie $C_e = 1,00$ dla terenów normalnych: obszarów, na których nie występuje znaczne przenoszenie śniegu przez wiatr na budowle z powodu ukształtowania terenu – występowanie drzew z dwóch stron budynku.

Współczynnik termiczny C_t powinien być stosowany do oceny zmniejszenia obciążenia śniegiem dachów o wysokim współczynniku przenikania ciepła ($> 1 \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$). Konstrukcja dachu nie przewidywała, żadnych dodatkowych przegród zwiększających współczynnik przenikania ciepła na dachu hangaru.

Przejęto współczynnik termiczny $C_t = 1,00$.

Współczynnik kształtu dachu

Konstrukcja dachu hangaru składa się z kilku załamanych części kratownicowych. Ze względu na jego kształt, nie da się jednoznacznie określić czy jest to dach dwuspadowy czy też wielospadowy. Norma nie przewiduje takiego kształtu dachu, dlatego w celu uproszczenia obliczeń przyjmuję, że dach ma kształt walcowy. Dla takich parametrów zostanie przeprowadzona analiza obciążenia śniegiem.

Współczynniki kształtu dachu dla dachów walcowych, jeżeli brak jest barierek przeciwsnieżnych:

$$\beta \leq 60^\circ \quad \mu_3 = 0,20 + 10 \cdot \frac{h}{b}$$

$h_1 = 33,70$ m – wysokość całego budynku,

$h_2 = 14,57$ m – wysokość dachu (uproszczonego dachu walcowego),

$b = 53,10$ m – szerokość hangaru na sterowce,

Według normy [N3] stosunek wysokości do szerokości budynku wygląda następująco:

$$\frac{h}{b} = \frac{14,57 \text{ m}}{53,10 \text{ m}} = 0,274$$

Według normy [N3] -zalecana górna wartość współczynnika μ_3 podana jest w załączniku krajowym. Wynosi ona 2,00. Stosunek wyniosłości do rozpiętości dla analizowanego kształtu dachu wynosi 0,274. Na podstawie rysunku 5.5 norma [N3] odczytano współczynnik kształtu dachu jako wartość maksymalna $\mu_3 = 2,00$.

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

Równomierne obciążenie śniegiem według normy [N3] należy stosować według rysunku 5.6, przypadek (i). Współczynnik dachu przyjmujemy na poziomie 0,80.

Nierównomierne obciążenie śniegiem należy stosować według rysunku 5.6. przypadek (ii). Współczynnik dachu przyjmujemy na poziomie odczytanego z rysunku 5.5 na podstawie stosunku wyniosłości do rozpiętości (h/b) tj. $\mu_3 = 2,00$.

Ze względu na układ konstrukcyjny dachu, nie wystąpi na nim żadna zaspą śnieżną, dodatkowo połaci dachu nie występują, żadne dodatkowe obciążenia miejscowe.

Charakterystyczne obciążenie śniegiem

Wartość charakterystyczna przy równomiernym obciążeniu śniegiem połaci dachu według rysunku 5.6, przypadek (i) – norma [N3]:

$$s = 0,80 \cdot 1,00 \cdot 1,00 \cdot 1,60 = 1,28 \frac{kN}{m^2}$$

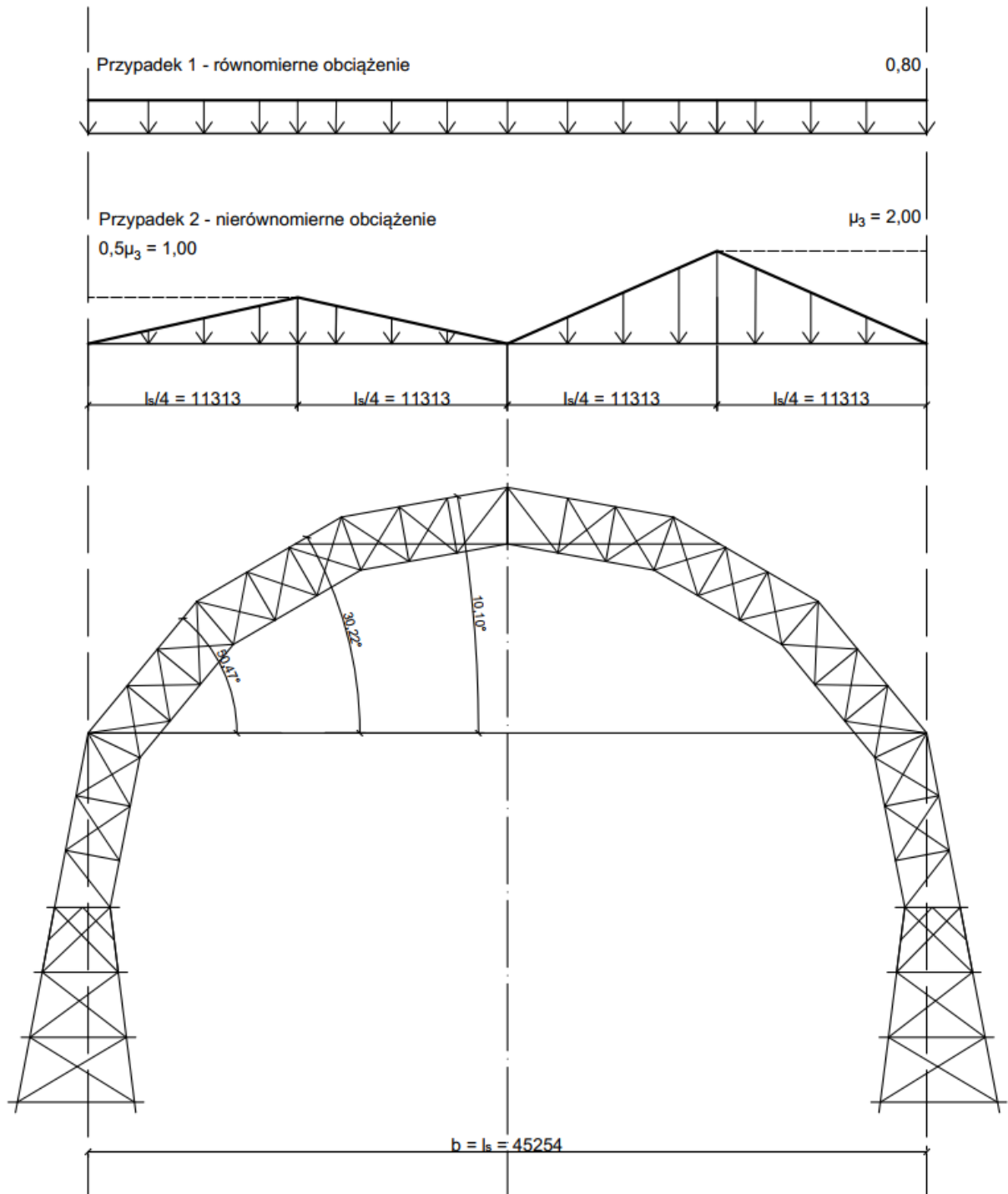
Wartość charakterystyczna przy nierównomiernym obciążeniu śniegiem połaci dachu według rysunku 5.6, przypadek (ii). Tak jak w poprzednim przypadku wykorzystano rys. 4 z normy [N3] dla dachów bez barierek przeciwsnieżnych, na szerokości połaci I_s , na której kąt nachylenia stycznej spełnia warunek $\beta \leq 60^\circ$. Charakterystyczne obciążenie śniegiem gruntu ma następujące wartości ze względu na współczynnik kształtu dachu:

$$s_I = \mu_3 \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k = 2,00 \cdot 1,00 \cdot 1,00 \cdot 1,60 = 3,20 \frac{kN}{m^2}$$

$$s_{II} = 0,50 \cdot \mu_3 \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k = 0,50 \cdot 2,00 \cdot 1,00 \cdot 1,00 \cdot 1,60 = 1,60 \frac{kN}{m^2}$$

Poniżej zostanie zaprezentowany rysunek (Rys. 4.1) przedstawia dokładne rozłożenie obciążenia równomiernego oraz nierównomiernego na analizowanym uproszczonym dachu walcowym hangaru.

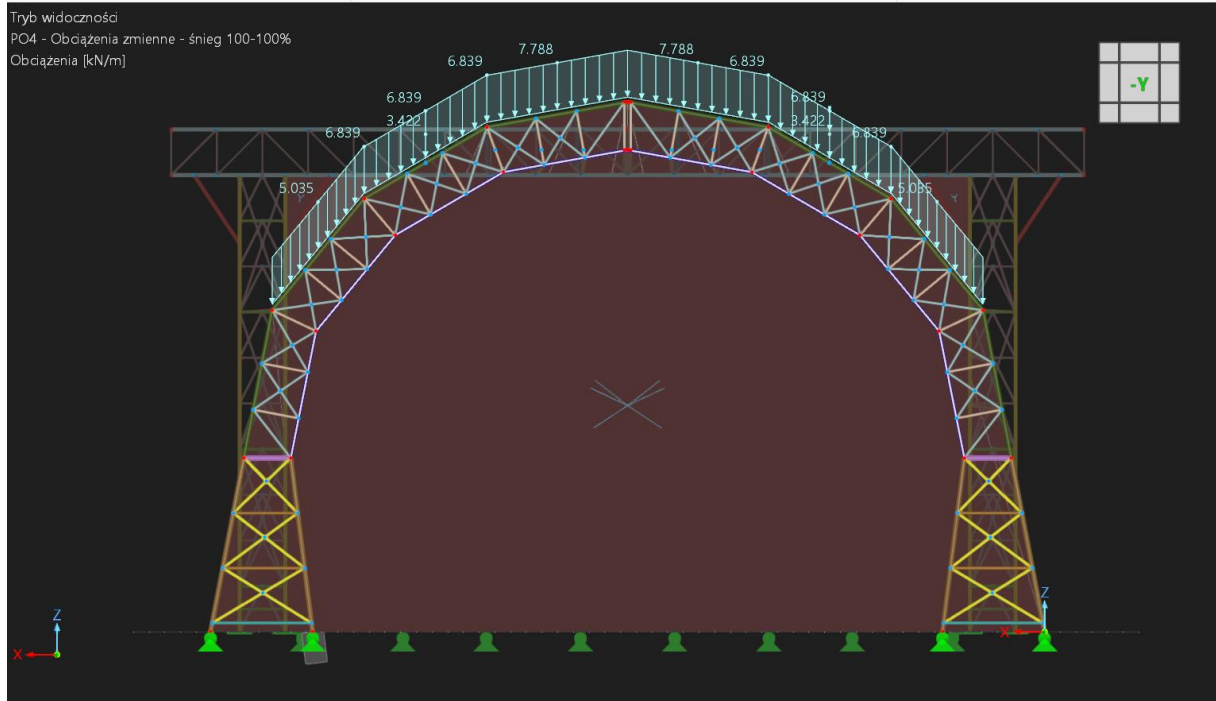
PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ



Rys. 4.1. Obciążenie śniegiem konstrukcji ramy hangaru. Źródło własne

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

Wyżej zaprezentowane obciążenie zostało zamodelowane w programie do analizy statyczno-wytrzymałościowej RFEM 6 w celu odwzorowania faktycznej pracy konstrukcji. Uzyskano odpowiedni rozkład obciążeń na poszczególne ramy konstrukcyjne głównego układu nośnego konstrukcji. Ze względu na symetrię konstrukcji hangaru stworzono trzy obliczeniowe przypadki obciążenia śniegiem konstrukcji (100-100%, 100-0% oraz 100-50%).



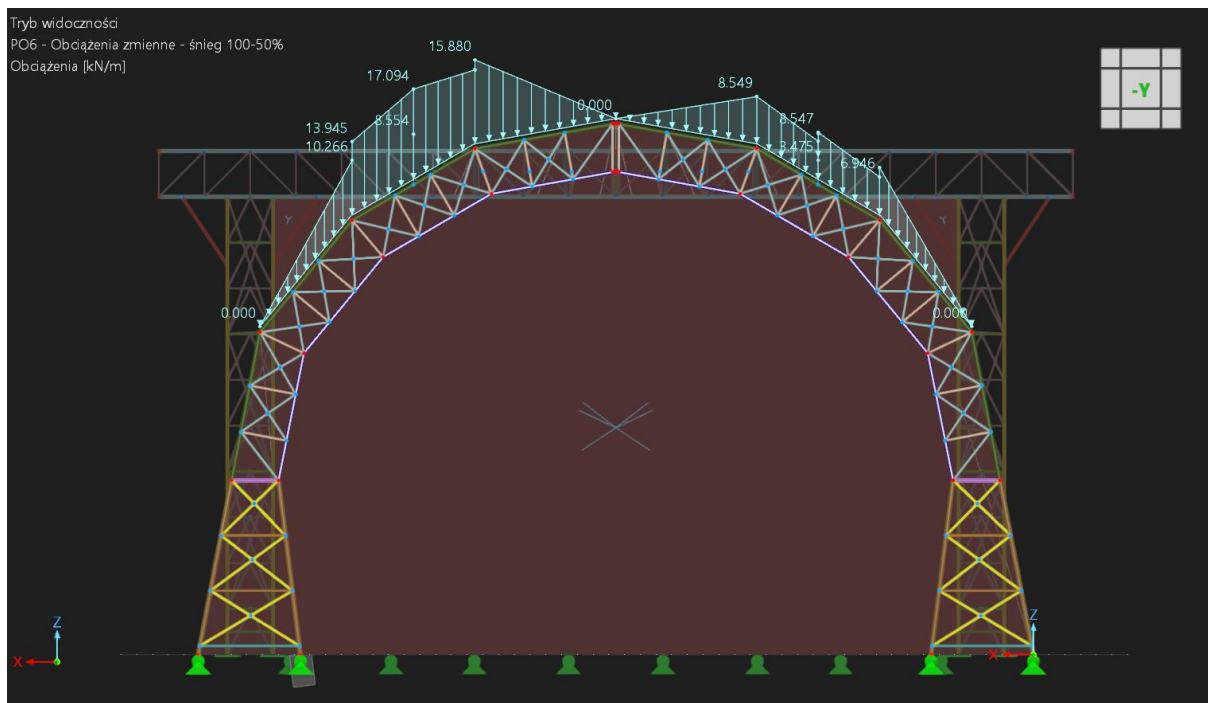
Rys. 4.2. Obciążenie śniegiem konstrukcji ramy hangaru – pierwszy przypadek obliczeniowy w programie. Źródło własne

PO4 - Obciążenia zmienne - śnieg 100-100%

Obciążenia [kN], [kN/m]

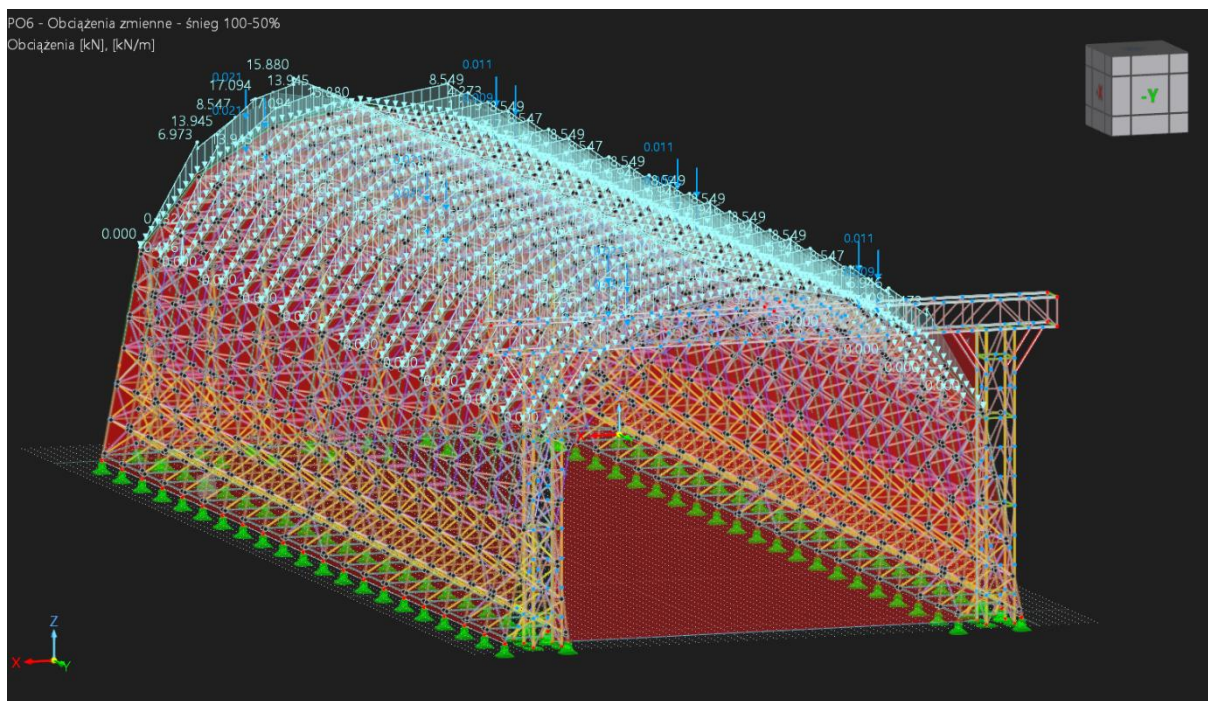
44

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ



Rys. 4.5. Obciążenie śniegiem konstrukcji ramy hangaru – przypadek śnieg 100-50%.

Źródło własne



Rys. 4.6. Obciążenie śniegiem zebrane z powierzchni rozkładu – paneli przenoszących obciążenie na elementy konstrukcji hangaru – źródło własne

Obciążenia zmienne – wiatr

Obliczenia w celu wyznaczenia obciążeń oraz ich efektów oddziaływania na odtwarzaną konstrukcję wykonano na podstawie normy PN-EN 1991-1-4 [N4]. Białystok, tj. Las Pietrasze według rysunku NA.1 – podział Polski na strefy obciążenia wiatrem znajduje się w I strefie obciążenia wiatrem. Dodatkowo miejsce, w którym usytuowany był hangar czyli Las Pietrasze znajduje się na wysokości **172 m n.p.m.** i jest to najwyższy położony punkt na Białostocczyźnie.

Oddziaływanie wiatru na powierzchnie zewnętrzne hangaru.

Wartość podstawową bazowej prędkości wiatru v_b należy obliczyć z wyrażenia:

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0} \quad (4.2)$$

gdzie: v_b - bazowa prędkość wiatru określana jako funkcja kierunku wiatru i pory roku na wysokości 10 m nad poziomem gruntu w terenie kategorii II; $v_{b,0}$ – wartość podstawowa bazowej prędkości wiatru. Według tabeli tab.NA.1 normy [N4] wartość podstawowej bazowej prędkości wiatru i ciśnienia prędkości wiatru w I strefie wiatrowej wynoszą następująco:

$A = 172 \text{ m n.p.m.}$, dla $A \leq 300 \text{ m}$ wartość bazowej prędkości wiatru to: $v_{b,0} = 22 \frac{m}{s}$,
 c_{dir} - współczynnik kierunkowy. Wartością zalecaną podaną w załączniku krajowym jest 1,00;
 c_{season} – współczynnik sezonowy. Wartością zalecaną podaną w załączniku krajowym normy jest 1,00.

Bazowa wartość prędkości wiatru wynosi:

$$v_b = 1,00 \cdot 1,00 \cdot 22 = 22 \frac{m}{s}$$

Średnia prędkość wiatru:

Średnia prędkość wiatru $v_m(z)$ na wysokości z nad poziomem terenu zależy od chropowatości i rzeźby terenu, a także od bazowej prędkości wiatru. Wyznaczamy ją za pomocą następującego wzoru:

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_o(z) \cdot v_b \quad (4.3)$$

gdzie: $c_r(z)$ - jest to współczynnik chropowatości, a $c_o(z)$ to współczynnik rzeźby terenu.

Chropowatość terenu

Współczynnik chropowatości $c_r(z)$, uwzględnia zmienność prędkości wiatru w miejscu lokalizacji konstrukcji.

Procedura wyznaczania $c_r(z)$ podana jest w Załączniku krajowym. Zalecana procedura wyznaczania wartości współczynnika chropowatości na wysokości wyznaczana jest następująco:

$$c_r(z) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \text{ dla } z_{min} \leq z \leq z_{max} \quad (4.4)$$

gdzie: $c_r(z)$ - współczynnik terenu zależny od wysokości chropowatości z_0 obliczany z następującego wzoru:

$$k_r = 0,19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0,07} \quad (4.5)$$

W którym: z_0 - 0,30 m (kategoria III, tablica 4.1, normy [N4]), z_{min} - wysokość minimalna, podana w tablicy 4.1 [N5], czyli w tym wypadku – 5 m, z_{max} - wg. Normy [N4] należy przyjąć 400 m,

z_0, z_{min} - przyjmujemy w zależności od kategorii terenu. Dla projektowanego hangaru przyjmuję kategorię terenu III – tereny regularnie pokryte roślinnością lub budynkami albo o pojedynczych przeszkodach, oddalonych od siebie najwyżej na odległość równą ich 20 wysokościom (takie jak wsie, tereny podmiejskie, stałe lasy).

$$c_r(z) = 0,80 \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^{0,19} \quad (4.6)$$

gdzie: z jest to wysokość danej konstrukcji n.p.m. w m.

$$c_r(z) = 0,80 \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^{0,19} = 0,80 \cdot \left(\frac{33,70 \text{ m}}{10}\right)^{0,19} = 1,008$$

Średnia prędkość wiatru

$$v_m(z) = 1,008 \cdot 1,00 \cdot 22 = 22,18 \frac{m}{s}$$

Współczynnik ekspozycji

Kategoria terenu jest to III kategoria terenu.

Współczynnik ekspozycji terenu wg tab.NA.3 normy [N4]

$$c_e(z) = 1,90 \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^{0,26} \quad (4.7)$$

$$c_e(z) = 1,90 \cdot \left(\frac{33,70}{10}\right)^{0,26} = 2,605 - \text{dla } h = 33,70 \text{ m} - \text{wysokość całego budynku}$$

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

Wartości szczytowe ciśnienia prędkości wiatru wg pkt.4.5 normy [N4].

$$q_b(z) = c_e(z) \cdot q_b \quad (4.8)$$

gdzie: $q_b(z)$ - wartość bazowa ciśnienia prędkości obliczana z następującego wzoru:

$$q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2$$

W którym: q - wartość gęstości powietrza, wartość podana w załączniku krajowym

$$- q = 1,25 \frac{kg}{m^3}.$$

$$q_b = \frac{1}{2} \cdot 1,25 \cdot (22)^2 = 302,5 \frac{N}{m^2} = 0,303 \frac{kN}{m^2}$$

Wartość szczytowa ciśnienia prędkości wiatru w zależności do współczynnika ekspozycji czyli od wysokości hangaru.

$$q_b(z) = c_e(z) \cdot q_b \quad (4.9)$$

$$q_b(z) = 2,605 \cdot 0,303 \frac{kN}{m^2} = 0,789 \frac{kN}{m^2}$$

Ciśnienie wiatru działające na powierzchnie zewnętrzne konstrukcji w_e wyznaczamy ze wzoru poniżej:

$$w_e = q_p(z_e) \cdot c_{pe} \quad (4.10)$$

gdzie: $q_p(z_e)$ - wartość szczytowa ciśnienia prędkości w kN/m^2 , z_e - wysokość odniesienia dla ciśnienia zewnętrznego w m, c_{pe} - współczynnik ciśnienia zewnętrznego.

Ciśnienia wiatru działające na powierzchnie wewnętrzne konstrukcji w_i wyznaczamy ze wzoru poniżej:

$$w_i = q_p(z_i) \cdot c_{pi} \quad (4.11)$$

gdzie: $q_p(z_i)$ - wartość szczytowa ciśnienia prędkości w $kN.m^2$, z_i - wysokość odniesienia dla ciśnienia wewnętrznego w m, c_{pi} - współczynnik ciśnienia wewnętrznego.

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

Ciśnienie wiatru działające na powierzchnie zewnętrzne konstrukcji

Ściany zewnętrzne budynku nachylone są do pionu pod kątem 11° w celu uproszczenia obliczeń oraz przeprowadzenia analitycznej analizy oddziaływania wiatru na ściany hangaru, przyjęto, że jego ściany są pionowe, na rzucie prostokąta.

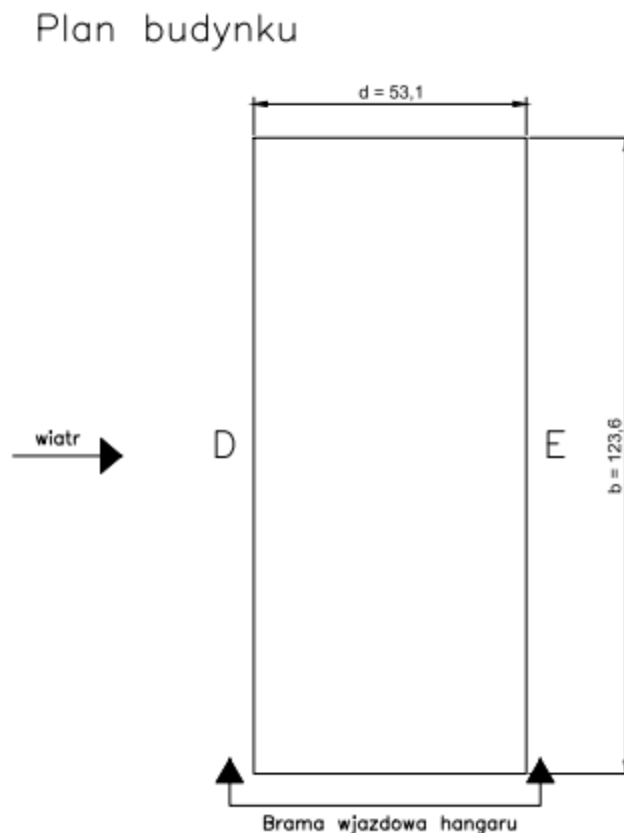
Wstępne założenia do analizy wiatrowej:

Wysokość analizowanej konstrukcji - $h_{budynku} = 33,70$ m

Szerokość analizowanej konstrukcji - $b = 53,10$ m

Wysokość konstrukcji jest mniejsza od jej szerokości, a zatem ten budynek będziemy traktować jako całość. Nie będzie uwzględniana zmiana ciśnienia na wyższych partiach budynku.

I PRZYPADEK – wiatr prostopadły do kalenicy dachu



Rys. 4.7. Rzut budynku do obliczeń wiatrowych – I przypadek. Źródło własne

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

Dane geometryczne konstrukcji potrzebne do zebrania obciążenia od działającego wiatru na analizowaną konstrukcję:

$$b = 123,60 \text{ m}$$

$$2h = 2 \cdot 33,70 \text{ m} = 67,40 \text{ m}$$

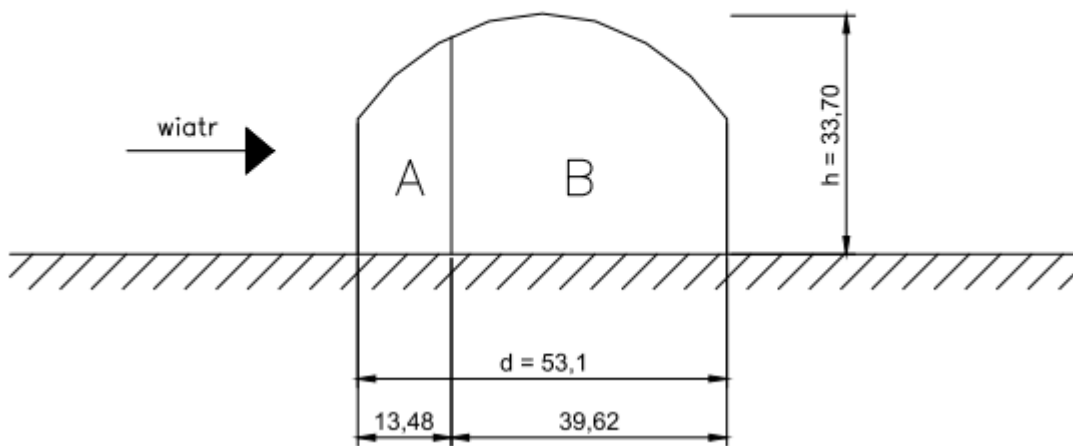
e – mniejszy z dwóch (b ; $2h$)

$$e = 67,40 \text{ m}$$

$$\frac{e}{5} = \frac{67,40 \text{ m}}{5} = 13,48 \text{ m}$$

Zgodnie z nierównością $e \geq d$, $67,40 \text{ m} \geq 53,10 \text{ m}$, pochodzącą z normy [N4] elewacje z polami obciążeń działającego wiatru będą wyglądać następująco.

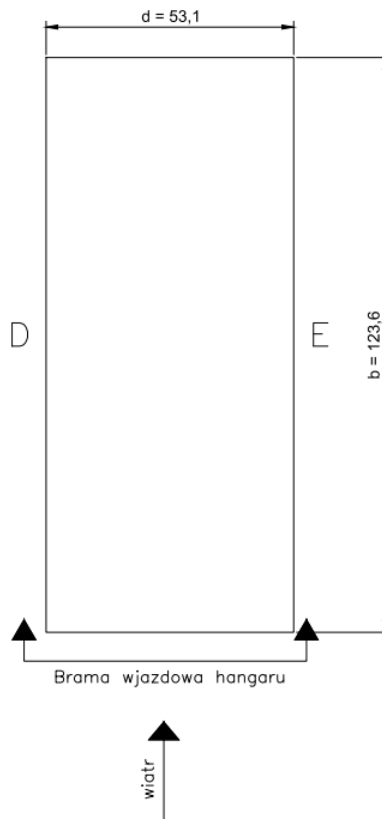
Elewacja przy $e \geq d$



Rys. 4.8. Elewacje budynku – Przypadek I analizy wiatrowej. Źródło własne

II PRZYPADK – wiatr równoległy do kalenicy dachu

Plan budynku



Rys. 4.9. Rzut budynku do obliczeń wiatrowych – II przypadek. Źródło własne

Dane geometryczne konstrukcji potrzebne do zebrania obciążenia od działającego wiatru na analizowaną konstrukcję

$$b = 53,10 \text{ m}$$

$$2h = 2 \cdot 33,70 \text{ m} = 67,40 \text{ m}$$

e – mniejszy z dwóch ($b; 2h$)

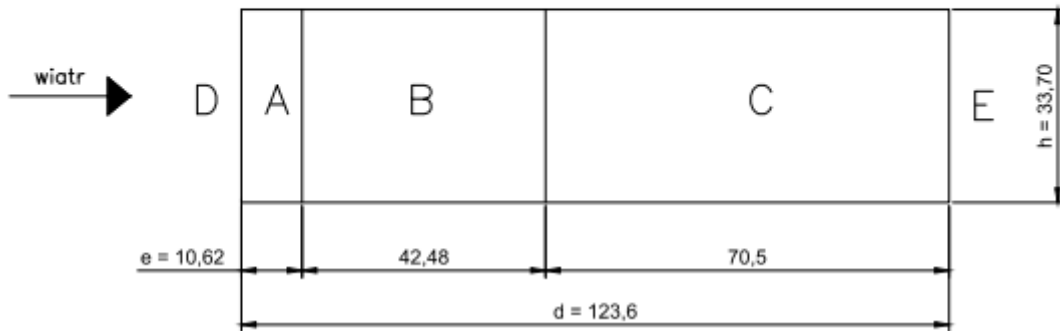
$$e = 53,10 \text{ m}$$

$$\frac{e}{5} = \frac{53,10 \text{ m}}{5} = 10,62 \text{ m}$$

Zgodnie z nierównością $e \geq d, 68,57 \text{ m} \geq 53,10 \text{ m}$, pochodzącą z normy [N4] elewacje z polami obciążeń wiatru zgodnie z II przypadkiem będą wyglądać następująco.

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

Elewacja przy $e < d$



Rys. 4.10. Elewacje budynku – Przypadek II analizy wiatrowej. Źródło własne

Wartości wyników współczynnika ciśnienia zewnętrznego wyznaczonego na podstawie normy [N4]. W celu wyznaczenia odpowiednich wartości współczynnika $c_{pe,10}$ dla pola ściany D i E zastosowano interpolację liniową. Wyniki zamieszczono w poniższej tabeli:

Tabela. 4.2. Wartości współczynnika ciśnienia zewnętrznego

Pole	A		B		C		D		E	
h/d	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$
1	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,8	+1,0	-0,5	
0,65	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,75	+1,0	-0,41	
$\leq 0,25$	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,7	+1,0	-0,3	

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

Tabela. 4.3. Wartości współczynnika ciśnienia zewnętrznego wiatru na ściany budynku

ELEMENT	ŚCIANY				
POLE	A	B	C	D	E
WIATR PROSTOPADŁY DO KALENICY DACHU					
$c_{pe,10}$ [-]	-1,20	-0,80	-	+0,75	-0,41
w $\left[\frac{kN}{m^2}\right]$	-0,95	-0,63	-	+0,59	-0,32
WIATR RÓWNOLEGLY DO KALENICY DACHU					
$c_{pe,10}$ [-]	-1,20	-0,80	-0,50	+0,75	-0,41
w $\left[\frac{kN}{m^2}\right]$	-0,95	-0,63	-0,39	+0,59	-0,32

Ze względu na występowanie złożonej konstrukcji dachu, przyjęto uproszczenie, że połacie dachu hangaru jest w kształcie łukowym (walcowym) na rzucie prostokąta. Zaawansowana analiza uwzględniająca realne oddziaływanie wiatru na projektowaną konstrukcję zostanie przeprowadzona w programie do analizy statyczno-wytrzymałościowej konstrukcji REFEM 6 przy użyciu modułu do obliczeń obciążenia wiatrem na zamodelowaną konstrukcję 3D.

Procedura wyznaczenia obciążenia wiatru działającego na połacie dachu analizowanej konstrukcji zostały wyznaczone zgodnie z punktem 7.2.8 normy [N4].

I PRZYPADEK – WIATR PROSTOPADŁY DO KALENICY

$$\frac{h}{d} = \frac{33,70}{53,10} = 0,635$$

$$f = 14,57 \text{ m},$$

$$h = 19,13 \text{ m},$$

$$z_e = h + f = 19,13 + 14,57 = 33,70 \text{ m}$$

$$\frac{f}{d} = \frac{14,57}{53,10} = 0,274 \geq 0,20, \quad \frac{h}{d} = \frac{19,13}{53,10} = 0,360 \leq 0,50,$$

Na podstawie powyższego warunku należy rozpatrzyć tylko jeden przypadek wartości $c_{pe,10}$, wyznaczony za pomocą interpolacji liniowej.

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

Wartości współczynników ciśnienia zewnętrznego odczytane na podstawie rysunku 7.11 normy [N4].

Pole A $c_{pe,10} = +0,42$,

Pole B $c_{pe,10} = -0,97$,

Polce C $c_{pe,10} = -0,40$.

Tabela. 4.4. Wartości współczynnika ciśnienia zewnętrznego wiatru dla dachu konstrukcji. Przypadek I.

Pole	A	B	C
f/d	$c_{pe,10}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,10}$
0,20	+0,20	-0,90	-0,40
0,274	+0,42	-0,97	-0,40
0,30	+0,46	-1,0	-0,40

II PRZYPADEK – WIATR RÓWNOLEGŁY DO KALENICY

$$\frac{h}{d} = \frac{33,70}{123,60} = 0,273$$

$$f = 14,57 \text{ m},$$

$$h = 19,13 \text{ m},$$

$$z_e = h + f = 19,13 + 14,57 = 33,70 \text{ m}$$

$$\frac{f}{d} = \frac{14,57}{123,60} = 0,118 \leq 0,20 \qquad \frac{h}{d} = \frac{19,13}{123,60} = 0,155 \leq 0,50,$$

Na podstawie powyższego warunku należy rozpatrzyć tylko jeden przypadek wartości $c_{pe,10}$, wyznaczony za pomocą interpolacji liniowej.

Wartości współczynników ciśnienia zewnętrznego odczytane na podstawie rysunku 7.11 normy [N4] dla kolejnego przypadku kierunku wiania wiatru:

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

Pole A $c_{pe,10} = +0,12$,

Pole B $c_{pe,10} = -0,82$,

Polce C $c_{pe,10} = -0,40$.

Tabela. 4.5. Wartości współczynnika ciśnienia zewnętrznego wiatru dla dachu konstrukcji.
Przypadek II.

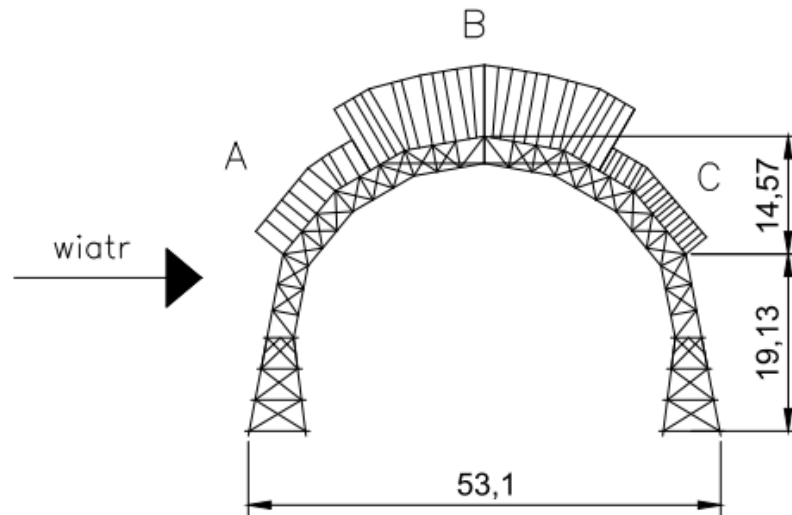
Pole	A	B	C
f/d	$c_{pe,10}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,10}$
0,10	+0,18	-0,80	-0,40
0,118	+0,12	-0,82	-0,40
0,20	+0,00	-0,90	-0,40

Wszystkie wyznaczone wartości współczynnika ciśnienia zewnętrznego wraz z wyznaczonym ciśnieniem wiatru przedstawia poniższa tabela. Na kolejnej stronie przedstawiono schematyczne rysunki przedstawiające obciążenie głównego układu konstrukcyjnego hangaru – jednej ramy kratownicowej.

Tabela. 4.6. Wartości współczynnika ciśnienia zewnętrznego wiatru na ściany budynku

ELEMENT	POŁAĆ DACHU - ŁUKOWY		
POLE	A	B	C
WIATR PROSTOPADŁY DO KALENICY DACHU			
$c_{pe,10} [-]$	+0,42	-0,97	-0,40
$w \left[\frac{kN}{m^2} \right]$	+0,331	-0,765	-0,316
WIATR RÓWNOLEGŁY DO KALENICY DACHU			
$c_{pe,10} [-]$	+0,12	-0,82	-0,40
$w \left[\frac{kN}{m^2} \right]$	+0,095	-0,647	+0,316

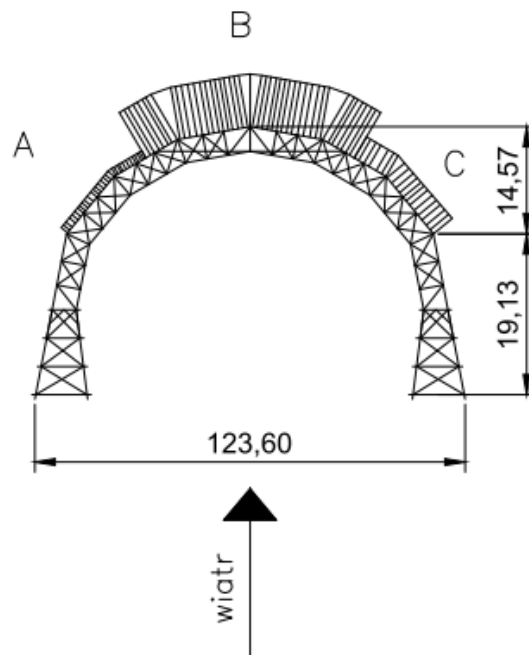
Dach łukowy – przypadek I



Rys. 4.11. Obciążenie ramy konstrukcyjnej hangaru od I przypadku wiatru.

Źródło własne

Dach łukowy – przypadek II



Rys. 4.12. Obciążenie ramy konstrukcyjnej hangaru od I przypadku wiatru.

Źródło własne

Ciśnienie wiatru działające na powierzchnie wewnętrzne konstrukcji

W odwzorowywanym budynku znajduje się duża brama wjazdowa do hangaru. Zbudowana była z czterech dużych przesuwnych skrzydeł umieszczonych na specjalnych prowadnicach zaczepionych do stalowej konstrukcji kratownicowej. Owa konstrukcja przestrzenna bramy wjazdowej do hangaru nie jest przedmiotem obliczeń w tej oto pracy dyplomowej. Przedstawioną ją jako dodatkowy efekt wizualny oraz w celu całkowitego odtworzenia hangaru dla sterowców. Ze względu na jej duże wymiary oraz brak danych na temat wymiarów i ilości okien znajdujących się w ścianach zewnętrznych budynku na podstawie normy [N4] rozpatrzony zostanie najbardziej niekorzystny przypadek wystąpienia ciśnienia wewnętrznego wiatru zgodnie z wartościami podanymi w normie.

Przyjmujemy następujące wartości ciśnienia wewnętrznego wiatru ssanie oraz parcie:

$c_i = +0,20$ (parcie) oraz $c_i = -0,30$ (ssanie).

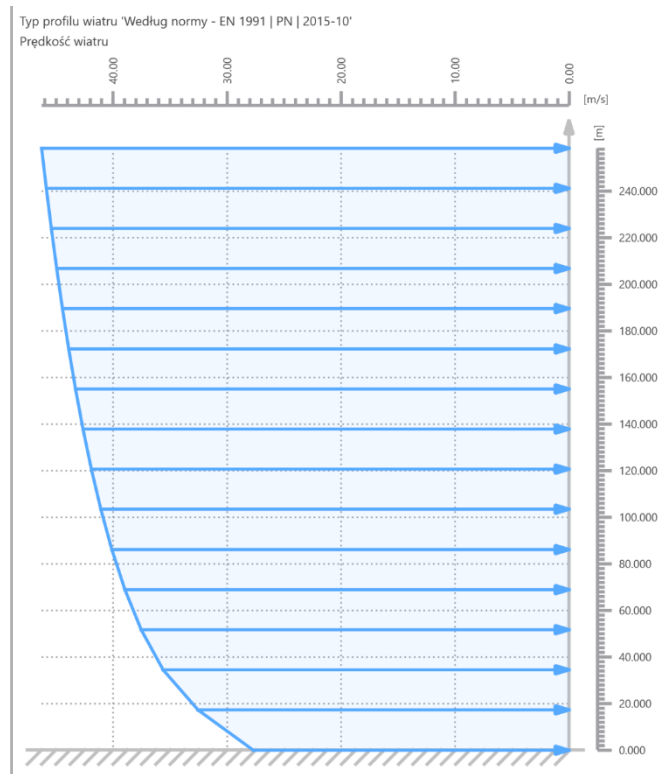
$$w_1 = q_p(z_i) \cdot c_{pi} = 0,789 \cdot 0,20 = 0,158 \frac{kN}{m^2}$$

$$w_2 = q_p(z_i) \cdot c_{pi} = 0,789 \cdot (-0,30) = 0,237 \frac{kN}{m^2}$$

4.3. Analiza obciążenia wiatrem w programie RFEM 6

Dodatkowy moduł do programu RFEM 6, RWIND 3 służy do definiowania obciążeń wiatrem dla budynków. Oprócz modelu 3D należało wprowadzić odpowiednie założenia początkowe zgodnie z obowiązującą normą [N4]. Na podstawie stworzonego profilu wiatru program automatycznie określa wszystkie pozostałe parametry symulacji przepływu wiatru. Zadaniem projektanta jest dokonanie analizy otrzymanych wyników oraz wprowadzenie ich do programu RFEM 6 w celu stworzenia kombinacji obciążeń.

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ



Rys. 4.13. Profil wiatru wyznaczony w programie do analizy oddziaływania wiatru na podstawie normy [N4]. Źródło własne

Poniżej została zaprezentowana tabela z wynikami dotyczącymi prędkości wiatru oraz intensywności turbulencji wraz ze wzrostem wysokości.

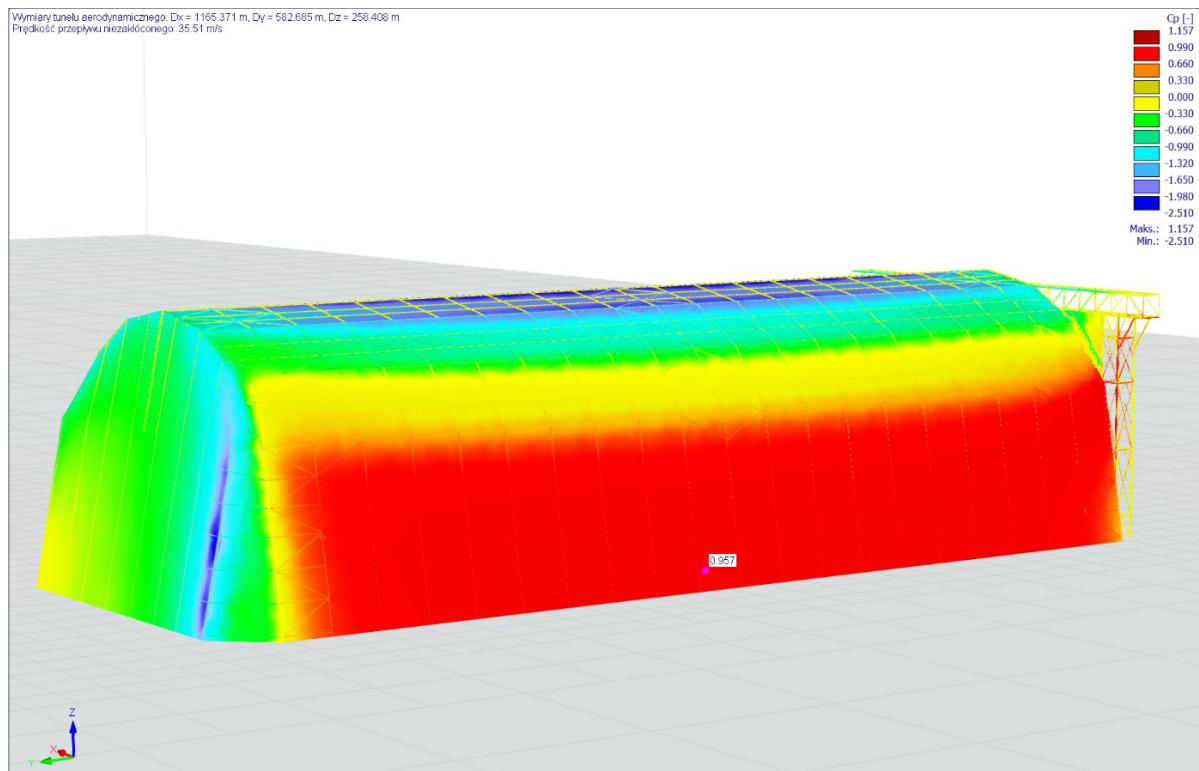
Tabela. 4.7. Wartości prędkości wiatru i intensywności turbulencji wiatru w prowadzonej analizie wiatrowej.

Nr	Wysokość z [m]	Prędkość wiatru v [m/s]	Intensywność turbulencji I [%]
1	0,000	27,71	35,54
2	17,227	32,55	24,69
3	34,454	35,62	21,08
4	51,682	37,54	19,42
5	68,909	38,97	18,39
6	86,136	40,12	17,67
7	103,363	41,08	17,12
8	120,590	41,92	16,68
9	137,817	42,65	16,31
10	155,045	43,31	16,01
11	172,272	43,90	15,74
12	189,499	44,45	15,51
13	206,726	44,96	15,30
14	223,953	45,43	15,12
15	241,180	45,87	14,95
16	258,408	46,28	14,80

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

Na podstawie przeprowadzonej analizy otrzymano rozkład współczynników ciśnienia zewnętrznego wiatru na analizowanej konstrukcji hangaru. Poniższy rysunek Rys. 4.14. przedstawia szczegółowe rozmieszczenie poszczególnych wartości współczynników c_p na całej analizowanej konstrukcji. Można w ten sposób odczytać dokładną wartość w każdym charakterystycznym punkcie budynku.

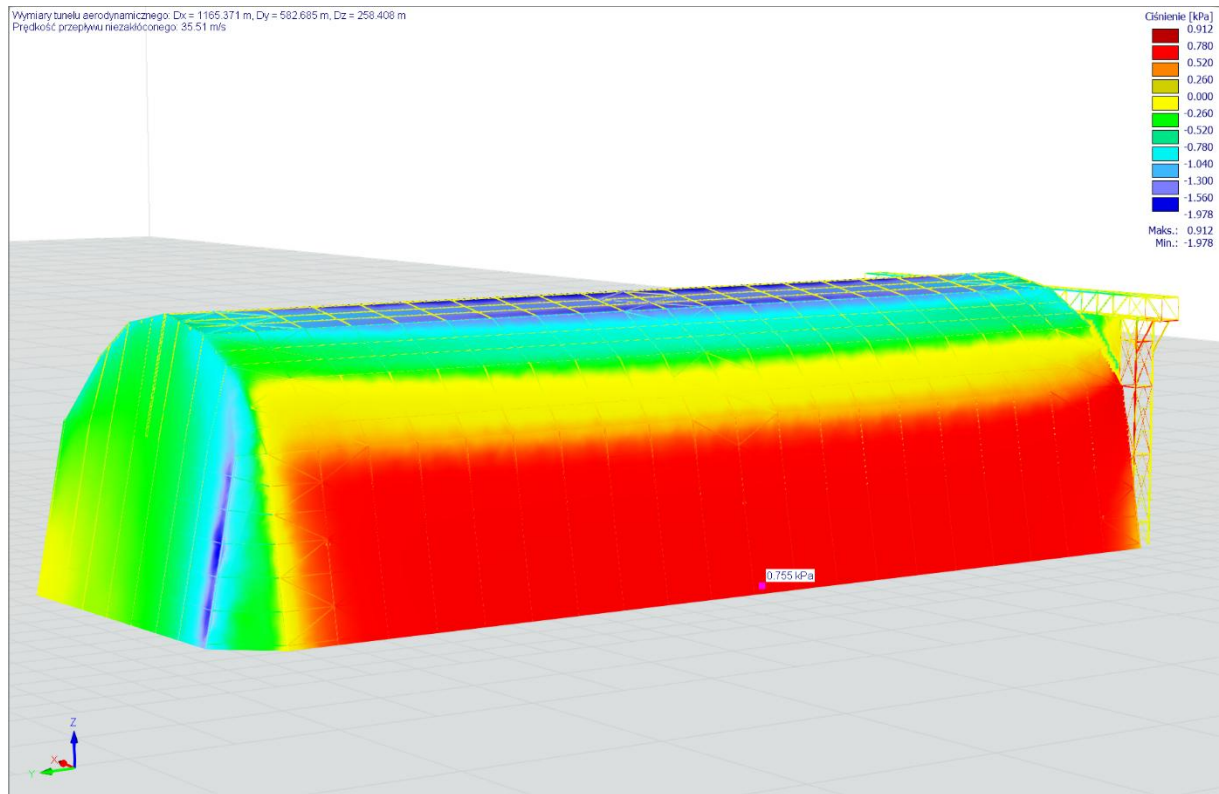
Na kolejnych ilustracjach zaprezentowano wyniki przeprowadzonej analizy w tunelu aerodynamicznym hangaru dla sterowców. Zostały wyznaczone współczynniki ciśnienia zewnętrznego wiatru, ciśnienie wiatru działające na powierzchnie budynku, wektory obciążeń prętowych będących efektem oddziaływania wiatru działającego na hangar oraz efektem finalnym jest animacja pokazująca rozkład strug powietrza opływających konstrukcję w dwóch przypadkach. W pierwszym przypadku struga powietrzna skierowana jest prostopadłe do kalenicy dachu (zgodnie z kierunkiem X przyjętego układu globalnego w programie). Natomiast jako drugi przypadek stworzono strugę powietrza skierowaną równolegle do kalenicy dachu czyli zgodnie z kierunkiem Y przyjętego układu globalnego. Analiza porównawcza otrzymanych wyników zostanie zaprezentowana w dalszej części pracy. Do kombinacji obciążeń zostaną wybrane wartości będące bardziej niekorzystną sytuacją.



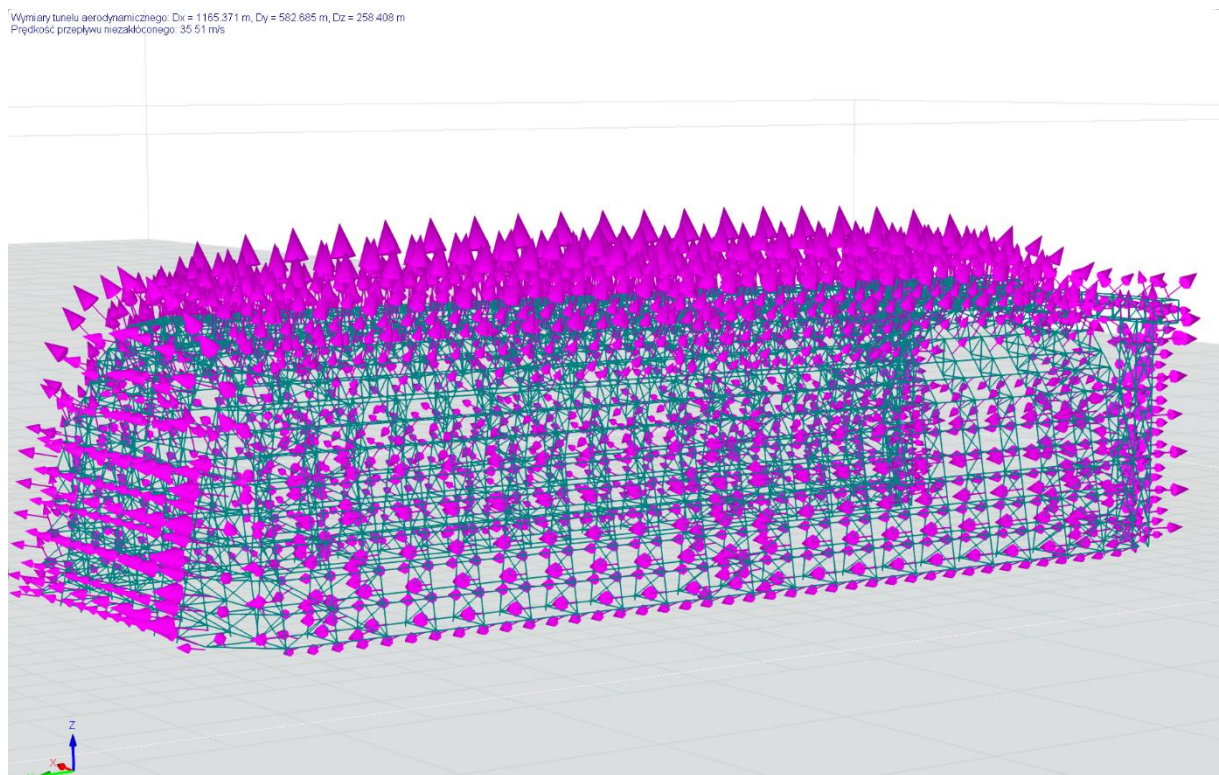
Rys. 4.14. Otrzymane wartości współczynników ciśnienia zewnętrznego. Przypadek I

– źródło własne

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ



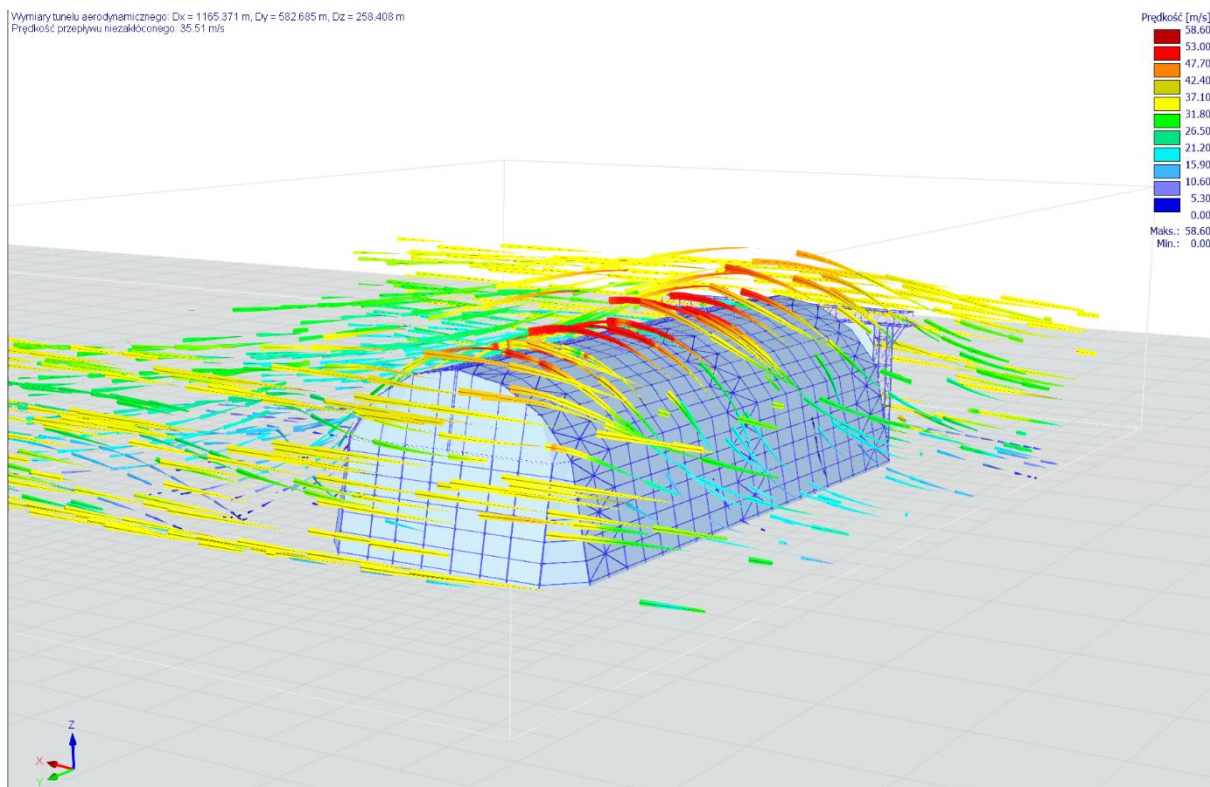
Rys. 4.15. Otrzymane wartości współczynników ciśnienia wiatru działającego na powierzchnie analizowanego hangaru. Przypadek I. Źródło własne



Rys. 4.16. Otrzymane wektory obciążeń prętowych będących skutkiem oddziaływania wiatru. Przypadek I. Źródło własne

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

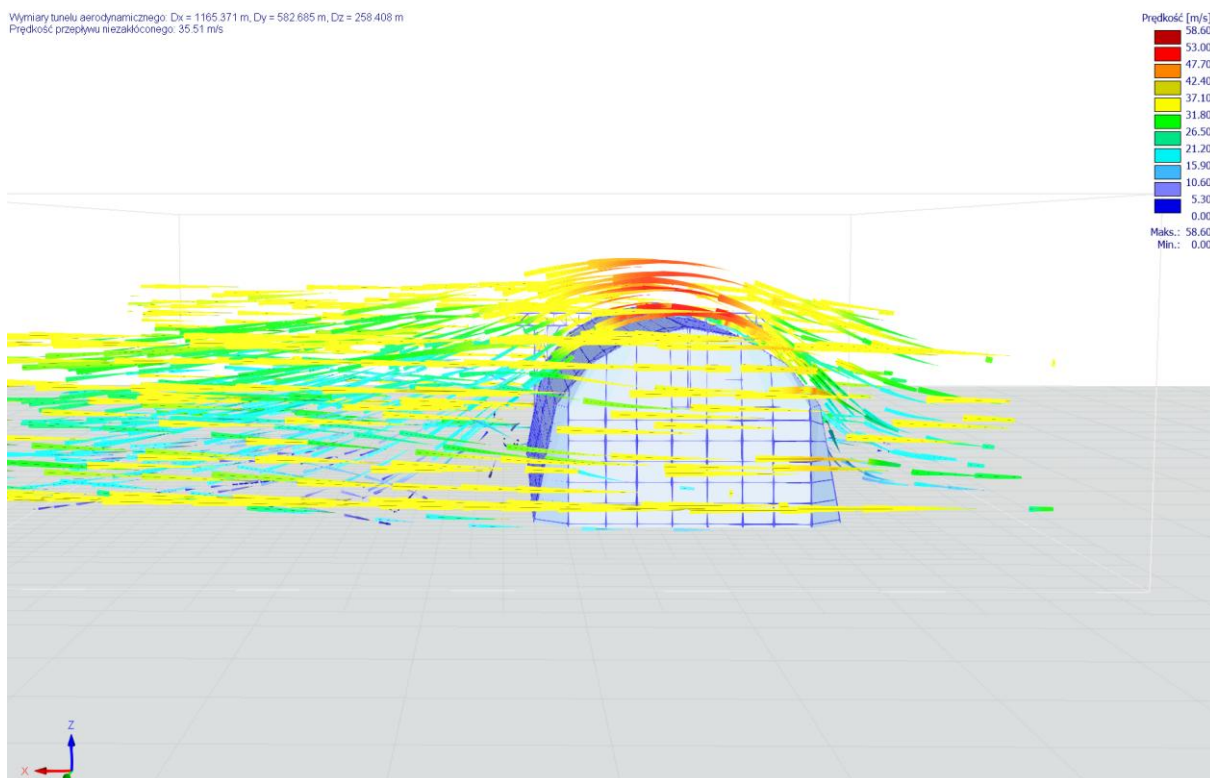
Wymiary tunelu aerodynamicznego: $D_x = 1165.371$ m, $D_y = 582.685$ m, $D_z = 258.408$ m
Prędkość przepływu niezakłóconego: 35.51 m/s



Rys. 4.17. Animacja ukazująca kierunek opływających hangar strug powietrza. Przypadek I.

Źródło własne

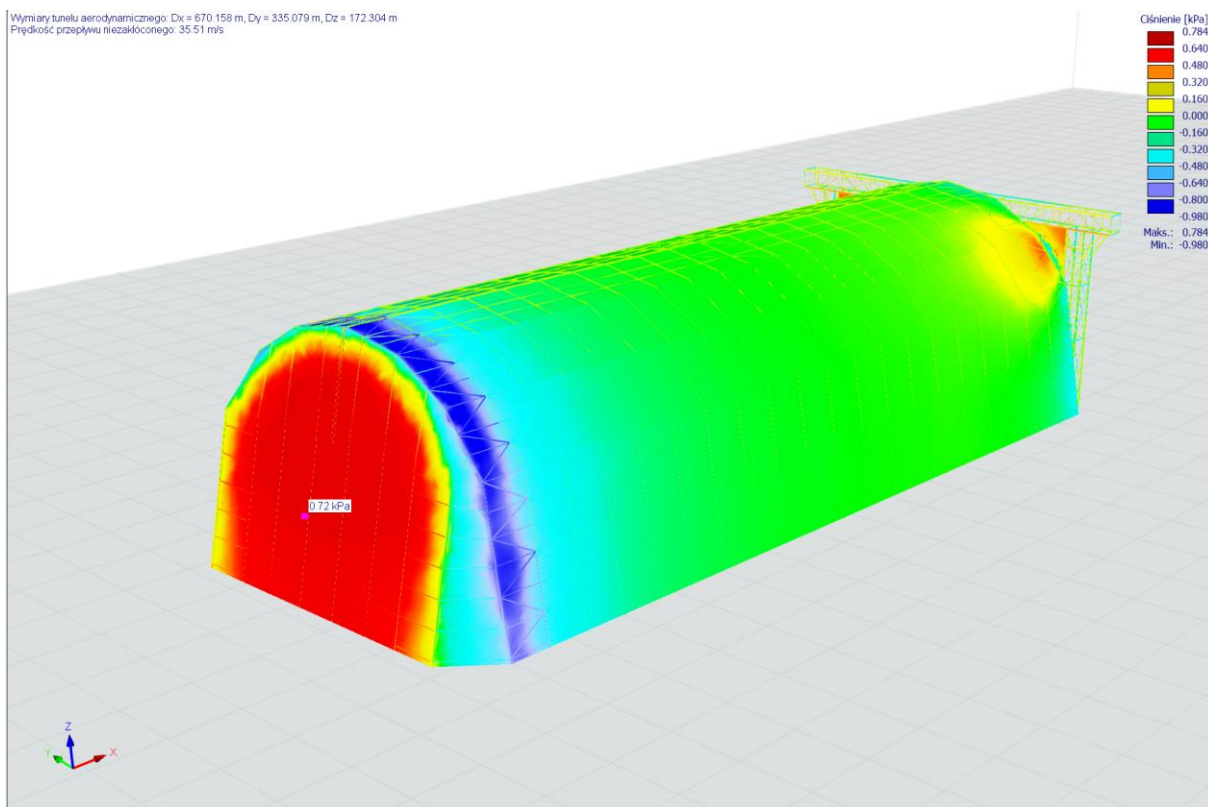
Wymiary tunelu aerodynamicznego: $D_x = 1165.371$ m, $D_y = 582.685$ m, $D_z = 258.408$ m
Prędkość przepływu niezakłóconego: 35.51 m/s



Rys. 4.18. Animacja ukazująca kierunek opływających hangar strug powietrza. Przypadek I.

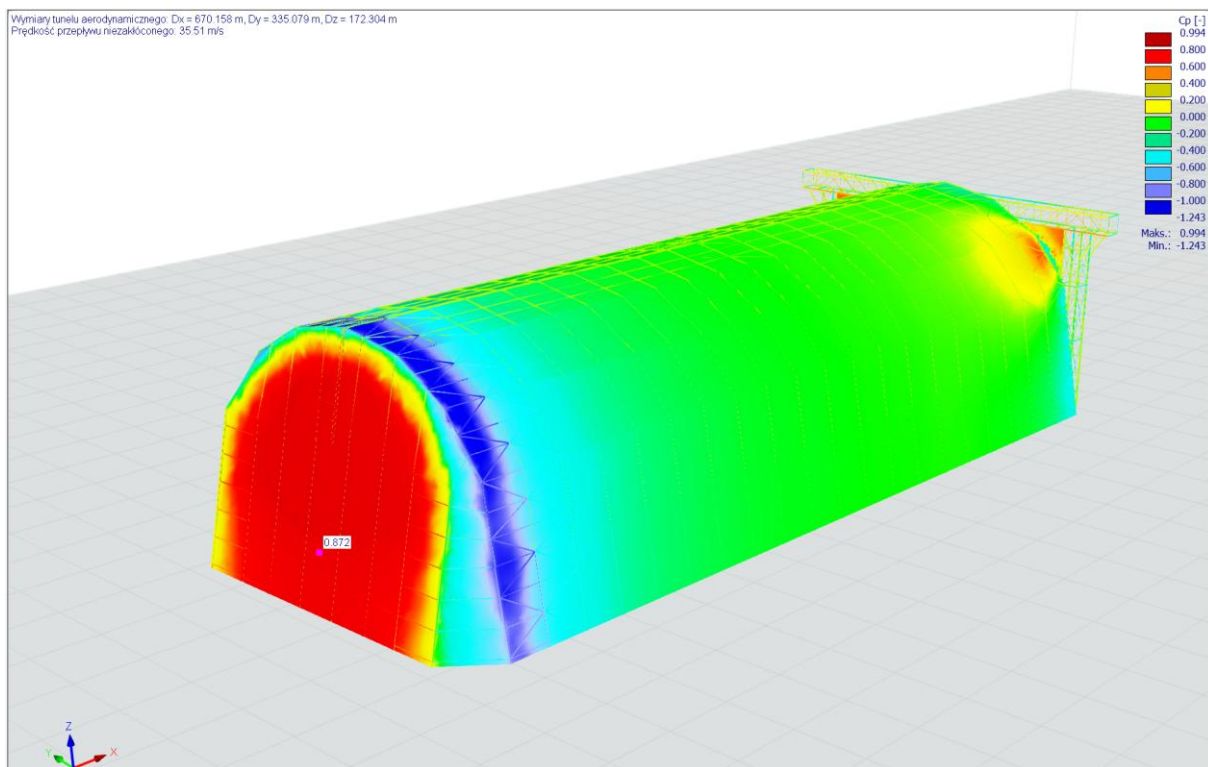
Źródło własne

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ



Rys. 4.19. Otrzymane wartości współczynników ciśnienia zewnętrznego. Przypadek II.

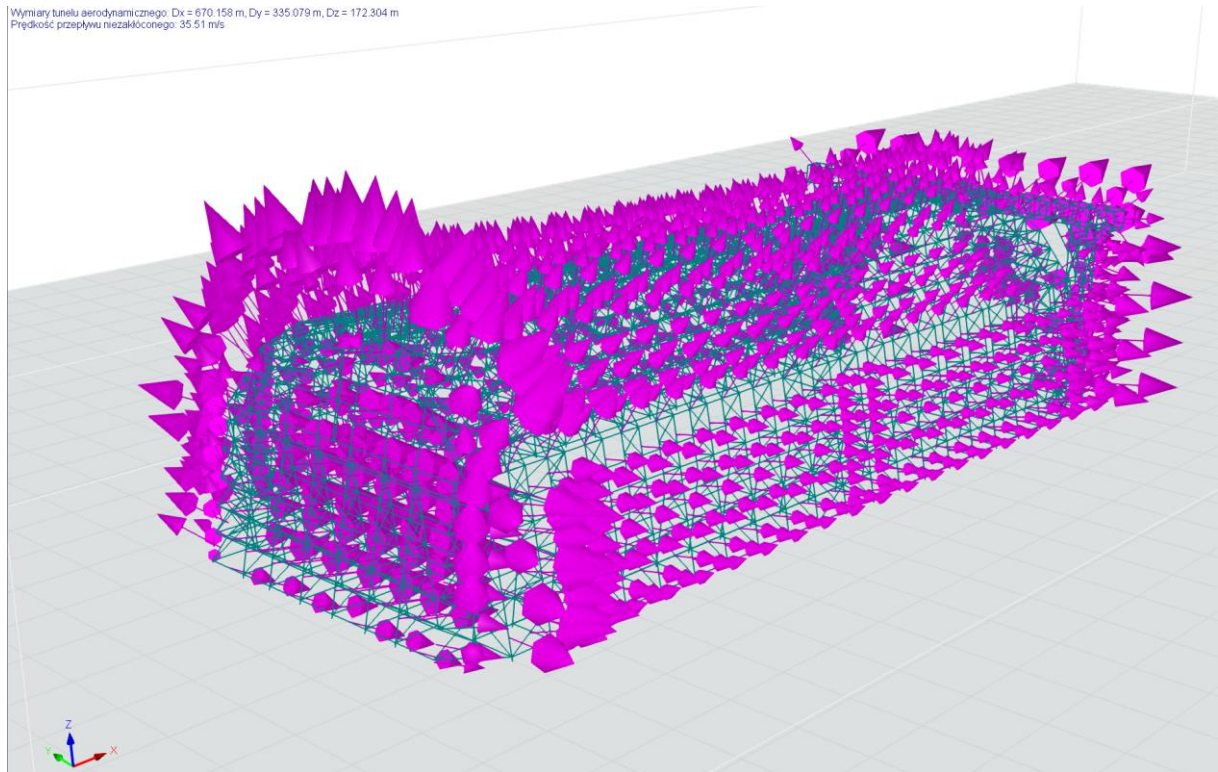
Źródło własne



Rys. 4.20. Otrzymane wartości współczynników ciśnienia wiatru działającego na powierzchnie analizowanego hangaru. Przypadek II. Źródło własne

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

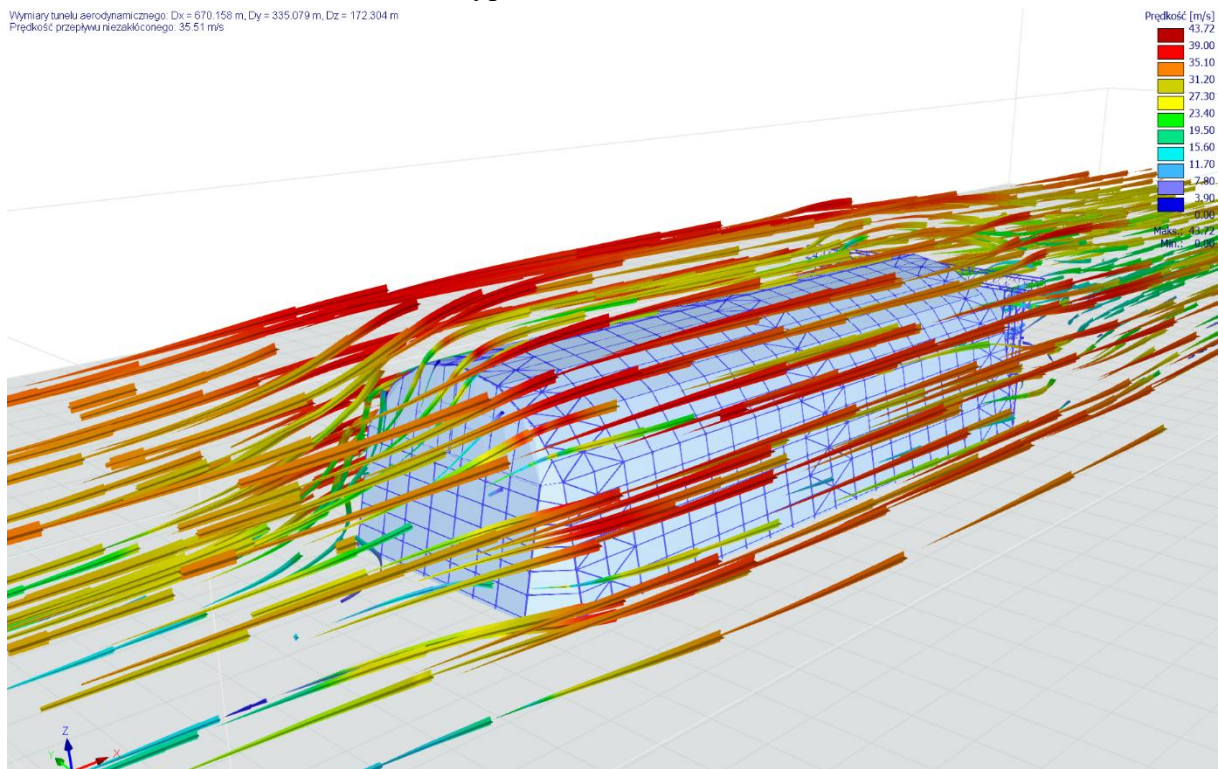
Wymiary tunelu aerodynamicznego: Dx = 670.158 m, Dy = 335.079 m, Dz = 172.304 m
Prędkość przepływu niezakłóconego: 35.51 m/s



Rys. 4.21. Otrzymane wektory obciążeń prętowych będących skutkiem oddziaływania wiatru.

Przypadek II. Źródło własne

Wymiary tunelu aerodynamicznego: Dx = 670.158 m, Dy = 335.079 m, Dz = 172.304 m
Prędkość przepływu niezakłóconego: 35.51 m/s



Rys. 4.22. Animacja ukazująca kierunek opływających hangar strug powietrza. Przypadek II.

Źródło własne

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ



Rys. 4.23. Animacja ukazująca kierunek opływających hangar strug powietrza. Przypadek II.
Źródło własne

Przeprowadzona analiza oddziaływania wiatru na konstrukcję na podstawie symulacji w cyfrowym tunelu aerodynamicznym pozwala szczegółowo wyznaczyć wszystkie wartości ciśnienia wiatru działającego na konstrukcję. Dodatkowo w celu zrealizowania szczegółowych analiz można zbadać przepływ stacjonarny jak i niestacjonarny wiatru. Jednak tak szczegółowe obliczenia nie są przedmiotem tej pracy inżynierskiej. Dokonana analiza oddziaływania wiatru na odtwarzaną konstrukcję miała na celu sprawdzenie rozbieżności między wynikami wyznaczonymi analitycznie na podstawie normy [N4], a oddziaływaniem wyznaczonym na podstawie numerycznej analizy w tunelu aerodynamicznym. Ze względu na skomplikowany kształt oraz geometrię budynku nie ma możliwości dokładnego wyznaczenia oddziaływania wiatru na konstrukcję za pomocą metod analitycznych. Norma [N4] nie uwzględnia budynków, które posiadają nachylone ściany względem pionu lub mają złożone kształty dach jak w przypadku analizowanego hangaru. Wyniki uzyskane po przeprowadzeniu analizy w programie RWIND pokazują, że rzeczywiste oddziaływanie wiatru ma bardziej niekorzystne wartości niż te wyznaczone sposobem analitycznym. Dzięki zaprezentowanej animacji (Rys 4.17 – 4.18; Rys. 4.22 – 4.23.) opływającej konstrukcję strugi powietrza można zauważyć, dodatkowo tworzące się wiry powietrza po stronie zawietrznej analizowanego przypadku wiatru (wiatr równoległy do kalenicy budynku) (Rys. 4.23.). Jest to dodatkowe obciążenie nie uwzględniane w analitycznych metodach. Co więcej przy numerycznym wyznaczeniu obciążenia wiatrem otrzymano dokładne wartości wektorów obciążeń prętowych będących efektem oddziaływania wiatru. Zdjęcia Rys. 4.16 oraz Rys. 4.21. przedstawiają w sposób graficzny różnice w wartościach wektorów powstałych w wyniku oddziaływania wiatru

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

na kolejnych elementach oraz powierzchniach budynku. Można zauważyć różnice w wartościach poszczególnych wektorów w zależności od rozpatrywanego miejsca na konstrukcji. Ze względu na otrzymanie wartości obciążeń większych niż uzyskanych metodą analityczną do dalszych obliczeń w tym otrzymania kombinacji obciążeń oraz wykresów sił wewnętrznych zastosowano wartości wyznaczone za pomocą tunelu aerodynamicznego. Dzięki temu późniejsze wartości sił wewnętrznych posiadać będą wartości bardziej dokładne niż te wyznaczone metodami tradycyjnymi. Działanie jest po stronie tak zwanej bezpiecznej, ponieważ do obliczeń przyjmowane są wartości bardziej niekorzystne dla analizowanej konstrukcji hangaru.

4.4. Kombinacje obciążeń

Obliczenia konstrukcji budowlanych należy wykonywać z uwzględnieniem różnych wariantów obciążeń nazywanych kombinacjami obciążeń. Algorytm obliczania oraz budowania kombinacji podany jest w normie [N1]. Kombinacje obciążeń dla stanu granicznego nośności (SGN) uwzględniają obliczeniowe wartości obciążeń stałych oraz zmiennych. Prawdopodobieństwo pojawienia się obciążeń zmiennych określa się za pomocą współczynnika jednoczesności trwania analizowanych przypadków obciążeń [N1]. Kombinacje obciążeń dla stanu granicznego użytkowalności (SGU) wyznaczają odkształcenia konstrukcji, zależne od charakterystycznych efektów oddziaływań na konstrukcję. Kombinacje te tworzone są na podstawie wzoru (4.12).

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{j \geq 1} \gamma_{Q,j} \cdot \psi_{0,1} \cdot Q_{k,j} \quad (4.12)$$

gdzie: $\gamma_{G,j}$, $\gamma_{Q,j}$ – są to współczynniki bezpieczeństwa według wartości podanych w normie [N1], $G_{k,j}$ jest to obciążenie stałe w kN/m^2 , $Q_{k,j}$ jest to obciążenie zmienne w kN/m^2 , natomiast $\psi_{0,1}$ jest to współczynnik jednoczesności obciążeń o wartościach podanych w normie [N1].

W niniejszej pracy inżynierskiej kombinacje obciążeń zostały stworzone automatycznie za pomocą oprogramowania do obliczeń konstrukcji inżynierskich – RFEM 6. Utworzono 11 przypadków obciążeń działających na analizowaną konstrukcję i na ich podstawie zostały wygenerowane odpowiednie kombinacje dla dwóch rozpatrywanych sytuacji obliczeniowych to jest SGN oraz SGU wraz z zachowaniem wszystkich wymaganych współczynników bezpieczeństwa oraz jednoczesności trwania przypadków obciążeń.

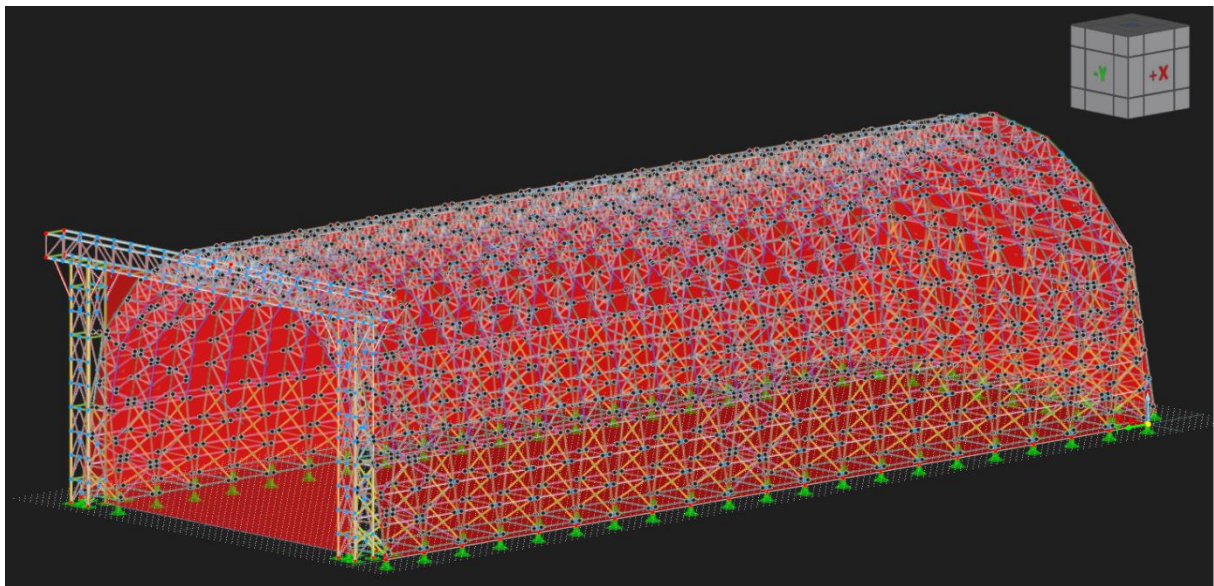
5. Analiza

5.1. Wybór metody analizy stateczności konstrukcji

Przeprowadzono analizę stateczności konstrukcji w module do analizy wyboczeniowej RFEM 6. Analiza stateczności konstrukcji została wykorzystana w celu ustalenia współczynnika krytycznego α_{cr} . Analizy wyboczeniowe oraz zwichrzenie przeprowadzono na podstawie procedur analitycznych [N5, L9] jednak uzyskany współczynnik krytyczny posłużył jako dodatkowe sprawdzenie otrzymanych wyników z metod analitycznych. Dzięki uzyskanym postaciom odkształcenia oraz współczynnikom krytycznym obserwuje się tylko lokalne utraty stateczności elementów konstrukcyjnych hangaru. Ostatecznie zdecydowano, że w obliczeniach zastosowaną analizę I rzędu, a zatem geometrycznie liniową.

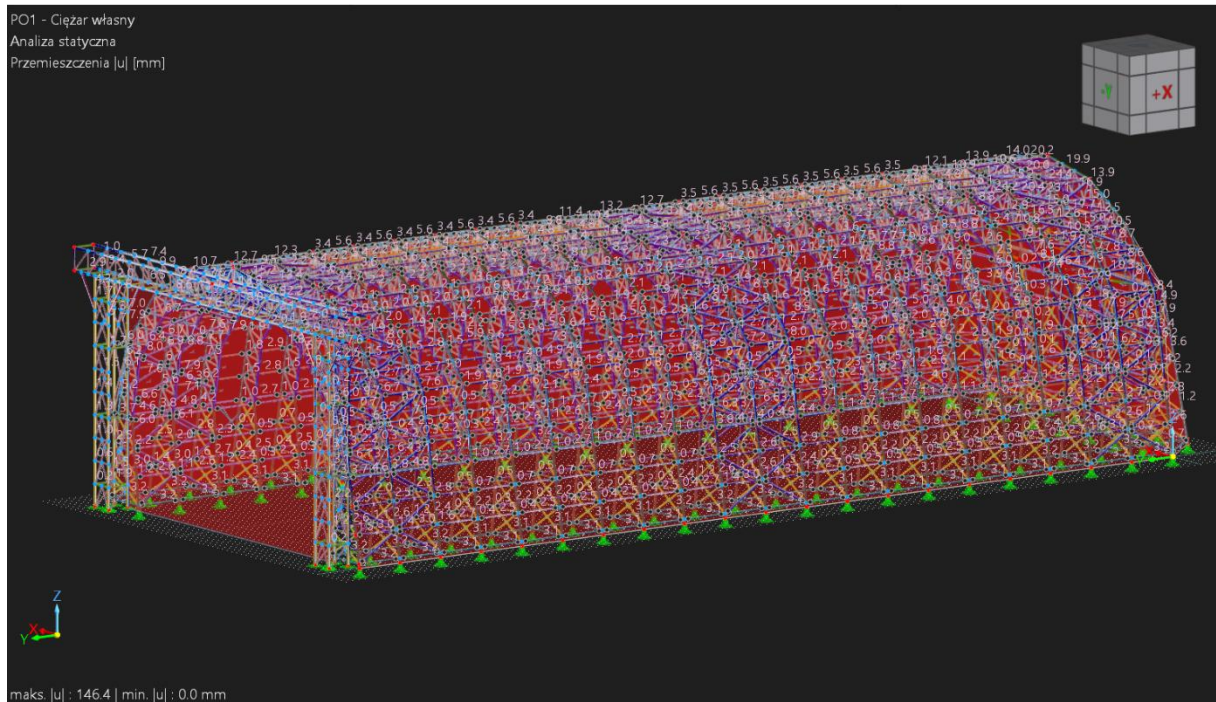
5.2. Dane do analizy

Na poniższych rysunkach (rys. 5.2.1. ; rys. 5.2.2.) przedstawione zostały schematy dotyczące danych geometrycznych modeli 3D konstrukcji zamodelowanej odpowiednio w programie DLUBAL RFEM 6.



Rys. 5.2.1 Układ konstrukcyjny hangaru – model 3D, źródło własne

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ



Rys. 5.2.2 Układ konstrukcyjny hangaru – analiza stateczności konstrukcji pod ciężarem własnym – źródło własne

Węzły ramy zostały przyjęte jako:

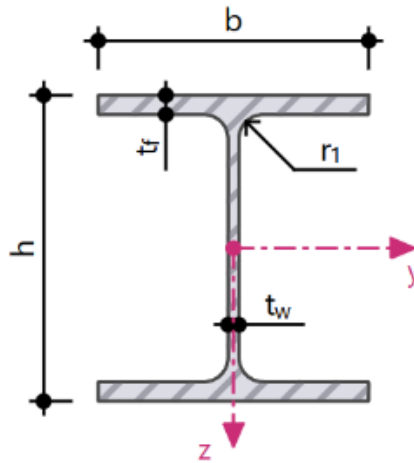
- sztywne przy połączeniach słupków i krzyżulców kratownicy odpowiednio z pasem dolnym oraz górnym kratownicy górnej konstrukcji.
- sztywne przy połączeniach krzyżulców oraz słupów dolnej części głównego układu konstrukcyjnego odtwarzanego hangaru.
- przegubowe przy połączeniach płatwi z poszczególnymi ramami kratowymi konstrukcji, przy połączeniach dolnych belek łączących ze sobą dolne układy nośne konstrukcji tzw. "kozły", oraz przy prętach stężających całą konstrukcję.

W tabeli 5.1. zestawiono wszystkie elementy składające się na główny układ konstrukcyjny hangaru. Ze względu na rozmiar tabeli umieszczona ona została na stronie 74.

5.3. Przekroje elementów

Pasy górny i dolny kratownicowej części układu konstrukcyjnego hangaru

Na rysunku 5.3 i tabeli 5.2 przedstawiono dane geometryczne dotyczące przekroju kształtownika walcowanego na gorąco HEA przyjętego jako pas górny części kratownicowej odtwarzanego hangaru.



Rys. 5.3. Przekrój profilu HEA oraz HEB

Źródło: [S1,S2].

Tabela. 5.2. Dane profilu kształtownika HEA i HEB

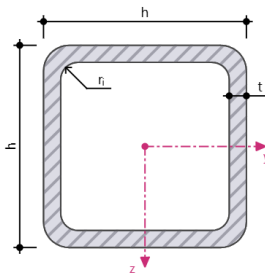
Przekrój	Masa [kg/m]	Wymiary							Pole przekroju	Moment bezwładności przekroju		Promień bezwładności przekroju		Wskaźnik plastyczności przekroju		Wskaźnik sprężystości przekroju		Moment bezwładności przy skręcaniu	Wskaźnik wytrzymałości na skręcanie		
		h	b	t _w	t _f	h _i	r ₁	d		I _y	I _z	i _y	i _z	W _{pl,y}	W _{pl,z}	W _{el,y}	W _{el,z}			I _t	W _t
		[mm]								A [cm ²]	[cm ⁴]		[cm]		[cm ³]		[cm ³]			[cm ⁴]	[cm ³]
PAS GÓRNY KRATOWNICY GŁÓWNEJ CZĘŚCI NOŚNEJ HANGARU																					
HEB220	71,4	220	220	9,5	16	188	18	152	91,00	8090	2840	94,3	55,9	828	394	736	258	76,80	48,00		
PAS DOLNY KRATOWNICY GŁÓWNEJ CZĘŚCI NOŚNEJ HANGARU																					
HEA200	42,2	190	200	6,5	10	170	18	134	55,80	3690	1340	82,8	49,8	430	204	389	134	21,10	21,10		

Źródło: [S1, S2]

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

Słupki i krzyżulce kratownicowej części układu konstrukcyjnego hangaru

Rysunek 5.4 i tabela 5.3 przedstawia dane dotyczące właściwości przekroju kształtownika rury kwadratowej walcowanej na gorąco, zastosowanego w słupkach i krzyżulcach kratownicowej części odtwarzanego hangaru.



Rys. 5.4. Przekrój kształtownika SHS

Tabela. 5.3. Dane dotyczące właściwości profilu SHS

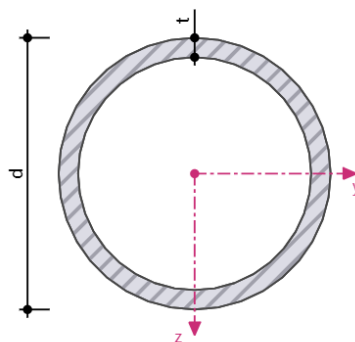
Przekrój	Masa [kg/m]	Wymiary					Pole przekroju	Moment bezwładności przekroju		Promień bezwładności przekroju		Wskaźnik plastyczności przekroju		Wskaźnik sprężystości przekroju		Moment bezwładności przy skręcaniu	Wskaźnik wytrzymałości na skręcanie	
		h	t	r ₀	r _i	d		I _y	I _z	i _y	i _z	W _{pl,y}	W _{pl,z}	W _{el,y}	W _{el,z}			
		[mm]																A [cm ²]
SŁUPKI KRATOWNICY GŁÓWNEJ CZĘŚCI NOŚNEJ HANGARU																		
SHS 100x4,5	13,3	100	4,5	6,8	4,5	82	17,00	256	-	38,8	-	60,50	-	51,20	-	401	75,10	
KRZYŻULCE KRATOWNICY GŁÓWNEJ CZĘŚCI NOŚNEJ HANGARU																		
SHS 100x6,3	18,2	100	6,3	9,4	6,3	74,8	23,20	336	-	38	-	80,90	-	67,10	-	534	97,80	

Źródło: [S3, S4]

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

Śłupy nośne oraz krzyżulce dolnej części układu konstrukcyjnego ramy hangaru

Na rysunku 5.5 i tabeli 5.4 przedstawiono podstawowe dane dotyczące właściwości przekroju kształtownika w postaci rury okrągłej walcowanej na gorąco, zastosowanej w dolnej części układu konstrukcyjnego ramy głównej hangaru tak zwanego „kozła”, stanowią one słupy odtwarzanego hangaru oraz krzyżulce tworzące dolną kratownicę całej ramy.



Rys. 5.5. Przekrój kształtownika CHS

Tabela. 5.4. Dane dotyczące właściwości profilu CHS

Przekrój	Masa [kg/m]	Wymiary		Pole przekroju	Moment bezwładności przekroju		Promień bezwładności przekroju		Wskaźnik plastyczności przekroju		Wskaźnik sprężystości przekroju		Moment bezwładności przy skręcaniu	Wskaźnik wytrzymałości na skręcanie
		d	t	A [cm ²]	I _y	I _z	i _y	i _z	W _{pl,y}	W _{pl,z}	W _{el,y}	W _{el,z}	I _t	W _t
		[mm]			[cm ⁴]		[cm]		[cm ³]		[cm ³]		[cm ⁴]	[cm ³]
ŚŁUPY GŁÓWNE ORAZ ŚŁUPKI I KRZYŻULCE DOLNEJ CZĘŚCI NOŚNEJ HANGARU - "KOZŁA"														
CHS 273x12,5	80,1	273	12,5	102,0	8697	-	92,2	-	849	-	637	-	17400	1274
CHS 139,7x6,3	20,7	139,7	6,3	26,40	589	-	47,2	-	112	-	84,30	-	1177	169

Źródło: [S5, S6]

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

Belki łączące kolejne układy kratownicowe hangaru

W tabeli 5.5 przedstawiono podstawowe właściwości kształtownika w postaci dwuteownika o szerszych stopkach HEA, użytego jako belki łączące poszczególne dolne układy ramowe ze sobą. Są one połączone w sposób przegubowy.

Tabela. 5.5. Dane dotyczące właściwości profilu HEA

Przekrój	Masa [kg/m]	Wymiary							Pole przekroju	Moment bezwładności przekroju		Promień bezwładności przekroju		Wskaźnik plastyczności przekroju		Wskaźnik sprężystości przekroju		Moment bezwładności przy skręcaniu	Wskaźnik wytrzymałości na skręcanie
		h	b	t _w	t _f	h _i	r _i	d		I _y	I _z	i _y	i _z	W _{pl,y}	W _{pl,z}	W _{el,y}	W _{el,z}		
		[mm]								A [cm ²]	[cm ⁴]		[cm]		[cm ³]		[cm ³]		
BELKI ŁĄCZĄCE UKŁADY DOLNEJ CZĘŚCI KONSTRUKCJI																			
HEA 140	24,6	133	140	5,5	8,5	116	12	92	31,40	1033	389	57,3	35,2	173,00	84,70	155,00	55,60	8,16	9,60

Źródło: [S7]

Tabela. 5.6. Dane dotyczące właściwości profilu CHS

Przekrój	Masa [kg/m]	Wymiary					Pole przekroju	Moment bezwładności przekroju		Promień bezwładności przekroju		Wskaźnik plastyczności przekroju		Wskaźnik sprężystości przekroju		Moment bezwładności przy skręcaniu	Wskaźnik wytrzymałości na skręcanie	
		h/d	t	r ₀	r _i	d		A [cm ²]	I _y	I _z	i _y	i _z	W _{pl,y}	W _{pl,z}	W _{el,y}			W _{el,z}
		[mm]							[cm ⁴]		[cm]		[cm ³]		[cm ³]			
POŁĄCZENIE KONSTRUKCYJNE DOLNEJ CZĘŚCI RAMY („KOZŁA”)																		
CHS 139,7x4,0	13,4	139,7	4,0	-	-	-	17,10	393	-	48	-	73,70	-	56,20	-	786	112	

Źródło: [S8]

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

Belki łączące górne układy kratownicowe hangaru i słupy ściany tylnej hangaru

W tabeli 5.7 przedstawiono podstawowe właściwości kształtownika w postaci dwuteownika o szerokich stopkach – kształtownika HEA, pełni on swego rodzaju funkcję płatwi stosowanych w dzisiejszych konstrukcjach. Ma za zadanie połączyć i usztywnić kolejne układy kratownicowe. Dodatkowo w tabeli umieszczono dane kształtownika użytego w ścianie tylnej hangaru oraz belki głównej w dolnej konstrukcji kratowej tzw. „koźle” .

Tabela. 5.7. Dane dotyczące właściwości profilu HEA

Przekrój	Masa [kg/m]	Wymiary							Pole przekroju	Moment bezwładności przekroju		Promień bezwładności przekroju		Wskaźnik plastyczności przekroju		Wskaźnik sprężystości przekroju		Moment bezwładności przy skręcaniu	Wskaźnik wytrzymałości na skręcanie
		h	b	t _w	t _f	h _i	r _i	d		I _y	I _z	i _y	i _z	W _{pl,y}	W _{pl,z}	W _{el,y}	W _{el,z}		
		[mm]							A [cm ²]	[cm ⁴]		[cm]		[cm ³]		[cm ³]		[cm ⁴]	[cm ³]
BELKI STĘŻAJĄCE GÓRNĄ CZĘŚĆ KRATOWNICY I SŁUPY TYLNEJ ŚCIANY HANGARU																			
HEA 140	24,7	133	140	5,5	8,5	116	12	92	31,42	1033	389,3	57,4	35,2	173,53	84,85	155,4	55,62	8,03	9,45
HEA 180	35,5	171	180	6	9,5	152	15	122	45,25	2510	924,6	74,5	45,2	324,93	156,49	293,6	102,7	14,66	15,43
HEA 280	76,4	270	280	8	13,0	244	24	196	97,30	13670	4760	119,0	70,0	1110,0	518,0	1010,0	340,0	62,40	48,00

Źródło: [S7,S8,S9]

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

W poniższej tabeli zostały przedstawione dane dotyczące zastosowanych przekrojów w modelu obliczeniowym konstrukcji.

Tabela. 5.8. Dane dotyczące zastosowanych profili w programie RFEM 6

Przekrój nr	Nazwa przekroju	Przypisano do prętów nr	Materiał	Pola przekroju [cm ²]			Momenty bezwładności [cm ⁴]			Osie główne α [deg]	Wymiary całkowite [mm]		Komentarz
				Osiowa A	Ścinanie Ay	Ścinanie Az	Skręcanie J	Zginanie Iy	Zginanie Iz		Szerokość b	Wysokość h	
1	IPE 220	2490,2821,2822,2830,2831,3895	1 - S275J0 Izotropowy Liniowy sprężysty	33,40	17,00	11,94	9,07	2772,00	205,00	0,00	110,0	220,0	Pas dolny_brama hangaru_IPE220
2	HEA 200	833,2834,3805,3806,3817,3818,3840,3841	1 - S275J0 Izotropowy Liniowy sprężysty	53,80	33,71	10,66	21,10	3690,00	1340,00	0,00	200,0	190,0	Śłupy nośne_brama hangaru_HEA200
3	SHS 70x5	1,2868-2870,2872,2873,2875,2876,2878,	1 - S275J0 Izotropowy Liniowy sprężysty	12,70	5,54	5,54	142,00	88,50	88,50	0,00	70,0	70,0	Śłupki i krzyżulce_brama hangaru_SHS70x5
4	SHS 120x5	838-2840,2845,2846,2848-2862,2867,28	1 - S275J0 Izotropowy Liniowy sprężysty	22,70	9,73	9,73	777,00	498,00	498,00	0,00	120,0	120,0	Dół stężenia_brama hangaru_SHS120x5
5	IPE 200	2842-2844,2847,2863-2866	1 - S275J0 Izotropowy Liniowy sprężysty	28,50	14,20	10,28	6,98	1943,00	142,00	0,00	100,0	200,0	Wzmocnienie_brama hangaru_IPE200
6	ROUND 200/H	295-4322,4325-4348,4351-4353,4356-43	2 - S275J0 Izotropowy Liniowy sprężysty	314,16	263,89	263,89	15707,96	7853,98	7853,98	0,00	200,0	200,0	Stężenia_wiatrowe_PO25
7	CHS 273.0x12.5	9,1422,1475,1478,1532,1535,1588,1591	2 - S275J0 Izotropowy Liniowy sprężysty	102,00	51,36	51,36	17400,00	8697,00	8697,00	0,00	273,0	273,0	Śłupy nośne_kozioł_CHS273x12,5
8	HEB 220	1255,1257,1307,1310,1312,1314,1363,13	2 - S275J0 Izotropowy Liniowy sprężysty	91,00	58,80	17,84	76,80	8090,00	2840,00	0,00	220,0	220,0	Pas górny_kratownica_HEB220
9	SHS 100x100x4.5	5,1271-1281,1328-1338,1384-1394,1441	2 - S275J0 Izotropowy Liniowy sprężysty	17,00	7,27	7,27	401,00	256,00	256,00	0,00	100,0	100,0	Śłupki_kratownica_SHS100x4,5
10	SHS 100x100x6.3	84-1304,1340-1360,1397-1417,1453-14	2 - S275J0 Izotropowy Liniowy sprężysty	23,20	10,06	10,06	534,00	336,00	336,00	0,00	100,0	100,0	Krzyżulce_kratownica_SHS100x6,3
11	HEA 140	553,3555-3575,3577,3579-3599,3601,36	2 - S275J0 Izotropowy Liniowy sprężysty	31,40	19,89	6,20	8,16	1030,00	389,00	0,00	140,0	133,0	Stężenia_górne_kratownica_HEA140
12	CHS 139.7x4.0	5,2676,2683,2684,2691,2692,2699,2700	2 - S275J0 Izotropowy Liniowy sprężysty	17,10	8,53	8,53	786,00	393,00	393,00	0,00	139,7	139,7	Połączenia_dolne_kozioł_139,4
13	HEA 200	3175-3178,3180-3183,4725,4726	2 - S275J0 Izotropowy Liniowy sprężysty	53,80	33,71	10,66	21,10	3690,00	1340,00	0,00	200,0	190,0	Oparcie_ściana tylna_HEA200
14	HEA 320	3150-3156	2 - S275J0 Izotropowy Liniowy sprężysty	124,00	77,94	24,56	108,00	22930,00	6990,00	0,00	300,0	310,0	Oparcie_ściana tylna_kozioł_HEA320
15	HEA 280	4042-4062,4107-4127	2 - S275J0 Izotropowy Liniowy sprężysty	97,30	60,86	18,85	62,40	13670,00	4760,00	0,00	280,0	270,0	Oparcie_luk_kozioł_HEA280
16	HEA 200	1256,1258,1308,1311,1313,1315,1364,1	2 - S275J0 Izotropowy Liniowy sprężysty	53,80	33,71	10,66	21,10	3690,00	1340,00	0,00	200,0	190,0	Pas dolny_kratownica_HEA180
17	CHS 139.7x6.3	8-1438,1489-1494,1546-1551,1602-1607	2 - S275J0 Izotropowy Liniowy sprężysty	26,40	13,27	13,27	1177,00	589,00	589,00	0,00	139,7	139,7	Krzyżulce_kozioł_CHS139x6.3
18	CHS 139.7x6.3	090,3979,3981,3983,3984,3986,3987,39	2 - S275J0 Izotropowy Liniowy sprężysty	26,40	13,27	13,27	1177,00	589,00	589,00	0,00	139,7	139,7	Śłupki_kozły_CHS139.7x6.3
19	HEA 140	681,2685-2689,2693-2697,2701-2705,27	2 - S275J0 Izotropowy Liniowy sprężysty	31,40	19,89	6,20	8,16	1030,00	389,00	0,00	140,0	133,0	Połączenie_ramy_kozioł_HEA140
20	HEA 160	3184-3207	2 - S275J0 Izotropowy Liniowy sprężysty	38,80	24,13	7,77	12,30	1670,00	616,00	0,00	160,0	152,0	Tylna_ściana_belki_HEA160

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

5.4. Właściwości stali konstrukcyjnej

W tabeli 5.9 przedstawiono właściwości stali, z której zostaną wykonane poszczególne elementy konstrukcji hangaru.

Tabela. 5.9. Parametry stali zastosowanej na elementy konstrukcyjne hangaru

STAL S275J0			
Granica plastyczności	Wytrzymałość na rozciąganie	Moduł sprężystości	Moduł sprężystości przy ścinaniu
f_y	f_u	E	G
275 N/mm ²	430 N/mm ²	210 000 N/mm ²	81 000 N/mm ²

5.5. Przebieg analizy konstrukcji

Obliczenia przeprowadzono przy użyciu programu do analizy statyczno-wytrzymałościowej konstrukcji RFEM 6 wraz z dodatkowym modułem do analizy oddziaływania wiatru RWIND 3. Początkowo zakładano, że odtwarzana konstrukcja była wykonana w całości ze stali, jednak na podstawie uzyskanych źródeł archiwalnych [L1, L2] potwierdził się fakt, że oryginalna konstrukcja była jednak drewniana. Oprócz stalowego modelu 3D konstrukcji hangaru wykonano również model 3D z drewna. Odzwierciedla on wszystkie użyte materiały oraz odpowiednie przekroje zgodnie z oryginałem jak w rzeczywistości wyglądała odtwarzana konstrukcja hangaru. Zostało to wykonane na podstawie dostępnych źródeł archiwalnych. Jeżeli wystąpiły sytuacje, w których na podstawie dostępnych źródeł nie dało się odwzorować konstrukcji zostały zaproponowane rozwiązania zgodne z dzisiejszą technologią oraz możliwościami budownictwa. Porównano otrzymane masy obu konstrukcji. Hangar drewniany ma masę 440 ton. Jest to masa budujących do elementów konstrukcyjnych bez uwzględnienia dodatkowych połączeń stalowych. Natomiast konstrukcja stalowa ma masę 1209,47 ton. Różnica masy obu konstrukcji jest ponad dwu i pół krotna. Konstrukcje drewniane charakteryzują się lekkością oraz niską masą jednak konstrukcje stalowe mimo dużej masy własnej mają najlepszy stosunek przenoszonego przez nie obciążenia do ich masy. Na podstawie porównania pracy konstrukcji zauważono, że stal w obiekcie o takich gabarytach zdecydowanie lepiej przenosi obciążenia. Jesteśmy w stanie zastosować przekroje o mniejszych wymiarach w porównaniu do ich drewnianych odpowiedników. Obciążenia zostały zebrane powierzchniowo na cały budynek. Uwzględnione zostały rozkłady obciążeń oraz ich przenoszenie na poszczególne elementy konstrukcyjne.

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

Zdefiniowano odpowiednie typy prętów stalowych jak i drewnianych w celu przeprowadzenia procedur do wymiarowania elementów konstrukcyjnych. W programie RFEM 6 jesteśmy w stanie za pomocą odpowiednich warunków brzegowych analizowanych konstrukcji oraz długości efektywnych prętów ustawić odpowiednie parametry do obliczeń z uwzględnieniem stateczności konstrukcji. Po wymiarowaniu przeprowadzonemu metodami analitycznymi sprawdzono otrzymane wyniki z wartościami uzyskanymi w programie RFEM 6. Połączenie słupa nośnego dolnej części konstrukcji tzw. „kozła” z fundamentem zaprojektowano w programie obliczeniowym ze względu na jego złożoną geometrię aby odwzorować dokładnie kształt połączenia oryginalnego. Wyniki przeprowadzonego wymiarowania połączenia załączono do pracy jako notka obliczeniowa ukazująca analizowane stany graniczne nośności i użyteczności.

5.6. Wyniki przeprowadzonej analizy

Ze względu na wystąpienie jedynie lokalnych utrat stateczności elementów konstrukcji przeprowadzono wymiarowanie bez uwzględniania efektów 2 rzędu czyli globalnej utraty stateczności konstrukcji. Otrzymane wyniki analizy przedstawiono na rysunku 5.6.

Sprawdzono stan graniczny nośności SGN oraz użyteczności SGU.

SGN

Do programu zostały wprowadzone obliczone przypadki obciążeń działających na odtwarzaną konstrukcję. Na ich podstawie stworzono kombinacje obciążeń uwzględniające kategorię oraz typ ich oddziaływania. Następnie po uzyskaniu najbardziej niekorzystnych przypadków przystąpiono do obliczenia występujących w poszczególnych elementach konstrukcji sił wewnętrznych. Po otrzymaniu wyników analizy statycznej konstrukcji zwymiarowano główne elementy nośne konstrukcji hangaru.

SGU

Na podstawie otrzymanych kombinacji charakterystycznych SGU dokonano weryfikacji maksymalnych przemieszczeń pionowych i poziomych poszczególnych elementów i węzłów konstrukcji. Maksymalne przemieszczenie pionowe wystąpiło w pręcie 4684 (krzyżulce środkowy górnej kratownicy) i wyniosło 15,5 mm. Maksymalne przemieszczenie poziome wystąpiło w pręcie 4537 (oparcie tylnej ściany) i wyniosło 7.7 mm. Poniżej zostaną

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

zaprezentowane procedury wyznaczenia maksymalnych ugięć elementów konstrukcyjnych na podstawie stworzonych kombinacji charakterystycznych.

$$w \leq w_{lim} = \frac{L}{L_{lim}} \quad (5.1)$$

gdzie: L jest to długość analizowanego elementu w m, L_{lim} jest to graniczna wartość długości elementu na podstawie jego schematu statycznego.

$$w_{lim} = \frac{4337}{250} = 17,3 \text{ mm}$$

$$w = 15,5 \text{ mm}$$

$$15,5 \text{ mm} \leq 17,3 \text{ mm}$$

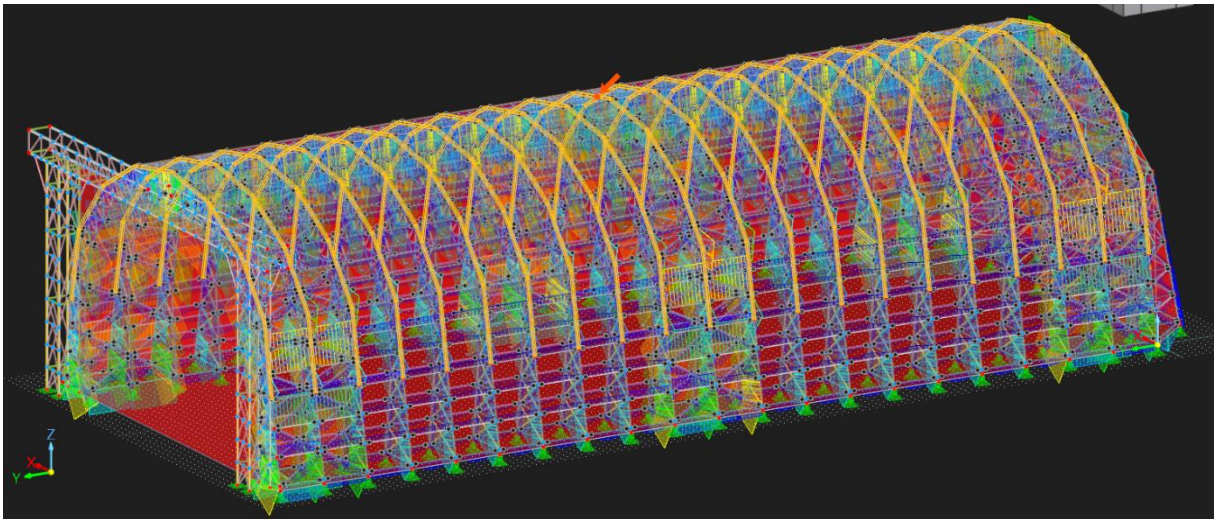
Warunek na kryterium granicznego ugięcia dla analizowanego elementu został spełniony.

6. Wymiarowanie elementów konstrukcji nośnej hangaru

6.1. Wymiarowanie pasa górnego kratownicy

Sily wewnętrzne występujące w elemencie

Pas górny zaprojektowano z dwuteownika o szerokich stopkach ze względu na duże obciążenie zbierane z powierzchni dachu i przekazywane na dalsze układy konstrukcyjne odtwarzanego hangaru, a w szczególności kolejne elementy budujące kratownicową część hangaru. Zastosowano kształtownik HEB 220. Poprzednie obliczenia przeprowadzane były dla kształtownika HEA 280, lecz ze względu na dużą masę oraz duży moment zginający względem osi y lepszym rozwiązaniem okazało się zastosowanie kształtownika HEB 220 o grubszych półkach. Nie waży on tak dużo jak kształtownik HEA 280 a jego wykorzystanie jest lepsze niż o cieńszych ściankach. Właściwości danego kształtownika zostały przedstawione w tabeli powyżej w punkcie 5.3.1 tabela 5.2. Dane dotyczące zastosowanej stali konstrukcyjnej znajdują się w punkcie 5.4, tabeli 5.9.



Rys. 6.1.1. Wymiarowane elementy konstrukcyjne hangaru – źródło własne

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

Siły wewnętrzne w wymiarowanym pasie górnym:

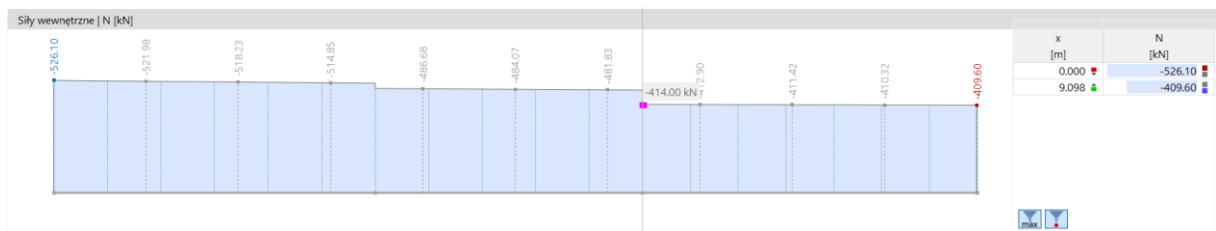
Najbardziej niekorzystną kombinacją jest: **KO27**

$$N_{Ed} = -414,00 \text{ kN}$$

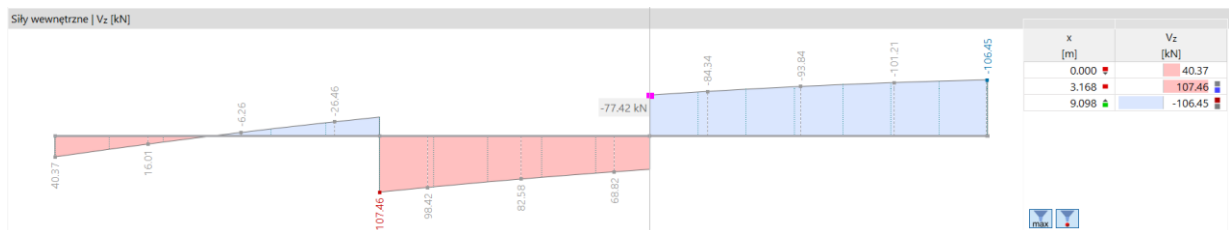
$$V_{z,Ed} = -77,42 \text{ kN}$$

$$M_{y,Ed} = 185,25 \text{ kNm}$$

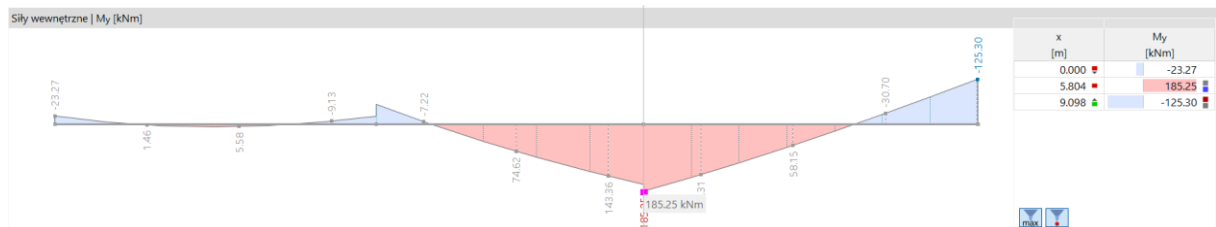
$$M_{z,Ed} = -0,55 \text{ kNm}$$



Rys. 6.1.2. Wykres sił wewnętrznych – siły normalne

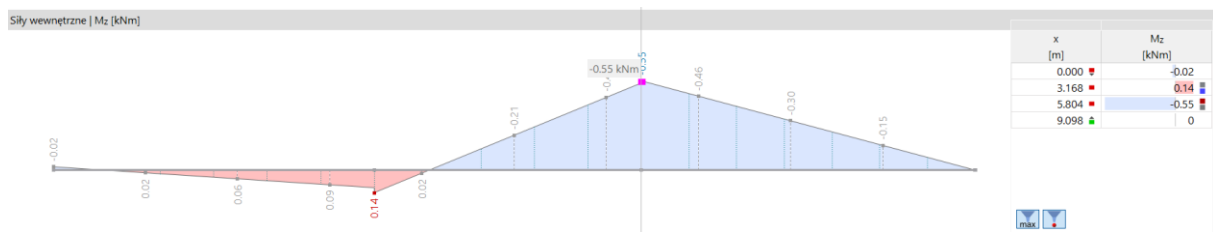


Rys. 6.1.3. Wykres sił wewnętrznych – siły tnące



Rys. 6.1.4. Wykres sił wewnętrznych – momenty zginające M_y

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ



Rys. 6.1.5. Wykres sił wewnętrznych – momenty zginające M_z

Klasyfikacja przekroju

Według normy [N5]

$$t_{max} = t_{f,c} = 16 \text{ mm} < 40 \text{ mm} \rightarrow f_y = 275 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (6.1)$$

gdzie: f_y jest granicą plastyczności stali konstrukcyjnej w MPa.

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{275}} = 0,92$$

Środek ściskany

$$\frac{c}{t} = \frac{d_g}{t_{w,g}} < 33\varepsilon \rightarrow \text{klasa 1 przekroju} \quad (6.2)$$

gdzie: d_g jest wysokością prostej części środka w mm, a $t_{w,g}$ jest grubością środka w mm.

$$\frac{c}{t} = \frac{152}{9,5} = 16$$

Wartości graniczne według normy [N5], tablicy 5.2.

$$\frac{c}{t} = 16 < 33\varepsilon = 33 \cdot 0,92 = 30,36 \rightarrow \text{przekrój klasy 1}$$

Pas ściskany

$$\frac{c}{t} = \frac{b_g - t_{w,g} - 2r_g}{2t_{fg}} \quad (6.3)$$

gdzie: b_g jest szerokością półki przekroju w mm, $t_{w,g}$ jest grubością środka w mm, r_g jest promieniem zaokrąglenia naroża w mm, a t_{fg} jest grubością pasa w mm.

$$\frac{c}{t} = \frac{220 - 9,5 - 2 \cdot 18}{2 \cdot 16} = 5,45$$

Wartości graniczne według normy [N5], tablicy 5.2.

$$\frac{c}{t} < 9\varepsilon \quad (6.4)$$

$$\frac{c}{t} = 5,45 < 9 \cdot 0,92 = 8,28 \rightarrow \text{przekrój klasy 1}$$

Zastosowany kształtownik HEB 220 jest przekrojem klasy 1 ze względu na spełnione wszystkie powyższe warunki.

Nośność przekroju

Ściskanie

Obliczeniowa nośność przekroju równomiernie ściskanego klasy 1

$$N_{c,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (6.5)$$

gdzie: A jest polem powierzchni przekroju kształtownika w mm^2 , f_y jest granicą plastyczności stali w MPa, a γ_{M0} jest współczynnikiem bezpieczeństwa dla stali -1,00

$$N_{c,Rd} = \frac{91,00 \cdot 10^2 \cdot 275 \cdot 10^{-3}}{1,00} = 2502,50 \text{ kN}$$

$$N_{Ed} = 414,00 \text{ kN} < N_{pl,Rd} = 2502,50 \text{ kN}$$

Wyężenie przekroju ściskanego osiowo

$$\eta N_{c,Rd} = \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} = \frac{414,00}{2502,50} = 0,17 \leq 1,00$$

Warunek nośności przekroju na ściskanie został spełniony.

Gdy siła osiowa występująca w analizowanym przekroju jest mniejsza równa 0,25 nośności tego przekroju na ściskanie możemy nie uwzględniać wpływu siły podłużnej na nośność plastyczną przekroju na zginanie, zgodnie ze wzorem 6.33 oraz 6.34 normy [N5].

$$N_{Ed} \leq 0,25 N_{pl,Rd} \quad (6.6)$$

gdzie: N_{Ed} jest to siła osiowa występująca w elemencie ściskanym w MPa, a $N_{pl,Rd}$ jest to plastyczna nośność danego przekroju na ściskanie w MPa.

$$N_{Ed} \leq 0,5 \cdot h_w \cdot t_w \cdot \frac{f_{y,w}}{\gamma_{M0}} \text{ (względem osi y)} \quad (6.7)$$

$$N_{Ed} \leq h_w \cdot t_w \cdot \frac{f_{y,w}}{\gamma_{M0}} \text{ (względem osi z)} \quad (6.8)$$

gdzie: h_w jest to wysokość środnika między pasami w mm, t_w jest to grubość środnika w mm, $f_{y,w}$ jest to granica plastyczności środnika w MPa, a γ_{M0} jest to współczynnik częściowy stali równy 1,00.

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

$$0,25N_{pl,Rd} = 0,25 \cdot 2502,50 \text{ kN} = 625,63 \text{ kN}$$

$$414,00 \text{ kN} \leq 625,63 \text{ kN}$$

$$0,5 \cdot h_w \cdot t_w \cdot \frac{f_{y,w}}{\gamma_{M0}} = 0,5 \cdot 188 \cdot 9,5 \cdot \frac{275}{1,00} = 245,58 \text{ kN}$$

$$414,00 \text{ kN} > 151,94 \text{ kN}$$

$$0,5 \cdot 188 \cdot 9,5 \cdot \frac{275}{1,00} = 491,15 \text{ kN}$$

$$414,00 \text{ kN} \leq 491,15 \text{ kN}$$

Ze względu na przekroczone warunki pozwalające na nieuwzględnianie interakcji ściskania i zginania należy uwzględnić wpływ siły podłużnej na plastyczną nośność przekroju przy zginaniu względem osi y. Nie uwzględniamy wpływu siły osiowej na nośność plastyczną przekroju przy zginaniu względem osi z.

Zginanie dwukierunkowe z uwzględnieniem siły podłużnej

Obliczeniowa nośność przekroju przy zginaniu w przypadku przekrojów klasy 1

$$M_{pl,y,Rd} = W_{pl,y} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \quad (6.9)$$

gdzie: $W_{pl,y}$ jest to plastyczny wskaźnik wytrzymałości przekroju względem osi y w cm^3 , f_y jest to granica plastyczności środnika w MPa, a γ_{M0} jest to współczynnik częściowy stali równy 1,00.

$$M_{pl,y,Rd} = 828 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{275}{1,00} = 227,70 \text{ kNm}$$

$$M_{pl,z,Rd} = W_{pl,z} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \quad (6.10)$$

gdzie: $W_{pl,z}$ jest to plastyczny wskaźnik wytrzymałości przekroju względem osi z w cm^3 , f_y jest to granica plastyczności środnika w MPa, a γ_{M0} jest to współczynnik częściowy stali równy 1,00.

$$M_{pl,z,Rd} = 394 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{275}{1,00} = 108,35 \text{ kNm}$$

Stosunek pola przekroju środnika do pola przekroju brutto zastosowanego kształtownika

$$a = \frac{A-2 \cdot b \cdot t_f}{A} \quad (6.11)$$

gdzie: A jest to pole przekroju poprzecznego kształtownika w mm^2 , b jest to szerokość przekroju kształtownika w mm, a t_f jest to grubość pasa kształtownika w mm.

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

$$a = \frac{91,00 \cdot 10^2 - 2 \cdot 200 \cdot 16}{91,00 \cdot 10^2} = 0,226$$

Stosunek obliczeniowej siły osiowej do obliczeniowej nośności plastycznej przekroju przy ściskaniu

$$n = \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} \quad (6.12)$$

gdzie: N_{Ed} jest to obliczeniowa siła ściskająca w kN, a $N_{pl,Rd}$ jest to obliczeniowa plastyczna nośność na ściskanie przekroju w kN.

$$n = \frac{414,00}{2502,50} = 0,165$$

Obliczeniowa nośność na zginanie z uwzględnieniem wpływu siły osiowej

$$M_{N,y,Rd} = M_{pl,y,Rd} \cdot \frac{1-n}{1-0,5 \cdot a} \quad (6.13)$$

gdzie: $M_{pl,y,Rd}$ jest to obliczeniowa nośność na zginanie w kNm, n jest to stosunek obliczeniowej siły osiowej do obliczeniowej nośności plastycznej na ściskanie, natomiast a jest to stosunek pola przekroju środnika do pola przekroju brutto.

$$M_{N,y,Rd} = 227,70 \cdot \frac{1-0,165}{1-0,5 \cdot 0,226} = 214,29 \text{ kNm}$$

Obliczeniowa nośność przekroju poddanego dwukierunkowemu zginaniu z uwzględnieniem działającej siły osiowej

$$\left(\frac{M_{y,Ed}}{M_{N,y,Rd}} \right)^\alpha + \left(\frac{M_{z,Ed}}{M_{pl,z,Rd}} \right)^\beta \leq 1 \quad (6.14)$$

gdzie: $M_{y,Ed}$, $M_{z,Ed}$ są to obliczeniowe momenty zginające względem osi y, oraz z w kNm, $M_{N,y,Ed}$ jest to obliczeniowa nośność przekroju na zginanie uwzględniająca działanie siły osiowej w kNm, $M_{pl,z,Ed}$ jest to obliczeniowa nośność przekroju na zginanie względem osi z w kNm, α, β są to parametry interakcji przy zginaniu dwukierunkowym. Zgodnie z punktem 6.2.9.1(6) normy [N5], dla dwuteowników bisymetrycznych parametry mają następujące wartości: $\alpha = 2$, $\beta = 5n$, lecz $\beta \geq 1,00$, $\beta = 5 \cdot 0,165 = 0,83 < 1,00$ a zatem parametr $\beta = 1,00$.

$$\left(\frac{185,25}{214,19} \right)^{2,00} + \left(\frac{0,55}{108,35} \right)^{1,00} = 0,75 \leq 1$$

Warunki nośności przekroju poddanego zginaniu dwukierunkowym z uwzględnieniem interakcji działającej siły osiowej na zginanie zostały spełnione.

Ścinanie

Pole przekroju czynnego przy ścinaniu

$$V_{pl,z,Rd} = \frac{A_{v,z} \cdot \left(\frac{f_{y,w}}{\sqrt{3}} \right)}{\gamma_{M0}} \quad (6.15)$$

gdzie: $A_{v,z}$ jest to pole przekroju czynnego przy ścinaniu w mm^2 , $f_{y,w}$ jest to granica plastyczności przy ścinaniu w MPa, a γ_{M0} jest to współczynnik częściowy.

$$V_{pl,z,Rd} = \frac{27,92 \cdot 10^2 \cdot \left(\frac{275 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} \right)}{1,00} = 443,29 \text{ kN}$$
$$\eta V_z = \frac{77,42}{443,29} = 0,18 \leq 0,5 V_{pl,z,Rd}$$

Zgadnie z punktem 6.2.8 lub 6.2.10 normy [N5] wpływ siły ścinającej w kierunku osi z jest pomijany, ponieważ wartość obliczeniowej siły tnącej występującej w analizowanym elemencie nie przekracza połowy nośności zastosowanego kształtownika na ścinanie.

Nośność elementu z uwzględnieniem stateczności

Element zginany i ściskany o stałym przekroju

Wyboczenie giętne względem osi głównej y-y (w płaszczyźnie kratownicy)

Długość wyboczeniowa pasa górnego względem osi głównej y-y jest to odległość między poszczególnymi słupkami kratownicy. Długość wyboczeniowa względem osi głównej y jest to:

$$L_{cr,y} = 3,294 \text{ m}$$

Krytyczna siła sprężysta

$$N_{cr,y} = (\pi^2) \cdot E \cdot \frac{I_y}{(L_{cr,y})^2} \quad (6.16)$$

gdzie: E jest to moduł sprężystości stali w GPa, I_y jest to moment bezwładności przekroju kształtownika względem osi y-y w mm^3 , $L_{cr,y}$ jest to długość wyboczeniowa względem płaszczyzny kratownicy w mm.

$$N_{cr,y} = (\pi^2) \cdot 210000 \cdot \frac{8090 \cdot 10^4}{(3294)^2} = 15450,00 \text{ kN}$$

Smukłość względna względem osi y dla przekrojów klasy 1, 2 oraz 3.

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr,y}}} \quad (6.17)$$

gdzie: A jest to pole przekroju kształtownika w mm^2 , f_y jest to granica plastyczności stali w MPa, a $N_{cr,y}$ jest to sprężysta siła krytyczna względem osi y-y

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

$$\overline{\lambda}_y = \sqrt{\frac{91,00 \cdot 10^2 \cdot 275}{15450,00}} = 0,405$$

Ograniczenia przyporządkowujące odpowiednie krzywe wyboczenia do danego elementu i typu jego przekroju

$$\frac{h_g}{b_g} = \frac{220 \text{ mm}}{220 \text{ mm}} = 1,00 \leq 1,2 \quad i \quad t_{fg} = 16 \text{ mm} \leq 100 \text{ mm}$$

Na podstawie ograniczeń przyjęto krzywą wyboczeniową b według tablicy 6.2 [N5].

Parametr imperfekcji według tablicy 6.1 normy [N5], $\alpha = 0,34$.

Parametr krzywej niestateczności χ

$$\phi_y = 0,5 \cdot [1 + \alpha_y \cdot (\overline{\lambda}_y - 0,2) + (\overline{\lambda}_y)^2] \quad (6.18)$$

gdzie: α_y jest to współczynnik imperfekcji wyznaczany na podstawie krzywej wyboczeniowej, $\overline{\lambda}_y$ jest to smukłość bezwymiarowa.

$$\phi_y = 0,5 \cdot [1 + 0,34 \cdot (0,402 - 0,2) + (0,402)^2] = 0,615$$

Wyboczeniowy współczynnik redukcyjny χ

$$\chi_y = \frac{1}{\phi_y + \sqrt{(\phi_y)^2 - (\overline{\lambda}_y)^2}} \quad (6.19)$$

gdzie: ϕ_y jest to parametr krzywej niestateczności χ , $\overline{\lambda}_y$ jest to smukłość bezwymiarowa kształtownika.

$$\chi_y = \frac{1}{0,615 + \sqrt{(0,615)^2 - (0,402)^2}} = 0,93$$

Wyboczenie giętne względem osi głównej z-z (z płaszczyzny kratownicy)

Sprężysta siła krytyczna

$$N_{cr,z} = (\pi^2) \cdot E \cdot \frac{I_z}{(L_{cr,z})^2} \quad (6.16)$$

gdzie: E jest to moduł sprężystości stali w GPa, I_z jest to moment bezwładności względem przekroju kształtownika względem osi z-z w cm^3 , $L_{cr,z}$ jest to długość wyboczeniowa z płaszczyzny kratownicy w m. Długość wyboczeniowa z płaszczyzny kratownicy jak i w płaszczyźnie kratownicy, czyli względem osi głównych z-z i y-y jest taka sama ze względu na występowanie dodatkowych stężeń łączących pasy górne poszczególnych kratownic między sobą. Stężenia łączą kratownice między sobą w miejscach występowania słupków w układzie kratownicowym.

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

$$N_{cr,z} = (\pi^2) \cdot 210\,000 \cdot \frac{2840}{(3,294)^2} = 5423,72 \text{ kN}$$

Smukłość bezwymiarowa względem osi z dla przekrojów klasy 1, 2 oraz 3.

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr,z}}} \quad (6.17)$$

gdzie: A jest to pole przekroju kształownika w mm^2 , f_y jest to granica plastyczności stali w MPa, a $N_{cr,z}$ jest to sprężysta siła krytyczna względem osi z-z.

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{91,00 \cdot 275\,000}{5423,72}} = 0,679$$

Parametr krzywej niestateczności χ

$$\phi_z = 0,5 \cdot \left[1 + \alpha_z \cdot (\bar{\lambda}_z - 0,2) + (\bar{\lambda}_z)^2 \right] \quad (6.18)$$

gdzie: α_z jest to współczynnik imperfekcji wyznaczany na podstawie krzywej wyboczeniowej, $\bar{\lambda}_z$ jest to smukłość bezwymiarowa.

Ograniczenia przyporządkowujące odpowiednie krzywe wyboczenia do danego elementu i typu jego przekroju

$$\frac{h_g}{b_g} = \frac{220}{220} = 1,00 \leq 1,2 \quad i \quad t_{fg} = 16 \leq 100$$

Na podstawie tabeli 6.2 normy [N5] oraz powyższych warunków krzywa wyboczeniowa względem osi z-z ma postać krzywej c.

Parametr imperfekcji krzywej wyboczeniowej c to $\alpha = 0,49$

$$\phi_z = 0,5 \cdot [1 + 0,49 \cdot (0,679 - 0,2) + (0,679)^2] = 0,848$$

Wyboczeniowy współczynnik redukcyjny χ

$$\chi_z = \frac{1}{\phi_z + \sqrt{(\phi_z)^2 - (\bar{\lambda}_z)^2}} \quad (6.19)$$

gdzie: ϕ_z jest to parametr krzywej niestetyczności χ , $\bar{\lambda}_z$ jest to smukłość bezwymiarowa kształownika.

$$\chi_z = \frac{1}{0,848 + \sqrt{(0,848)^2 - (0,679)^2}} = 0,74$$

Zwicherungie

Sprężysty moment krytyczny zwicherungia kształtownika ze względu na zginanie i lokalną utratę stateczności górnej półki kształtownika.

Norma [N5] nie podaje informacji na temat obliczania momentu krytycznego przy zwicherungiu belek i innych elementów wrażliwych na zwicherungie. Posłużono się materiałami dodatkowymi wspomagającymi projektowanie konstrukcji stalowych zgodnie z europejskimi normami – Eurokodami, Access Steel [L5]. W dokumencie Access Steel: SN003a-PL-EU – sprężysty moment krytyczny przy zwicherungiu [L5] podano formuły do wyznaczenia sprężystego momentu krytycznego podwójnie symetrycznych przekrojów. Wartości współczynników branych do obliczeń są podane dla podstawowych przypadków. Dla belki obciążonej obciążeniem równomiernie rozłożonym o stałej wartości i momentami na końcach, lub siłami skupionymi w środku rozpiętości i momentami na końcach, wartości współczynników podane są na wykresach.

Sprężysty moment krytyczny może być obliczony według następującej formuły wyprowadzonej z teorii wyboczenia:

$$M_{cr} = C_1 \cdot \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{(k \cdot L_{cr})^2} \cdot \left[\sqrt{\left(\frac{k}{k_w}\right)^2 \cdot \frac{I_w}{I_z} \cdot \frac{(k \cdot L_{cr})^2 \cdot G \cdot I_t}{\pi^2 \cdot E \cdot I_z} + (C_2 \cdot z_g)^2} - C_2 \cdot z_g \right] \quad (6.20)$$

gdzie: E jest to moduł sprężystości podłużnej stali w N/mm^2 , G jest to moduł sprężystości poprzecznej w N/mm^2 , I_z jest to moment bezwładności kształtownika względem osi z w cm^3 , I_t jest to moment bezwładności przy skręcaniu swobodnym w cm^3 , I_w jest to wycinkowy moment bezwładności w cm^3 , L jest to odległość między punktami bocznego podparcia w m – analizowana długość krytyczna przy zwicherungiu sprężystym, k oraz k_w są to współczynniki długości efektywnej, z_g jest to odległość od punktu przyłożenia obciążenia do środka ścinania przekroju w m , oraz C_1 i C_2 są to współczynniki zależne od obciążenia warunków podparcia na końcach.

Długość krytyczna przy zwicherungiu sprężystym w tym przypadku wynosi:

$$L_{cr,LT} = 3,294 \text{ m}$$

Współczynniki długości efektywnej:

Współczynnik k odnosi się do obrotu końca elementu w planie. Jest on analogiczny do współczynnika długości wyboczeniowej w stosunku do długości elementu ściskanego. Wg zaleceń [L4] współczynnik k powinien być brany jako nie mniejszy niż 1,0 (brak usztywnienia przeciwskrętnego) chyba, że wartości mniejsze mogą być uzasadnione.

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

Przyjęto zatem współczynnik: $k = 1,0$

Współczynnik k_w odnosi się do spaczenia końca elementu. W przypadku braku specjalnych usztywnień przeciwdziałających spaczeniu, k_w powinien być przyjmowany jako 1,0.

Przyjęto zatem współczynnik: $k_w = 1,0$

Miejsce przyłożenia obciążenia:

Założono, że obciążenie przekazywane jest w połączeniu belki z podciągami w osi podciagu (połączenia środkowego). Ponieważ przekrój jest bisymetryczny to środek ścinania leży w osi symetrii. Odległość od punktu przyłożenia obciążenia do środka ścinania wynosi zatem: $z_g = 0 \text{ mm}$.

Dobór współczynników zależnych od obciążenia i warunków podparcia analizowanego elementu:

Tablica 6.1 Wartości współczynnika C_1 dla elementu z momentami występującymi na końcach pręta

ψ	C_1
+1,00	1,00
+0,75	1,14
+0,50	1,31
+0,25	1,52
0,00	1,77
-0,25	2,05
-0,50	2,33
-0,75	2,57
-1,00	2,55

Wykres momentów między stężeniami czyli między słupkami górnej części kratownicowej konstrukcji zmienia się liniowo. Stosunek momentów występujących na obu końcach analizowanego odcinka krytycznego wynoszą kolejno:

$M_{1,y} = -125,58 \text{ kNm}$, oraz $M_{2,y} = 185,25 \text{ kNm}$

Stosunek momentów na końcach pręta:

$$\psi_{LT,y} = \frac{M_{1,y}}{M_{2,y}} \quad (6.21)$$

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

gdzie: $M_{l,y}$ jest to moment zginający występujący na początku analizowanej długości krytycznej pręta w kNm, natomiast $M_{2,y}$ jest to moment zginający występujący na końcu analizowanego pręta w kNm.

$$\psi_{LT,y} = \frac{-125,58}{185,25} = -0,676$$

Po przeprowadzeniu interpolacji liniowej odpowiednich wartości pochodzących z tabeli 7.1 uzyskano wartość parametru C_l

$$C_l = 2,50.$$

Biorąc pod uwagę powyższe założenia wzór na sprężysty moment krytyczny przybierze prostszą postać:

$$M_{cr} = 2,50 \cdot \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 2840 \cdot 10^4}{(1,00 \cdot 3924)^2} \cdot \left[\sqrt{\frac{295400 \cdot 10^6}{2840 \cdot 10^4} \cdot \frac{(3924)^2 \cdot 81000 \cdot 10^4}{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 2840 \cdot 10^4}} \right] = 2005,58 \text{ kNm}$$

Zgodnie z punktem 6.3.2.3.(4) normy [N5] kiedy:

$$\overline{\lambda}_{LT} \leq \overline{\lambda}_{LT,0} \quad (6.22)$$

$$\frac{M_{Ed}}{M_{cr}} \leq \overline{\lambda}_{LT,0}^2 \quad (6.23)$$

gdzie: $\overline{\lambda}_{LT}$ jest to smukłość graniczna przy zwichrzeniu, $\overline{\lambda}_{LT,0}$ jest to maksymalna smukłość graniczna przy zwichrzeniu podana w załączniku krajowym do normy [N5]. Wynosi ona: $\overline{\lambda}_{LT} = 0,4$, M_{Ed} jest to obliczeniowy moment zginający występujący w analizowanym przekroju w kNm, M_{cr} jest to sprężysty moment krytyczny przy zwichrzeniu w kNm.

$$\overline{\lambda}_{LT,0}^2 = 0,4^2 = 0,16$$

$$\frac{M_{Ed}}{M_{cr}} \leq 0,16$$

$$M_{Ed} \leq 0,16 \cdot M_{cr}$$

$$185,25 \text{ kNm} \leq 0,16 \cdot 2005,58 \text{ kNm} = 320,89 \text{ kNm}$$

Charakterystyczna nośność na ściskanie

$$N_{Rk} = A \cdot f_y \quad (6.24)$$

gdzie: A jest to pole przekroju poprzecznego kształtownika w cm^2 , f_y jest to granica plastyczności stali konstrukcyjnej w MPa.

$$N_{Rk} = 91,00 \cdot 10^2 \cdot 275\,000 = 2502,50 \text{ kN}$$

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

Charakterystyczna nośność przekroju na moment zginający w osi y

$$M_{y,Rk} = W_{pl,y} \cdot f_y \quad (6.25)$$

gdzie: $W_{pl,y}$ jest to plastyczny wskaźnik wytrzymałości przekroju względem osi y-y w cm^3 , f_y jest to granica plastyczności stali w MPa.

$$M_{y,Rk} = 828 \cdot 10^3 \cdot 275 = 227,70 \text{ kNm}$$

Charakterystyczna nośność przekroju na moment zginający w osi z

$$M_{z,Rk} = W_{pl,z} \cdot f_y \quad (6.26)$$

gdzie: $W_{pl,z}$ jest to plastyczny wskaźnik wytrzymałości przekroju względem osi z w cm^3 , f_y jest to granica plastyczności stali w MPa.

$$M_{z,Rk} = 394,00 \cdot 10^3 \cdot 275 = 108,35 \text{ kNm}$$

Współczynniki równoważnego stałego momentu

W celu wyznaczenia współczynników interakcji k_{ij} należy najpierw wyznaczyć parametry pomocnicze takie jak współczynniki równoważnego stałego momentu na podstawie tabeli Tablica. B.3 załącznika krajowego do normy [N5]. Rozkład momentów na analizowanym elemencie ma charakter liniowy zatem współczynniki będą wyglądały następująco:

$$C_{my} = 0,6 - 0,4 \cdot \psi_y \geq 0,4 \quad (6.27)$$

$$C_{mz} = 0,6 - 0,4 \cdot \psi_z \geq 0,4 \quad (6.28)$$

gdzie: ψ_y jest to parametr będący stosunkiem momentów zginających względem osi y występujących na końcach analizowanego pręta,

$$\psi_y = \frac{M_{1,y}}{M_{2,y}} \quad (6.29)$$

$$\psi_y = \frac{-125,58}{185,25} = -0,676$$

$$C_{my} = 0,6 + 0,4 \cdot (-0,676) = 0,330$$

Ze względu na niespełnienie warunku przyjęto $C_{my} = 0,40$

ψ_z jest to parametr będący stosunkiem momentów zginających względem osi z występujących na końcach analizowanego pręta.

$$\psi_z = \frac{M_{1,z}}{M_{2,z}} \quad (6.30)$$

$$\psi_z = \frac{-0,002}{0,55} = -0,002$$

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

$$C_{mz} = 0,6 + 0,4 \cdot (-0,002) = 0,60$$

Współczynniki interakcji $k_{yy}, k_{yz}, k_{zy}, k_{zz}$

Wartości poszczególnych współczynników interakcji dla elementów niewrażliwych na deformacje skrętne ze względu na występujący pomijalnie mały moment skręcający wyznaczono na podstawie tablicy B.1 załącznika krajowego B do normy [N5].

$$k_{yy} = C_{my} \cdot \left(1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \cdot \frac{N_{c,Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) \quad (6.31)$$

$$k_{yy} = \min \left((k_{yy}, C_{my} \cdot \left(1 + 0,8 \cdot \frac{N_{c,Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) \right) \quad (6.32)$$

$$k_{yz} = 0,6 \cdot C_{mz} \cdot \left(1 + (2 \cdot \bar{\lambda}_z - 0,6) \cdot \frac{N_{c,Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) \quad (6.33)$$

$$k_{yz} = \min \left((k_{yz}, 0,6 \cdot C_{mz} \cdot \left(1 + 1,4 \cdot \frac{N_{c,Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) \right) \quad (6.34)$$

$$k_{zy} = 0,6 \cdot C_{my} \cdot \left(1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \cdot \frac{N_{c,Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) \quad (6.35)$$

$$k_{zy} = \min \left((k_{zy}, 0,6 \cdot C_{my} \cdot \left(1 + 0,8 \cdot \frac{N_{c,Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) \right) \quad (6.36)$$

$$k_{zz} = C_{mz} \cdot \left(1 + (2 \cdot \bar{\lambda}_z - 0,6) \cdot \frac{N_{c,Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) \quad (6.37)$$

$$k_{zz} = \min \left((k_{zz}, C_{mz} \cdot \left(1 + 1,4 \cdot \frac{N_{c,Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) \right) \quad (6.38)$$

gdzie: C_{my}, C_{mz} , współczynniki równoważnego stałego momentu, $\bar{\lambda}_z, \bar{\lambda}_y$ są to smukłości graniczne względem odpowiednich osi lokalnych kształtownika, $N_{c,Ed}$ jest to ściskająca siła osiowa występująca w elemencie wymiarowanym w kN, χ_z, χ_y , jest to współczynnik redukujący dla wyboczenia, N_{Rk} jest to nośność przekroju na ściskanie, oraz γ_{M1} jest to współczynnik częściowy.

$$k_{yy} = 0,400 \cdot \left(1 + (0,402 - 0,2) \cdot \frac{414,00}{0,93 \cdot \frac{2502,50}{1,00}} \right) = 0,414$$

$$k_{yy} = \min \left(\left(0,414; 0,400 \cdot \left(1 + 0,8 \cdot \frac{414,00}{0,93 \cdot \frac{2502,50}{1,00}} \right) \right) \right) = 0,414$$

$$k_{yz} = 0,6 \cdot 0,60 \cdot \left(1 + (2 \cdot 0,679 - 0,6) \cdot \frac{414,00}{0,74 \cdot \frac{2502,50}{1,00}} \right) = 0,421$$

$$k_{yz} = \min \left((0,421; 0,6 \cdot 0,60 \cdot \left(1 + 1,4 \cdot \frac{414,00}{0,74 \cdot \frac{2502,50}{1,00}} \right) \right) = 0,421$$

$$k_{zy} = 0,6 \cdot 0,400 \cdot \left(1 + (0,405 - 0,2) \cdot \frac{414,00}{0,93 \cdot \frac{2502,50}{1,00}} \right) = 0,266$$

$$k_{zy} = \min \left((0,266; 0,6 \cdot 0,400 \cdot \left(1 + 0,8 \cdot \frac{414,00}{0,93 \cdot \frac{2502,50}{1,00}} \right) \right) = 0,266$$

$$k_{zz} = 0,60 \cdot \left(1 + (2 \cdot 0,679 - 0,6) \cdot \frac{414,00}{0,74 \cdot \frac{2502,50}{1,00}} \right) = 0,701$$

$$k_{zz} = \min \left((0,702; 0,60 \cdot \left(1 + 1,4 \cdot \frac{414,00}{0,74 \cdot \frac{2502,50}{1,00}} \right) \right) = 0,701$$

Warunki nośności elementów ściskanych i zginanych

$$\frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_y \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\frac{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1 \quad (6.39)$$

$$\frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_z \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\frac{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1 \quad (6.40)$$

gdzie: N_{Ed} , $M_{y,Ed}$, są to wartości obliczeniowe siły ściskającej i maksymalnych momentów zginających względem odpowiednich osi lokalnych y-y i z-z w kolejno kN i kNm, χ_z , χ_y są to współczynniki wyboczenia giętnego, χ_{LT} jest to współczynnik zwichrzenia wynoszący w tym przypadku 1,00 ze względu na brak uwzględniania zwichrzenia w nośności przekorju oraz k_{yy} , k_{zy} , k_{yz} , k_{zz} są to współczynniki interakcji. Wszystkie wyżej wymienione parametry oraz współczynniki zostały policzone w kolejnych krokach obliczeniowych zaprezentowanych powyżej.

$$\frac{414,00}{\frac{0,93 \cdot 2502,50}{1,00}} + 0,414 \cdot \frac{185,25}{1,00 \cdot \frac{227,70}{1,00}} + 0,421 \cdot \frac{0,55}{\frac{108,35}{1,00}} = 0,52 \leq 1$$

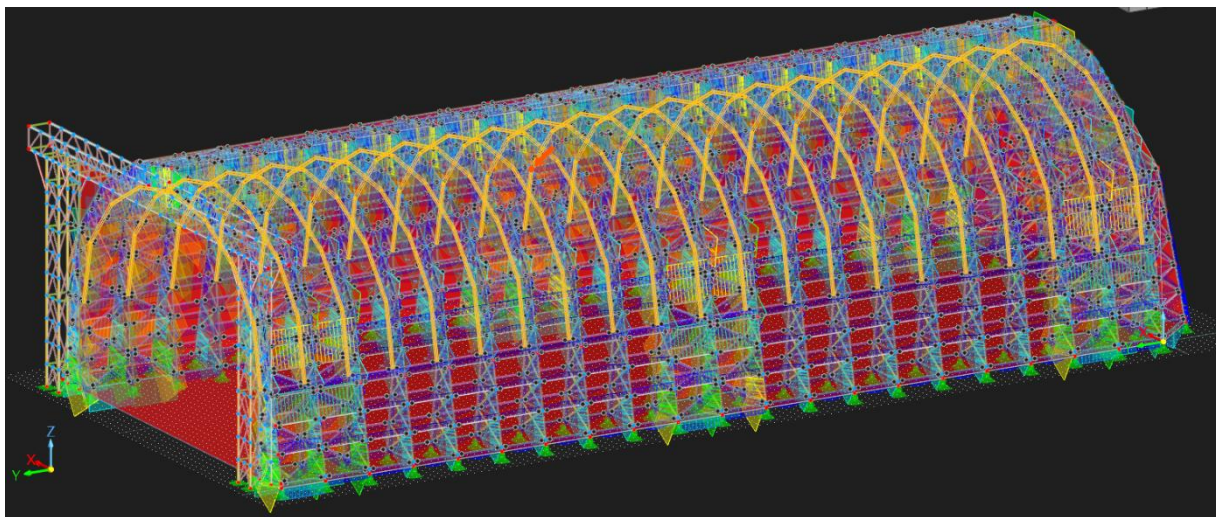
$$\frac{414,00}{\frac{0,74 \cdot 2502,50}{1,00}} + 0,266 \cdot \frac{185,25}{1,00 \cdot \frac{227,70}{1,00}} + 0,701 \cdot \frac{0,55}{\frac{108,35}{1,00}} = 0,45 \leq 1$$

Wszystkie warunki nośności pasa górnego uwzględniające nośność przekroju oraz sprawdzenie stateczności przekroju zostały spełnione. Przyjęto kształtownik HEB 220 jako pas górny części kratownicowej głównej ramy odtwarzanej konstrukcji hangaru. Nie można zastosować mniejszych przekrojów ze względu na nie spełnienie późniejszego warunku w połączeniu na docisk. Dodatkowo, w celu odwzorowania odtwarzanej konstrukcji, zastosowany kształtownik jest jak najbardziej zbliżony do wersji oryginalnej hangaru.

6.2. Wymiarowanie pasa dolnego kratownicy

Siły wewnętrzne występujące w elemencie

Pas dolny zaprojektowano z dwuteownika o szerokich stopkach, ale o cieńszych ściankach ze względu na mniejsze obciążenie oddziałujące na pas dolny w porównaniu do pasa górnego układu kratownicowego. Zastosowano lżejszy ale nadal posiadający odpowiednie właściwości na wyboczenie i zwichrzenie kształtownik HEA200. Właściwości tego kształtownika zostały przedstawione w tabeli powyżej w punkcie 5.3.1 tabela 5.2. Dane dotyczące zastosowanej stali konstrukcyjnej znajdują się w punkcie 5.4 tabeli 5.9.



Rys. 6.2.1. Wymiarowane elementy konstrukcyjne hangaru – źródło własne

Siły wewnętrzne w wymiarowanym pasie dolnym układu:

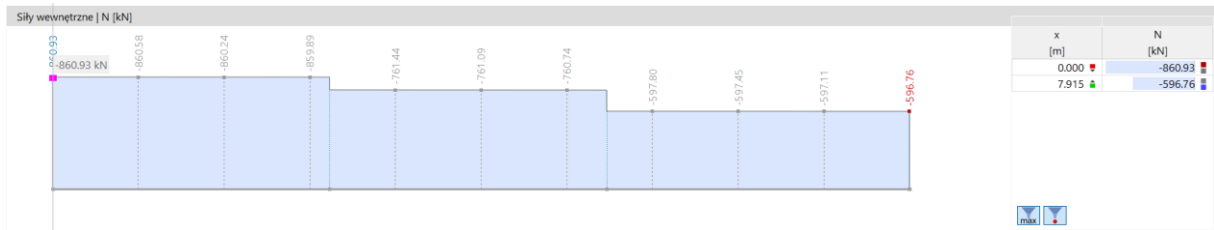
Najbardziej niekorzystną kombinacją jest: **KO31**

$$N_{Ed} = -860,93 \text{ kN}$$

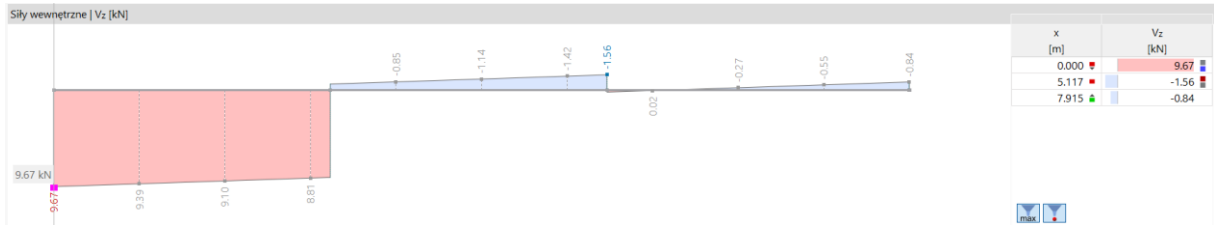
$$V_{z,Ed} = 9,67 \text{ kN}$$

$$M_{y,Ed} = -16,42 \text{ kNm}$$

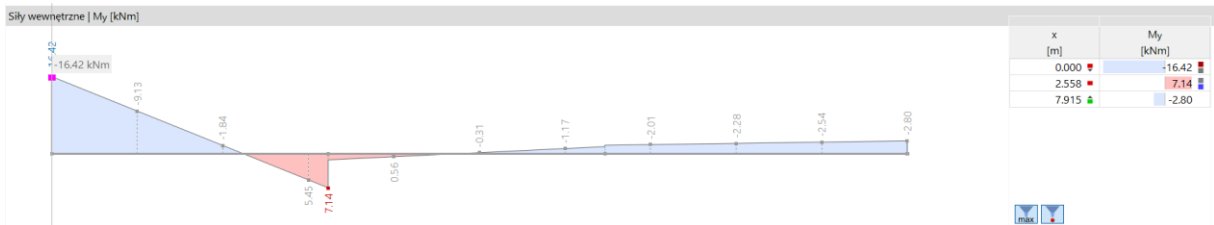
PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ



Rys. 6.2.2. Wykres sił wewnętrznych – siły normalne



Rys. 6.2.3. Wykres sił wewnętrznych – siły tnące



Rys. 6.2.4. Wykres sił wewnętrznych – momenty zginające

Klasyfikacja przekroju kształtownika

Według normy [N5]

$$t_{max} = t_{f,d} = 10 \text{ mm} < 40 \text{ mm} \rightarrow f_y = 275 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (6.1)$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{275}} = 0,92$$

Środek ściskany

$$\frac{c}{t} = \frac{d_d}{t_{w,d}} < 33\varepsilon \rightarrow \text{klasa 1 przekroju} \quad (6.2)$$

$$\frac{c}{t} = \frac{134}{6,05} = 20,62$$

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

Wartości graniczne według normy [N5], tablicy 5.2.

$$\frac{c}{t} = 20,62 < 33\varepsilon = 33 \cdot 0,92 = 30,36 \rightarrow \text{przekrój klasy 1}$$

Pas ściskany

$$\frac{c}{t} = \frac{b_d - t_{wd} - 2r_d}{2t_{fd}} \quad (6.3)$$

$$\frac{c}{t} = \frac{200 - 6,5 - 2 \cdot 18}{2 \cdot 10} = 7,88$$

Wartości graniczne według normy [N5], tablicy 5.2.

$$\frac{c}{t} < 9\varepsilon \quad (6.4)$$

$$\frac{c}{t} = 7,88 < 9 \cdot 0,92 \rightarrow \text{przekrój klasy 1}$$

Zastosowany kształtownik HEA 200 jest przekrojem klasy 1 ze względu na spełnione wszystkie powyższe warunki.

Nośność przekroju

Ściskanie

Obliczeniowa nośność przekroju równomiernie ściskanego klasy 1

$$N_{c,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (6.5)$$

$$N_{c,Rd} = \frac{53,80 \cdot 10^2 \cdot 275 \cdot 10^{-3}}{1,00} = 1479,50 \text{ kN}$$

$$N_{Ed} = 860,93 \text{ kN} < N_{pl,Rd} = 1479,50 \text{ kN}$$

$$N_{Ed} \leq 0,25 N_{pl,Rd} \quad (6.6)$$

$$N_{Ed} \leq 0,5 \cdot h_w \cdot t_w \cdot \frac{f_{y,w}}{\gamma_{M0}} \quad (6.7)$$

$$0,25 N_{pl,Rd} = 0,25 \cdot 1479,50 \text{ kN} = 369,875 \text{ kN}$$

$$860,93 \text{ kN} > 369,875 \text{ kN}$$

$$0,5 \cdot h_w \cdot t_w \cdot \frac{f_{y,w}}{\gamma_{M0}} = 0,5 \cdot 170 \cdot 6,5 \cdot \frac{275}{1,00} = 151,938 \text{ kN}$$

$$860,93 \text{ kN} > 151,938 \text{ kN}$$

Ze względu na przekroczone warunki pozwalające na nieuwzględnianie interakcji ściskania i zginania należy uwzględnić wpływ siły podłużnej na plastyczną nośność przekroju przy zginaniu.

Zginanie z siłą podłużną

Obliczeniowa nośność przekroju przy jednokierunkowym zginaniu w przypadku przekrojów klasy 1

$$M_{pl,y,Rd} = W_{pl,y} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \quad (6.9)$$

$$M_{pl,y,Rd} = 430 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{275}{1,00} = 118,25 \text{ kNm}$$

Stosunek pola przekroju środka do pola przekroju brutto zastosowanego kształtownika

$$a = \frac{A-2 \cdot b \cdot t_f}{A} \quad (6.11)$$

$$a = \frac{53,80 \cdot 10^2 - 2 \cdot 200 \cdot 10}{53,80 \cdot 10^2} = 0,257$$

Stosunek obliczeniowej siły osiowej do obliczeniowej nośności plastycznej przekroju przy ściskaniu

$$n = \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} \quad (6.12)$$

$$n = \frac{860,93}{147,50} = 0,582$$

Obliczeniowa nośność na zginanie z uwzględnieniem wpływu siły osiowej

$$M_{N,y,Rd} = M_{pl,y,Rd} \cdot \frac{1-n}{1-0,5 \cdot a} \quad (6.13)$$

$$M_{N,y,Rd} = 118,25 \cdot \frac{1-0,582}{1-0,5 \cdot 0,257} = 56,71 \text{ kNm}$$

Wyężenie przekroju poddanemu jednoczesnemu ściskaniu i zginaniu względem osi y

$$\eta = \frac{M_{y,Ed}}{M_{N,y,Rd}} \leq 1 \quad (6.14)$$

$$\eta = \frac{16,42}{56,71} = 0,29 \leq 1$$

Warunek nośności dla przekrojów klasy 1 na moment zginający z uwzględnieniem wpływu siły osiowej na zginanie został spełniony.

Wykorzystanie nośności przekroju zginanego jednokierunkowo z uwzględnieniem wpływu siły osiowej

$$\eta_{My} = M_{y,Ed} \cdot \frac{1-0,5a}{M_{pl,y,Rd}} \quad (6.41)$$

gdzie: $M_{y,Ed}$ jest to obliczeniowy moment zginający w kNm, a jest to stosunek pola przekroju środka do pola przekroju brutto, $M_{pl,y,Rd}$ jest to obliczeniowa nośność przekroju zginanego jednokierunkowo w kNm.

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

$$\eta_{My} = 16,44 \cdot \frac{1 - 0,5 \cdot 0,527}{118,25} = 0,121$$

Zgodnie z punktem normy 6.2.9.1(5) równanie 6.36 normy [N5]:

$$\eta = \eta_N + \eta_{My} \quad (6.42)$$

gdzie: η_N jest to stopień wykorzystania przekroju ze względu na siłę ściskającą w kN, η_{My} jest to stopień wykorzystania przekroju poddanego jednokierunkowemu ściskaniu w kNm.

$$\eta = 0,582 + 0,121 = 0,70 \leq 1$$

Warunek ze względu na interakcję zginania jednokierunkowego z działającą siłą osiową został spełniony.

Ścinanie

Pole przekroju czynnego przy ścinaniu

$$V_{pl,z,Rd} = \frac{A_{v,z} \cdot \left(\frac{f_{y,w}}{\sqrt{3}} \right)}{\gamma_{M0}} \quad (6.15)$$

$$V_{pl,z,Rd} = \frac{18,08 \cdot 10^2 \cdot \left(\frac{275 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} \right)}{1,00} = 287,06 \text{ kN}$$

$$\eta V_z = \frac{9,67}{287,06} = 0,03$$

Zgadnie z punktem 6.2.8 lub 6.2.10 normy [N5] wpływ siły ścinającej w kierunku osi z jest pomijany, ponieważ wartość obliczeniowej siły tnącej występującej w analizowanym elemencie nie przekracza połowy nośności zastosowanego kształtownika na ścinanie.

Nośność elementu z uwzględnieniem stateczności

Interakcja zginania i wyboczenia względem osi głównych kształtownika. Wyboczenie razem ze zwichrzeniem. Element zginany i ściskany jednocześnie.

Wyboczenie giętne w płaszczyźnie kratownicy w osi y-y

Sprężysta siła krytyczna względem osi y-y

$$N_{cr,y} = (\pi^2) \cdot E \cdot \frac{I_y}{(L_{cr,y})^2} \quad (6.16)$$

Długość wyboczeniowa pasa dolnego w płaszczyźnie kratownicy wynosi $L_{cr,y} = 2,558 \text{ m}$.

Długość wyboczeniowa pasa dolnego w dwóch płaszczyznach jest taka sama ze względu na występowanie słupków kratownicy skracających długość wyboczeniową pasa dolnego oraz

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

stężeń połaciowych, których zadaniem jest usztywnienie konstrukcji oraz dodatkowo zabezpieczenie pasa dolnego przed wyboczeniem.

$$N_{cr,y} = (\pi^2) \cdot 210000 \cdot \frac{3690}{(2,558)^2} = 11685,60 \text{ kN}$$

Smukłość względna względem osi y dla przekrojów klasy 1, 2 oraz 3.

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr,y}}} \quad (6.17)$$

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{53,80 \cdot 275\,000}{11685,60}} = 0,356$$

Parametr krzywej niestateczności χ

$$\phi_y = 0,5 \cdot [1 + \alpha_y \cdot (\bar{\lambda}_y - 0,2) + (\bar{\lambda}_y)^2] \quad (6.18)$$

Ograniczenia przyporządkowujące odpowiednie krzywe wyboczenia do danego elementu i typu jego przekroju

$$\frac{h_d}{b_d} = \frac{190}{200} = 0,95 \leq 1,2 \quad i \quad t_{fd} = 10 \leq 100$$

Na podstawie tabeli 6.2 normy [N5] oraz powyższych warunków krzywa wyboczeniowa względem osi y-y ma postać krzywej b.

Parametr imperfekcji krzywej wyboczeniowej c to $\alpha = 0,34$

$$\phi_y = 0,5 \cdot [1 + 0,34 \cdot (0,356 - 0,2) + (0,356)^2] = 0,590$$

Wyboczeniowy współczynnik redukcyjny χ

$$\chi_y = \frac{1}{\phi_y + \sqrt{(\phi_y)^2 - (\bar{\lambda}_y)^2}} \quad (6.19)$$

$$\chi_y = \frac{1}{0,590 + \sqrt{(0,590)^2 - (0,356)^2}} = 0,94$$

Obliczeniowa nośność przekroju ściskanego na wyboczenie względem osi y

$$N_{b,y,Rd} = \chi_y \cdot A \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \quad (6.43)$$

gdzie: χ_y jest to wyboczeniowy współczynnik redukcyjny, A jest to pole powierzchni przekroju w mm^2 , f_y jest to granica plastyczności stali w MPa, natomiast γ_{M0} jest to współczynnik częściowy dla stali wynoszący 1,00.

$$N_{b,y,Rd} = 0,94 \cdot 53,80 \cdot 10^2 \cdot \frac{275}{1,00} = 1395,54 \text{ kN}$$

Wyężenie przekroju ze względu na stateczność – wyboczenie giętne względem osi y

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{N_{b,y,Rd}} \quad (6.44)$$

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

gdzie: $N_{c,Ed}$ jest to obliczeniowa siła ściskająca występująca w analizowanym elemencie w kN, natomiast $N_{b,y,Ed}$ jest to obliczeniowa nośność przekroju ściskanego na wyboczenie w kN.

$$\eta = \frac{861,87}{1395,54} = 0,62$$

Warunek obliczeniowej nośności przekroju a wyboczenie pręta ściskanego został spełniony.

Wyboczenie giętne z płaszczyzny kratownicy w osi z-z

Sprężysta siła krytyczna

$$N_{cr,z} = (\pi^2) \cdot E \cdot \frac{I_z}{(L_{cr,z})^2} \quad (6.16)$$

Długość wyboczeniowa pasa dolnego względem osi z-z wynosi $L_{cr,z} = 2,558$ m.

$$N_{cr,z} = (\pi^2) \cdot 210\,000 \cdot \frac{1340}{(2,558)^2} = 4243,54 \text{ kN}$$

Smukłość bezwymiarowa względem osi z dla przekrojów klasy 1, 2 oraz 3.

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr,z}}} \quad (6.17)$$

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{53,80 \cdot 275\,000}{4243,54}} = 0,590$$

Parametr krzywej niestateczności χ

$$\phi_z = 0,5 \cdot \left[1 + \alpha_z \cdot (\bar{\lambda}_z - 0,2) + (\bar{\lambda}_z)^2 \right] \quad (6.18)$$

Ograniczenia przyporządkowujące odpowiednie krzywe wyboczenia do danego elementu i typu jego przekroju

$$\frac{h_d}{b_d} = \frac{190}{200} = 0,95 \leq 1,2 \quad i \quad t_{fd} = 10 \leq 100$$

Na podstawie tabeli 6.2 normy [N5] oraz powyższych warunków krzywa wyboczeniowa względem osi z-z ma postać krzywej c.

Parametr imperfekcji krzywej wyboczeniowej c to $\alpha = 0,49$

$$\phi_z = 0,5 \cdot [1 + 0,49 \cdot (0,590 - 0,2) + (0,590)^2] = 0,770$$

Wyboczeniowy współczynnik redukcyjny χ

$$\chi_z = \frac{1}{\phi_z + \sqrt{(\phi_z)^2 - (\bar{\lambda}_z)^2}} \quad (6.19)$$

$$\chi_z = \frac{1}{0,770 + \sqrt{(0,770)^2 - (0,590)^2}} = 0,79$$

$$N_{b,z,Rd} = \chi_z \cdot A \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \quad (6.43)$$

$$N_{b,z,Rd} = 0,79 \cdot 53,80 \cdot 10^2 \cdot \frac{275}{1,00} = 1170,32 \text{ kN}$$

Wytężenie przekroju ze względu na stateczność – wyboczenie giętne względem osi z

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{N_{b,z,Rd}} \quad (6.44)$$

$$\eta = \frac{860,93}{1170,32} = 0,74$$

Warunek obliczeniowej nośności przekroju a wyboczenie pręta ściskanego został spełniony.

Zwicherung

Sprężysty moment krytyczny może być obliczony według następującej formuły wyprowadzonej z teorii wyboczenia:

$$M_{cr} = C_1 \cdot \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{(k \cdot L_{cr})^2} \cdot \left[\sqrt{\left(\frac{k}{k_w}\right)^2 \cdot \frac{I_w}{I_z} \cdot \frac{(k \cdot L_{cr})^2 \cdot G \cdot I_t}{\pi^2 \cdot E \cdot I_z} + (C_2 \cdot z_g)^2} - C_2 \cdot z_g \right] \quad (6.20)$$

Długość krytyczna przy zwicherungu sprężystym w tym przypadku wynosi:

$$L_{cr,LT} = 2,558 \text{ m}$$

Współczynniki długości efektywnej:

Przyjęto zatem współczynnik: $k = 1,0$

Przyjęto zatem współczynnik: $k_w = 1,0$

Miejsce przyłożenia obciążenia:

Założono, że obciążenie przekazywane jest w połączeniu belki z podciągami w osi podciągu (połączenia środkowe). Ponieważ przekrój jest bisymetryczny to środek ścinania leży w osi symetrii. Odległość od punktu przyłożenia obciążenia do środka ścinania wynosi zatem: $z_g = 0 \text{ mm}$.

Wykres momentów między stężeniami czyli między słupkami górnej części kratownicowej konstrukcji zmienia się liniowo. Stosunek momentów występujących na obu końcach analizowanego odcinka krytycznego wynoszą kolejno:

$M_{1,y} = 7,16 \text{ kNm}$, oraz $M_{2,y} = -16,42 \text{ kNm}$

Stosunek momentów na końcach pręta:

$$\psi_{LT,y} = \frac{M_{1,y}}{M_{2,y}} \quad (6.21)$$

$$\psi_{LT} = \frac{7,16}{-16,42} = -0,435$$

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

Po przeprowadzeniu interpolacji liniowej odpowiednich wartości pochodzących z tabeli 6.1 uzyskano wartość parametru C_I

$$C_I = 2,26.$$

Biorąc pod uwagę powyższe założenia wzór na sprężysty moment krytyczny przybierze prostszą postać:

$$M_{cr} = 2,26 \cdot \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 1340 \cdot 10^4}{(1,00 \cdot 2885)^2} \cdot \left[\sqrt{\frac{108000 \cdot 10^6}{1340 \cdot 10^4} \cdot \frac{(2558)^2 \cdot 81000 \cdot 10^4}{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 1340 \cdot 10^4}} \right] = 1054,58 \text{ kNm}$$

Zgodnie z punktem 6.3.2.3.(4) normy [N5] kiedy:

$$\overline{\lambda}_{LT} \leq \overline{\lambda}_{LT,0} \quad (6.22)$$

$$\frac{M_{Ed}}{M_{cr}} \leq \overline{\lambda}_{LT,0}^{-2} \quad (6.23)$$

$$\overline{\lambda}_{LT,0}^{-2} = 0,4^2 = 0,16$$

$$\frac{M_{Ed}}{M_{cr}} \leq 0,16$$

$$M_{Ed} \leq 0,16 \cdot M_{cr}$$

$$16,44 \text{ kNm} \leq 0,16 \cdot 1054,58 \text{ kNm} = 168,73 \text{ kNm}$$

Warunek został spełniony, zatem możemy nie sprawdzać zwichrzenia. Warunek stateczności przekroju sprowadza się jedynie do warunku nośności przekroju.

Charakterystyczna nośność przekroju na ściskanie

$$N_{Rk} = A \cdot f_y \quad (6.24)$$

$$N_{Rk} = 53,80 \cdot 10^2 \cdot 275\,000 = 1479,50 \text{ kN}$$

Charakterystyczna nośność przekroju na moment zginający w osi y

$$M_{y,Rk} = W_{pl,y} \cdot f_y \quad (6.25)$$

$$M_{y,Rk} = 430 \cdot 10^3 \cdot 275 = 118,25 \text{ kNm}$$

Charakterystyczna nośność przekroju na moment zginający w osi z

$$M_{z,Rk} = W_{pl,z} \cdot f_y \quad (6.26)$$

$$M_{z,Rk} = 204 \cdot 10^3 \cdot 275 = 56,10 \text{ kNm}$$

Współczynniki równoważnego stałego momentu

W celu wyznaczenia współczynników interakcji k_{ij} należy najpierw wyznaczyć parametry pomocnicze takie jak współczynniki równoważnego stałego momentu na podstawie

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

tabeli Tablica. B.3 załącznika krajowego do normy [N5]. Rozkład momentów na analizowanym elemencie ma charakter liniowy zatem współczynniki będą wyglądały następująco

$$C_{my} = 0,6 - 0,4 \cdot \psi_y \geq 0,4 \quad (6.27)$$

$$C_{mz} = 0,6 - 0,4 \cdot \psi_z \geq 0,4 \quad (6.28)$$

gdzie: ψ_y jest to parametr będący stosunkiem momentów zginających względem osi y występujących na końcach analizowanego pręta.

$$\psi_y = \frac{M_{1,y}}{M_{2,y}} \quad (6.29)$$

$$\psi_y = \frac{7,16}{-16,42} = -0,435$$

$$C_{my} = 0,6 + 0,4 \cdot (-0,435) = 0,426$$

ψ_z jest to parametr będący stosunkiem momentów zginających względem osi z występujących na końcach analizowanego pręta

$$\psi_z = \frac{M_{1,z}}{M_{2,z}} \quad (6.30)$$

$$\psi_z = \frac{-0,02}{-0,06} = 0,333$$

$$C_{mz} = 0,6 + 0,4 \cdot (0,333) = 0,733$$

Współczynniki interakcji $k_{yy}, k_{yz}, k_{zy}, k_{zz}$

Wartości poszczególnych współczynników interakcji dla elementów niewrażliwych na deformacje skrętne ze względu na występujący pomijalnie mały moment skręcający wyznaczono na podstawie tablicy B.1 załącznika krajowego B do normy [N5].

$$k_{yy} = C_{my} \cdot \left(1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \cdot \frac{N_{c,Ed}}{\chi_y \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) \quad (6.31)$$

$$k_{yy} = \min \left(k_{yy}, C_{my} \cdot \left(1 + 0,8 \cdot \frac{N_{c,Ed}}{\chi_y \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) \right) \quad (6.32)$$

$$k_{yz} = 0,6 \cdot C_{mz} \cdot \left(1 + (2 \cdot \bar{\lambda}_z - 0,6) \cdot \frac{N_{c,Ed}}{\chi_z \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) \quad (6.33)$$

$$k_{yz} = \min \left(k_{yz}; 0,6 \cdot C_{mz} \cdot \left(1 + 1,4 \cdot \frac{N_{c,Ed}}{\chi_z \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) \right) \quad (6.34)$$

$$k_{zy} = 0,6 \cdot C_{my} \cdot \left(1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \cdot \frac{N_{c,Ed}}{\chi_y \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) \quad (6.35)$$

$$k_{zy} = \min \left((k_{zy}; 0,6 \cdot C_{my} \cdot \left(1 + 0,8 \cdot \frac{N_{c,Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) \right) \quad (6.36)$$

$$k_{zz} = C_{mz} \cdot \left(1 + (2 \cdot \bar{\lambda}_z - 0,6) \cdot \frac{N_{c,Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) \quad (6.37)$$

$$k_{zz} = \min \left((k_{zz}, C_{mz} \cdot \left(1 + 1,4 \cdot \frac{N_{c,Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) \right) \quad (6.38)$$

$$k_{yy} = 0,426 \cdot \left(1 + (0,356 - 0,2) \cdot \frac{860,93}{0,94 \cdot \frac{1479,50}{1,00}} \right) = 0,467$$

$$k_{yy} = \min \left(\left(0,467; 0,426 \cdot \left(1 + 0,8 \cdot \frac{860,93}{0,94 \cdot \frac{1479,50}{1,00}} \right) \right) \right) = 0,467$$

$$k_{yz} = 0,6 \cdot 0,733 \cdot \left(1 + (2 \cdot 0,590 - 0,6) \cdot \frac{860,93}{0,79 \cdot \frac{1479,50}{1,00}} \right) = 0,628$$

$$k_{yz} = \min \left((0,628; 0,6 \cdot 0,733 \cdot \left(1 + 1,4 \cdot \frac{860,93}{0,79 \cdot \frac{1479,50}{1,00}} \right) \right) = 0,628$$

$$k_{zy} = 0,6 \cdot 0,426 \cdot \left(1 + (0,356 - 0,2) \cdot \frac{860,93}{0,94 \cdot \frac{1479,50}{1,00}} \right) = 0,280$$

$$k_{zy} = \min \left((0,280; 0,6 \cdot 0,426 \cdot \left(1 + 0,8 \cdot \frac{860,93}{0,94 \cdot \frac{1479,50}{1,00}} \right) \right) = 0,280$$

$$k_{zz} = 0,733 \cdot \left(1 + (2 \cdot 0,590 - 0,6) \cdot \frac{860,93}{0,79 \cdot \frac{1479,50}{1,00}} \right) = 1,070$$

$$k_{zz} = \min \left((1,070; 0,733 \cdot \left(1 + 1,4 \cdot \frac{860,93}{0,79 \cdot \frac{1479,50}{1,00}} \right) \right) = 1,070$$

Warunki nośności elementów ściskanych i zginanych

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{\gamma_{M1}} \leq 1 \quad (6.39)$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{\gamma_{M1}} \leq 1 \quad (6.40)$$

$$\frac{860,93}{0,94 \cdot \frac{1479,50}{1,00}} + 0,467 \cdot \frac{16,42}{1,00 \cdot \frac{118,25}{1,00}} + 0,628 \cdot \frac{0,06}{\frac{56,10}{1,00}} = 0,68 \leq 1$$

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

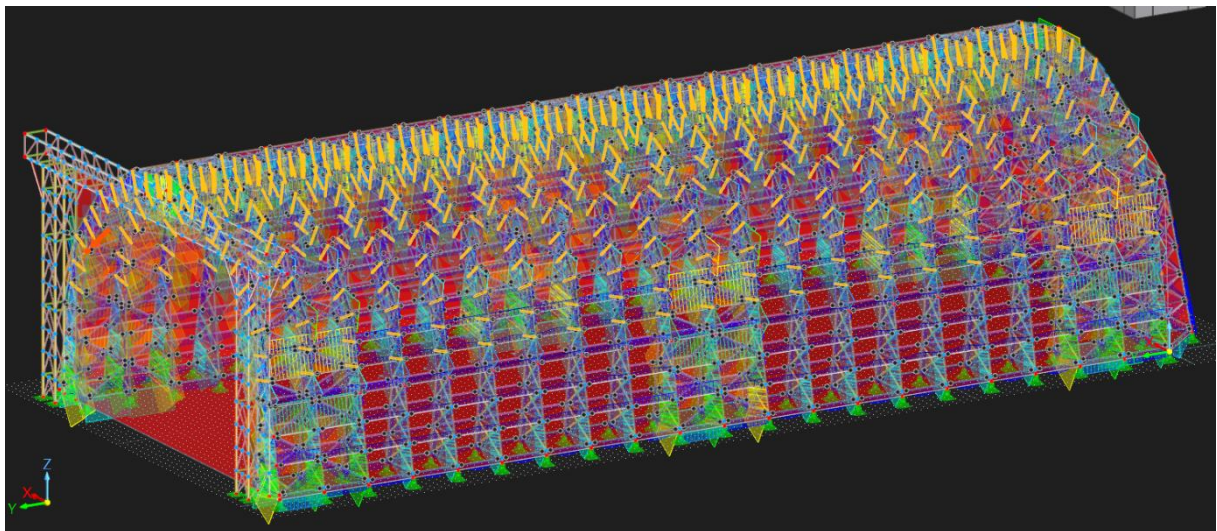
$$\frac{\frac{860,93}{0,79 \cdot 1479,50}}{1,00} + 0,280 \cdot \frac{\frac{16,42}{1,00 \cdot \frac{118,25}{1,00}}}{1,00} + 1,070 \cdot \frac{\frac{0,06}{56,10}}{1,00} = 0,78 \leq 1$$

Wszystkie warunki nośności pasa dolnego uwzględniające nośność przekroju oraz sprawdzenie jego stateczności zostały spełnione. Przyjęto kształtnik HEA200 jak pas dolny części kratownicowej głównego układu ramowego konstrukcji. Przeprowadzono dodatkową analizę w celu zmniejszenia zastosowanego kształtnika i uzyskania bardziej optymalnych wyników wyężenia jednak ze względów na przekroczone warunku początkowego stanu uplastycznienia w przekroju krytycznym pozostawiono kształtnik HEA200.

6.3. Wymiarowanie słupków części kratownicowej konstrukcji

Siły wewnętrzne występujące w elemencie

Słupki części kratownicowej konstrukcji ramowej zaprojektowano z rur kwadratowych SHS 100x4,5 ze stali S275J0. Wszystkie podstawowe dane dotyczące właściwości tego oto kształtownika rurowego umieszczono w punkcie 5.3.2 w tabeli 5.3. Dane dotyczące podstawowych parametrów zastosowanej stali konstrukcyjnej znajdują się w punkcie 5.4 tabeli 5.9.



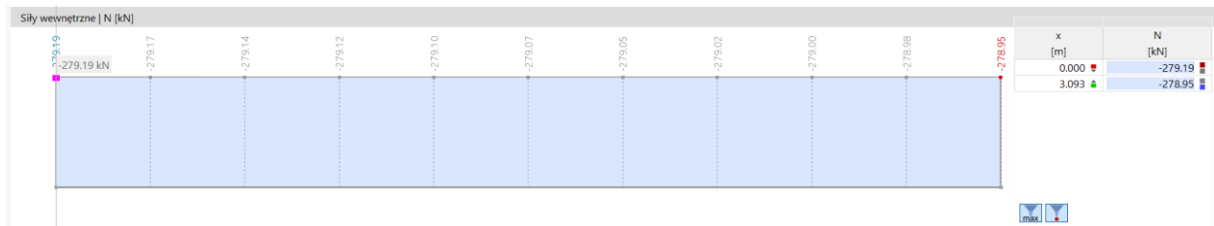
Rys. 6.3.1. Wymiarowane elementy konstrukcyjne hangaru – źródło własne

Siły wewnętrzne w wymiarowanym słupku

Najbardziej niekorzystną kombinacją jest: **KO57**

$$N_{Ed,S} = -279,19 \text{ kN}$$

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ



Rys. 6.3.2. Wykres sił wewnętrznych – siły normalne

Klasyfikacja przekroju

Według normy [N5]

$$t_{max} = t_{f,s} = 4,5 \text{ mm} < 40 \text{ mm} \rightarrow f_y = 275 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (6.1)$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{275}} = 0,92$$

$$\frac{c}{t} = \frac{h-3t}{t_t} < 33\varepsilon \rightarrow \text{klasa 1 przekroju} \quad (6.45)$$

$$\frac{c}{t} = \frac{100-3 \cdot 4,5}{4,5} = 19,22 < 33\varepsilon = 33 \cdot 0,92 = 30,36 \rightarrow \text{przekrój klasy 1}$$

Zastosowany kształtownik w postaci rury kwadratowej SHS100x4,5 jest przekrojem klasy 1 ze względu na spełnione wszystkie powyższe warunki.

Nośność przekroju

Ściskanie

Obliczeniowa nośność słupka na ściskanie

$$N_{c,Rd} = A \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \quad (6.5)$$

$$N_{c,Rd} = 17,00 \cdot 10^2 \cdot \frac{275 \cdot 0,001}{1,00} = 467,50 \text{ kN}$$

Wytężenie przekroju słupka poddanego osiowemu ściskaniu

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{N_{c,Rd}} \quad (6.6)$$

$$\eta = \frac{279,19}{467,50} = 0,60 \leq 1$$

Warunek nośności na ściskanie został spełniony.

Nośność elementu z uwzględnieniem stateczności

Wyboczenie giętnie względem głównej osi głównej z (z płaszczyzny kratownicy)

Sprężysta siła krytyczna

$$N_{cr,z} = (\pi^2) \cdot E \cdot \frac{I_z}{(L_{cr,z})^2} \quad (6.16)$$

Długość wyboczeniowa słupka to $L_{cr,z} = 3,093 \text{ m}$. Jest to długość całkowita słupka. Przekroje słupków mają takie same momenty bezwładności w obu płaszczyznach wyboczenia oraz te same długości wyboczeniowe ze względu na zastosowane dodatkowe stężenia między kratownicami układu ramowego hangaru.

$$N_{cr,z} = (\pi^2) \cdot 210000 \text{ 000} \cdot \frac{256 \cdot 10^4}{(3,093 \cdot 10^3)^2} = 554,45 \text{ kN}$$

Smukłość bezwymiarowa względem osi z dla przekrojów klasy 1, 2 oraz 3.

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr,z}}} \quad (6.17)$$

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{17,00 \cdot 275 \text{ 000}}{554,45}} = 0,918$$

Wytężenie nośności ze względu na wyboczenie w płaszczyźnie kratownicy wynosi:

$$\eta N_{cr,z} = \gamma_{M1} \cdot \frac{N_{c,Ed}}{N_{cr,z}} \quad (6.46)$$

$$\eta N_{cr,z} = 1,00 \cdot \frac{279,38}{554,45} = 0,504$$

Zgodnie z normą [N5] punktem 6.3.1.2(4) gdy wytężenie nośności przekroju ze względu na wyboczenie z płaszczyzny kratownicy jest mniejsze równe 0,04 efekty tego wyboczenia można pominąć. Ten warunek nie został jednak spełniony zatem musimy uwzględnić efekt wyboczenia względem płaszczyzny z-z (z płaszczyzny kratownicy).

Parametr krzywej niestateczności χ

$$\phi_z = 0,5 \cdot \left[1 + \alpha_z \cdot (\bar{\lambda}_z - 0,2) + (\bar{\lambda}_z)^2 \right] \quad (6.18)$$

Na podstawie tabeli 6.2 normy [N5] oraz faktu, że zastosowano jako kształtownik rurę kwadratową walcowaną na gorąco i rozpatrywane wyboczenie względem osi z-z to krzywa wyboczeniowa będzie miała postać krzywej a.

Parametr imperfekcji krzywej wyboczeniowej a to $\alpha = 0,21$

$$\phi_z = 0,5 \cdot [1 + 0,21 \cdot (0,918 - 0,2) + (0,918)^2] = 0,997$$

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

Wyboczeniowy współczynnik redukcyjny χ

$$\chi_z = \frac{1}{\phi_z + \sqrt{(\phi_z)^2 - (\lambda_z)^2}} \quad (6.19)$$
$$\chi_z = \frac{1}{0,997 + \sqrt{(0,997)^2 - (0,918)^2}} = 0,72$$

Obliczeniowa nośność na wyboczenie pręta ściskanego

$$N_{b,z,Rd} = \chi_z \cdot A \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \quad (6.43)$$
$$N_{b,z,Rd} = 0,72 \cdot 17,00 \cdot 10^2 \cdot \frac{275\,000}{1,00} = 337,45 \text{ kN}$$

Wyężenie nośności na wyboczenie przekroju względem osi z przekroju ściskanego

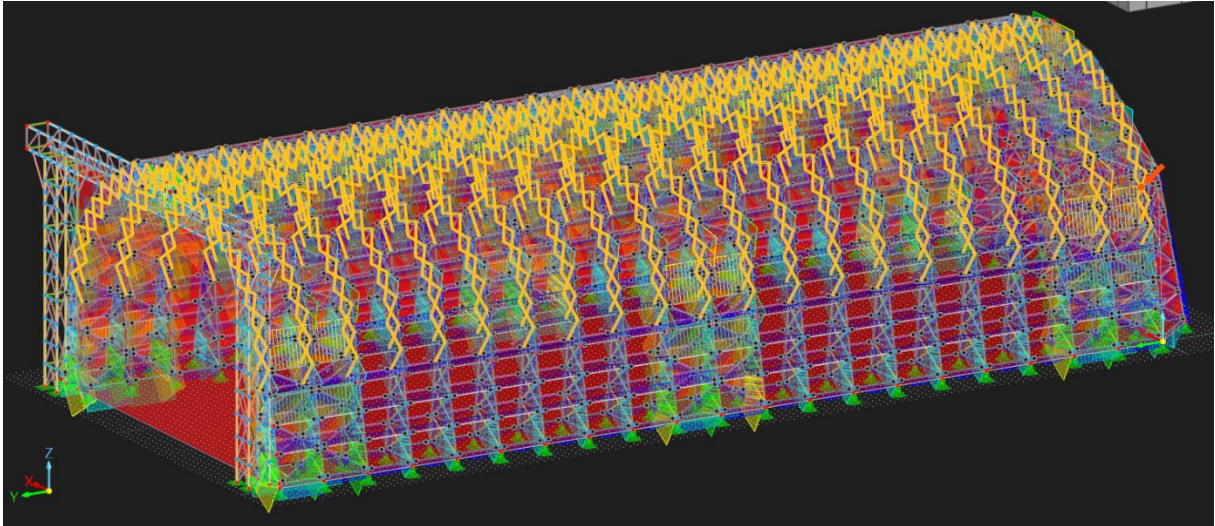
$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{N_{b,z,Rd}} \quad (6.44)$$
$$\eta = \frac{279,19}{337,45} = 0,83 \leq 1$$

Warunek ze względu na wyboczenie słupka w osi „z” z płaszczyzny kratownicy został spełniony. Wszystkie warunki projektowe sprawdzane powyżej są poprawne. Przyjęty kształtownik to rura kwadratowa SHS 100x4,5 jako słupek układu kratowego głównej ramy hangaru. Odpowiada to przekrojowi oryginalnemu zastosowanemu w pierwotnej wersji hangaru. Został jedynie zoptymalizowany i przystosowany do obowiązujących w dzisiejszych czasach norm projektowych, kształt oraz wymiary zostały zachowane zgodnie z pierwowzorem.

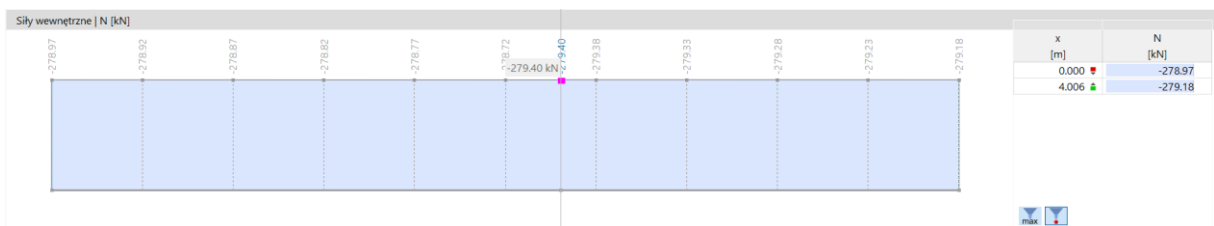
6.4. Wymiarowanie krzyżulca części kratownicowej konstrukcji

Sily wewnętrzne występujące w elemencie

Krzyżulce części kratownicowej konstrukcji ramowej zaprojektowano podobnie jak słupki z rur kwadratowych SHS 100x6,3 ze stali S275J0. Wszystkie podstawowe dane dotyczące właściwości tego oto kształtownika rurowego umieszczono w punkcie 5.3.2 w tabeli 5.3. Natomiast dane dotyczące podstawowych parametrów zastosowanej stali konstrukcyjnej znajdują się w punkcie 5.4 tabeli 5.9.



Rys. 6.4.1. Wymiarowane elementy konstrukcyjne hangaru – źródło własne



Rys. 6.4.2. Wykres sił wewnętrznych – siły normalne

Siły wewnętrzne w wymiarowanym krzyżulcu

Najbardziej niekorzystną kombinacją jest: **KO27**

$$N_{Ed,K} = -279,40 \text{ kN}$$

Klasyfikacja przekroju

Według normy [N5]

$$t_{max} = t_{f,k} = 6,3 \text{ mm} < 40 \text{ mm} \rightarrow f_y = 275 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (6.1)$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{275}} = 0,92$$

$$\frac{c}{t} = \frac{h-3t}{t_t} < 33\varepsilon \rightarrow \text{klasa 1 przekroju} \quad (6.45)$$

gdzie: h jest to wysokość kształtownika (rury kwadratowej) w mm, $t_{w,k}$ jest to grubość ścianki rury kwadratowej w mm.

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

$$\frac{c}{t} = \frac{100-3 \cdot 5}{5} = 17 < 33\varepsilon = 33 \cdot 0,92 = 30,36 \rightarrow \text{przekrój klasy 1}$$

Zastosowany kształtownik w postaci rury kwadratowej SHS100x6,3 jest przekrojem klasy 1 ze względu na spełnione wszystkie powyższe warunki.

Nośność przekroju

Ściskanie

Obliczeniowa nośność krzyżulca na ściskanie

$$N_{c,Rd} = A \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \quad (6.5)$$

$$N_{c,Rd} = 23,20 \cdot 10^2 \cdot \frac{275\,000}{1,00} = 638,00 \text{ kN}$$

Wytężenie przekroju krzyżulca poddanego osiowemu ściskaniu

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{N_{c,Rd}} \quad (6.6)$$

$$\eta = \frac{279,40}{638,00} = 0,44 \leq 1$$

Warunek nośności na ściskanie został spełniony.

Nośność elementu z uwzględnieniem stateczności

Wyboczenie giętnie względem głównej osi z-z (z płaszczyzny kratownicy)

Sprężysta siła krytyczna

$$N_{cr,z} = (\pi^2) \cdot E \cdot \frac{I_z}{(L_{cr,z})^2} \quad (6.16)$$

Długość wyboczeniowa krzyżulca to $L_{cr,z} = 4,006 \text{ m}$. Jest to całkowita długość krzyżulca kratownicy. Przekroje krzyżulców mają takie same momenty bezwładności w obu płaszczyznach wyboczenia, dodatkowo długość wyboczeniowa względem osi z jest 2 razy większa, dlatego że krzyżulce przecinają się między sobą w środku. O nośności elementu zdecyduje zatem wyboczenie z płaszczyzny kratownicy.

$$N_{cr,z} = (\pi^2) \cdot 210\,000 \cdot \frac{336 \cdot 10^4}{(4,006 \cdot 10^3)^2} = 434,01 \text{ kN}$$

Smukłość bezwymiarowa względem osi z dla przekrojów klasy 1, 2 oraz 3.

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr,z}}} \quad (6.17)$$

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{23,20 \cdot 275\,000}{434,01}} = 1,212$$

Wytężenie nośności ze względu na wyboczenie w płaszczyźnie kratownicy wynosi:

$$\eta N_{cr,y} = \gamma_{M1} \cdot \frac{N_{c,Ed}}{N_{cr,y}} \quad (6.46)$$

$$\eta N_{cr,y} = 1,00 \cdot \frac{279,40}{434,01} = 0,644$$

Zgodnie z normą [N5] punktem 6.3.1.2(4) gdy wytężenie nośności przekroju ze względu na wyboczenie z płaszczyzny kratownicy jest mniejsze równe 0,04 efekty wyboczenia można pominąć. Ten warunek nie został spełniony zatem musimy uwzględnić efekt wyboczenia względem płaszczyzny z-z (z płaszczyzny kratownicy).

Parametr krzywej niestateczności χ

$$\phi_z = 0,5 \cdot \left[1 + \alpha_z \cdot (\bar{\lambda}_z - 0,2) + (\bar{\lambda}_z)^2 \right] \quad (6.18)$$

gdzie: α_z jest to współczynnik imperfekcji wyznaczany na podstawie krzywej wyboczeniowej, $\bar{\lambda}_z$ jest to smukłość bezwymiarowa.

Na podstawie tabeli 6.2 normy [N5] oraz faktu, że zastosowano jako kształtownik rurę kwadratową walcowaną na gorąco i rozpatrywane wyboczenie względem osi z-z to krzywa wyboczeniowa będzie miała postać krzywej a.

Parametr imperfekcji krzywej wyboczeniowej a to $\alpha = 0,21$

$$\phi_z = 0,5 \cdot [1 + 0,21 \cdot (1,212 - 0,2) + (1,212)^2] = 1,341$$

Wyboczeniowy współczynnik redukcyjny χ

$$\chi_z = \frac{1}{\phi_z + \sqrt{(\phi_z)^2 - (\bar{\lambda}_z)^2}} \quad (6.19)$$

$$\chi_z = \frac{1}{1,341 + \sqrt{(1,341)^2 - (1,212)^2}} = 0,52$$

Obliczeniowa nośność na wyboczenie pręta ściskanego

$$N_{b,z,Rd} = \chi_z \cdot A \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \quad (6.43)$$

$$N_{b,z,Rd} = 0,52 \cdot 23,20 \cdot 10^2 \cdot \frac{275\,000}{1,00} = 333,16 \text{ kN}$$

Wytężenie nośności na wyboczenie przekroju względem osi z przekroju ściskanego

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{N_{b,z,Rd}} \quad (6.44)$$

$$\eta = \frac{279,40}{333,16} = 0,84 \leq 1$$

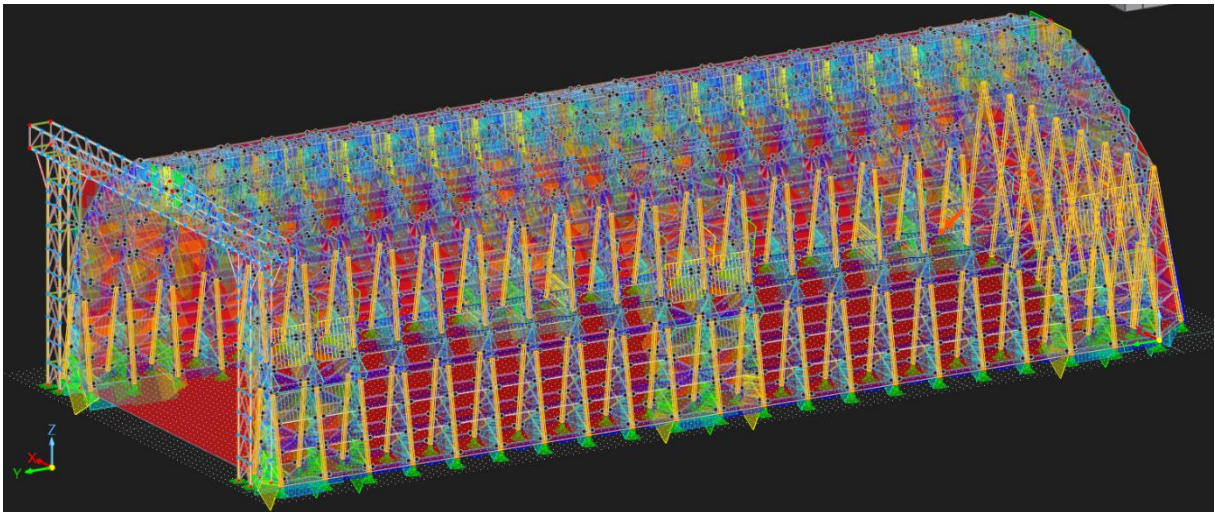
PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

Warunek ze względu na wyboczenie krzyżulca w osi z-z czyli z płaszczyzny kratownicy został spełniony. Wszystkie sprawdzane warunki projektowe również zostały spełnione. Przyjęty kształtownik to rura kwadratowa SHS 100x6,3 jako krzyżulec układu kratowego głównej ramy hangaru.

6.5. Wymiarowanie słupa nośnego dolnej części konstrukcji hangaru

Siły wewnętrzne występujące w elemencie

Słupy nośne dolnej części konstrukcji ramowej hangaru zostały odtworzone z przekrojów jakim są rury okrągłe walcowane na gorąco CHS 273x12 ze stali S275J0. Przekroje odwzorowują dokładne wymiary oryginalnego przekroju nogi tak zwanego kozła czyli dolnej części konstrukcji tuż pod łukiem zbudowanym z kratownic górnych. W oryginalnej konstrukcji słupy nośne zbudowane były z okrągłych pali o średnicy 280 mm. Ze względu na brak dostępności takiej średnicy rury walcowanej zastosowano najbardziej zbliżoną. Wszystkie podstawowe dane dotyczące właściwości tej rury okrągłej umieszczono w punkcie 5.3.3 w tabeli 5.4. Natomiast dane dotyczące podstawowych parametrów zastosowanej stali konstrukcyjnej znajdują się w punkcie 5.4 tabeli 5.9.



Rys. 6.5.1. Wymiarowane elementy konstrukcyjne hangaru – źródło własne

Siły wewnętrzne w wymiarowanym słupie nośnym dolnej części konstrukcji układu ramowego hangaru

Najbardziej niekorzystną kombinacją jest: **KO30**

$$N_{Ed} = -1188,65 \text{ kN}$$

$$V_{z,Ed} = -85,20 \text{ kN}$$

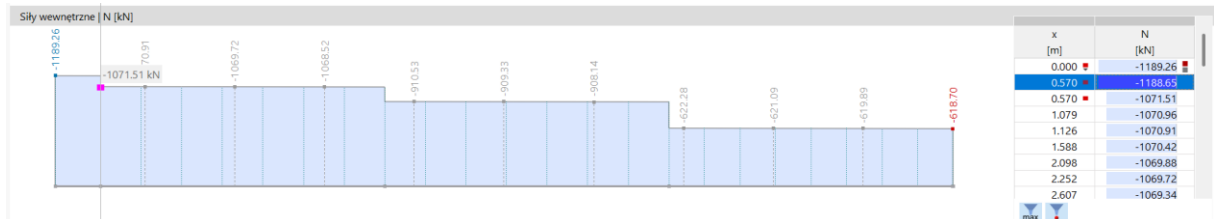
PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

$$V_{y,Ed} = -5,38 \text{ kN}$$

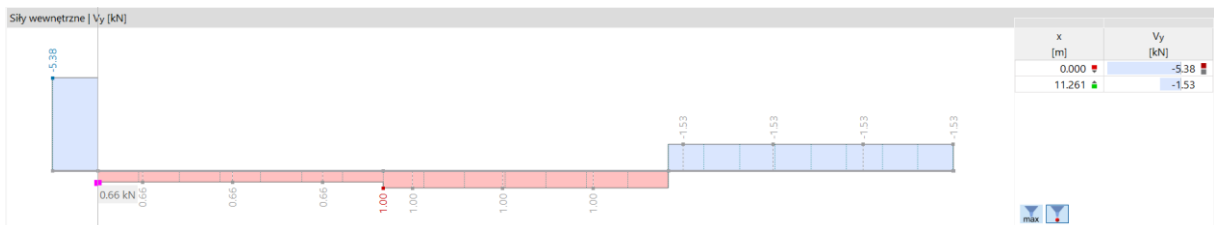
$$M_{y,Ed} = -48,69 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Ed} = 3,46 \text{ kNm}$$

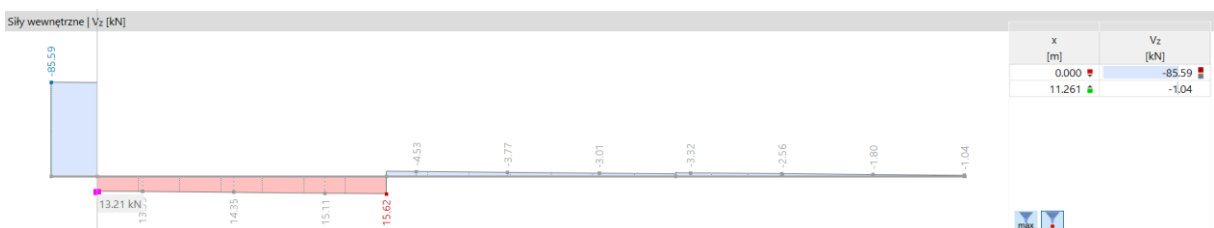
$$T_{Ed} = 2,07 \text{ kNm}$$



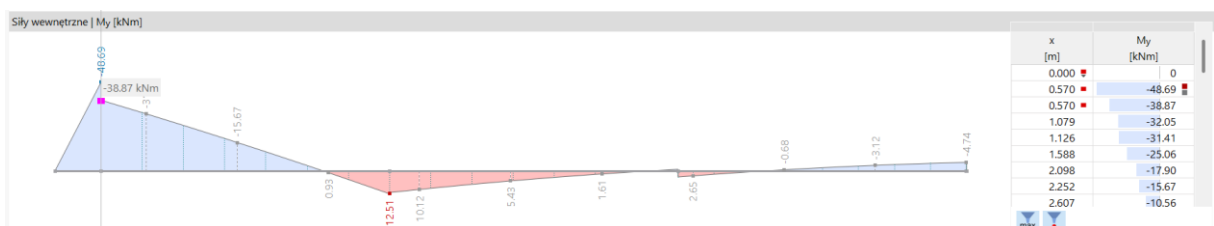
Rys. 6.5.2. Wykres sił wewnętrznych – sił normalne



Rys. 6.5.3. Wykres sił wewnętrznych – sił tnących V_y

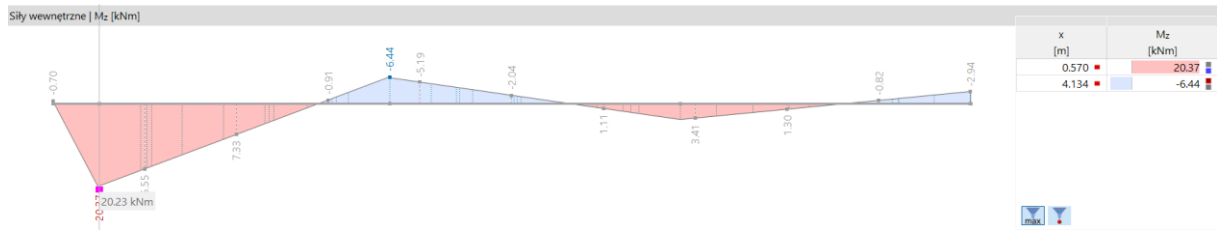


Rys. 6.5.4. Wykres sił wewnętrznych – sił tnących V_z



Rys. 6.5.5. Wykres sił wewnętrznych – moment zginający względem osi y

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ



Rys. 6.5.6. Wykres sił wewnętrznych – moment zginający względem osi z

Klasyfikacja przekroju

Według normy [N5]

$$t_{max} = t_{f,s} = 12,5 \text{ mm} < 40 \text{ mm} \rightarrow f_y = 275 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (6.1)$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{275}} = 0,92$$

Przekrój zginany i ściskany

Według tablicy 5.2 (arkusz 3 z 3) normy [N5] warunek na klasę przekroju zginanego i ściskanego jednocześnie dla rur kołowych wygląda następująco

$$\frac{d}{t} \leq 90\varepsilon^2 \quad (6.47)$$

gdzie: d jest to średnica rury kołowej w mm, a t jest to grubość ścianki rury w mm.

$$\frac{273}{12,5} = 21,84 \leq 90 \cdot (0,92)^2 = 76,18 \rightarrow \text{przekrój klasy 1}$$

Zastosowany kształtownik w postaci rury okrągłej CHS273x12,5 jest przekrojem klasy 1 ze względu na spełnione wszystkie powyższe warunki.

Nośność przekroju

Ściskanie

Obliczeniowa nośność przekroju, na który działają ściskające siły osiowe

$$N_{c,Rd} = A \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \quad (6.4)$$

$$N_{c,Rd} = 102,00 \cdot 10^2 \cdot \frac{275 \cdot 1000}{1,00} = 2805,00 \text{ kN}$$

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

Wytyżenie przekroju słupa poddanego osiowemu ściskaniu

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{N_{c,Rd}} \quad (6.5)$$

$$\eta = \frac{1188,65}{2805,00} = 0,42 \leq 1$$

Warunek nośności na ściskanie został spełniony.

Zginanie

Obliczeniowa nośność przekroju przy zginaniu jednokierunkowym w przypadku przekrojów klasy 1. Zastosowanym kształtownikiem jest rura okrągła mająca takie same momenty bezwładności względem dwóch osi z oraz y. Dlatego nośność przekroju zginanego względem dwóch osi jest taka sama.

Obliczeniowa nośność przekroju na zginanie względem osi y

$$M_{pl,y,Rd} = M_{pl,z,Rd} = W_{pl,y} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \quad (6.9)$$

$$M_{pl,y,Rd} = 849 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{275}{1,00} = 233,48 \text{ kNm}$$

Wytyżenie przekroju zginanego jednokierunkowo

$$\eta_{My} = \frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,y,Rd}} \leq 1 \quad (6.56)$$

$$\eta_{My} = \frac{48,69}{223,48} = 0,21 \leq 1$$

Warunek nośności dla przekrojów klasy 1 na jednokierunkowe zginanie względem osi „y” został spełniony.

Wypadkowe skręcanie i ścinanie

Przy projektowaniu plastycznym przyjmujemy, że $V_{c,Rd} = V_{pl,Rd}$, zatem zasadnym jest użycie następującego wzoru na nośność na ścinanie.

Obliczeniowa nośność na ścinanie

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \cdot \left(\frac{f_y}{\sqrt{3}} \right)}{\gamma_{M0}} \quad (6.15)$$

Pole przekroju czynnego przy ścinaniu A_v wyznaczamy zgodnie z punktem 6.2.6(3) normy [5] dla rur okrągłych o stałej grubości.

$$A_v = \frac{2A}{\pi} \quad (6.49)$$

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

gdzie: A jest to pole powierzchni przekroju rury kołowej w cm^2 .

$$A_v = \frac{2 \cdot 102,00}{\pi} = 64,94 \text{ cm}^2$$

$$V_{pl,Rd} = \frac{64,94 \cdot \left(\frac{275 \cdot 1000}{\sqrt{3}} \right)}{1,00} = 1030,99 \text{ kN}$$

Ze względu na wystąpienie niewielkiego momentu skręcającego postanowiono, że zostanie sprawdzona nośność przekroju na wypadkowe skręcanie wraz ze ścinaniem według punktu 6.2.6(2) oraz 6.2.7(9) normy [N5].

Obliczeniowe naprężenie styczne od skręcania

$$|\tau_{t,Ed}| = \frac{|\tau_{Ed}|}{W_t} \quad (6.50)$$

gdzie: τ_{Ed} jest to obliczeniowy moment skręcający w kNm , a W_t jest to wskaźnik wytrzymałości na skręcanie przekroju w cm^3 .

$$|\tau_{t,Ed}| = \frac{|2,07 \cdot 10^3 \cdot 10^3|}{1274 \cdot 10^3} = 1,63 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Obliczeniowa nośność na ścinanie ze skręcaniem

$$V_{pl,T,Rd} = \left[1 - \frac{|\tau_{t,Ed}|}{\frac{f_y}{\sqrt{3}} \gamma_{M0}} \right] \cdot V_{pl,Rd} \quad (6.51)$$

gdzie: $\tau_{t,Ed}$ jest to obliczeniowe naprężenie styczne od skręcania w N/mm^2 , f_y jest to granica plastyczności stali w MPa , a γ_{M0} jest to współczynnik częściowy stali, $V_{pl,Rd}$ jest to obliczeniowa nośność na ścinanie w kN .

$$V_{pl,T,Rd} = \left[1 - \frac{|1,63|}{\frac{275}{\sqrt{3}} \cdot 1,00} \right] \cdot 1030,99 = 1019,95 \text{ kN}$$

Wyłączenie nośności przekroju na ścinanie

$$\eta = \frac{V_{Ed}}{V_{pl,T,Rd}} \quad (6.52)$$

gdzie: V_{Ed} obliczeniowa siła ścinająca występująca w analizowanym elemencie w kN , $V_{pl,T,Rd}$ jest to nośność przekroju na ścinanie z uwzględnieniem wypadkowej skręcania w kN .

$$\eta = \frac{85,37}{1019,95} = 0,08 \leq 1$$

Warunek na wypadkowe ścinanie i skręcanie został spełniony.

Zgodnie z punktem 6.2.8(2) normy [N5] wpływ siły ścinającej na nośność plastyczną przekroju przy zginaniu, możemy pominąć kiedy nośność przekroju nie ulega redukcji ze

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

względnie na wystąpienie wyboczenia przy ścinaniu, a także siła poprzeczna nie przekracza 50% nośności plastycznej przy ścinaniu. W tym przypadku siła poprzeczna nie przekracza 50% nośności plastycznej przy ścinaniu zatem nie musimy redukować nośności przekroju zginanego ze względu na interakcję ze ścinaniem.

Nośność elementu z uwzględnieniem stateczności

Wyboczenie względem osi głównych y-y (w płaszczyźnie słupa)

Wyboczenie giętne względem osi głównej y-y

Zastosowanym kształtownikiem pełniącym rolę słupów nośnych odtwarzanego hangaru na sterowce jest przekrój w postaci rury okrągłej CHS273x12,5. Kształtownik jest przekrojem symetrycznym zatem wyboczenie względem osi głównej y-y oraz z-z są takie same gdyż momenty bezwładności przekroju względem dwóch osi z uwagi na symetrię są takie same.

Sprężysta siła krytyczna względem osi y-y.

$$N_{cr,y} = N_{cr,z} = (\pi^2) \cdot E \cdot \frac{I_y}{(L_{cr,y})^2} \quad (6.16)$$

Długość wyboczeniowa słupa dolnej części nośnej konstrukcji wynosi $L_{cr,y} = L_{cr,z} = 4,134$ m. Jest to długość słupa od ziemi do pierwszego stężenia w postaci belki łączącej układy ramowe ze sobą. Belka połączona jest ze słupem w sposób przegubowy.

$$N_{cr,y} = N_{cr,z} = (\pi^2) \cdot 210000000 \cdot \frac{8697 \cdot 10^4}{(4,134 \cdot 10^3)^2} = 10547,70 \text{ kN}$$

Smukłość względna względem osi y dla przekrojów klasy 1, 2 oraz 3.

$$\overline{\lambda}_y = \overline{\lambda}_z = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr,y}}} \quad (6.17)$$

$$\overline{\lambda}_y = \sqrt{\frac{102,00 \cdot 275\,000}{10547,70}} = 0,516$$

Parametr krzywej niestateczności χ

$$\phi_y = \phi_z = 0,5 \cdot [1 + \alpha_y \cdot (\overline{\lambda}_y - 0,2) + (\overline{\lambda}_y)^2] \quad (6.18)$$

Na podstawie tabeli 6.2 normy [N5] dla kształtowników w postaci rury okrągłej walcowanej na gorąco wyboczenie względem dowolnej osi przyjmuje postać wyboczenia krzywej a.

Parametr imperfekcji krzywej wyboczeniowej a to $\alpha = 0,21$

$$\phi_y = 0,5 \cdot [1 + 0,21 \cdot (0,516 - 0,2) + (0,516)^2] = 0,666$$

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

Wyboczeniowy współczynnik redukcyjny χ

$$\chi_y = \chi_z = \frac{1}{\phi_y + \sqrt{(\phi_y)^2 - (\bar{\lambda}_y)^2}} \quad (6.19)$$

$$\chi_y = \frac{1}{0,666 + \sqrt{(0,666)^2 - (0,516)^2}} = 0,92$$

Obliczeniowa nośność na wyboczenie pręta ściskanego – słupa

$$N_{b,y,Rd} = N_{b,z,Rd} = \chi_y \cdot A \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \quad (6.43)$$

$$N_{b,y,Rd} = 0,92 \cdot 102,00 \cdot 10^2 \cdot \frac{275}{1,00} = 2578,72 \text{ kN}$$

Wyężenie przekroju ze względu na wyboczenie pręta ściskanego

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{N_{b,y,Rd}} \quad (6.44)$$

$$\eta = \frac{1188,65}{2578,72} = 0,46 \leq 1$$

Wyboczenie względem osi z-z ma tą samą postać, ze względu na właściwości zastosowanego kształtownika tj symetrię, a co za tym idzie identyczne momenty bezwładności względem dwóch kierunków y i z. Jest to cecha charakterystyczna przekrojów rurowych. Wszystkie policzone uprzednio współczynniki oraz parametry mają taką samą wartość.

Charakterystyczna nośność przekroju na ściskanie

$$N_{Rk} = A \cdot f_y \quad (6.24)$$

$$N_{Rk} = 102,00 \cdot 10^2 \cdot 275 = 2805,00 \text{ kN}$$

Charakterystyczna nośność na zginanie względem osi y

$$M_{y,Rk} = W_{ply} \cdot f_y \quad (6.25)$$

$$M_{y,Rk} = 849 \cdot 10^3 \cdot 275 = 233,48 \text{ kNm}$$

Charakterystyczna nośność na zginanie względem osi z

$$M_{z,Rk} = W_{plz} \cdot f_y \quad (6.26)$$

$$M_{z,Rk} = 849 \cdot 10^3 \cdot 275 = 233,48 \text{ kNm}$$

Ze względu na występujący wykres momentów w postaci paraboli występującej po jednej stronie należy wyznaczyć współczynnik określający stosunek momentów M_h oraz M_s według tablicy B.3 załącznika do normy [N5].

$$\alpha_{h,y} = \frac{M_{h,y}}{M_{s,y}} \quad (6.53)$$

gdzie: $M_{h,y}$ jest to moment podporowy występujący na pręcie 1080 względem osi y-y w kNm, a $M_{s,y}$ jest to moment przęsłowy występujący na pręcie 1080 względem osi y-y w kNm.

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

$$\alpha_{h,y} = \frac{12,51}{-18,33} = -0,683$$

Współczynnik równoważnego stałego momentu C_m ,

Należy obliczyć współczynnik równoważnego momentu stałego na podstawie zadanego obciążenia oraz wartości współczynnika bezwymiarowego α_h . Obciążenie występuje w postaci obciążenia skupionego przekazywanego z górnej części kratownicowej części układu ramowego hangaru.

$$C_{my} = 0,90 + 0,10 \cdot \alpha_h \quad (6.54)$$

$$C_{my} = 0,90 + 0,10 \cdot (-0,683) = 0,832$$

Ze względu na występowanie momentu zginającego również na drugim kierunku osi głównych tj. z-z należy wyznaczyć taki sam współczynnik bezwymiarowy α_h ale dla kierunku z-z.

$$\alpha_{h,z} = \frac{M_{h,z}}{M_{s,z}} \quad (6.55)$$

gdzie: $M_{h,z}$ jest to moment podporowy występujący na przęcie 1080 względem osi z-z w kNm, a $M_{s,z}$ jest to moment przęsłowy występujący na przęcie 1080 względem osi z-z w kNm.

$$\alpha_{h,z} = \frac{0,82}{2,17} = 0,376$$

Współczynnik równoważnego stałego momentu C_m względem osi z-z

$$C_{mz} = 0,90 + 0,10 \cdot \alpha_h \quad (6.56)$$

$$C_{mz} = 0,90 + 0,10 \cdot 0,376 = 0,938$$

Współczynniki interakcji k_{ji} potrzebne do wyznaczenia do formuł interakcyjnych

Współczynniki interakcji k_{yy} , k_{yz} , k_{zy} , k_{zz} dla elementów niewrażliwych na deformacje skrętne. Wartości poszczególnych współczynników interakcji dla elementów niewrażliwych na deformacje skrętne ze względu na występujący pomijalnie mały moment skręcający wyznaczono na podstawie tablicy B.1 załącznika krajowego B do normy [N5] dla przekrojów klasy 1 i 2.

$$k_{yy} = C_{my} \cdot \left(1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \cdot \frac{N_{c,Ed}}{\chi_y \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) \quad (6.31)$$

$$k_{yy} = \min \left(k_{yy}, C_{my} \cdot \left(1 + 0,8 \cdot \frac{N_{c,Ed}}{\chi_y \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) \right) \quad (6.32)$$

$$k_{yz} = 0,6 \cdot C_{mz} \cdot \left(1 + (\bar{\lambda}_z - 0,2) \cdot \frac{N_{c,Ed}}{\chi_z \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) \quad (6.33)$$

$$k_{yz} = \min \left((k_{yz}; 0,6 \cdot C_{mz} \cdot \left(1 + 0,8 \cdot \frac{N_{c,Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) \right) \quad (6.34)$$

$$k_{zy} = 0,6 \cdot C_{mz} \cdot \left(1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \cdot \frac{N_{c,Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) \quad (6.35)$$

$$k_{zy} = \min \left(k_{zy}; 0,6 \cdot C_{my} \cdot \left(1 + 0,8 \cdot \frac{N_{c,Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) \right) \quad (6.36)$$

$$k_{zz} = C_{mz} \cdot \left(1 + (\bar{\lambda}_z - 0,2) \cdot \frac{N_{c,Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) \quad (6.37)$$

$$k_{zz} = \min \left((k_{zz}; C_{mz} \cdot \left(1 + 0,8 \cdot \frac{N_{c,Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) \right) \quad (6.38)$$

$$k_{yy} = 0,832 \cdot \left(1 + (0,516 - 0,2) \cdot \frac{1188,65}{0,92 \cdot \frac{2805,00}{1,00}} \right) = 0,953$$

$$k_{yy} = \min \left((0,953; 0,832 \cdot \left(1 + 0,8 \cdot \frac{1188,65}{0,92 \cdot \frac{2805,00}{1,00}} \right) \right) = 0,953$$

$$k_{yz} = 0,6 \cdot 0,938 \cdot \left(1 + (0,516 - 0,2) \cdot \frac{1188,65}{0,92 \cdot \frac{2805,00}{1,00}} \right) = 0,644$$

$$k_{yz} = \min \left((0,644; 0,6 \cdot 0,938 \cdot \left(1 + 0,8 \cdot \frac{1188,65}{0,92 \cdot \frac{2805,00}{1,00}} \right) \right) = 0,644$$

$$k_{zy} = 0,6 \cdot 0,832 \cdot \left(1 + (0,516 - 0,2) \cdot \frac{1188,65}{0,92 \cdot \frac{2805,00}{1,00}} \right) = 0,572$$

$$k_{zy} = \min \left((0,572; 0,6 \cdot 0,846 \cdot \left(1 + 0,8 \cdot \frac{1188,65}{0,92 \cdot \frac{2805,00}{1,00}} \right) \right) = 0,572$$

$$k_{zz} = 0,938 \cdot \left(1 + (0,516 - 0,2) \cdot \frac{1188,65}{0,92 \cdot \frac{2805,00}{1,00}} \right) = 1,074$$

$$k_{zz} = \min \left((1,074; 0,938 \cdot \left(1 + 0,8 \cdot \frac{1188,65}{0,92 \cdot \frac{2805,00}{1,00}} \right) \right) = 1,074$$

Warunki nośności elementów ściskanych i zginanych

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rk}}}{\gamma_{M1}} + k_{yy} \cdot \frac{\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rk}}}{\gamma_{M1}} + k_{yz} \cdot \frac{\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rk}}}{\gamma_{M1}} \leq 1 \quad (6.39)$$

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{Rk}}}{\gamma_{M1}} + k_{zy} \cdot \frac{\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rk}}}{\gamma_{M1}} + k_{zz} \cdot \frac{\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rk}}}{\gamma_{M1}} \leq 1 \quad (6.40)$$

$$\frac{\frac{1188,65}{0,92 \cdot 2805}}{1,00} + 0,953 \cdot \frac{\frac{48,69}{233,48}}{1,00} + 0,644 \cdot \frac{\frac{3,46}{233,48}}{1,00} = 0,67 \leq 1$$

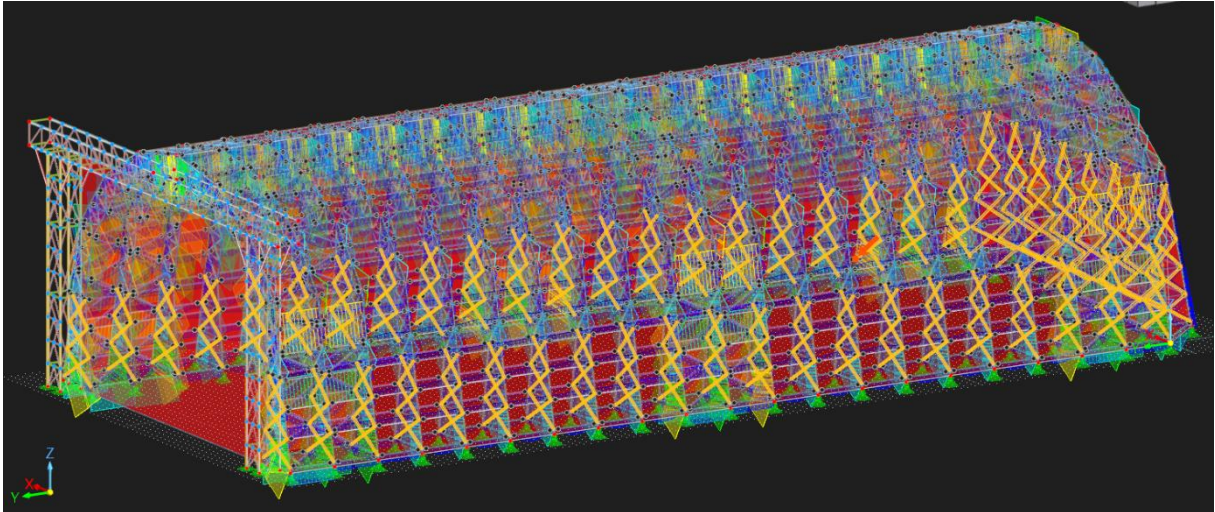
$$\frac{\frac{1188,65}{0,92 \cdot 2805}}{1,00} + 0,572 \cdot \frac{\frac{48,69}{233,48}}{1,00} + 1,074 \cdot \frac{\frac{3,46}{233,48}}{1,00} = 0,60 \leq 1$$

Wszystkie warunki nośności słupa nośnego dolnej części konstrukcji uwzględniające nośność przekroju oraz sprawdzenie jego stateczności zostały spełnione. Przyjęto kształtownik w postaci rury okrągłej CHS 273x12,5. Dodatkowo sprawdzono rurę okrągłą o grubości blachy 12,5, jednak w późniejszym etapie wymiarowania połączenia stalowego rury wraz z dwuteownikiem będącym oparciem dla górnej konstrukcji kratowej, warunek na docisk połączenia nie został spełniony, zatem zastosowano rurę o grubszej ścianie. Co więcej, zapewnia to większą sztywność dolnej części konstrukcji, a przez to przeanalizowany współczynnik krytyczny stateczności konstrukcji metodą numeryczną się zmniejszył.

6.6. Wymiarowanie krzyżulca i słupka dolnej części kratownicowej konstrukcji – pod oparciem łuku kratownicowego

Sily wewnętrzne występujące w elemencie

Krzyżulce dolnej części głównego układu konstrukcyjnego hangaru przyjęto jako kształtowniki w postaci rury okrągłej walcowanej na gorąco CHS139,7x6,3. Wszystkie podstawowe dane dotyczące właściwości tego oto kształtownika rurowego umieszczono w punkcie 5.3.3 w tabeli 5.4. Natomiast dane dotyczące podstawowych parametrów zastosowanej stali konstrukcyjnej znajdują się w punkcie 5.4 tabeli 5.9. Początkowo zastosowano rurę okrągłą o grubości ścianki 6 mm, jednak ze względu na brak dostępności rury o takiej ścianie, wykorzystano najbliższy odpowiednik czyli rurę okrągłą o ścianie 6,3 mm.



Rys. 6.6.1. Wymiarowane elementy konstrukcyjne hangaru – źródło własne

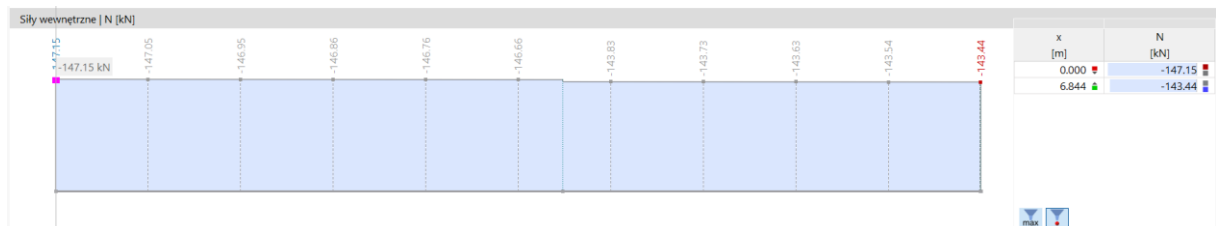
Siły wewnętrzne w wymiarowanym krzyżulcu dolnej części konstrukcji

Najbardziej niekorzystną kombinacją jest: **KO26**

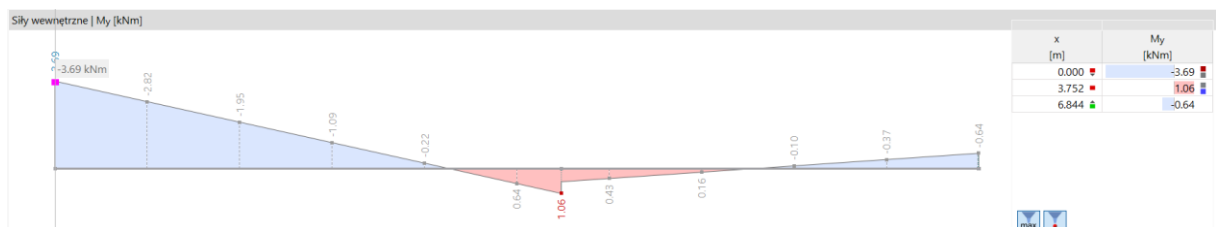
$$N_{Ed,K} = -147,15 \text{ kN}$$

$$M_{y,Ed} = -3,69 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Ed} = 0,68 \text{ kNm}$$

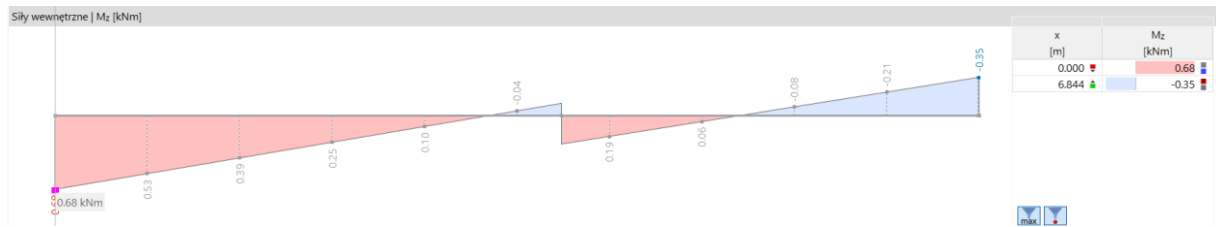


Rys. 6.6.2. Wykres sił wewnętrznych – siły normalne



Rys. 6.6.3. Wykres sił wewnętrznych – momenty zginające względem osi y

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ



Rys. 6.6.4. Wykres sił wewnętrznych – momenty zginające względem osi z

Klasyfikacja przekroju

Według normy [N5]

$$t_{max} = t_{f,k} = 6,3 \text{ mm} < 40 \text{ mm} \rightarrow f_y = 275 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (6.1)$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{275}} = 0,92$$

Przekrój zginany i ściskany

Według tablicy 5.2 (arkusz 3 z 3) normy [N5] warunek na klasę przekroju zginanego i ściskanego jednocześnie dla rur kołowych wygląda następująco

$$\frac{d}{t} \leq 90\varepsilon^2 \quad (6.47)$$

$$\frac{139,7}{6,3} = 22,17 \leq 90 \cdot (0,92)^2 = 76,18 \rightarrow \text{przekrój klasy 1}$$

Zastosowany kształtownik w postaci rury okrągłej CHS139,7x6,3 jest przekrojem klasy 1 ze względu na spełnione wszystkie powyższe warunki.

Nośność przekroju

Ściskanie

Obliczeniowa nośność krzyżulca na ściskanie

$$N_{c,Rd} = A \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \quad (6.4)$$

$$N_{c,Rd} = 26,40 \cdot 10^2 \cdot \frac{275}{1,00} = 726,00 \text{ kN}$$

Wytężenie przekroju krzyżulca poddanego osiowemu ściskaniu

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{N_{c,Rd}} \quad (6.5)$$

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

$$\eta = \frac{147,15}{726} = 0,20 \leq 1$$

Warunek nośności na ściskanie został spełniony.

Zginanie względem osi y

Obliczeniowa nośność przekroju na zginanie względem osi y

$$M_{pl,y,Rd} = W_{pl,y} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \quad (6.9)$$

$$M_{pl,y,Rd} = 112 \cdot 10^2 \cdot \frac{275}{1,00} = 30,80 \text{ kNm}$$

Wytężenie przekroju poddanego zginaniu względem osi y

$$\eta = \frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,y,Rd}} \quad (6.56)$$

gdzie: $M_{y,Ed}$ jest to obliczeniowy moment zginający względem osi y występujący w analizowanym przekroju w kNm, natomiast $M_{pl,y,Rd}$ jest to obliczeniowa nośność przekroju na zginanie w kNm.

$$\eta = \frac{3,69}{30,80} = 0,12 \leq 1$$

Warunek nośności przekroju ze względu na zginanie względem osi y został spełniony.

Nośność elementu z uwzględnieniem stateczności

Wyboczenie względem osi głównych y-y oraz z-z

Wyboczenie giętne względem osi głównej y-y

Zastosowanym kształtownikiem pełniącym rolę krzyżulców dolnej części konstrukcyjnej odtwarzanego hangaru na sterowce jest przekrój w postaci rury okrągłej CHS139,7x6,3. Zastosowany kształtownik jest przekrojem symetrycznym zatem wyboczenie względem osi głównej y-y oraz z-z są takie same gdyż momenty bezwładności przekroju względem dwóch osi z uwagi na symetrię są identyczne. Wszystkie wartości wyboczenia względem osi y i z oraz obliczone parametry będą miały taką samą wartość.

Sprężysta siła krytyczna względem osi y-y.

$$N_{cr,y} = N_{cr,z} = (\pi^2) \cdot E \cdot \frac{I_y}{(L_{cr,y})^2} \quad (6.16)$$

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

Długość wyboczeniowa krzyżulca dolnej części nośnej konstrukcji wynosi $L_{cr,y} = 6,844$ m. Jest to całkowita długość najdłuższego dolnego krzyżulca konstrukcji, czyli tego który będzie miał najdłuższą długość wyboczeniową.

$$N_{cr,y} = (\pi^2) \cdot 210000000 \cdot \frac{589 \cdot 10^4}{(6,844 \cdot 10^3)^2} = 260,63 \text{ kN}$$

Smukłość względna względem osi y dla przekrojów klasy 1, 2 oraz 3.

$$\overline{\lambda}_y = \overline{\lambda}_z = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr,y}}} \quad (6.17)$$

$$\overline{\lambda}_y = \sqrt{\frac{26,40 \cdot 275 \cdot 000}{260,63}} = 1,669$$

Parametr krzywej niestateczności χ

$$\phi_y = \phi_z = 0,5 \cdot [1 + \alpha_y \cdot (\overline{\lambda}_y - 0,2) + (\overline{\lambda}_y)^2] \quad (6.18)$$

Na podstawie tabeli 6.2 normy [N5] dla kształtowników w postaci rury okrągłej walcowanej na gorąco wyboczenie względem dowolnej osi przyjmuje postać wyboczenia krzywej a.

Parametr imperfekcji krzywej wyboczeniowej a to $\alpha = 0,21$

$$\phi_y = 0,5 \cdot [1 + 0,21 \cdot (1,669 - 0,2) + (1,669)^2] = 2,047$$

Wyboczeniowy współczynnik redukcyjny χ

$$\chi_y = \chi_z = \frac{1}{\phi_y + \sqrt{(\phi_y)^2 - (\overline{\lambda}_y)^2}} \quad (6.19)$$

$$\chi_y = \frac{1}{2,047 + \sqrt{(2,047)^2 - (1,669)^2}} = 0,31$$

Interakcja wyboczenia względem głównych osi y oraz z wraz z występującym momentem zginającym w krzyżulcach. Element zginany i ściskany jednocześnie.

Charakterystyczna nośność na ściskanie

$$N_{Rk} = A \cdot f_y \quad (6.24)$$

$$N_{Rk} = 26,40 \cdot 10^2 \cdot 275 = 726,00 \text{ kN}$$

Charakterystyczna nośność przekroju na zginanie względem osi y-y oraz z-z

$$M_{y,Rk} = 112,00 \cdot 10^3 \cdot 275 = 30,80 \text{ kN} \quad (6.25)$$

$$M_{z,Rk} = 112,00 \cdot 10^3 \cdot 275 = 30,80 \text{ kN} \quad (6.26)$$

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

Ze względu na występujący wykres momentów w postaci paraboli przechodzącej przez zero, wyznaczając współczynnik stosunku momentów przęsłowego do podporowego α_s postępujemy według tablicy B.3 załącznika do normy [N5].

$$\alpha_{s,y} = \frac{M_{s,y}}{M_{h,y}} \quad (6.53)$$

gdzie: $M_{h,y}$ jest to moment podporowy występujący na pręcie 303 względem osi y-y w kNm, a $M_{s,y}$ jest to moment przęsłowy występujący na pręcie 303 względem osi y-y w kNm.

$$\alpha_{s,y} = \frac{0,78}{-3,69} = -0,212$$

Współczynnik równoważnego stałego momentu C_m ,

Należy obliczyć dodatkowo współczynnik równoważnego momentu stałego na podstawie zadanego obciążenia oraz wartości współczynnika bezwymiarowego α_h . Obciążenie występuje w postaci obciążenia skupionego przekazywanego z górnej części kratownicowej części układu ramowego hangaru.

$$C_{my} = -0,80 \cdot \alpha_{s,y} \geq 0,4 \quad (6.57)$$

gdzie: $\alpha_{s,y}$ współczynnik stosunku momentów przęsłowego do podporowego α_s postępujemy według tablicy B.3 załącznika do normy [N5].

$$C_{my} = -0,80 \cdot (-0,212) = 0,169$$

Jednak zgodnie z Tablicą B.3 załącznika do normy [N5] minimalna wartość współczynnika C jest to 0.4.

W przypadku gdy nie spełniona jest podana nierówność wartość przyjętego współczynnika równoważnego stałego momentu wynosi $C_{my} = 0,4$.

Ze względu na występowanie momentu zginającego również na drugim kierunku osi głównych tj. z-z należy wyznaczyć taki sam współczynnik bezwymiarowy α_s dotyczący stosunku momentu przęsłowego do podporowego ale dla kierunku z-z.

$$\alpha_{s,z} = \frac{M_{s,z}}{M_{h,z}} \quad (6.55)$$

gdzie: $M_{h,z}$ jest to moment podporowy występujący na pręcie 303 względem osi z-z w kNm, a $M_{s,z}$ jest to moment przęsłowy występujący na pręcie 303 względem osi z-z w kNm.

$$\alpha_{s,z} = \frac{-0,04}{0,68} = -0,060$$

Współczynnik równoważnego stałego momentu C_m , względem osi z-z

$$C_{mz} = 0,20 \cdot (-\psi_z) - 0,80 \cdot \alpha_{s,z} \geq 0,4 \quad (6.56)$$

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

gdzie: $-\psi_z$ jest to stosunek momentów na końcach analizowanego pręta. W tym przypadku $\psi_z = -0,514$ na kierunku osi z tj. $\frac{-0,35}{0,68} = -0,514$.

$$C_{mz} = 0,20 \cdot (-(-0,514)) - 0,80 \cdot -0,060 = 0,151$$

Jednak zgodnie z Tablicą B.3 załącznika do normy [N5] minimalna wartość współczynnika C jest to 0.4.

W przypadku gdy nie spełniona jest podana nierówność wartość przyjętego współczynnika równoważnego stałego momentu wynosi $C_{mz} = 0,4$.

Współczynniki interakcji k_{yy} , k_{yz} , k_{zy} , k_{zz} dla elementów niewrażliwych na deformacje skrętne

Wartości poszczególnych współczynników interakcji dla elementów niewrażliwych na deformacje skrętne ze względu na występujący pomijalnie mały moment skręcający wyznaczono na podstawie tablicy B.1 załącznika krajowego B do normy [N5] dla przekrojów klasy 1 i 2.

$$k_{yy} = C_{my} \cdot \left(1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \cdot \frac{N_{c,Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) \quad (6.31)$$

$$k_{yy} = \min \left(k_{yy}, C_{my} \cdot \left(1 + 0,8 \cdot \frac{N_{c,Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) \right) \quad (6.32)$$

$$k_{yz} = 0,6 \cdot C_{mz} \cdot \left(1 + (\bar{\lambda}_z - 0,2) \cdot \frac{N_{c,Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) \quad (6.33)$$

$$k_{yz} = \min \left(k_{yz}, 0,6 \cdot C_{mz} \cdot \left(1 + 0,8 \cdot \frac{N_{c,Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) \right) \quad (6.34)$$

$$k_{zy} = 0,6 \cdot C_{mz} \cdot \left(1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \cdot \frac{N_{c,Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) \quad (6.35)$$

$$k_{zy} = \min \left(k_{zy}, 0,6 \cdot C_{mz} \cdot \left(1 + 0,8 \cdot \frac{N_{c,Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) \right) \quad (6.36)$$

$$k_{zz} = C_{mz} \cdot \left(1 + (\bar{\lambda}_z - 0,2) \cdot \frac{N_{c,Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) \quad (6.37)$$

$$k_{zz} = \min \left(k_{zz}, C_{mz} \cdot \left(1 + 0,8 \cdot \frac{N_{c,Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) \right) \quad (6.38)$$

$$k_{yy} = 0,400 \cdot \left(1 + (1,669 - 0,2) \cdot \frac{147,15}{0,31 \cdot \frac{726,00}{1,00}} \right) = 0,785$$

$$k_{yy} = \min \left((0,785; 0,400 \cdot \left(1 + 0,8 \cdot \frac{147,15}{0,31 \cdot \frac{726,00}{1,00}} \right) \right) = 0,610$$

$$k_{yz} = 0,6 \cdot 0,400 \cdot \left(1 + (1,669 - 0,2) \cdot \frac{147,15}{0,31 \cdot \frac{726,00}{1,00}} \right) = 0,471$$

$$k_{yz} = \min \left((0,471; 0,6 \cdot 0,400 \cdot \left(1 + 0,8 \cdot \frac{147,15}{0,31 \cdot \frac{726,00}{1,00}} \right) \right) = 0,366$$

$$k_{zy} = 0,6 \cdot 0,400 \cdot \left(1 + (1,669 - 0,2) \cdot \frac{147,15}{0,31 \cdot \frac{726,00}{1,00}} \right) = 0,471$$

$$k_{zy} = \min \left((0,471; 0,6 \cdot 0,400 \cdot \left(1 + 0,8 \cdot \frac{147,15}{0,31 \cdot \frac{726,00}{1,00}} \right) \right) = 0,366$$

$$k_{zz} = 0,400 \cdot \left(1 + (1,669 - 0,2) \cdot \frac{147,15}{0,31 \cdot \frac{726,00}{1,00}} \right) = 0,785$$

$$k_{zz} = \min \left((0,785; 0,400 \cdot \left(1 + 0,8 \cdot \frac{147,15}{0,31 \cdot \frac{726,00}{1,00}} \right) \right) = 0,610$$

Warunki nośności elementów ściskanych i zginanych

$$\frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_y \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1 \quad (6.39)$$

$$\frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_z \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1 \quad (6.40)$$

$$\frac{147,15}{\frac{0,31 \cdot 726,00}{1,00}} + 0,610 \cdot \frac{3,69}{\frac{30,80}{1,00}} + 0,366 \cdot \frac{0,68}{\frac{30,80}{1,00}} = 0,74 \leq 1$$

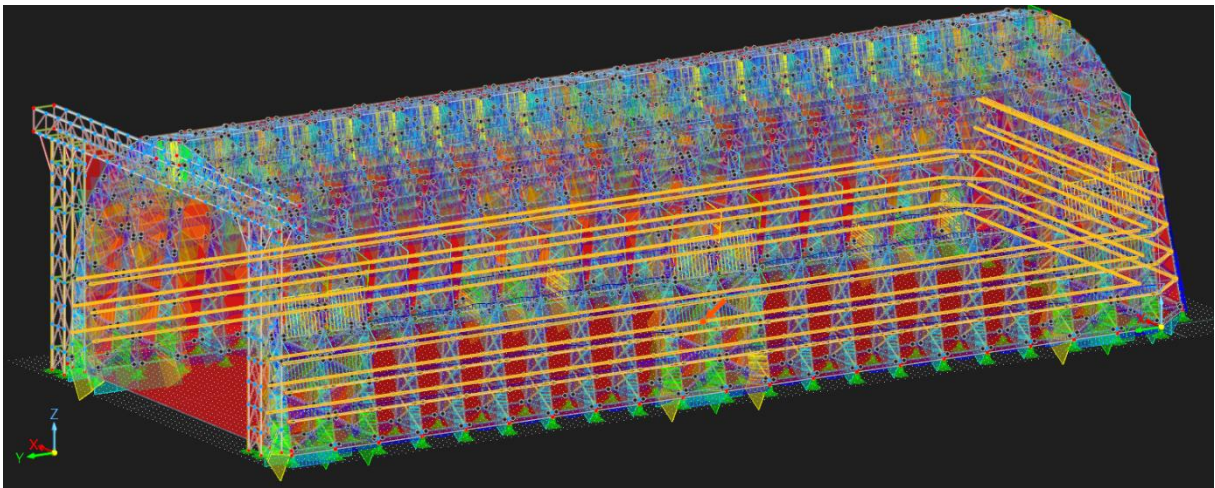
$$\frac{147,15}{\frac{0,31 \cdot 726,00}{1,00}} + 0,366 \cdot \frac{3,69}{\frac{30,80}{1,00}} + 0,610 \cdot \frac{0,68}{\frac{30,80}{1,00}} = 0,71 \leq 1$$

Wszystkie warunki nośności słupków oraz krzyżulców dolnej części konstrukcji budujący tak zwany „koziół” uwzględniające nośność przekroju oraz sprawdzenie jego stateczności zostały spełnione. Przyjęto kształtownik w postaci rury okrągłej CHS 139,7x6,3.

6.7. Wymiarowanie belek łączących dolne części głównych układów ramowych

Siły wewnętrzne występujące w elemencie

Belki łączące główne układy konstrukcyjne odtwarzanego hangaru wykonano z kształtownika dwuteowego HEA 140. Są one połączone w sposób przegubowy aby zapewnić odpowiednią pracę konstrukcji hangaru. Ich zadaniem jest zapewniać konstrukcji odpowiednią sztywność oraz przenosić oddziaływania wiatru ze ścian konstrukcji na układy ramowe hangaru. Wszystkie podstawowe dane dotyczące właściwości tego kształtownika dwuteowego umieszczono w punkcie 5.3.4 w tabeli 5.5. Natomiast dane dotyczące podstawowych parametrów zastosowanej stali konstrukcyjnej znajdują się w punkcie 5.4 tabeli 5.9.

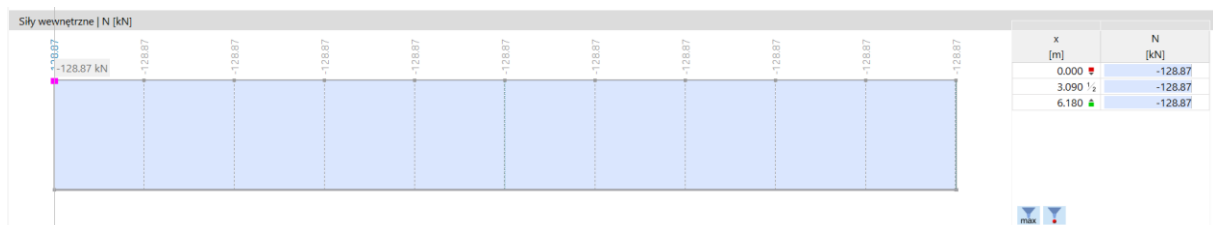


Rys. 6.7.1. Wymiarowane elementy konstrukcyjne hangaru – źródło własne

Siły wewnętrzne w wymiarowanej belce

Najbardziej niekorzystną kombinacją jest: **KO25**

$$N_{Ed,S} = -128,87 \text{ kN},$$



Rys. 6.7.2. Wykres sił wewnętrznych – siły normalne

Klasyfikacja przekroju

Według normy [N5]

$$t_{max} = t_{f,c} = 8,5 \text{ mm} < 40 \text{ mm} \rightarrow f_y = 275 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (6.8)$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{275}} = 0,92$$

Środek ściskany

$$\frac{c}{t} = \frac{d_g}{t_{w,g}} < 33\varepsilon \rightarrow \text{klasa 1 przekroju} \quad (6.9)$$

$$\frac{c}{t} = \frac{92}{5,5} = 16,73$$

Wartości graniczne według normy [N5], tablicy 5.2.

$$\frac{c}{t} = 16,73 < 33\varepsilon = 33 \cdot 0,92 = 30,36 \rightarrow \text{przekrój klasy 1}$$

Pas ściskany

$$\frac{c}{t} = \frac{b_g - t_{wg} - 2r_g}{2t_{fg}} \quad (6.10)$$

$$\frac{c}{t} = \frac{140 - 5,5 - 2 \cdot 12}{2 \cdot 8,5} = 6,50$$

Wartości graniczne według normy [N5], tablicy 5.2.

$$\frac{c}{t} < 9\varepsilon \quad (6.11)$$

$$\frac{c}{t} = 6,50 < 9 \cdot 0,92 = 8,28 \rightarrow \text{przekrój klasy 1}$$

Zastosowany kształtownik HEA 140 jest przekrojem klasy 1 ze względu na spełnione wszystkie powyższe warunki.

Nośność przekroju

Ściskanie

Obliczeniowa nośność przekroju równomiernie ściskanego klasy 1

$$N_{c,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (6.4)$$

$$N_{c,Rd} = \frac{31,40 \cdot 10^2 \cdot 275 \cdot 10^{-3}}{1,00} = 863,50 \text{ kN}$$

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

$$N_{Ed} = 128,87 \text{ kN} < N_{pl,Rd} = 863,50 \text{ kN}$$

Wyteżenie przekroju poddanego osiowemu ścisnaniu

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{N_{c,Rd}} \quad (6.5)$$

$$\eta = \frac{128,87}{863,50} = 0,15 \leq 1,00$$

Warunek nośności przekroju na ścisnienie został spełniony.

Nośność elementu z uwzględnieniem stateczności

Wyboczenie giętne względem osi głównej y-y (w płaszczyźnie belki)

Długość wyboczeniowa belki łączącej poszczególne układy ramowe między sobą jest to cała długość rzeczywista belki ze względu na nie występowanie żadnych podpór lub stężeń skracających długość wyboczeniową elementu. Długość wyboczeniowa względem osi głównej y jest to: $L_{cr,y} = 6,180 \text{ m}$

Krytyczna siła sprężysta

$$N_{cr,y} = (\pi^2) \cdot E \cdot \frac{I_y}{(L_{cr,y})^2} \quad (6.16)$$

$$N_{cr,y} = (\pi^2) \cdot 210000 \cdot \frac{1030 \cdot 10^4}{(6180)^2} = 558,96 \text{ kN}$$

Smukłość względna względem osi y dla przekrojów klasy 1, 2 oraz 3.

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr,y}}} \quad (6.17)$$

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{31,40 \cdot 10^2 \cdot 275}{558,96}} = 1,243$$

Ograniczenia przyporządkowujące odpowiednie krzywe wyboczenia do danego elementu i typu jego przekroju

$$\frac{h_g}{b_g} = \frac{133 \text{ mm}}{140 \text{ mm}} = 0,95 \leq 1,2 \quad i \quad t_{fg} = 8,5 \text{ mm} \leq 100 \text{ mm}$$

Na podstawie ograniczeń przyjęto krzywą wyboczeniową b według tablicy 6.2 [N5].

Parametr imperfekcji według tablicy 6.1 normy [N5], $\alpha = 0,34$.

Parametr krzywej niestateczności χ

$$\phi_y = 0,5 \cdot [1 + \alpha_y \cdot (\bar{\lambda}_y - 0,2) + (\bar{\lambda}_y)^2] \quad (6.18)$$

$$\phi_y = 0,5 \cdot [1 + 0,34 \cdot (1,243 - 0,2) + (1,243)^2] = 1,45$$

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

Wyboczeniowy współczynnik redukcyjny χ

$$\chi_y = \frac{1}{\phi_y + \sqrt{(\phi_y)^2 - (\bar{\lambda}_y)^2}} \quad (6.19)$$

$$\chi_y = \frac{1}{1,45 + \sqrt{(1,45)^2 - (1,243)^2}} = 0,46$$

Obliczeniowa nośność przekroju ściskanego na wyboczenie względem osi y

$$N_{b,y,Rd} = \chi_y \cdot A \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \quad (6.43)$$

$$N_{b,y,Rd} = 0,46 \cdot 31,40 \cdot 10^2 \cdot \frac{275}{1,00} = 393,23 \text{ kN}$$

Wyężenie przekroju ze względu na stateczność – wyboczenie giętne względem osi z

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{N_{b,y,Rd}} \quad (6.44)$$

$$\eta = \frac{128,87}{393,23} = 0,33 \leq 1$$

Warunek obliczeniowej nośności przekroju na wyboczenie pręta ściskanego względem osi y został spełniony.

Wyboczenie giętne względem osi głównej z-z (z płaszczyzny belki)

Sprężysta siła krytyczna

$$N_{cr,z} = (\pi^2) \cdot E \cdot \frac{I_z}{(L_{cr,z})^2} \quad (6.16)$$

Belka nie jest stężona na całej swojej długości ani na kierunku y, ani na kierunku z. Ze względu na brak dodatkowych podpór zmniejszających długość wyboczeniową elementu, długość wyboczeniowa względem osi z wynosi: $L_{cr,z} = 6,180 \text{ m}$.

$$N_{cr,z} = (\pi^2) \cdot 210\,000 \cdot \frac{389 \cdot 10^4}{(6180)^2} = 211,10 \text{ kN}$$

Smukłość bezwymiarowa względem osi z dla przekrojów klasy 1, 2 oraz 3.

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr,z}}} \quad (6.17)$$

gdzie: A jest to pole przekroju kształownika w mm^2 , f_y jest to granica plastyczności stali w MPa, a $N_{cr,z}$ jest to sprężysta siła krytyczna względem osi z-z.

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{31,40 \cdot 275}{211,10}} = 2,022$$

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

Parametr krzywej niestateczności χ

$$\phi_z = 0,5 \cdot \left[1 + \alpha_z \cdot (\bar{\lambda}_z - 0,2) + (\bar{\lambda}_z)^2 \right] \quad (6.18)$$

Ograniczenia przyporządkowujące odpowiednie krzywe wyboczenia do danego elementu i typu jego przekroju

$$\frac{h_g}{b_g} = \frac{133}{140} = 0,95 \leq 1,2 \quad i \quad t_{fg} = 8,5 \leq 100$$

Na podstawie tabeli 6.2 normy [N5] oraz powyższych warunków krzywa wyboczeniowa względem osi z-z ma postać krzywej c.

Parametr imperfekcji krzywej wyboczeniowej c to $\alpha = 0,49$

$$\phi_z = 0,5 \cdot \left[1 + 0,49 \cdot (2,022 - 0,2) + (2,022)^2 \right] = 2,992$$

Wyboczeniowy współczynnik redukcyjny χ

$$\chi_z = \frac{1}{\phi_z + \sqrt{(\phi_z)^2 - (\bar{\lambda}_z)^2}} \quad (6.19)$$

$$\chi_z = \frac{1}{2,992 + \sqrt{(2,992)^2 - (2,022)^2}} = 0,19$$

Obliczeniowa nośność przekroju ściskanego na wyboczenie względem osi z

$$N_{b,z,Rd} = \chi_z \cdot A \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \quad (6.43)$$

$$N_{b,z,Rd} = 0,19 \cdot 31,40 \cdot 10^2 \cdot \frac{275}{1,00} = 166,18 \text{ kN}$$

Wytężenie przekroju ze względu na stateczność – wyboczenie giętne względem osi z

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{N_{b,z,Rd}} \quad (6.44)$$

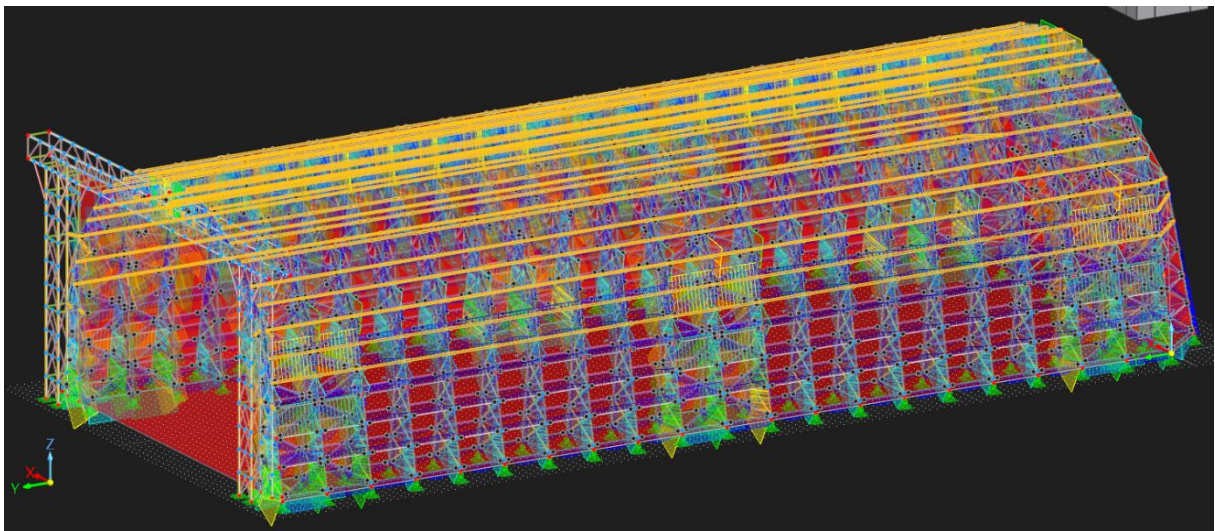
$$\eta = \frac{128,87}{166,18} = 0,78 \leq 1$$

Warunek obliczeniowej nośności przekroju na wyboczenie pręta ściskanego względem osi y został spełniony.

6.8. Wymiarowanie belek łączących górne kratownice odtwarzanego hangaru

Siły wewnętrzne występujące w elemencie

Belki łączące główne układy konstrukcyjne odtwarzanego hangaru wykonano z kształtownika dwuteowego HEA 140. Są one połączone w sposób przegubowy aby zapewnić odpowiednią pracę konstrukcji hangaru. Ich zadaniem jest zapewniać konstrukcji odpowiednią sztywność oraz przenosić oddziaływania wiatru ze ścian konstrukcji na układy ramowe hangaru. Wszystkie podstawowe dane dotyczące właściwości tego kształtownika dwuteowego umieszczono w punkcie 5.3.4 w tabeli 5.5. Natomiast dane dotyczące podstawowych parametrów zastosowanej stali konstrukcyjnej znajdują się w punkcie 5.4 tabeli 5.9.

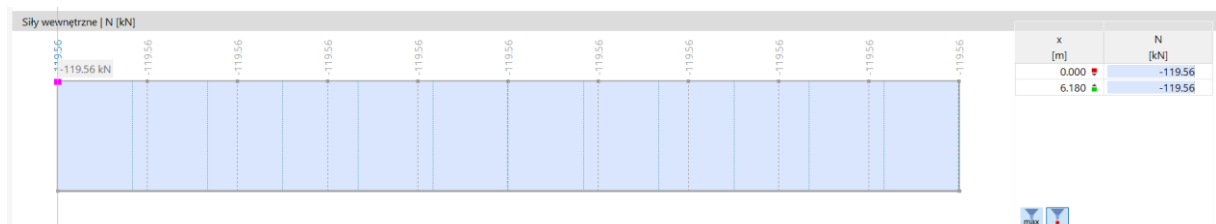


Rys. 6.8.1. Wymiarowane elementy konstrukcyjne hangaru – źródło własne

Siły wewnętrzne w wymiarowanej belce (płatwi).

Najbardziej niekorzystną kombinacją jest: **KO42**

$$N_{Ed,S} = -119,56 \text{ kN},$$



Rys. 6.8.2. Wykres sił wewnętrznych – siły normalne – źródło własne

Klasyfikacja przekroju

Według normy [N5]

$$t_{max} = t_{f,c} = 8,5 \text{ mm} < 40 \text{ mm} \rightarrow f_y = 275 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (6.12)$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{275}} = 0,92$$

Środek ściskany

$$\frac{c}{t} = \frac{d_g}{t_{w,g}} < 33\varepsilon \rightarrow \text{klasa 1 przekroju} \quad (6.13)$$

$$\frac{c}{t} = \frac{92}{5,5} = 16,73$$

Wartości graniczne według normy [N5], tablicy 5.2.

$$\frac{c}{t} = 16,73 < 33\varepsilon = 33 \cdot 0,92 = 30,36 \rightarrow \text{przekrój klasy 1}$$

Pas ściskany

$$\frac{c}{t} = \frac{b_g - t_{wg} - 2r_g}{2t_{fg}} \quad (6.14)$$

$$\frac{c}{t} = \frac{140 - 5,5 - 2 \cdot 12}{2 \cdot 8,5} = 6,50$$

Wartości graniczne według normy [N5], tablicy 5.2.

$$\frac{c}{t} < 9\varepsilon \quad (6.15)$$

$$\frac{c}{t} = 6,50 < 9 \cdot 0,92 = 8,28 \rightarrow \text{przekrój klasy 1}$$

Zastosowany kształtownik HEA 140 jest przekrojem klasy 1 ze względu na spełnione wszystkie powyższe warunki.

Nośność przekroju

Ściskanie

Obliczeniowa nośność przekroju równomiernie ściskanego klasy 1

$$N_{c,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (6.4)$$

$$N_{c,Rd} = \frac{31,40 \cdot 10^2 \cdot 275 \cdot 10^{-3}}{1,00} = 863,50 \text{ kN}$$

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

$$N_{Ed} = 119,56 \text{ kN} < N_{pl,Rd} = 863,50 \text{ kN}$$

Wyężenie przekroju poddanego osiowemu ściskaniu

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{N_{c,Rd}} \quad (6.5)$$

$$\eta = \frac{119,56}{863,50} = 0,14 \leq 1,00$$

Warunek nośności przekroju na ściskanie został spełniony.

Nośność elementu z uwzględnieniem stateczności

Wyboczenie giętnie względem osi głównej y-y (w płaszczyźnie belki)

Długość wyboczeniowa belki łączącej poszczególne układy ramowe między sobą jest to cała długość rzeczywista belki ze względu na nie występowanie żadnych podpór lub stężeń skracających długość wyboczeniową elementu. Belka w odtwarzanym hangarze pełni funkcję płatwi. Jej zadaniem jest przenieść obciążenia na główne układy ramowe hangaru oraz zapewnić odpowiednią sztywność konstrukcji. Długość wyboczeniowa względem osi głównej y jest to: $L_{cr,y} = 6,180 \text{ m}$

Krytyczna siła sprężysta

$$N_{cr,y} = (\pi^2) \cdot E \cdot \frac{I_y}{(L_{cr,y})^2} \quad (6.16)$$

$$N_{cr,y} = (\pi^2) \cdot 210000 \cdot \frac{1030 \cdot 10^4}{(6180)^2} = 558,96 \text{ kN}$$

Smukłość względna względem osi y dla przekrojów klasy 1, 2 oraz 3.

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr,y}}} \quad (6.17)$$

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{31,40 \cdot 10^2 \cdot 275}{558,96}} = 1,243$$

Ograniczenia przyporządkowujące odpowiednie krzywe wyboczenia do danego elementu i typu jego przekroju

$$\frac{h_g}{b_g} = \frac{133 \text{ mm}}{140 \text{ mm}} = 0,95 \leq 1,2 \quad i \quad t_{fg} = 8,5 \text{ mm} \leq 100 \text{ mm}$$

Na podstawie ograniczeń przyjęto krzywą wyboczeniową b według tablicy 6.2 [N5].

Parametr imperfekcji według tablicy 6.1 normy [N5], $\alpha = 0,34$.

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

Parametr krzywej niestateczności χ

$$\phi_y = 0,5 \cdot [1 + \alpha_y \cdot (\bar{\lambda}_y - 0,2) + (\bar{\lambda}_y)^2] \quad (6.18)$$

$$\phi_y = 0,5 \cdot [1 + 0,34 \cdot (1,243 - 0,2) + (1,243)^2] = 1,45$$

Wyboczeniowy współczynnik redukcyjny χ

$$\chi_y = \frac{1}{\phi_y + \sqrt{(\phi_y)^2 - (\bar{\lambda}_y)^2}} \quad (6.19)$$

$$\chi_y = \frac{1}{1,45 + \sqrt{(1,45)^2 - (1,243)^2}} = 0,46$$

Obliczeniowa nośność przekroju ściskanego na wyboczenie względem osi y

$$N_{b,y,Rd} = \chi_y \cdot A \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \quad (6.43)$$

$$N_{b,y,Rd} = 0,46 \cdot 31,40 \cdot 10^2 \cdot \frac{275}{1,00} = 393,23 \text{ kN}$$

Wytężenie przekroju ze względu na stateczność – wyboczenie giętne względem osi y

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{N_{b,y,Rd}} \quad (6.44)$$

$$\eta = \frac{119,56}{393,23} = 0,30 \leq 1$$

Warunek obliczeniowej nośności przekroju na wyboczenie pręta ściskanego względem osi y został spełniony.

Wyboczenie giętne względem osi głównej z-z (z płaszczyzny belki)

Sprężysta siła krytyczna

$$N_{cr,z} = (\pi^2) \cdot E \cdot \frac{I_z}{(L_{cr,z})^2} \quad (6.16)$$

Belka nie jest stężona na całej swojej długości ani na kierunku y, ani na kierunku z. Ze względu na brak dodatkowych podpór zmniejszających długość wyboczeniową elementu, długość wyboczeniowa względem osi z wynosi: $L_{cr,z} = 6,180 \text{ m}$.

$$N_{cr,z} = (\pi^2) \cdot 210\,000 \cdot \frac{389 \cdot 10^4}{(6180)^2} = 211,10 \text{ kN}$$

Smukłość bezwymiarowa względem osi z dla przekrojów klasy 1, 2 oraz 3.

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr,z}}} \quad (6.17)$$

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{31,40 \cdot 275}{211,10}} = 2,022$$

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

Parametr krzywej niestateczności χ

$$\phi_z = 0,5 \cdot [1 + \alpha_z \cdot (\bar{\lambda}_z - 0,2) + (\bar{\lambda}_z)^2] \quad (6.18)$$

Ograniczenia przyporządkowujące odpowiednie krzywe wyboczenia do danego elementu i typu jego przekroju

$$\frac{h_g}{b_g} = \frac{133}{140} = 0,95 \leq 1,2 \quad i \quad t_{fg} = 8,5 \leq 100$$

Na podstawie tabeli 6.2 normy [N5] oraz powyższych warunków krzywa wyboczeniowa względem osi z-z ma postać krzywej c.

Parametr imperfekcji krzywej wyboczeniowej c to $\alpha = 0,49$

$$\phi_z = 0,5 \cdot [1 + 0,49 \cdot (2,022 - 0,2) + (2,022)^2] = 2,992$$

Wyboczeniowy współczynnik redukcyjny χ

$$\chi_z = \frac{1}{\phi_z + \sqrt{(\phi_z)^2 - (\bar{\lambda}_z)^2}} \quad (6.19)$$

$$\chi_z = \frac{1}{2,992 + \sqrt{(2,992)^2 - (2,022)^2}} = 0,19$$

Obliczeniowa nośność przekroju ściskanego na wyboczenie względem osi z

$$N_{b,z,Rd} = \chi_z \cdot A \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \quad (6.43)$$

$$N_{b,z,Rd} = 0,19 \cdot 31,40 \cdot 10^2 \cdot \frac{275}{1,00} = 166,18 \text{ kN}$$

Wyężenie przekroju ze względu na stateczność – wyboczenie giętnie względem osi z

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{N_{b,z,Rd}} \quad (6.44)$$

$$\eta = \frac{119,56}{166,18} = 0,72 \leq 1$$

Warunek obliczeniowej nośności przekroju na wyboczenie pręta ściskanego względem osi z został spełniony. Wszystkie zaprojektowane wyżej przekroje będące głównymi elementami odtwarzanego hangaru spełniły wszystkie sprawdzane warunki zarówno nośności zastosowanego przekroju stalowego, ale również warunki stateczności zaprojektowanego element. Ze względu na to, że odtwarzany hangar jest konstrukcji stalowej, wykorzystane przekroje są mniejszych wymiarów niż przekroje oryginalne. Wpływa na to materiał z jakiego był zbudowany pierwowzór czyli drewno, oraz tamtejsze normy projektowe i wartości obciążeń zbieranych na konstrukcję. Odtwarzany hangar spełnia wszystkie założenia projektowe oraz obowiązujące normy i akty prawne zapewniające bezpieczeństwo i trwałość konstrukcji. W

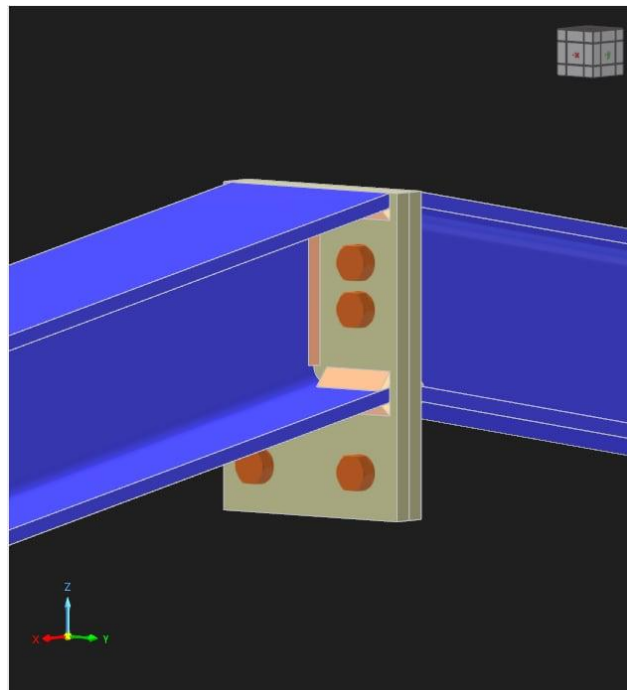
PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

pracy analitycznie zwymiarowano główne układy nośne konstrukcji. Hangar posiadał również ścianę tylną, która została dodatkowo zwymiarowana numerycznie w programie do obliczeń i analizy statyczno-wytrzymałościowej RFEM 6. Uzyskane wyniki oraz wytyżenia przekrojów załączono do pracy jako notatka obliczeniowa wyeksportowana z programu obliczeniowego. Dzięki zwymiarowaniu również tylnej ściany hangaru uzyskano całkowitą bryłę odtwarzanej konstrukcji. Wyniki wykorzystano podczas analizy nośności zaprojektowanych połączeń stalowych. Po procesie wymiarowania konstrukcja została zamodelowana w programie Tekla Structures a następnie wygenerowano dokumentację techniczną konstrukcji (rysunki zestawcze wraz z rysunkami zespołów wysyłkowych).

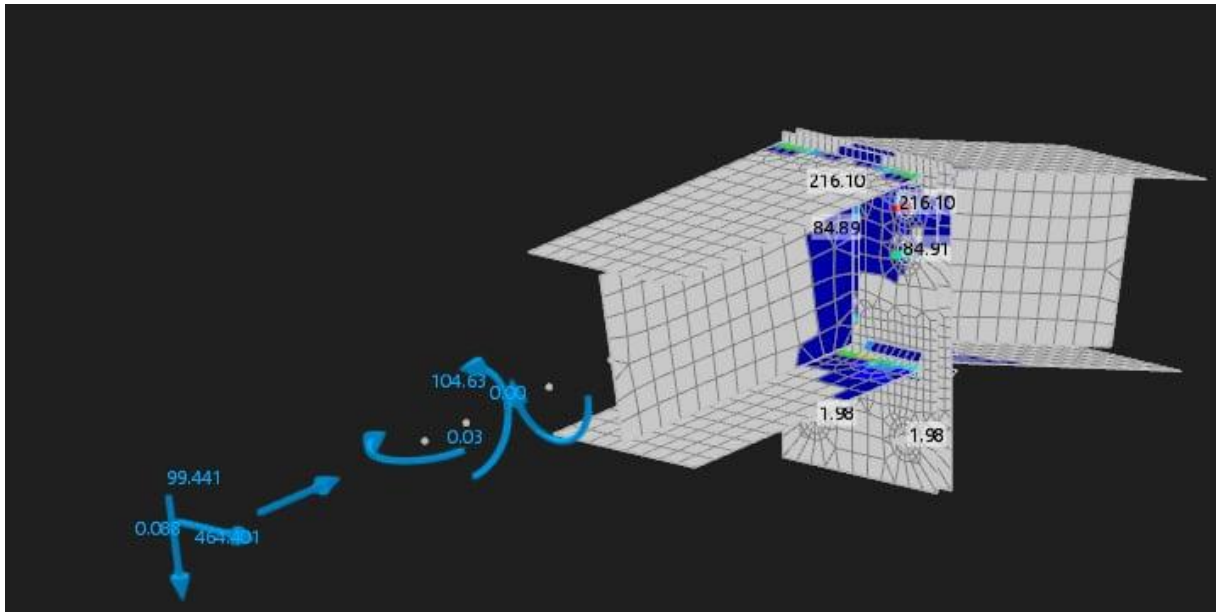
7. Wymiarowanie połączeń elementów konstrukcji stalowe

7.1. Styk ciągły doczołowy (kalenicowy) pasa górnego kratownicowego łuku konstrukcji hangaru.

Zaprojektowano styk kalenicowy pasa górnego łukowej kratownicy hangaru z kształtownika HEB 220 ze stali S275J0 z blachami czołowymi 20x240x350 połączonymi śrubami M22, kl. 10.9. Styk został obciążony siłami wewnętrznymi występującymi w projektowanym węźle nr 931.



Rys. 7.1.1. Model 3D połączenia styku kalenicowego pasów górnych kratownicy –
źródło własne



Rys. 7.1.2. Model 3D połączenia styku kalenicowego pasów górnych kratownicy –
rozkład naprężeń w analizowanym połączeniu - źródło własne

Sily wewnętrzne występujące w połączeniu

Sila rozciągająca - $F_{t,Ed} = 216,10 \text{ kN}$,

Sila tnąca - $F_{v,Ed} = 0,82 \text{ kN}$,

Dane projektowe

Pas górny kratownicy łukowej konstrukcji – HEB 220 – tabela 5.2, punkt 5.3.1,

Stal S275J0 – tabela 5.9, punkt 5.4,

Blacha czołowa:

$$b_{ep} = 240,0 \text{ mm}, h_{ep} = 310,0 \text{ mm}, t_{ep} = 20,0 \text{ mm}, w = 140,0 \text{ mm},$$

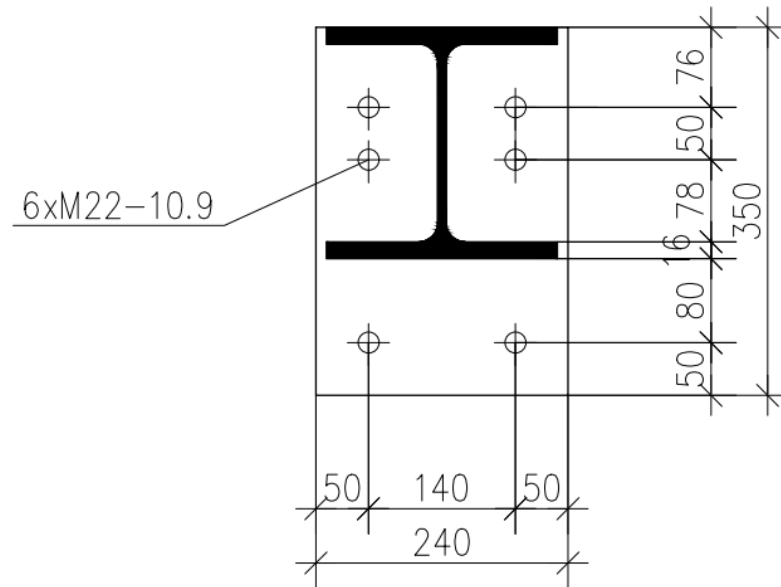
$$e_x = 50 \text{ mm}, e_p = 60 \text{ mm}.$$

Śruby M22, kl.10,9:

$$d = 22 \text{ mm}, A_s = 303 \text{ mm}^2, d_m = 34 \text{ mm}, f_{yb} = 900 \text{ MPa}, f_{ub} = 1000 \text{ MPa}.$$

Współczynniki częściowe:

$$\gamma_{M0} = 1,00, \quad \gamma_{M2} = 1,25, \quad \gamma_{M5} = 1,00,$$



Rys. 7.1.3. Rozstawy oraz wymiary otworów w projektowanym węźle - źródło własne

Zgodnie z punktem 3.5 tj. Rozmieszczenie otworów na śruby normy [N5], rozstawy i odległości śrub zaproponowane w projektowanym połączeniu są spełnione gdyż:

- odległość czołowa e_1 – $\min 1,2d_0 = 1,2 \cdot 22 = 26,4$ mm. Minimalna odległość została spełniona.
- odległość boczna e_2 – $\min 1,2d_0 = 1,2 \cdot 22 = 26,4$ mm. Minimalna odległość została spełniona.
- rozstaw p – $\min 2,2d_0 = 2,2 \cdot 22 = 48,4$ mm. Minimalny rozstaw p również został spełniony. Wszystkie wyżej wymienione minimalne wymagane odległości zostały spełnione. Konstrukcyjnie rozstawy śrub zostały przyjęte w poprawny sposób.

Nośność na ścinanie w jednej płaszczyźnie

Nośność na ścinanie zgodnie z punktem 3.6.1. tab.3.4, normy [N5]

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v f_{ub} A_s}{\gamma_{M2}} \quad (7.1)$$

gdzie: α_v jest to współczynnik zależy od płaszczyzny ścinania przechodzącej przez gwintowaną część śruby oraz klasy śruby w tym przypadku $\alpha_v = 0,5$, f_{ub} jest to wytrzymałość na rozciąganie śruby zgodna z jej klasą w MPa, A_s jest to pole przekroju czynnego śruby w mm^2 , natomiast γ_{M2} jest to współczynnik częściowy .

$$F_{v,Rd} = \frac{0,5 \cdot 1000 \cdot 303}{1,25} = 121,20 \text{ kN}$$

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

Wykorzystanie

$$\eta_{Fv} = \frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} \leq 1 \quad (7.2)$$

gdzie: $F_{v,Ed}$ jest to obliczeniowa siła tnąca występująca w analizowanym węźle w kN, a $F_{v,Rd}$ jest to obliczeniowa nośność węzła na ścianie w kN.

$$\eta_{Fv} = \frac{0,82}{121,20} = 0,01 \leq 1$$

Warunek na nośność na ścinanie w jednej płaszczyźnie został spełniony.

Nośność na docisk

Zgodnie z punktem 3.6.1. tab.3.4, normy [N5] prostopadle do kierunku obciążenia przyjmujemy:

Skrajne położenie śruby, po lewej od kierunku działania siły

$$k_{1,l} = \min \left(2,8 \cdot \left(\frac{e_{2,l}}{d_0} \right) - 1,7; 2,5 \right) \quad (7.3)$$

gdzie: $e_{2,l}$ jest to odległość od śruby, krawędzi płyty w kierunku prostopadłym do wynikowej siły docisku w mm, d_0 jest to średnica otworu w mm.

$$k_{1,l} = \min \left(2,8 \cdot \left(\frac{50}{24,0} \right) - 1,7; 2,5 \right) = 2,50$$

Skrajne położenie śruby, po prawej od kierunku działania siły

$$k_{1,p} = \min \left(2,8 \cdot \left(\frac{e_{2,p}}{d_0} \right) - 1,7; 2,5 \right) \quad (7.4)$$

gdzie: $e_{2,p}$ jest to odległość od śruby, krawędzi płyty w kierunku prostopadłym do wynikowej siły docisku w mm, d_0 jest to średnica otworu w mm.

$$k_{1,p} = \min \left(2,8 \cdot \left(\frac{50}{24,0} \right) - 1,7; 2,5 \right) = 2,50$$

Współczynnik k_1 ma zatem wartość równą 2,50.

Skrajne położenie śruby w kierunku działania siły

$$\alpha_b = \min \left(\frac{e_1}{3 \cdot d_0}, \frac{f_{ub}}{f_u}, 1 \right) \quad (7.5)$$

gdzie: e_1 jest to odległość od śruby do krawędzi płyty w kierunku wynikowej siły docisku w mm, d_0 jest to średnica otworu w mm, f_{ub} jest to wytrzymałość na rozciąganie śruby w MPa, natomiast f_u jest to granica wytrzymałości blachy na rozciąganie w MPa.

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

$$\alpha_b = \min\left(\frac{50}{3 \cdot 24}, \frac{1000}{410}, 1\right) = 0,69$$

Obliczeniowa nośność na docisk

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}} \quad (7.6)$$

gdzie: k_1 jest to współczynnik zależny od kierunku obciążenia i umiejscowienia śrub, α_b współczynnik związany z położeniem śruby w kierunku działania siły, f_u jest to wytrzymałość na rozciąganie blachy w MPa, d jest to średnica zastosowanej śruby w mm, t jest to grubość zastosowanej blachy w połączeniu w mm, γ_{M2} jest to współczynnik częściowy.

$$F_{b,Rd} = \frac{2,50 \cdot 0,69 \cdot 410 \cdot 0,22 \cdot 20,0}{1,25} = 248,95 \text{ kN}$$

Wykorzystanie

$$\eta_{Fb} = \frac{F_{v,Ed}}{F_{b,Rd}} \leq 1 \quad (7.7)$$

gdzie: $F_{v,Ed}$ jest to obliczeniowa siła tnąca występująca w analizowanym węźle w kN, a $F_{b,Rd}$ jest to obliczeniowa nośność węzła na docisk w kN.

$$\eta_{Fv} = \frac{0,82}{248,95} = 0,003 \leq 1$$

Warunek połączenia na docisk został spełniony

Nośność na rozciąganie

$$F_{t,Rd} = \frac{k_2 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} \quad (7.8)$$

gdzie: k_2 jest to współczynnik zależny od śruby z wpuszczonym łbem, w tym przypadku $k_2 = 0,90$, f_{ub} jest to wytrzymałość na rozciąganie śruby w MPa, A_s jest to pole przekroju czynnego śruby w mm², a γ_{M2} jest to współczynnik częściowy.

$$F_{t,Rd} = \frac{0,90 \cdot 1000 \cdot 303,0}{1,25} = 218,16 \text{ kN}$$

Wykorzystanie

$$\eta_{Ft} = \frac{F_{t,Ed}}{F_{t,Rd}} \leq 1 \quad (7.9)$$

gdzie: $F_{t,Ed}$ jest to obliczeniowa siła rozciągająca występująca w analizowanym węźle w kN, a $F_{b,Rd}$ jest to obliczeniowa nośność węzła na rozciąganie w kN.

$$\eta_{Ft} = \frac{216,10}{218,16} = 0,99 \leq 1$$

Warunek nośności węzła na rozciąganie został spełniony.

Nośność na ścinanie przy przebiciu - przeciągnięcie

$$B_{p,Rd} = \frac{0,60 \cdot \pi \cdot d_m \cdot t_p \cdot f_u}{\gamma_{M2}} \quad (7.10)$$

gdzie: d_m jest to średnica łba śruby lub nakrętki w mm, t_p jest to grubość blachy w mm, f_u jest to granica plastyczności zastosowanej blachy, a γ_{M2} jest to współczynnik częściowy.

$$B_{p,Rd} = \frac{0,60 \cdot 3,14 \cdot 34,0 \cdot 20,0 \cdot 410}{1,25} = 420,42 \text{ kN}$$

Wykorzystanie

$$\eta_{Bp} = \frac{F_{t,Ed}}{B_{p,Rd}} \leq 1 \quad (7.11)$$

gdzie: $F_{t,Ed}$ jest to obliczeniowa siła rozciągająca występująca w analizowanym węźle w kN, a $B_{p,Rd}$ jest to obliczeniowa nośność węzła ścinanie przy przebiciu w kN.

$$\eta_{Ft} = \frac{216,10}{420,42} = 0,51 \leq 1$$

Warunek nośności węzła na przeciągnięcie został spełniony.

Nośność na ścinanie z rozciąganiem

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4 \cdot F_{t,Rd}} \leq 1,0 \quad (7.12)$$

gdzie: $F_{v,Ed}$ jest to obliczeniowa siła tnąca występująca w przekroju w kN, $F_{v,Rd}$ jest to obliczeniowa nośność na ścinanie w kN, $F_{t,Ed}$ jest to obliczeniowa siła rozciągająca działająca w węźle w kN, natomiast $F_{t,Rd}$ jest to obliczeniowa nośność węzła na rozciąganie w kN.

$$\frac{0,82}{121,20} + \frac{216,10}{1,4 \cdot 218,16} = 0,71 \leq 1,0$$

Warunek na nośność węzła na ścinanie z rozciąganiem został spełniony. Wszystkie warunki projektowe zostały spełnione zatem połączenie zostało zaprojektowane poprawnie.

Nośność blachy czołowej przy zginaniu

Nośność blachy czołowej przy zginaniu oblicza się przy zastosowaniu zastępczego króćca teowego z trzech możliwych modeli zniszczenia. Nośność pojedynczego szeregu śrub oblicza się zgodnie z punktem 6.2.6.5. tab. 6.6, normy [N5]. Szereg śrub rozważamy jako indywidualny.

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

Długości efektywne zastępczych króćców teowych blachy czołowej zgodnie z tablicą 6.6. normy [N5].

Linie załomu kołowe:

$$l_{eff,ep} = 2 \cdot \pi m_x \quad (7.13)$$

$$l_{eff,ep} = \pi m_x + w \quad (7.14)$$

$$l_{eff,ep} = \pi m_x + 2e \quad (7.15)$$

gdzie: m_x jest to szerokość współpracująca w połączeniu doczołowym podana w mm, w jest to rozstaw poziomy śrub w mm, natomiast e jest to odległość od krawędzi blachy do otworu podana w mm.

Do obliczenia połączenia zgodnie z rozstawem śrub wybrano najbardziej niekorzystną wartość odległości m . Odległość wyznacza się na podstawie rysunku 6.8 normy [N5] a zatem:

$$m = m_x = 60 - 0,8 \cdot 10 \cdot \sqrt{2} = 48,69 \text{ mm},$$

$$n = e_{min} \leq 1,25m$$

$$n = 50 \leq 1,25 \cdot 48,69 = 60,86 \text{ mm}$$

$$l_{eff,ep} = 2 \cdot 3,14 \cdot 48,69 = 305,93 \text{ mm},$$

$$l_{eff,ep} = 3,14 \cdot 48,69 + 140 = 292,96 \text{ mm},$$

$$l_{eff,ep} = 3,14 \cdot 48,69 + 2 \cdot 50 = 252,96 \text{ mm},$$

$$\min(l_{eff,ep}) = 252,96 \text{ mm}.$$

Linie załomu niekołowe:

$$l_{eff,nc} = 4m + 1,25 \cdot e_x \quad (7.16)$$

$$l_{eff,nc} = e + 2 \cdot m_x + 0,625 \cdot e_x \quad (7.17)$$

$$l_{eff,nc} = 0,5b_p \quad (7.18)$$

$$l_{eff,nc} = 0,5w + 2 \cdot m_x + 0,625 \cdot e_x \quad (7.19)$$

gdzie: m_x jest to szerokość współpracująca w połączeniu doczołowym podana w mm, w jest to rozstaw poziomy śrub w mm, natomiast e jest to odległość od krawędzi blachy do otworu podana w mm.

$$l_{eff,nc} = 4 \cdot 48,69 + 1,25 \cdot 50 = 257,26 \text{ mm},$$

$$l_{eff,nc} = 50 + 2 \cdot 48,69 + 0,625 \cdot 50 = 178,63 \text{ mm},$$

$$l_{eff,nc} = 0,5 \cdot 240 = 120,00 \text{ mm},$$

$$l_{eff,nc} = 0,5 \cdot 140 + 2 \cdot 48,69 + 0,625 \cdot 50 = 198,63 \text{ mm},$$

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

$$\min(l_{eff,nc}) = 120,00 \text{ mm.}$$

A zatem:

$$l_{eff,1} = l_{eff,nc} < l_{eff,ep}$$

$$l_{eff,1} = 120 \text{ mm} < 252,96 \text{ mm}$$

$$l_{eff,2} = l_{eff,nc} = 120 \text{ mm.}$$

Momenty graniczne T-króćca zgodnie ze wzorem

$$M_{pl,1,Rd} = 0,25 \cdot \sum \frac{l_{eff,1} \cdot t_f^2 \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (7.20)$$

gdzie: $l_{eff,1}$ jest to długość efektywna zastępczego króćca teowego blachy czołowej w mm, t_f jest to grubość blachy czołowej w mm, f_y jest to granica plastyczności zastosowanej blachy czołowej, natomiast γ_{M0} jest to współczynnik częściowy stali.

$$M_{pl,1,Rd} = 0,25 \cdot \frac{120,00 \cdot 20^2 \cdot 275}{1,0} = 3,3 \text{ kNm,}$$

$$F_{t,Rd} = \min \left\{ \begin{array}{l} F_{T,1,Rd} = \frac{4 \cdot M_{pl,1,Rd}}{m} \\ F_{T,2,Rd} = \frac{2 \cdot M_{pl,2,Rd} + n \cdot \sum F_{t,Rd}}{m+n} \\ F_{T,3} = \sum F_{t,Rd} \end{array} \right. \quad (7.21)$$

gdzie: $M_{pl,1,Rd}$ jest to moment przy danym modelu zniszczenia połączenia bez blach wzmacniających w kNm, m szerokość współpracująca wyznaczona na podstawie rysunku 6.2 normy [N5], n jest to najmniejsza odległość śruby od krawędzi blachy w mm, a $F_{t,Rd}$ jest to obliczeniowa nośność łączników na rozciąganie w kN.

$$F_{t,Rd} = \min \left\{ \begin{array}{l} F_{T,1,Rd} = \frac{4 \cdot 3,3 \cdot 10^6}{48,69} = 271,10 \text{ kN} \\ F_{T,2,Rd} = \frac{2 \cdot 3,3 \cdot 10^6 + 50 \cdot 2 \cdot 218,16 \cdot 10^3}{48,69 + 50} = 287,93 \text{ kN} \\ F_{T,3} = 2 \cdot 218,16 \cdot 10^3 = 436,32 \text{ kN} \end{array} \right.$$

$$F_{t,Rd} = 271,10 \text{ kN}$$

O nośności połączenia śrubowego stanowi całkowite uplastycznienie półki – powstanie mechanizmu (model zniszczenia 1).

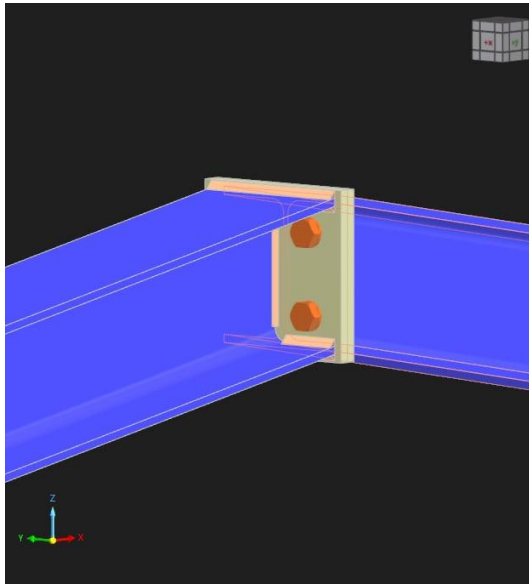
Nośność połączenia wynosi:

$$F_{Rd} = F_{T,1,Rd} > N_{Ed} \quad (7.22)$$

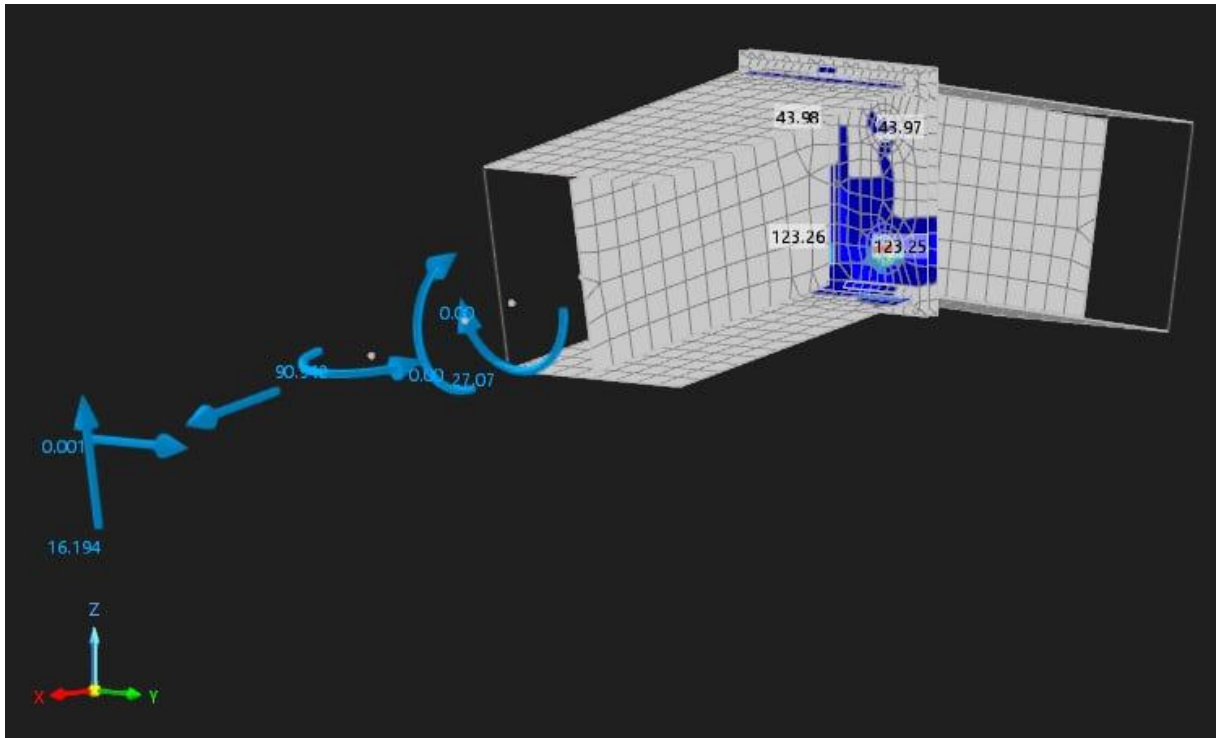
$$F_{Rd} = 271,10 \text{ kN} > 216,10 \text{ kN.}$$

7.2. Styk ciągły doczołowy pasa dolnego kratownicowego łuku konstrukcji hangaru.

Zaprojektowano styk kalenicowy pasa dolnego łukowej kratownicy hangaru z kształtownika HEA 200 ze stali S275J0 z blachami czołowymi 12x213x220 połączonymi śrubami M20, kl. 8.8. Styk został obciążony siłami wewnętrznymi występującymi w projektowanym węźle nr 932.



Rys. 7.2.1. Model 3D połączenia styku kalenicowego pasów dolnych kratownicy łukowej, górnej – źródło własne



Rys. 7.2.2. Model 3D połączenia styku kalenicowego pasów dolnych kratownicy – rozkład naprężeń w analizowanym połączeniu w postaci elementu skończonego - źródło własne

Siły wewnętrzne występujące w połączeniu

Siła rozciągająca - $F_{t,Ed} = 123,26 \text{ kN}$,

Siła tnąca - $F_{v,Ed} = 0,24 \text{ kN}$,

Dane projektowe

Pas dolny kratownicy łukowej konstrukcji – HEA 200 – tabela 5.2, punkt 5.3.1,

Stal S275J0 – tabela 5.9, punkt 5.4,

Blacha czołowa:

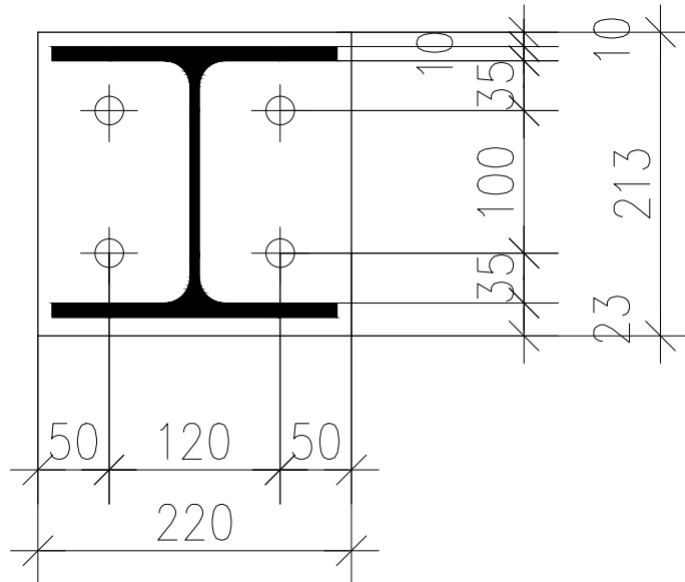
$b_{ep} = 220,0 \text{ mm}$, $h_{ep} = 213,0 \text{ mm}$, $t_{ep} = 12,0 \text{ mm}$, $w = 140,0 \text{ mm}$, $e_x = 50 \text{ mm}$, $e_p = 35 \text{ mm}$.

Śruby M20, kl.8.8:

$d = 20 \text{ mm}$, $A_s = 245 \text{ mm}^2$, $d_m = 32 \text{ mm}$, $f_{yb} = 800 \text{ MPa}$, $f_{ub} = 800 \text{ MPa}$.

Współczynniki częściowe:

$\gamma_{M0} = 1,00$, $\gamma_{M2} = 1,25$, $\gamma_{M5} = 1,00$,



Rys. 7.2.3. Rozstawy oraz wymiary otworów w projektowanym węźle - źródło własne

Zgodnie z punktem 3.5 tj. Rozmieszczenie otworów na śruby normy [N5], rozstawy i odległości śrub zaproponowane w projektowanym połączeniu są spełnione gdyż:

- odległość czołowa e_1 – $\min 1,2d_0 = 1,2 \cdot 20 = 24$ mm. Minimalna odległość została spełniona.

- odległość boczna e_2 – $\min 1,2d_0 = 1,2 \cdot 20 = 24$ mm. Minimalna odległość została spełniona.

- rozstaw p – $\min 2,2d_0 = 2,2 \cdot 20 = 44$ mm. Minimalny rozstaw p również został spełniony.

Wszystkie wyżej wymienione minimalne wymagane odległości zostały spełnione. Konstrukcyjnie rozstawy śrub zostały przyjęte w poprawny sposób.

Nośność na ścinanie w jednej płaszczyźnie

Nośność na ścinanie zgodnie z punktem 3.6.1. tab.3.4, normy [N5]

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} \quad (7.1)$$

$$F_{v,Rd} = \frac{0,6 \cdot 800 \cdot 245}{1,25} = 94,08 \text{ kN}$$

Wykorzystanie

$$\eta_{Fv} = \frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} \leq 1 \quad (7.2)$$

$$\eta_{Fv} = \frac{0,24}{94,08} = 0,003 \leq 1$$

Warunek na nośność na ścinanie w jednej płaszczyźnie został spełniony.

Nośność na docisk

Zgodnie z punktem 3.6.1. tab.3.4, normy [N5] prostopadle do kierunku obciążenia przyjmujemy:

Skrajne położenie śruby, po lewej od kierunku działania siły

$$k_{1,l} = \min \left(2,8 \cdot \left(\frac{e_{2,l}}{d_0} \right) - 1,7; 2,5 \right) \quad (7.3)$$

$$k_{1,l} = \min \left(2,8 \cdot \left(\frac{50}{22,0} \right) - 1,7; 2,5 \right) = 2,50$$

Skrajne położenie śruby, po prawej od kierunku działania siły

$$k_{1,p} = \min \left(2,8 \cdot \left(\frac{e_{2,p}}{d_0} \right) - 1,7; 2,5 \right) \quad (7.4)$$

$$k_{1,p} = \min \left(2,8 \cdot \left(\frac{60}{22,0} \right) - 1,7; 2,5 \right) = 2,50$$

Współczynnik k_l ma zatem wartość równą 2,50.

Skrajne położenie śruby w kierunku działania siły

$$\alpha_b = \min \left(\frac{e_1}{3 \cdot d_0}, \frac{f_{ub}}{f_u}, 1 \right) \quad (7.5)$$

$$\alpha_b = \min \left(\frac{58}{3 \cdot 22}, \frac{800}{410}, 1 \right) = 0,88$$

Obliczeniowa nośność na docisk

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}} \quad (7.6)$$

$$F_{b,Rd} = \frac{2,50 \cdot 0,88 \cdot 410 \cdot 20,0 \cdot 12,0}{1,25} = 173,18 \text{ kN}$$

Wykorzystanie

$$\eta_{Fb} = \frac{F_{v,Ed}}{F_{b,Rd}} \leq 1 \quad (7.7)$$

$$\eta_{Fv} = \frac{0,82}{173,18} = 0,04 \leq 1$$

Warunek połączenia na docisk został spełniony

Nośność na rozciąganie

$$F_{t,Rd} = \frac{k_2 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} \quad (7.8)$$

gdzie: k_2 jest to współczynnik zależny od śruby z wpuszczonym łbem, w tym przypadku $k_2 = 0,90$, f_{ub} jest to wytrzymałość na rozciąganie śruby w MPa, A_s jest to pole przekroju czynnego śruby w mm², a γ_{M2} jest to współczynnik częściowy.

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

$$F_{t,Rd} = \frac{0,90 \cdot 800 \cdot 245,0}{1,25} = 141,12 \text{ kN}$$

Wykorzystanie

$$\eta_{Ft} = \frac{F_{t,Ed}}{F_{t,Rd}} \leq 1 \quad (7.9)$$

$$\eta_{Ft} = \frac{123,26}{141,12} = 0,87 \leq 1$$

Warunek nośności węzła na rozciąganie został spełniony.

Nośność na ścinanie przy przebiciu - przeciągnięcie

$$B_{p,Rd} = \frac{0,60 \cdot \pi \cdot d_m \cdot t_p \cdot f_u}{\gamma_{M2}} \quad (7.10)$$

$$B_{p,Rd} = \frac{0,60 \cdot 3,14 \cdot 32,0 \cdot 12,0 \cdot 410}{1,25} = 237,41 \text{ kN}$$

Wykorzystanie

$$\eta_{Bp} = \frac{F_{t,Ed}}{B_{p,Rd}} \leq 1 \quad (7.11)$$

$$\eta_{Ft} = \frac{123,26}{237,41} = 0,52 \leq 1$$

Warunek nośności węzła na przeciągnięcie został spełniony.

Nośność na ścinanie z rozciąganiem

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4 \cdot F_{t,Rd}} \leq 1,0 \quad (7.12)$$

$$\frac{0,24}{94,08} + \frac{123,26}{1,4 \cdot 141,12} = 0,63 \leq 1,0$$

Nośność blachy czołowej przy zginaniu

Nośność blachy czołowej przy zginaniu oblicza się przy zastosowaniu zastępczego króćca teowego z trzech możliwych modeli zniszczenia. Nośność pojedynczego szeregu śrub oblicza się zgodnie z punktem 6.2.6.5. tab. 6.6, normy [N5]. Szereg śrub rozważamy jako indywidualny.

Długości efektywne zastępczych króćców teowych blachy czołowej zgodnie z tablicą 6.6. normy [N5].

Linie załomu kołowe:

$$l_{eff,ep} = 2 \cdot \pi m_x \quad (7.13)$$

$$l_{eff,ep} = \pi m_x + w \quad (7.14)$$

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

$$l_{eff,ep} = \pi m_x + 2e \quad (7.15)$$

Do obliczenia połączenia zgodnie z rozstawem śrub wybrano najbardziej niekorzystną wartość odległości m . Odległość wyznacza się na podstawie rysunku 6.8 normy [N5] a zatem:

$$m = m_x = 35 - 0,8 \cdot 6 \cdot \sqrt{2} = 28,21 \text{ mm},$$

$$n = e_{min} \leq 1,25m$$

$$n = 35 \leq 1,25 \cdot 28,21 = 35,26 \text{ mm}$$

$$l_{eff,ep} = 2 \cdot 3,14 \cdot 28,21 = 177,25 \text{ mm},$$

$$l_{eff,ep} = 3,14 \cdot 28,21 + 140 = 228,62 \text{ mm},$$

$$l_{eff,ep} = 3,14 \cdot 28,21 + 2 \cdot 50 = 188,62 \text{ mm},$$

$$\min(l_{eff,ep}) = 177,25 \text{ mm}.$$

Linie załomu niekołowe:

$$l_{eff,nc} = 4m + 1,25 \cdot e_x \quad (7.16)$$

$$l_{eff,nc} = e + 2 \cdot m_x + 0,625 \cdot e_x \quad (7.17)$$

$$l_{eff,nc} = 0,5b_p \quad (7.18)$$

$$l_{eff,nc} = 0,5w + 2 \cdot m_x + 0,625 \cdot e_x \quad (7.19)$$

$$l_{eff,nc} = 4 \cdot 28,21 + 1,25 \cdot 35 = 156,59 \text{ mm},$$

$$l_{eff,nc} = 50 + 2 \cdot 28,21 + 0,625 \cdot 35 = 128,30 \text{ mm},$$

$$l_{eff,nc} = 0,5 \cdot 220 = 110,00 \text{ mm},$$

$$l_{eff,nc} = 0,5 \cdot 140 + 2 \cdot 28,21 + 0,625 \cdot 35 = 148,30 \text{ mm},$$

$$\min(l_{eff,nc}) = 110,00 \text{ mm}.$$

A zatem:

$$l_{eff,1} = l_{eff,nc} < l_{eff,ep}$$

$$l_{eff,1} = 110 \text{ mm} < 177,25 \text{ mm}$$

$$l_{eff,2} = l_{eff,nc} = 110 \text{ mm}.$$

Momenty graniczne T-króćca zgodnie ze wzorem

$$M_{pl,1,Rd} = 0,25 \cdot \sum \frac{l_{eff,1} \cdot t_f^2 \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (7.20)$$

$$M_{pl,1,Rd} = 0,25 \cdot \frac{110,00 \cdot 12^2 \cdot 275}{1,0} = 1,1 \text{ kNm},$$

$$F_{t,Rd} = \min \begin{cases} F_{T,1,Rd} = \frac{4 \cdot M_{pl,1,Rd}}{m} \\ F_{T,2,Rd} = \frac{2 \cdot M_{pl,2,Rd} + n \cdot \sum F_{t,Rd}}{m+n} \\ F_{T,3} = \sum F_{t,Rd} \end{cases} \quad (7.21)$$

$$F_{t,Rd} = \min \begin{cases} F_{T,1,Rd} = \frac{4 \cdot 1,1 \cdot 10^6}{28,21} = 155,97 \text{ kN} \\ F_{T,2,Rd} = \frac{2 \cdot 1,1 \cdot 10^6 + 35 \cdot 2 \cdot 141,12 \cdot 10^3}{28,21 + 35} = 191,08 \text{ kN} \\ F_{T,3} = 2 \cdot 141,12 \cdot 10^3 = 282,24 \text{ kN} \end{cases}$$

$$F_{t,Rd} = 155,97 \text{ kN}$$

O nośności połączenia śrubowego stanowi całkowite uplastycznienie półki – powstanie mechanizmu (model zniszczenia 1).

Nośność połączenia wynosi:

$$F_{Rd} = F_{T,1,Rd} > N_{Ed} \quad (7.22)$$

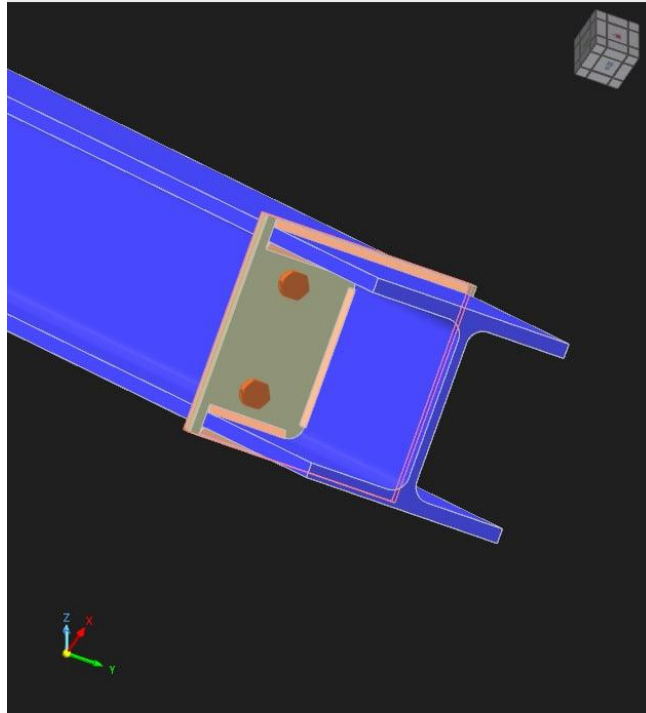
$$F_{Rd} = 123,26 \text{ kN} > 155,97 \text{ kN}.$$

7.3. Styk ciągly doczołowy pasa górnego kratownicy łukowej. Połączenie elementów łuku kratowego.

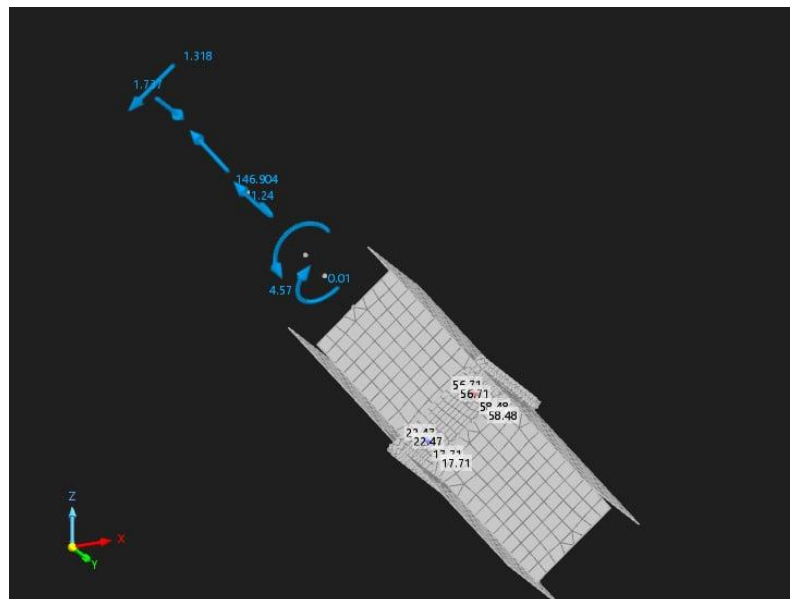
Kratownica górna głównego układu nośnego hangaru składa się z 8 elementów. W miejscach załamania krzywizny łuku znajdują się słupki kratownic, dlatego połączenie zaplanowano z przesunięciem 25 cm od tego węzła. Zaprojektowano styk pasa górnego łukowej kratownicy, pasa dolnego łukowej kratownicy oraz krzyżulców. Wszystkie elementy zostały przecięte w jednej linii konstrukcyjnej. Dzięki takiemu rozwiązaniu nie trzeba było zmieniać geometrii całej ramy kratownicowej ze względu na przesunięcie słupków i została ona w jak największym stopniu odwzorowana na podstawie oryginału. Połączenia doczołowe, są wytrzymałe, sztywne oraz nieskomplikowane w swej budowie. Dzięki tym połączeniom powstało 8 niezależnych elementów konstrukcji, które po wykonaniu i pospawaniu w warsztacie, na budowie mogą zostać skrócone w cały górny łuk kratowy konstrukcji hangaru. Ułatwia to zarówno montaż na budowie jak i sam transport elementów z warsztatu na miejsce montażu.

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

Zaprojektowany węzeł składa się z kształtownika HEB 220 ze stali S275J0 wraz z blachami czołowymi 12x213x220 połączonymi śrubami M20, kl. 8.8. Styk został obciążony siłami wewnętrznymi występującymi w projektowanym węźle nr 4363.



Rys. 7.3.1. Model 3D połączenia styku kalenicowego pasów górnych kratownicy łukowej; łączenie poszczególnych segmentów między sobą – źródło własne



Rys. 7.3.2. Model 3D połączenia styku kalenicowego pasów górnych kratownicy – rozkład naprężeń w analizowanym połączeniu w postaci elementu skończonego - źródło własne

Siły wewnętrzne występujące w połączeniu

Siła rozciągająca - $F_{t,Ed} = 64,00 \text{ kN}$,

Siła tnąca - $F_{v,Ed} = 0,55 \text{ kN}$,

Dane projektowe

Pas dolny kratownicy łukowej konstrukcji – HEB 220 – tabela 5.2, punkt 5.3.1,

Stal S275J0 – tabela 5.9, punkt 5.4,

Blacha czołowa:

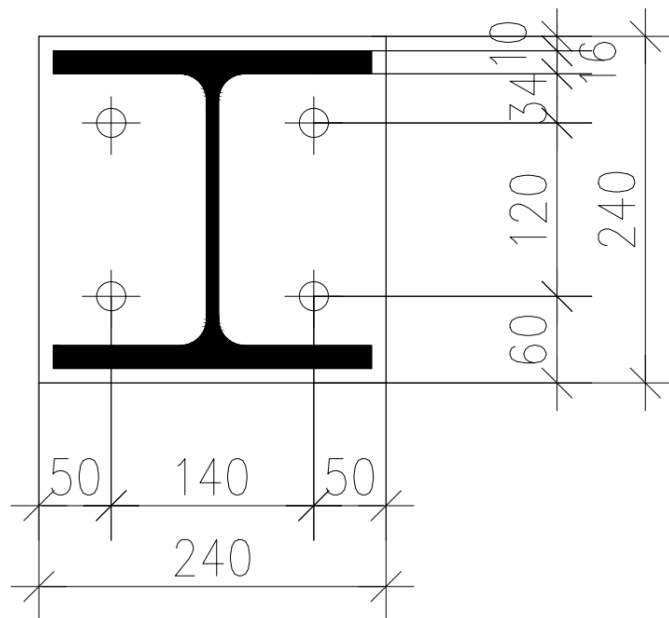
$b_{ep} = 240,0 \text{ mm}$, $h_{ep} = 240 \text{ mm}$, $t_{ep} = 12,0 \text{ mm}$, $w = 140,0 \text{ mm}$, $e_x = 50 \text{ mm}$, e_p
 $= 34 \text{ mm}$.

Śruby M16, kl.8,8:

$d = 16 \text{ mm}$, $A_s = 157 \text{ mm}^2$, $d_m = 26 \text{ mm}$, $f_{yb} = 800 \text{ MPa}$, $f_{ub} = 800 \text{ MPa}$.

Współczynniki częściowe:

$\gamma_{M0} = 1,00$, $\gamma_{M2} = 1,25$, $\gamma_{M5} = 1,00$,



Rys. 7.3.3. Rozstawy oraz wymiary otworów w projektowanym węźle - źródło własne

Zgodnie z punktem 3.5 tj. Rozmieszczenie otworów na śruby normy [N5], rozstawy i odległości śrub zaproponowane w projektowanym połączeniu są spełnione gdyż:

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

- odległość czołowa e_1 – $\min 1,2d_0 = 1,2 \cdot 16 = 19,2$ mm. Minimalna odległość została spełniona.

- odległość boczna e_2 – $\min 1,2d_0 = 1,2 \cdot 16 = 19,2$ mm. Minimalna odległość została spełniona.

- rozstaw p – $\min 2,2d_0 = 2,2 \cdot 16 = 35,2$ mm. Minimalny rozstaw p również został spełniony. Wszystkie wyżej wymienione minimalne wymagane odległości zostały spełnione. Konstrukcyjnie rozstawy śrub zostały przyjęte w poprawny sposób.

Nośność na ścinanie w jednej płaszczyźnie

Nośność na ścinanie zgodnie z punktem 3.6.1. tab.3.4, normy [N5]

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} \quad (7.1)$$

$$F_{v,Rd} = \frac{0,6 \cdot 800 \cdot 157}{1,25} = 60,29 \text{ kN}$$

Wykorzystanie

$$\eta_{Fv} = \frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} \leq 1 \quad (7.2)$$

$$\eta_{Fv} = \frac{0,55}{60,29} = 0,01 \leq 1$$

Warunek na nośność na ścinanie w jednej płaszczyźnie został spełniony.

Nośność na docisk

Zgodnie z punktem 3.6.1. tab.3.4, normy [N5] prostopadle do kierunku obciążenia przyjmujemy:

Skrajne położenie śruby, po lewej od kierunku działania siły

$$k_{1,l} = \min \left(2,8 \cdot \left(\frac{e_{2,l}}{d_0} \right) - 1,7; 2,5 \right) \quad (7.3)$$

$$k_{1,l} = \min \left(2,8 \cdot \left(\frac{50}{16,0} \right) - 1,7; 2,5 \right) = 2,50$$

Skrajne położenie śruby, po prawej od kierunku działania siły

$$k_{1,p} = \min \left(2,8 \cdot \left(\frac{e_{2,p}}{d_0} \right) - 1,7; 2,5 \right) \quad (7.4)$$

$$k_{1,p} = \min \left(2,8 \cdot \left(\frac{60}{16,0} \right) - 1,7; 2,5 \right) = 2,50$$

Współczynnik k_1 ma zatem wartość równą 2,50.

Skrajne położenie śruby w kierunku działania siły

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

$$\alpha_b = \min\left(\frac{e_1}{3 \cdot d_0}, \frac{f_{ub}}{f_u}, 1\right) \quad (7.5)$$

$$\alpha_b = \min\left(\frac{60}{3 \cdot 16}, \frac{800}{410}, 1\right) = 1,00$$

Obliczeniowa nośność na docisk

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}} \quad (7.6)$$

$$F_{b,Rd} = \frac{2,50 \cdot 1,00 \cdot 410,0 \cdot 16,0 \cdot 12,0}{1,25} = 157,44 \text{ kN}$$

Wykorzystanie

$$\eta_{Fb} = \frac{F_{v,Ed}}{F_{b,Rd}} \leq 1 \quad (7.7)$$

$$\eta_{Fv} = \frac{0,55}{157,44} = 0,004 \leq 1$$

Warunek połączenia na docisk został spełniony

Nośność na rozciąganie

$$F_{t,Rd} = \frac{k_2 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} \quad (7.8)$$

gdzie: k_2 jest to współczynnik zależny od śruby z wpuszczonym łbem, w tym przypadku $k_2 = 0,90$, f_{ub} jest to wytrzymałość na rozciąganie śruby w MPa, A_s jest to pole przekroju czynnego śruby w mm², a γ_{M2} jest to współczynnik częściowy.

$$F_{t,Rd} = \frac{0,90 \cdot 800 \cdot 157,0}{1,25} = 90,43 \text{ kN}$$

Wykorzystanie

$$\eta_{Ft} = \frac{F_{t,Ed}}{F_{t,Rd}} \leq 1 \quad (7.9)$$

$$\eta_{Ft} = \frac{64,00}{90,43} = 0,71 \leq 1$$

Warunek nośności węzła na rozciąganie został spełniony.

Nośność na ścinanie przy przebiciu - przeciągnięcie

$$B_{p,Rd} = \frac{0,60 \cdot \pi \cdot d_m \cdot t_p \cdot f_u}{\gamma_{M2}} \quad (7.10)$$

$$B_{p,Rd} = \frac{0,60 \cdot 3,14 \cdot 26,0 \cdot 12,0 \cdot 410}{1,25} = 192,90 \text{ kN}$$

Wykorzystanie

$$\eta_{Bp} = \frac{F_{t,Ed}}{B_{p,Rd}} \leq 1 \quad (7.11)$$

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

$$\eta_{Ft} = \frac{64,00}{192,90} = 0,33 \leq 1$$

Warunek nośności węzła na przeciągnięcie został spełniony.

Nośność na ścinanie z rozciąganiem

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4 \cdot F_{t,Rd}} \leq 1,0 \quad (7.12)$$

$$\frac{0,55}{60,29} + \frac{64,00}{1,4 \cdot 90,43} = 0,52 \leq 1,0$$

Nośność blachy czołowej przy zginaniu

Nośność blachy czołowej przy zginaniu oblicza się przy zastosowaniu zastępczego króćca teowego z trzech możliwych modeli zniszczenia. Nośność pojedynczego szeregu śrub oblicza się zgodnie z punktem 6.2.6.5. tab. 6.6, normy [N5]. Szereg śrub rozważamy jako indywidualny.

Długości efektywne zastępczych króćców teowych blachy czołowej zgodnie z tablicą 6.6. normy [N5].

Linie załomu kołowe:

$$l_{eff,ep} = 2 \cdot \pi m_x \quad (7.13)$$

$$l_{eff,ep} = \pi m_x + w \quad (7.14)$$

$$l_{eff,ep} = \pi m_x + 2e \quad (7.15)$$

Do obliczenia połączenia zgodnie z rozstawem śrub wybrano najbardziej niekorzystną wartość odległości m . Odległość wyznacza się na podstawie rysunku 6.8 normy [N5] a zatem:

$$m = m_x = 34 - 0,8 \cdot 6 \cdot \sqrt{2} = 27,21 \text{ mm},$$

$$n = e_{min} \leq 1,25m$$

$$n = 34 \leq 1,25 \cdot 27,21 = 34,01 \text{ mm}$$

$$l_{eff,ep} = 2 \cdot 3,14 \cdot 27,21 = 170,97 \text{ mm},$$

$$l_{eff,ep} = 3,14 \cdot 27,21 + 140 = 225,48 \text{ mm},$$

$$l_{eff,ep} = 3,14 \cdot 27,21 + 2 \cdot 50 = 185,48 \text{ mm},$$

$$\min(l_{eff,ep}) = 170,97 \text{ mm}.$$

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

Linie załomu niekołowe:

$$l_{eff,nc} = 4m + 1,25 \cdot e_x \quad (7.16)$$

$$l_{eff,nc} = e + 2 \cdot m_x + 0,625 \cdot e_x \quad (7.17)$$

$$l_{eff,nc} = 0,5b_p \quad (7.18)$$

$$l_{eff,nc} = 0,5w + 2 \cdot m_x + 0,625 \cdot e_x \quad (7.19)$$

$$l_{eff,nc} = 4 \cdot 27,21 + 1,25 \cdot 50 = 171,34 \text{ mm},$$

$$l_{eff,nc} = 50 + 2 \cdot 27,21 + 0,625 \cdot 50 = 135,67 \text{ mm},$$

$$l_{eff,nc} = 0,5 \cdot 240 = 120,00 \text{ mm},$$

$$l_{eff,nc} = 0,5 \cdot 140 + 2 \cdot 27,21 + 0,625 \cdot 50 = 155,67 \text{ mm},$$

$$\min(l_{eff,nc}) = 120,00 \text{ mm}.$$

A zatem:

$$l_{eff,1} = l_{eff,nc} < l_{eff,ep}$$

$$l_{eff,1} = 120 \text{ mm} < 170,97 \text{ mm}$$

$$l_{eff,2} = l_{eff,nc} = 120 \text{ mm}.$$

Momenty graniczne T-króćca zgodnie ze wzorem

$$M_{pl,1,Rd} = 0,25 \cdot \sum \frac{l_{eff,1} \cdot t_f^2 \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (7.20)$$

$$M_{pl,1,Rd} = 0,25 \cdot \frac{120,00 \cdot 12^2 \cdot 275}{1,0} = 1,19 \text{ kNm},$$

$$F_{t,Rd} = \min \begin{cases} F_{T,1,Rd} = \frac{4 \cdot M_{pl,1,Rd}}{m} \\ F_{T,2,Rd} = \frac{2 \cdot M_{pl,2,Rd} + n \cdot \sum F_{t,Rd}}{m+n} \\ F_{T,3} = \sum F_{t,Rd} \end{cases} \quad (7.21)$$

$$F_{t,Rd} = \min \begin{cases} F_{T,1,Rd} = \frac{4 \cdot 1,19 \cdot 10^6}{27,21} = 174,94 \text{ kN} \\ F_{T,2,Rd} = \frac{2 \cdot 1,19 \cdot 10^6 + 35 \cdot 2 \cdot 90,43 \cdot 10^3}{27,21 + 35} = 140,01 \text{ kN} \\ F_{T,3} = 2 \cdot 90,43 \cdot 10^3 = 180,86 \text{ kN} \end{cases}$$

$$F_{t,Rd} = 140,01 \text{ kN}$$

O nośności połączenia śrubowego stanowi zerwanie śrub z częściowym uplastycznieniem blachy czołowej (schemat zniszczenia połączenia nr 2).

Nośność połączenia wynosi:

$$F_{Rd} = F_{T,2,Rd} > N_{Ed}$$

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

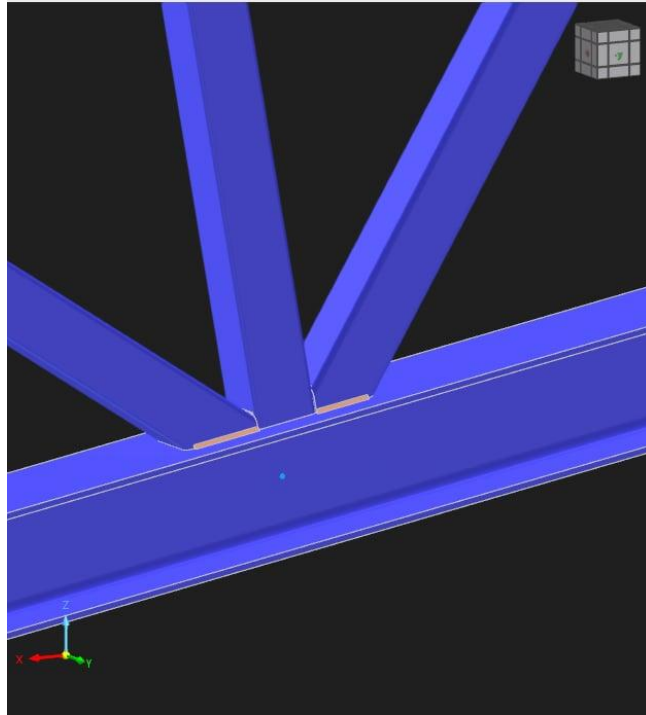
$$F_{Rd} = 140,01 \text{ kN} > 64,00 \text{ kN}.$$

Wszystkie wyżej sprawdzane warunki zostały spełnione, połączenie zostało zaprojektowane poprawnie.

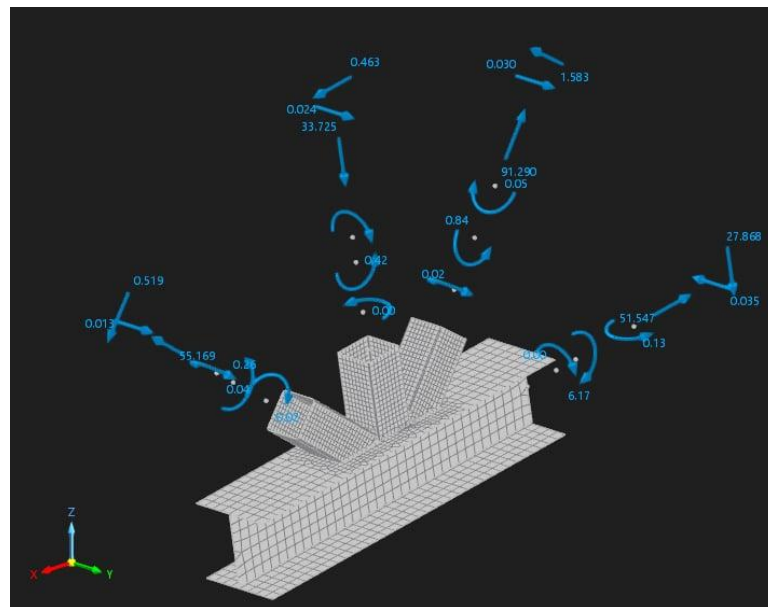
7.4. Połączenie prętów rygla kratowego – słupka i krzyżulców z pasem dolnym kratownicy

Zaprojektowany węzeł składa się z krzyżulców w postaci rur kwadratowych SHS 100x6,3, słupków w postaci również SHS 100x4,5 oraz z kształtownika w postaci dwuteownika HEA 200. Konstrukcja została zaprojektowana jako 8 niezależnych elementów składających się na całkowitą skręcaną łukową kratownicę. Każda część będzie osobno spawana. Krzyżulce oraz słupki będą połączone za pomocą spawów. Stworzy nam to odwzorowanie połączeń nakładkowych w pierwotnej konstrukcji hangaru oraz zapewni odpowiednią sztywność całej konstrukcji. Styk został obciążony siłami wewnętrznymi występującymi w projektowanym węźle nr 1008. Z całej konstrukcji wybrano jedno najbardziej obciążone połączenie i przeprowadzono jego wymiarowanie. Przeanalizowano wszystkie ramy konstrukcyjne hangaru oraz występujące w nich siły wewnętrzne za pomocą oprogramowania do analizy statyczno-wytrzymałościowej RFEM 6. W rezultacie wybrano jeden wiodący węzeł dla całej konstrukcji. Reszta pozostałych węzłów będą to wierne kopie zwymiarowanego połączenia. Wszystkie szczegóły konstrukcyjne zostaną ukazane na zaawansowanym modelu 3D konstrukcji hangaru wykonanym w programie TEKLA.

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ



Rys. 7.4.1. Model 3D połączenia kratowego krzyżulców oraz słupka górnej części kratownicowej– źródło własne



Rys. 7.4.2. Model 3D połączenia kratowego krzyżulców, słupka oraz pasa dolnego, górnej części łukowej kratownicy- źródło własne

Siły wewnętrzne występujące w połączeniu

$$N_{Ed,P1} = -44,74 \text{ kN (ściskanie)}$$

$$N_{Ed,P2} = -20,06 \text{ kN (ściskanie)}$$

$$N_{Ed,K1} = 55,17 \text{ kN (rozciąganie)}$$

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

$$N_{Ed,S1} = -33,72 \text{ kN (ściskanie)}$$

$$N_{Ed,K2} = 98,45 \text{ kN (rozciąganie)}$$

Dane projektowe

Pas dolny kratownicy łukowej konstrukcji – HEB 220 – tabela 5.2, punkt 5.3.1,

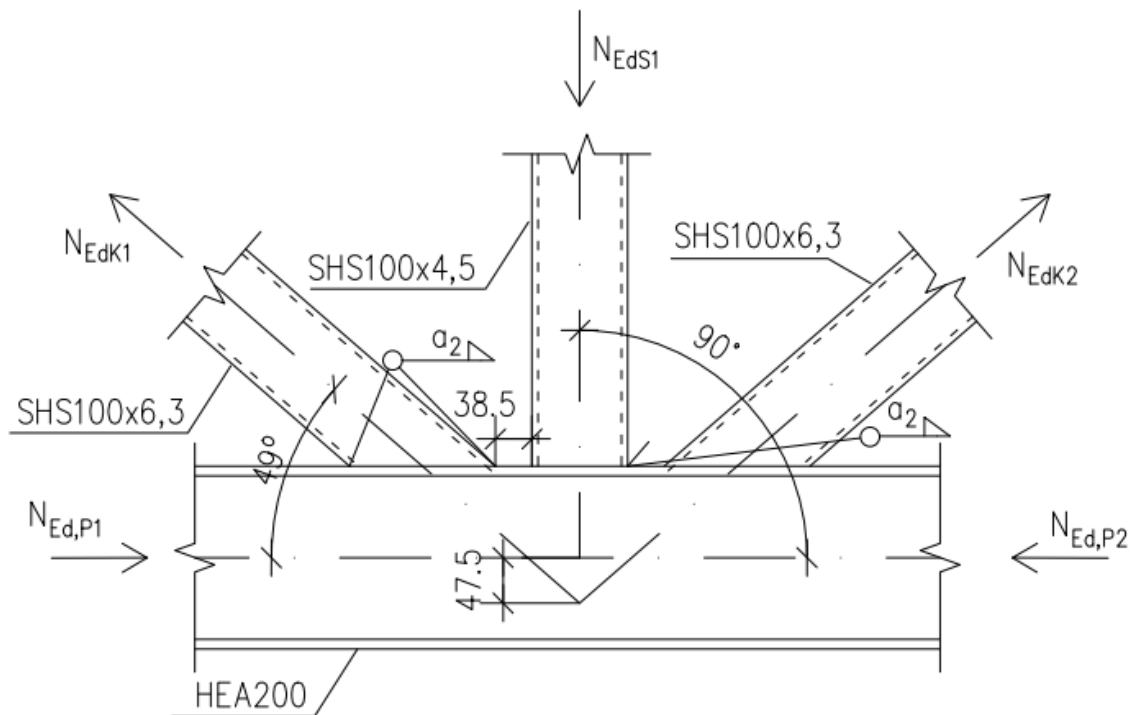
Krzyżulce kratownicy łukowej – SHS 100x6,3 – tabela 5.3, punkt 5.3.2,

Słupki kratownicy łukowej – SHS 100x4,5 – tabela 5.3, punkt 5.3.2,

Stal S275J0 – tabela 5.9, punkt 5.4,

Współczynniki częściowe:

$$\gamma_{M0} = 1,00, \gamma_{M2} = 1,25, \gamma_{M5} = 1,00$$



Rys. 7.4.3. Schemat połączenia słupka i krzyżulców w projektowanym węźle 1008

- źródło własne

Ze względów konstrukcyjnych – zdecydowane ułatwienie podczas wytwarzania i spawania konstrukcji w warsztacie prefabrykacji zastosowano węzeł z lekkim odstępem,

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

tworząc w węźle mimośród dodatni o wartości: $e = 0,25 \cdot h_0$, gdzie h_0 jest to wysokość całkowita kształtownika HEA 200 czyli pasa dolnego kratownicy.

$$e = 0,25 \cdot h_0 = 0,25 \cdot 190 = 47,5 \text{ mm}.$$

Wówczas odstęp pomiędzy poszczególnymi prętami skatowania wynosi:

$$g = \left(e + \frac{h_0}{2} \right) \cdot \frac{\sin(\theta_1 + \theta_2)}{\sin(\theta_1 \cdot \theta_2)} - \frac{h_1}{2 \sin \theta_1} - \frac{h_2}{2 \sin \theta_2} \quad (7.21)$$

gdzie: e jest to mimośród dodatni stworzony przez odsunięcie krzyżulców i słupków od siebie w m, h_0 jest to wysokość kształtownika pasa dolnego w mm, θ_1 jest to kąt nachylenia krzyżulca do pasa dolnego kratownicy w stopniach, natomiast θ_2 jest to kąt nachylenia słupka do pasa dolnego kratownicy w stopniach.

$$g = \left(47,5 + \frac{190}{2} \right) \cdot \frac{\sin(49+90)}{\sin(49) \cdot \sin(90)} - \frac{100}{2 \sin 49} - \frac{100}{2 \sin 90} = 37,71 \text{ mm} \approx 38 \text{ mm}.$$

Warunki konstrukcyjne węzła

Momenty wynikające z mimośrodków możemy pomijać przy obliczeniach rozciąganych pasów i prętów skratowania. Możemy je także pomijać przy obliczaniu połączeń, jeżeli mimośród mieści się w następującej granicy zgodnie z punktem 5.1.5(5) normy [N5]:

$$-0,55h_0 \leq e \leq 0,25h_0 \quad (7.22)$$

gdzie: e jest to wyliczony mimośród w m (przesunięcie krzyżulca względem słupka) w mm, h_0 jest to wysokość kształtownika pasa dolnego HEA200.

$$-0,55 \cdot 200 = -110 \text{ mm} \leq 47,5 \text{ mm} \leq 0,25 \cdot 200 = 50 \text{ mm}$$

$g = 38 \text{ mm}$ – przesunięcie od lica słupka do lica krzyżulca w połączeniu

$$t_1 + t_2 = 6,3 \text{ mm} + 4,5 \text{ mm} = 10,8 \text{ mm}$$

$$g > t_1 + t_2 \rightarrow 38 \text{ mm} > 10,8 \text{ mm}$$

$\theta_1 = 49^\circ > 30^\circ$ oraz $\theta_2 = 90^\circ > 30^\circ$ - warunek konstrukcyjny zgodnie z punktem 7.1.2, tab. 7.20, normy [N5].

Wszystkie wymagane warunki konstrukcyjne zostały spełnione.

Projektowany węzeł jest to węzeł typu KT. Składa się on z dwóch krzyżulców odbitych lustrzanie względem słupka umieszczonego prostopadle do pasa dolnego kratownicy. W celu uproszczenia obliczeń ze względu na symetrię połączenia węzeł KT zamieniono na dwa symetrycznie odbite węzły KN. Wymiarowanie przeprowadzane będzie tylko w jednym węźle na najbardziej niekorzystne siły wewnętrzne. Jeżeli połączenie zostanie zwymiarowane na

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

bardziej niekorzystne siły wewnątrz to również zostaną spełnione warunki nośności połączenia przy mniej niekorzystnych układzie sił wewnętrznych występujących w węźle.

Klasa przekroju pasa dolnego to **klasa I**.

$$d_w = h_0 - 2(t_f + r) \quad (7.23)$$

gdzie: h_0 jest to wysokość kształownika pasa dolnego – HEA200 w mm, t_f jest to grubość półki kształownika w mm, r jest to promień gięcia ścianek w kształowniku w mm.

$$d_w = 190 - 2(10 + 18) = 134 \text{ mm} < 400 \text{ mm} - \text{warunek spełniony}$$

Smukłość ścianki prętów skratowania

$$\frac{h_1}{t_1} = \frac{h_2}{t_2} \quad (7.24)$$

gdzie: h_1, h_2 jest to wysokość kształownika rurowego w mm, t_1, t_2 jest to grubość ścianki kształownika rurowego w mm.

$$\frac{100}{4,5} = 22,22 < 35$$

$$\frac{100}{6,3} = 15,87 < 35$$

Warunek na smukłość ścianki prętów skratowania został spełniony.

Stosunek wysokości do szerokości rury:

$$\frac{h_1}{t_1} = \frac{h_2}{t_2} = \frac{100}{100} = 1,0 \leq 2,0$$

Warunek na stosunek wysokości do szerokości rury został spełniony.

Smukłość stopki pasa dolnego

Kształownik pasa dolnego jest klasy 1 zatem warunek jest spełniony gdyż może on być maksymalnie przekrojem klasy 2.

Zgodnie z tabelą 7.20 normy [N5] zaprojektowany węzeł spełnia wszystkie warunki konstrukcyjne zawarte w tej tabeli, a zatem obowiązującymi kryteriami dotyczącymi nośności zaprojektowanego węzła będzie tablica 7.21 normy [N5].

Niestateczność środka pasa

$$b_w = \frac{h_i}{\sin\theta_i} + 5(t_f + 4) \quad (7.25)$$

$$N_{i,Rd} = \frac{f_y \cdot t_w \cdot b_w}{\sin\theta_i} \cdot \frac{1}{\gamma_{M5}} \quad (7.26)$$

gdzie: h_i jest to wysokość kształownika w mm, t_w jest to grubość ścianki środka w mm, b_w jest to wyliczony współczynnik zgodnie ze wzorem 8.25 w mm, t_f jest to grubość półki

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

kształtownika w mm, θ_i jest to kąt nachylenia kształtownika względem pasa dolnego kratownicy w stopniach.

Warunek nośności krzyżulca

$$b_{w1} = \frac{100}{\sin 49^\circ} + 5(10 + 18) = 272,50 \text{ mm}$$

lecz zgodnie z tablicą 7.21 normy [N5]

$$b_{w1} \leq 2t_1 + 10(t_f + r)$$

$$272,50 \text{ mm} \leq 2 \cdot 6,3 + 10(10 + 18) = 292,60 \text{ mm}$$

Ostatecznie wartość to: $b_{w1} = 272,50 \text{ mm}$

$$N_{1,Rd} = \frac{275 \cdot 6,5 \cdot 272,50}{\sin 49^\circ} \cdot \frac{1}{1,00} = 645,41 \text{ kN}$$

$$N_{Ed,K1} = 98,45 \text{ kN} < N_{1,Rd} = 645,41 \text{ kN}$$

Warunek nośności został spełniony.

Zniszczenie skratowania

$$\beta = \frac{b_1 + b_2 + h_1 + h_2}{4 \cdot b_0} \quad (7.27)$$

gdzie: b_1, b_2 są to szerokości kształtowników w mm, h_1, h_2 są to wysokości kształtowników rurowych, b_0 jest to szerokość kształtownika pasa dolnego w mm.

$$\beta = \frac{100 + 100 + 100 + 100}{4 \cdot 200} = 0,5$$

oraz

$$\beta < 1,0 - 0,03 \cdot \gamma \quad (7.28)$$

gdzie:

$$\gamma = \frac{b_0}{2 \cdot t_f} = \frac{200}{2 \cdot 10} = 10$$

oraz

$$\frac{g}{t_f} = \frac{38}{10} = 3,8 < 20 - 28 \cdot \beta = 20 - 28 \cdot 0,5 = 6$$

a także:

$$0,75 < \frac{b_1}{b_2}$$

$$0,75 < \frac{100}{100} = 1,00$$

Wszystkie warunki podane w tablicy 7.21 normy [N5] zostały spełnione, zatem nie ma konieczności sprawdzania zniszczenia skratowania projektowanego węzła.

Ścięcie pasa

$$\alpha = \sqrt{\frac{1}{\frac{1+g^2}{3 \cdot t_f^2}}} \quad (7.29)$$

gdzie: g jest to przesunięcie skratowania względem siebie (odsunięcie obliczone na początku) w mm, t_f jest to grubość półki kształtownika pasa dolnego w mm.

$$\alpha = \sqrt{\frac{1}{\frac{1+38^2}{3 \cdot 10^2}}} = 0,46$$

$$A_v = A_0 - (2 - \alpha) \cdot b_0 \cdot t_f + (t_w + 2 \cdot r) \cdot t_f \quad (7.30)$$

gdzie: A_0 jest to pole powierzchni kształtownika dwuteowego HEA200 w mm², α wartość współczynnika obliczona powyżej, b_0 jest to szerokość kształtownika HEA200 w mm, t_f jest to grubość półek kształtownika w mm, t_w jest to grubość środnika kształtownika w mm.

$$A_v = 53,83 \cdot 10^2 - (2 - 0,46) \cdot 200 \cdot 10 + (6,5 + 2 \cdot 18) \cdot 10 = 2728 \text{ mm}^2$$

Warunek nośności na ścięcie pasa

$$N_{i,Rd} = \frac{f_y \cdot A_v}{\sqrt{3} \cdot \sin(\theta_i)} \cdot \frac{1}{\gamma_{M5}} \quad (7.31)$$

gdzie: f_y jest to granica plastyczności stali konstrukcyjnej w MPa, A_v jest to wyznaczone powyżej pole ścinania środnika w mm², θ_i jest to kąt nachylenia krzyżulca lub słupka względem pasa dolnego kratownicy w stopniach, γ_{M5} jest to współczynnik częściowy.

Warunek nośności krzyżulca

$$N_{K2,Rd} = \frac{275 \cdot 2728}{\sqrt{3} \cdot \sin(49)} \cdot \frac{1}{1,0} = 573,90 \text{ kN}$$

$$N_{Ed,K2} = 98,45 \text{ kN} < N_{K2,Rd} = 573,90 \text{ kN}$$

Warunek nośności słupka

$$N_{S1,Rd} = \frac{275 \cdot 2728}{\sqrt{3} \cdot \sin(49)} \cdot \frac{1}{1,0} = 573,90 \text{ kN}$$

$$N_{Ed,S1} = -33,72 \text{ kN} < N_{K2,Rd} = 573,90 \text{ kN}$$

Warunki nośności zostały spełnione.

Nośność pasa dolnego w obszarze węzła (interakcja ścinania oraz siły podłużnej)

$$N_{0,Rd} = \frac{(A_0 - A_v) \cdot f_{y0} + A_v \cdot f_{y0} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{V_{Ed}}{V_{pl,Rd}}\right)^2}}{\gamma_{M5}} \quad (7.32)$$

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

gdzie: A_0 jest to pole powierzchni kształtownika w mm^2 , A_v jest to pole ścinania w mm^2 , f_{y0} jest to granica plastyczności stali w MPa, V_{Ed} występująca w analizowanym elemencie siła ściskająca lub rozciągająca w kN, $V_{pl,Rd}$ jest to nośność plastyczna pasa na ścinanie w kN.

Nośność plastyczna pasa na ściskanie

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{M0}} \quad (7.33)$$

gdzie: A_v pole powierzchni ścinania pasa w mm^2 , f_y jest to granica plastyczności stali w MPa, γ_{M0} jest to współczynnik częściowy stali.

$$V_{pl,Rd} = \frac{2728 \cdot \frac{275}{\sqrt{3}}}{1,0} = 433,13 \text{ kN}$$

a zatem nośność pasa dolnego w obszarze węzła wynosi:

$$N_{0,Rd} = \frac{(5383 - 2728) \cdot 275 + 2728 \cdot 275 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{33,72}{433,13}\right)^2}}{1,0} = 1478,05 \text{ kN}$$
$$N_{0,Rd} > N_{1,Ed} - N_{Ed,S1} \cdot \cos(\theta_2) \quad (7.34)$$

gdzie: $N_{0,Rd}$ jest to nośność pasa dolnego w obszarze węzła w kN, $N_{1,Ed}$ jest to siła występująca w pasie dolnym w kN, $N_{Ed,S1}$ jest to siła występująca w słupku w kN, natomiast θ_2 jest to kąt nachylenia słupka w stosunku do górnej półki pasa dolnego kratownicy w kN.

$$1478,05 \text{ kN} > 44,74 \text{ kN} - 33,72 \text{ kN} \cdot \cos(90^\circ) = 44,74 \text{ kN}$$

Warunek nośności połączenia jest zachowany.

Nośność spoin łączących skratowanie z pasem dolnym kratownicy

Połączenie z pasem dolnym zaprojektowano bez wzmacniających żeber.

Obliczenie szerokości efektywnej

$t_1 = 4,5 \text{ mm}$ jest to grubość ścianki słupka SHS100x4,5,

$t_2 = 6,3 \text{ mm}$ jest to grubość ścianki krzyżulca SHS100x6,3,

$b_p = b_1 = b_2 = 100 \text{ mm}$ jest to szerokość zastosowanej rury kwadratowej w połączeniu,

$f_{y,f} = f_{y,p} = f_f = 275 \text{ MPa}$ jest to granica plastyczności elementów budujących połączenie,

$f_{u,p} = f_u = 410 \text{ MPa}$ jest to wytrzymałość na rozciąganie w MPa.

$$k_1 = \frac{t_f}{t_{p,1}} \cdot \frac{f_{y,f}}{f_{y,p}} \quad (7.35)$$

gdzie: t_f jest to grubość pasa kształtownika, $t_{p,1}$, $t_{p,2}$ grubości ścianek kolejno krzyżulca oraz słupka w mm, $f_{y,f}$, $f_{y,p}$ jest to granica plastyczności stali w MPa.

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

$$k_1 = \frac{10}{6,3} \cdot \frac{275}{275} = 1,59$$

$$k_2 = \frac{10}{4,5} \cdot \frac{275}{275} = 2,22$$

lecz wartość parametru k może przyjmować maksymalnie wartość 1,0, a zatem

$$k = 1,0; \quad s = r = 18 \text{ mm},$$

$$b_{eff} = t_w + 2s + 7k \cdot t_f \quad (7.36)$$

$$b_{eff,1} = 6,5 + 2 \cdot 18 + 7 \cdot 1,59 \cdot 10 = 153,8 \text{ mm}$$

$$b_{eff,2} = 6,5 + 2 \cdot 18 + 7 \cdot 2,22 \cdot 10 = 197,9 \text{ mm}$$

$$b_{eff} > \frac{f_{y,p}}{f_{u,p}} \cdot b_p \quad (7.37)$$

$$153,8 \text{ mm} > \frac{275}{410} \cdot 100 = 67,07 \text{ mm}$$

$$197,9 \text{ mm} > \frac{275}{410} \cdot 100 = 67,07 \text{ mm}$$

Wszystkie powyższe warunki zostały spełnione. Dzięki temu, projektowany węzeł nie wymaga dodatkowego usztywnienia. Co więcej, $b_{eff,1}$ oraz $b_{eff,2} > b_p = 100 \text{ mm}$, dlatego też w obliczeniach można uwzględnić wszystkie odcinki spoin ułożone dookoła prętów skratowania budujących ten węzeł.

Spoiny mocujące słupki

Pręt zamocowany będzie prostopadle do pasa dolnego kratownicy, wszystkie odcinki spoin pachwinowych są prostopadłe do kierunku działania obciążenia. Kat nachylenia ścianek do pasa wynosi 90° , więc zawiera się w dopuszczalnym przedziale $60-120^\circ$.

Grubość spoin o nośności obliczeniowej nie mniejszej niż obliczeniowa nośność ścianki słupka może zostać wyliczona z następującej zależności

$$\sum a \geq \sqrt{2} \cdot \beta_w \cdot \frac{\frac{f_y}{\gamma_{M0}}}{\frac{f_u}{\gamma_{M2}}} \cdot t_1 \quad (7.38)$$

gdzie: β_w jest to współczynnik korelacji wynoszący dla stali S275 0,85, f_y granica plastyczności stali w MPa, γ_{M0}, γ_{M2} współczynniki częściowe stali, f_u jest to wytrzymałość graniczna na rozciąganie stali S275, t_1, t_2 są to grubości ścianek zastosowanych rur kwadratowych jako słupki i krzyżulec w połączeniu w mm.

$$\sum a \geq \sqrt{2} \cdot 0,85 \cdot \frac{\frac{275}{410}}{1,0} \cdot 4,5 = 3,63 \text{ mm}$$

$$\Sigma a \geq \sqrt{2} \cdot 0,85 \cdot \frac{\frac{275}{1,0}}{\frac{410}{1,0}} \cdot 6,3 = 5,00 \text{ mm}$$

Przyjęto kolejno spoiny pachwinowe: spoina pachwinowa ułożona dookoła brzegu słupka o grubości $a_2 = 4$ mm, natomiast spoina pachwinowa ułożona dookoła brzegu krzyżulca o grubości $a_1 = 5$ mm.

Spoiny mocujące krzyżulce

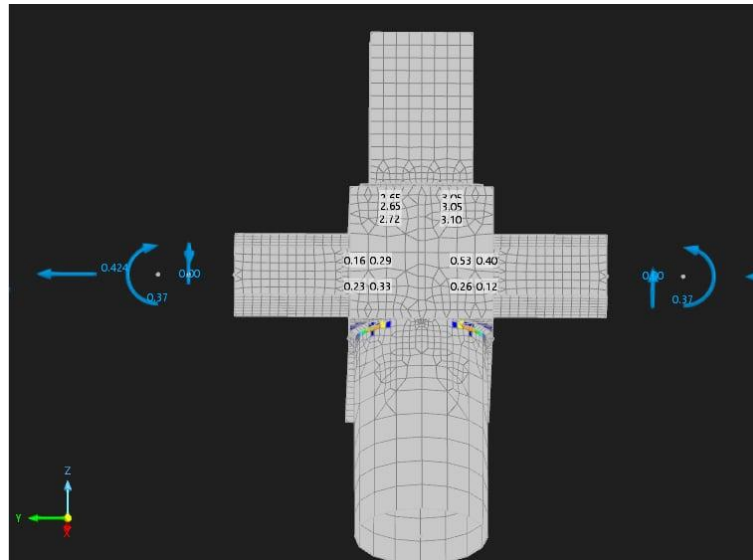
Spoinę mocującą dwie ścianki rury kwadratowej ustawione pod kątem prostym do lica pasa dolnego kratownicy przyjęto jak wyżej spoinę pachwinową o grubości $a_1 = 5$ mm. Trzecia ścianka rury nachylona jest pod kątem 49° . W punkcie 4.3.2.1 (2) normy [N5] kiedy występują kąty mniejsze niż 60° dopuszczalne jest zastosowanie spoiny pachwinowej, jednak należy ją traktować jako niepełną, ale zgodnie z punktem 4.7.2 normy [N5] jej nośność obliczeniową wyznacza się stosując metodę dla spoinach pachwinowych z pełnym przetopem. Zakłada się, brak pełnego przetopu, a zatem przyjęto grubość spoiny $a_1 = 5$ mm. Czwarta ścianka nachylona jest pod kątem $90^\circ + 49^\circ = 139^\circ$. Według normy [N5] zaleca się projektowanie spoin pachwinowych przy kątach nie większych niż 120° . Dlatego przyjęto też spoinę czołową z o pełnym przetopie na całej szerokości tej ścianki. Jej nośność jest nie mniejsza niż nośność ścianki kształtownika rurowego.

7.5. Połączenie pasa dolnego kratownicy łukowej z belką dolnej części konstrukcji hangaru tak zwanym „kozłem”.

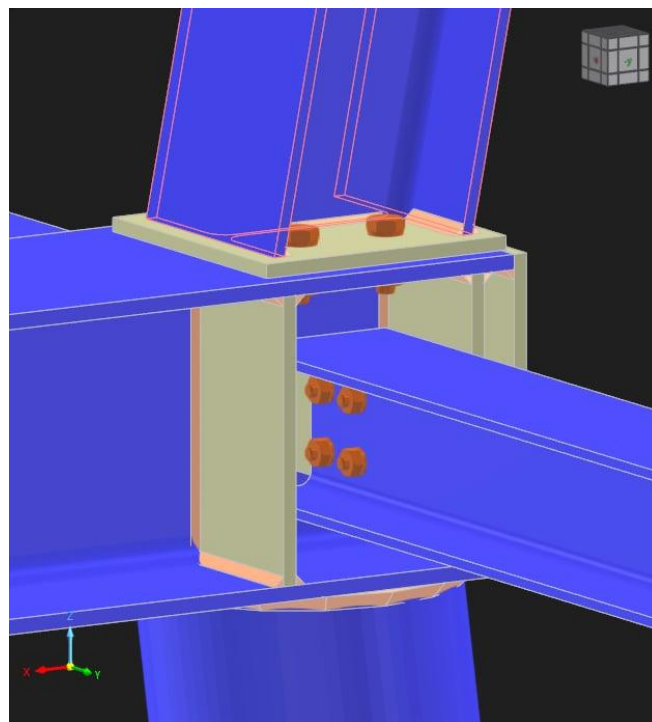
Zaprojektowany węzeł składa się z kształtownika HEA200 będącym pasem dolnym konstrukcji, oraz kształtownika HEA 280, pełniącego rolę oparcia pasa dolnego na dolnej części konstrukcji jaką jest tak zwany „koziół”. Połączenie składa się również z stężeń w postaci kształtowników HEA140, połączenia spawanego słupa nośnego dolnej części w postaci rury okrągłej CHS273,0x12,5 oraz krzyżulca dolnej części kratownicy budującej kozioł. Połączenie zostało rozbite na poszczególne komponenty. Analitycznemu wymiarowaniu poddano połączenie doczołowe pasa dolnego górnej części kratownicy łukowej opierającego się na belce górnej dolnej części konstrukcji głównego układu ramowego konstrukcji hangaru. Reszta komponentów została zwymiarowana i zweryfikowana w programie obliczeniowym do analizy konstrukcji RFEM 6. To wszystko zostało przeprowadzone w celu zwymiarowania najbardziej wyťažonego połączenia głównego układu ramowego hangaru i stworzenia późniejszej

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

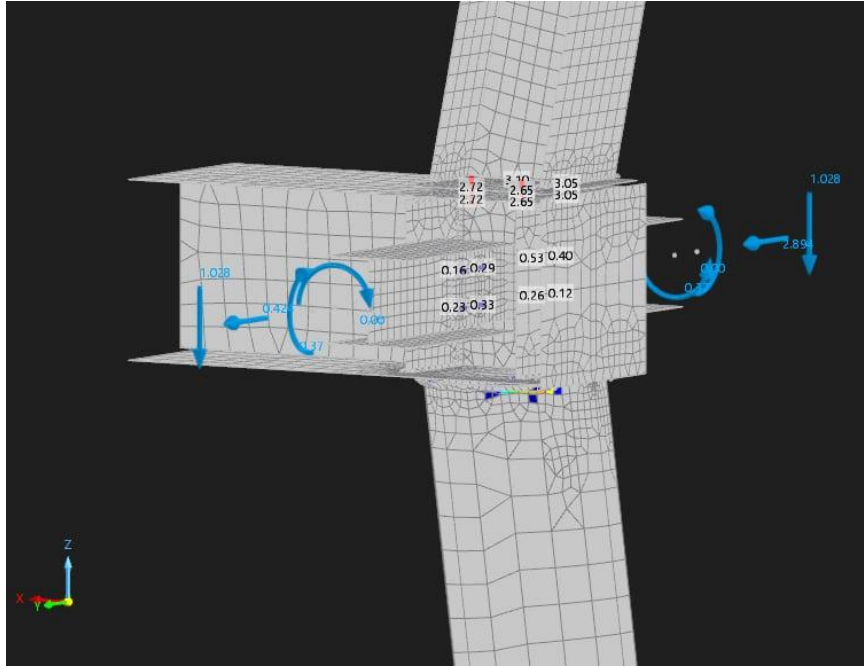
dokumentacji techniczno-wykonawczej w programie do modelowania konstrukcji 3D TEKLA STRUCTURES. Szczegóły konstrukcyjne pochodzące z modelu 3D budynku zostaną zaprezentowane w następnym rozdziale pracy.



Rys. 7.5.1. Model 3D połączenia belki dolnej części konstrukcji – „kozła” i pasa dolnego, górnej części łukowej kratownicy, najbardziej wyężone miejsce w przekroju - źródło własne



Rys. 7.5.2. Model 3D połączenia oparcia pasa dolnego kratownicy górnej na belce dolnej części konstrukcji – tzw. „kozła” – źródło własne



Rys. 7.5.3. Model 3D połączenia belki dolnej części konstrukcji – „kozła” i pasa dolnego, górnej części łukowej kratownicy- źródło własne

Siły wewnętrzne występujące w połączeniu

$$N_{Ed} = -704,91 \text{ kN (ściskanie)}$$

$$M_y = 11,72 \text{ kN (zginanie)}$$

Dane projektowe

Pas dolny kratownicy łukowej konstrukcji – HEA 200 – tabela 5.2, punkt 5.3.1,

Belka górna dolnej części konstrukcji – HEA 280 – tabela 5.7, punkt 5.3.5,

Stal S275J0 – tabela 5.9, punkt 5.4,

Blacha czołowa:

$$b_{ep} = 260,0 \text{ mm}, h_{ep} = 254 \text{ mm}, t_{ep} = 12,0 \text{ mm}, w = 160,0 \text{ mm}, e_x = 50 \text{ mm}, \\ e_p = 77 \text{ mm}.$$

Śruby M16, kl.10.9:

$$d = 16 \text{ mm}, A_s = 157 \text{ mm}^2, d_m = 26 \text{ mm}, f_{yb} = 900 \text{ MPa}, f_{ub} = 1000 \text{ MPa}.$$

Współczynniki częściowe:

$$\gamma_{M0} = 1,00, \quad \gamma_{M2} = 1,25, \quad \gamma_{M5} = 1,00, \gamma_{M2S} = 1,25$$

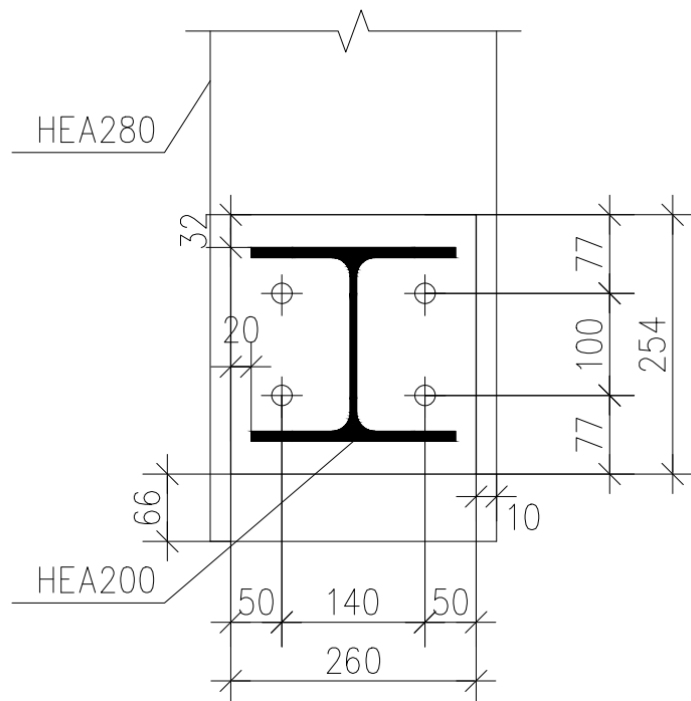
PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

Zgodnie z punktem 3.5 tj. Rozmieszczenie otworów na śruby normy [N5], rozstawy i odległości śrub zaproponowane w projektowanym połączeniu są spełnione gdyż:

- odległość czołowa e_1 – $\min 1,2d_0 = 1,2 \cdot 16 = 19,4$ mm. Minimalna odległość została spełniona.

- odległość boczna e_2 – $\min 1,2d_0 = 1,2 \cdot 16 = 19,4$ mm. Minimalna odległość została spełniona.

- rozstaw p – $\min 2,2d_0 = 2,2 \cdot 16 = 35,2$ mm. Minimalny rozstaw p również został spełniony. Wszystkie wyżej wymienione minimalne wymagane odległości zostały spełnione. Konstrukcyjnie rozstawy śrub zostały przyjęte w poprawny sposób.



Rys. 7.5.4. Schemat połączenia pasa dolnego górnej konstrukcji kratownicowej i belki dolnej części układu ramowego konstrukcji tzw. „kozła” - węzeł 253 - źródło własne

Spoiny łączące kształtownik HEA 200 z blachą czołową połączenia

$$a_{fmin} = \frac{\sqrt{2} \cdot \beta_w \cdot f_y \cdot \gamma_{M2S}}{\gamma_{M0} \cdot f_u} \cdot \frac{t_f}{2} \quad (7.39)$$

gdzie: β_w jest to współczynnik zależny od klasy stali spawanej w tym przypadku 0,85, f_y jest to granica plastyczności stali w MPa, f_u jest to graniczna wytrzymałość na rozciąganie stali konstrukcyjnej w MPa, t_f jest to grubość stopek kształtownika HEA 200 w mm, a γ_{M2S} jest to częściowy współczynnik bezpieczeństwa dla spoin wynoszący 1,25.

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

$$a_{fmin} = \frac{\sqrt{2} \cdot 0,85 \cdot 275 \cdot 1,25}{1,00 \cdot 410} \cdot \frac{10}{2} = 5,04 \text{ mm}$$

Przyjęto obustronną spoinę o grubości $a_1 = 6 \text{ mm}$.

Spoiny łączące środnik kształtownika

$$a_{wmin} = \frac{\sqrt{2} \cdot \beta_w \cdot f_y \cdot \gamma_{M2S}}{\gamma_{M0} \cdot f_u} \cdot \frac{t_w}{2} \quad (7.40)$$

gdzie: β_w jest to współczynnik zależny od klasy stali spawanej w tym przypadku 0,85, f_y jest to granica plastyczności stali w MPa, f_u jest to graniczna wytrzymałość na rozciąganie stali konstrukcyjnej w MPa, t_w jest to grubość środnika kształtownika HEA 200 w mm, a γ_{M2S} jest to częściowy współczynnik bezpieczeństwa dla spoin wynoszący 1,25.

$$a_{fmin} = \frac{\sqrt{2} \cdot 0,85 \cdot 275 \cdot 1,25}{1,00 \cdot 410} \cdot \frac{6,5}{2} = 3,28 \text{ mm}$$

Przyjęto obustronną spoinę o grubości $a_2 = 4 \text{ mm}$.

Sprawdzenie nośności połączenia za względu na ściskanie

Nośność środnika przy poprzecznym ściskaniu

Nośność środnika określono jak dla środnika nieuźebrowanego – jest to podejście bezpieczne. Dodatkowo blacha czołowa nie wystaje poza obrys pasa belki głównej dolnej części układu ramowego hangaru.

$$c = 0 \text{ mm}$$

$$s_p = t_{ep} + c \quad (7.41)$$

gdzie: t_{ep} jest to grubość zastosowanej blachy czołowej w połączeniu doczołowym w mm.

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

$$b_{effcwc} = t_f + 2 \cdot \sqrt{2} \cdot a_f + 5 \cdot (t_{fc} + r_c) + s_c \quad (7.42)$$

gdzie: t_f jest to grubość półki zastosowanego kształtownika jako pas dolny w górnej części kratownicowej w mm, a_f jest to grubość zastosowanej spoiny wokół pasów kształtownika $a_f = 6 \text{ mm}$, t_{fc} jest to grubość pasów belki dolnej części kratownicowej układu czy na tzw. „koźle” r_c jest to promień zagięcia ścianek kształtownika HEA 280 w mm, a s_c jest to grubość blachy czołowej w połączeniu w mm.

$$b_{effcwc} = 10 + 2 \cdot \sqrt{2} \cdot 6 + 5 \cdot (13 + 24) + 12 = 223,97 \text{ mm}$$

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

$$d_{wc} = h_c - 2 \cdot (t_{fc} + r_c) \quad (7.43)$$

gdzie: h_c jest to wysokość kształtownika HEA 280 w mm, t_{fc} jest to grubość pasów dolnych kształtownika HEA 280 w mm, natomiast r_c jest to promień gięcia ścianek kształtownika w mm.

$$d_{wc} = 280 - 2 \cdot (13 + 24) = 206 \text{ mm}.$$

Smukłość płytowa środnika

$$\lambda_{pw} = 0,932 \cdot \sqrt{\frac{b_{effcwc} \cdot d_{wc} \cdot f_y}{E_s \cdot t_{wc}^2}} \quad (7.44)$$

gdzie: b_{effcwc} obliczona wyżej długość efektywna w mm, d_{wc} jest to wysokość środnika w świetle pasów kształtownika HEA 280, f_y jest to granica plastyczności zastosowanej stali w MPa, E_s jest to moduł sprężystości podłużnej stali konstrukcyjnej w GPa, a t_{wc} jest to grubość środnika kształtownika HEA 280 w mm.

$$\lambda_{pw} = 0,932 \cdot \sqrt{\frac{223,97 \cdot 206 \cdot 275 \cdot 10^6}{210 \cdot 10^9 \cdot 8^2}} = 0,91$$

Współczynnik redukcyjny z uwagi na wyboczenie miejscowe w wymiarowanym połączeniu

$$\lambda_{pw} \leq 0,72 \text{ to } \left\{ \frac{1}{\frac{\lambda_{pw} - 0,2}{\lambda_{pw}^2}} \right. \quad (7.45)$$

gdzie: λ_{pw} jest to smukłość płytowa obliczona powyżej.

$$\lambda_{pw} = 0,91 \text{ więc } \frac{\lambda_{pw} - 0,2}{\lambda_{pw}^2} = \frac{0,91 - 0,2}{0,91^2} = 0,86$$

Współczynnik redukcyjny wynosi $\rho = 0,86$

Parametr transformacji wg normy [N5]

$$\beta_t = 1$$

Współczynnik redukcyjny

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3 \cdot \left(\frac{b_{effcwc} \cdot t_{wc}}{A_{vc}} \right)^2}} \quad (7.46)$$

gdzie: b_{effcwc} jest to długość efektywna (szerokość) ściskanego środnika kształtownika HEA 280 w mm, t_{wc} jest to grubość środnika tego kształtownika w mm, A_{vc} jest to pole powierzchni czynnego ścinania kształtownika w mm. $A_{vc} = 31,74 \text{ cm}^2$.

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3 \cdot \left(\frac{223,97 \cdot 8,0}{31,74 \cdot 10^2} \right)^2}} = 0,84$$

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

Napężenie normalne w środniku (na końcu płaskiej jego części)

$$\sigma_{comEd} = \frac{N_{cc,Ed}}{A_c} + \frac{M_{cc,Ed}}{I_{y,c}} \cdot \frac{d_{wc}}{2} \quad (7.47)$$

gdzie: $N_{cc,Ed}$ siła ściskająca występująca w analizowanym połączeniu, A_c pole powierzchni kształownika HEA 280 w mm^2 , $M_{cc,Ed}$ jest to moment zginający występujący w analizowanym połączeniu w kNm, $I_{y,c}$ moment bezwładności kształownika względem osi y w mm^4 , d_{wc} wysokość środnika w świetle ścianek kształownika w mm.

$$\sigma_{comEd} = \frac{704,91}{97,3 \cdot 10^2} + \frac{11,72 \cdot 1000}{13670 \cdot 10^4} \cdot \frac{206}{2} = 81,28 \frac{N}{\text{mm}^2} = 81,28 \text{ Pa}$$

Współczynnik redukcyjny uwzględniający wartość maksymalnych naprężeń ściskających

$$k_{wc} = \sigma_{comEd} \leq 0,7 \cdot f_y \left\{ 1,7 - \frac{\sigma_{comEd}}{f_y} \right\} \quad (7.48)$$

$$k_{wc} = 1,00$$

Nośność środnika belki „kozła” przy poprzecznym ściskaniu stopkami HEA 200

$$F_{cwcRd} = \min \left(\frac{\omega \cdot k_{wc} \cdot b_{effcwc} \cdot t_{wc} \cdot f_y}{\gamma_{M0}}; \frac{\omega \cdot k_{wc} \cdot \rho \cdot b_{effcwc} \cdot t_{wc} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \right) \quad (7.49)$$

gdzie: ω jest to współczynnik redukcyjny, k_{wc} jest to również współczynnik redukcyjny uwzględniający wartość maksymalnych naprężeń ściskających, t_{wc} jest to grubość środnika kształownika HEA 280 w mm, f_y jest to granica plastyczności stali MPa, natomiast ρ jest to współczynnik redukcyjny ze względu na wyboczenie środnika.

$$F_{cwcRd} = \min \left(\frac{0,84 \cdot 1,00 \cdot 223,97 \cdot 8,00 \cdot 275}{1,00}; \frac{0,84 \cdot 1,00 \cdot 0,86 \cdot 223,97 \cdot 8,00 \cdot 275}{1,00} \right) =$$
$$\min(413,90 \text{ kN}, 355,95 \text{ kN}) = 355,95 \text{ kN}$$

Nośność połączenia

$$F_{jRd} = 2 \cdot F_{cwcRd} = 2 \cdot 355,95 = 711,90 \text{ kN}$$

Wykorzystanie nośności połączenia

$$\eta = \frac{N_{Ed}}{F_{j,Rd}} \leq 1 \quad (7.50)$$

gdzie: N_{Ed} jest to siła osiowa występująca w analizowanym węźle w kN, $F_{j,Rd}$ jest to nośność środnika belki głównej „kozła” dolnej części konstrukcji przy poprzecznym ściskaniu.

$$\eta = \frac{704,91}{711,90} = 0,99$$

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

Warunek nośności został spełniony. Dodatkowo ze względów konstrukcyjnych wykonano dwa żebra usztywniające belkę główną „kozła” czyli kształtownika HEA 280, w miejscach przyłożenia stopek kształtownika HEA 200 czyli pasa dolnego górnej kratownicy układu. Dodatkowo przeprowadzono analizę numeryczną połączenia, w programie obliczeniowym RFEM 6 i przeanalizowano styk słupa nośnego kozła czyli kształtownika rurowego z ową belką główną, na której opiera się górna konstrukcja. Analiza potwierdziła, że występowanie dodatkowych żebrow usztywniających w miejscach przyłożenia stopek pasa dolnego kratownicy pomoże w przenoszeniu sił wewnętrznych z górnej części układu ramowego na część dolną. Co więcej, ze względów technologicznych wręcz zalecane jest usztywniać miejsca newralgiczne połączeń dochodzących elementów stalowych, a te połączenie zdecydowanie tego wymaga. Wszystkie szczegóły konstrukcyjne zostaną zaprezentowane na modelu 3D konstrukcji w programie TEKLA STRUCTURES oraz na dokumentacji techniczno-wykonawczej.

Grubość spoiny łączącej żebro usztywniające do słupa

$$a_{3max} = 0,7 \cdot t_s \quad (7.51)$$

gdzie: t_s jest to grubość zastosowanej blachy na usztywnienie pasów kształtownika HEA 280 jako belka w części dolnej konstrukcji w mm.

$$a_{3max} = 0,7 \cdot 12 = 8,4 \text{ mm}$$

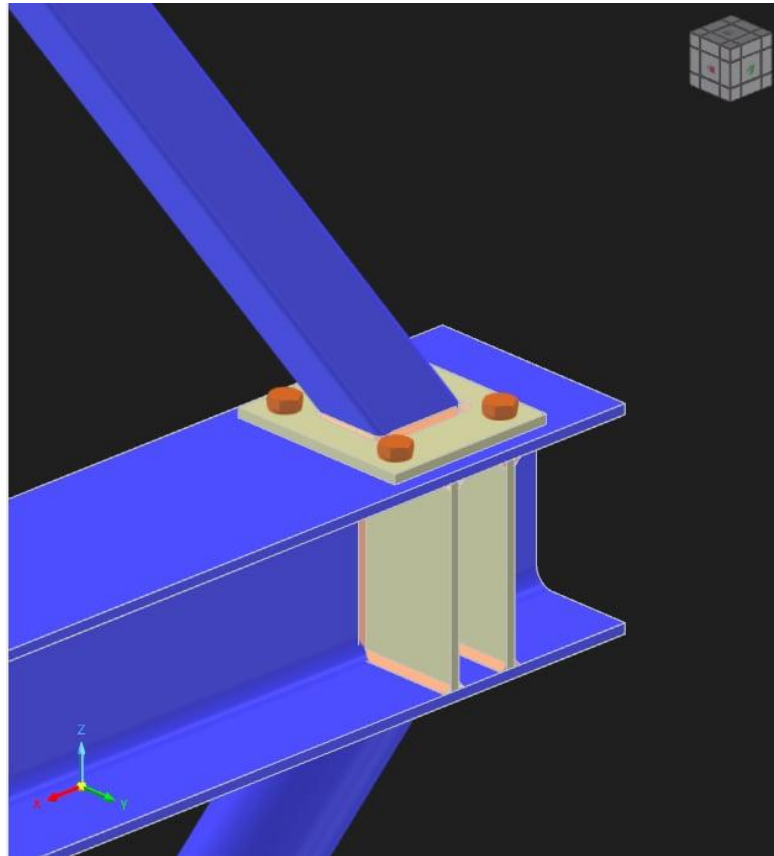
Przyjęto grubość spoin wynoszącą $a_3 = 5 \text{ mm}$.

7.6. Połączenie krzyżulca kratownicy łukowej z belką dolnej części konstrukcji hangaru tak zwanym „kozłem”.

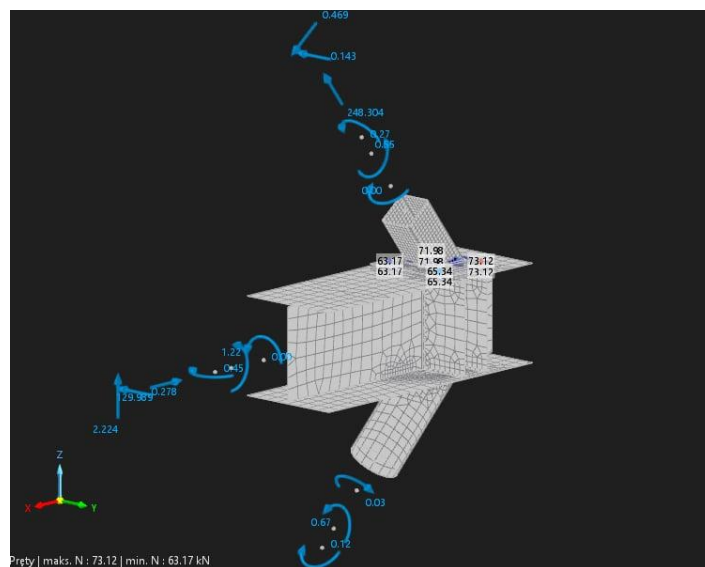
Zaprojektowany węzeł składa się z kształtownika SHS100x6,3 będącym krzyżulcem górnej kratownicy łukowej konstrukcji oraz kształtownika HEA 280, pełniącego rolę oparcia pasa dolnego na dolnej części konstrukcji jaką jest tak zwany „kozioł”. Te połączenie jest kontynuacją połączenia zwymiarowanego powyżej (patrz punkt 7.5.), jednak obliczeniowo jest one traktowane jako osobny węzeł, gdyż żaden element nie jest wspólnych dla obu połączeń. Jest to oparcie krzyżulca górnej części konstrukcji łuku kratownicowego na dolnej części. Połączenie zostało zaprojektowane jako połączenie doczołowe ze względu na dużą sztywność połączenia oraz nośność. Szczegóły konstrukcyjne połączenia zostaną zaprezentowane w

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

następnym rozdziale pracy. Wszystkie szczegóły zostały zamodelowane w wspomnianym programie do modelowania konstrukcji 3D – TEKLI STRUCTURES.



Rys. 7.5.1. Model 3D połączenia oparcia krzyżulca kratownicy górnej na belce dolnej części konstrukcji – tzw. „kozła” – źródło własne



Rys. 7.5.2. Model 3D połączenia belki dolnej części konstrukcji – „kozła” i pasa dolnego, górnej części łukowej kratownicy- źródło własne

Siły wewnętrzne występujące w połączeniu

$$N_{Ed} = 73,12 \text{ kN (rozciąganie)}$$

$$F_{V,Ed} = 50,95 \text{ kN (ściskanie)}$$

Dane projektowe

Krzyżulec górnej części łuku kratowego – SHS100x6,3 – tabela 5.3, punkt 5.3.2,

Belka górna dolnej części konstrukcji – HEA 280 – tabela 5.7, punkt 5.3.5,

Stal S275J0 – tabela 5.9, punkt 5.4,

Blacha czołowa:

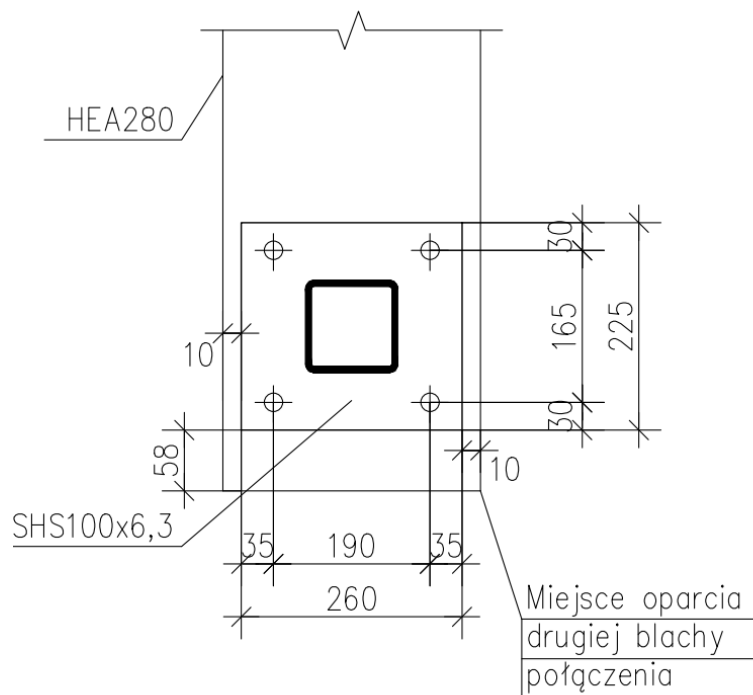
$$b_{ep} = 260,0 \text{ mm}, h_{ep} = 225 \text{ mm}, t_{ep} = 12,0 \text{ mm}, w = 190,0 \text{ mm}, e_x = 35 \text{ mm}, e_p = 35 \text{ mm}.$$

Śruby M20, kl.10.9:

$$d = 20 \text{ mm}, A_s = 245 \text{ mm}^2, d_m = 32 \text{ mm}, f_{yb} = 900 \text{ MPa}, f_{ub} = 1000 \text{ MPa}.$$

Współczynniki częściowe:

$$\gamma_{M0} = 1,00, \gamma_{M2} = 1,25, \gamma_{M5} = 1,00, \gamma_{M2S} = 1,25$$



Rys. 7.6.3. Rozstawy oraz wymiary otworów w projektowanym węźle - źródło własne

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

Zgodnie z punktem 3.5 tj. Rozmieszczenie otworów na śruby normy [N5], rozstawy i odległości śrub zaproponowane w projektowanym połączeniu są spełnione gdyż:

- odległość czołowa e_1 – $\min 1,2d_0 = 1,2 \cdot 20 = 24,0$ mm. Minimalna odległość została spełniona.

- odległość boczna e_2 – $\min 1,2d_0 = 1,2 \cdot 20 = 24,0$ mm. Minimalna odległość została spełniona.

- rozstaw p – $\min 2,2d_0 = 2,2 \cdot 20 = 44,0$ mm. Minimalny rozstaw p również został spełniony. Wszystkie wyżej wymienione minimalne wymagane odległości zostały spełnione. Konstrukcyjnie rozstawy śrub zostały przyjęte w poprawny sposób.

Spoiny łączące kształtownik SHS100x6,3 z blachą czołową połączenia

$$a_1 = \frac{\sqrt{2} \cdot \beta_w \cdot f_y \cdot \gamma_{M2S}}{\gamma_{M0} \cdot f_u} \cdot \frac{t_f}{2} \quad (7.39)$$

$$a_1 = \frac{\sqrt{2} \cdot 0,85 \cdot 275 \cdot 1,25}{1,00 \cdot 410} \cdot \frac{6,3}{2} = 3,17 \text{ mm}$$

Ze względu na warunki konstrukcyjne, kąt nachylenia krzyżulca i wytrzymałość połączenia przyjęto grubość spoiny pachwinowej na poziomie $a_1 = 5,0$ mm.

Nośność na ścinanie w jednej płaszczyźnie

Nośność na ścinanie zgodnie z punktem 3.6.1. tab.3.4, normy [N5]

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} \quad (7.1)$$

gdzie: α_v jest to współczynnik zależy od płaszczyzny ścinania przechodzącej przez gwintowaną część śruby oraz klasy śruby w tym przypadku $\alpha_v = 0,5$ (klasa 10.9), f_{ub} jest to wytrzymałość na rozciąganie śruby zgodna z jej klasą w MPa, A_s jest to pole przekroju czynnego śruby w mm^2 , natomiast γ_{M2} jest to współczynnik częściowy .

$$F_{v,Rd} = \frac{0,5 \cdot 1000 \cdot 245}{1,25} = 98,00 \text{ kN}$$

Wykorzystanie

$$\eta_{Fv} = \frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} \leq 1 \quad (7.2)$$

$$\eta_{Fv} = \frac{50,95}{98,00} = 0,52 \leq 1$$

Warunek na nośność na ścinanie w jednej płaszczyźnie został spełniony.

Nośność na docisk

Zgodnie z punktem 3.6.1. tab.3.4, normy [N5] prostopadle do kierunku obciążenia przyjmujemy:

Skrajne położenie śruby, po lewej od kierunku działania siły

$$k_{1,l} = \min \left(2,8 \cdot \left(\frac{e_{2,l}}{d_0} \right) - 1,7; 2,5 \right) \quad (7.3)$$

$$k_{1,l} = \min \left(2,8 \cdot \left(\frac{35}{20,0} \right) - 1,7; 2,5 \right) = 2,50$$

Skrajne położenie śruby, po prawej od kierunku działania siły

$$k_{1,p} = \min \left(2,8 \cdot \left(\frac{e_{2,p}}{d_0} \right) - 1,7; 2,5 \right) \quad (7.4)$$

$$k_{1,p} = \min \left(2,8 \cdot \left(\frac{30}{20,0} \right) - 1,7; 2,5 \right) = 2,50$$

Współczynnik k_1 ma zatem wartość równą 2,50.

Skrajne położenie śruby w kierunku działania siły

$$\alpha_b = \min \left(\frac{e_1}{3 \cdot d_0}, \frac{f_{ub}}{f_u}, 1 \right) \quad (7.5)$$

$$\alpha_b = \min \left(\frac{30}{3 \cdot 20}, \frac{1000}{410}, 1 \right) = 0,50$$

Obliczeniowa nośność na docisk

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}} \quad (7.6)$$

$$F_{b,Rd} = \frac{2,50 \cdot 0,50 \cdot 410,0 \cdot 20,0 \cdot 12,0}{1,25} = 98,40 \text{ kN}$$

Wykorzystanie

$$\eta_{Fb} = \frac{F_{v,Ed}}{F_{b,Rd}} \leq 1 \quad (7.7)$$

$$\eta_{Fv} = \frac{50,95}{98,40} = 0,52 \leq 1$$

Warunek połączenia na docisk został spełniony

Nośność na rozciąganie

$$F_{t,Rd} = \frac{k_2 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} \quad (7.8)$$

gdzie: k_2 jest to współczynnik zależny od śruby z wpuszczonym łbem, w tym przypadku $k_2 = 0,90$, f_{ub} jest to wytrzymałość na rozciąganie śruby w MPa, A_s jest to pole przekroju czynnego śruby w mm², a γ_{M2} jest to współczynnik częściowy.

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

$$F_{t,Rd} = \frac{0,90 \cdot 1000 \cdot 254,0}{1,25} = 176,40 \text{ kN}$$

Wykorzystanie

$$\eta_{Ft} = \frac{F_{t,Ed}}{F_{t,Rd}} \leq 1 \quad (7.9)$$

$$\eta_{Ft} = \frac{73,12}{176,40} = 0,41 \leq 1$$

Warunek nośności węzła na rozciąganie został spełniony.

Nośność na ścinanie przy przebiciu - przeciągnięcie

$$B_{p,Rd} = \frac{0,60 \cdot \pi \cdot d_m \cdot t_p \cdot f_u}{\gamma_{M2}} \quad (7.10)$$

$$B_{p,Rd} = \frac{0,60 \cdot 3,14 \cdot 32,0 \cdot 12,0 \cdot 410}{1,25} = 237,41 \text{ kN}$$

Wykorzystanie

$$\eta_{Bp} = \frac{F_{t,Ed}}{B_{p,Rd}} \leq 1 \quad (7.11)$$

$$\eta_{Ft} = \frac{73,12}{237,41} = 0,31 \leq 1$$

Warunek nośności węzła na przeciągnięcie został spełniony.

Nośność na ścinanie z rozciąganiem

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4 \cdot F_{t,Rd}} \leq 1,0 \quad (7.12)$$

$$\frac{50,95}{98,00} + \frac{73,12}{1,4 \cdot 176,40} = 0,82 \leq 1,0$$

Warunek nośności węzła na ścinanie z rozciąganiem został spełniony.

Połączenie śrubowe doczołowe poddane rozciąganiu

Szereg śrub nr 1

Pas belki głównej dolnej części „kozła” zginany wskutek oddziaływań poprzecznych. Przypadek blachy czołowej węższej, nie wystające poza szerokość kształtownika HEA280 (belki).

$$m_1 = 58,00 - 0,8 \cdot 5 \cdot \sqrt{2} = 52,34 \text{ mm},$$

Odległość 58,00 mm jest to odległość odczytana z programu TEKLA STRUCTURES, gdzie zamodelowano dokładnie geometrię całego połączenia. Jest to odległość na leżąca na przekątnej blachy czołowej, zatem nie można było policzyć jej w sposób analityczny.

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

$$e_c = \frac{b_{fc} - w}{2} \quad (7.51)$$

gdzie: b_{fc} jest to szerokość kształtownika HEA280 (belki „kozła”) w mm, w jest to poziomy rozstaw otworów w połączeniu w mm.

$$e_c = \frac{280 - 190}{2} = 45 \text{ mm}$$

Wyznaczenie długości efektywnych dla przypadku uźebrowanego pasa słupa

Długość efektywna, mechanizm kołowy, szereg śrub w pobliżu umieszczonego żebra

$$l_{eff,cp} = 2 \cdot \pi \cdot m_1 \quad (7.52)$$

gdzie: m_1 jest to odległość otworu do początku spoiny kształtownika w mm.

$$l_{eff,cp} = 2 \cdot \pi \cdot 52,34 = 328,86 \text{ mm}$$

Długość efektywna, mechanizm niekołowy, szereg śrub w pobliżu żebra

$$m_2 = 0,5 \cdot (p - t_s - 2 \cdot 0,8 \cdot a_1 \cdot \sqrt{2}) \quad (7.53)$$

gdzie: p jest to pionowy rozstaw śrub w połączeniu w mm, t_s jest to grubość zastosowanego żebra w mm (zastosowano zebro o grubości 12 mm), a_1 jest to grubość spoiny wokół żebra w mm (zastosowano spoinę identyczną jak w przypadku kształtownika) a zatem $a_1 = 5$ mm.

$m_2 = 30 \text{ mm}$, jest to odległość odczytana z programu TEKLA STRUCTURES, gdzie zamodelowano dokładnie geometrię całego połączenia. (odległość od śruby do spoiny łączącej zebro do pasa górnego kształtownika HEA 280).

$$\lambda_1 = \frac{m_1}{m_1 + e_c} \quad (7.54)$$

$$\lambda_1 = \frac{52,34}{52,34 + 45,00} = 0,54$$

$$\lambda_2 = \frac{m_2}{m_2 + e_c} \quad (7.55)$$

$$\lambda_2 = \frac{30}{30 + 45,00} = 0,40$$

Na podstawie rysunku 6.11 (Wartości α w przypadku uźebrowanych pasów słupów i blach czołowych) normy [N5] przyjęto: $\alpha_{nc} = 5,75$,

$$l_{eff,nc} = \alpha_{nc} \cdot m_1 \quad (7.56)$$

$$l_{eff,nc} = 5,75 \cdot 52,34 = 300,96 \text{ mm}$$

Model zniszczenia węzła 1

$$l_{eff1} = \min(l_{effcp}; l_{effnc}) \quad (7.57)$$

$$l_{eff1} = \min(328,86; 300,96) = 300,96 \text{ mm}$$

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

$$M_{pl1,Rd} = 0,25 \cdot l_{eff1} \cdot t_{fc}^2 \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \quad (7.58)$$

gdzie: l_{eff1} jest to wyznaczona długość efektywna w mm, t_{fc} jest to grubość pasów kształtownika belki „kozła” w mm, f_y jest to granica plastyczności stali w MPa, γ_{M0} jest to częściowy współczynnik bezpieczeństwa stali.

$$M_{pl1,Rd} = 0,25 \cdot 300,96 \cdot 13^2 \cdot \frac{275}{1} = 3496,78 \text{ kN} \cdot \text{mm}$$

$$F_{T1,Rd} = \frac{4 \cdot M_{pl1,Rd}}{m_1} \quad (7.59)$$

$$F_{T1,Rd} = \frac{4 \cdot 3496,78}{52,34} = 267,24 \text{ kN}$$

Model zniszczenia węzła 2

$$l_{eff2} = l_{effnc} = 300,96 \text{ mm}$$

$$M_{pl2,Rd} = M_{pl1,Rd} = 3496,78 \text{ kN} \cdot \text{mm}$$

gdzie: l_{eff2} jest to wyznaczona długość efektywna w mm, t_{fc} jest to grubość pasów kształtownika belki „kozła” w mm, f_y jest to granica plastyczności stali w MPa, γ_{M0} jest to częściowy współczynnik bezpieczeństwa stali.

$$n_2 = e_c = 45 \text{ mm}$$

$$n_{min} = 1,25 \cdot m_1 = 1,25 \cdot 52,34 = 65,43 \text{ mm}$$

$$n_2 = \min(n_2; n_{min}) = \min(45; 65,43) = 45,00 \text{ mm}$$

Obliczeniowa nośność śruby na rozciąganie

Nośność śruby na rozciąganie obliczona zgodnie z punktem 8.6.5. $F_{t,Rd} = 176,40 \text{ kN}$.

$$F_{T2Rd} = \frac{2 \cdot M_{pl2,Rd} + n_2 \cdot 2 \cdot F_{t,Rd}}{m_1 + n_2} \quad (7.60)$$

$$F_{T2Rd} = \frac{2 \cdot 3496,78 + 45 \cdot 2 \cdot 176,40}{52,34 + 45} = 234,95 \text{ kN}$$

Model zniszczenia węzła 3

$$T_{T3Rd} = 2 \cdot F_{t,Rd} \quad (7.61)$$

$$T_{T3Rd} = 2 \cdot 176,40 = 352,80 \text{ kN}$$

Nośność pasa belki „kozła”

$$F_{t1fc,Rd} = \min(F_{T1,Rd}; F_{T2,Rd}; F_{T3,Rd}) \quad (7.62)$$

$$F_{t1fc,Rd} = \min(267,24; 234,95; 352,80) = 234,95 \text{ kN}$$

O nośności połączenia śrubowego stanowi zerwanie śrub z częściowym uplastycznieniem blachy czołowej (schemat zniszczenia połączenia nr 2).

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

Parametr transformacji

$$\beta_t = 1,0,$$

$$b_{efftwc} = \min(l_{effcp}; l_{effnc}) \quad (7.63)$$

$$b_{efftwc} = \min(328,86; 300,96) = 300,96 \text{ mm}$$

Współczynnik redukcji

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3 \cdot \left(\frac{b_{effcwc} \cdot t_{wc}}{A_{vc}} \right)^2}} \quad (7.46)$$

gdzie: b_{effcwc} jest to długość efektywna (szerokość) ściskanego środnika kształtownika HEA 280 w mm, t_{wc} jest to grubość środnika tego kształtownika w mm, A_{vc} jest to pole powierzchni czynnego ścinania kształtownika w mm. $A_{vc} = 31,74 \text{ cm}^2$.

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3 \cdot \left(\frac{300,96 \cdot 8,0}{31,74 \cdot 10^2} \right)^2}} = 0,76$$
$$F_{t1wc,Rd} = \frac{\omega \cdot b_{efftwc} \cdot t_{wc} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (7.64)$$

gdzie: ω jest to obliczony współczynnik redukcji, b_{efftwc} jest to efektywna szerokość ściskanego środnika kształtownika HEA 280 w mm, t_{wc} jest to grubość środnika w mm, f_y jest to granica stali konstrukcyjnej w MPa, γ_{M0} jest to częściowy współczynnik bezpieczeństwa stali.

$$F_{t1wc,Rd} = \frac{0,76 \cdot 300,96 \cdot 8,00 \cdot 275}{1,00} = 503,21 \text{ kN}$$

Blacha czołowa w strefie rozciągania

$$m_{1b} = m_1 = 52,34 \text{ mm},$$

$$e_p = 35 \text{ mm},$$

$$e_{min} = \min(e_p; e_{min}) = \min(52,34; 35) = 35,00 \text{ mm}$$

Długość efektywna, mechanizm kołowy, 1 szereg śrub w pobliżu umieszczonego zebra

$$l_{eff,cp} = 2 \cdot \pi \cdot m_{1b} \quad (7.52)$$

gdzie: m_{1b} jest to odległość otworu do początku spoiny kształtownika w mm.

$$l_{eff,cp} = 2 \cdot \pi \cdot 52,34 = 328,86 \text{ mm}$$

Długość efektywna, mechanizm niekołowy, 1 szereg śrub w pobliżu umieszczonego zebra

$$m_{2b} = m_2 = 30,00 \text{ mm},$$

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

$$\lambda_1 = \frac{m_{1b}}{m_{1b} + e_p} \quad (7.54)$$

$$\lambda_1 = \frac{52,34}{52,34 + 35,00} = 0,60$$

$$\lambda_2 = \frac{m_{2b}}{m_b + e_p} \quad (7.55)$$

$$\lambda_2 = \frac{30}{30 + 35,00} = 0,46$$

Na podstawie rysunku 6.11 (Wartości α w przypadku uźebrowanych pasów słupów i blach czołowych) normy [N5] przyjęto: $\alpha_b = 5,25$,

$$l_{eff,nc} = \alpha_{nc} \cdot m_{1b} \quad (7.56)$$

$$l_{eff,nc} = 5,25 \cdot 52,34 = 274,79 \text{ mm}$$

Model zniszczenia węzła 1

$$l_{eff1} = \min(l_{effcp}; l_{effnc}) \quad (7.57)$$

$$l_{eff1} = \min(328,86; 274,79) = 276,79 \text{ mm}$$

$$M_{pl1,Rd} = 0,25 \cdot l_{eff1} \cdot t_{ep}^2 \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \quad (7.58)$$

$$M_{pl1,Rd} = 0,25 \cdot 276,79 \cdot 12^2 \cdot \frac{275}{1} = 2740,221 \text{ kN} \cdot \text{mm}$$

$$F_{T1,Rd} = \frac{4 \cdot M_{pl1,Rd}}{m_{1b}} \quad (7.59)$$

$$F_{T1,Rd} = \frac{4 \cdot 2740,22}{52,34} = 209,42 \text{ kN}$$

Model zniszczenia węzła 2

$$l_{eff2} = l_{effnc} = 274,79 \text{ mm}$$

$$M_{pl2,Rd} = M_{pl1,Rd} = 2740,22 \text{ kN} \cdot \text{mm}$$

$$n_{1b} = \min(e_2; 1,25 \cdot m_{1b}) = \min(35; 65,43) = 35,00 \text{ mm}$$

Obliczeniowa nośność śruby na rozciąganie

Nośność śruby na rozciąganie obliczona zgodnie z punktem 8.6.5. $F_{t,Rd} = 176,40 \text{ kN}$.

$$F_{T2Rd} = \frac{2 \cdot M_{pl2,Rd} + n_{1b} \cdot 2 \cdot F_{t,Rd}}{m_{1b} + n_{1b}} \quad (7.60)$$

$$F_{T2Rd} = \frac{2 \cdot 2740,22 + 35 \cdot 2 \cdot 176,40}{52,34 + 35} = 253,46 \text{ kN}$$

Model zniszczenia węzła 3

$$T_{T3Rd} = 2 \cdot F_{t,Rd} \quad (7.61)$$

$$T_{T3Rd} = 2 \cdot 176,40 = 352,80 \text{ kN}$$

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

Nośność blachy czołowej połączenia

$$F_{t1ep,Rd} = \min(F_{T1,Rd}; F_{T2,Rd}; F_{T3,Rd}) \quad (7.62)$$

$$F_{t1ep,Rd} = \min(209,42; 253,46; 352,80) = 209,42 \text{ kN}$$

O nośności połączenia śrubowego stanowi całkowite uplastycznienie blachy czołowej i powstanie mechanizmu.

Środek belki w strefie rozciągania

$$b_{efftwb} = \min(l_{effcp}; l_{effnc})$$

$$b_{efftwb} = \min(328,86; 274,79) = 276,79 \text{ mm}$$

$$F_{t1wb,Rd} = \frac{b_{efftwb} \cdot t_w \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (7.63)$$

gdzie: b_{effwb} szerokość efektywna w mm, t_w jest to szerokość ścianki rury kwadratowej w mm, f_y jest to granica plastyczności stali w MPa, γ_{M0} jest to współczynnik częściowy stali.

$$F_{t1wb,Rd} = \frac{276,79 \cdot 6,3 \cdot 275}{1,0} = 479,54 \text{ kN}$$

Nośność 1 szeregu śrub

$$F_{t1,Rd} = \min(F_{t1fc,Rd}; F_{t1wc,Rd}; F_{t1ep,Rd}; F_{t1wb,Rd}) \quad (7.64)$$

$$F_{t1,Rd} = \min(234,95; 503,21; 209,42; 479,54) = 209,42 \text{ kN}$$

Nośność 2 szeregu śrub

Z uwagi na symetrię całego złącza obliczenia nośność 2 szeregu śrub są dokładnie takie same jak dla pierwszego szeregu. Nośność 2 szeregu śrub wynosi $F_{t2,Rd} = 209,42 \text{ kN}$

Nośność szeregów 1 i 2, rozważanych jako grupa szeregów

$$m_{12b} = m_{2b} = 30,00 \text{ mm},$$

$$e_{12} = e_p = 35,00 \text{ mm},$$

$$e_{12min} = \min(e_p; e_c) = \min(30; 35) = 30,00 \text{ mm}$$

Szereg śrub nr 1

Długość efektywna, mechanizm kołowy, 1 szereg śrub w pobliżu umieszczonego żebra

$$l_{eff,cp1} = \pi \cdot m_{12,b} + p \quad (7.65)$$

gdzie: m_{12b} jest to odległość otworu do początku spoiny kształtownika w mm.

$$l_{eff,cp} = \pi \cdot 30,00 + 165 = 259,25 \text{ mm}$$

Długość efektywna, mechanizm niekołowy, 1 szereg śrub w pobliżu umieszczonego żebra

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

$$l_{eff,nc1} = 0,5 \cdot p + \alpha_b \cdot m_{12b} - (2 \cdot m_{12b} + 0,625 \cdot e_{12}) \quad (7.66)$$

gdzie: m_{12b} jest to odległość otworu do początku spoiny kształtownika w mm, p jest to rozstaw pionowy śrub w mm, e jest to odległość śruby od krawędzi blachy w mm.

$$l_{eff,nc1} = 0,5 \cdot 165 + 5,25 \cdot 30,00 - (2 \cdot 30,00 + 0,625 \cdot 35,00) = 158,13 \text{ mm}$$

Szereg śrub nr 2

Szereg śrub nr 2 jest symetryczny względem szeregu pierwszego, a zatem:

$$l_{effcp2} = l_{effcp1} = 259,25 \text{ mm}$$

$$l_{effnc2} = l_{effnc1} = 158,13 \text{ mm}$$

Model zniszczenia węzła 1

$$l_{eff1} = \min(l_{effcp1} + l_{effcp2}; l_{effnc1} + l_{effnc2}) \quad (7.67)$$

$$l_{eff1} = \min(259,25 + 259,25; 158,13 + 158,13) = 316,26 \text{ mm}$$

$$M_{pl1,Rd} = 0,25 \cdot l_{eff1} \cdot t_{ep}^2 \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \quad (7.58)$$

$$M_{pl1,Rd} = 0,25 \cdot 316,26 \cdot 12^2 \cdot \frac{275}{1} = 3130,97 \text{ kN} \cdot \text{mm}$$

$$F_{T1,Rd} = \frac{4 \cdot M_{pl1,Rd}}{m_{12b}} \quad (7.59)$$

$$F_{T1,Rd} = \frac{4 \cdot 3130,97}{30,00} = 417,46 \text{ kN}$$

Model zniszczenia węzła 2

$$l_{eff2} = l_{effnc1} + l_{effnc2} = 316,26 \text{ mm}$$

$$M_{pl2,Rd} = M_{pl1,Rd} = 3130,97 \text{ kN} \cdot \text{mm}$$

$$n_{12} = \min(e_{12min}; 1,25 \cdot m_{12b}) = \min(30,00; 37,50) = 30,00 \text{ mm}$$

Obliczeniowa nośność śruby na rozciąganie

Nośność śruby na rozciąganie obliczona zgodnie z punktem 8.6.5. $F_{t,Rd} = 176,40 \text{ kN}$.

$$F_{T2Rd} = \frac{2 \cdot M_{pl2,Rd} + n_{12} \cdot 4 \cdot F_{t,Rd}}{m_{12b} + n_{12}} \quad (7.68)$$

$$F_{T2Rd} = \frac{2 \cdot 3130,97 + 30,00 \cdot 4 \cdot 176,40}{30,00 + 30,00} = 457,17 \text{ kN}$$

Model zniszczenia węzła 3

$$T_{T3Rd} = 4 \cdot F_{t,Rd} \quad (7.61)$$

$$T_{T3Rd} = 4 \cdot 176,40 = 705,60 \text{ kN}$$

Nośność blachy czołowej połączenia

$$F_{t12ep,Rd} = \min(F_{T1,Rd}; F_{T2,Rd}; F_{T3,Rd}) \quad (7.62)$$

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

$$F_{t12ep,Rd} = \min(417,46; 457,17; 705,60) = 417,46 \text{ kN}$$

O nośności połączenia śrubowego stanowi całkowite uplastycznienie blachy czołowej i powstanie mechanizmu.

Środek belki w strefie rozciągania

$$b_{efftwb} = \min(l_{effcp1} + l_{effcp2}; l_{effnc1} + l_{effnc2})$$

$$b_{efftwb} = \min(259,25 + 259,25; 158,13 + 158,130) = 316,26 \text{ mm}$$

$$F_{t12wb,Rd} = \frac{b_{efftwb} \cdot t_w \cdot f_y}{\gamma_{Mo}} \quad (7.63)$$

$$F_{t12wb,Rd} = \frac{316,26 \cdot 6,3 \cdot 275}{1,0} = 547,92 \text{ kN}$$

Nośność połączenia na rozciąganie

$$F_{jRd} = \min(F_{t1,Rd} + F_{t2,Rd}; F_{t12,Rd}) \quad (6.69)$$

$$F_{jRd} = \min(209,42 + 209,42; 547,92) = 418,84 \text{ kN}$$

Warunek nośności połączenia

$$\eta = \frac{N_{Ed}}{F_{jRd}} < 1,0 \quad (6.70)$$

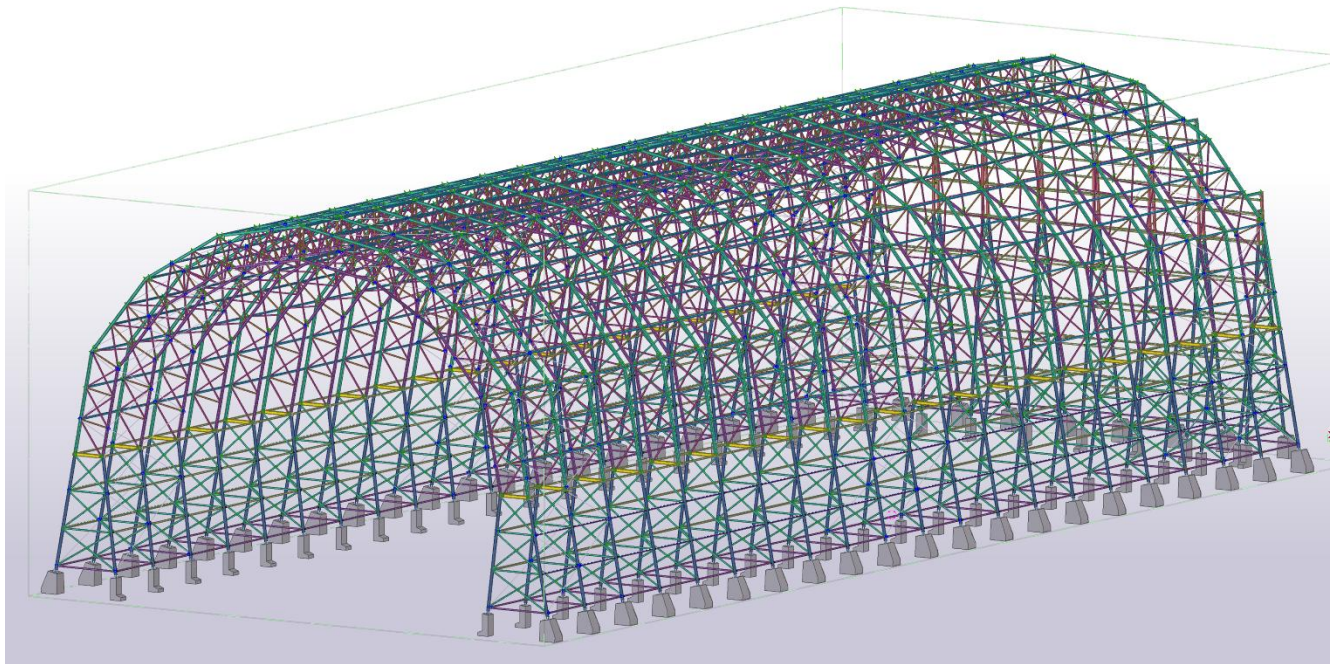
$$\eta = \frac{73,12}{418,84} = 0,17 < 1,0$$

Warunek nośności połączenia został spełniony. Ze względów konstrukcyjnych i ogólnej sztywności całego układu postanowiono pozostawić ilość śrub oraz dodatkowe żebra usztywniające pasy kształtownika HEA280, ze względu na przeprowadzoną analizę stateczności całej konstrukcji.

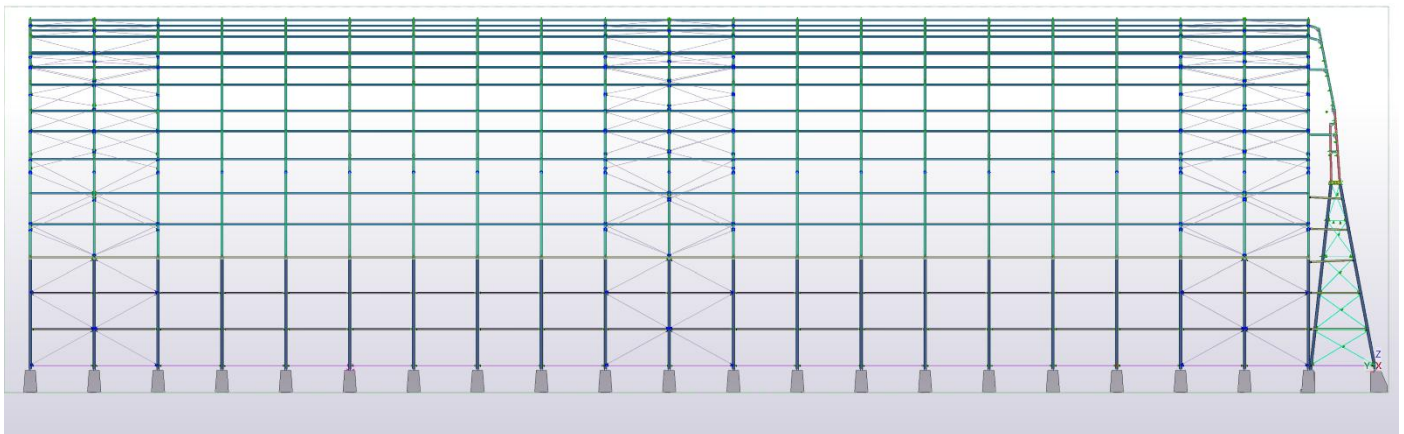
8. Szczegóły konstrukcyjne wykonane za pomocą oprogramowania BIM

Po przeprowadzeniu analiz statycznych modelu 3D konstrukcji w programie do obliczeń statyczno-wytrzymałościowych konstrukcji RFEM 6 oraz module dodatkowym do symulacji oddziaływania wiatru na konstrukcję hangaru, przystąpiono do modelowania w programie Tekla Structures. Zaczynając od kształtu, wymiarów i geometrii fundamentów hangaru po połączenia głównych układów poprzecznych konstrukcji czy szczegóły samych połączeń kratowych łuku. Wszystko to zostało jak najdokładniej odtworzone i przedstawia faktyczny stan hangaru analogiczny lub zbliżony do oryginału. Każde połączenie, spawane oraz skręcane zostało zamodelowane na podstawie obliczeń wytrzymałościowych. Zadaniem tych styków jest przede wszystkim zapewnienie odpowiedniej sztywności konstrukcji oraz spełnienie wymagań nośności. Przedstawiana geometria ma przypominać pierwotną wersję budynku ale przy tym spełniać dzisiejsze normy oraz standardy budowlane. Wymiary zewnętrzne budynku, wymiary poszczególnych elementów konstrukcyjnych zostały również zachowane. Otrzymano stalowe odtworzenie posiadające rozwiązania technologiczne zgodne z aktualnymi normami oraz technologią wykonania. Jedynym elementem brakującym w dokumentacji archiwalnej była tylna ściana konstrukcji. Na podstawie dostępnych zdjęć, przypuszczeń oraz opisu archiwalnego konstrukcji [L1] zaproponowano rozwiązanie podobne do tego, które mogło być wykorzystane w przeszłości. W tym rozdziale zostaną zaprezentowane detale konstrukcyjne wszystkich połączeń hangaru oraz ogólny szczegółowy model 3D konstrukcji stalowej.

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

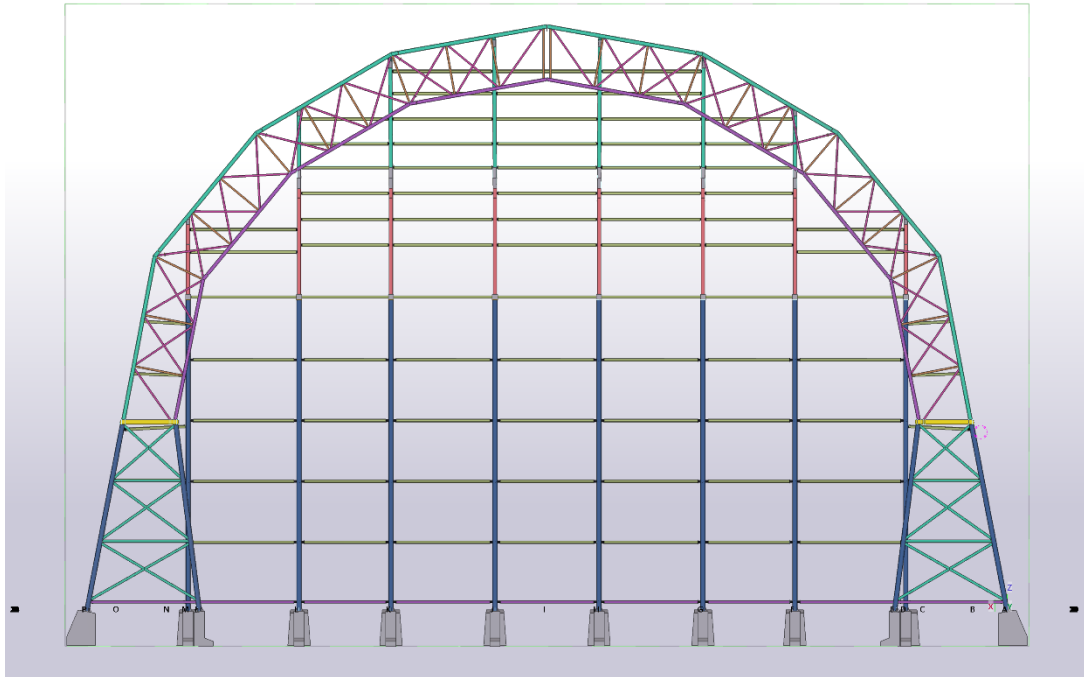


Rys. 7.1. Model 3D konstrukcji hangaru wykonany w programie Tekla Structures - źródło własne

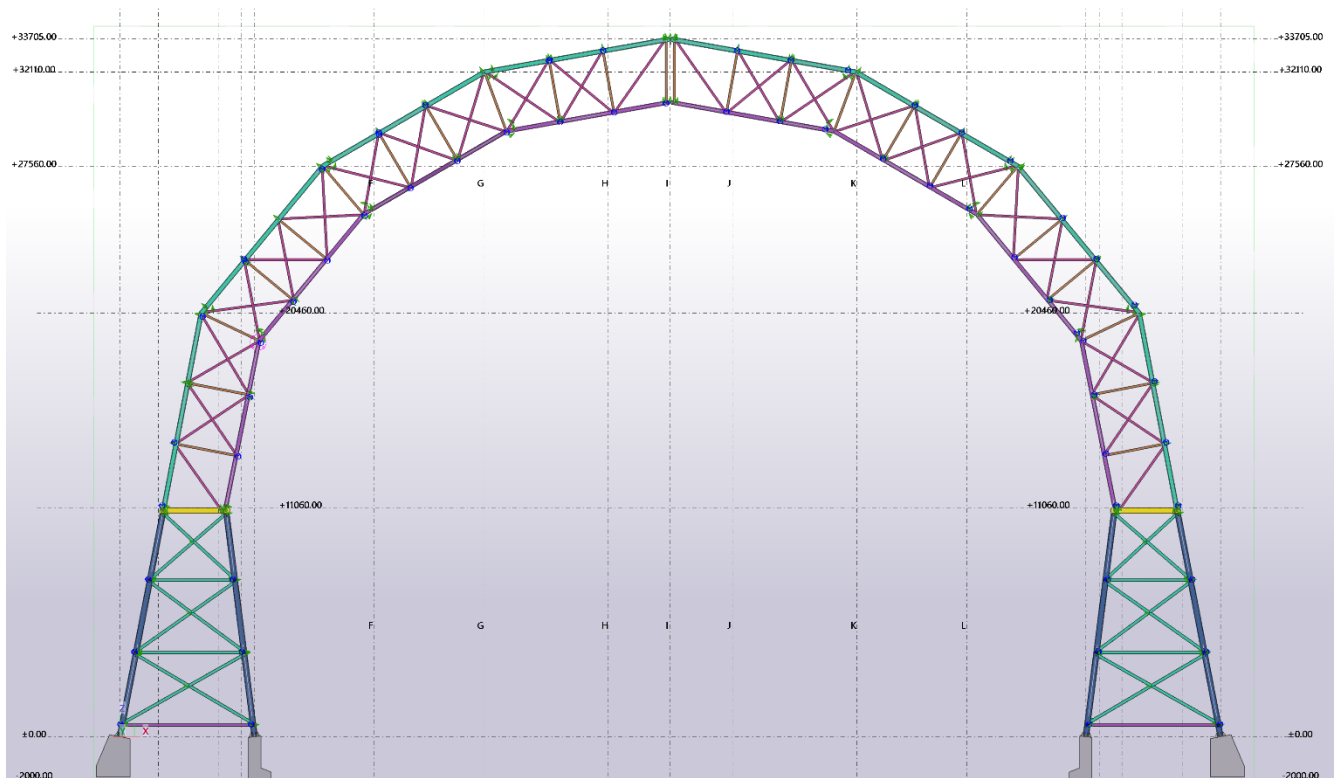


Rys. 7.2. Model 3D konstrukcji hangaru wykonany w programie Tekla Structures -
widok boczny konstrukcji - źródło własne

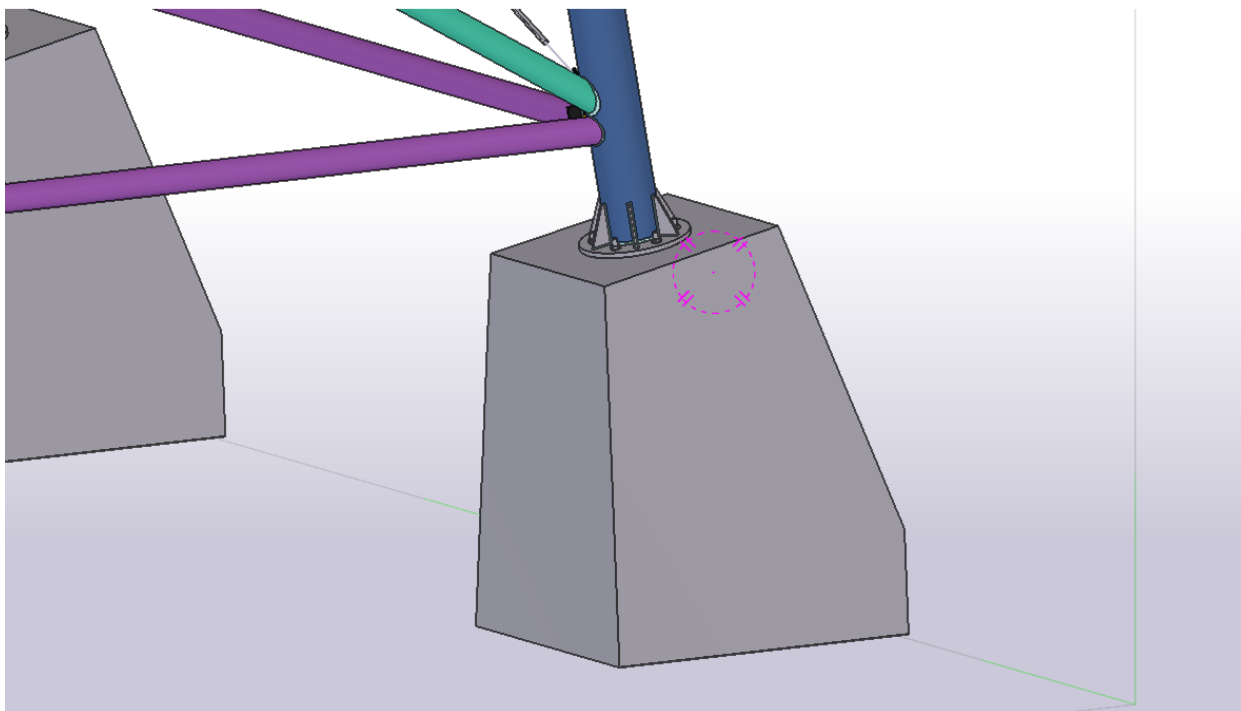
PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU
DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ



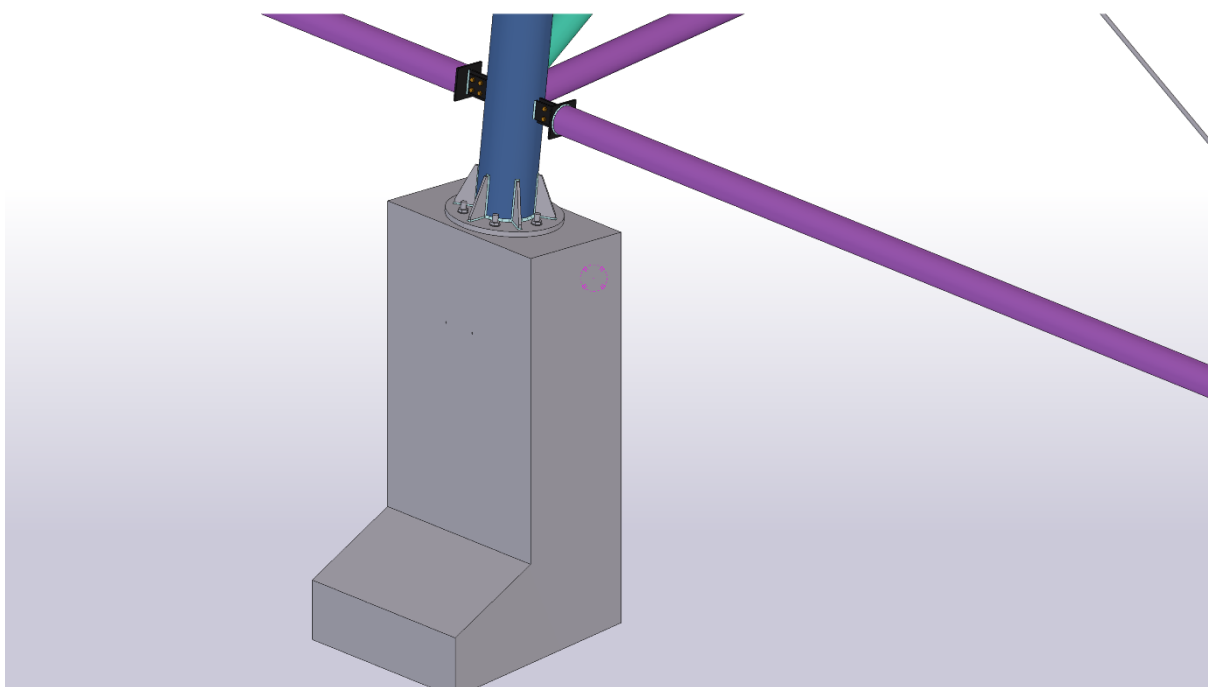
Rys. 7.3. Widok ściany tylnej konstrukcji hangaru - źródło własne



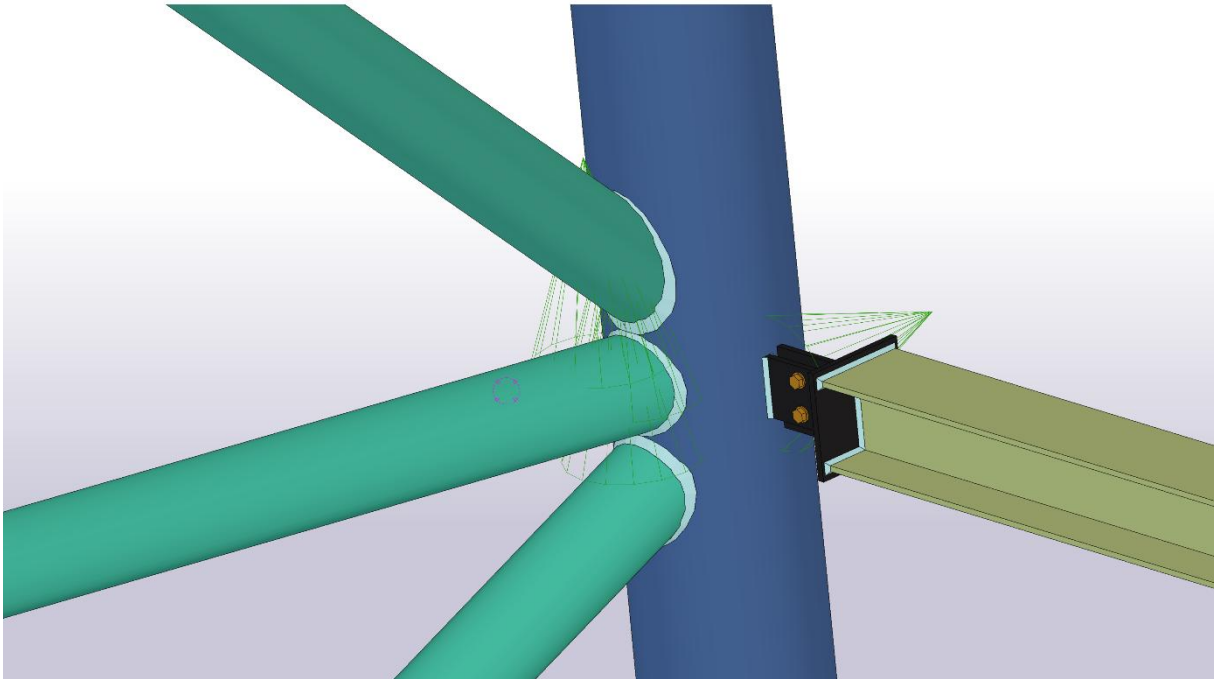
Rys. 7.4. Układ poprzeczny konstrukcji hangaru – rama kratownicowa - źródło własne



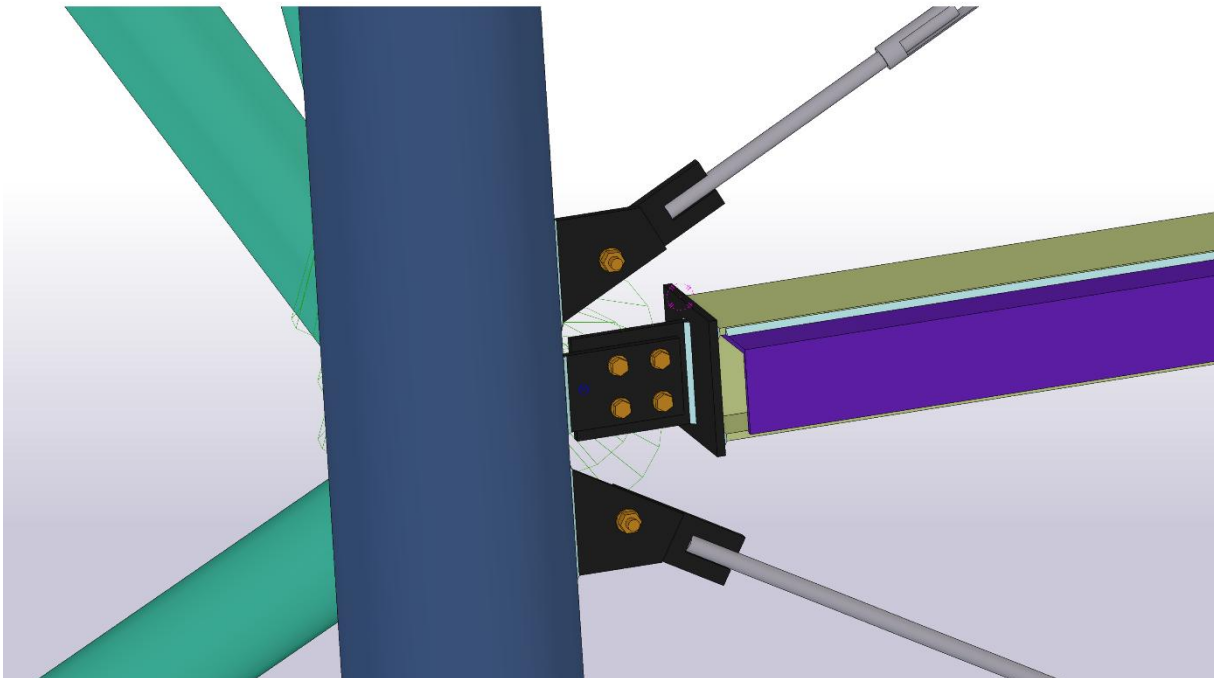
Rys. 7.4. Model zewnętrznej stopy fundamentowej hangaru – źródło własne



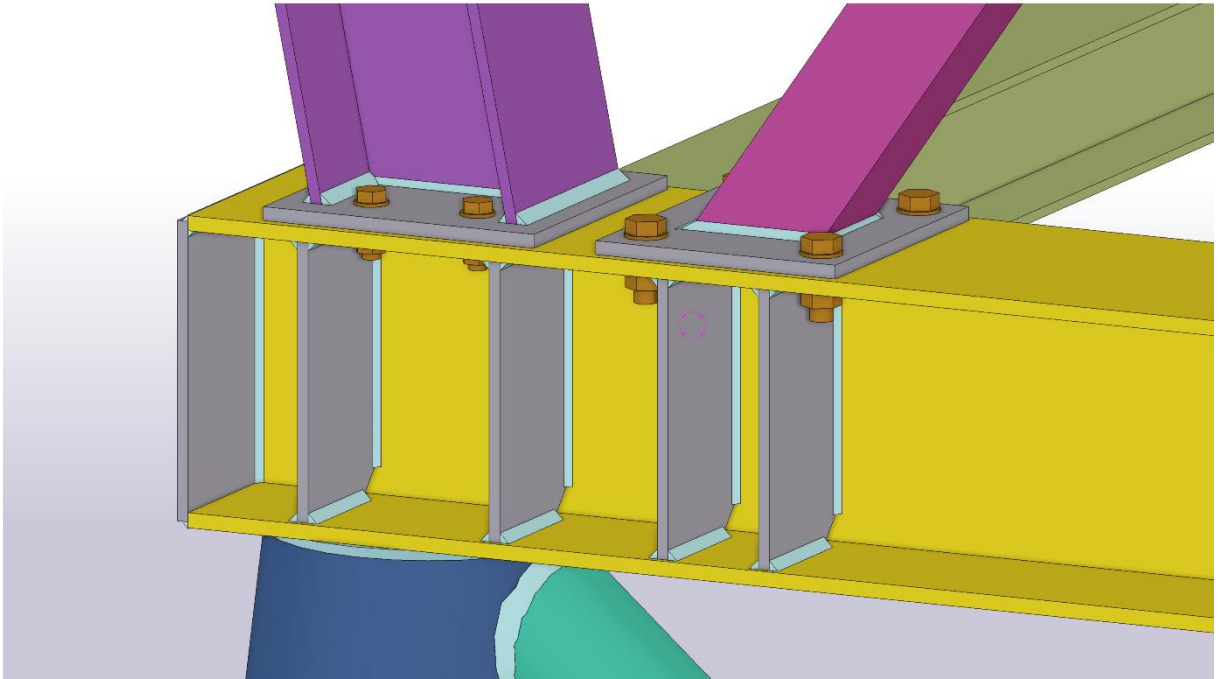
Rys. 7.5. Model wewnętrznej stopy fundamentowej – źródło własne



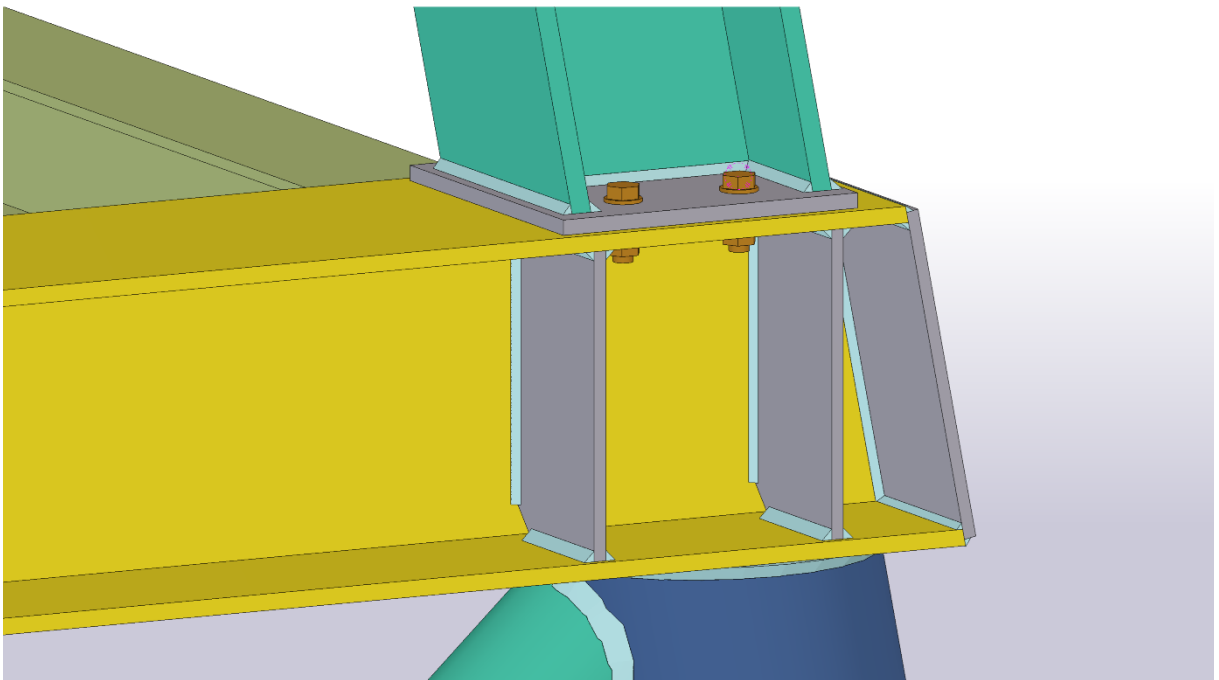
Rys. 7.6. Połączenie krzyżulców i słupków w dolnej części konstrukcji tzw. „kozła” –
źródło własne



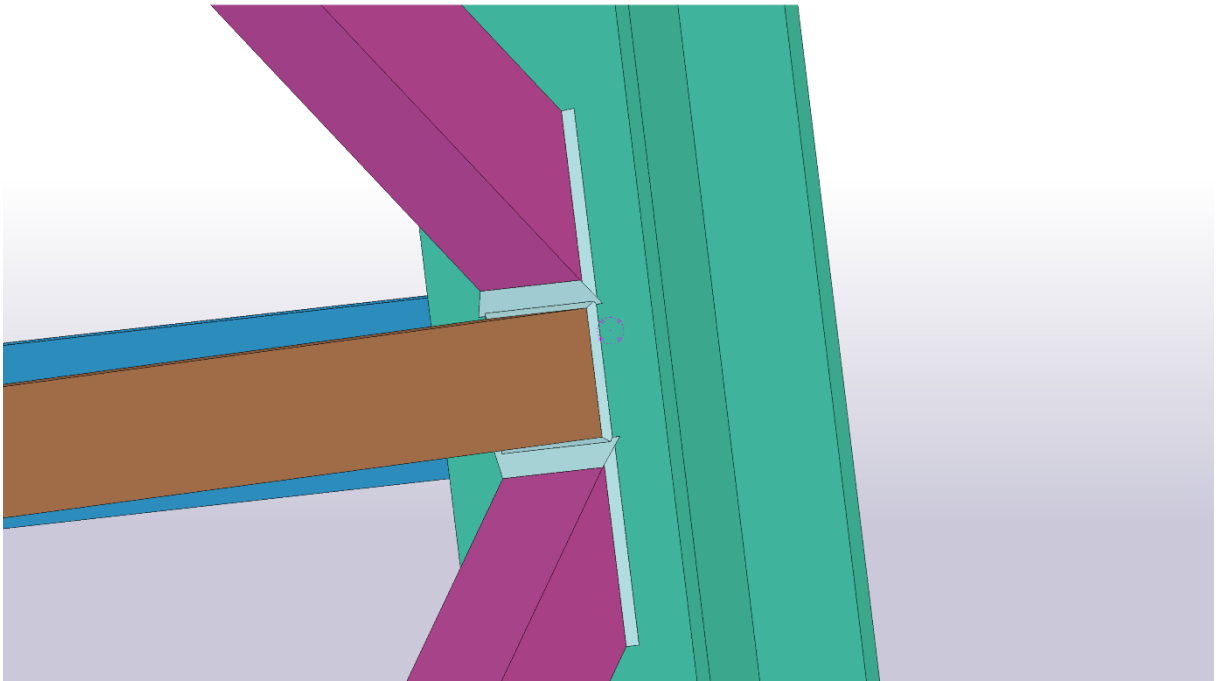
Rys. 7.7. Połączenie stężeń i belek łączących poszczególne układy wraz z
przyspawanymi kątownikami do obudowy hangaru - źródło własne



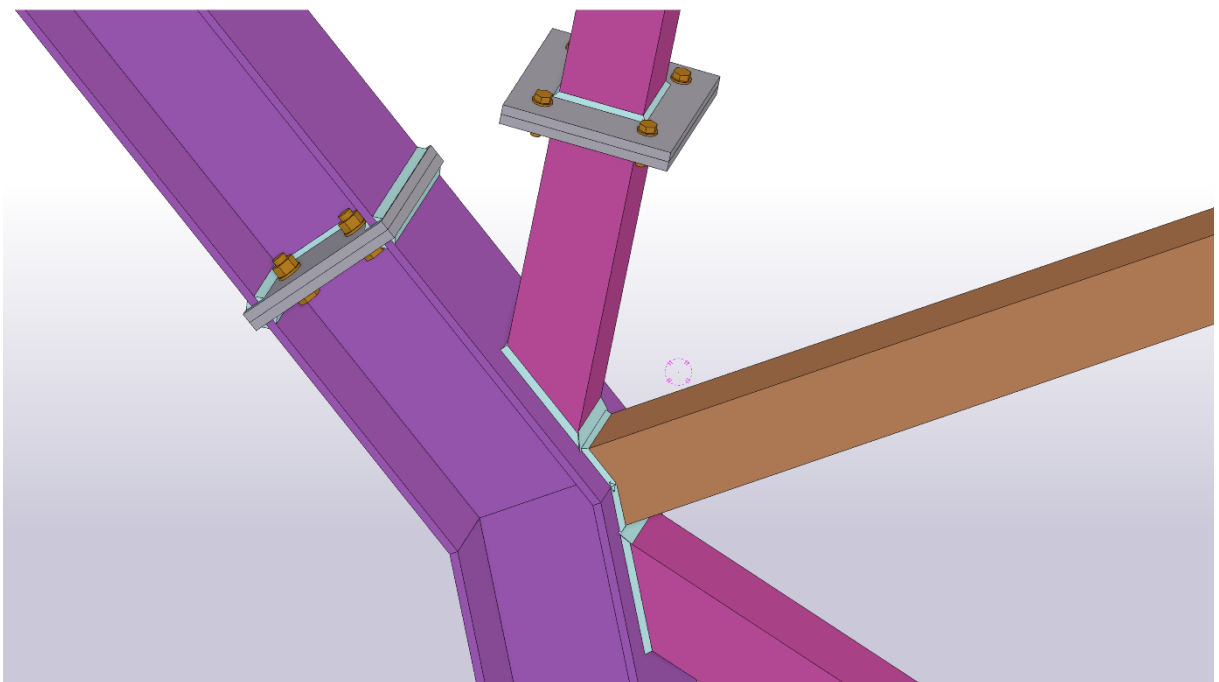
Rys. 7.8. Węzeł – oparcie górnego łuku kratowego na dolnej części – „kozło” – źródło własne



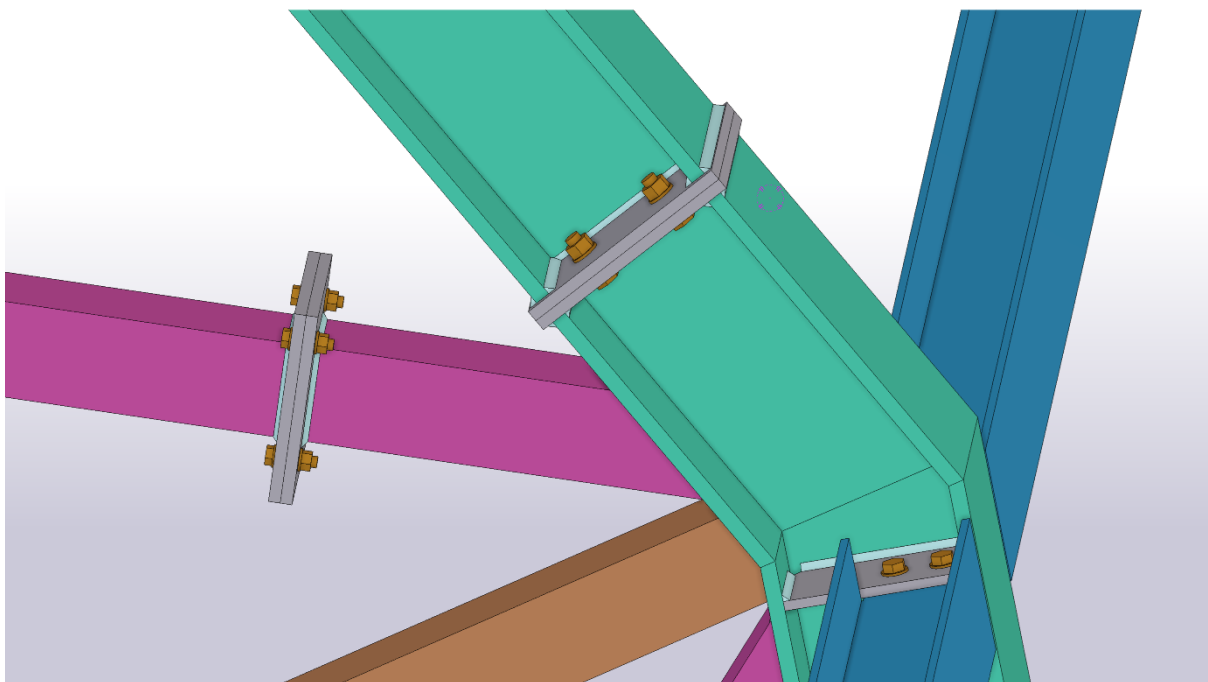
Rys. 7.9. Oparcie pasa górnego kratownicy łukowej na belce głównej „kozła” – źródło własne



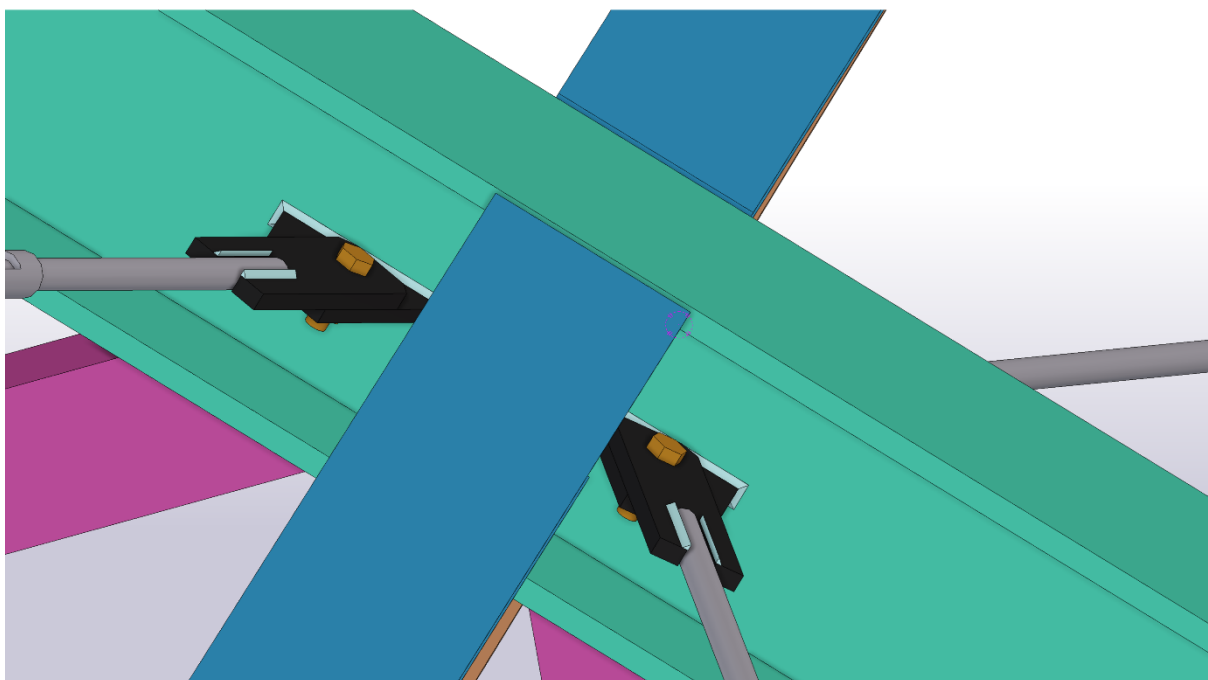
Rys. 7.10. Połączenie krzyżulców i słupków z pasem górnym kratownicy – źródło własne



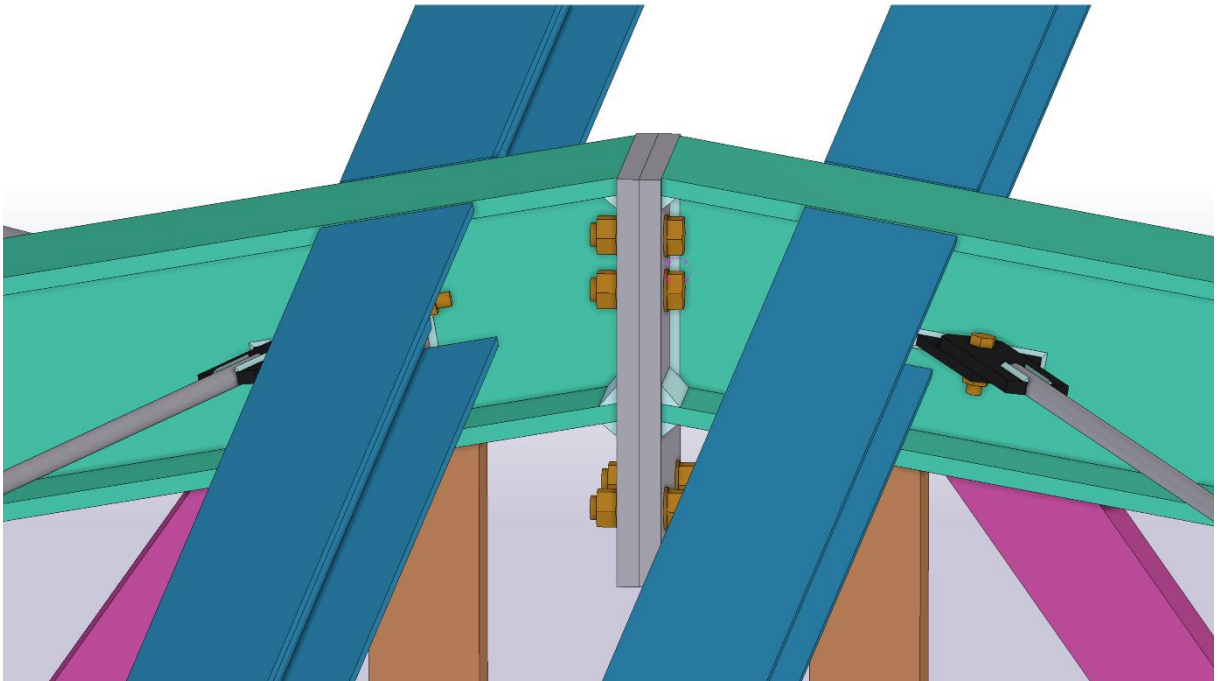
Rys. 7.11. Połączenie doczołowe pasa dolnego i krzyżulca kratownicy. Szczegół przyspawania słupków i krzyżulców łuku kratowniczowego – źródło własne



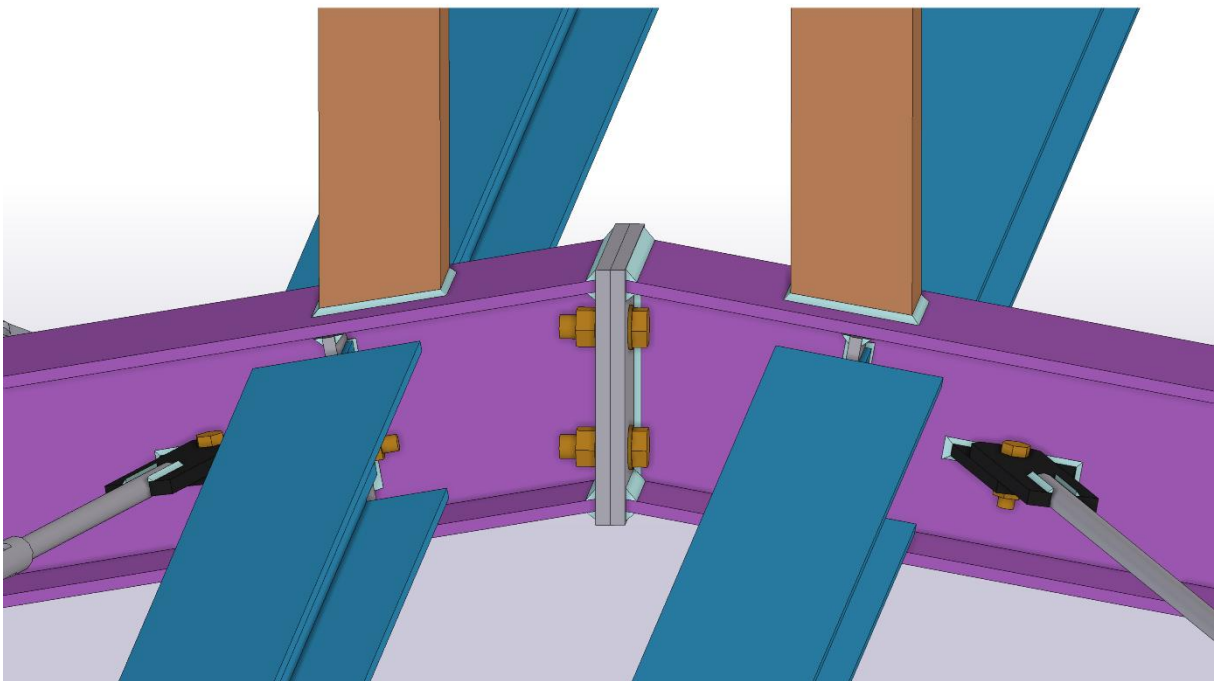
Rys. 7.12. Połączenie doczołowe pasa dolnego łuku kratowego – źródło własne



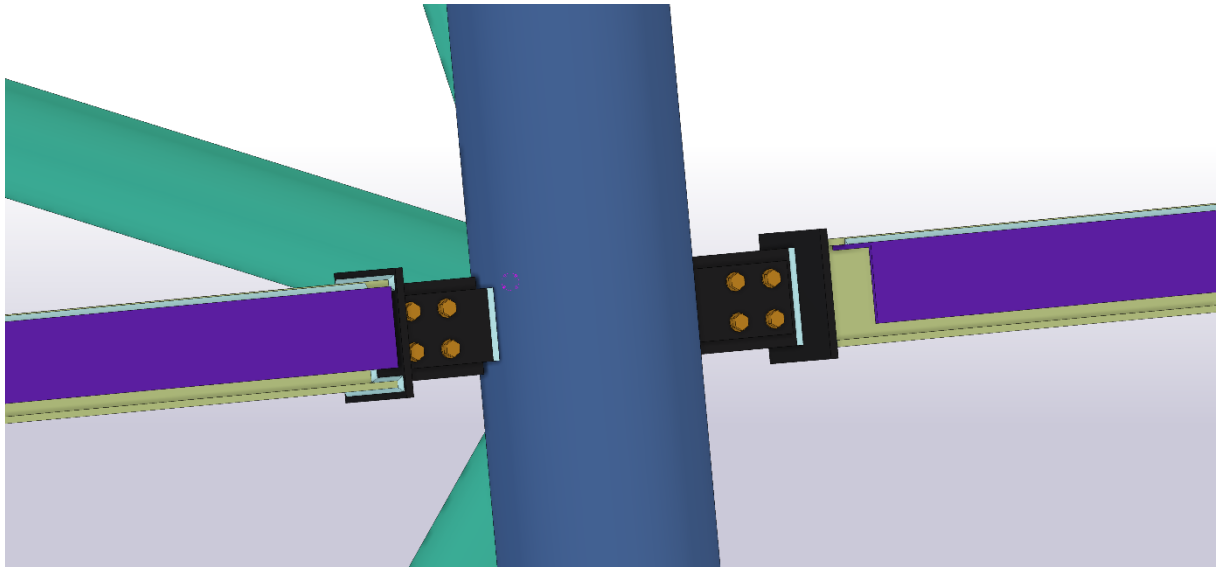
Rys. 7.13. Stężenia oraz belki płatwiowe konstrukcji hangaru – źródło własne



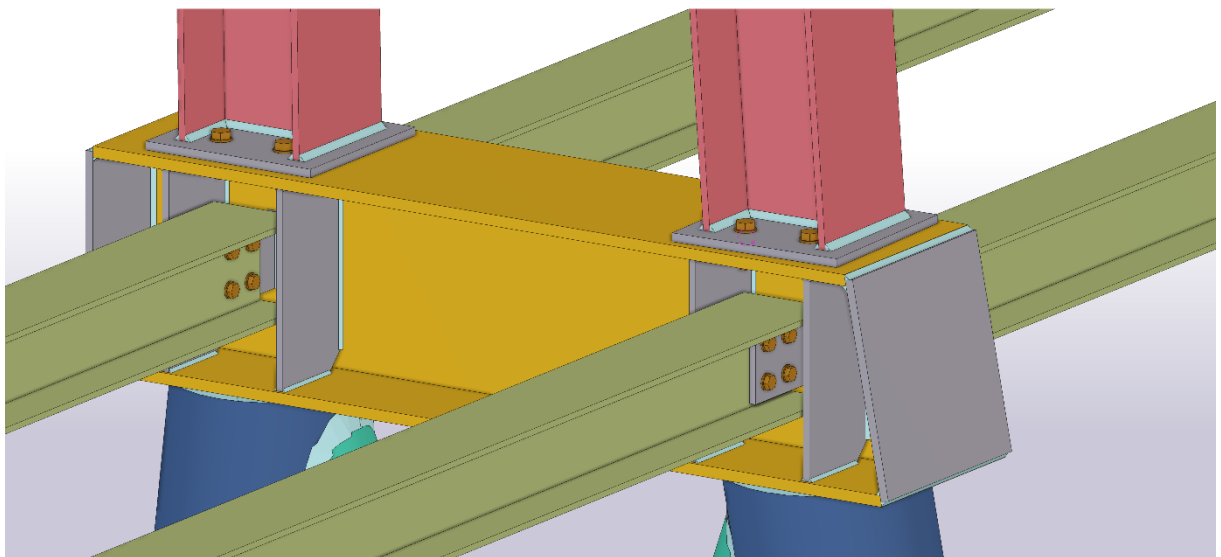
Rys. 7.14. Kalenicowe połączenie doczołowe pasów górnych kratownicy – źródło własne



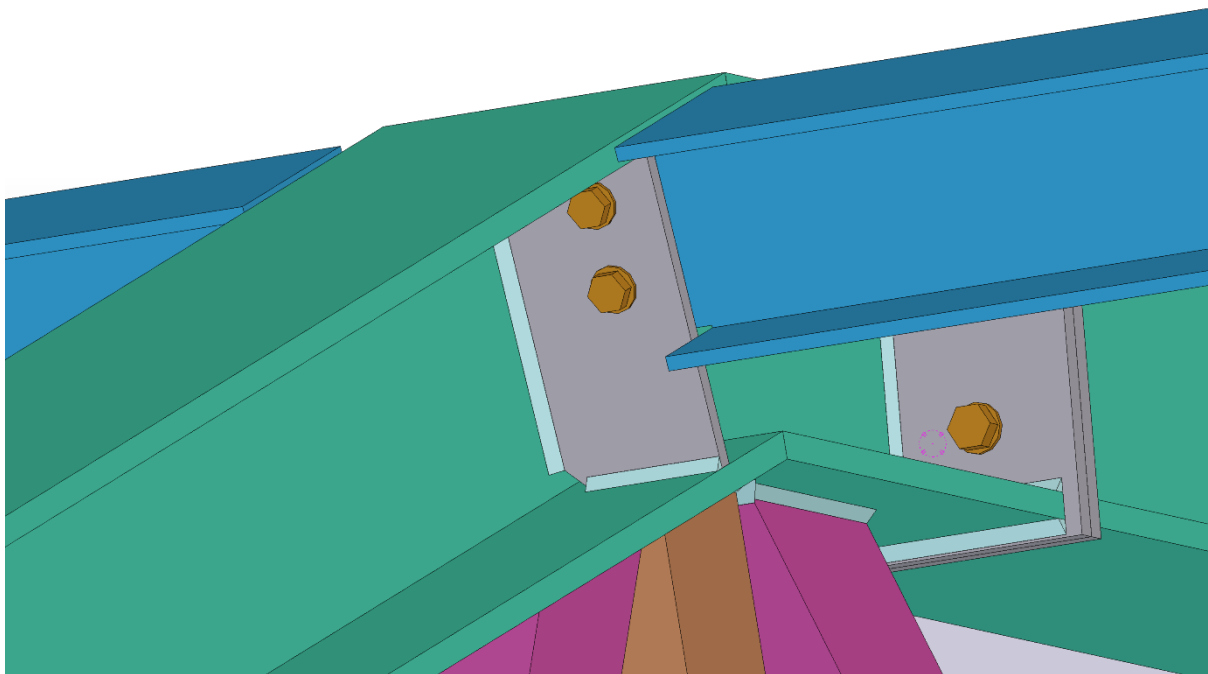
Rys. 7.15. Kalenicowe połączenie doczołowe pasów dolnych kratownicy wraz z stężeniami
– źródło własne



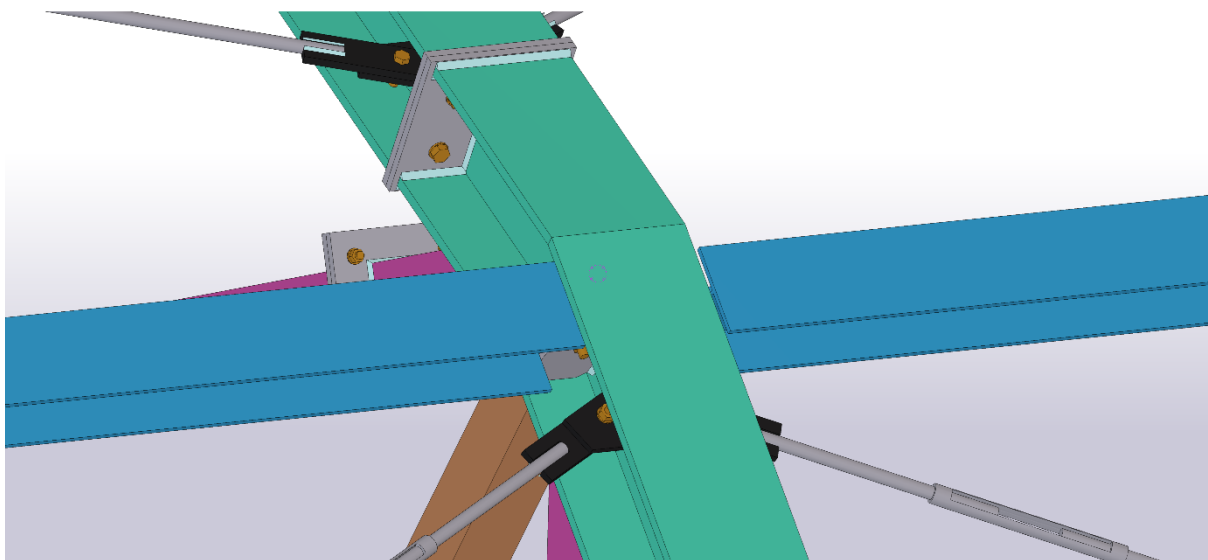
Rys. 7.16. Belki łączące dolną część konstrukcji wraz z kątownikami do obudowy hangaru
– źródło własne



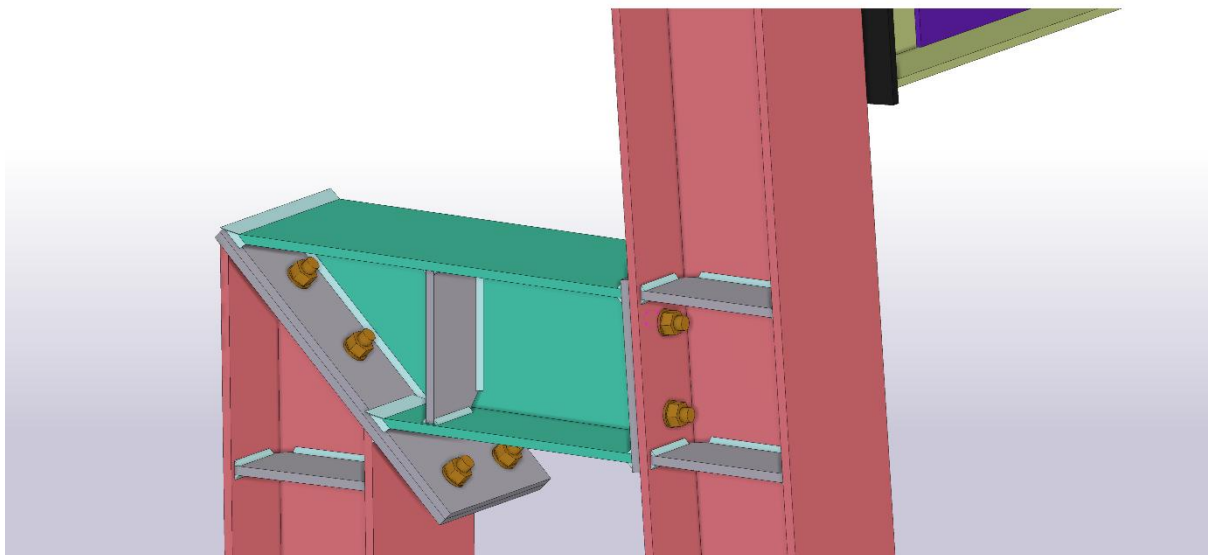
Rys. 7.17. Oparcie górnej kratownicy na koźle wraz z połączeniami belek – źródło własne



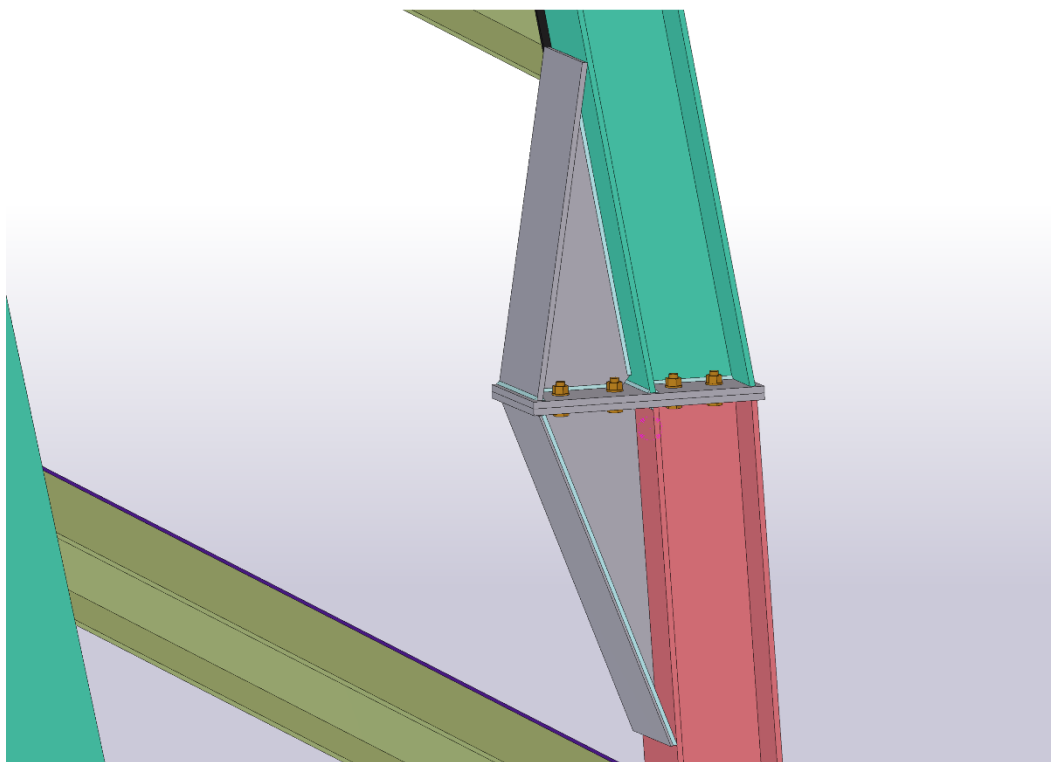
Rys. 7.18. Połączenie belek płatwiowych z pasami górnymi kratownicy – źródło własne



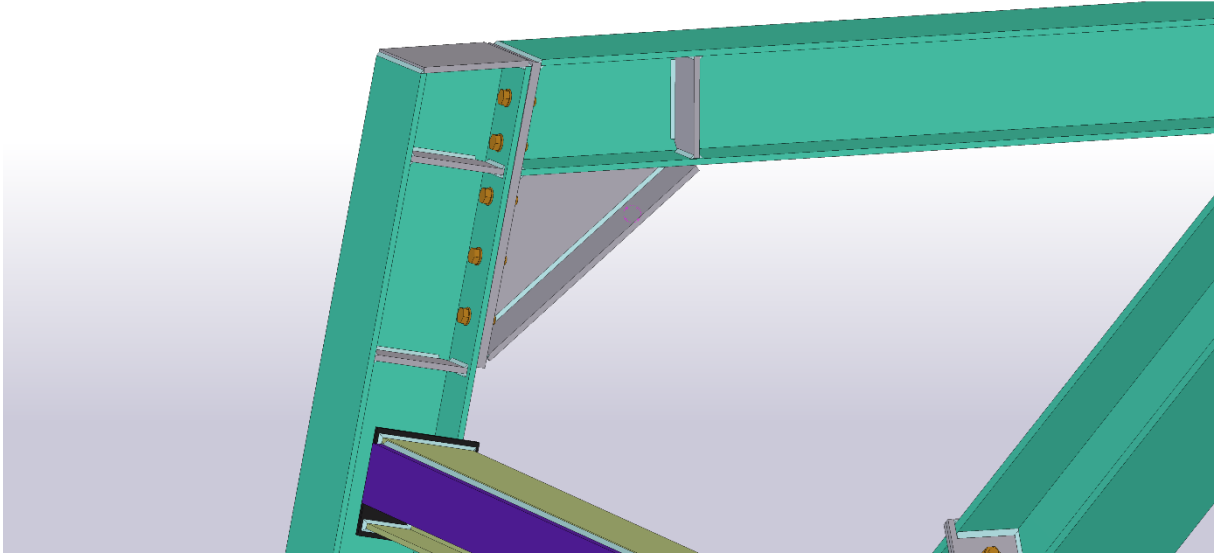
Rys. 7.19. Węzeł górny konstrukcji kratownicy. Stężenia, pasy górne oraz belki płatwiowe
– źródło własne



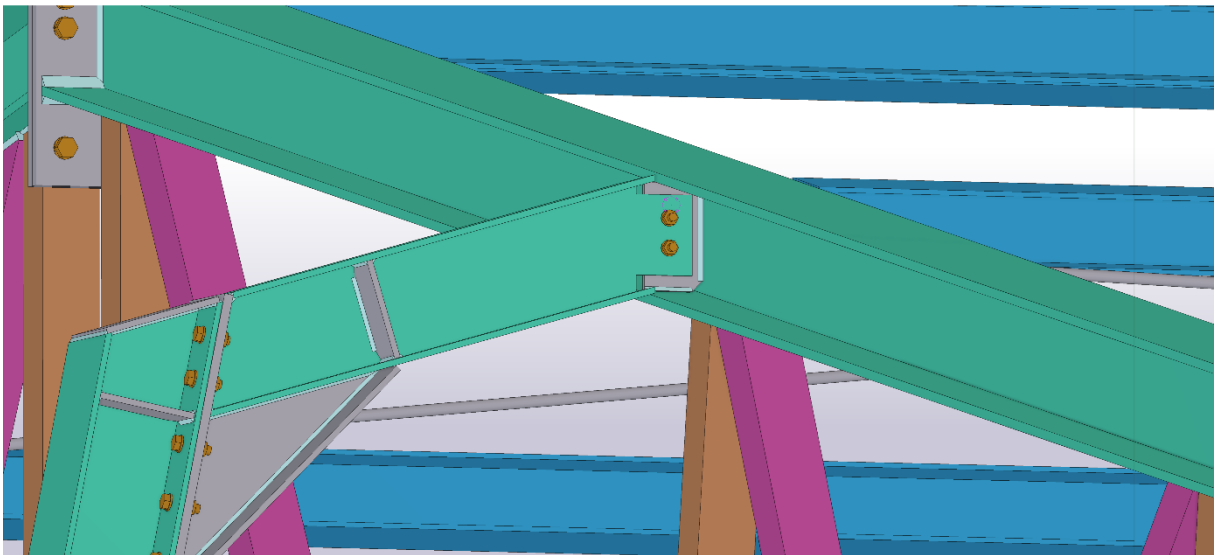
Rys. 7.20. Połączenie belki wsporczej tylnej ściany hangaru – źródło własne



Rys. 7.21. Połączenie ściany tylnej konstrukcji hangaru – źródło własne



Rys. 7.22. Węzeł górny ściany tylnej konstrukcji – źródło własne



Rys. 7.23. Połączenie belki ściany tylnej z głównym układem poprzecznym konstrukcji
hangaru – źródło własne

Podsumowanie

Tematem niniejszej pracy inżynierskiej był projekt odtworzeniowy wojskowego hangaru dla sterowców z okresu I Wojny Światowej. Został on opracowany zgodnie z obowiązującymi przepisami i normami konstrukcyjnymi. W pracy zawarto przegląd literatury na temat konstrukcji drewnianych hangarów z czasów I Wojny Światowej. Są to zgromadzone materiały historyczne i archiwalne odtwarzanej konstrukcji hangaru z Lasu Pietrasze. Następnie opracowano projekt odtworzonego głównego układu poprzecznego konstrukcji, przeprowadzono obliczenia statyczne elementów konstrukcyjnych, ich wymiarowanie oraz szczegóły konstrukcyjne węzłów hangaru zamodelowane w programie Tekla Structures.

Hangar dla sterowców zaprojektowano w miejscu jego pierwotnego położenia jako obiekt wolnostojący składający się z 20 układów poprzecznych oraz ściany tylnej budynku. Będzie on pełnił funkcje wojskowego obiektu stacjonowania, eksploatacji oraz serwisowania bojowych sterowców typu Albatros II i Astra.

Głównym układem nośnym konstrukcji jest dwuczęściowa rama kratownicowa. Dolna część konstrukcji nazywana „kozłem” składa się z okrągłych kształowników rurowych CHS273,0x12,5 oraz belki w postaci kształownika HEA280, na której opierać się będzie górna kratownica łukowa. Jest ona złożona z pasów dolnych wykonanych z kształownika HEA200, pasów górnych wykonanych z kształownika HEB220, natomiast krzyżulce i słupki z rur kwadratowych o przekroju SHS100x4,5 oraz SHS100x6,3. Górna kratownica łukowa podzielona jest na 8 niezależnych segmentów połączonych ze sobą doczołowo. Dochodzące do niej belki płatwiowe (kształtowniki HEA140) połączone są z układami poprzecznymi przegubowo za pomocą blachy. Słupy nośne konstrukcji połączono ze stopami fundamentowymi w sposób przegubowy.

Dach hangaru pokryto „12-funtową” (5 kg) blachą pomalowaną w kolorze ochry (bordowym), ściany obite 1-calowymi deskami pomalowanymi szarym lakierem olejnym oraz do wysokości 4 metrów, specjalnym impregnatem ogniotrwałym. Wszystkie elementy konstrukcyjne zostały zaprojektowane ze stali S275J0.

Do pomocy w wyznaczeniu sił wewnętrznych, niezbędnych do wymiarowania konstrukcji wykorzystano program do analizy statyczno-wytrzymałościowej RFEM 6. Dodatkowo przeprowadzono szczegółową analizę oddziaływania wiatru na bryłę hangaru za pomocą dodatkowego modułu RWIND wykorzystującego symulację umieszczenia budowli w tunelu aerodynamicznym. Na podstawie otrzymanych sił wewnętrznych oraz najbardziej

PRACA DYPLOMOWA – PROJEKT ODTWÓRCZY WOJSKOWEGO HANGARU DLA STEROWCÓW Z OKRESU I WOJNY ŚWIATOWEJ

niekorzystnej sytuacji obliczeniowej dokonano wymiarowania głównych elementów hangaru oraz zaprojektowano i zweryfikowano nośności połączeń stalowych. Wszystkie wymagane warunki ze względu stany graniczne nośności - SGN i użytkowości - SGU zostały spełnione dla wszystkich elementów konstrukcyjnych jak i połączeń. Dodatkowo został wykonany szczegółowy model 3D konstrukcji hangaru w oprogramowaniu do modelowania konstrukcji budowlanych - Tekli Structures, ukazujący wszystkie zaprojektowane elementy, połączenia oraz ogólną bryłę budynku 3D. Wszystkie procedury obliczeniowe zostały przeprowadzone w ramach aktualnie obowiązujących norm projektowych, czyli Eurokodów. Do pracy załączono również dokumentację rysunkową w postaci rysunki konstrukcyjnych zespołów wysyłkowych, a także ogólnych rysunków zestawczych konstrukcji wraz z niezbędnymi wymiarami montażowymi oraz przekrojami.

Wykonanie pracy dyplomowej wymagało jednak nie tylko pracy typowo analitycznej i opisowej. Przed jej rozpoczęciem posiadano niewielką ilość informacji na temat konstrukcji, która mogła znajdować się w lesie Pietrasze. Pracując w zespole wraz z Promotorem pracy i Historykiem – Amatorem, Panem Piotrem Szutkiewiczem (mieszkaniec Białegostoku), dokonano szeregu oględzin i pomiarów w samym lesie. Gdyby nie ten etap, nie byłoby możliwe zidentyfikowanie konkretnej geometrii hangaru w źródłach literaturowych (obcojęzycznych). Niniejsza praca dyplomowa stanowi więc podsumowanie i udokumentowanie wszelkich działań w tym zakresie. Ostatecznie, można więc twierdzić, że:

W lesie Pietrasze z dużą pewnością, w czasie I Wojny Światowej, znajdował się hangar wojskowy. Stacjonowały w nim sterowce militarne. Jego konstrukcja wyglądała bliźniaczo do tej jaką przedstawiono w niniejszej pracy dyplomowej.

Literatura i źródła historyczne

[L1] Blinov_V_K__Sokov_V_S_- _Ellingi_dlya_dirizhabley_- _1935 – oryginalna rosyjska wersja książki.

Tłumaczenie książki, na rzecz źródeł archiwalnych oraz materiałów wykorzystanych podczas pisania pracy zostało wykonane własnoręcznie.

[L2] <https://www.facebook.com/p/Sterowce-Pietrasze-i-Wiatr-100063916490541/> - strona internetowa „Sterowce Pietrasze i Wiatr” – autor Piotr Szutkiewicz.

[L3] <https://www.youtube.com/channel/UCkQ07vN5EpnCkbbk7roJw3jg> - kanał historyczny opowiadający o historii, Pietrasz, Bacieczek oraz samego miasta Białystok i jego okolic. Twórca kanału – Piotr Szutkiewicz.

[L5] Centralne Archiwum Wojskowe – mapy historyczne.

[L6] Tablice do projektowania konstrukcji metalowych - Bogucki, Żybertowicz.

[L7] Kształtowniki i pręty walcowane na gorąco - ArcelorMital - katalog wyrobów

[L8] Access Steel: SN007b-PL-EU - Informacje uzupełniające: Skręcanie.

[L9] Access Steel: SN003a-PL-EU - Informacje uzupełniające: Sprężysty moment krytyczny przy zwichrzeniu.

[L10] Budownictwo ogólne. Tom 5. Stalowe konstrukcje budynków, projektowanie według Eurokodów z przykładami obliczeń. Wydawnictwo „Arkady”, Warszawa, 2010.

[L11] Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1 – dźwigary kratownicowe, słupy, ramownice. Wydawnictwo naukowe „PWN”, Warszawa 2016.

[L12] Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 2 – belki, płatwie, węzły i połączenia, ramy, łożyska. Wydawnictwo naukowe „PWN”, Warszawa 2016.

[L13] Konstrukcje Stalowe. Przykłady obliczeń według PN-EN-1993-1. Część pierwsza. Wybrane elementy i połączenia. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2022.

[L14] Konstrukcje Stalowe. Przykłady obliczeń według PN-EN-1993-1. Część trzecia. Hale i wiaty. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2023.

Akty ustawodawcze i obowiązujące normy projektowe

- [N1] PN-EN 1990:2004 Eurokod 1. Podstawy projektowania konstrukcji.
- [N2] PN-EN 1991-1-1:2005 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 1991-1-4:2005 Eurokod 1. Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-4: Oddziaływania ogólne – oddziaływania wiatru.
- [N5] PN-EN 1993-1-1:2006 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.

Strony internetowe

- [S1]<https://www.dluba1.com/pl/wlasciwosci-przekrojow/heb-220-euronorm-53-62-din-1025-2-szs> - właściwości kształtownika HEB220,
- [S2]<https://www.dluba1.com/pl/wlasciwosci-przekrojow/hea-200-euronorm-53-62-din-1025-3-szs> - właściwości kształtownika HEA200,
- [S3]<https://www.dluba1.com/pl/wlasciwosci-przekrojow/shs-100x100x4-5-en-10210-2-alukonigstahl> - właściwości kształtownika SHS100x4,5,
- [S4]<https://www.dluba1.com/pl/wlasciwosci-przekrojow/shs-100x100x6-3-en-10210-2-alukonigstahl> - właściwości kształtownika SHS100x6,3,
- [S5]<https://www.dluba1.com/pl/wlasciwosci-przekrojow/chs-273-0x12-0-en-10210-2-1997-continental-steel> - właściwości kształtownika CHS273,0x12,
- [S6]<https://www.dluba1.com/pl/wlasciwosci-przekrojow/chs-139-7x4-0-en-10210-2-1997-continental-steel> - właściwości kształtownika CHS139,7x4,
- [S7]<https://www.dluba1.com/pl/wlasciwosci-przekrojow/hea-140-euronorm-53-62-din-1025-3-szs> - właściwości kształtownika HEA140,
- [S8]<https://www.dluba1.com/pl/wlasciwosci-przekrojow/hea-180-euronorm-53-62-din-1025-3-szs> - właściwości kształtownika HEA180,
- [S9]<https://www.dluba1.com/pl/wlasciwosci-przekrojow/hea-280-euronorm-53-62-din-1025-3-szs> - właściwości kształtownika HEA280,

Załączniki

1. Notka obliczeniowa z programu RFEM 6 – wymiarowanie połączenia słupa nośnego z fundamentem hangaru
2. Rysunki zbiorcze połączeń hangaru
 - Rysunek zbiorczy połączeń kratownicy oraz kozła – **PŁ/001 – PŁ/002**
3. Rysunki zespołów wysyłkowych
 - Rysunek zespołu – dolna część konstrukcji – kozioł – **KZ/001, KZ/002**
 - Rysunek zespołu – górna kratownica łukowa – **ŁK/001 – ŁK/004**
 - Rysunek zespołu – ściana tylna hangaru – **ŚT/001 – ŚT/005**
4. Rysunki zestawcze hangaru – widoki wraz z przekrojami
 - Rysunek zestawczy hangaru – **ZK/001 – ZK/003**