

POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA



WYDZIAŁ INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I GEODEZJI

Budownictwo

specjalność: Konstrukcje budowlane i inżynierskie

inż. Daniel Tabaka

Nr albumu

U-10641

**Przekrycie strukturalne parkingu przy galerii
handlowej**

Space frame roof of the car park at shopping mall

Praca magisterska wykonana pod kierunkiem

dr inż. Michał Piątkowski

Koszalin 2023

Spis treści

Oświadczenie.....	5
Streszczenie pracy dyplomowej	6
Diploma thesis abstract.....	7
1. WPROWADZENIE	8
2. CHARAKTERYSTYKA PROJEKTU WYJŚCIOWEGO	9
2.1. Zagospodarowanie terenu	9
2.2. Architektura	12
2.3. Elementy konstrukcyjne.....	14
2.3.1. Słupy nośne	14
2.3.2. Podpory gałęziowe	17
2.3.3. Siatka prętów.....	18
2.3.4. Kształtowanie i geometria siatki górnej.....	19
2.3.5. Kształtowanie i geometria siatki dolnej	20
2.3.6. Skratowanie ustroju.....	21
3. USTALENIE ODDZIAŁYWAŃ.....	22
3.1. Obciążenia stałe	22
3.1.1. Ciężar własny	22
3.1.2. Konstrukcja wsporcza	22
3.1.3. Pokrycie.....	23
3.1.4. Sposób obciążenia konstrukcji – przypadek PO2	26
3.2. Obciążenia zmienne	27
3.2.1. Obciążenie śniegiem	27
3.2.1.1. Oddziaływania wg. dachów dwupołaciowych.....	28
3.2.1.2. Oddziaływania z uwzględnieniem zasp śnieżnych -.....	31
3.2.1.3. Oddziaływania powiązane z kierunkiem wiatru.	32
3.2.2. Obciążenie wiatrem.....	35
3.2.2.1. Parametry tunelu aerodynamicznego	36
3.2.2.2. Ciśnienie powierzchniowe	37
3.2.2.3. Pole przepływu – przedstawienie graficzne wpływu wiatru na strefy.....	39
3.2.2.4. Wizualna interpretacja wyników	40
4. WYMIAROWANIE KONSTRUKCJI	42
4.1. Analiza statyczna	42
4.1.1. Kombinacje obciążeń	42
4.1.2. Wyniki analizy stanu granicznego użyteczności	45

4.1.3.	Stan graniczny nośności	47
4.1.3.1.	Wyniki dla siatki górnej	47
4.1.3.2.	Wyniki dla siatki dolnej.....	50
4.1.3.3.	Wyniki pręty skratowania.....	53
4.1.3.4.	Wyniki dla trzonu słupa.....	55
4.1.3.5.	Wyniki dla gałęzi.....	58
4.2.	Analiza stateczności	61
4.2.1.	Współczynnik obciążenia krytycznego	61
4.2.2.	Długości efektywne i obciążenia krytyczne według postaci własnych	62
4.2.3.	Analiza naprężeniowo – odkształceniowa.....	63
4.2.3.1.	Naprężenia – siatka górna	64
4.2.3.2.	Naprężenia – siatka dolna.....	65
4.2.3.3.	Naprężenia – skratowanie.....	65
4.2.3.4.	Naprężenia – słup	66
4.2.4.	Wyboczenie ścianek elementów	67
4.2.4.1.	Postać wyboczenia – słup.....	67
4.2.4.2.	Postać wyboczenia – przekrój rurowy.....	68
4.3.	Wymiarowanie elementów	69
5.	KONSTRUOWANIE WĘZŁÓW.....	73
5.1.	Podstawa słupa	73
5.1.1.	Obciążenia podstawy słupa.....	74
5.1.2.	Wyniki analizy.....	74
5.2.	Węzeł słupa z gałęziami podporowymi.....	76
5.3.	Węzeł siatka górna – wariant z profilem zamkniętym	80
5.3.1.	Obliczanie łączników.....	81
5.3.2.	Spoiny.....	83
5.4.	Węzeł siatka górna – wariant z blachą usztywniającą.....	85
5.5.	Zestawienie materiałów – porównanie połączeń.....	88
6.	ANALIZA SYTUACJI WYJĄTKOWEJ.....	89
6.1.	Pożar.....	89
6.2.	Uderzenie pojazdu	89
6.3.	Uszkodzenie podstawy	91
7.	POSUMOWANIE.....	93
	Bibliografia	96
	Spis rysunków	97
	Spis tabeli.....	100

Oświadczenie

O Ś W I A D C Z E N I E (STUDENTA)

Daniel Tabaka

U-10641

Oświadczam, że moja praca pt.: *Przekrycie strukturalne parkingu przy galerii handlowej*:

1. została przygotowana przeze mnie samodzielnie*;
2. nie narusza praw autorskich w rozumieniu ustawy z dnia 4 lutego 1994 r. o prawie autorskim i prawach pokrewnych (j.t. Dz. U. z 2006 r. Nr 90, poz. 631 z późn. zm.) oraz dóbr osobistych chronionych prawem;
3. nie zawiera danych i informacji, które uzyskałem w sposób niedozwolony;
4. nie była podstawą nadania dyplomu uczelni wyższej lub tytułu zawodowego ani mnie, ani innej osobie.

Ponadto oświadczam, że treść pracy przedstawionej przez mnie do obrony, zawarta na przekazywanym nośniku elektronicznym, jest identyczna z jej wersją drukowaną.

.....

data

.....

Podpis studenta

*Uwzględniając merytoryczny wkład promotora (w ramach prowadzonego seminarium dyplomowego)

Streszczenie pracy dyplomowej

Koszalin, 10.10.2023

POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA

WYDZIAŁ INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I GEODEZJI

Katedra Konstrukcji Metalowych

Tytuł: Przekrycie strukturalne parkingu przy galerii handlowej

Autor: inż. Daniel Tabaka

Promotor: dr inż. Michał Piątkowski

Przedmiotem opracowania jest projekt konstrukcji stalowej przekrycia strukturalnego parkingu przy galerii handlowej, z przewidywaną lokalizacją na terenie miasta Szczecinek – w I strefie obciążenia wiatrem i II strefie obciążenia śniegiem.

Obiekt, usytuowany na planie prostokąta o powierzchni 26355 m², konstrukcja posadowiona na 22 słupach, poszycie dachowe stanowi blacha trapezowa, w części przeszklone osadzone na podkonstrukcji. Głównym elementem nośnym są słupy o przekroju rurowym, wielokątnym, formowanym na zimno oraz siatka górna z RO 219,1 x 6,3 i dolna z RO 193,7 x 6,3, natomiast krzyżulce z RO 168,3 x 6,3.

Cała konstrukcja została zaprojektowana ze stali S355J0. Wszystkie elementy konstrukcyjne stanowią pojedyncze elementy wysyłkowe, ze względu na swoje duże gabaryty, na budowie przewidziano wykonanie połączeń montażowych śrubowych wraz z montażem poszczególnych sekcji.

Zakres opracowania obejmuje: opracowanie geometrii przekrycia w programie REVIT, zestawienie obciążeń, symulację przepływu wiatru wykonaną za pomocą programu RWIND Simulation, obliczenia statyczne i wymiarowanie elementów w programie RFEM, sprawdzenie nośności wybranych połączeń przy użyciu programu IDEA Statica wraz z dokładnymi obliczeniami niektórych części składowych, uwzględnienie sytuacji awaryjnej poprzez uszkodzenie słupa.

Słowa kluczowe: przekrycie strukturalne, tunel aerodynamiczny, węzły, konstrukcja stalowa,

Diploma thesis abstract

Koszalin, 10.10.2023

KOSZALIN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Faculty of Civil Engineering, Environment and Geodesy

Department of Metal Structures

Title: TESIS TITLE IN ENGLISH

Author: inż.. Daniel Tabaka

Supervisor: dr inż. Michał Piątkowski

The subject of the study is the design of a steel structure for the structural roofing of the car park at the shopping mall, with the expected location in the city of Szczecinek -in wind load zone I and snow load zone II.

The building, situated on a rectangular plan, with an area of 26,355 m², the structure is founded on 22 pillars, the roof is made of trapezoidal sheet, partly glazed, set on a substructure. The main load-bearing element is the columns of cold-formed polygonal tubular cross-sections and the upper mesh made of RO 219.1 x 6.3 and the lower mesh made of RO 193.7 x 6.3, while the diagonals made of RO 168.3 x 6.3.

The entire structure was designed from S355J0 steel. All structural elements are single shipping elements, due to their large dimensions, bolted assembly connections are provided on the construction site along with the assembly of individual sections.

The scope of the study includes: development of the cover geometry in the REVIT program, a list of loads, simulation of the wind flow made using the RWIND Simulation program, static calculations and dimensioning of elements in the RFEM program, checking the load capacity of selected connections using the IDEA Statica program along with careful calculations of some components, taking into account the emergency situation by pole failure.

Keywords: canopy space frame, wind tunnel, nodes, steel structure,

1. WPROWADZENIE

Opracowanie projektu konstrukcji stalowej przekrycia strukturalnego parkingu podzielono na kilka osobnych zagadnień inżynierskich. Pierwszym z nich jest określenie geometrii przekrycia poprzedzonej projektem zagospodarowania terenu galerii handlowej.

Ze względu na znaczną powierzchnię do zadaszenia, dążono do uzyskania nietuzinkowego kształtu inspirowanego naturalnymi formami. Dodatkowo dyskowaty pofalowany kształt na wzór morskiej płaszczki stawia mniejszy opór powietrza.

Drugim zagadnieniem jest określenie na podstawie norm europejskich oddziaływań stałych, klimatycznych i użytkowych. Ze względu na kształt konstrukcji, którego nie uwzględniają zawarte w normach metody, przeprowadzono symulację przepływu wiatru w programie RWIND, a obciążenia śniegiem oprócz przypadków normowych rozwinęto o możliwe zaspy śnieżne związane z ukształtowaniem dachu oraz działaniem wiatru. Sposób określenia obciążenia śniegiem interpolowano z przypadków normowych.

Kolejnym zagadnieniem było modelowanie i wymiarowanie konstrukcji, którego dokonano w programie RFEM, przeprowadzone w nim obliczenia służyły do optymalizacji elementów konstrukcji, umiejscowienia słupów nośnych, a także ustalenia i weryfikacji nośności profili.

Do modelowania i obliczania węzłów, łączących dużą liczbę prętów dochodzących pod różnymi kątami, zastosowano program IDEA Statica. Wybrano po jednym newralgicznym połączeniu w siatce górnej, dolnej i w miejscu podparcia przez gałąź słupa.

2. CHARAKTERYSTYKA PROJEKTU WYJŚCIOWEGO

Projektem wyjściowym jest teren przy galerii handlowej, opracowany na potrzeby pracy dyplomowej, oparty na podkładzie geodezyjnym. Obiekt zaprojektowano w Szczecinku, woj. Zachodniopomorskie na terenie zurbanizowanym, powierzchnia opracowania zajmuje 7,6 ha.

Powierzchnia zadaszona wynosi 26355 m², parking przewidziano na 688 miejsc, z czego 44 miejsca dla osób niepełnosprawnych. Zaprojektowano drogi wewnętrzne, chodniki i tereny zielone. Wewnątrz znajdują się także przystanki komunikacji miejskiej, a także wyznaczone miejsca parkingowe dla rowerzystów.

2.1. Zagospodarowanie terenu

Galeria handlowa wraz z przyległym terenem skomunikowano wewnętrznymi drogami dojazdowymi, wraz z dojściami pieszymi z parkingu do budynków handlowych. Rysunek 1 przedstawia budynki obiektu handlowego oznaczone kolorem niebieskim, zarys przekrycia pokazano kolorem czerwonym.

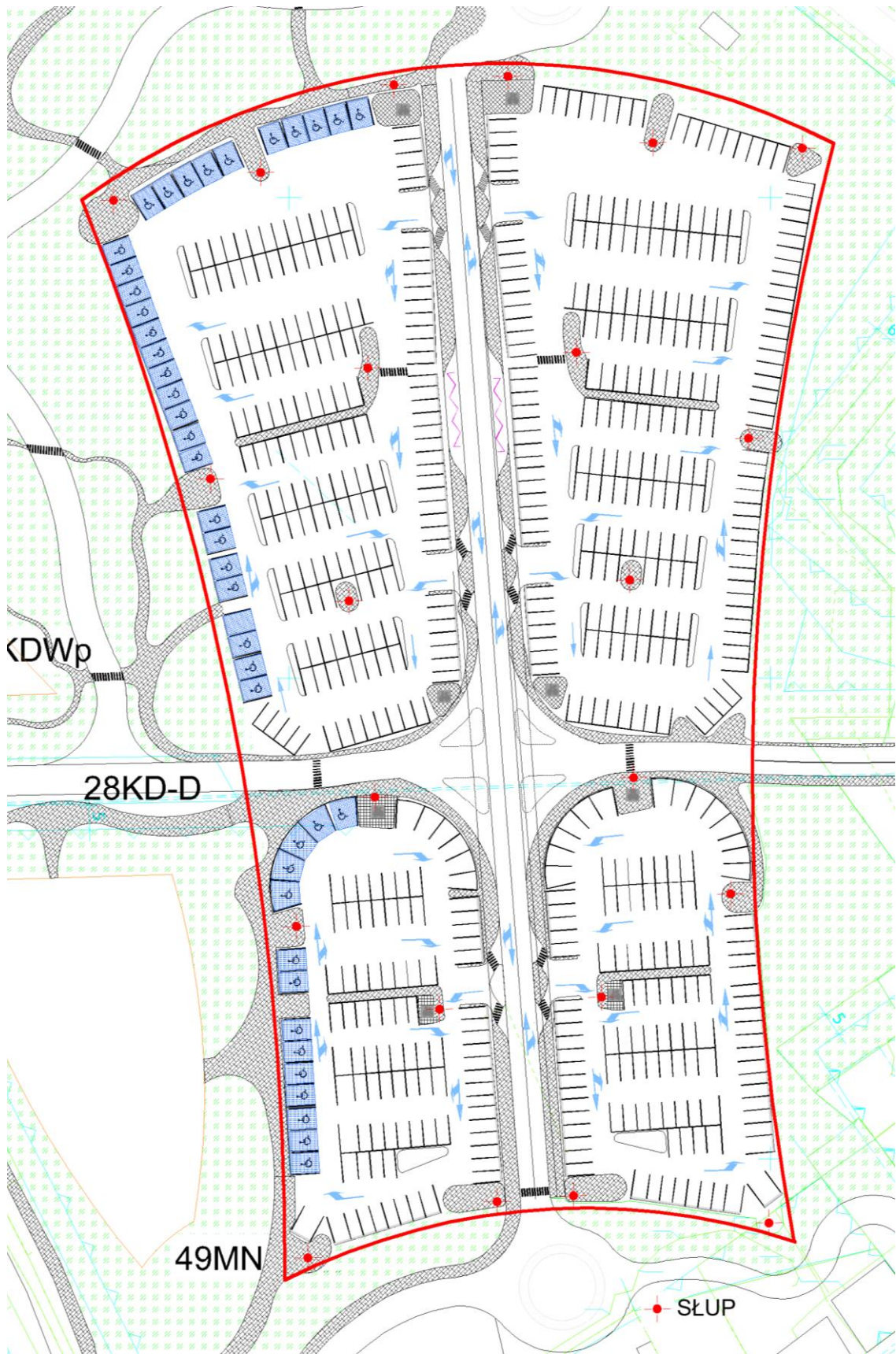


Rys. 1. Plan zagospodarowania terenu



Rys. 2. Plan zagospodarowania

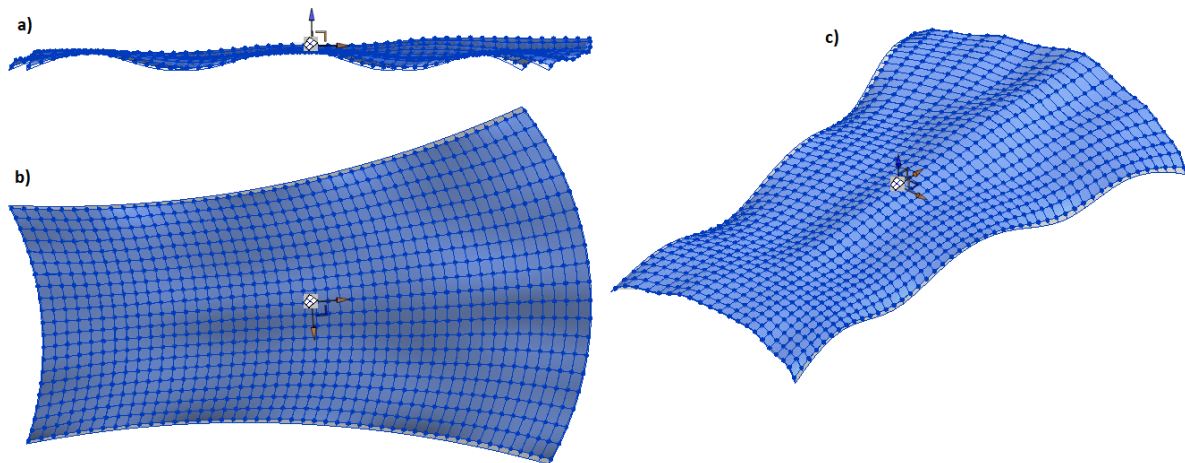
Kolorem czerwonym zaznaczono obrys projektowanego zadania.



Rys. 3. Projekt parkingu– lokalizacja słupów

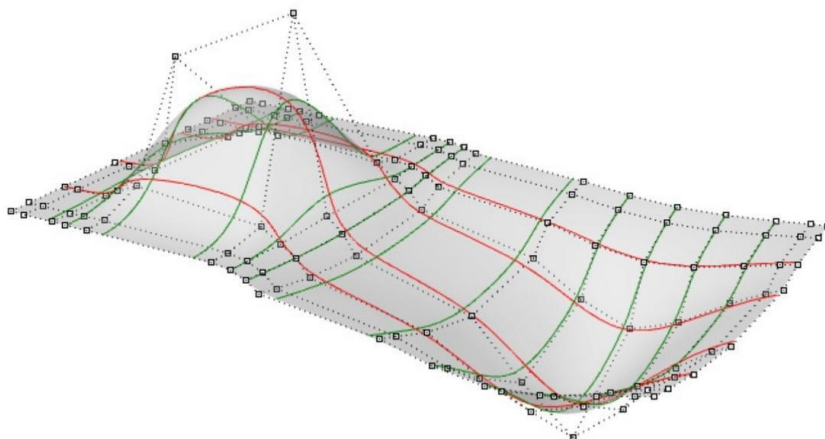
2.2. Architektura

Bryłę zadaszzenia, uwypuklenia i kształt zamodelowano w programie Autodesk Revit, rysunek 4 pokazuje rzuty na które została nałożona siatka punktów, a następnie pokazana na rysunku 6 konstrukcja przestrzenna tworząca siatkę prętów.



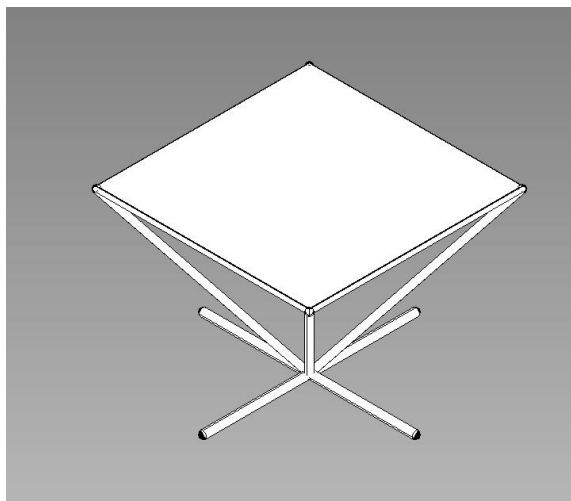
Rys. 4. Rzuty bryły konstrukcji a) z boku, b) z góry, c) aksonometria

Opracowanie kształtu rozpoczęto od zdefiniowania obszaru zadaszzenia, następnie należało określić sekcje wklęsłe i wypukłe poprzez zastosowanie siatki podziału. Zastosowane modelowanie NURBS czyli określanie krzywych za pomocą punktów kontrolnych tworzących wielobok kontrolny, korzysta z automatycznego wygładzenia obiektów. Siatka NURBS przedstawiona na rysunku 5, nie posiada krawędzi, wierzchołków oraz boków, powierzchnie tych elementów są same w sobie gładkie. Utworzone krzywe są ustawiane za pomocą wierzchołków, które są przesuwane po konturach elementu tworząc kształt, a przestrzeń pomiędzy jest interpolowana.



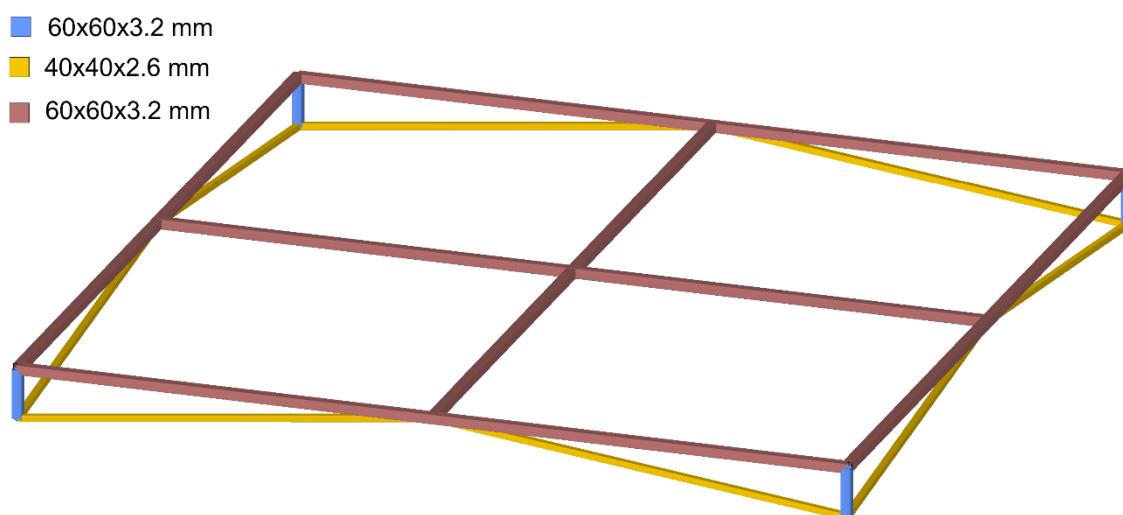
Rys. 5. Punkty kontrolne struktury - Design, Analysis and Construction of Space Structures; Herbert Klimke, Jaime Sanchez

Element wypełniający zawiera pręty pasa górnego, elementy kratownicowe i pręty pasa dolnego.



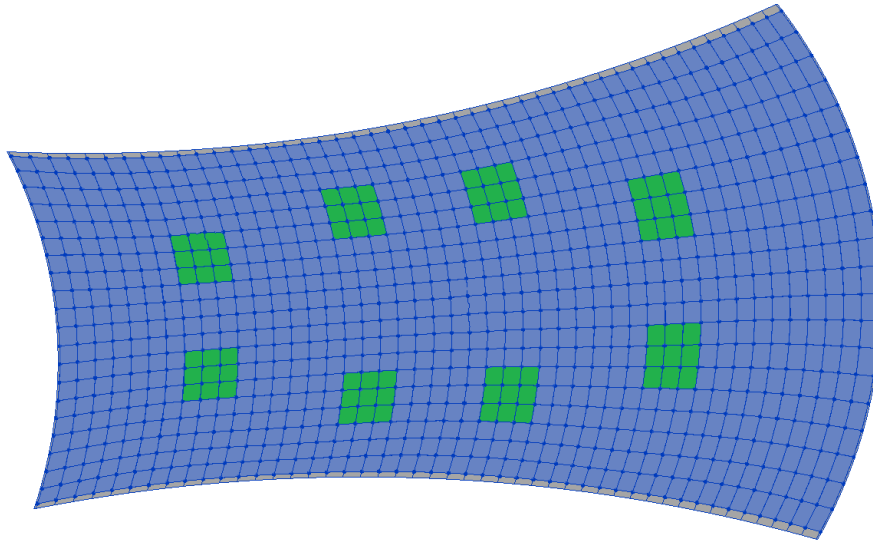
Rys. 6. Element konstrukcyjny

Konstrukcja została zaprojektowana tak aby można było dostosować materiał poszycia do lokalnych potrzeb. Zastosowano dodatkową podkonstrukcję (rysunek 7), ramę, do której jest możliwość zamontowania modułów fotowoltaicznych, przeszklenia części konstrukcji jako doświetlenia, a także zastosowania blachy perforowanej.



Rys. 7. Podkonstrukcja - przekroje

W niniejszym opracowaniu zastosowano pokrycie blachą trapezową, a w środkowej części, przy słupach elementy przeszkłone. Rysunek 8 przedstawia lokalizację świetlików.

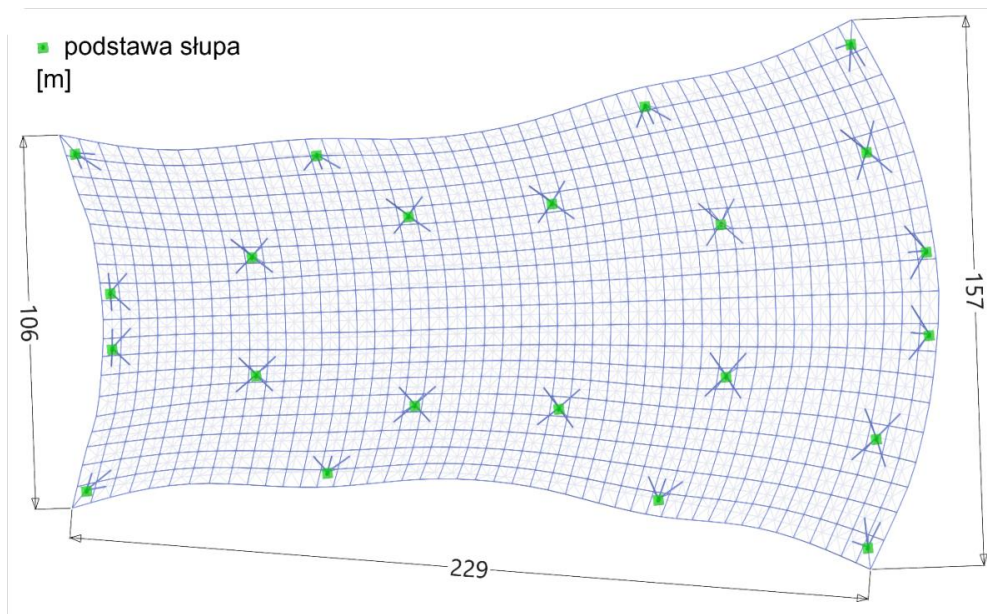


Rys. 8. Lokalizacja świetlików – pokrycie szklane – pola kolor zielony

2.3. Elementy konstrukcyjne

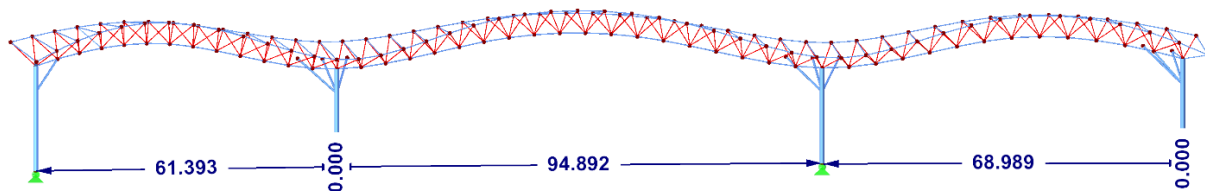
2.3.1. Słupy nośne

Słupy nośne po obrysie obiektu zlokalizowano w narożach, a także w najniższym punkcie pofalowania bryły. Dodatkowo w części przedniej i tylnej, szczytowej umieszczono słupy w rozstawie umożliwiającym poprowadzenie drogi wewnętrznej. Rysunek 9 przedstawia lokalizację słupów po przeprowadzeniu analizy konstrukcji, miejsca posadowienia słupów wewnętrznych przyjęto po przeprowadzeniu wstępnej analizy statycznej.



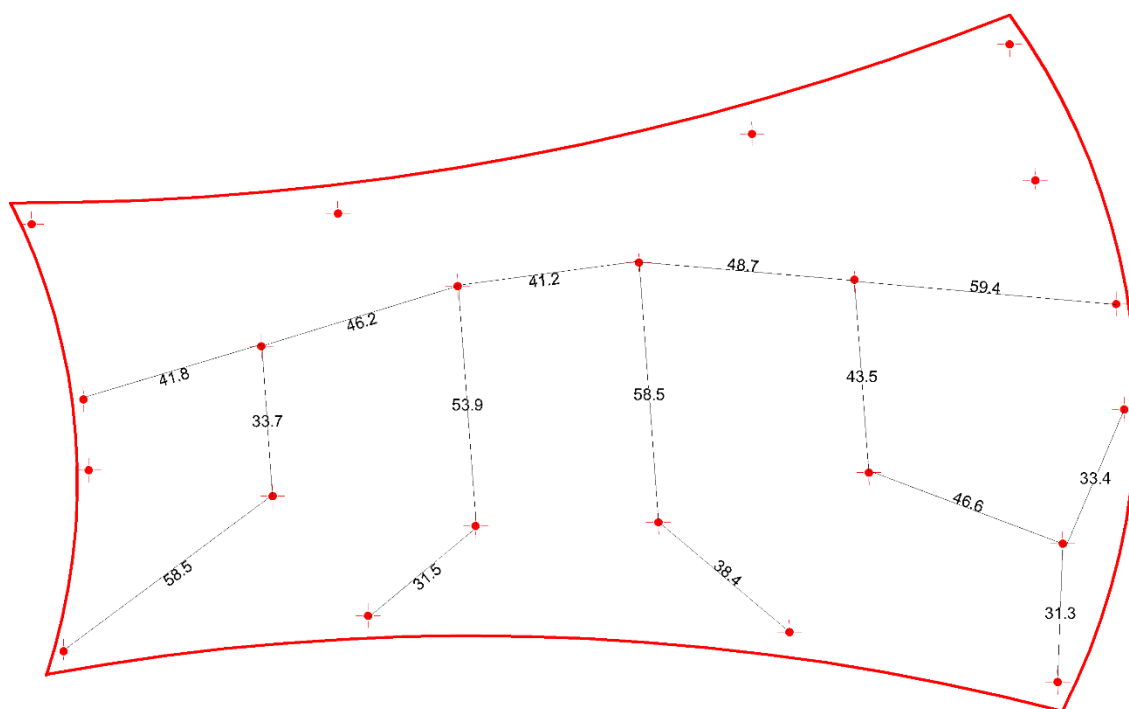
Rys. 9. Siatka słupów

Rozstaw słupów nawy bocznej, pokazany na rysunku 10, o rozpiętości od 61 metrów, aż do 94 metrów przedstawia możliwości jakie posiadają przekrycia strukturalne. Zestawienie wymiarów poprzecznego rozstawu słupów wewnętrznych przedstawiono na rysunku 10.



Rys. 10. Widok nawy bocznej wraz z rozstawem słupów

Należy zauważyć znaczne rozpiętości wewnątrz konstrukcji, zastosowana technologia pozwala uzyskać niezakłóconą przestrzeń rzędu 40-50 metrów.



Rys. 11. Rozstaw słupów wewnętrznych [m]

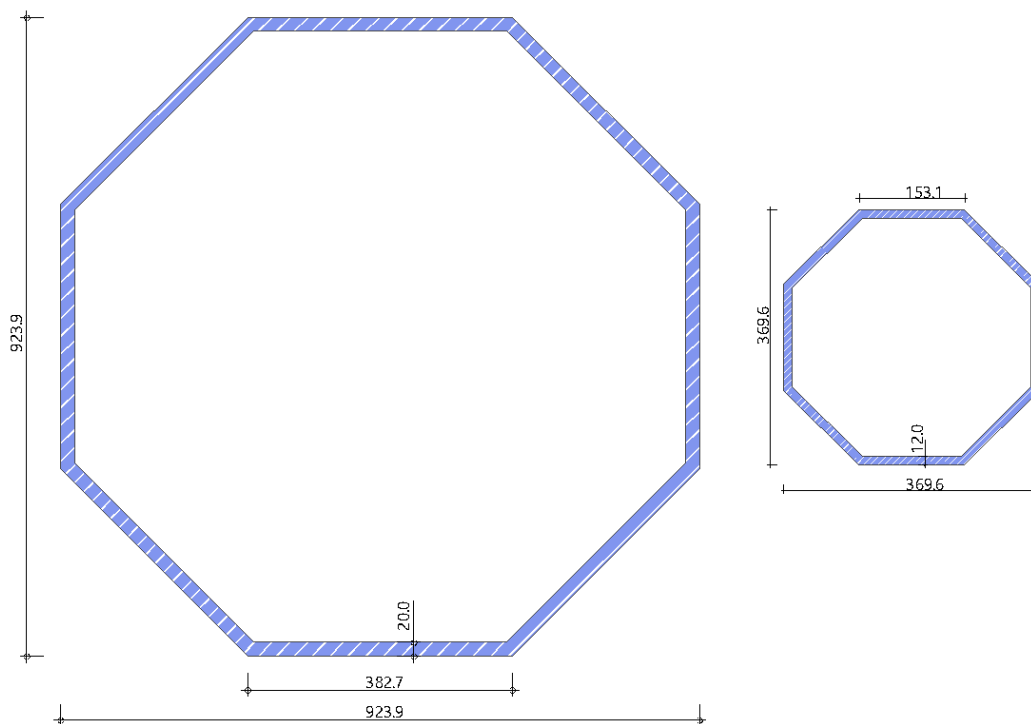
Słupy nośne zaprojektowano z przekroji rurowych wielokątnych formowanych na zimno. Trzon słupa wykonany o stałym, zamkniętym, przekroju poprzecznym na długości. Zgodnie z podanym w literaturze założeniu przekrój ośmiokątny kształtowany na zimno ze szwem

podłużnym charakteryzują się dużą sztywnością skrętną, a aspekt wyboczenia i zwichrzenia można pominąć, aczkolwiek miejscowe deformacje ścian należy uwzględnić przy połączeniach. [dr inż. Sławomir Labocha Stalowe słupy powłokowe, PWN 2017, str. 2.]

Charakterystyka przekroju słupa Polygon 8/1000/12, a także gałęzi przedstawiono poniżej na rysunku 12.

Tab. 1. Charakterystyka przekroju słup i gałęzi (RFEM)

Charakterystyki przekroju	Symbol	Gałąź	Słup	Jednostka
Średnica okręgu opisanego na obrysie zewnętrznym	D	400,00	1000,00	mm
Grubość ściany	t	12,00	22,00	mm
Wysokość	h	369,60	923,90	mm
Pole przekroju	A	142,01	362,44	cm ²
Pole przekroju czynnego przy ścinaniu	A _v	67,69	172,41	cm ²
Moment bezwładności	I _y	24017,0	398316,0	cm ⁴
Ciężar	g	111,5	284,5	kg/m
Powierzchnia	A _p	1,225	3,061	m ² /m

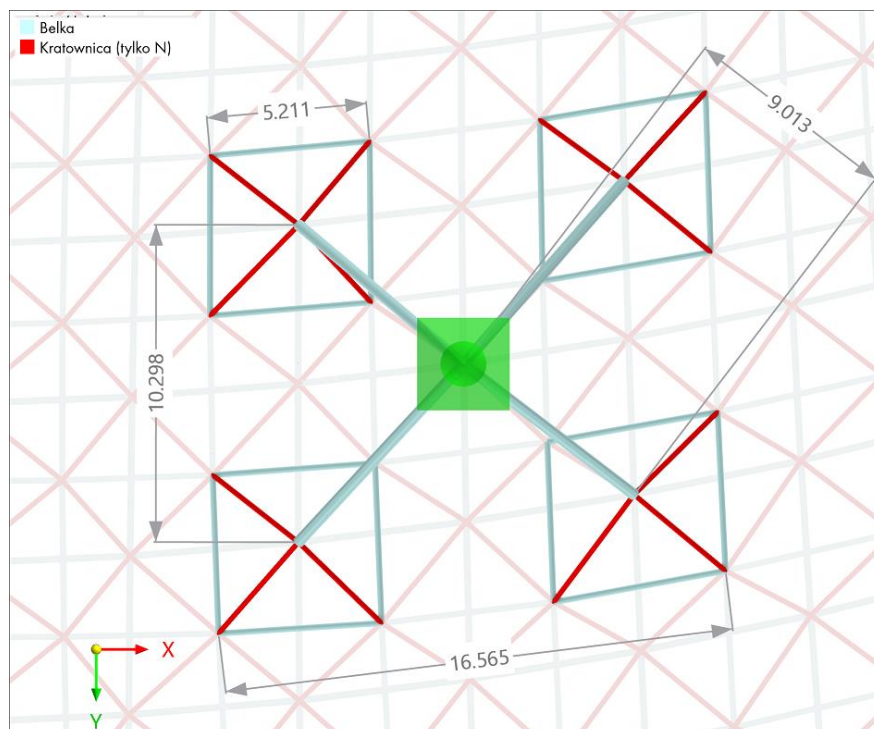


Rys. 12. Geometria przekroju słupa i gałęzi (RFEM)

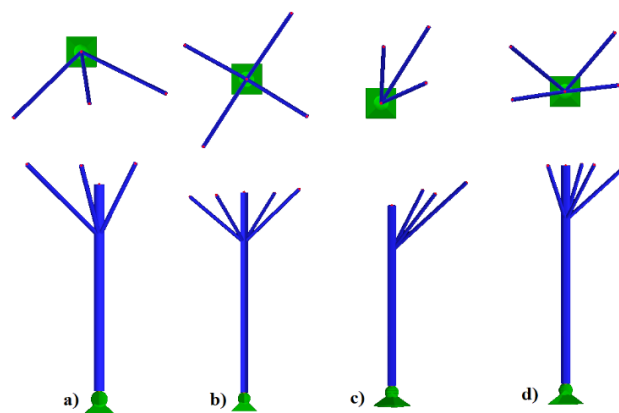
2.3.2. Podpory gałęziowe

Konstrukcja dachowa została podparta na „rozgałęzieniach” rozpoczynających się na $\frac{3}{4}$ wysokości słupa. Słupy narożne i skrajne wyposażono w trzy gałęzie, a słupy wewnętrzne w cztery. Przyjęto zasadę odsunięcia dodatkowych punktów podparcia o jedno pole, schemat przedstawiono na rysunku 13.

Na rysunku 14 przedstawiono użyte sposoby podparcia konstrukcji, rozróżniono cztery rodzaje podparć uzależnione od ilości gałęzi, a także od kąta zamocowania podpory w stosunku do trzonu słupa.



Rys. 13. Rozmieszczenie podpór gałęziowych

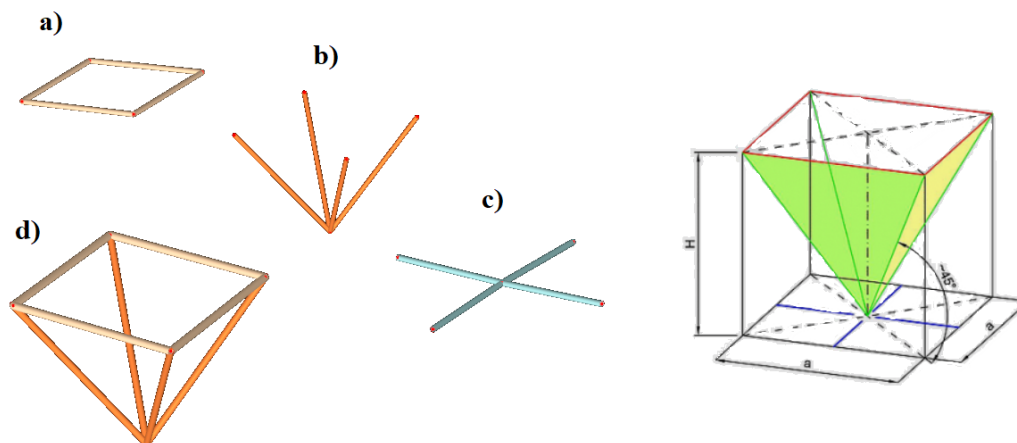


Rys. 14. Zastosowane sposoby podparcia konstrukcji.

a) słup skrajny boczny; b) słup wewnętrzny; c) słup narożny; d) słup skrajny o czterech rozwartych gałęziach

2.3.3. Siatka prętów

Przestrzenny ustrój prętowy zaprojektowano na bazie pochodnej formy czworościanu foremnego przedstawionego na rysunku 15 poz. d, punktem wyjścia zastosowanej konfiguracji jest podstawa bryły, której pręty tworzą ortogonalną siatkę warstwy górnej, siatka dolna przesunięta jest w stosunku do górnej tak aby możliwe było sprzęgnięcie za pomocą skratowania.



Rys. 15. Proces modelowania modułu

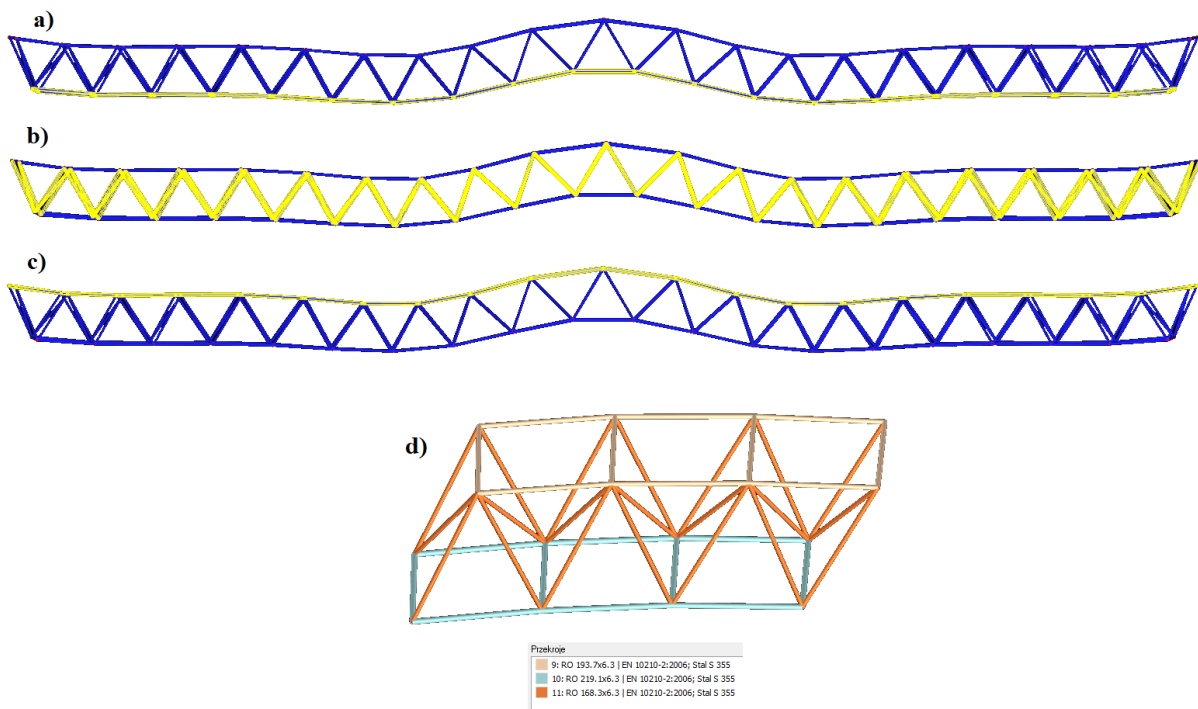
a) Siatka górna; b) skratowanie; c) siatka dolna; d) moduł geometryczny;

Specyfiką konfiguracji warstw na płaszczyźnie są przecinające się rzuty prostokątne w nieskończonej liczbie punktów, co odróżnia takie przekrycie od rusztu kratowego ze szczytkowymi stężeniami. Skratowanie siatki górnej z dolną wykonano poprzez połączenie węzłów siatki górnej z węzłem siatki dolnej, rozwiązanie przedstawiono na rysunku 15. Następnie konstrukcja jednego modułu naniesiona na płaszczyznę z określonymi węzłami górnej siatki tworzy kratownicę przestrzenną. Układ przestrzenny ortogonalny siatki górnej i dolnej przedstawiono na rysunku 16, wraz z przekrojem poprzecznym przez konstrukcję przekrycia. Na rysunku zaznaczono linią żółtą poszczególne konfiguracje warstw.

Wysokość modułu określono na podstawie zależności odległości pomiędzy podporami, a wysokością piramidki wg. Lan T. T. (2005). Space FrameStructures. In W.-F. Chen & E. M. Lui (Eds.), Handbook of Structural Engineering (2nd ed.). CRC Press. (chodor-projekt.net)

$$i = \frac{L}{H} = 12,5 \div 25$$

$$i = \frac{61,39}{4,7} = 13,06$$



Rys. 16. Przekrój z układem przestrzennym

a) Siatka dolna; b) skratowanie; c) siatka górna; d) schemat struktury przestrzennej;

2.3.4. Kształtowanie i geometria siatki górnej

Siatka górna określa powierzchnię czynną przekrycia, kształt krzywizn i geometrię płaszczyzny określono w programie Autodesk Revit,. Prace architektoniczne nad planowaną powierzchnią 36800 m² o wymiarach 230 m na 160 m, doprowadziły do utworzenia zadania o nieregularnym kształcie, ciekawym pod względem architektonicznym o powierzchni prawie 27 tysięcy metrów kwadratowych (2,7 ha), co odpowiada 4 boiskom piłkarskim.

Płaszczyznę podzielono na siatkę o wymiarze oczek kwadratowych wynoszących 5,2 x 5,2 m. Nadanie kształtu poprzez wyciągnięcie ku górze części środkowej, a także ukształtowanie spadków odprowadzających wody opadowe wprowadziło ostateczne wymiary każdego pola. Najmniejsze z pól zawiera się w wyjściowym wymiarze, przy minimalnej długości pręta wynoszącej 4,8 m, największe pole ma wymiary 5 x 8 m, zlokalizowane jest w najwyższym punkcie konstrukcji, w frontowej części. Siatkę górną o wymiarach całkowitych 228 x 156 m przedstawiono na rysunku 15 poz. a).

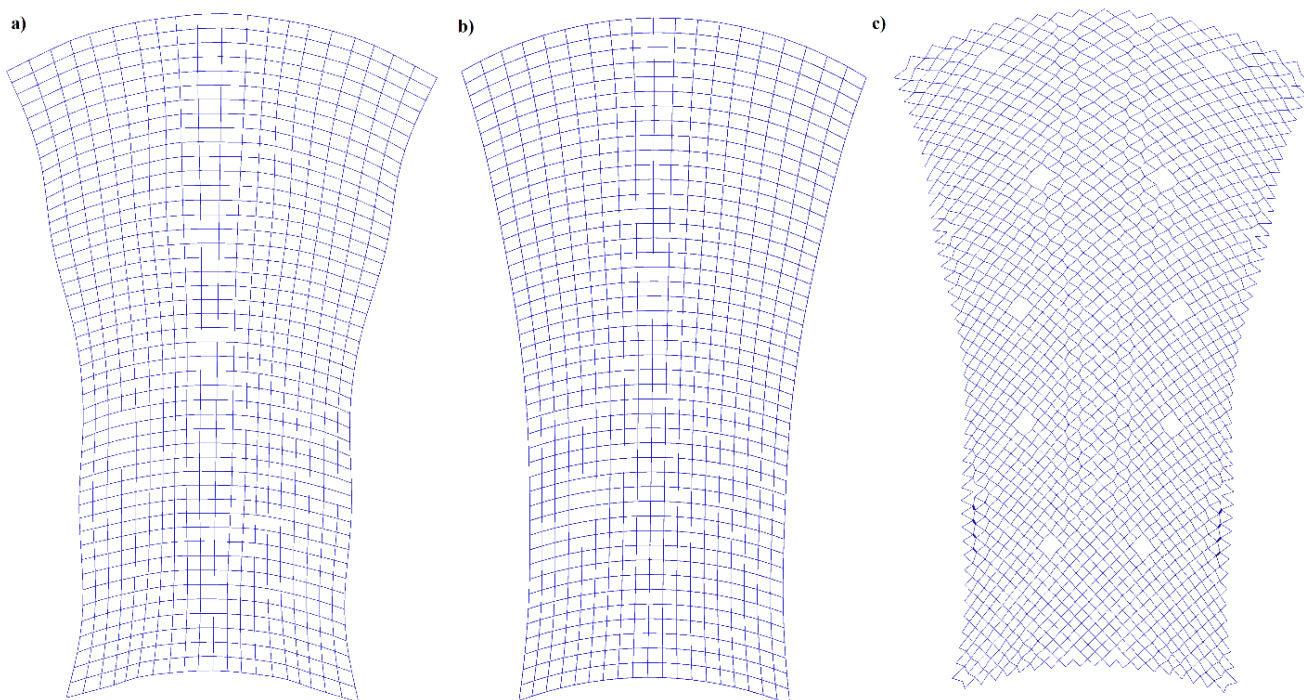
Zastosowano przekrój z rury otwartej o parametrach przedstawionych w tabeli 2.

Tab. 2. Charakterystyka przekroju siatki górnej i dolnej

Charakterystyki przekroju	Pas dolny	Pas górny	Jednostka
	RO 193,7x6,3	RO 219,1x6,3	
Średnica zewnętrzna	193,700	219,100	mm
Grubość ściany	6,300	6,300	mm
Pole przekroju	37,100	42,100	cm ²
Moment bezwładności	1630,000	2386,000	cm ⁴
Ciężar	29,100	33,000	kg/m
Powierzchnia	0,609	0,688	m ² /m

2.3.5. Kształtowanie i geometria siatki dolnej

Siatka dolna została wygenerowana na podstawie geometrii siatki górnej, a także geometrii pojedynczego modułu przestrzennego. Ukształtowanie brzegu przekrycia dachowego w formie gzymsu pozwoliło na zaprojektowanie siatki dolnej w regularnym kształcie, uzyskując przez to zróżnicowany na długości krawędzi okap. Siatka dolna przedstawiona na rysunku 17 poz. b, jest przesunięta do wnętrza w stosunku do siatki górnej o około 5,5 metra.



Rys. 17. Konfiguracja prętów warstwowych

a) Siatka górna; b) siatka dolna; c) skratowanie;

2.3.6. Skratowanie ustroju

Dwuwarstwowa konstrukcja sprzęgnięta została za pomocą skratowania tak aby utworzyć mikrostrukturę przestrzenną. Siatkę skratowania przedstawiono na rysunku 15 poz. c), miejsca newralgiczne przy słupach wykonano z wzmocnionego przekroju, zgodnie z tabelą 3 poz. b. Zabieg ten pozwala na przeniesienie części obciążeń na trzon słupa nośnego.

Charakterystyka przekroju skratowania przedstawiono w tabeli 3.

Tab. 3. Charakterystyka skratowania

Charakterystyki przekroju	Skratowanie		Jednostka
	RO 168,3x6,3	RO 177,8x8,0	
Średnica zewnętrzna	168,300	177,800	mm
Grubość ściany	6,300	8,000	mm
Pole przekroju	32,100	42,700	cm ²
Moment bezwładności	1053,000	1541,000	cm ⁴
Ciężar	25,200	33,500	kg/m
Powierzchnia	0,529	0,559	m ² /m

3. USTALENIE ODDZIAŁYWAŃ

Obliczenia statyczne wykonano przy pomocy oprogramowania firmy Dlubal. Analizę statyczną przeprowadzono programem RFEM, a symulację obciążeń wiatrowych programem RWIND.

3.1. Obciążenia stałe

3.1.1. Ciężar własny

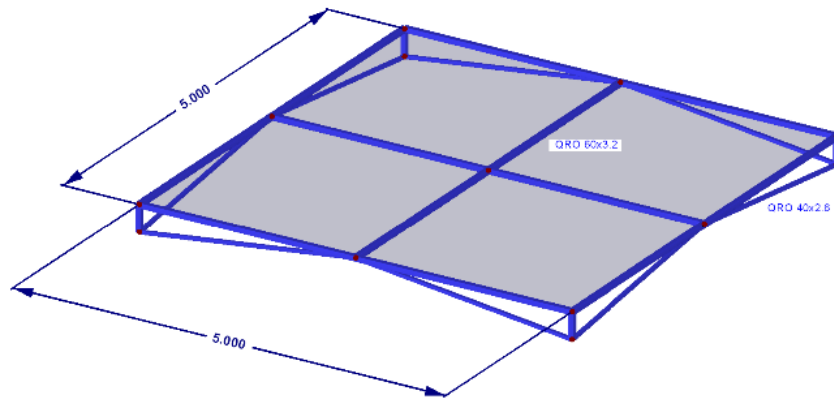
Ciężar własny elementów konstrukcyjnych określono w programie obliczeniowym. W tabeli 4 zestawiono ciężar poszczególnych elementów konstrukcji z podziałem na użyte przekroje. Ciężar całkowity konstrukcji wynosi 1368,6 tony, zużycie stali 51,9 kg/m² przy pokryciu 26394,5 m².

Tab. 4. Zestawienie ilościowe materiału

Nazwa	Przekrój	Masa	Długość	Ilość
		[t]	[m]	[szt.]
Pas górny	CHS 193.7x6.3	305,8	10500	1906
Pas dolny	CHS 219.1x6.3	318,6	9641	1772
Skratowanie	CHS 168.3x6.3	509,2	20208	3613
Skratowanie wzmocnione	CHS 177.8x8.0	12,5	370	64
Trzon słupa	PHS 8/1000/20	139,3	489	22
Gałąź	PHS 8/400/12	83,2	746	78
Razem:		1368,6	41954	7455

3.1.2. Konstrukcja wsporcza

Zaprojektowano dodatkową konstrukcję wsporczą spełniającą rolę płatwi montażowych elementów poszycia dachu przedstawioną na rysunku 18, zastosowano profile zamknięte rury kwadratowej, do dalszych obliczeń przyjęto moduł o wielkości 5,2 x 5,2 m. Ze względu na krzywizny, faktyczna wielkość siatki zawiera się w przedziale od 5,0 do 5,3 m. Konstrukcję zabezpieczono cynkowaniem ogniowym i malowaniem proszkowym.



Rys. 18. Konstrukcja wsporcza

3.1.3. Pokrycie

Przeprowadzono analizę wraz z wyznaczeniem sił obciążających węzły konstrukcji nośnej pokrycia konstrukcji blachą trapezową i panelami szkła laminowanego.

Analiza zastosowania blachy trapezowej systemu łukowego firmy Arceroll Mittal, przeprowadzona została dla blach na bazie profilu TS40, zastosowano materiał wsadowy stali w gatunku FeE 320 G, ciężar i grubość przedstawiono na rysunku 19.

Łuki FLOLINE 40 na bazie profilu TS40

F1
Strona wypukła

F2
Strona wklęsła

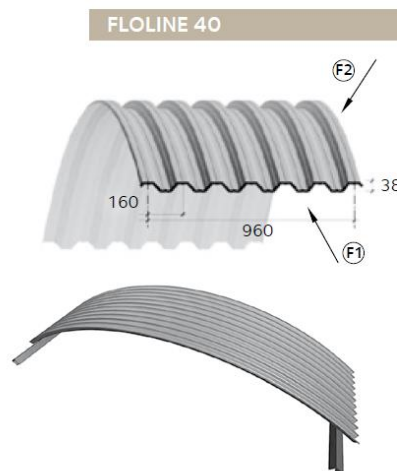
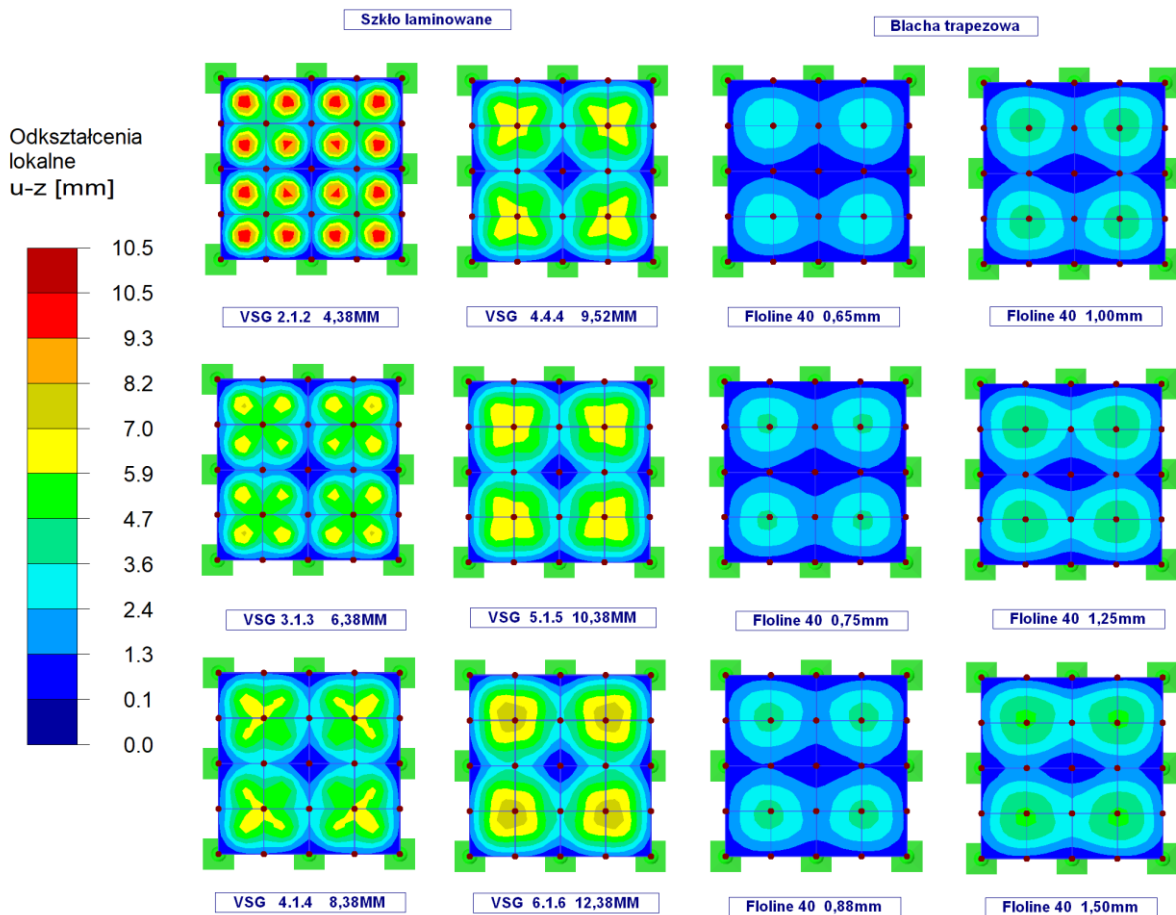


Tabela		Tabela gięcia profilu FLOLINE 40		
ŁUK	Grubość	Ciężar	Promień	
Typ profilu	blachy [mm]	1m ²	minimalny [m]	
	0,63	6,44	12,50	
	0,75	7,67	9,50	
	0,88	8,99	7,00	
	1,00	10,22	5,00	
	1,25	12,78	4,50	
	1,50	15,33		

FLOLINE 40 szer. budowlana 960 mm

Rys. 19. Blacha trapezowa (Arcelor Mittal Construction Polska Sp. z o. o.)

Zastosowano doświetlenie wnętrza poprzez obszary wykonane ze szkła laminowanego VSG, szkło bezpieczne warstwowe. Analizowane grubości wraz z mapą odkształceń od ciężaru własnego i obciążenia śniegiem zestawiono na rysunku 20.



Rys. 20. Typoszereg materiału pokrycia

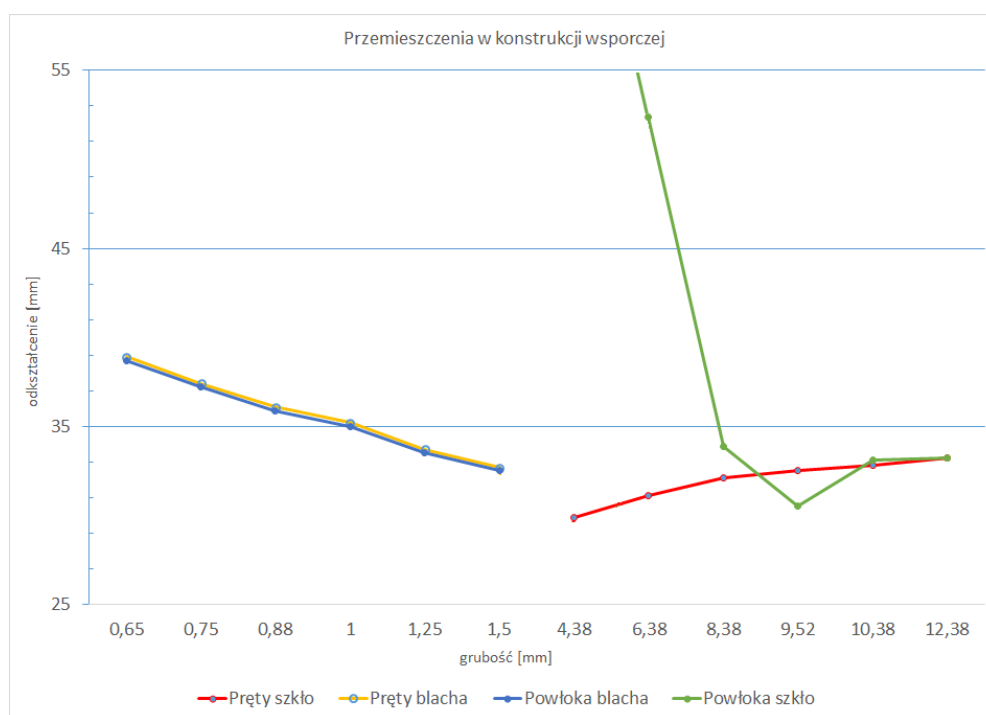
Przeprowadzono analizę od ciężaru własnego pokrycia wraz z obciążeniem śniegiem o wartości $0,72 \text{ kN/m}^2$, co pozwoliło wybrać optymalny wariant do dalszych obliczeń. Wzięto pod uwagę ugięcia profilu konstrukcji, ugięcia zastosowanych paneli, a także wartość oddziaływań na główną konstrukcję nośną w postaci obciążenia skupionego przyłożonego do węzła. Wartość ugięć przedstawiono na rysunku 20, a w tabeli 5 zawarto zestawienie zależności sił węzłowych w stosunku do ugięcia.

Do dalszych rozważań wykorzystano wartości obciążeń skupionych z tabeli 5 przypadek 5 i 9, oznaczone kolorem żółtym, ze względu na zbliżoną wartość ugięć pozwalającą na równomierne rozłożenie naprężenia w badanej konstrukcji.

Tab. 5. Zestawienie reakcji węzłowych w stosunku do przemieszczeń

	Przypadek	Grubość	Pręty	Powłoka	Reakcje węzłowe
		[mm]	[mm]	[mm]	[kN]
Blacha trapezowa	1	0,65	38,9	38,7	1,80
	2	0,75	37,4	37,2	1,95
	3	0,88	36,1	35,9	2,12
	4	1,00	35,2	35,0	2,28
	5	1,25	33,7	33,5	2,60
	6	1,50	32,7	32,5	2,91
Szkło laminowane	7	4,38	29,9	155,0	2,80
	8	6,38	31,1	52,4	3,42
	9	8,38	32,1	33,9	4,04
	10	9,52	32,5	30,5	4,31
	11	10,38	32,8	33,1	4,66
	12	12,38	33,2	33,2	5,28

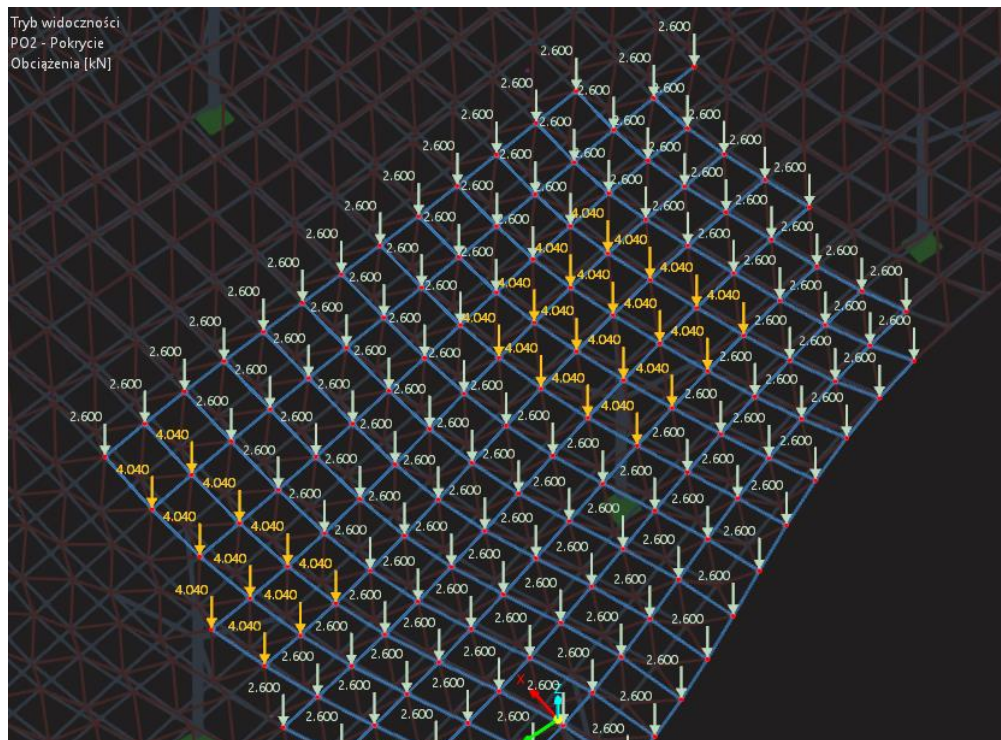
Wykres przedstawiony na rysunku 21 przedstawia wpływ grubości wykorzystanego materiału na wartość przemieszczeń. Można zaobserwować, że zwiększenie grubości materiału blachy trapezowej powoduje liniowe zmniejszenie przemieszczeń, w odróżnieniu do pokrycia szklanego, analiza wykazała że zwiększanie grubości powoduje znaczny przyrost obciążenia, a także zwiększanie się ugięcia konstrukcji pod ciężarem własnym.



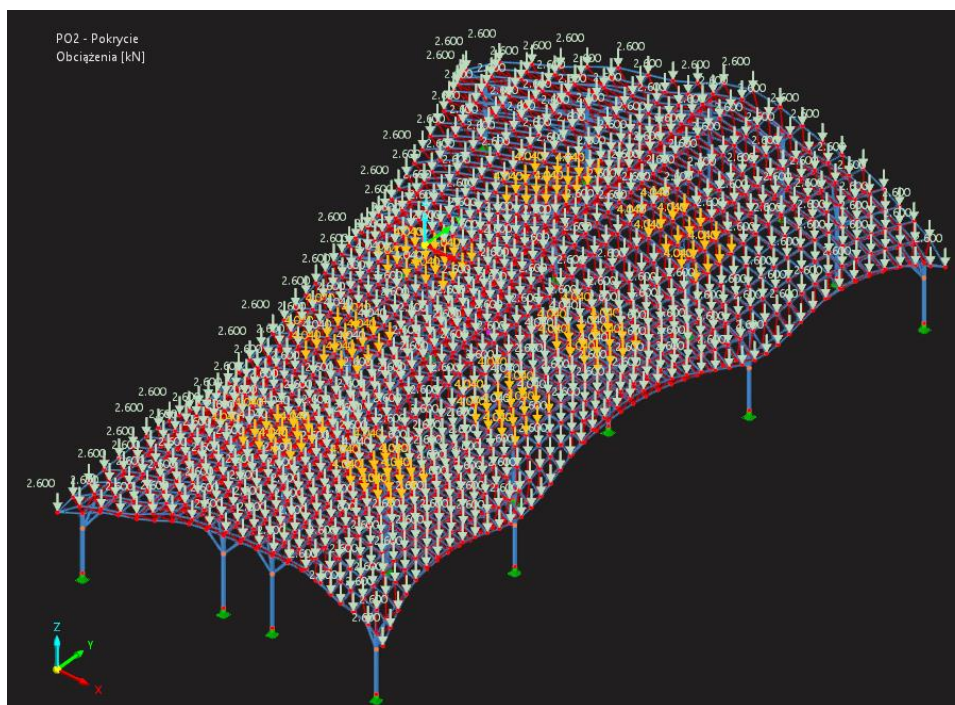
Rys. 21. Przemieszczenia w konstrukcji wsporczej

3.1.4. Sposób obciążenia konstrukcji – przypadek PO2

Na rysunku 22 i 23 przedstawiono sposób przyłożenia obciążenia skupionego do węzła konstrukcji, przedstawiono także pola, oznaczone kolorem żółtym, w których przyłożono obciążenie skupione o wartości 4,04 kN, jaką generuje pokrycie szklane, pozostałe węzły obciążono siłą 2,60 kN od konstrukcji pokrytej blachą trapezową.



Rys. 22. Obciążenie stałe PO2



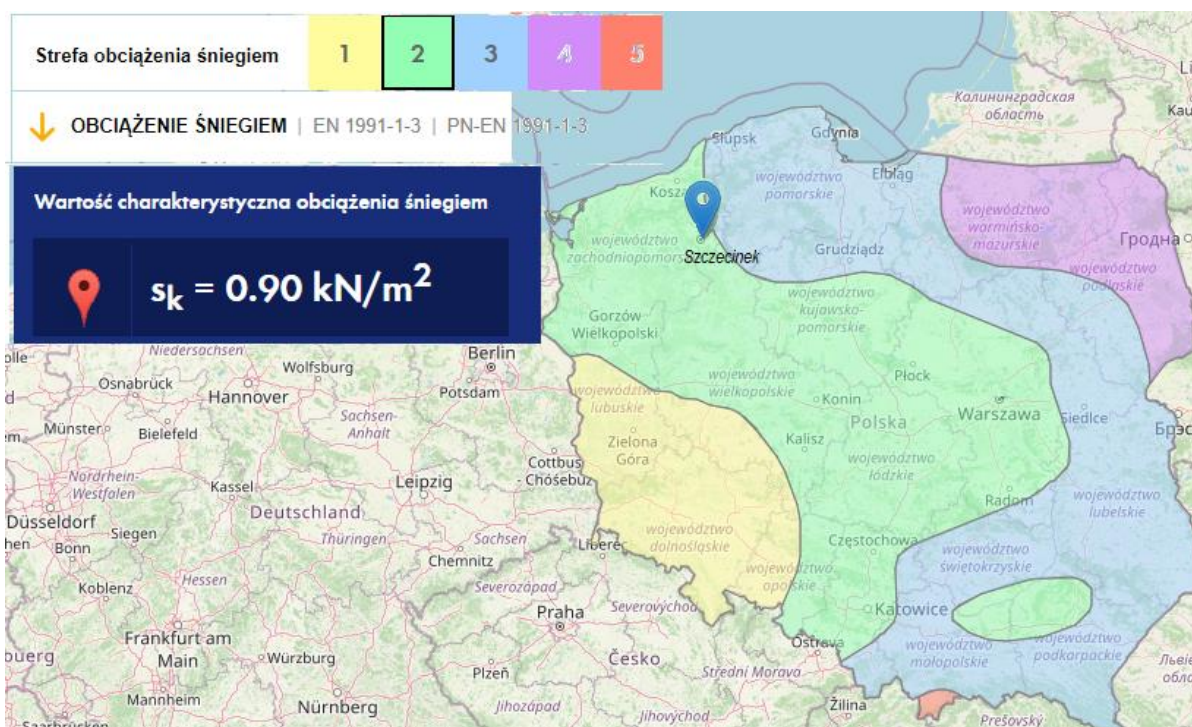
Rys. 23. Obciążenie PO2

3.2. Obciążenia zmienne

Wielkopowierzchniowe przekrycia strukturalne narażone są na szereg niesprzyjających czynników zewnętrznych. Konstrukcja obciążona śniegiem w sposób niekontrolowany może ulec awarii, niezwykle ważnym aspektem jest opracowanie właściwych stref dodatkowego dociążenia konstrukcji w postaci worków i nawisów śnieżnych. Istotnym czynnikiem w rozważanej konstrukcji jest sposób w jaki wiatr wpływa na elementy tworzące połacie dachową. Do zobrazowania i określenia wartości ciśnienia użyto tunelu aerodynamicznego RWIND firmy Dlubal.

3.2.1. Obciążenie śniegiem

Oddziaływanie na konstrukcję obciążeniem śniegiem wyznaczono na podstawie normy PN-EN 1991-1-3 Eurokod 1 Oddziaływania na konstrukcję Część 1-3: Oddziaływania ogólne – Obciążenia śniegiem. Wartość charakterystyczną obciążenia śniegiem gruntu (s_k) uwzględniono przy pomocy programu RFEM, Geo-Zone Tool, rysunek 24.



Rys. 24. Strefa obciążenia śniegiem

Obliczeniowa wartość obciążenia śniegiem:

$$s = \mu_i * C_e * C_t * s_k$$

Charakterystyczna wartość obciążenia śniegiem dla strefy II (Szczecinek):

$$s_k = 0,9 \text{ kN/m}^2$$

Współczynnik termiczny:

$$C_t = 1,0$$

Współczynnik ekspozycji:

$$C_e = 1,0$$

Uwzględniono współczynnik normalny ze względu na usytuowanie na obszarze, bez występowania przenoszenia śniegu przez wiatr na budowlę, ani przez ukształtowanie terenu, a także z sąsiednich budynków.

Współczynnik kształtu dachu

$\mu_1 = 0,8$ dla dachu dwu spadowego o kącie pochylenia $\alpha = 0^\circ < 3^\circ$ do $10^\circ < 30^\circ$,

Obciążenie charakterystyczne

$$S_1^k = 0,8 * 1,0 * 1,0 * 0,9 = 0,72 \text{ kN/m}^2$$

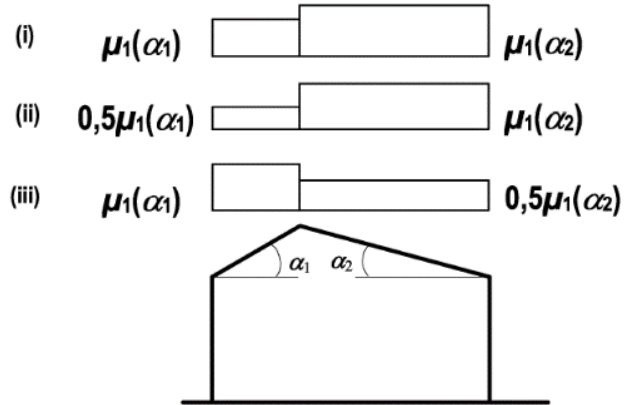
Wyznaczono obciążenie węzłowe przenoszone przez podkonstrukcję na punkty podparcia konstrukcji głównej na podstawie modelu przedstawionego na rysunku 26.

Skomplikowanie i złożona forma dachu wymagała indywidualnego rozpatrzenia obciążeń. Obciążenia śniegiem wprowadzono poprzez modyfikację przyjętych w normie EC 1991-1-3 współczynników odnoszących się do kształtu dachu, poprzez indywidualne określenie stref, tak aby na poszczególnych obszarach zastosować częściowo założenia normowe. Interpolacja współczynników normowych uwzględnia możliwe przewymiarowania konstrukcji w kierunku zwiększenia bezpieczeństwa projektowanego obiektu.

3.2.1.1. *Oddziaływania wg. dachów dwupołaciowych*

Zastosowano obciążenie zgodne z punktem 5.3.3 Dachy dwupołaciowe normy EN 1991-1-3, rysunek 25, przypadek równomiernego obciążenia, a także obciążenie lewej i prawej połaci zgodnie z rysunkiem 27.

Przypadek

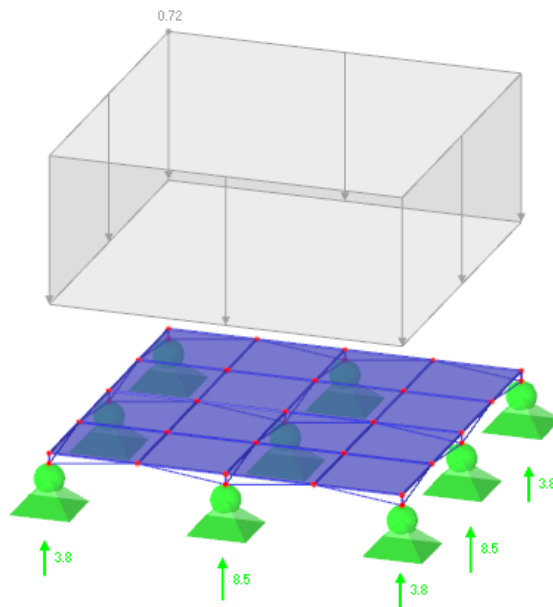


Rys. 25. Współczynnik kształtu dachu- dachy dwupołaciowe EN-1991-1-3; Rysunek 5.3

- Obciążenie charakterystyczne

$$S_{100\%} = 0,8 * 1,0 * 1,0 * 0,9 = 0,72 \text{ kN/m}^2$$

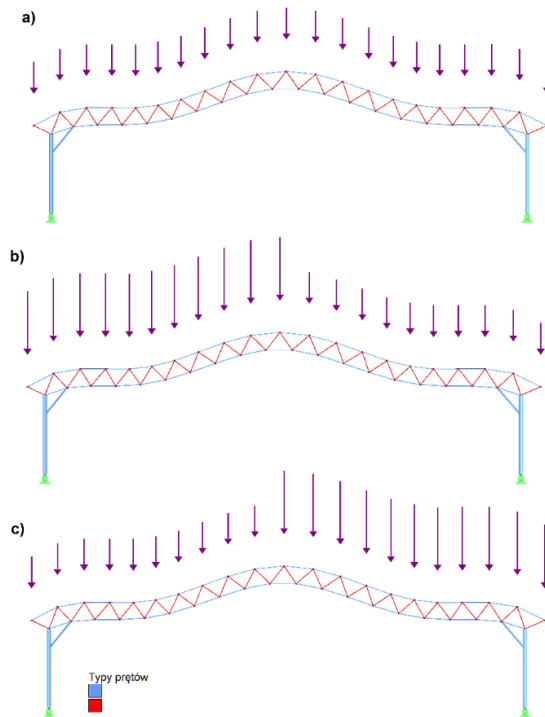
Obciążono powierzchniowo model składający się z 4 pól konstrukcji wsporczej, wynik analizy pozwolił przyjąć jako wartość wyjściową, oddziaływanie na podporę wewnętrzną o wartości 8,5 kN.



Rys. 26. Wyznaczenie wartości obciążenia węzłowego

$$P = 8,5 \text{ kN}$$

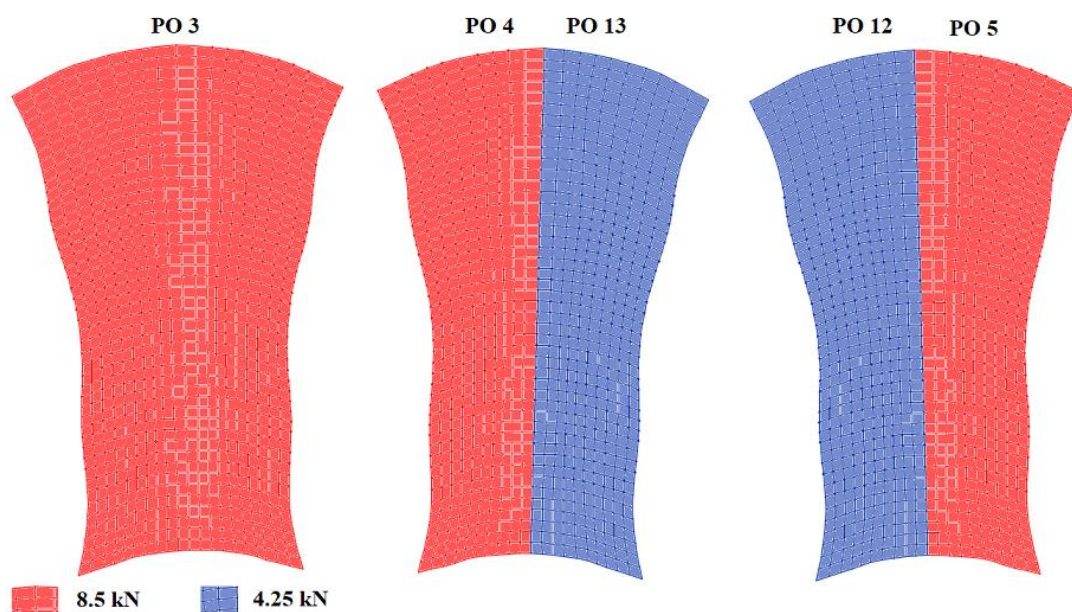
$$S_{50\%} = 0,5(0,8 * 1,0 * 1,0 * 0,9) = 0,36 \text{ kN/m}^2 \quad P_{50\%} = 4,25 \text{ kN}$$



Rys. 27. Obciążenie śniegiem wg. EN 1911-1-3, punkt 5.3.3.

- a) równomiernie PO3;
- b) lewa strona PO4 - 100%; PO12 – 50%;
- c) prawa strona PO5 – 100%; PO13 – 50%;

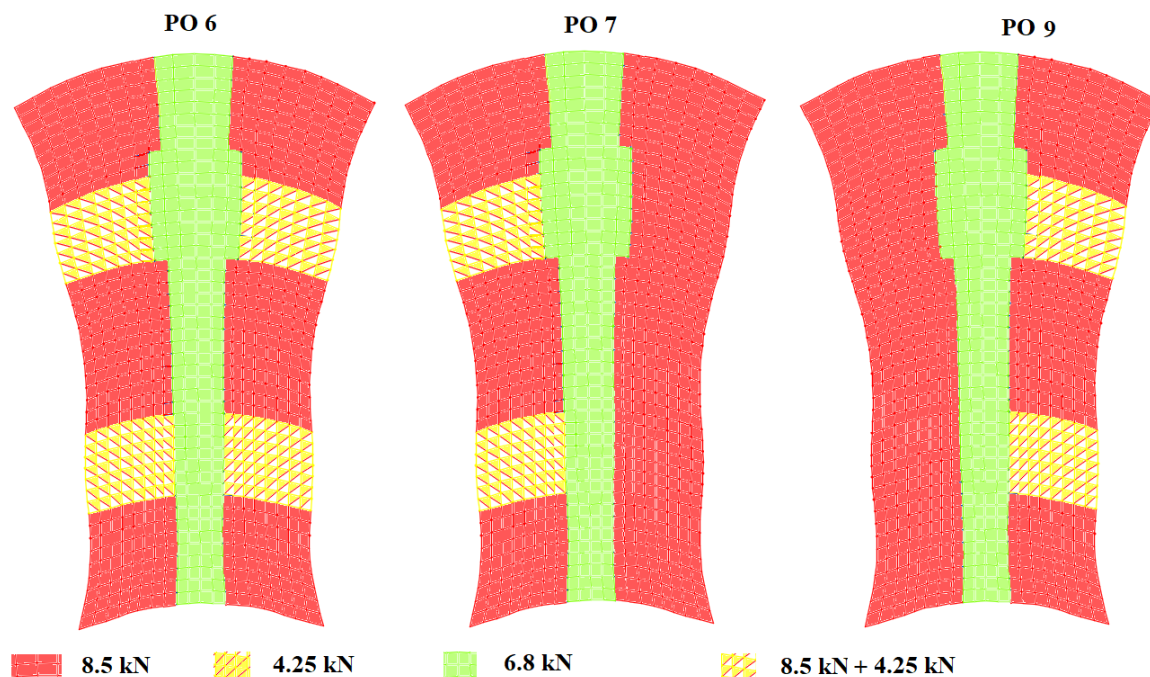
Rysunek 28 przedstawia obszary obciążenia połaci dachowej, podział na lewą i prawą stronę wraz z wartością oddziaływania.



Rys. 28. Przypadki obciążenia śniegiem – lokalizacja obciążeń

3.2.1.2. Oddziaływania z uwzględnieniem zasp śnieżnych -

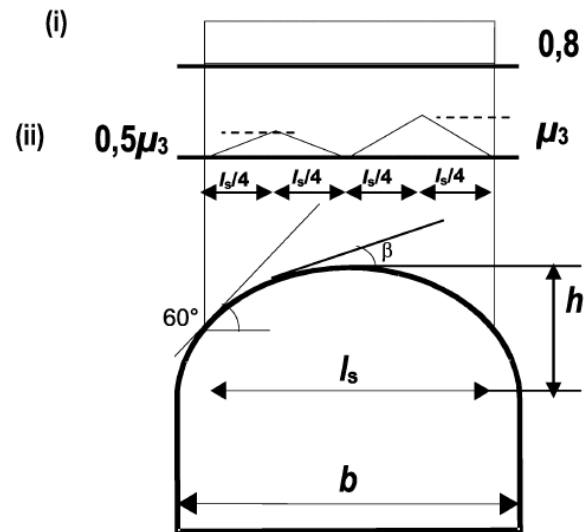
Kształt dachu umożliwia tworzenie się zasp śnieżnych, a także zsuwaniu się śniegu w niższe partie. W związku z tym zastosowano dodatkowe obciążenia w postaci miejscowego dociążenia konstrukcji, wytypowano 4 obszary występowania zasp w przypadku opadu przy stosunkowo małym wietrze, obszary te zaznaczono na rysunku 29 kolorem żółtym.



Rys. 29. Przypadki obciążenia śniegiem – lokalizacja zasp

Dla części środkowej, szczytowej, przyjęto współczynnik kształtu dachu według punktu 5.3.5 EN 1991-1-3, zgodnie z rysunkiem normowym, rys. 30, w części szczytowej współczynnik wynosi 0,8, nie uwzględniono przypadku 2 ze względu na małą wyniosłość łuku względem rozpiętości. Ze względu na małą wypukłość części szczytowej (łagodne przejścia pomiędzy strefami) przyjęto obciążenie pośrednie o wartości 75% wyjściowego, tj. 6,8 kN. Rysunek 29 przedstawia opisaną sytuację kolorem zielonym.

Przypadek



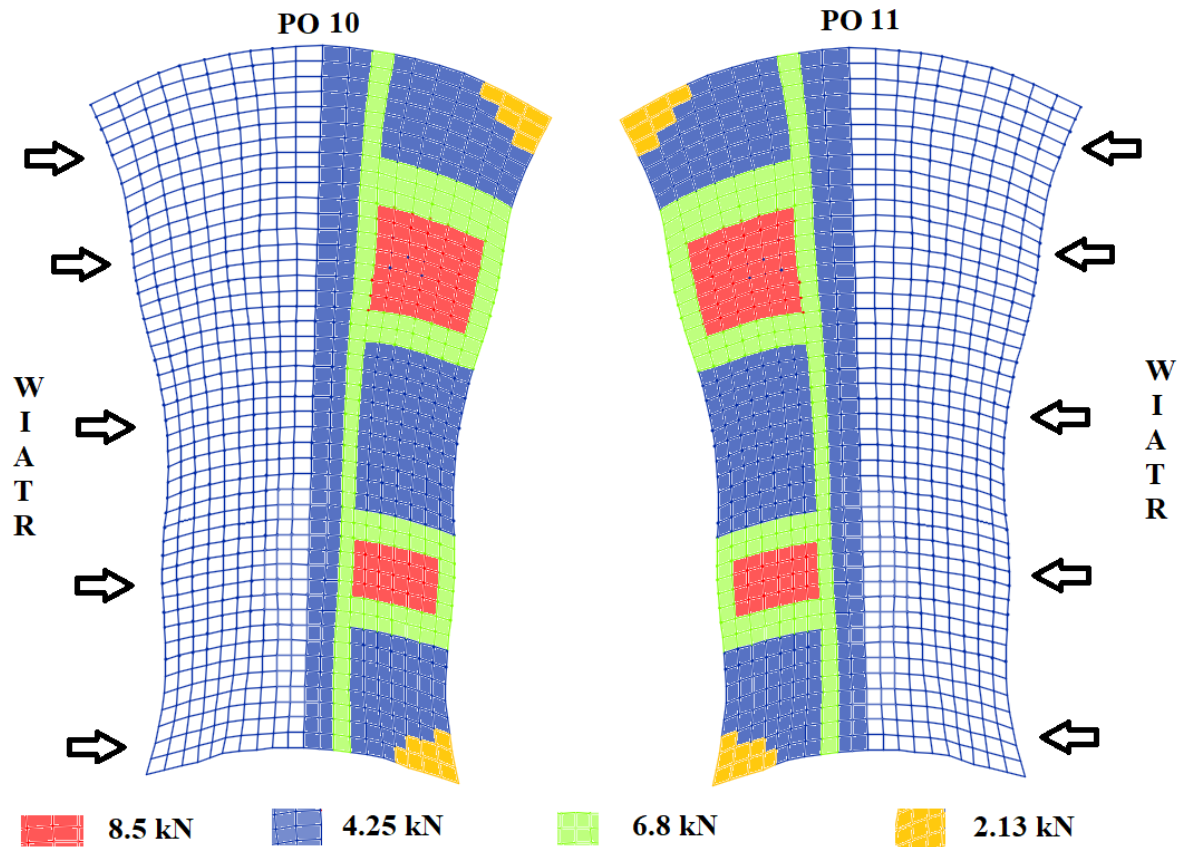
Rys. 30. Współczynnik kształtu dachu dla dachów walcowych

Przyjęte wartości węzłowych obciążeń śniegowych:

- 100 % - 8,5 kN
- 50% - 4,25 kN
- 75% - 6,8 kN
- 25% - 2,13 kN

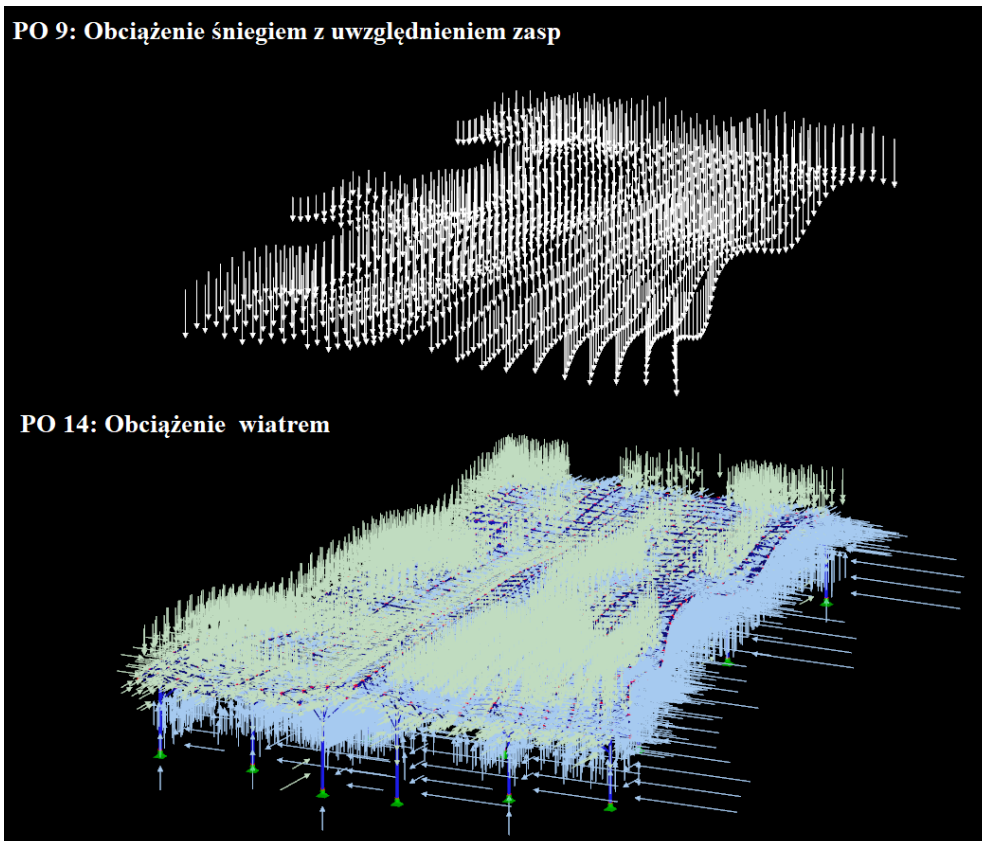
3.2.1.3. Oddziaływania powiązane z kierunkiem wiatru.

Oddziaływania siłami wiatru na konstrukcje zostały przeprowadzone po dogłębnej analizie konstrukcji w tunelu aerodynamicznym Rwind, szereg prób pozwolił wypracować metodykę obciążania konstrukcji zaspami śnieżnymi, a także określić pola na których śnieg nie powinien zalegać. Określając obciążenie śniegiem powiązane z kierunkiem działania wiatru uwzględniono przypadki obciążenia dla dachów dwupołaciowych, walcowych a także część kształtu dla dachów wielopołaciowych. Analiza trójwymiarowa uwzględnia stopnienie i zwianie części śniegu, pokazana na rysunku 31 sytuacja nawiewania z przeciwległej połaci śniegu i obciążania w sposób niekorzystny zagłębień w konstrukcji pozwala na dokładniejszą kontrolę nad procesem projektowania.

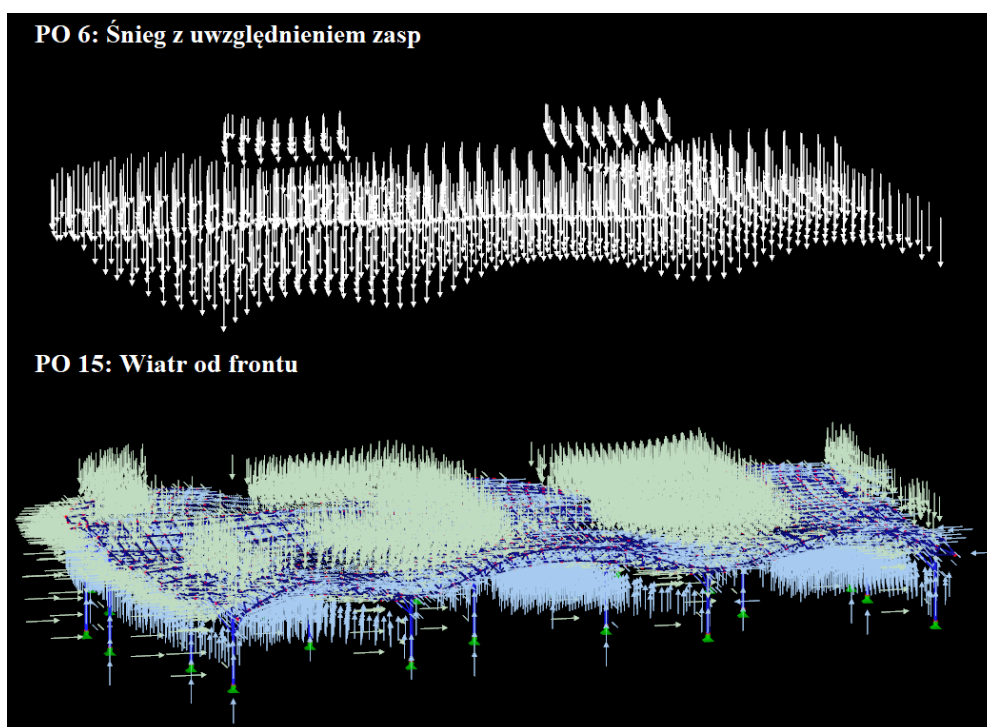


Rys. 31. Przypadki obciążenia śniegiem – lokalizacja obciążeń dla wiatru prostopadłego

Kształt dachu powoduje możliwość odkładania się zasp w zagłębieniach, a dodatkowo niejednakowa geometrycznie kalenica może działać jako przeszkoda utrudniająca swobodny ruch śniegu i ma wpływ na ilość śniegu w części zawietrznej. Na kolejnych rysunkach pokazano możliwość współpracy sił wywołanych wiatrem w stosunku do obciążenia śniegiem. Rysunek 32 przedstawia siły na kierunku poprzecznym, a rysunek 33 na kierunku wzdłużnym. Symulacja obciążeń wiatrowych uwydatniła dodatkowe dociążenie obszarów narażonych na tworzenie się zasp, przyjmuje się, że część śniegu nie zostanie zwiana, a pozostała ulegnie zlodowaceniu, stąd kombinacje obciążeń uwzględniają obciążenie śniegiem w ilości 50% na połaci nawietrznej.



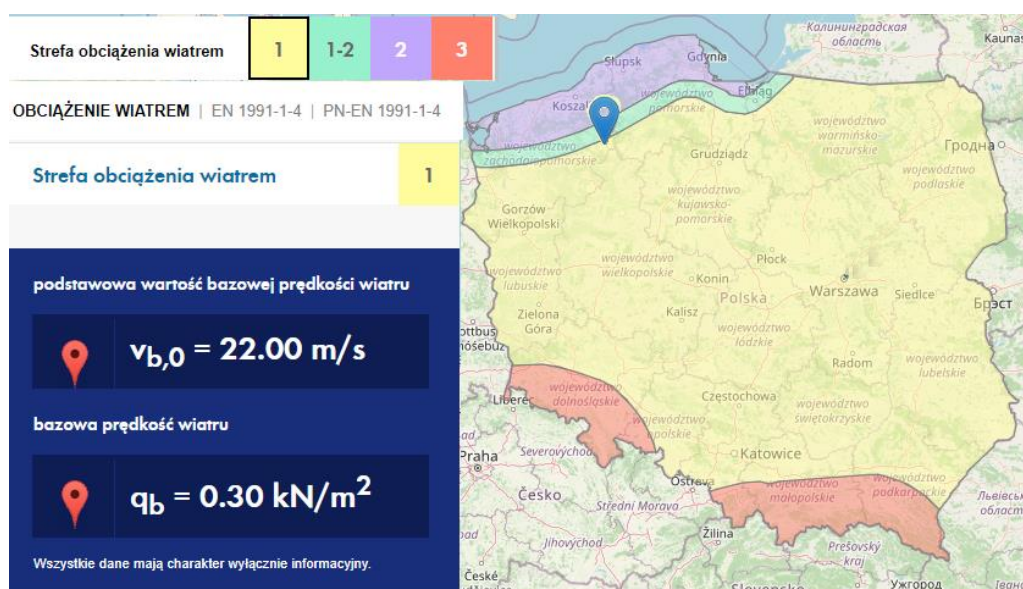
Rys. 32. Interakcja poprzecznych obciążeń wiatrowych z śniegowymi



Rys. 33. Interakcja podłużna obciążeń wiatrowych z śniegowymi (RFEM)

3.2.2. Obciążenie wiatrem

Oddziaływanie na konstrukcję obciążeniem wiatrowym wyznaczono na podstawie normy PN-EN 1991-1-4 Eurokod 1 Oddziaływania na konstrukcję Część 1-4: Oddziaływania ogólne – Oddziaływania wiatru. Wartość charakterystyczną obciążenia śniegiem gruntu (s_k) uwzględniono przy pomocy programu RFEM, Geo-Zone Tool, rysunek 34. Mając na uwadze skomplikowaną bryłę obiektu, której wprost nie przewidują procedury normowe skorzystano z oprogramowania oferującego symulację przepływu wiatru w tunelu aerodynamicznym RWIND. Specyfika obiektu narzuca uwzględnienie czterech charakterystycznych kierunków działania wiatru, dłuższa część poprzecznie do kierunku wiatru, nawiewana szczytowa przednia i tylna część konstrukcji.



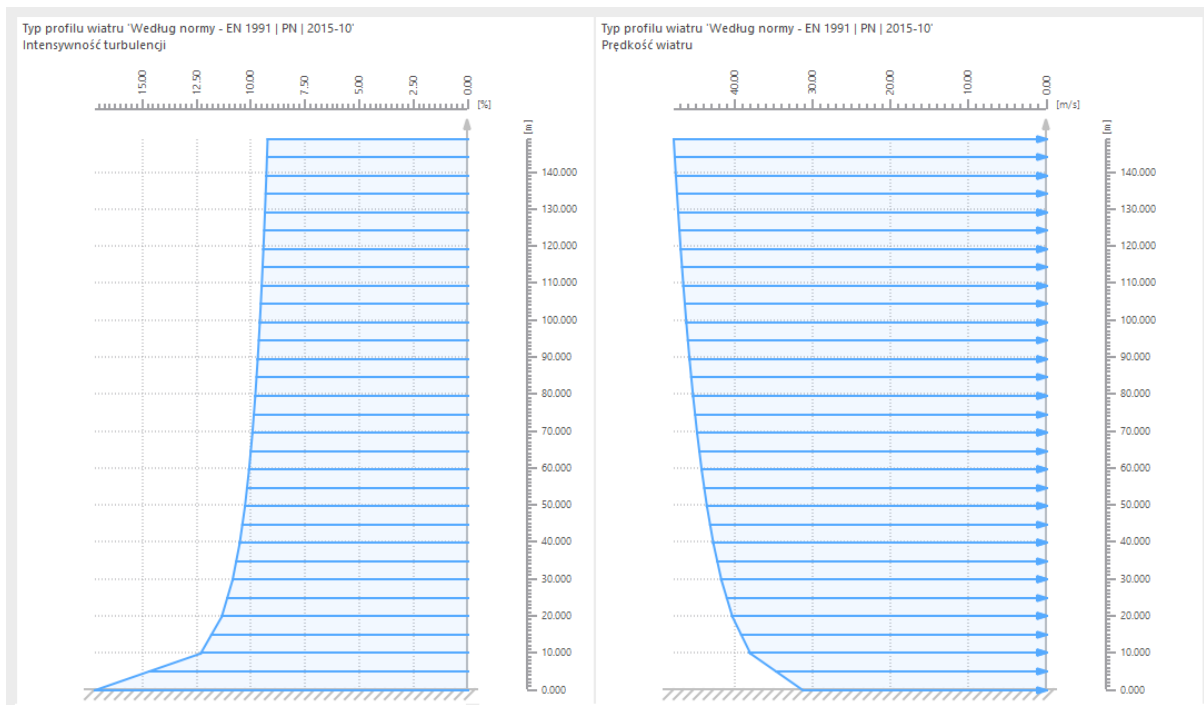
Rys. 34. Strefa obciążenia wiatrem

Przeprowadzenie symulacji przyjęto w tunelu określonym przez program, rozmiar został dostosowany automatycznie.

Przyjęto parametry zgodne strefą 1 przedstawione wraz z profilem wiatru przedstawionym na rysunku 35, prędkość wiatru przedstawiono w tabeli 6.

Tab. 6. Parametry profilu wiatru

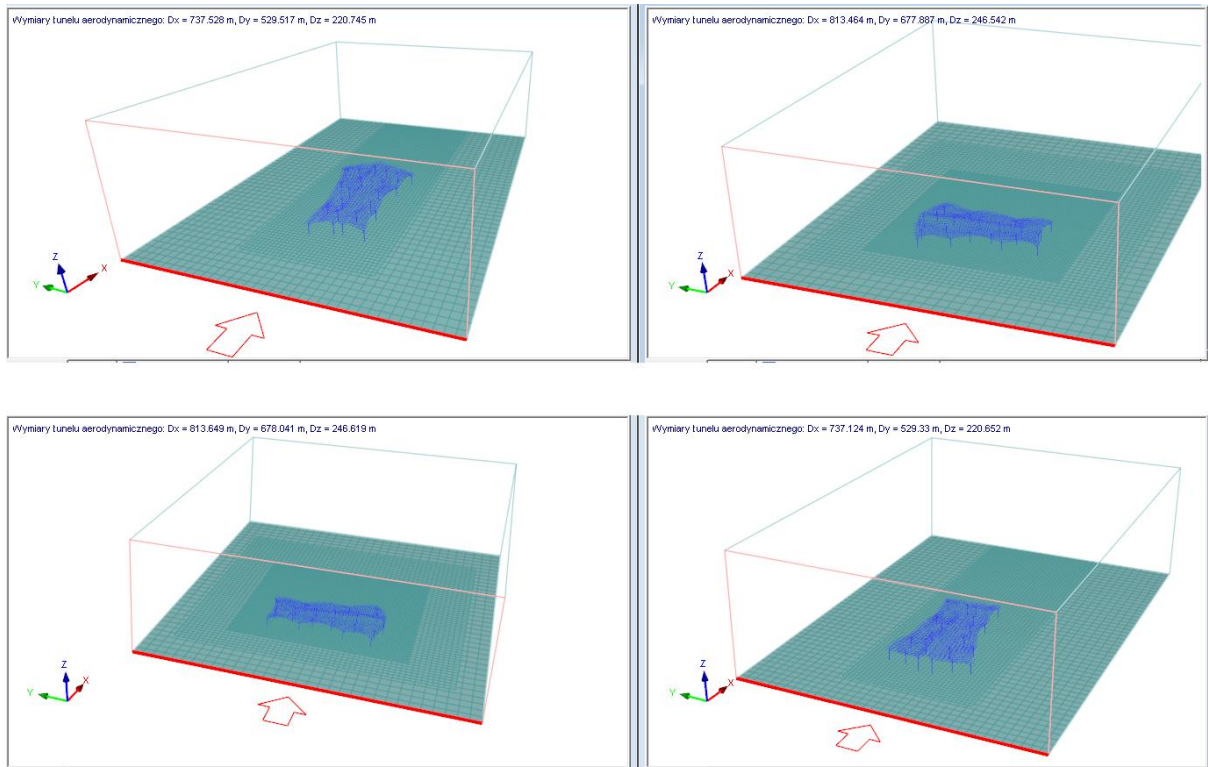
Strefa obciążenia		1,00	
Kategoria terenu		0	
Wysokość n.p.m	A	133	m
Wysokość konstrukcji	h	34,169	m
Gęstość powietrza	p	1,25	kg/m ³
Podstawowa prędkość wiatru	V _{b,0}	22	m/s
Współczynnik kierunkowy	C _{dir}	1.0	
Współczynnik sezonowy	C _{season}	1.0	
Współczynnik chropowatości	C _r	1,75	
Współczynnik ekspozycji	C _e	4,75	
Bazowe ciśnienie prędkości	q _b	0,3	kN/m ²



Rys. 35. Profil wiatru – prędkość wiatru, intensywność turbulencji

3.2.2.1. Parametry tunelu aerodynamicznego

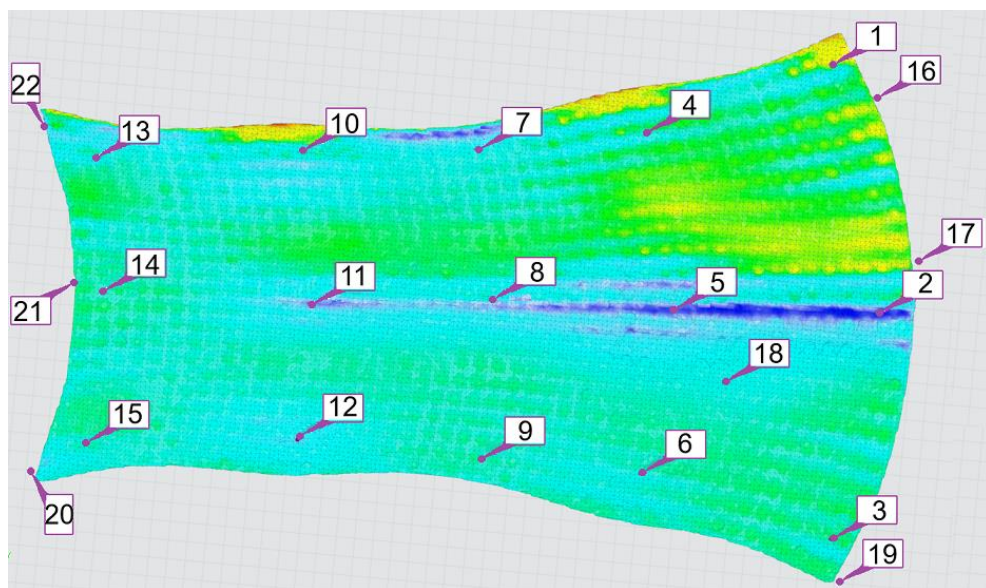
Przeprowadzono analizę obciążeń wiatrowych dla czterech kierunków, każdy przypadek analizowano przy zbliżonej wielkości tunelu, zaobserwowano niewielkie różnice w wielkości.



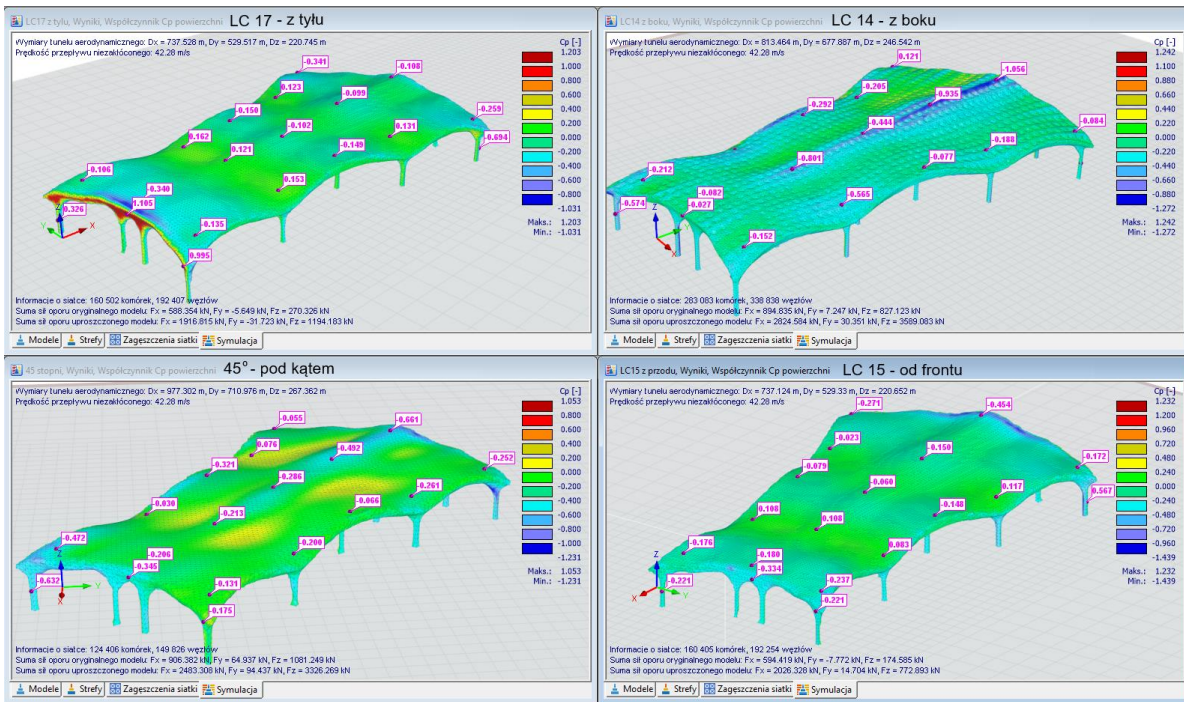
Rys. 36. Wymiary tunelu - w zależności od kierunku wiatru (RWIND)

3.2.2.2. Ciśnienie powierzchniowe

Wyznaczono wartości ciśnienia zewnętrznego wiatru na obudowę konstrukcji, na rysunku 38 przedstawiono wyniki analizy wraz wartościami w punktach charakterystycznych. Punkty charakterystyczne ustalono w wyniesieniach, zagłębieniach i krawędzi natarcia siły wiatrowej. Badano także wpływ wiatru na słupy wewnętrzne (poz. 18), wyniki badań zestawiono w tabeli 7.



Rys. 37. Lokalizacja punktów pomiarowych – do tabeli

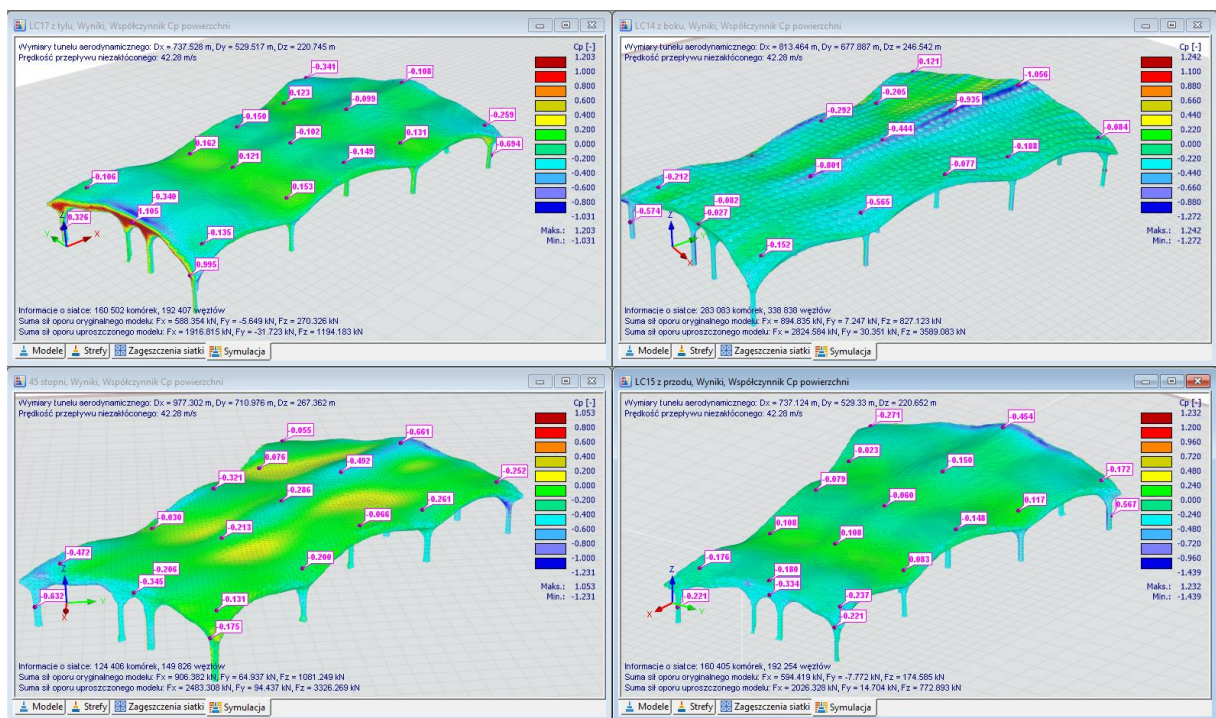


Rys. 38. Mapa ciśnienia powierzchniowego (RWIND)

Tab. 7. Wartość ciśnienia zewnętrznego z współczynnikiem Cp w punktach kontrolnych

	Punkt	LC 14– wiatr z lewej		LC 15– wiatr od frontu		LC 17– wiatr z tyłu		45°– wiatr pod kątem	
		p[Pa]	Cp	p[Pa]	Cp	p[Pa]	Cp	p[Pa]	Cp
POŁAĆ DACHU	1	134.9	0.121	-302.2	-0.271	-380.5	-0.341	-61.0	-0.055
	2	-1179.9	-1.056	-506.9	-0.454	-120.8	-0.108	-738.9	-0.661
	3	-94.3	-0.084	-192.4	-0.172	-289.5	-0.259	-282.0	-0.252
	4	-229.4	-0.205	-26.0	-0.023	146.7	0.131	85.2	0.076
	5	-1044.3	-0.935	-167.8	-0.150	-110.7	-0.099	-549.5	-0.492
	6	-209.9	-0.188	131.2	0.117	137.3	0.123	-291.4	-0.261
	7	-325.7	-0.292	-87.8	-0.079	-167.8	-0.150	-358.9	-0.321
	8	-496.2	-0.444	-67.4	-0.060	-113.7	-0.102	-319.0	-0.286
	9	-85.9	-0.077	-164.9	-0.148	-166.9	-0.149	-73.5	-0.066
	10	-179.8	-0.161	120.8	0.108	170.7	0.153	-33.6	-0.030
	11	-894.9	-0.801	120.4	0.108	134.6	0.121	-238.1	-0.213
	12	-631.0	-0.565	92.3	0.083	181.4	0.162	-223.4	-0.200
	13	-236.9	-0.212	-197.1	-0.176	-118.8	-0.106	-527.3	-0.472
	14	-91.4	-0.082	-201.5	-0.180	-379.4	-0.340	-230.4	-0.206
	15	-169.4	-0.152	-264.7	-0.237	-150.8	-0.135	-145.8	-0.131
FRONT	16	343.5	0.308	941.9	0.843	-570.4	-0.511	1130.8	1.012
	17	-159.9	-0.143	1292.9	1.157	-248.4	-0.222	944.9	0.846
	18	-113.7	-0.102	322.0	0.288	-208.8	-0.187	317.8	0.284
SŁUP	19	-174.2	-0.156	633.4	0.567	-775.3	-0.694	-13.5	-0.012
TYŁ	20	-110.2	-0.099	-247.3	-0.221	1112.0	0.995	-195.0	-0.175
	21	-30.6	-0.027	-373.1	-0.334	1234.0	1.105	-385.7	-0.345
	22	-641.3	-0.574	-247.4	-0.221	364.5	0.326	-705.9	-0.632

Wyznaczono wartość współczynników C_p , rysunek 36, powierzchni który przy pomocy zintegrowanego narzędzia RFEM przeniesiono do analizy statycznej. Złożoność konstrukcji uniemożliwia standardowe podejście, norma oddziaływania wiatrem EN 1991-1-4 nie uwzględnia krzywizn zawartych w niniejszym rozważaniu. Stosownym byłoby użycie zmodyfikowanej części dotyczącej wiat dwuspadowych odnośnie kierunku poprzecznego konstrukcji, w kierunku wzdłużnym należało by zastosować współczynniki redukcyjne dla wiat wielospadowych. Takie uproszczone podejście mogło by zostać obarczone znacznym błędem, wyniki nie były by wystarczająco miarodajne do kontynuowania analizy. Należałoby zwiększyć współczynnik bezpieczeństwa, co powoduje nieekonomiczne podejście.

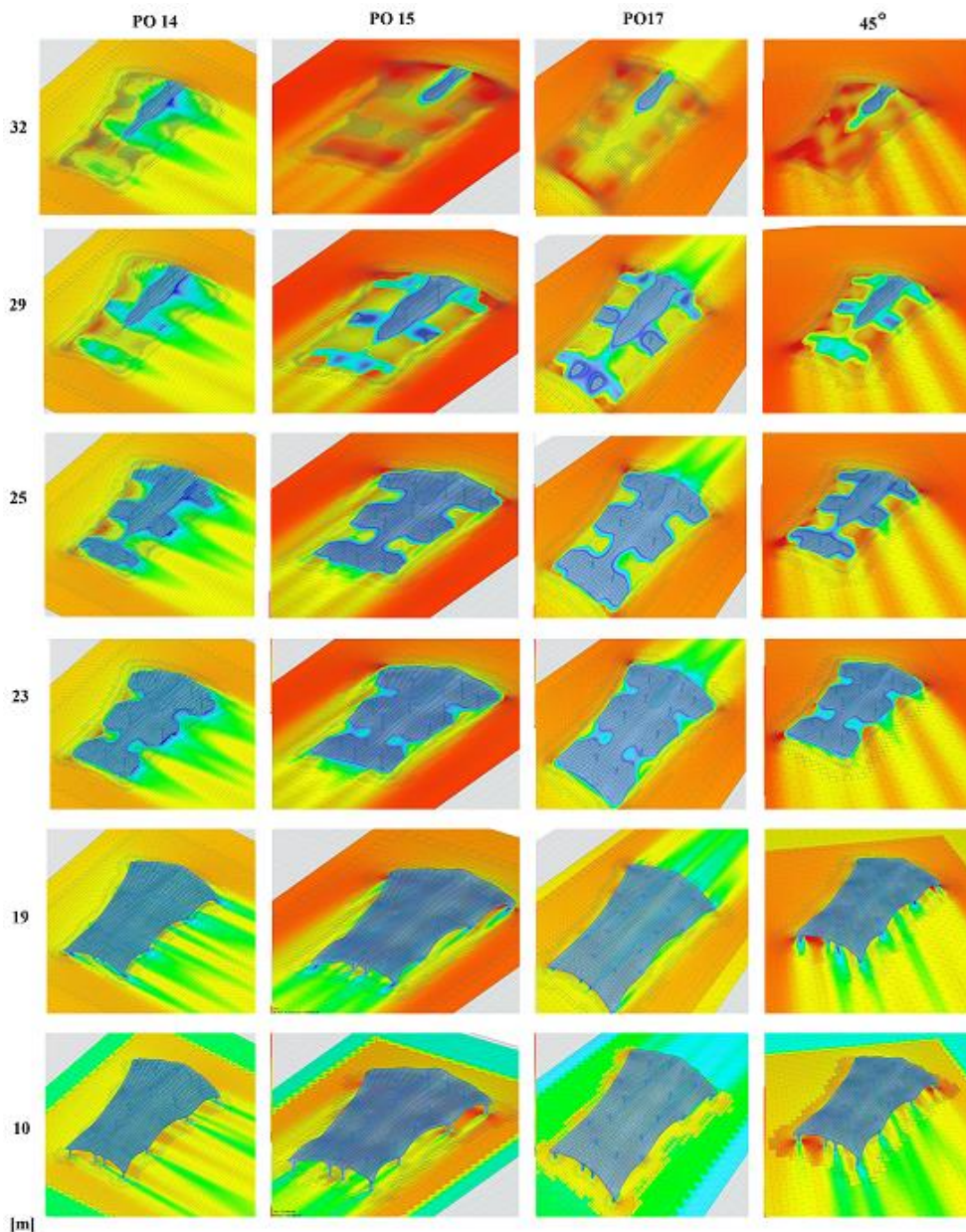


Rys. 39. Współczynnik C_p powierzchni (RWIND)

3.2.2.3. Pole przepływu – przedstawienie graficzne wpływu wiatru na strefy

Analiza komputerowa modelu w tunelu aerodynamicznym pozwala na precyzyjne określenie stref w których mogą pojawiać się dodatkowe wpływy sił zewnętrznych na konstrukcję. Przeprowadzono stopniową analizę przepływu mas powietrza wokół badanej bryły, zaobserwowano zależność kierunku wiatru do możliwości powstawania zasp śnieżnych. Pozwoliło to na doprecyzowanie obciążeń śniegowych, wprowadzono obszary na których mogą pojawiać się znaczne obciążenia. Rysunek 39 pokazuje sposób przeprowadzenia badania, na

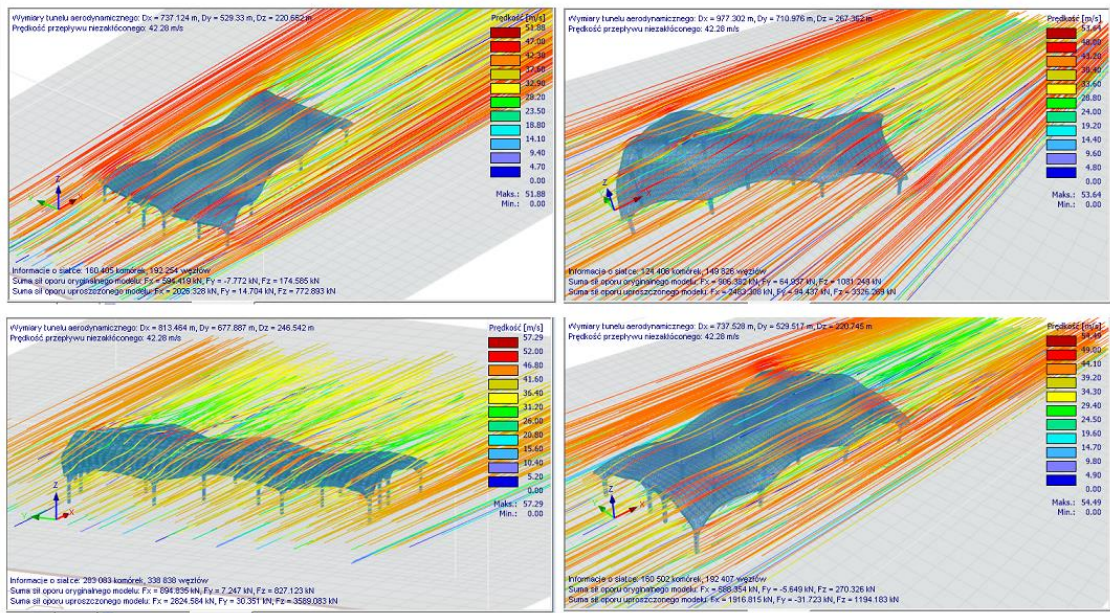
każdym z kierunków analizowano płaszczyznę poziomą przecinającą połac dachu, płaszczyznę określono za pomocą wysokości wyrażonej w metrach od poziomu zero i przedstawiono po lewej stronie rysunku.



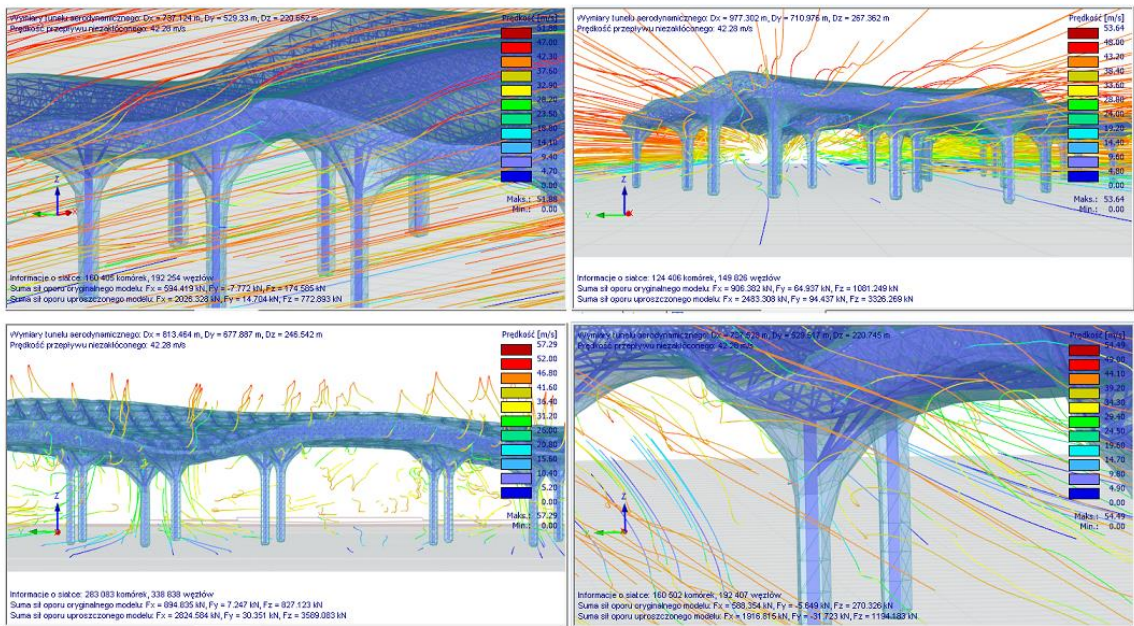
Rys. 40. Pola przepływu (RWIND)

3.2.2.4. Wizualna interpretacja wyników

Przeprowadzenie symulacji komputerowej oddziaływania wiatrem pozwala także na zaobserwowanie przepływu cząstek, elementy wystające, gzymsy itp. powodują dodatkowe zawirowania mogące być przyczyną niepożądanym dźwięków. Konstrukcję zoptymalizowano pod względem oporu powietrza, kształt podparcia i krawędź zewnętrzna została uformowana na podstawie analizy linii prądu, rysunek 38 i 39 przedstawia opływanie konstrukcji wraz z ograniczonymi do minimum turbulencjami.



Rys. 41. Linie prądu – prędkość wiatru wokół i za konstrukcją (RWIND)



Rys. 42. Linie prądu – detale (RWIND)

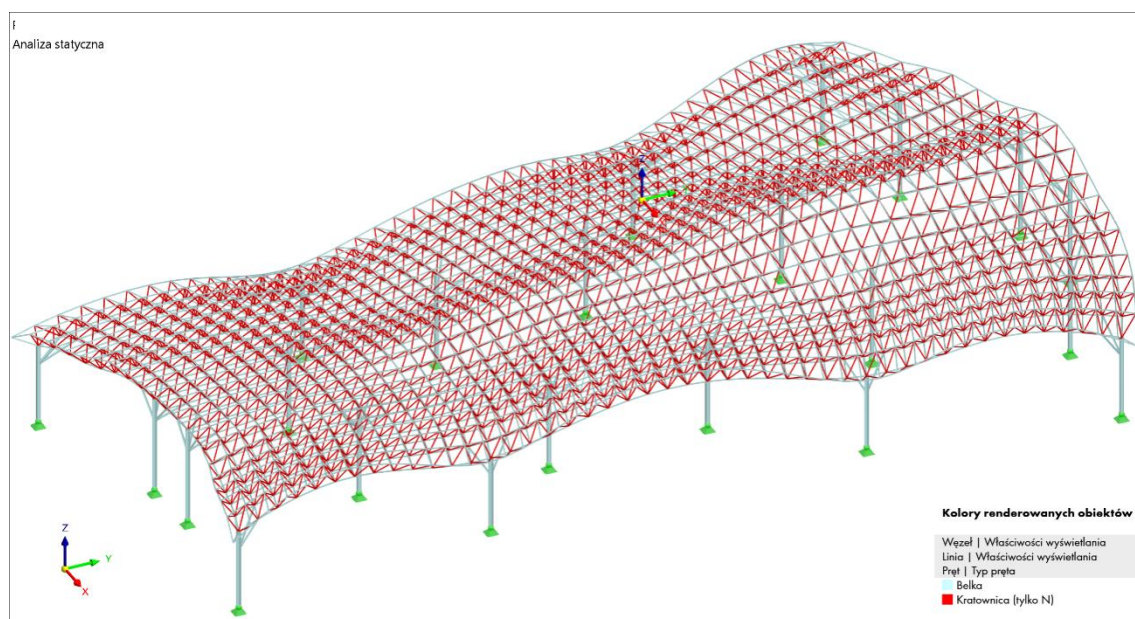
4. WYMIAROWANIE KONSTRUKCJI

4.1. Analiza statyczna

Obliczenia statyczne przeprowadzono na modelu 3D zdefiniowanym w programie RFEM, umożliwiło to obliczenie sił wewnętrznych w każdym elemencie konstrukcji.

Dla połączeń belkowych przyjęto połączenia sztywne, konstrukcja węzła umożliwia takie rozwiązanie, dodatkowo wprowadzono połączenie sztywne „przepona” w górnej siatce, pozwala to na współpracę sąsiednich węzłów połączonych dodatkową konstrukcją wsporczą. W konstrukcji nie zastosowano dodatkowych stężeń. Oparcie na fundamencie słupów przyjęto jako przegubowe.

Model 3d konstrukcji uwzględniający typy prętów przedstawiono na rysunku 40, słupy, pas górny i dolny zamodelowano jako belka, pozostałe elementy pracują jako elementy kratownicowe, przenoszą siły normalne.



Rys. 43. Model 3D konstrukcji w programie RFEM

4.1.1. Kombinacje obciążeń

Na podstawie wartości poszczególnych obciążeń oddziałujących na konstrukcję uzyskano 17 przypadków, zestawionych w tabeli 8. Uwzględniając normę PN-EN 1990:2004 Eurokod: Podstawy projektowania konstrukcji, wygenerowano ręcznie kombinacje zawierające oddziaływanie śniegiem w stosunku do oddziaływań wiatrowych, łącznie przeanalizowano 32 kombinacje obliczeniowe przedstawione w tabeli 10.

Tab. 8. Przypadki obliczeniowe

Przypadek obciążenia	Nazwa	Rysunek	Typ analizy	EN 1990 PN 2010-09
				Kategoria oddziaływania
PO1	Ciężar własny		Analiza statyczna	Stałe
PO2	Pokrycie (blacha, szkło)			Stałe/użytkowe
PO3	Śnieg równomiernie rozłożony	28		Obciążenie śniegiem/lodem H ≤ 1000 m
PO4	Śnieg lewa strona 100%	28		
PO5	Śnieg prawa strona 100%	28		
PO6	Śnieg równomiernie z uwzględnieniem zasp dwustronnie	29		
PO7	Śnieg równomiernie z uwzględnieniem zasp lewa strona	29		
PO9	Śnieg z uwzględnieniem zasp prawa strona	29		
PO10	Śnieg z uwzględnieniem zasp śnieżnych lewa	31		
PO11	Śnieg z uwzględnieniem zasp śnieżnych prawa	31		
PO12	Śnieg lewa 50%	28		
PO13	Śnieg prawa 50%	28		
PO14	SW1: 0.00 deg			Symulacja wiatru
PO15	SW1: 90.00 deg		Wiatr	
PO16	SW1: 180.00 deg		Wiatr	
PO17	SW1: 270.00 deg		Wiatr	

Zastosowano cztery sytuacje obliczeniowe, SO1 do projektowania konstrukcji stalowych, SO2 do analizy naprężeniowo – odkształceniowej i projektowania konstrukcji w stanie granicznym użyteczności, SO3 do analizy naprężeniowo- odkształceniowej w stanie granicznym nośności i SO4 do projektowania połączenia stalowego.

Tab. 9. Sytuacje obliczeniowe

Syt. oblicz.	EN 1990 PN 2010-09
	Typ sytuacji obliczeniowej
SO1	SGN (STR/GEO) - Trwała i przejściowa - Równ. 6.10a i 6.10b
SO2	SGU - Charakterystyczna
SO3	SGN (STR/GEO) - Trwała i przejściowa - Równ. 6.10a i 6.10b
SO4	SGN (STR/GEO) - Trwała i przejściowa - Równ. 6.10a i 6.10b

Analizę statyczną przeprowadzono metodą liniową, a analizę stateczności metodą wartości własnych Lanczos. Wygenerowano 10 przypadków wartości własnych.

Tab. 10. Kombinacje obciążeniowe

Komb. obciążeń	Nazwa kombinacji	Sytuacja obliczeniowa	Oddziaływania stałe				Oddziaływania zmienne					
			Ciężar własny konstrukcji		Pokrycie		Wiodące zmienne		Pierwsze towarzyszące		Drugie towarzyszące	
			Wsp.	Nr	Wsp.	Nr	Wsp.	Nr	Wsp.	Nr	Wsp.	Nr
KO1	śnieg równomiernie	SO1 - SGN	1,35	PO1	1,35	PO2	1,50	PO3	1,00			
KO2	śnieg z lewej	SO1 - SGN	1,35	PO1	1,35	PO2	1,50	PO4	1,00			
KO3	śnieg z prawej	SO1 - SGN	1,35	PO1	1,35	PO2	1,50	PO5	1,00			
KO4	śnieg z prawej 50%	SO1 - SGN	1,35	PO1	1,35	PO2	1,50	PO4	1,50	PO13	1,00	
KO5	śnieg z lewej 50%	SO1 - SGN	1,35	PO1	1,35	PO2	1,50	PO5	1,50	PO12	1,00	
KO6	śnieg po6	SO1 - SGN	1,35	PO1	1,35	PO2	1,50	PO6	1,00			
KO7	śnieg po7	SO1 - SGN	1,35	PO1	1,35	PO2	1,50	PO7	1,00			
KO8	śnieg po9	SO1 - SGN	1,35	PO1	1,35	PO2	1,50	PO9	1,00			
KO9	śnieg po10	SO1 - SGN	1,35	PO1	1,35	PO2	1,50	PO10	1,00			
KO10	śnieg po11	SO1 - SGN	1,35	PO1	1,35	PO2	1,50	PO11	1,00			
KO11	śnieg z prawej wiatr z lewej po14	SO1 - SGN	1,35	PO1	1,35	PO2	1,50	PO5	1,50	PO14	1,00	
KO12	śnieg z lewej 50% wiatr z lewej po14	SO1 - SGN	1,35	PO1	1,35	PO2	1,50	PO5	1,50	PO12	1,50	PO14
KO13	śnieg po9 wiatr z lewej po14	SO1 - SGN	1,35	PO1	1,35	PO2	1,50	PO9	1,50	PO14	1,00	
KO14	śnieg po10 wiatr z lewej po14	SO1 - SGN	1,35	PO1	1,35	PO2	1,50	PO10	1,50	PO14	1,00	
KO15	śnieg rowno wiatr od frontu po15	SO1 - SGN	1,35	PO1	1,35	PO2	1,50	PO3	1,50	PO15	1,00	
KO16	śnieg po6 + wiatr od frontu po15	SO1 - SGN	1,35	PO1	1,35	PO2	1,50	PO6	1,50	PO15	1,00	
KO17	śnieg rowno + wiatr tyl po17	SO1 - SGN	1,35	PO1	1,35	PO2	1,50	PO3	1,50	PO17	1,00	
KO18	śnieg po6 + wiatr tyl po17	SO1 - SGN	1,35	PO1	1,35	PO2	1,50	PO6	1,50	PO17	1,00	
KO19	śnieg po7 + wiatr tyl po17	SO1 - SGN	1,35	PO1	1,35	PO2	1,50	PO7	1,50	PO17	1,00	
KO20	śnieg po9 + wiatr tyl po17	SO1 - SGN	1,35	PO1	1,35	PO2	1,50	PO9	1,50	PO17	1,00	
KO21	PO1 + PO2 + PO9 + PO14	SO2 - SGU	1,00	PO1	1,00	PO2	1,00	PO9	1,00	PO14	1,00	
KO22	naprezenia snieg po9 wiatr z lewej po14	SO3 - SGN	1,35	PO1	1,35	PO2	1,50	PO9	1,50	PO14	1,00	
KO23	śnieg z prawej wiatr z lewej po14	SO4 - SGN	1,35	PO1	1,35	PO2	1,50	PO5	1,50	PO14	1,00	
KO24	śnieg z lewej 50% wiatr z lewej po14	SO4 - SGN	1,35	PO1	1,35	PO2	1,50	PO5	1,50	PO12	1,50	PO14
KO25	śnieg po9 wiatr z lewej po14	SO4 - SGN	1,35	PO1	1,35	PO2	1,50	PO9	1,50	PO14	1,00	
KO26	śnieg po10 wiatr z lewej po14	SO4 - SGN	1,35	PO1	1,35	PO2	1,50	PO10	1,50	PO14	1,00	
KO27	śnieg rowno wiatr od frontu po15	SO4 - SGN	1,35	PO1	1,35	PO2	1,50	PO3	1,50	PO15	1,00	
KO28	śnieg po6 + wiatr od frontu po15	SO4 - SGN	1,35	PO1	1,35	PO2	1,50	PO6	1,50	PO15	1,00	
KO29	śnieg rowno + wiatr tyl po17	SO4 - SGN	1,35	PO1	1,35	PO2	1,50	PO3	1,50	PO17	1,00	
KO30	śnieg po6 + wiatr tyl po17	SO4 - SGN	1,35	PO1	1,35	PO2	1,50	PO6	1,50	PO17	1,00	
KO31	śnieg po7 + wiatr tyl po17	SO4 - SGN	1,35	PO1	1,35	PO2	1,50	PO7	1,50	PO17	1,00	
KO32	śnieg po9 + wiatr tyl po17	SO4 - SGN	1,35	PO1	1,35	PO2	1,50	PO9	1,50	PO17	1,00	

4.1.2. Wyniki analizy stanu granicznego użyteczności

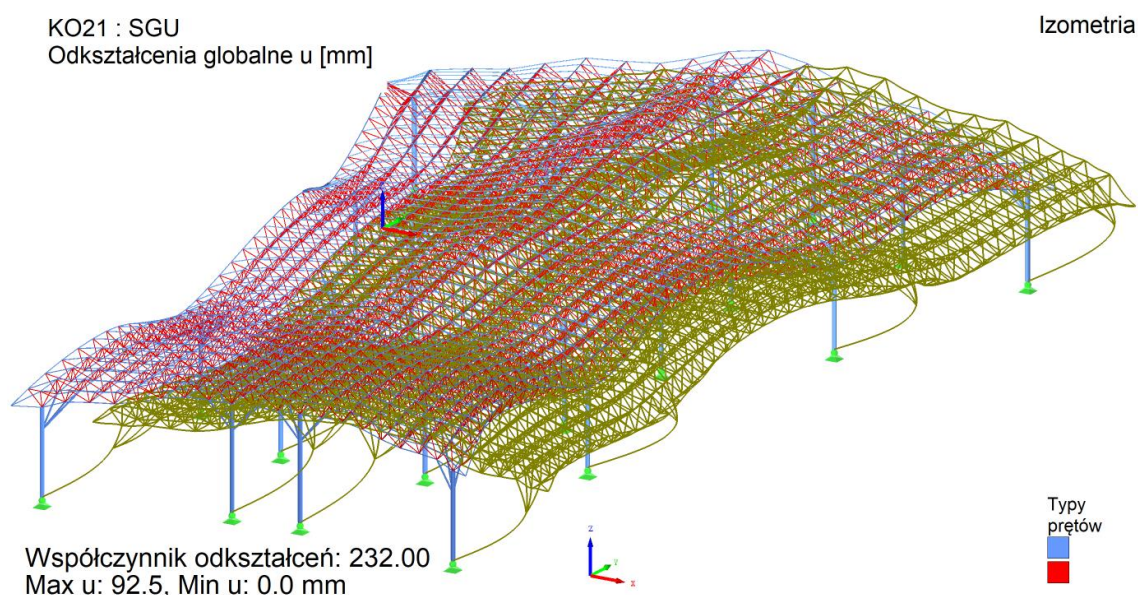
Ugięcia przekrycia strukturalnego pod całkowitym obciążeniem maksymalnym w środkowej jego części w przypadku konstrukcji dachowej nie powinny przekraczać $l/200$ rozpiętości krótszego boku...

Ugięcia przekrycia strukturalnego pod całkowitym obciążeniem maksymalnym między słupami podporowymi w przypadku dachów nie powinny przekraczać $l/300$ rozpiętości krótszego boku ...

Źródło: Bródka J. Przekrycia strukturalne, Arkady Warszawa, 1985 [1]

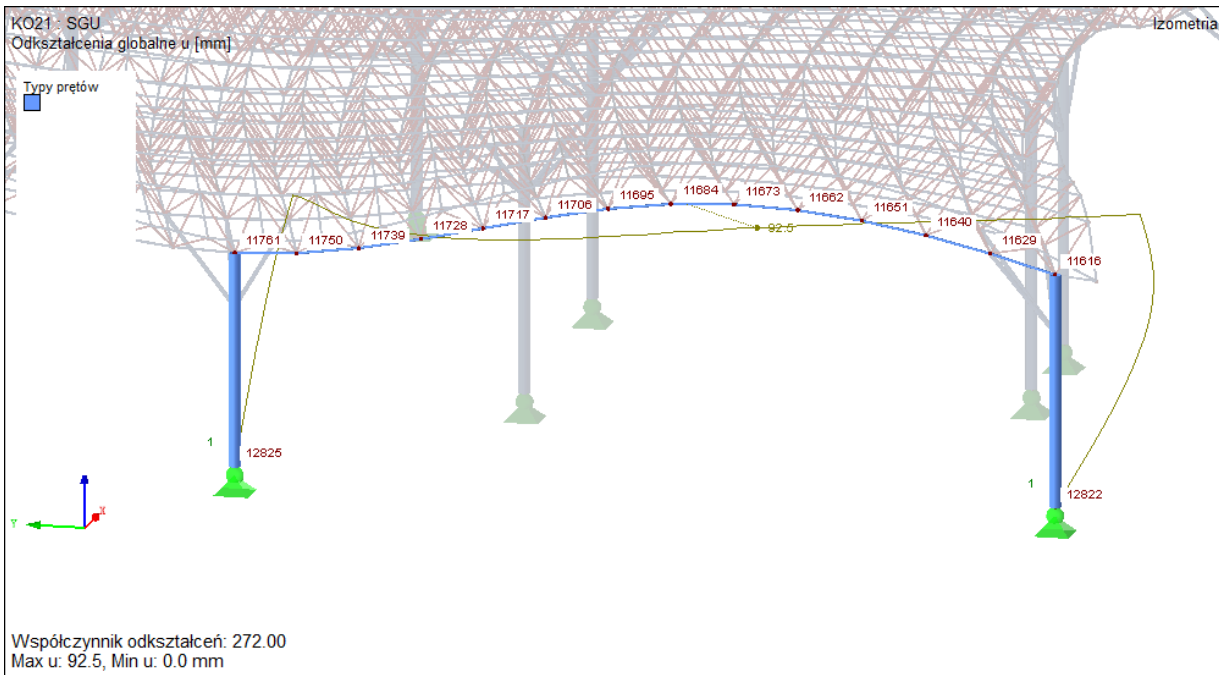
Analizę stanu granicznego użyteczności przeprowadzono po ustaleniu najmniej korzystnej kombinacji SGN, dla kombinacja SGU wg. Załącznika A1 normy EN 1990:2002 przyjmuje się współczynniki częściowe dla oddziaływań równe 1.

Na rysunku 44 przedstawiono stan konstrukcji odkształconej wg. Kombinacji obliczeniowej KO21, maksymalne odkształcenie wynosi 92.5 mm.

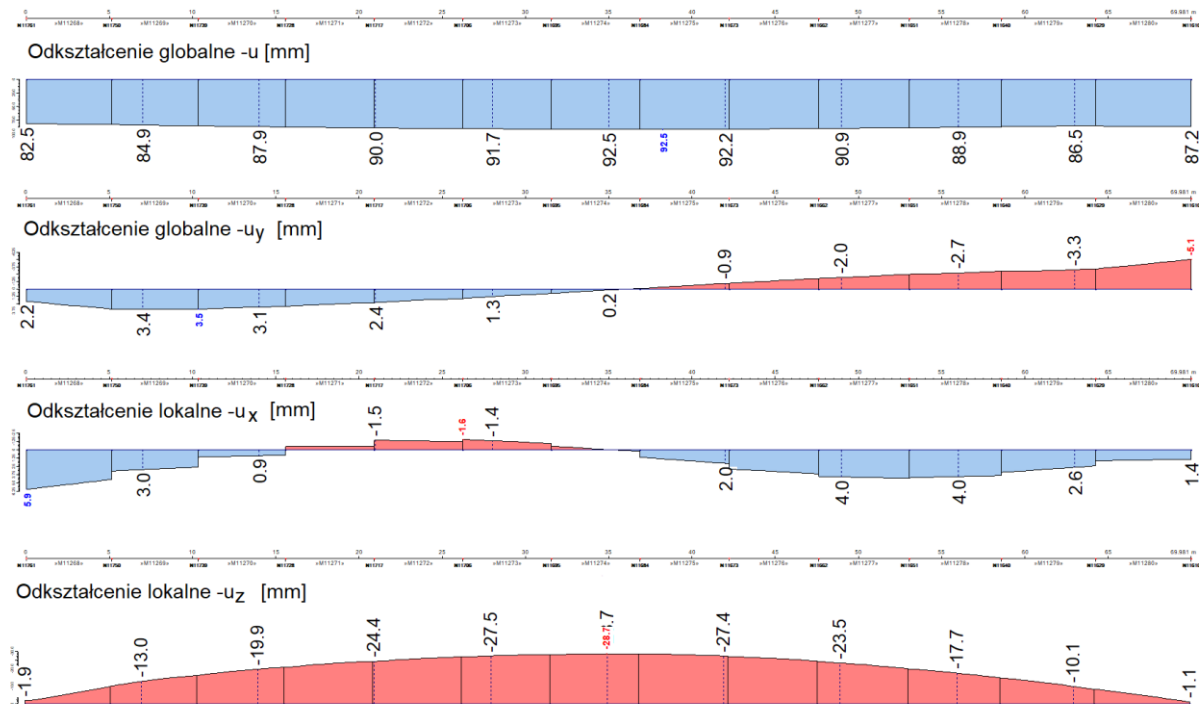


Rys. 44. Odształcenia globalne KO21

Obliczono dopuszczalne ugięcie konstrukcji wg. Założeń prof. J. Bródki [1], po przeanalizowaniu pełnego odcinka pasa dolnego między słupami. Analizę przeprowadzono na wykresach odkształceń lokalnych i globalnych (rysunek 46), lokalizację badanego elementu wydzielonego z siatki dolnej, przedstawiono na rysunku 45.



Rys. 45. Pas dolny – SGU



Rys. 46. Odształcenia SGU pasa dolnego

Ugięcie pasa dolnego między podporami

$$\max = 2,85 \text{ cm} < \frac{6998}{300} = 23,33 \text{ cm}$$

Odształcenie całej konstrukcji

$$\max = 9,25 \text{ cm} < \frac{6998}{200} = 34,99 \text{ cm}$$

Założenie projektowe zostało spełnione

Ze względu na zastosowanie dodatkowych elementów przekrycia, elementów szklanych, badana konstrukcja powinna spełniać dodatkowe wymogi odnośnie przemieszczeń. Stan graniczny użyteczności wymaga zwiększonych przekrojów co ogranicza przemieszczenia węzłów punktów mocowania wsporników. Współpraca pasów górnych i dolnych ze skratowaniem przyczynia się do ograniczenia deformacji wywołanych obciążeniami zewnętrznymi, wykazano, że odpowiednie krzywoliniowe ukształtowanie zbiorów prętów wpływa korzystnie na sztywność konstrukcji. Konstrukcje oparte na łukach posiadają duże walory architektoniczne oraz korzystne właściwości wytrzymałościowe.

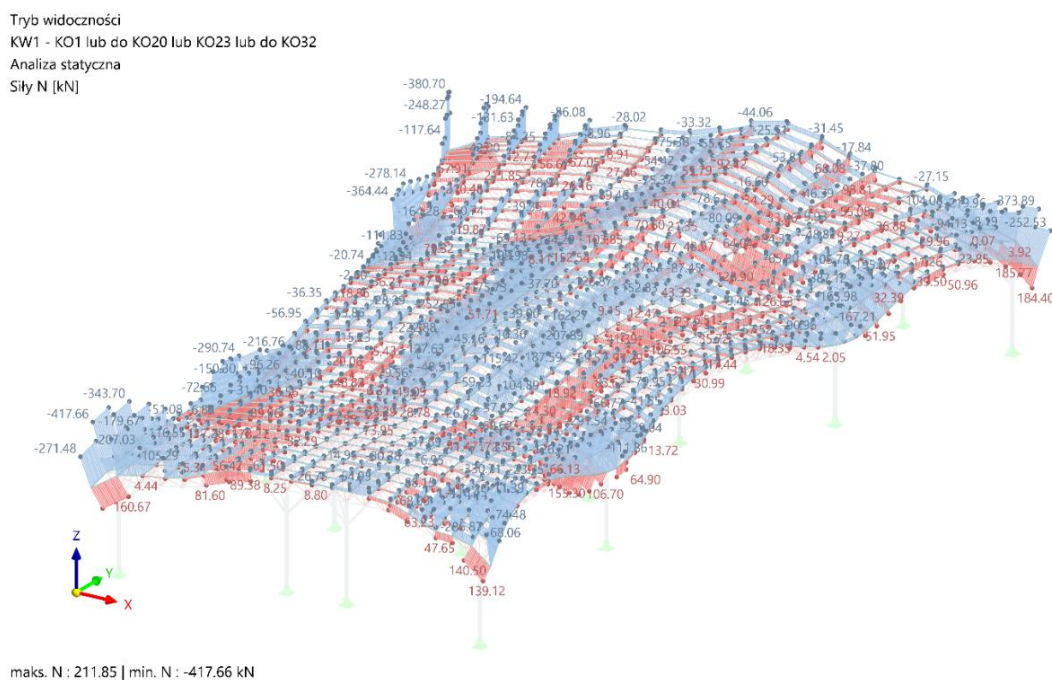
Na podstawie śledzenia wartości przemieszczeń przeprowadzono wstępną analizę sztywności, zmieniano przekroje iteracyjnie aż do osiągnięcia względnej równowagi przemieszczeń w każdym elemencie. Wypracowano konstrukcję charakteryzującą się małymi odkształceniami lokalnymi.

4.1.3. Stan graniczny nośności

Wyniki analizy statycznej ze względu na ilość węzłów i prętów przedstawiono w zestawieniu tabelarycznym, a także na wykresach. Dane dotyczące prętów zgrupowano w odniesieniu do funkcji pełnionej w konstrukcji.

4.1.3.1. Wyniki dla siatki górnej

Rysunek 47 przedstawia obwiednię siły ściskającej i rozciągającej elementy siatki górnej z kombinacji oddziaływań wszystkich wyników.



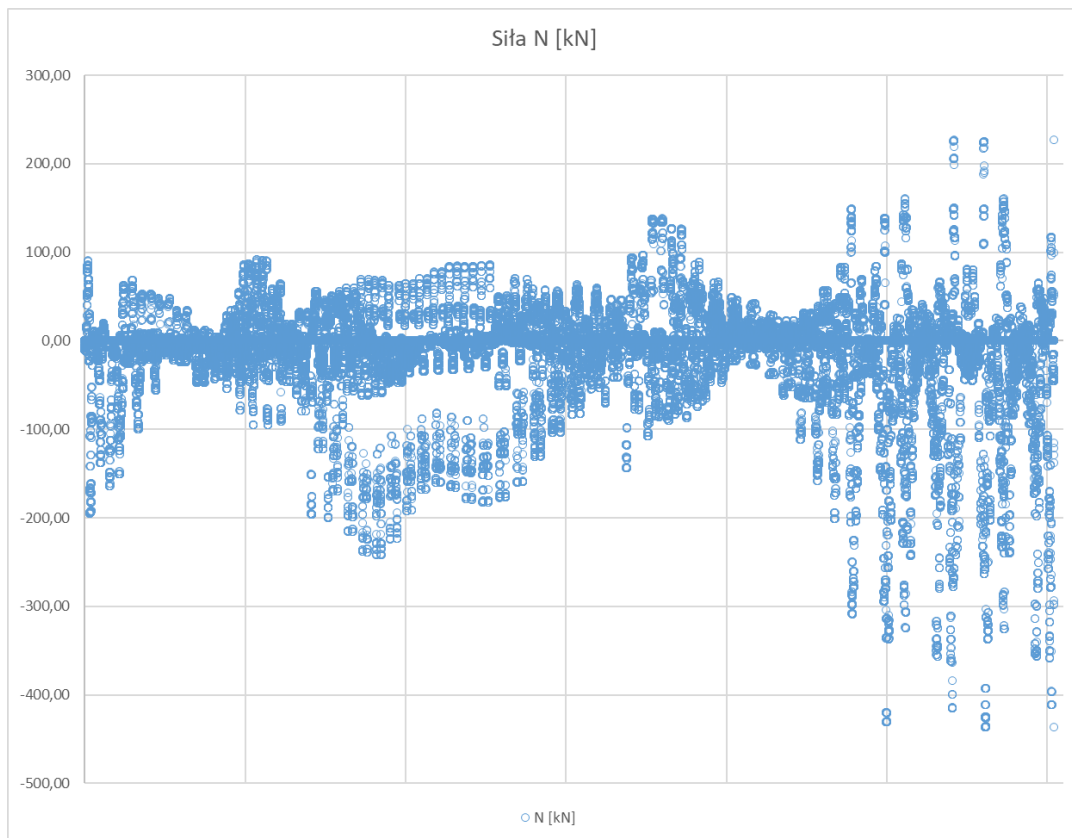
Rys. 47. Ściskanie i rozciąganie – siatka górna

Koncentracja największych sił w pasie siatki górnej, występuje w obszarach obniżenia, nawisów po obwodzie konstrukcji, tabela 11 przedstawia ekstremalne wartości z wybranych prętów. Z uwagi na określenie prętów pasa górnego jako elementu belkowego występują nieznaczące siły tnące, a także momenty. Siły normalne przedstawione na rysunku 48 w większości zawierają się w przedziale -250 kN do 150 kN, około 10 % wyników znajduje się w zakresie -440 kN do -250 kN i od 150 kN do 230 kN.

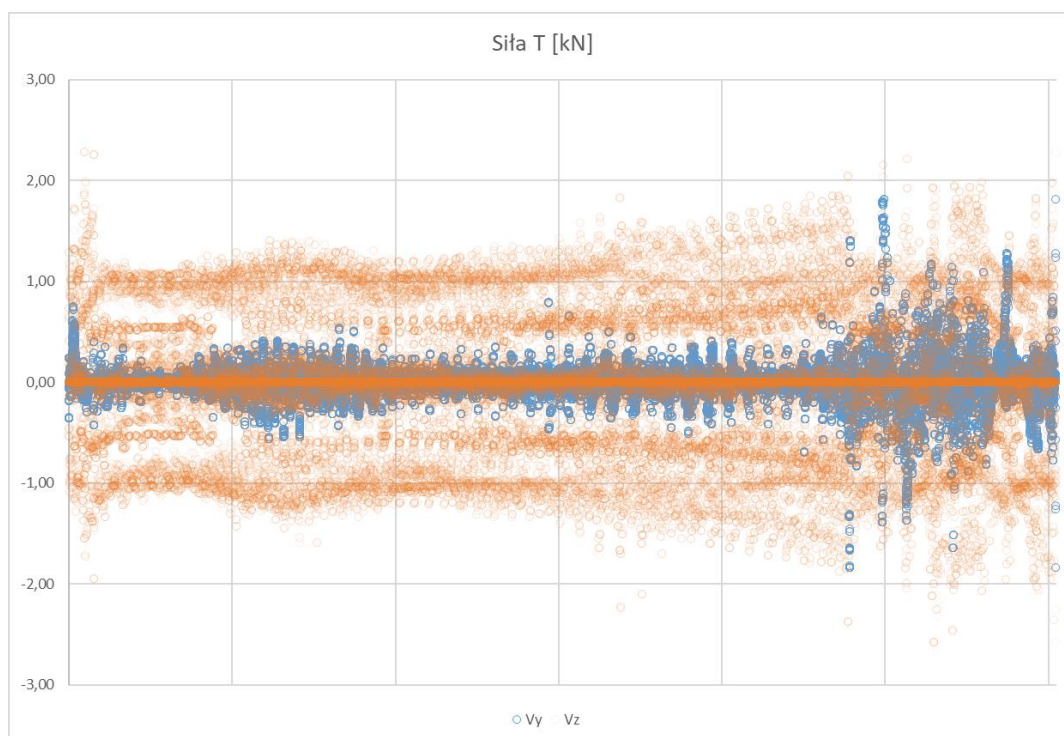
Siły tnące i momenty zawierają się w wąskim zakresie, uwzględnienie ich w wymiarowaniu nie ma dużego znaczenia. Wyniki tych sił przedstawiono na kolejnych rysunkach 49 i 50.

Tab. 11. Zestawienie maksymalnych sił w siatce górnej

Przekrój nr 9: RO 193.7x6.3 ; EN 10210-2:2006										
Pręt nr	Węzeł nr	Położenie x [m]		Siły [kN]			Momenty [kNm]			Odpowiednie przypadki obciążeń
				N	V _y	V _z	M _T	M _y	M _z	
10344	12114	9,680	MAX N	226,13	-0,57	-0,85	0,05	-1,40	1,40	KO 16
10588	11402	0,000	MIN N	-436,81	0,41	1,21	0,00	-2,38	0,71	KO 18
9804	11618	7,141	MAX V _y	99,27	1,81	-1,17	-0,32	-0,10	-2,86	KO 13
9575		1,507	MIN V _y	-298,28	-1,84	1,18	-0,47	-0,10	-0,10	KO 18
411	579	0,000	MAX V _z	-138,59	0,00	2,28	0,09	-4,03	0,01	KO 16
10177	8054	7,158	MIN V _z	-129,42	-0,26	-2,58	-0,13	-3,15	0,70	KO 12
9803		2,782	MAX M _T	-294,10	-1,23	0,06	0,48	1,15	2,28	KO 19
9575		3,245	MIN M _T	-298,10	1,23	-0,12	-0,47	1,21	2,32	KO 20
10177		2,863	MAX M _y	-121,46	-0,15	0,03	-0,11	2,31	-0,32	KO 11
10201	8530	7,553	MIN M _y	-115,62	0,51	-2,26	0,13	-4,03	-2,21	KO 19
10721	12447	0,000	MAX M _z	50,44	1,27	0,95	0,23	-0,53	3,60	KO 16
9949	11740	0,000	MIN M _z	53,78	-1,26	0,94	-0,22	-0,56	-3,56	KO 16

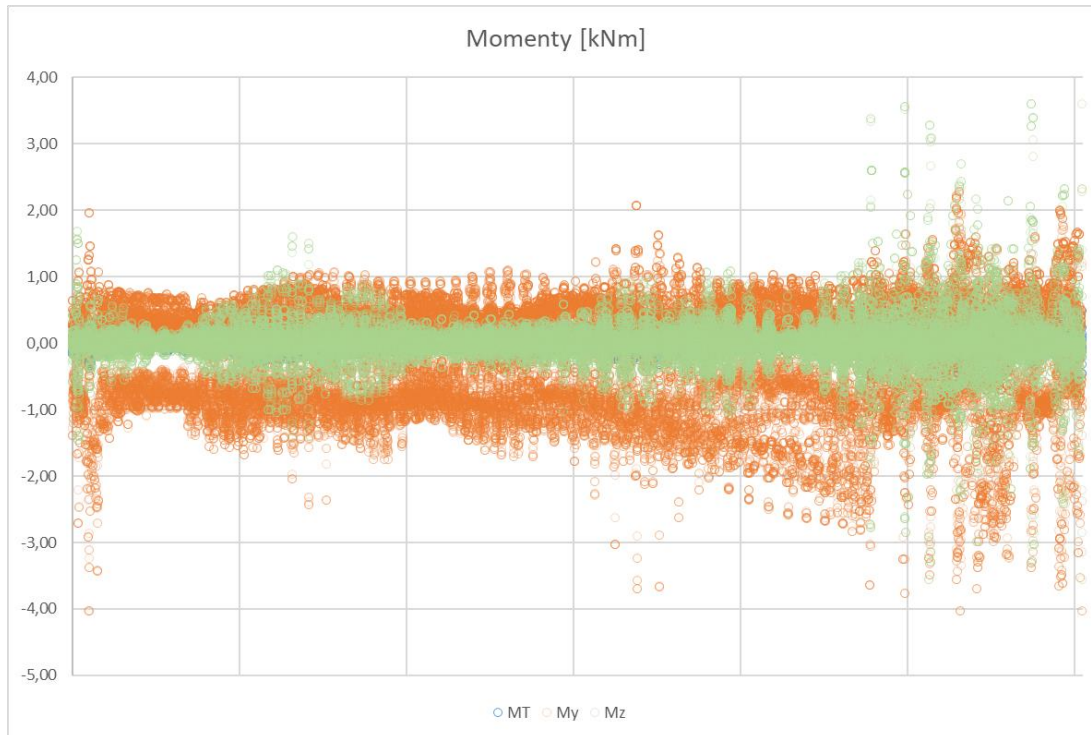


Rys. 48. Wykres koncentracji wyników – siły normalne



Rys. 49. Wykres koncentracji wyników – siły tnące

Zgodnie z założeniami konstrukcji łukowych można zauważyć małe, a w dużej części zerowe wartości momentów zginających. Odpowiednio wymodelowana geometria siatki prętów górnych spowodowała występowanie ważnych przy wymiarowaniu sił ściskających.

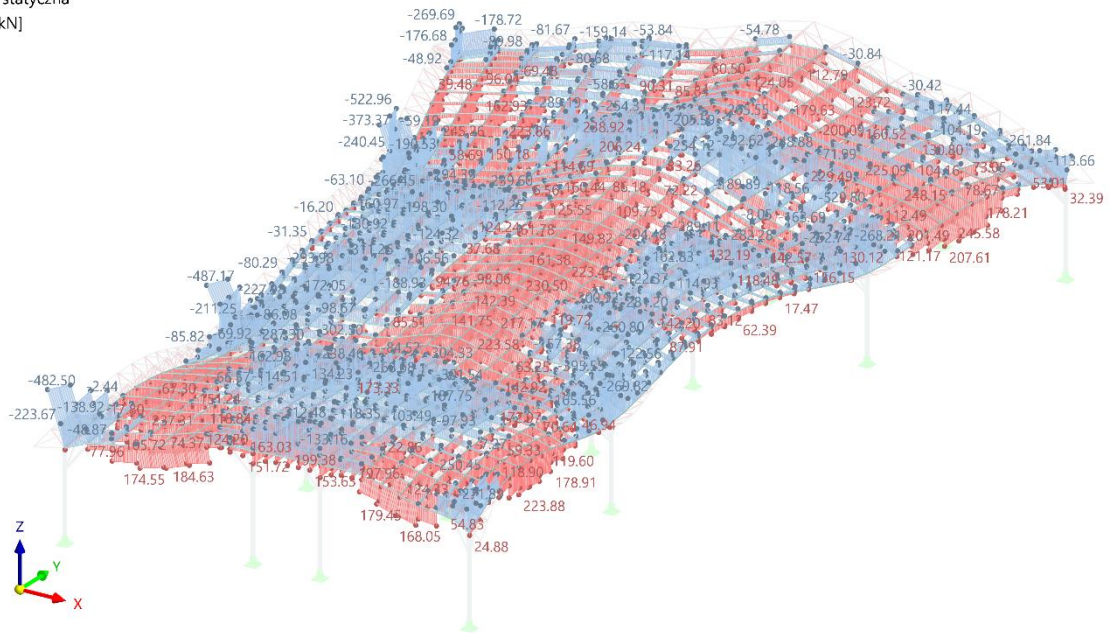


Rys. 50. Wykres koncentracji wyników – momenty

4.1.3.2. Wyniki dla siatki dolnej

W pasie dolnym występują zdecydowanie większe siły normalne, a rozkład tych sił przedstawiony na rysunku 52, jest bardziej zrównoważony, większość wyników zawiera się w przedziale -300 kN do 260 kN, nieznaczna ilość prętów zlokalizowana przy słupach jest ściskana większą siłą. Zgodnie z rysunkiem 51 w pasie dolnym wyraźnie odznacza się granica pomiędzy prętami ściskanymi, a rozciąganymi. W przypadku rozkładu sił tnących, na rysunku 53 można zauważyć wyraźne rozwarstwienie wyników pomiędzy wartościami dodatnimi i ujemnymi, a także zbliżonymi do zerowych, spowodowane jest to równomiernym obciążeniem pasa dolnego związaną z redystrybucją sił z prętów kratowych. Także momenty oddziałujące na pas dolny przedstawiają duże skupienie (rysunek 54), minimalne wartości wynikają z przeprowadzenia analizy pasa jako element belkowy.

Tryb widoczności
 KW1 - KO1 lub do KO20 lub KO23 lub do KO32
 Analiza statyczna
 Siły N [kN]

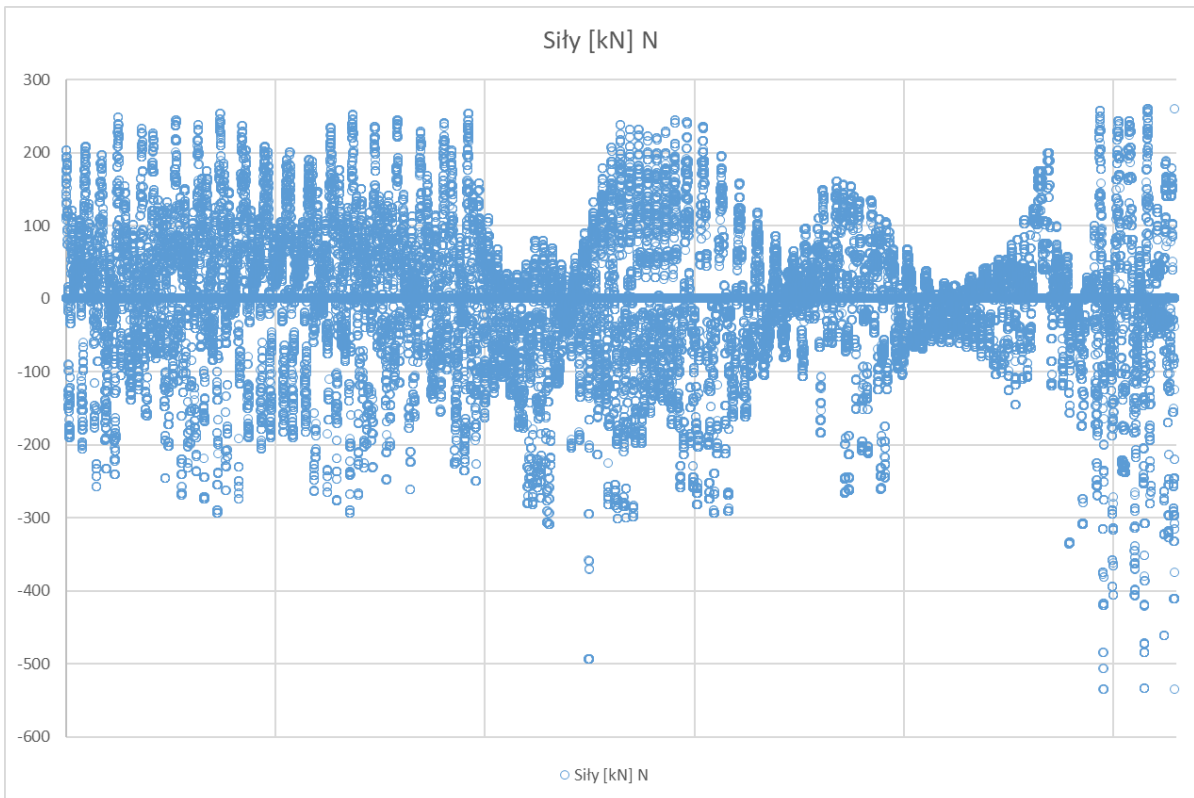


maks. N : 248.15 | min. N : -529.80 kN

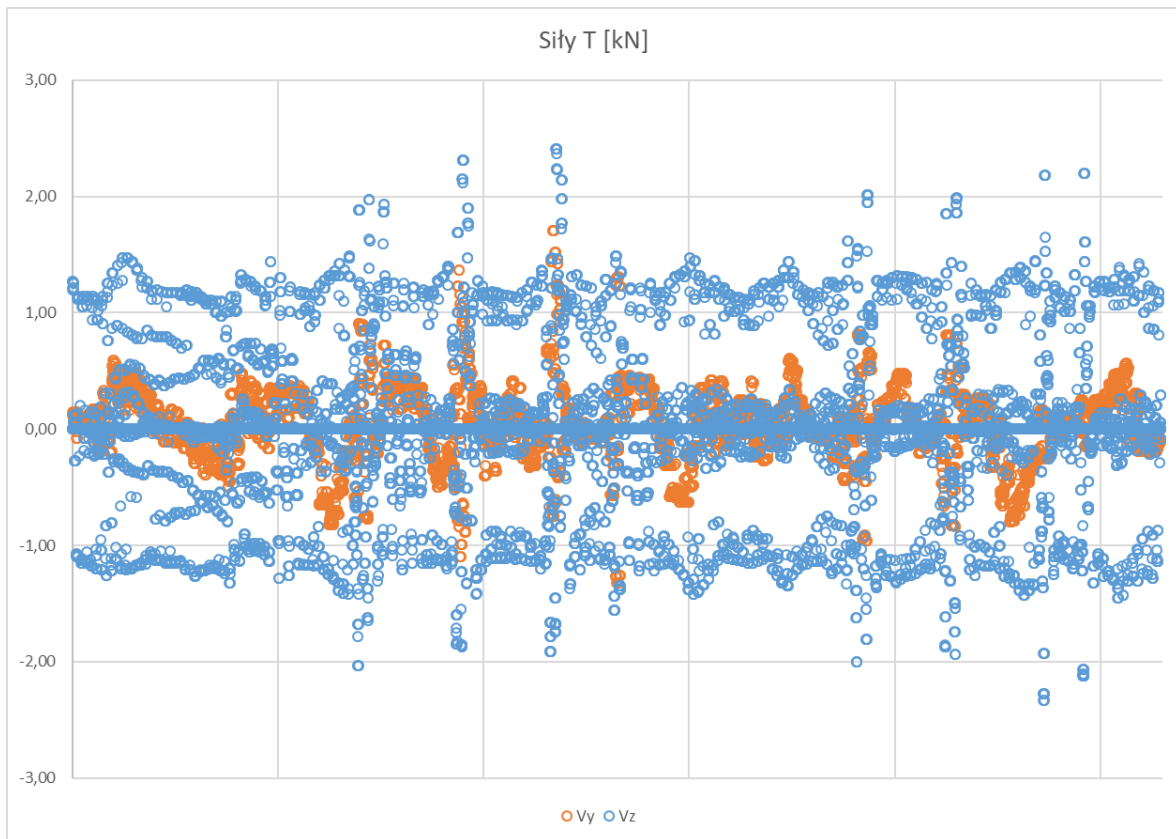
Rys. 51. Ściskanie i rozciąganie – siatka dolna

Tab. 12. Zestawienie maksymalnych sił w elementach siatki dolnej

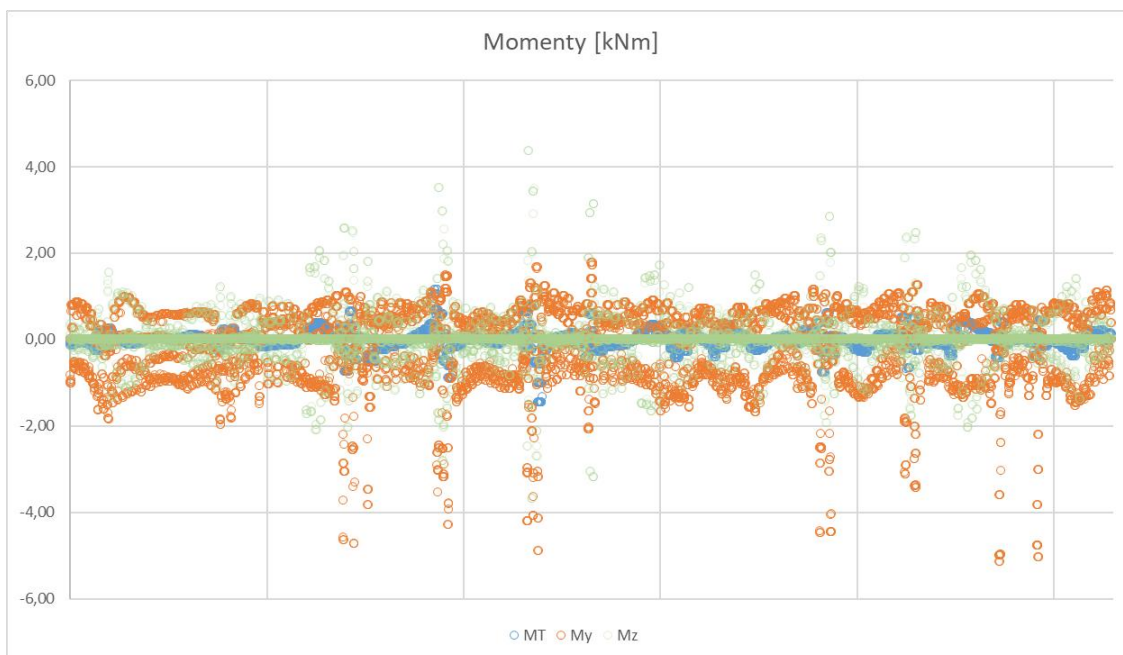
Przekrój nr 10: RO 219.1x6.3 ; EN 10210-2:2006										
Pręt nr	Węzeł nr	Położenie x [m]		Siły [kN]			Momenty [kNm]			Odpowiednie przypadki obciążeń
				N	V _y	V _z	M _T	M _y	M _z	
11320	12756	4,766	MAX N	259,81	-0,19	-1,18	-0,09	-0,47	0,15	KO 13
11249	11970	0,000	MIN N	-535,51	0,08	2,10	1,19	-5,29	0,99	KO 16
1418		1,975	MAX V _y	-124,94	2,06	0,97	0,53	1,54	-0,34	KO 13
11193		6,836	MIN V _y	-38,89	-1,77	-0,92	0,17	-0,39	0,32	KO 15
11313		0,972	MAX V _z	-308,38	-1,26	3,02	2,32	-6,81	-2,92	KO 16
11248		3,888	MIN V _z	-374,84	0,47	-3,37	-1,29	-5,65	-0,73	KO 19
11313	12690	4,860	MAX M _T	-308,32	-1,46	1,68	2,32	3,16	2,92	KO 16
11248	11981	0,000	MIN M _T	-316,20	1,61	-1,41	-2,35	2,78	3,19	KO 16
10728	12470	0,000	MAX M _y	-84,27	0,57	-1,56	0,15	5,65	1,39	KO 13
11248	11970	4,860	MIN M _y	-316,28	0,98	-3,07	-2,34	-9,74	-4,03	KO 16
149	8293	0,000	MAX M _z	-220,18	1,44	1,21	0,76	-0,92	4,36	KO 16
1357	578	0,000	MIN M _z	-220,03	-1,43	1,44	-0,76	-0,94	-4,17	KO 16



Rys. 52. Wykres koncentracji wyników – siły normalne



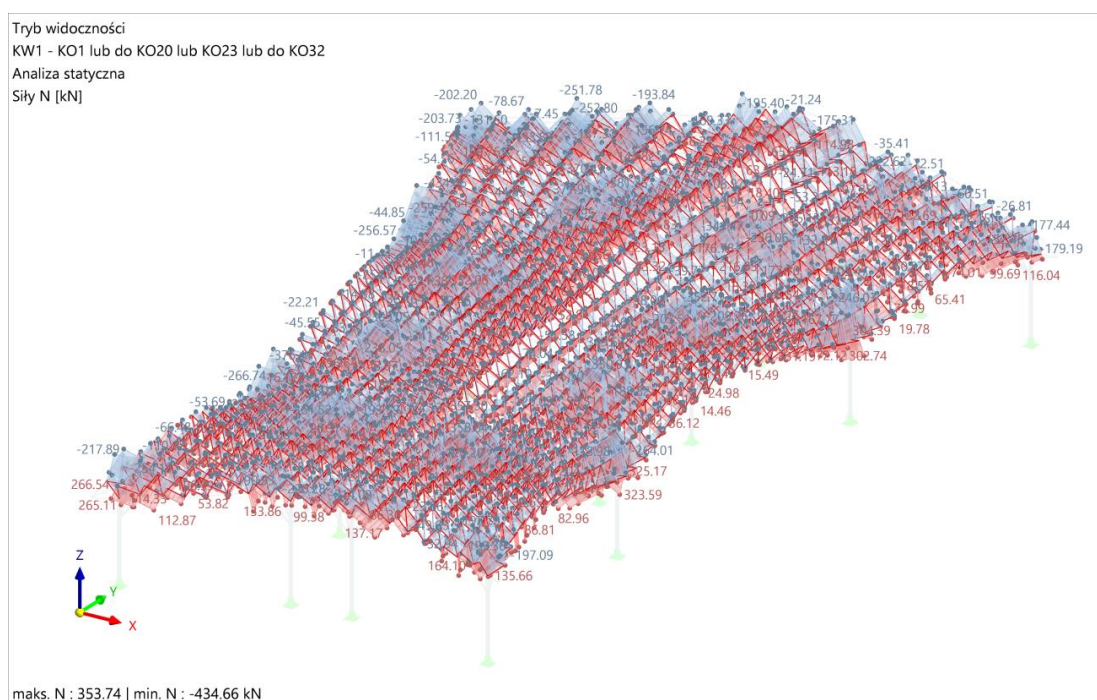
Rys. 53. Wykres koncentracji wyników – siły tnące



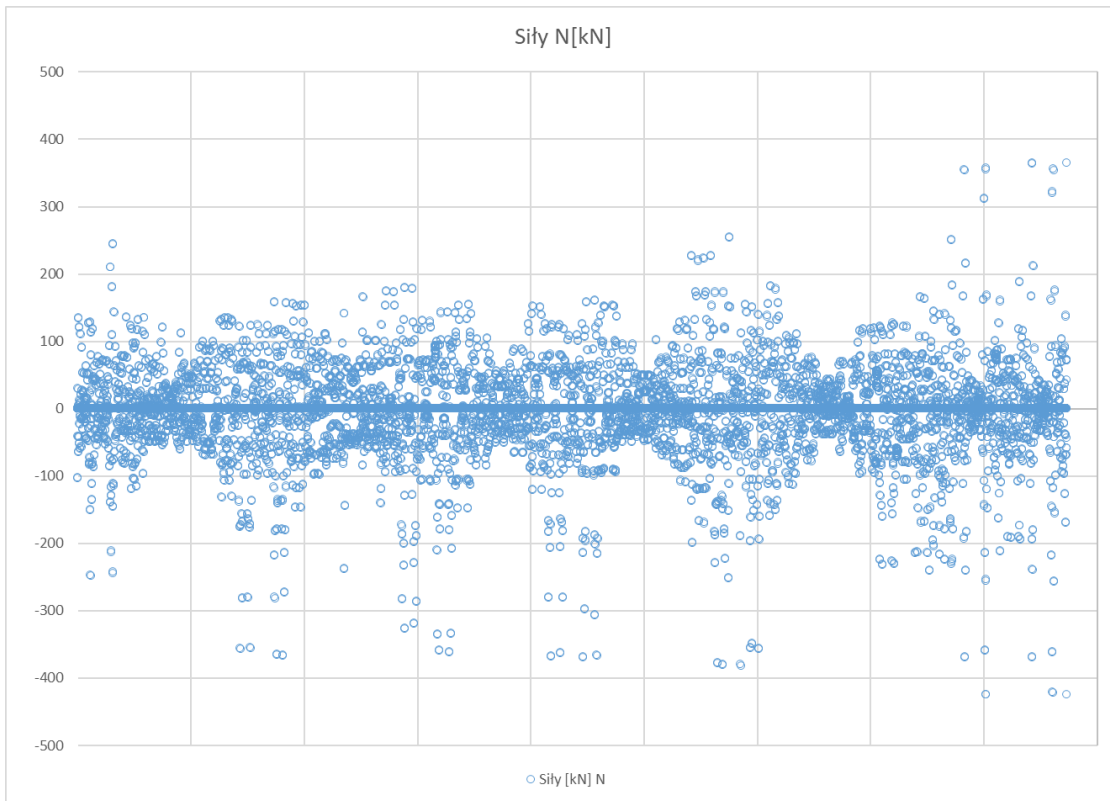
Rys. 54. Wykres koncentracji wyników – momenty

4.1.3.3. Wyniki pręty skratowania

Skratowanie przenosi siły z siatki górnej na dolną w sposób równomierny, a nieznaczna część prętów przenosi siły o wartości ponad 200 kN. Wykres obwiedni sił na rysunku 55 pokazuje równomierność oddziaływania, potwierdzoną wykresem na rysunku 56. Największe wartości w tabeli 13 występują w prętach skratowania przenoszących siły na szczyt słupa, w związku z tym zastosowano lokalnie zwiększone przekroje RO 177,8 x 8,0.



Rys. 55. Ściskanie i rozciąganie – skratowanie



Rys. 56. Siły normalne – skratowanie

Tab. 13. Wyniki dla skratowania

Przekrój nr 11: RO 168.3x6.3 ; EN 10210-2:2006										
Pręt nr	Węzeł nr	Położenie x [m]		Siły [kN]			Momenty [kNm]			Odpowiednie przypadki obciążeń
				N	V _y	V _z	M _T	M _y	M _z	
10715	218	0,000	MAX N	364,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	KO 16
10185	11970	6,092	MIN N	-425,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	KO 16
9150		3,374	MAX V _y	-68,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	KO 18
10303	10910	0,000	MIN V _y	72,89	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	KO 13
9150	10672	0,000	MAX V _z	-58,39	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	KO 13
10303	12080	6,314	MIN V _z	71,55	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	KO 13
8706	10393	6,140	MAX M _T	-43,74	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	KO 13
10303	10910	0,000	MIN M _T	72,89	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	KO 13
10303		3,400	MAX M _y	42,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	KO 11
9150	10672	0,000	MIN M _y	-58,39	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	KO 13
10303	12080	6,314	MAX M _z	71,55	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	KO 13
10303	10910	0,000	MIN M _z	72,89	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	KO 13

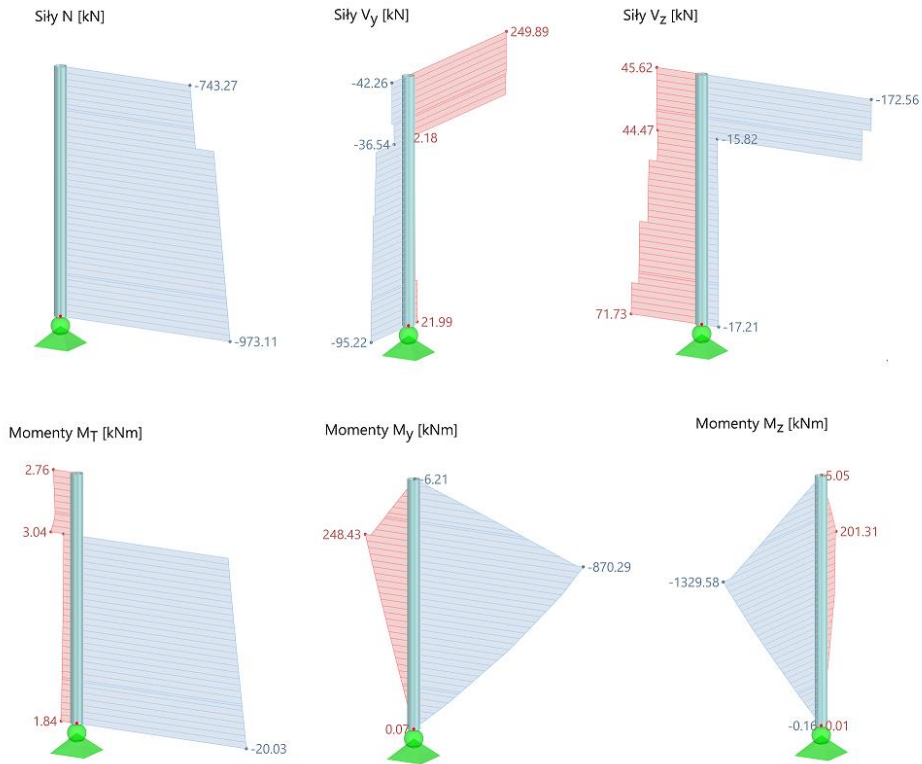
4.1.3.4. Wyniki dla trzonu słupa

Tab. 14. Wyniki dla słupów

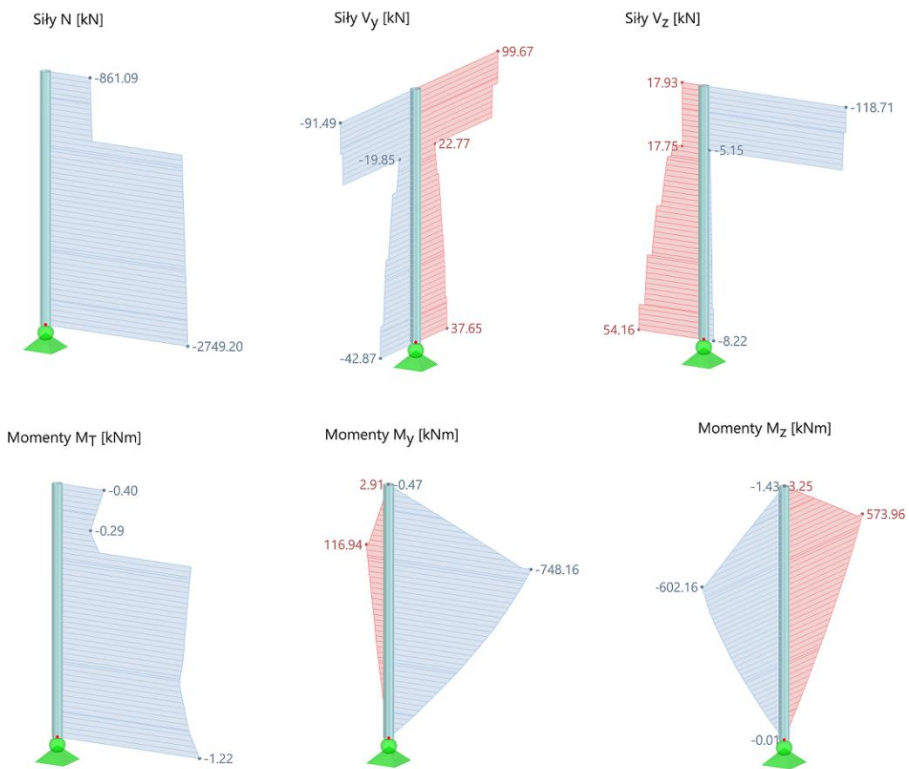
Przekrój nr 6: Polygon 8/1000/12										
Pręt nr	Węzeł nr	Położenie x [m]		Siły [kN]			Momenty [kNm]			Odpowiednie przypadki obciążeń
				N	V _y	V _z	M _T	M _y	M _z	
11147	12860	23,982	MIN N	-2697,57	-1,07	-4,04	0,61	0,00	0,00	KO 6
11111	11616	0,000	MAX V _y	-460,81	214,64	25,32	-3,21	-6,93	7,48	KO 16
11107	11401	19,768	MIN V _y	-483,85	-202,98	-34,03	3,67	-7,64	6,21	KO 16
11128	12831	0,000	MAX V _z	-1415,11	-12,66	129,79	1,39	0,00	-0,02	KO 13
11128	12470	18,176	MIN V _z	-684,00	33,21	-319,15	-2,08	-8,40	2,59	KO 13
11111	12822	19,767	MAX M _T	-810,46	-23,68	68,52	20,91	0,04	-0,24	KO 13
11128	12831	0,000	MIN M _T	-1312,67	51,60	37,85	-16,55	0,14	0,04	KO 16
11128		13,632	MAX M _y	-1364,42	-8,97	95,12	2,08	1578,23	155,21	KO 13
11119		5,000	MIN M _y	-708,52	19,26	70,13	-4,07	-1165,03	334,89	KO 13
11128		13,632	MAX M _z	-1263,38	-59,09	24,35	13,04	439,81	1032,45	KO 18
11111		4,942	MIN M _z	-837,07	-69,22	-9,00	10,65	149,91	-1177,60	KO 16

Zgodnie z założeniami projektowymi, wykorzystującymi zalety przekryć strukturalnych, poprzez zastosowanie jak najmniejszej ilości podpór, słupy przenoszą siły ściskające, ze względu na masę konstrukcji w żadnym przypadku nie występują siły rozciągające. Na rysunku 59 można wyodrębnić grupy oddziaływań, największe o wartości ponad 2000 kN występują w słupach wewnętrznych, średnie z przedziału 2000÷1000 kN występują w bocznej części, a poniżej 1000 kN od frontu i od tyłu. Słupy wewnętrzne zaprojektowano w celu zmniejszenia ugięć, a także równomiernemu rozkładowi obciążeń, Wynik analizy pokazał zasadność ich zastosowania. W węźle konstrukcyjnym łączącym słupy z gałęziami występują znaczne momenty zginające. Wartości powyżej 1000 kNm przedstawione na rysunku 61, występują w słupach bocznych, w przypadkach oddziaływania wiatru z boku konstrukcji, są to wartości na słupach od zawietrznej strony. Analogiczna sytuacja występuje w przypadku sił tnących na rysunku 60. Największe siły tnące w zdecydowanej większości występują powyżej węzła gałęziowego, słup w tej części jest obciążony od sił przenoszonych z gałęzi podporowych, a także od sił prętów opartych na szczycie słupa.

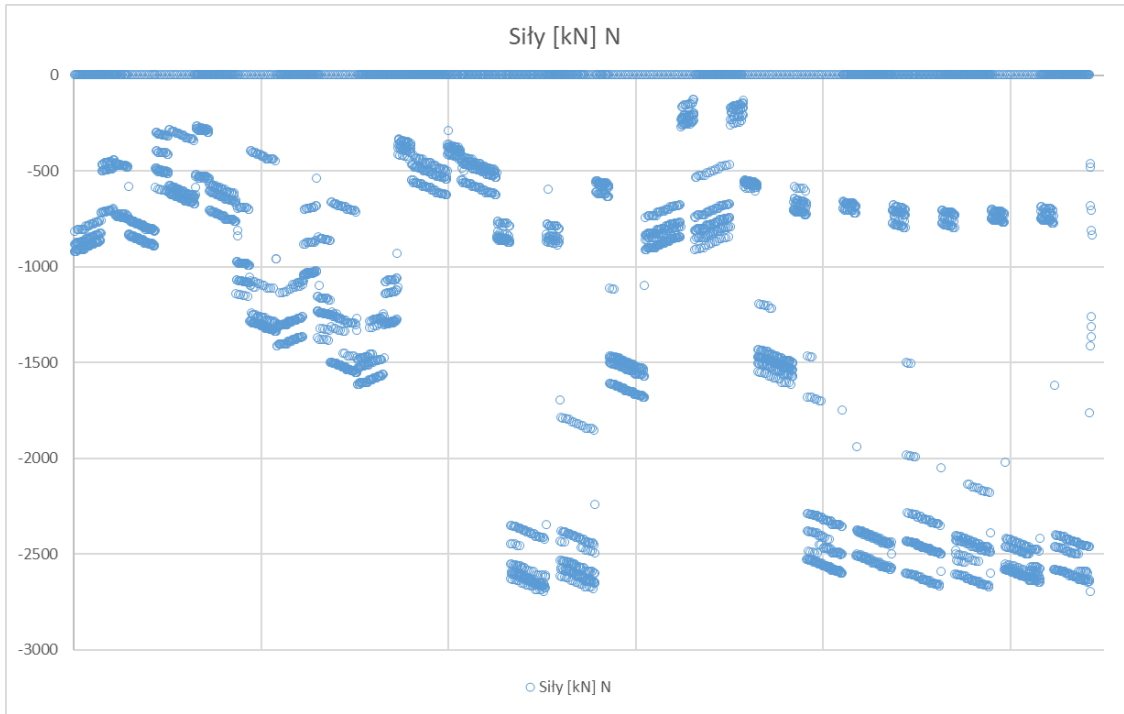
Rysunki 57 oraz 58 pokazują rozkład sił w słupach wewnętrznych i skrajnych, przedstawiają miejsca węzłowe w górnej części, wyraźną pracę górnej części słupa.



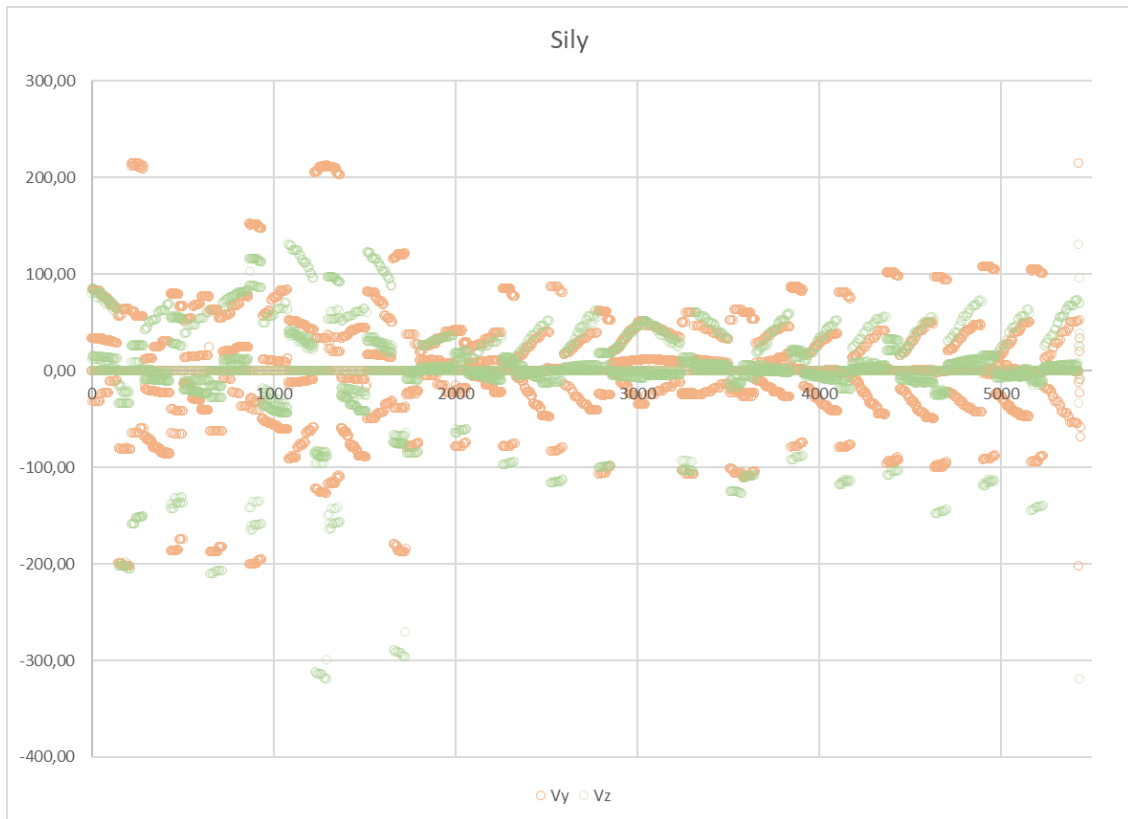
Rys. 57. Słup narożny- 11111



Rys. 58. Słup wewnętrzny-11147



Rys. 59. Siły normalne- słup (elementy skończone)



Rys. 60. Siły tnące - słup

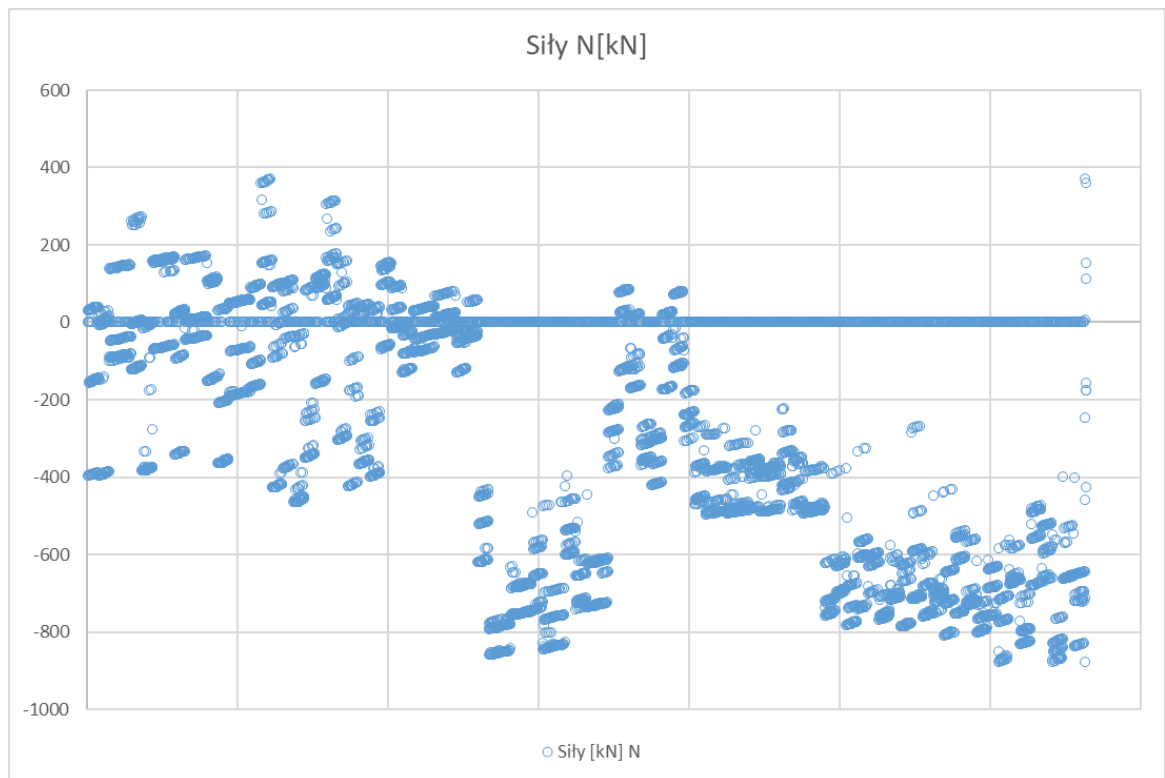


Rys. 61. Momenty – słup

4.1.3.5. Wyniki dla gałęzi

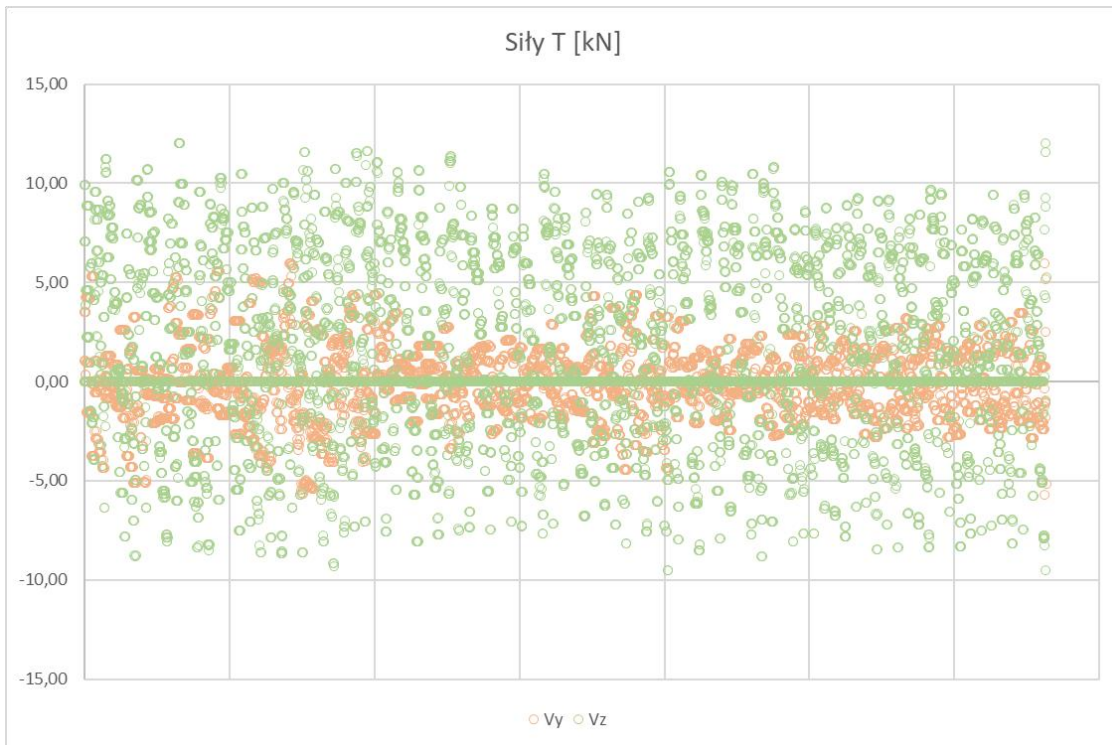
Tab. 15. Wyniki dla gałęzi

Przekrój nr 8: Polygon 8/400/12										
Pręt nr	Węzeł nr	Położenie x [m]		Siły [kN]			Momenty [kNm]			Odpowiednie przypadki obciążeń
				N	V _y	V _z	M _T	M _y	M _z	
11125	4009	7,781	MAX N	369,83	-1,27	-8,27	-1,90	-0,20	-1,16	KO 13
11225	12884	0,000	MIN N	-879,31	-0,37	7,63	1,44	-32,07	6,12	KO 18
11129		6,492	MAX V _y	-459,26	5,96	4,33	1,24	-3,09	0,58	KO 13
11130		8,239	MIN V _y	-248,49	-5,72	0,23	-4,18	2,95	0,86	KO 13
11117	12827	0,000	MAX V _z	4,20	2,48	12,01	-3,07	-28,33	-4,11	KO 16
11180	11517	7,945	MIN V _z	-175,95	-1,06	-9,56	-2,17	-8,74	0,07	KO 13
11126	12828	0,000	MAX M _T	-428,26	-1,11	8,80	7,62	-39,04	7,27	KO 18
11135	12834	0,000	MIN M _T	-177,98	0,75	9,26	-9,26	-13,86	-9,86	KO 13
11125	12828	0,000	MAX M _y	360,30	-0,95	-1,02	-1,88	35,46	-10,40	KO 13
11131	12832	0,000	MIN M _y	-157,85	-1,85	11,54	-2,87	-60,21	-14,52	KO 13
11125	12828	0,000	MAX M _z	151,55	5,14	4,18	5,97	2,19	31,37	KO 18
11131	12832	0,000	MIN M _z	112,38	-5,19	5,23	-6,26	-5,12	-32,76	KO 18

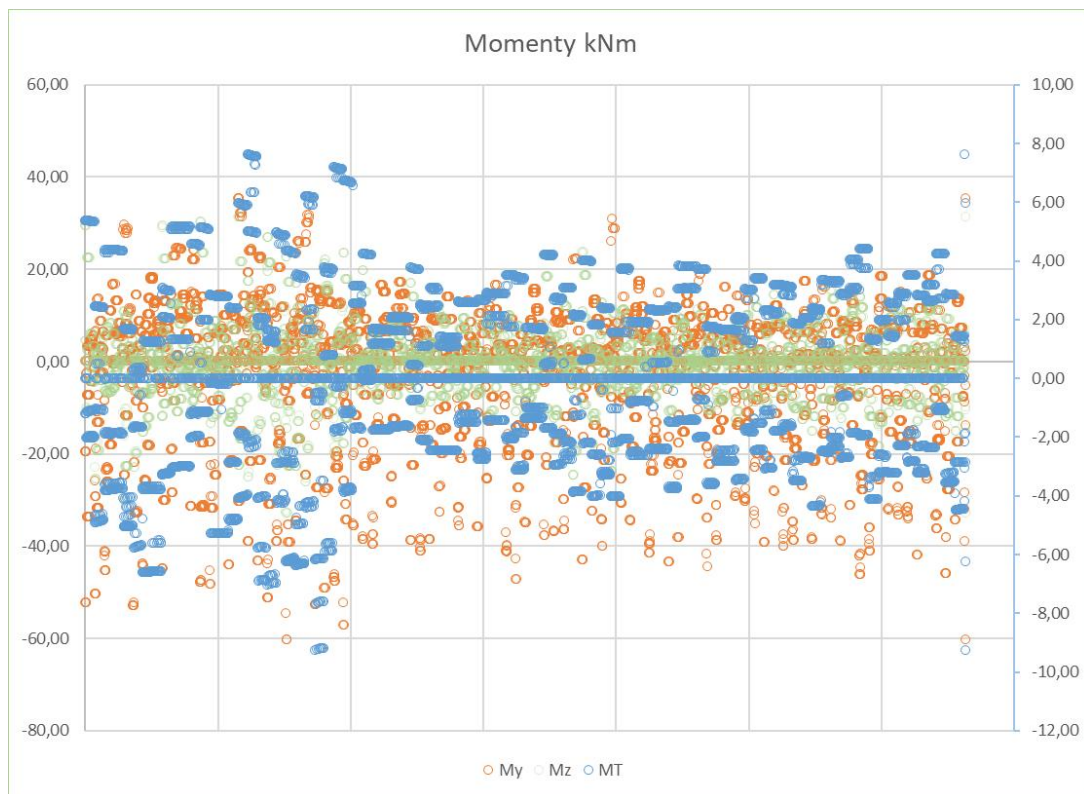


Rys. 62. Siły normalne - gałąź

Pręty gałęziowe przy słupach wewnętrznych są ściskane znacznymi siłami, po obwodzie są rozciągane lub ściskane w zakresie $-400 \text{ kN} \div 400 \text{ kN}$, zależnie od przypadku obciążenia. Występuje na nich równomierny rozkład sił tnących (rysunek 63), analogicznie do słupów po stronie zewnętrznej konstrukcji występują nieznacznie wyższe wartości momentów zginających (rysunku 64).



Rys. 63. Siły tnące - gałąź



Rys. 64. Momenty – gałąź

4.2. Analiza stateczności

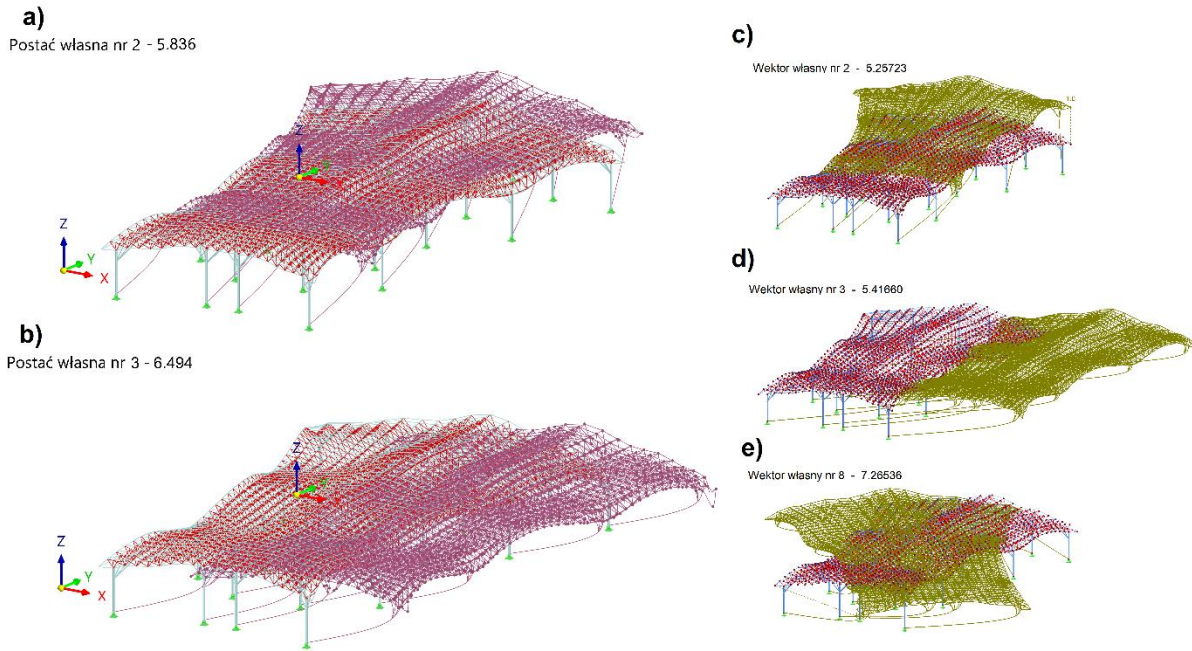
4.2.1. Współczynnik obciążenia krytycznego

Przeprowadzono analizę stateczności modelu w dwóch dostępnych wersjach programu RFEM. Wystąpiły nieznaczne różnice w wynikach pokazane w tabeli 16, w wersji RFEM 5 miarodajny wynik dała już 2 postać własna, a także 3. W nowszej wersji programu RFEM 6 miarodajny wartością współczynnika obciążenia krytycznego wyznacza także postać 2 i 3, wyniki analizy przedstawia rysunek 65.

Tab. 16. Współczynniki obciążenia krytycznego

Postać nr	RFEM 5		RFEM 6	
	Współczynnik obciążenia krytycznego	Współczynnik zwiększający	Współczynnik obciążenia krytycznego	Współczynnik zwiększający
	f [-]	α [-]	f [-]	α [-]
1	4,519	1,284	4,781	1,264
2	5,257	1,235	5,836	1,207
3	5,417	1,226	6,494	1,182
4	5,545	1,220	7,156	1,162
5	5,941	1,202	7,165	1,162
6	6,785	1,173	7,216	1,161
7	7,086	1,164	7,856	1,146
8	7,265	1,160	7,980	1,143
9	7,533	1,153	8,088	1,141
10	7,709	1,149	8,124	1,140

Analiza graficzna przedstawiona na rysunku 62 pozwoliła na określenie poprawnych wartości współczynnika krytycznego. Postacie drgań własnych uwzględniające miejscowe przemieszczenia nie spełniają założeń obliczeniowych. Wartości współczynnika przy globalnej niestateczności można wykorzystać do dalszych prac nad konstrukcją.



Rys. 65. Postacie drgań własnych

- a) nr 2 – 5,84; b) nr 3 – 6,49 (RFEM 6)
 b) c) nr 2 – 5,26; d) nr 3 - 5,42; e) nr 8 – 7,28; (RFEM 5)

4.2.2. Długości efektywne i obciążenia krytyczne według postaci własnych

Na podstawie współczynnika obciążenia krytycznego wyznaczonego z 2 postaci własnej przeprowadzono korektę długości prętów, wyznaczono współczynnik długości efektywnej i obciążenie krytyczne, w tabeli 17 przedstawiono wyniki dla najbardziej wyężonych prętów, po jednym z każdego przekroju. Program obliczeniowy uwzględnia wyznaczone długości efektywne w dalszych obliczeniach.

Tab. 17. Długości efektywne i obciążenia krytyczne

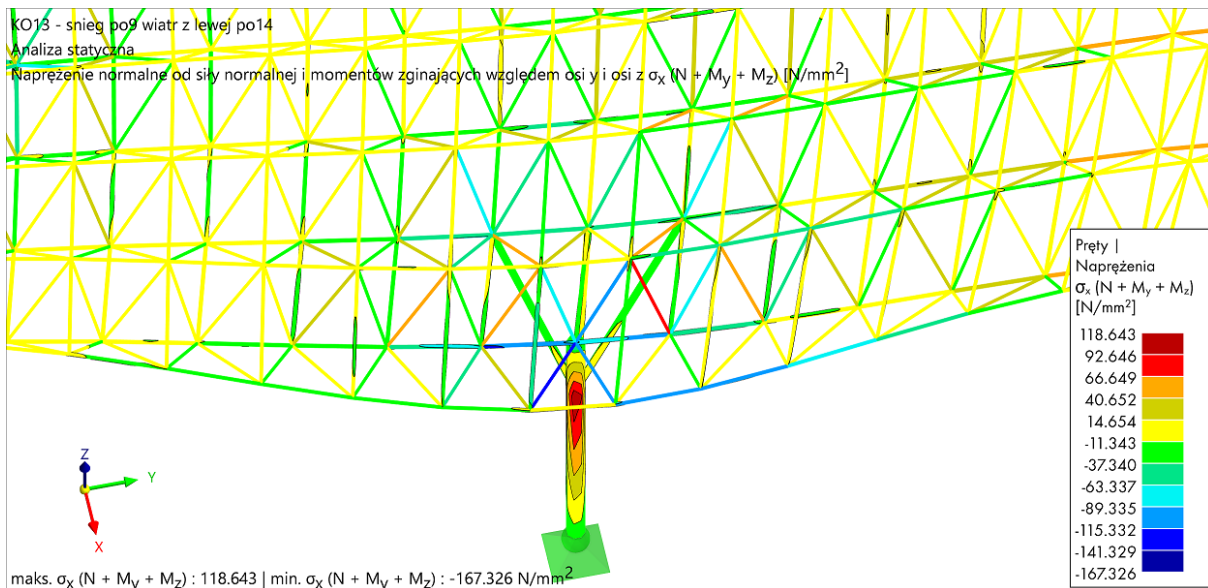
	Pręt nr	Węzeł nr		Długość L [m]	Długość efektywna [m]		Współczynnik długości efektywnej		Obciążenie krytyczne N_{cr} [kN]
		początek	koniec		$L_{cr,u}$	$L_{cr,v}$	$k_{cr,u}$	$k_{cr,v}$	
Pas górny	10588	11402	12337	5.972	3.743	3.743	0.627	0.627	2411.26
Pas dolny	11249	11970	11959	4.868	4.658	4.658	0.957	0.957	2279.47
Skratowanie	10185	11960	11970	6.092	3.451	3.451	0.566	0.566	1832.23
Słup	11147	8839	12860	23.982	31.647	31.647	1.320	1.320	13390.70
Gałąź	11225	12884	2399	9.882	10.721	10.721	1.085	1.085	4336.02

4.2.3. Analiza naprężeniowo – odkształceniowa

Analiza naprężeniowa wykazała bezpieczny stosunek wartości naprężenia do wartości granicznej, nie przekraczającym 50% wartości granicznej. W tabeli 18 zestawiono najwyższe wartości naprężenia w każdym z zastosowanych przekroji. Rysunek 66 przedstawia rozkład naprężenia przy skrajnym słupie, należy zauważyć, że największe naprężenia występują w połączeniu słupa z gałęziami, a także w prętach skratowania bezpośrednio przy gałęziach.

Tab. 18. Naprężenia na prętach według przekrojów

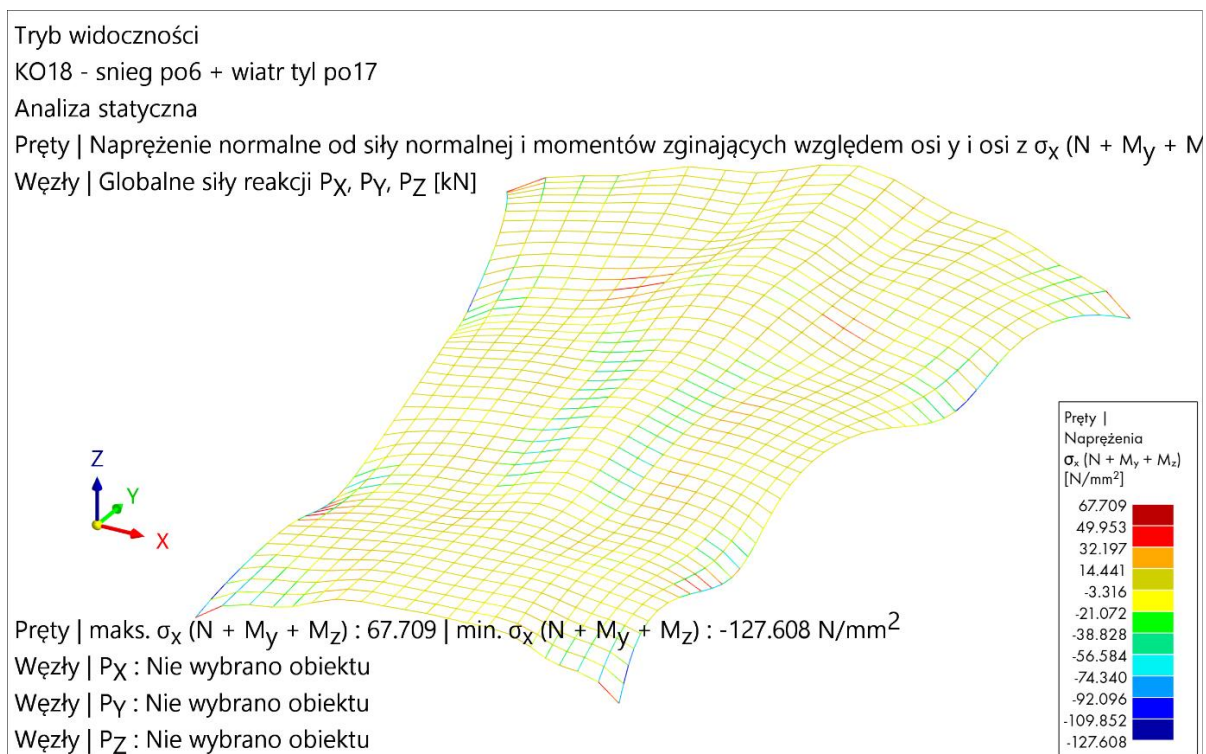
Przekrój	Pręt	Położenie	Obciążenie	Typ	Naprężenie [N/mm ²]		Stosunek naprężeń η [-]
	nr	x [m]	nr	naprężenia	Istniejące	Wartość graniczna	
PHS 8/1000/20	Słup						
	11136	14,023	KO22	$\sigma_{x,tot}$	-167,326	345,000	0,485
	11128	18,176	KO22	τ_{tot}	-13,103	199,186	0,066
	11136	14,023	KO22	$\sigma_{eqv,vonMises}$	167,358	345,000	0,485
PHS 8/400/12	Gałąź						
	11211	0,000	KO22	$\sigma_{x,tot}$	-86,504	355,000	0,244
	11135	0,000	KO22	τ_{tot}	-4,764	204,959	0,023
	11211	0,000	KO22	$\sigma_{eqv,vonMises}$	86,574	355,000	0,244
CHS 193.7x6.3	Pas górny						
	10972	0,000	KO22	$\sigma_{x,tot}$	-120,309	355,000	0,339
	9804	0,000	KO22	τ_{tot}	-2,386	204,959	0,012
	10972	0,000	KO22	$\sigma_{eqv,vonMises}$	120,318	355,000	0,339
CHS 219.1x6.3	Pas dolny						
	11249	0,000	KO22	$\sigma_{x,tot}$	-145,309	355,000	0,409
	11248	3,402	KO22	τ_{tot}	-5,336	204,959	0,026
	11249	0,000	KO22	$\sigma_{eqv,vonMises}$	145,350	355,000	0,409
CHS 168.3x6.3	Skratowanie						
	10953	6,092	KO22	$\sigma_{x,tot}$	-121,182	355,000	0,341
	10303	6,314	KO22	τ_{tot}	-1,616	204,959	0,008
	10953	6,092	KO22	$\sigma_{eqv,vonMises}$	121,182	355,000	0,341
CHS 177.8x8.0	Skratownie przy słupach						
	9800	6,759	KO22	$\sigma_{x,tot}$	-152,507	355,000	0,430
	11234	4,986	KO22	τ_{tot}	2,414	204,959	0,012
	9800	6,759	KO22	$\sigma_{eqv,vonMises}$	152,512	355,000	0,430



Rys. 66. Naprężenia od siły normalnej i momentów zginających

4.2.3.1. Naprężenia – siatka górna

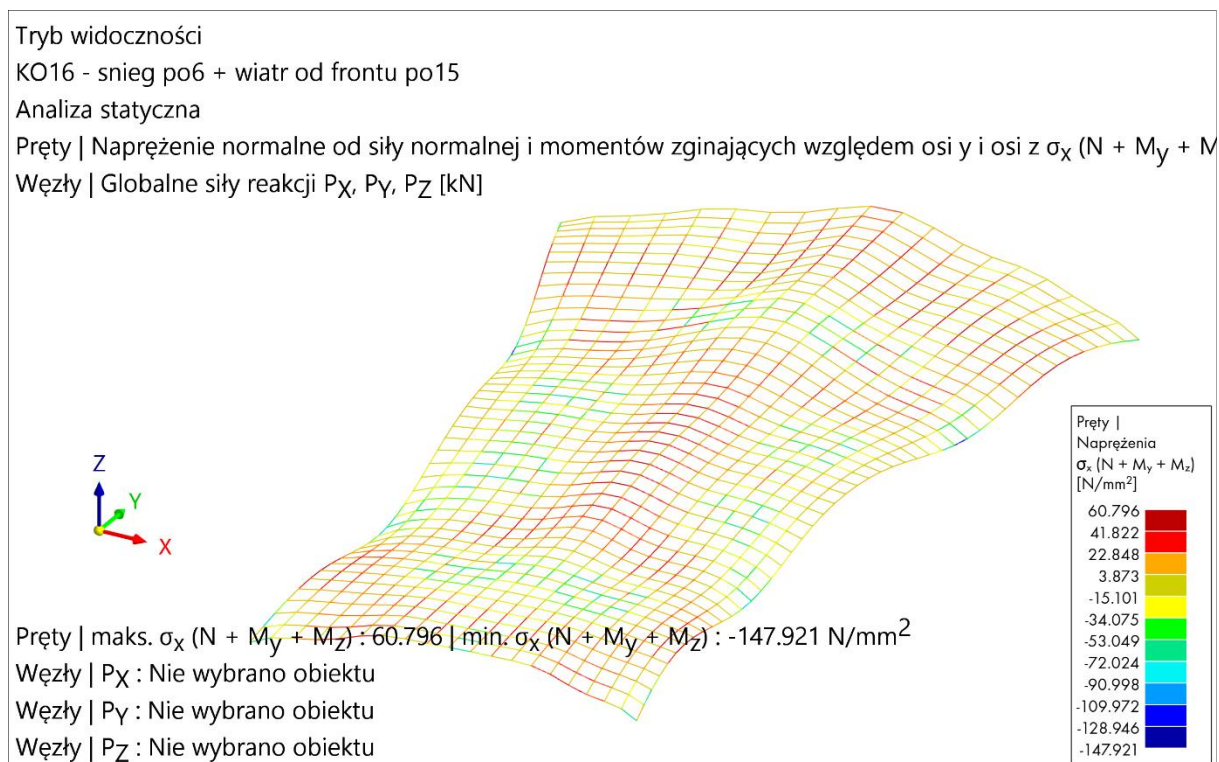
Analiza naprężenia normalnego od siły normalnej i momentów zginających przedstawiona na rysunku 67, wykazuje nie przekroczone dopuszczalne wartości naprężenia. Stal S355 charakteryzuje się wartością 35,5 kN/cm², 80% wynosi 28,4 kN/cm², pręty pasa górnego w znikomym zakresie przekraczają wartość 12,76 kN/cm².



Rys. 67. Naprężenia – pas górny

4.2.3.2. Naprężenia – siatka dolna

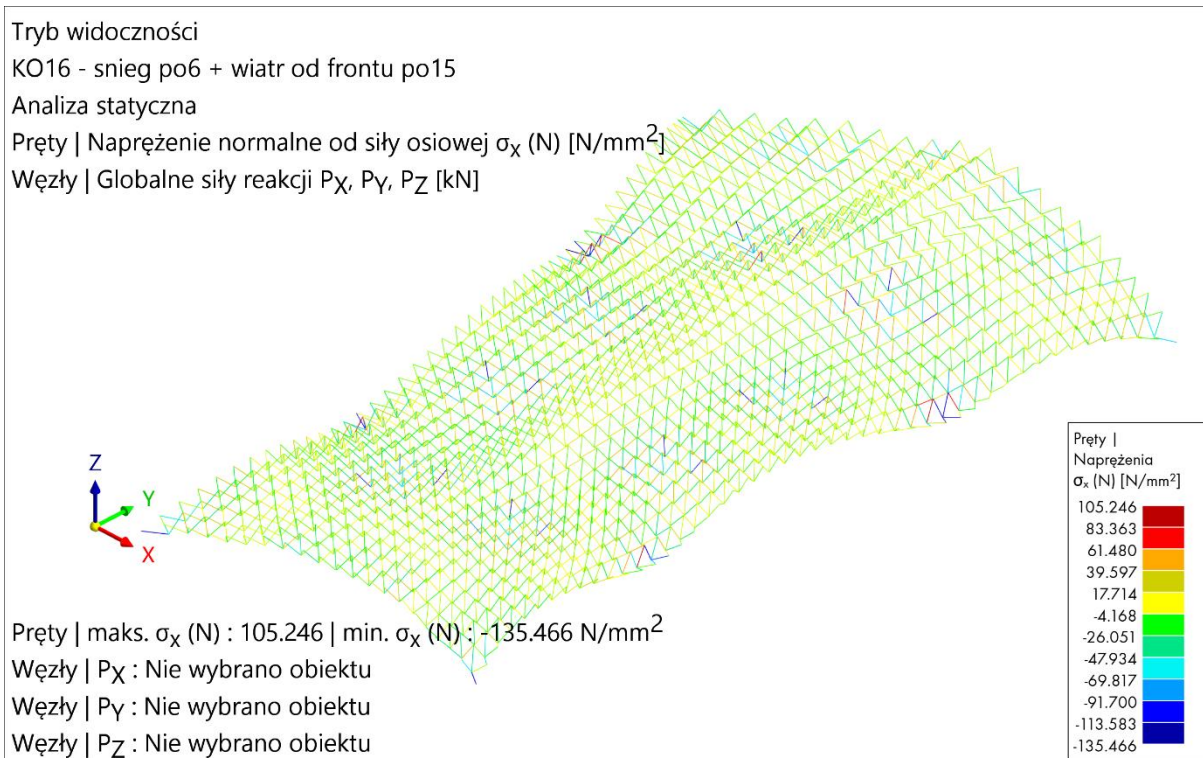
Naprężenia w prętach pasa dolnego przedstawione na rysunku 68 także przedstawiają wyraźne obszary oddziaływań, naprężenia w przekrojach pasa dolnego nie przekraczają wartości dopuszczalnych. Za wartość graniczną przyjęto 80 % wartości użytej stali.



Rys. 68. Naprężenia – pas dolny

4.2.3.3. Naprężenia – skratowanie

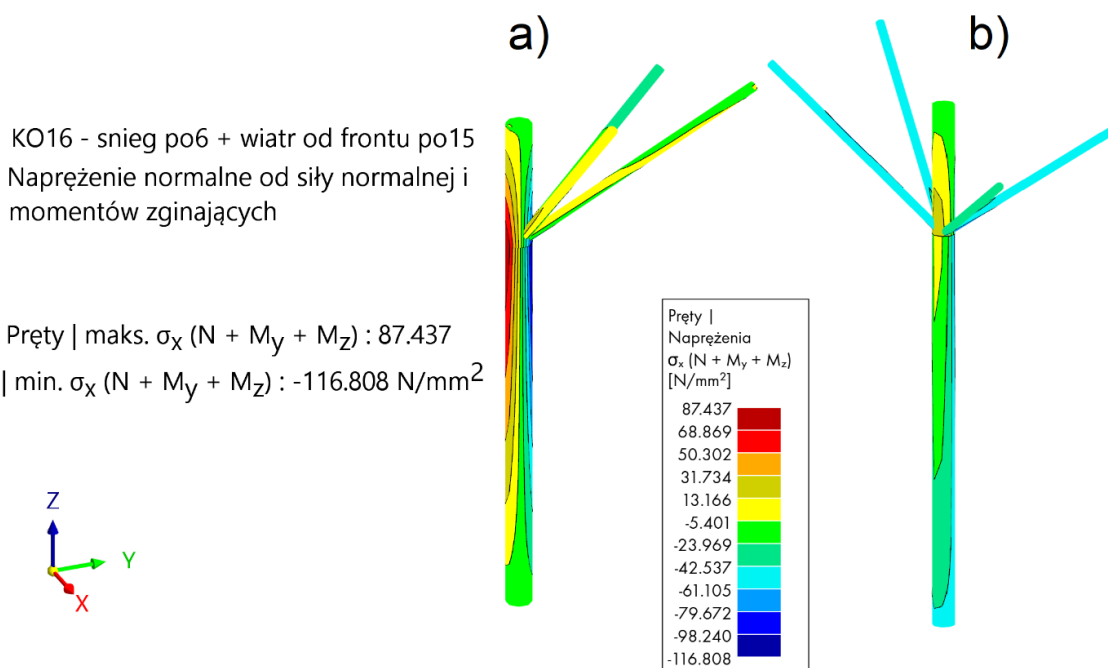
Naprężenia w prętach skratowania nie przekraczają dopuszczalnych wartości, a w większej części mają równomierny rozkład, jak można zaobserwować na rysunku 69 większe wartości występują przy podporach i w miejscach nawisów dolnych, po obwodzie. Należy przyjąć, że znaczna część konstrukcji współpracuje we właściwy, założony projektowo sposób.



Rys. 69. Naprężenia –skratowanie

4.2.3.4. Naprężenia – słup

Naprężenia w elementach powłokowych także nie przekraczają wartości granicznych, w dalszej części opracowania zastosowano wzmocnienie miejscowe, celem eliminacji lokalnej deformacji blachy tworzącej przekrój. Na rysunku 70 przedstawiono słup skrajny pozycja a) i wewnętrzny pozycja b).



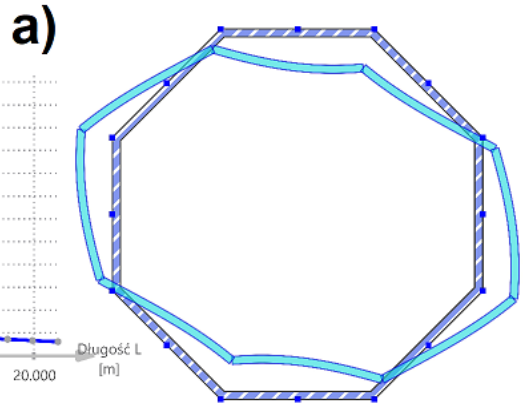
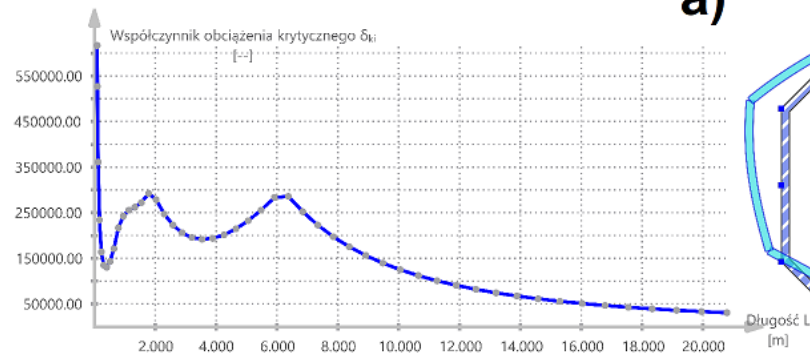
Rys. 70. Naprężenia w słupach

4.2.4. Wyboczenie ścianek elementów

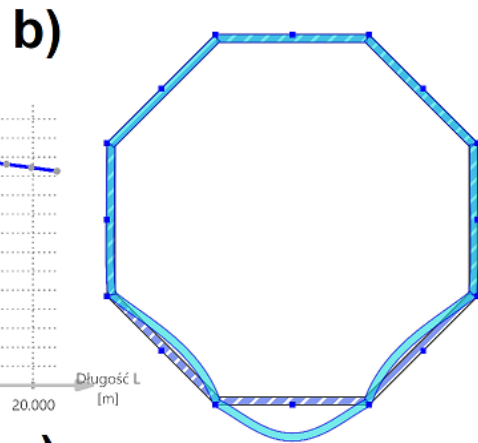
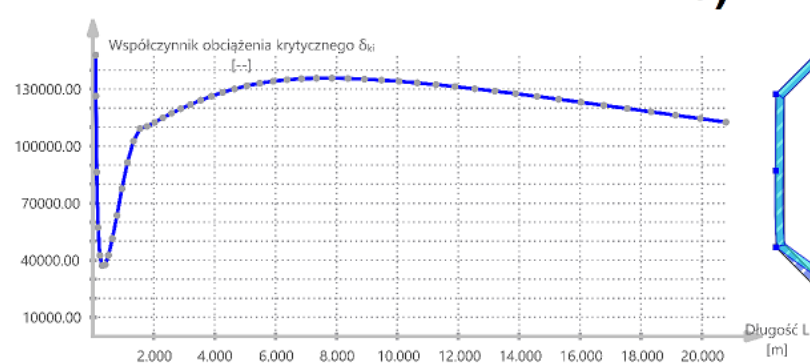
Przeprowadzono analizę wyboczeniową każdego z elementów. Rysunki 71 oraz 72 przedstawiają deformację elementów wraz z odpowiadającymi im wykresami.

4.2.4.1. Postać wyboczenia – słup

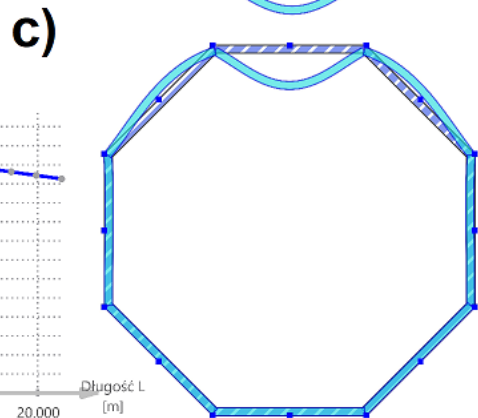
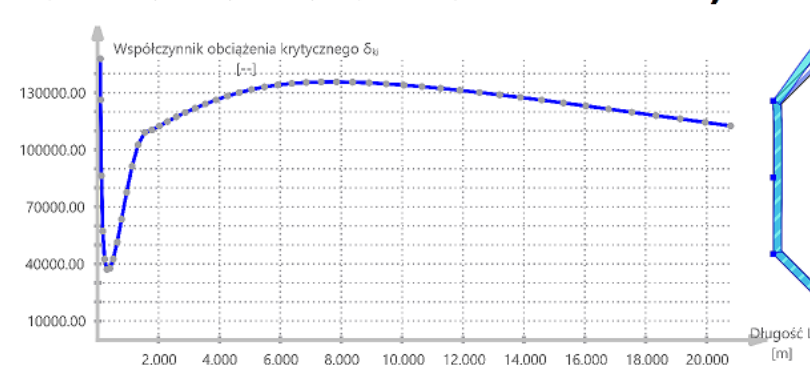
δ_{N_x} | N : -1 kN | Postać wyboczenia | FSM | L : 3.539 m | δ_{ki} : 191784.85



δ_{M_y} | M_y : -1 kNm | Postać wyboczenia | FSM | L : 0.306 m | δ_{ki} : 37117.57



δ_{M_z} | M_z : -1 kNm | Postać wyboczenia | FSM | L : 0.306 m | δ_{ki} : 37117.57

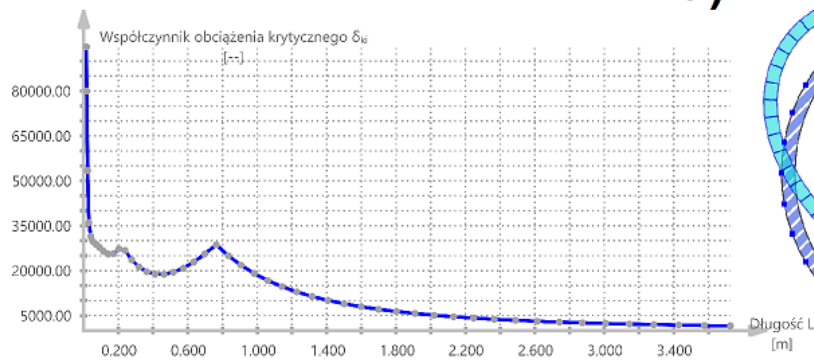


Rys. 71. Postacie wyboczeniowe – przekrój wielokątny

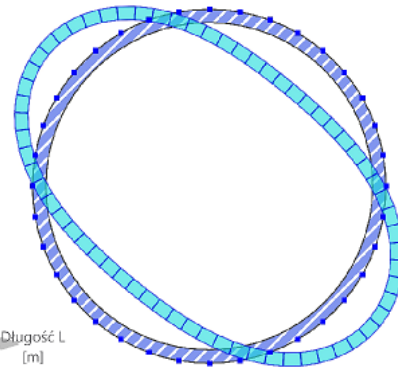
Na wykresach można zaobserwować analogiczne postacie wyboczenia, profil wielokątny wykazuje się wyraźniejszą, bardziej wyostrzoną odpowiedzią na zadane obciążenia. Mapę lokalnego wyboczenia przedstawiono w dalszej części dotyczącej podstawy słupa.

4.2.4.2. Postać wybożenia – przekrój rurowy

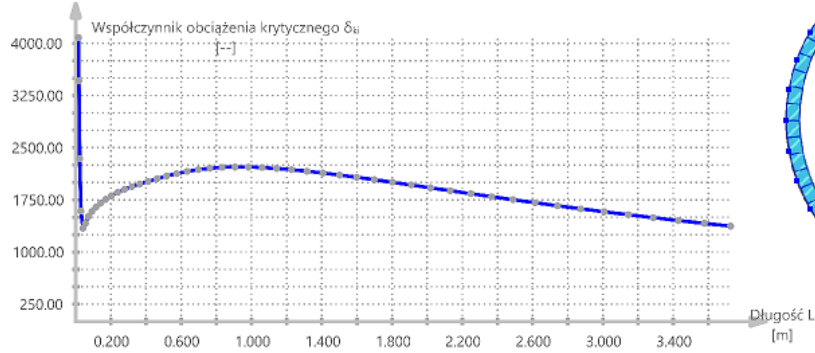
δ_{N-} | N : -1 kN | Postać wybożenia | FSM | L : 0.463 m | δ_{ki} : 18841.26



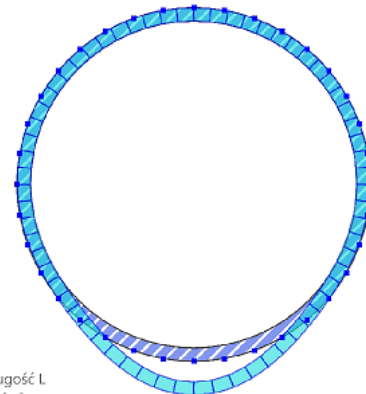
a)



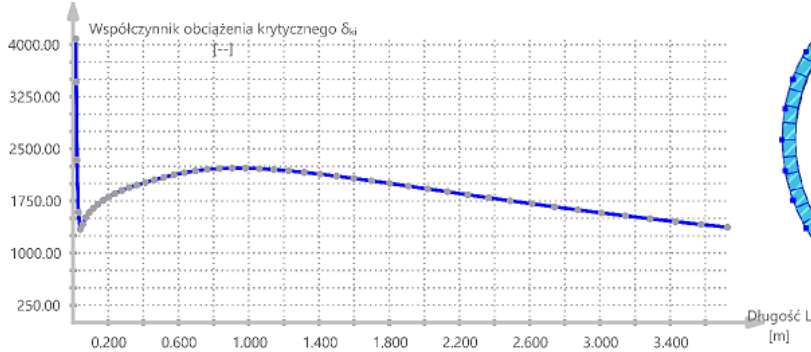
δ_{My-} | M_y : -1 kNm | Postać wybożenia | FSM | L : 0.041 m | δ_{ki} : 1353.02



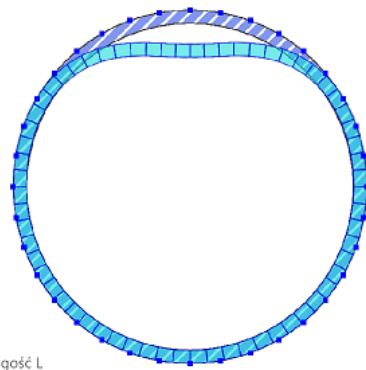
b)



δ_{Mz+} | M_z : 1 kNm | Postać wybożenia | FSM | L : 0.041 m | δ_{ki} : 1353.02



c)



Rys. 72. Postacie wybożenia – przekrój rurowy

4.3. Wymiarowanie elementów

Rozszerzenie Steel Design dostępne w programie RFEM 6 do wymiarowania konstrukcji stalowych przeprowadza szczegółową klasyfikację przekrojów w każdym miejscu obliczeń przed przeprowadzeniem obliczeń. Klasyfikacja przekrojów określa procedury obliczeniowe zgodnie z normą PN-EN 1993 dla każdego z obliczeń, pręty dzieli się na odpowiednie klasy i narzuca się normowe wymagania wymiarowania.

Tab. 19. Wymiarowanie - słup

Przekrój nr	Pręt	Położenie	Obciążenie	Stopień wykorzystania warunku projektowego η [--]	Warunek projektowy	Opis
	nr	x [m]	nr			
6	PHS 8/1000/20 3 - S355				Słup	
	11204	22,642	KO18	0,135	SP1200.00	Ściskanie wg 6.2.4
	11128	18,176	KO13	0,053	SP3100.02	Ścinanie w osi z wg 6.2.6(2) Projektowanie plastyczne
	11111	0,000	KO16	0,035	SP3200.02	Ścinanie w osi y wg 6.2.6(2) Projektowanie plastyczne
	11128	13,632	KO13	0,302	SP4100.03	Zginanie względem osi y wg 6.2.5 Projektowanie plastyczne
	11111	4,942	KO16	0,217	SP5100.03	Zginanie względem osi z wg 6.2.5 Projektowanie plastyczne
	11136	14,023	KO13	0,430	SP6300.01	Zginanie dwukierunkowe, siła osiowa i ścinanie wg 6.2.1(7) Projektowanie plastyczne
	11209	5,660	KO12	0,295	SP6300.02	Zginanie względem osi y, siła osiowa i ścinanie wg 6.2.1(7) Projektowanie plastyczne
	11229	21,494	KO15	0,138	SP6300.03	Zginanie względem osi z, siła osiowa i ścinanie wg 6.2.1(7) Projektowanie plastyczne
	11147	23,982	KO6	0,232	ST1100.00	Stateczność Wyboczenie giętkie względem głównej osi y wg 6.3.1
	11147	23,982	KO6	0,232	ST1300.00	Stateczność Wyboczenie giętkie względem głównej osi z wg 6.3.1
	11136	0,000	KO13	0,462	ST3100.00	Stateczność Zginanie i wyboczenie względem głównych osi wg 6.3.3
	11107	0,000	KO21	0,000	SE0100.00	Użytkowność Pomijalne ugięcia
	11136	10,517	KO21	0,402	SE1100.00	Użytkowność Ugięcia w kierunku z
11107	10,873	KO21	0,160	SE1200.00	Użytkowność Ugięcia w kierunku y	

Słupy zakwalifikowano do klasy 1. Dlatego też przeprowadzono obliczenia nośności w stanie plastycznym. W tabeli 19 zestawiono wyniki, decydującym warunkiem jest interakcja zginania i wyboczenia względem głównych osi. Prace przy projektowaniu połączenia wykazały także potrzebę przeanalizowania stateczności miejscowej ścianek płaskich, zastosowano dodatkowe nakładki aby ograniczyć wystąpienie niestateczności miejscowej.

Pręty gałęzi także zakwalifikowano do klasy 1, analogicznie do słupów decydującym warunkiem jest warunek stateczności. Elementy zaprojektowano ze stosunkowo dużym zapasem nośności ze względu na walory architektoniczne, a także możliwość montażowe elementów. Słupy powłokowe jako ustroje cienkościennie narażone są na deformację powłoki przy nieostrożnym montażu. W przypadku gałęzi występują dodatkowe siły rozciągające, wartość tej siły wg. tabeli 20 nie ma wpływu na nośność elementu.

Tab. 20. Wymiarowanie – gałąź

Przekrój nr	Pręt	Położenie	Obciążenie	Stopień wykorzystania warunku projektowego η [--]	Warunek projektowy	Opis
	nr	x [m]	nr			
PHS 8/400/12 3 - S355						Gałąź
8	11125	7,781	KO13	0,071	SP1100.00	Rozciąganie wg 6.2.3
	11225	0,000	KO18	0,174	SP1200.00	Ściskanie wg 6.2.4
	11143	0,000	KO15	0,007	SP3100.02	Ścinanie w osi z wg 6.2.6(2) Projektowanie plastyczne
	11130	8,239	KO13	0,003	SP3200.02	Ścinanie w osi y wg 6.2.6(2) Projektowanie plastyczne
	11131	0,000	KO13	0,082	SP4100.03	Zginanie względem osi y wg 6.2.5 Projektowanie plastyczne
	11131	0,000	KO18	0,044	SP5100.03	Zginanie względem osi z wg 6.2.5 Projektowanie plastyczne
	11135	0,000	KO16	0,187	SP6100.00	Naprężenie osiowe i styczne wg 6.2.1(5) Projektowanie sprężyste
	11231	0,000	KO13	0,232	SP6300.01	Zginanie dwukierunkowe, siła osiowa i ścinanie wg 6.2.1(7) Projektowanie plastyczne
	11231	0,000	KO18	0,221	SP6300.02	Zginanie względem osi y, siła osiowa i ścinanie wg 6.2.1(7) Projektowanie plastyczne
	11151	4,894	KO18	0,179	SP6300.03	Zginanie względem osi z, siła osiowa i ścinanie wg 6.2.1(7) Projektowanie plastyczne
	11109	0,000	KO14	0,072	SP6300.04	Zginanie dwukierunkowe i ścinanie wg 6.2.1(7) Projektowanie plastyczne
	11151	0,000	KO18	0,366	ST1100.00	Stateczność Wyboczenie giętne względem głównej osi y wg 6.3.1
	11151	0,000	KO18	0,366	ST1300.00	Stateczność Wyboczenie giętne względem głównej osi z wg 6.3.1
	11151	0,000	KO18	0,410	ST3100.00	Stateczność Zginanie i wyboczenie względem głównych osi wg 6.3.3
	11108	0,000	KO21	0,000	SE0100.00	Użytkowość Pomijalne ugięcia
	11117	5,417	KO21	0,097	SE1100.00	Użytkowość Ugięcia w kierunku z
	11130	3,877	KO21	0,049	SE1200.00	Użytkowość Ugięcia w kierunku y
	11114	0,000	KO12	-	WA5001.00	Skrećcie jest pomijane dla warunków projektowych stateczności

Pas górny sklasyfikowano do klasy 1. Do przeprowadzenia analizy elementy określono jako belkowe, wymiarowanie plastyczne wykazało znaczny zapas nośności. Analiza stateczności w tabeli 21, wynosząca wartość 0,607 okazała się decydująca.

Badanie naprężenia krytycznego rur obciążonych osiowo w punkcie 4.2.3.1 wykazało bezpieczny zapas nośności pasa górnego.

Tab. 21. Wymiarowanie – pas górny

Przekrój nr	Pręt	Położenie	Obciążenie	Stopień wykorzystania warunku projektowego η [--]	Warunek projektowy	Opis
	nr	x [m]	nr			
CHS 193.7x6.3 3 - S355						Pas górny
9	34	0,962	KO16	0,000	SP0100.00	Pomijalne siły wewnętrzne
	10344	9,680	KO16	0,161	SP1100.00	Rozciąganie wg 6.2.3
	9816	0,000	KO18	0,317	SP1200.00	Ściskanie wg 6.2.4
	10213	7,493	KO13	0,005	SP3100.02	Ścinanie w osi z wg 6.2.6(2) Projektowanie plastyczne
	9804	5,356	KO13	0,004	SP3200.02	Ścinanie w osi y wg 6.2.6(2) Projektowanie plastyczne
	10177	7,158	KO13	0,006	SP3300.02	Wypadkowe ścinanie wg 6.2.6(2) Projektowanie plastyczne
	411	0,000	KO16	0,052	SP4100.03	Zginanie względem osi y wg 6.2.5 Projektowanie plastyczne
	9804	0,000	KO18	0,048	SP5100.03	Zginanie względem osi z wg 6.2.5 Projektowanie plastyczne
	10201	7,553	KO18	0,003	SP6500.01	Zginanie dwukierunkowe, siła osiowa i ścinanie wg 6.2.9.1 i 6.2.10 Projektowanie plastyczne
	10588	1,493	KO18	0,149	SP6500.02	Zginanie względem osi y, siła osiowa i ścinanie wg 6.2.9.1 i 6.2.10 Projektowanie plastyczne
	10588	2,389	KO18	0,147	SP6500.03	Zginanie względem osi z, siła osiowa i ścinanie wg 6.2.9.1 i 6.2.10 Projektowanie plastyczne
	10360	8,810	KO19	0,002	SP6500.04	Zginanie dwukierunkowe i ścinanie wg 6.2.9.1 i 6.2.10 Projektowanie plastyczne
	9816	0,000	KO18	0,584	ST1100.00	Stateczność Wyboczenie giętne względem głównej osi y wg 6.3.1
	9816	0,000	KO18	0,584	ST1300.00	Stateczność Wyboczenie giętne względem głównej osi z wg 6.3.1
	9816	0,000	KO18	0,607	ST3100.00	Stateczność Zginanie i wyboczenie względem głównych osi wg 6.3.3
	21	0,000	KO21	0,000	SE0100.00	Użytkowość Pomijalne ugięcia
	10333	4,259	KO21	0,102	SE1100.00	Użytkowość Ugięcia w kierunku z
	9804	2,857	KO21	0,036	SE1200.00	Użytkowość Ugięcia w kierunku y

Pas dolny w klasie 2 analizowano metodami plastycznymi i sprężystymi. W tabeli 22 należy zwrócić uwagę na wyniki dla ściskania elementu, a także wynik obliczenia dla naprężenia osiowego i stycznego w stanie sprężystym. Decydującym wynikiem jest stateczność elementu i wyższa wartość naprężenia wykazana w punkcie 4.2.3.2.

Tab. 22. Wymiarowanie – pas dolny

Przekrój nr	Pręt	Położenie	Obciążenie	Stopień wykorzystania warunku projektowego η [--]	Warunek projektowy	Opis
	nr	x [m]	nr			
10	CHS 219.1x6.3 3 - S355					Pas dolny
	76	0,950	KO12	0,000	SP0100.00	Pomijalne siły wewnętrzne
	1111	5,034	KO1	0,166	SP1100.00	Rozciąganie wg 6.2.3
	11312	4,868	KO16	0,354	SP1200.00	Ściskanie wg 6.2.4
	11313	4,860	KO16	0,024	SP2100.00	Skręcanie wg 6.2.7
	11248	4,374	KO19	0,006	SP3100.01	Ścinanie w osi z i skręcanie wg 6.2.7(9) Projektowanie plastyczne
	2954	0,000	KO16	0,005	SP3100.02	Ścinanie w osi z wg 6.2.6(2) Projektowanie plastyczne
	11313	4,374	KO12	0,003	SP3200.01	Ścinanie w osi y i skręcanie wg 6.2.7(9) Projektowanie plastyczne
	11334	7,646	KO15	0,004	SP3200.02	Ścinanie w osi y wg 6.2.6(2) Projektowanie plastyczne
	11313	2,430	KO16	0,006	SP3300.01	Wypadkowe ścinanie i skręcanie wg 6.2.7(9) Projektowanie plastyczne
	2924	0,000	KO15	0,005	SP3300.02	Wypadkowe ścinanie wg 6.2.6(2) Projektowanie plastyczne
	11248	4,860	KO13	0,099	SP4100.03	Zginanie względem osi y wg 6.2.5 Projektowanie plastyczne
	1699	4,864	KO13	0,035	SP5100.03	Zginanie względem osi z wg 6.2.5 Projektowanie plastyczne
	11249	0,000	KO16	0,412	SP6100.00	Naprężenie osiowe i styczne wg 6.2.1(5) Projektowanie sprężyste
	11248	4,860	KO13	0,013	SP6500.01	Zginanie dwukierunkowe, siła osiowa i ścinanie wg 6.2.9.1 i 6.2.10 Projektowanie plastyczne
	11312	1,460	KO16	0,180	SP6500.02	Zginanie względem osi y, siła osiowa i ścinanie wg 6.2.9.1 i 6.2.10 Projektowanie plastyczne
	11312	0,974	KO13	0,151	SP6500.03	Zginanie względem osi z, siła osiowa i ścinanie wg 6.2.9.1 i 6.2.10 Projektowanie plastyczne
	2579	6,481	KO15	0,002	SP6500.04	Zginanie dwukierunkowe i ścinanie wg 6.2.9.1 i 6.2.10 Projektowanie plastyczne
	11312	4,868	KO16	0,461	ST1100.00	Stateczność Wyboczenie giętne względem głównej osi y wg 6.3.1
	11312	4,868	KO16	0,461	ST1300.00	Stateczność Wyboczenie giętne względem głównej osi z wg 6.3.1
	11312	4,868	KO16	0,488	ST3100.00	Stateczność Zginanie i wyboczenie względem głównych osi wg 6.3.3
	5	0,000	KO21	0,000	SE0100.00	Użytkowność Pomijalne ugięcia
	544	5,204	KO21	0,091	SE1100.00	Użytkowność Ugięcia w kierunku z
	2869	7,590	KO21	0,036	SE1200.00	Użytkowność Ugięcia w kierunku y
	115	0,000	KO18		-WAS001.00	Skręcanie jest pomijane dla warunków projektowych stateczności

Elementy skratowania określone w programie jako pręty kratowe z siłą normlaną, obliczono w klasie 1. Ocenę naprężeń i nośności przeprowadzono w stanie plastycznym. Decydującym warunkiem jest wyboczenie giętne, warunek ściskania i rozciągania znajduje się blisko równowagi. W tabeli 23 i 24 należy zwrócić uwagę na warunek stateczności, wartości w okolicy 0,9 wymagają szczególnej uwagi, analiza naprężeniowa w punkcie 4.2.3.3 pokazuje równomierny rozkład na całej konstrukcji.

Elementy skratowania oparte o słup należało zaprojektować z większego przekroju. Stateczność tego elementu względem zginania i wyboczenia jest ograniczona ze względu na przenoszenie części obciążeń na trzon słupa.

Naprężenia w tych elementach dochodzą do wartości 145,73 N/mm².

Tab. 23. Wymiarowanie - skratowanie

Przekrój nr	Pręt	Położenie	Obciążenie	Stopień wykorzystania warunku projektowego η [--]	Warunek projektowy	Opis
	nr	x [m]	nr			
CHS 168.3x6.3 3 - S355						Skratowanie
11	28	0,000	KO2	0,000	SP0100.00	Pomijalne siły wewnętrzne
	10194	0,000	KO19	0,310	SP1100.00	Rozciąganie wg 6.2.3
	10185	6,092	KO16	0,381	SP1200.00	Ściskanie wg 6.2.4
	10303	6,314	KO13	0,003	SP3100.02	Ścinanie w osi z wg 6.2.6(2) Projektowanie plastyczne
	9150	0,000	KO13	0,023	SP4100.03	Zginanie względem osi y wg 6.2.5 Projektowanie plastyczne
	10303	6,314	KO13	0,018	SP5100.03	Zginanie względem osi z wg 6.2.5 Projektowanie plastyczne
	9150	0,000	KO13	0,001	SP6500.01	Zginanie dwukierunkowe, siła osiowa i ścinanie wg 6.2.9.1 i 6.2.10 Projektowanie plastyczne
	9150	0,000	KO12	0,026	SP6500.02	Zginanie względem osi y, siła osiowa i ścinanie wg 6.2.9.1 i 6.2.10 Projektowanie plastyczne
	10303	5,683	KO13	0,025	SP6500.03	Zginanie względem osi z, siła osiowa i ścinanie wg 6.2.9.1 i 6.2.10 Projektowanie plastyczne
	8500	0,000	KO11	0,000	SP6500.04	Zginanie dwukierunkowe i ścinanie wg 6.2.9.1 i 6.2.10 Projektowanie plastyczne
	10185	6,092	KO16	0,904	ST1100.00	Stateczność Wyboczenie giętne względem głównej osi y wg 6.3.1
	10185	6,092	KO16	0,904	ST1300.00	Stateczność Wyboczenie giętne względem głównej osi z wg 6.3.1
	8934	6,161	KO6	0,160	ST3100.00	Stateczność Zginanie i wyboczenie względem głównych osi wg 6.3.3
	1	0,000	KO21	0,000	SE0100.00	Użytkowość Pomijalne ugięcia
	10303	3,400	KO21	0,061	SE1100.00	Użytkowość Ugięcia w kierunku z
	10303	4,371	KO21	0,023	SE1200.00	Użytkowość Ugięcia w kierunku y

Tab. 24. Wymiarowanie - skratowanie przy słupach

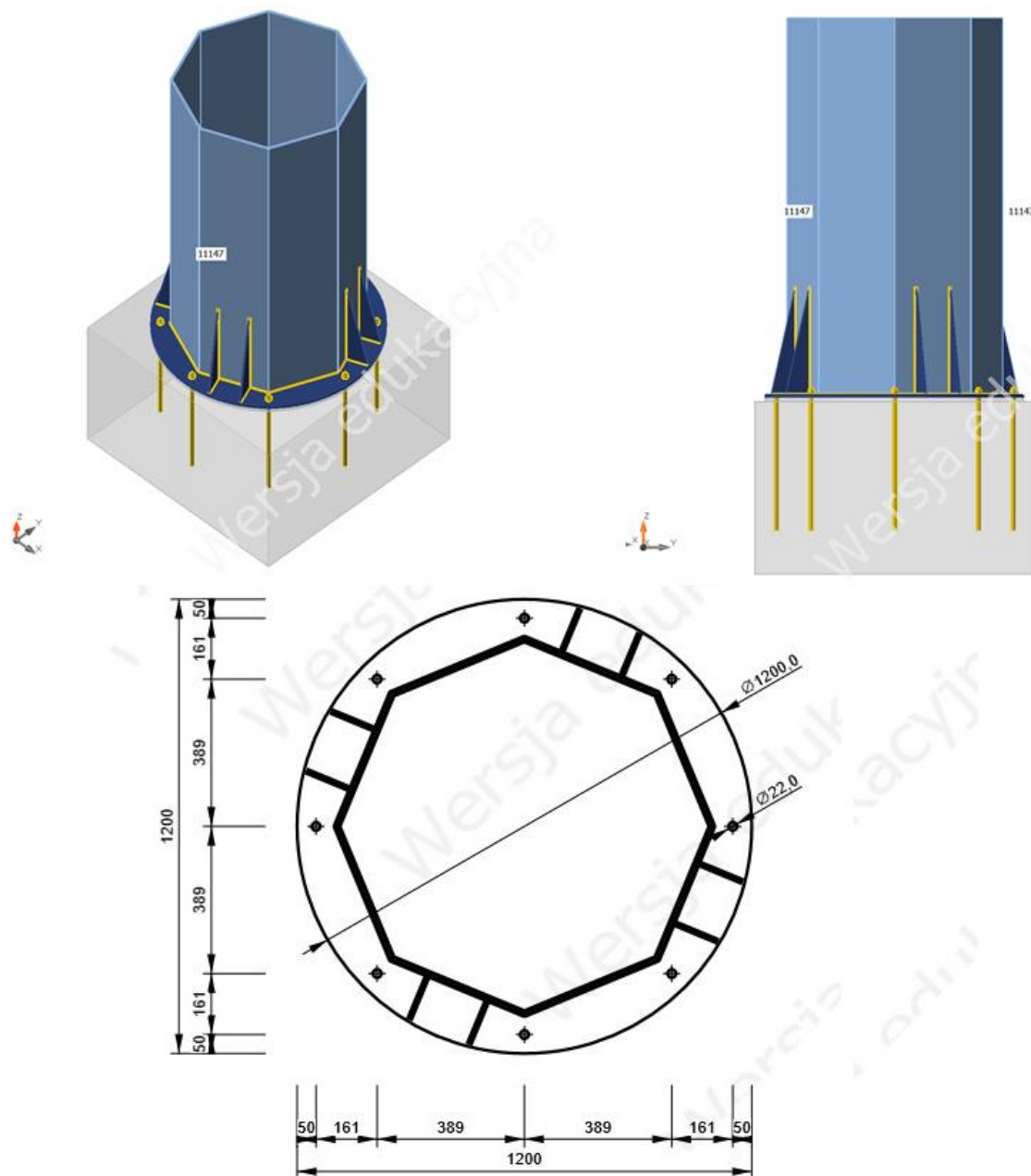
Przekrój nr	Pręt	Położenie	Obciążenie	Stopień wykorzystania warunku projektowego η [--]	Warunek projektowy	Opis
	nr	x [m]	nr			
CHS 177.8x8.0 3 - S355						Skratowanie przy słupach
12	9702	0,000	KO16	0,012	SP1100.00	Rozciąganie wg 6.2.3
	10183	6,147	KO19	0,410	SP1200.00	Ściskanie wg 6.2.4
	10568	6,648	KO17	0,004	SP3100.02	Ścinanie w osi z wg 6.2.6(2) Projektowanie plastyczne
	9800	1,690	KO13	0,004	SP3200.02	Ścinanie w osi y wg 6.2.6(2) Projektowanie plastyczne
	9800	4,828	KO19	0,006	SP3300.02	Wypadkowe ścinanie wg 6.2.6(2) Projektowanie plastyczne
	9800	6,759	KO13	0,073	SP4100.03	Zginanie względem osi y wg 6.2.5 Projektowanie plastyczne
	9800	6,759	KO19	0,063	SP5100.03	Zginanie względem osi z wg 6.2.5 Projektowanie plastyczne
	9800	6,759	KO19	0,010	SP6500.01	Zginanie dwukierunkowe, siła osiowa i ścinanie wg 6.2.9.1 i 6.2.10 Projektowanie plastyczne
	9800	6,759	KO12	0,169	SP6500.02	Zginanie względem osi y, siła osiowa i ścinanie wg 6.2.9.1 i 6.2.10 Projektowanie plastyczne
	9800	3,380	KO19	0,189	SP6500.03	Zginanie względem osi z, siła osiowa i ścinanie wg 6.2.9.1 i 6.2.10 Projektowanie plastyczne
	10183	6,147	KO19	0,914	ST1100.00	Stateczność Wyboczenie giętne względem głównej osi y wg 6.3.1
	10183	6,147	KO19	0,914	ST1300.00	Stateczność Wyboczenie giętne względem głównej osi z wg 6.3.1
	9800	6,759	KO2	0,941	ST3100.00	Stateczność Zginanie i wyboczenie względem głównych osi wg 6.3.3
	2067	0,000	KO21	0,000	SE0100.00	Użytkowość Pomijalne ugięcia
	9800	5,311	KO21	0,045	SE1100.00	Użytkowość Ugięcia w kierunku z
	9800	4,731	KO21	0,045	SE1200.00	Użytkowość Ugięcia w kierunku y

Każdy zastosowany element konstrukcji spełnia normowe wymagania nośności, naprężenia w elementach są poniżej 80 % wartości nominalnej stali, decydującymi wartościami dla całego ustroju są wyniki analizy stateczności.

5. KONSTRUOWANIE WĘZŁÓW

5.1. Podstawa słupa

Podstawę słupa nośnego opracowano w programie IDEA Statica. Słup ściskany osiowo przenosi siłę podłużną na fundament za pomocą poziomej blachy podstawy o grubości 14 mm, siła poprzeczna przenoszona jest poprzez kotwy. Na rysunku 70 przedstawiono rozmieszczenie dodatkowego uźebrowania, zastosowano żebra o grubości 8 mm.



Rys. 73. Podstawa słupa

Zastosowano 8 kotew M20 o klasie 8.8 i długości 600 mm.

5.1.1. Obciążenia podstawy słupa

Największe obciążenia podstawy słupa określa 16 kombinacja obliczeniowa, śnieg i wiatr wiejący od frontu, dane wyeksportowano z programu RFEM do IdeaStatica, wartości przedstawiono w tabeli 25.

Tab. 25. Obciążenia podstawy słupa

Nazwa	Element	N [kN]	Vy [kN]	Vz [kN]	Mx [kNm]	My [kNm]	Mz [kNm]
LC NL 16 śnieg po6 + wiatr od frontu po15(4)	11147 / Początek	2675,5	-48	-13,1	-1,8	0	0

5.1.2. Wyniki analizy

Naprężenia w płytach nie przekraczają 50 %, największa wartość wg. tabeli 26 występuje w podstawie. Na rysunku 74 poz. b przedstawiono wyniki analizy wyboczeniowej, wyznaczono współczynnik obciążenia krytycznego o wartości 10,73. Ze względu na zastosowanie uźebrowania odsunięto od podstawy możliwość występowania lokalnej niestateczności w blachach tworzących trzon słupa.

Tab. 26. Naprężenia w płytach – podstawa słupa

Płyta	tp [mm]	σ_{Ed} [MPa]	$\sigma_{c,Ed}$ [MPa]	fy [MPa]
Słup	12	95,5	0	>355
Podstawa	14	146,9	0	>355
Żebro	8	122,3	0	>355

W tabeli 27 przedstawiono wyniki analizy zakotwienia jako elementu przenoszącego siły poprzeczne. Analiza ścinania w płaszczyźnie styku poprzez tarcie wykazała bardziej korzystne rozwiązanie. Z uwagi na możliwe imperfekcje montażowe należy uznać, że część z kotew będzie przenosiła obciążenia wraz z siłami tarcia. Nośność obliczeniowa na ścinanie wynosi 683,1 kN, wykorzystane zostanie 7,3 % nośności bez uwzględnienia kotew.

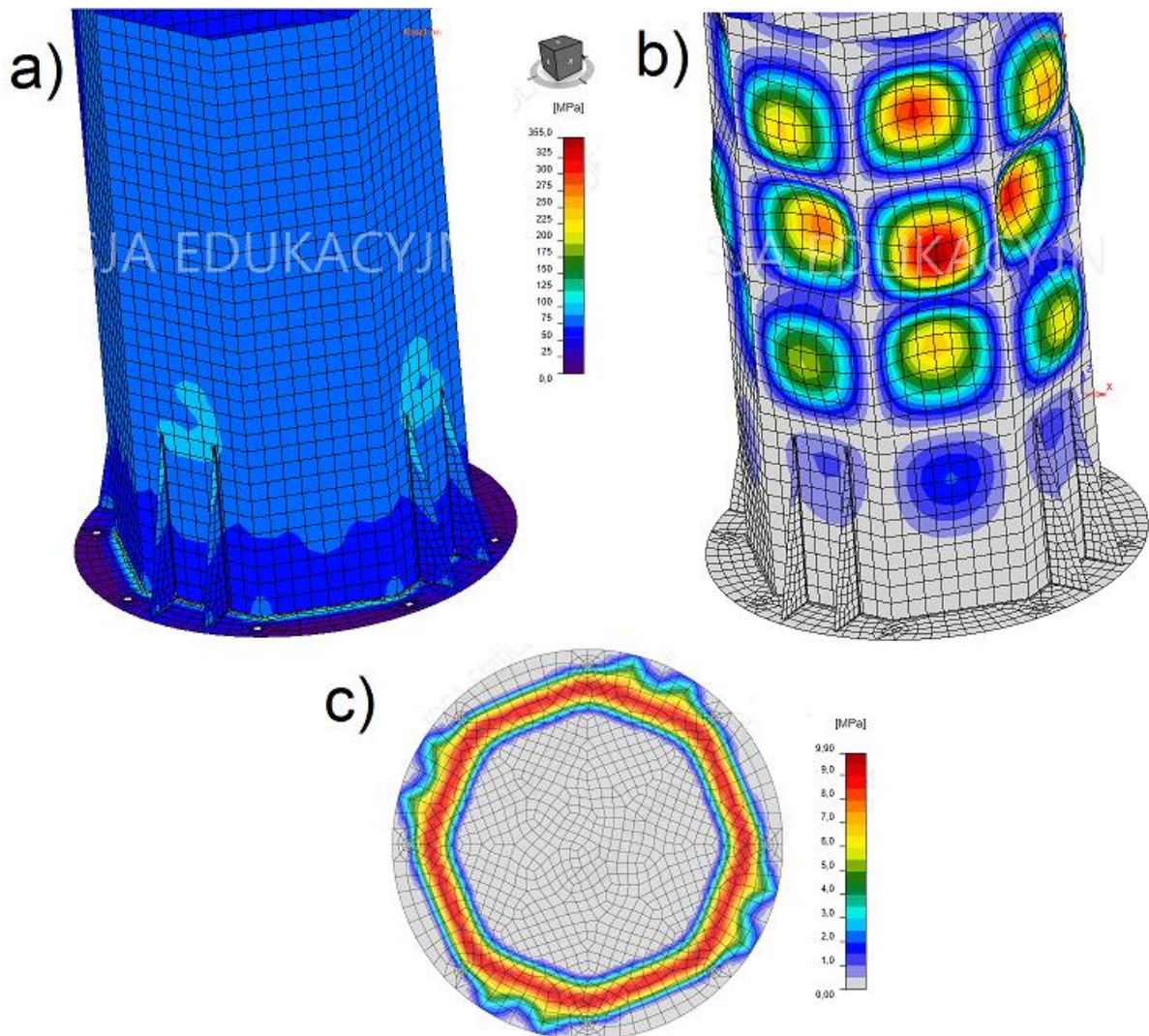
Tab. 27. Wyniki - kotwy

Kotwa	NEd [kN]	VEd [kN]	VRd,s [kN]	VRd,c [kN]	VRd,cp [kN]	Utt [%]	Uts [%]	Utts [%]
A5	0	6,6	22,5	52,6	472,7	0	91,8	88,0
A6	0	6,9	22,5	52,6	472,7	0	91,8	88,0

Zastosowano spoiny pachwinowe o szerokości 4 mm pomiędzy trzonem i podstawą, a także 3 mm w przypadku żeber. W tabeli 28 zestawiono decydujące wyniki analizy spoin.

Tab. 28. Wyniki – spoiny podstawy słupa

Spoina	T_w [mm]	L [mm]	$\sigma_{w,Ed}$ [MPa]	σ_{\perp} [MPa]	$\tau_{ }$ [MPa]	τ_{\perp} [MPa]	Ut [%]	Utc [%]
Podstawa - żebro	3,0	120	157,1	-73	37,5	-71	34,7	21,9
Słup – żebro	3,0	499	110,7	-45,1	44	-38,3	24,4	6,2
Podstawa – słup	4,0	3025	371,3	-137	16,4	-199	81,9	61,4

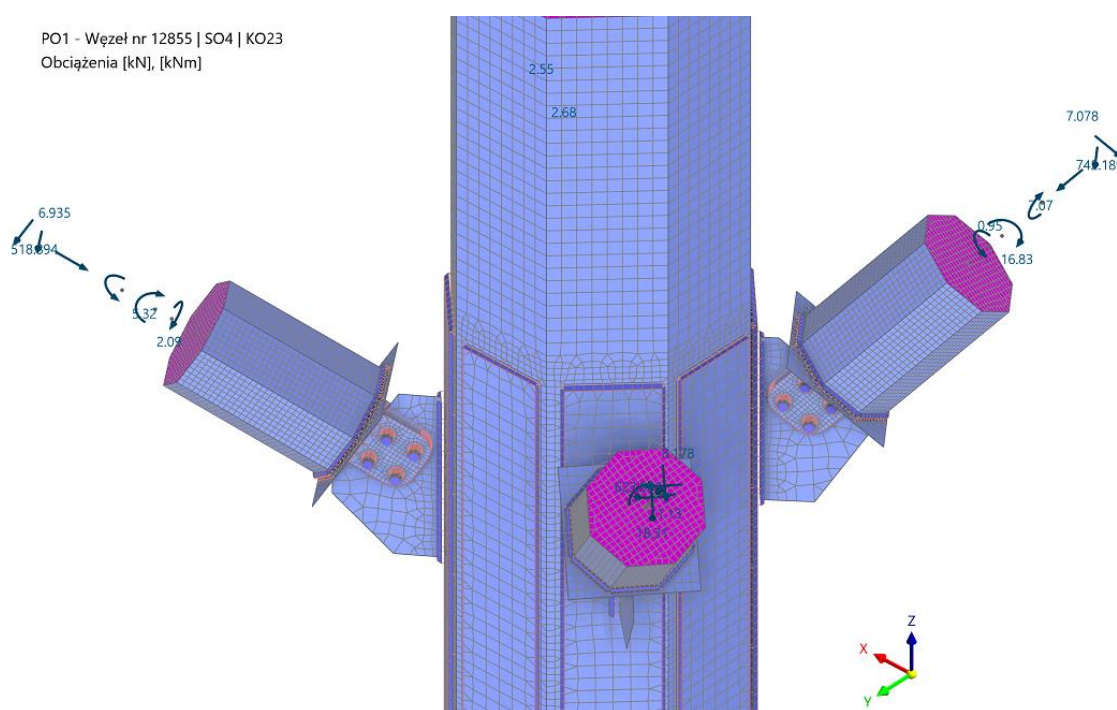


Rys. 74. Wyniki analizy – podstawa słupa

- a) Równoważne naprężenia
- b) Pierwszy kształt postaci wyboczeniowej
- c) Naprężenia w betonie

5.2. Węzeł słupa z gałęziami podporowymi

Węzeł zaprojektowano w programie RFEM 6, w module połączenia stalowe. Płaszczyznę blachy słupa wzmocniono poprzez zastosowanie dodatkowych blach nakładkowych, celem wyeliminowania niestateczności lokalnej projektowanego połączenia. Blacha węzłowa połączona spawem przenosi obciążenia poprzez połączenie śrubowe na podwójną blachę nakładkową. Przekrój gałęzi zakończono blachą czołową z przyspawanymi blachami nakładkowymi. Każdą z gałęzi połączono czterema łącznikami śrubowymi M27 10.9. Na rysunku 75 przedstawiono połączenie wraz z siatką obliczeniową i siłami.



Rys. 75. Węzeł – słup

Maksymalne przemieszczenia w projektowanym węźle wynoszą 9,2 mm, węzeł przemieszcza się wraz z połączeniami, jak można zaobserwować na rysunku 73 poz. b). Zastosowano blachy nakładkowe pozwalają pominąć wpływ sił węzłowych na ściany słupa. Rysunek 76 poz. a) przedstawia postać wyboczenia poszczególnych blach słupa, jest to analogiczna sytuacja jak w przypadku podstawy słupa.

Decydującym parametrem wytrzymałościowym jest nośność spoin pachwinowych. Poniżej przedstawiono wyciąg z obliczeń najbardziej wyężonej spoiny.

Stan graniczny nośności
Sprawdzenie spoiny pachwinowej

$$\eta_1 = \frac{\sigma_{eqv,w}}{f_u} \cdot \beta_w \cdot \gamma_{M2}$$

$$= \frac{443.400 \text{ N/mm}^2}{510.000 \text{ N/mm}^2} \cdot 0.90 \cdot 1.25$$

$$= 0.978$$

$$\eta_2 = \frac{|\sigma_{\perp}|}{0.9 \cdot f_u} \cdot \gamma_{M2}$$

$$= \frac{|-314.933 \text{ N/mm}^2|}{0.9 \cdot 510.000 \text{ N/mm}^2} \cdot 1.25$$

$$= 0.858$$

$$\eta = \max(\eta_1, \eta_2)$$

$$= \max(0.978, 0.858)$$

$$= 0.978$$

$$\eta = 0.978 \leq 1 \quad \checkmark$$

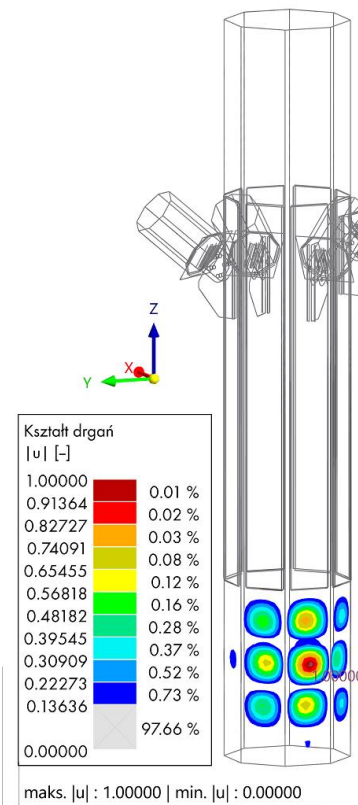
- η_1 Equivalent stress design check ratio
- $\sigma_{eqv,w}$ Napężenie równoważne spoiny
- f_u Wytrzymałość graniczna na rozciąganie
- β_w Współczynnik korelacji
- γ_{M2} Częściowy współczynnik bezpieczeństwa
- η_2 Perpendicular stress design check ratio
- σ_{\perp} Napężenie normalne prostopadłe do osi spoiny

4.5.3.2

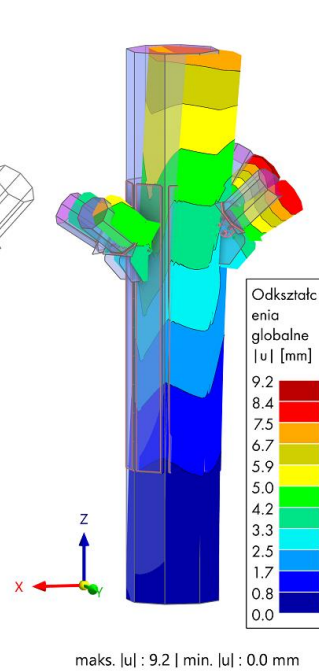
4.5.3.2

4.5.3.2

a) Znormalizowane przemieszczenia |u|



b) Przemieszczenia |u| [mm]



Rys. 76. Wyniki analizy – węzeł słup

Poniżej przedstawiono wyciąg z obliczeń łączników zastosowanych w połączeniu, zastosowanie dwuczętowego połączenia pozwoliło zapewnić nośność. Program prowadzi obliczenia i sprawdzenie warunków niezależnie od zastosowanych rozwiązań, część obliczeń takich jak: nośność na rozciąganie łącznika, przeciąganie, można pominąć ze względu na znikome wartości sił występujące w połączeniach, a także z uwagi na sposób wykonania połączenia. W tabeli 29 zestawiono wyniki obliczeń z uwzględnieniem lokalizacji najbardziej wyťažonych elementów.

Warunek projektowy UL1100 | EN 1993 | PN | 2015-08

Stan graniczny nośności
Sprawdzenie śruby

EN 1993-1-8, 3.6.1, tab. 3.4

Nośność na ścinanie:

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

$$= \frac{0.50 \cdot 1000.000 \text{ N/mm}^2 \cdot 459.0 \text{ mm}^2}{1.25}$$

$$= 183.60 \text{ kN}$$

$$\eta_{Fv} = \frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}}$$

$$= \frac{51.60 \text{ kN}}{183.60 \text{ kN}}$$

$$= 0.281$$

Nośność na docisk:

Edgeless bolt position, to left of force direction

$$k_{1,lef} = 2.5$$

Inner bolt position, to right of force direction

$$k_{1,rig} = \min \left(1.4 \cdot \left(\frac{p_{2,rig}}{d_0} \right) - 1.7, 2.5 \right)$$

$$= \min \left(1.4 \cdot \left(\frac{110.0 \text{ mm}}{30.0 \text{ mm}} \right) - 1.7, 2.5 \right)$$

$$= 2.50$$

$$k_1 = \min(k_{1,lef}, k_{1,rig})$$

$$= \min(2.50, 2.50)$$

$$= 2.50$$

Edgeless bolt position, in force direction

$$\alpha_b = 1 \quad \text{EN 1993-1-8, 3.6.1, tab. 3.4}$$

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

$$= \frac{2.50 \cdot 1.00 \cdot 470.000 \text{ N/mm}^2 \cdot 27.0 \text{ mm} \cdot 40.0 \text{ mm}}{1.25}$$

$$= 1015.20 \text{ kN}$$

$$\eta_{Fb} = \frac{F_{v,Ed}}{F_{b,Rd}}$$

$$= \frac{95.97 \text{ kN}}{1015.20 \text{ kN}}$$

$$= 0.095$$

Nośność na rozciąganie:

EN 1993-1-8, 3.6.1, tab. 3.4

$$F_{t,Rd} = \frac{k_2 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}}$$

$$= \frac{0.90 \cdot 1000.000 \text{ N/mm}^2 \cdot 459.0 \text{ mm}^2}{1.25}$$

$$= 330.48 \text{ kN}$$

$$\eta_{Ft} = \frac{F_{t,Ed}}{F_{t,Rd}}$$

$$= \frac{3.45 \text{ kN}}{330.48 \text{ kN}}$$

$$= 0.010$$

Nośność na przeciąganie:

EN 1993-1-8, 3.6.1, tab. 3.4

$$B_{p,Rd} = \frac{0.6 \cdot \pi \cdot d_m \cdot t_p \cdot f_u}{\gamma_{M2}}$$

$$= \frac{0.6 \cdot \pi \cdot 44.0 \text{ mm} \cdot 30.0 \text{ mm} \cdot 470.000 \text{ N/mm}^2}{1.25}$$

$$= 935.54 \text{ kN}$$

$$\eta_{Bp} = \frac{F_{t,Ed}}{B_{p,Rd}}$$

$$= \frac{3.45 \text{ kN}}{935.54 \text{ kN}}$$

$$= 0.004$$

Nośność na ścinanie z rozciąganiem:

EN 1993-1-8, 3.6.1, tab. 3.4

$$\eta_{Ft,Fv} = \frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1.4 \cdot F_{t,Rd}}$$

$$= \frac{51.60 \text{ kN}}{183.60 \text{ kN}} + \frac{3.45 \text{ kN}}{1.4 \cdot 330.48 \text{ kN}}$$

$$= 0.289$$

$$\eta = \max(\eta_{Fv}, \eta_{Fb}, \eta_{Ft}, \eta_{Bp}, \eta_{Ft,Fv})$$

$$= \max(0.281, 0.095, 0.010, 0.004, 0.289)$$

$$= 0.289$$

$$\eta = 0.289 \leq 1 \quad \checkmark$$

Stateczność

Analiza wyboczenia

$$\eta = \frac{f_{lim}}{f}$$

$$= \frac{15.00}{31.47}$$

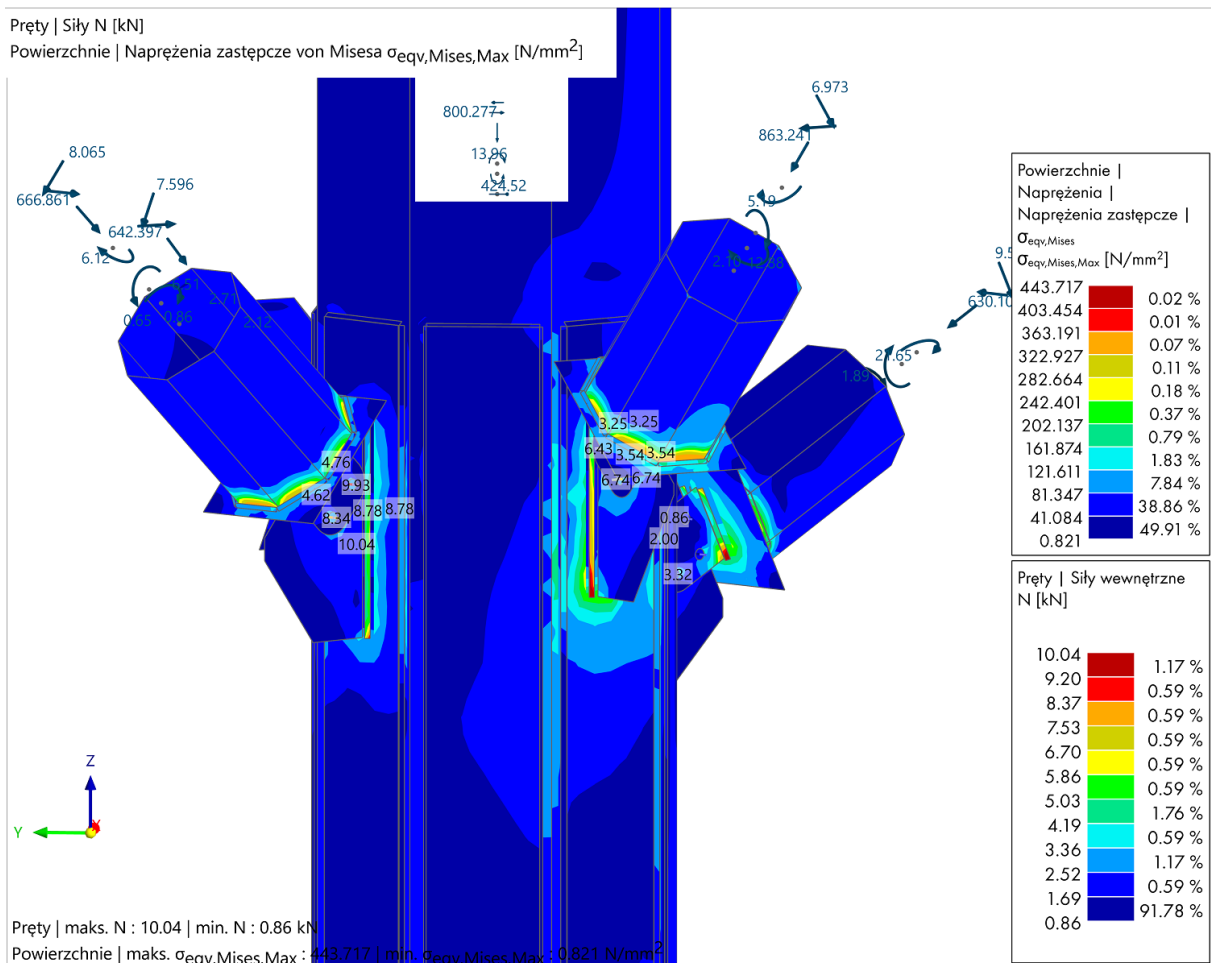
$$= 0.477$$

Współczynnik obciążenia krytycznego

$$31.47 \quad -- \quad > 15 \quad \checkmark$$

f_{lim} Współczynnik obciążenia granicznego

f Współczynnik obciążenia krytycznego



Rys. 77. Mapa naprężeniowa – połączenie słup

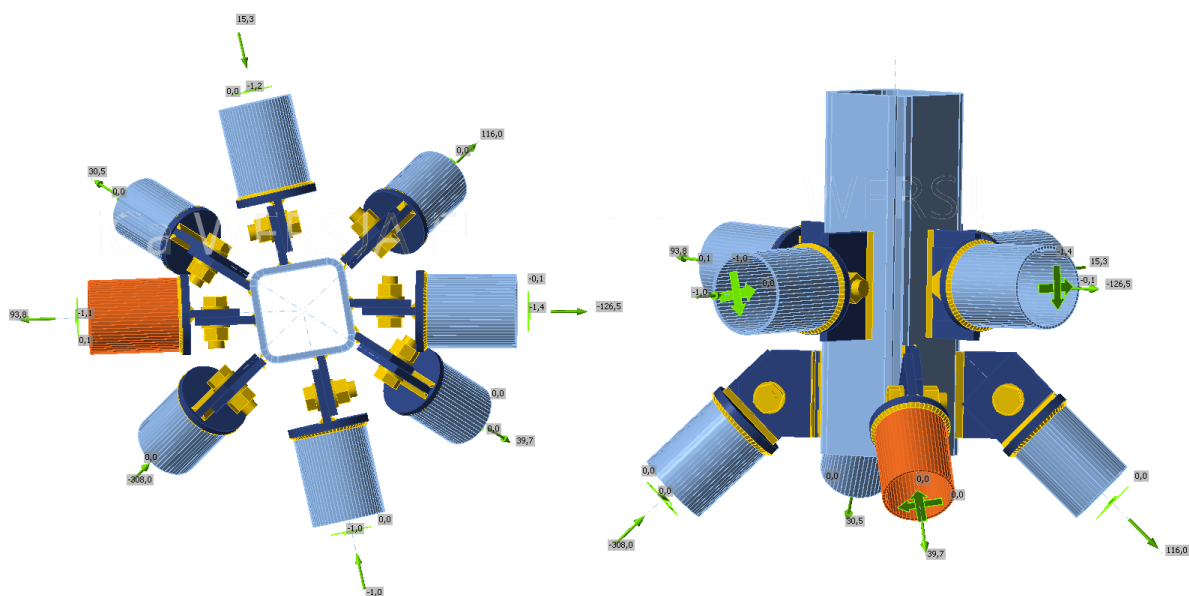
Mapa naprężeniowa na rysunku 77 pokazuje wartości w spoinach, wartość graniczna na rozciąganie projektowanej spoiny wynosi 510,0 N/mm².

Tab. 29. Wyniki analizy – węzeł słup

Węzeł nr	Część składowa		Obciążenie nr	Stopień wykorzystania warunku projektowego η [–]	Warunek projektowy	Opis
	Typ	Nazwa				
12855	Płyta	Pręt 3 Inne 5	KO30	0,023	UL1000.00	Stan graniczny nośności Sprawdzenie płyty
12855	Łącznik	Blacha łącząca 2 Łączniki Śruba 1, 2	KO25	0,788	UL1100.00	Stan graniczny nośności Sprawdzenie śruby
12855	Spoina	Blacha łącząca 2 Tongueplate 1 PlateCut 1 Spoina 1	KO25	0,978	UL1200.00	Stan graniczny nośności Sprawdzenie spoiny pachwinowej

5.3. Węzeł siatka górna – wariant z profilem zamkniętym

Zaprojektowano połączenie węzłowe w pasie górnym poprzez zastosowanie dodatkowego elementu w postaci profilu zamkniętego o wymiarach 250 x 250 x 16. Dodatkowy element przedstawiony na rysunku 78, umożliwia montaż podkonstrukcji wsporczej pokrycia. Proponowane rozwiązanie masą własną, pracochłonnością jest najbardziej optymalne, aczkolwiek obarczone możliwymi błędami wykonawczymi. Pojedyncza blacha, zamiast widelca umożliwia montaż elementu z błędnej strony, taka sama sytuacja dotyczy zastosowania pojedynczych łączników śrubowych.



Rys. 78. Połączenie profil

W tabeli 30 zestawiono obciążenia występujące w węźle, nieznaczne wartości momentów zginających spowodowane są sposobem modelowania prętów pasa górnego, wraz z ograniczoną możliwością modelowania graficznego w oprogramowaniu.

Tab. 30. Obciążenie w węźle – wariant 1

Kombinacja obciążeń	Element	N [kN]	Vy [kN]	Vz [kN]	Mx [kNm]	My [kNm]	Mz [kNm]
LC NL 18 śnieg po6 + wiatr tył po17(3)	7359 / koniec	39,7	0	0	0	0	0
	7372 / koniec	-308,0	0	0	0	0	0
	7380 / koniec	-1,0	0	-1,0	0	1,4	0,1
	7566 / koniec	116,0	0	0	0	0	0
	7569 / Początek	-126,5	-0,1	-1,4	0	-1,7	0,3
	7577 / koniec	30,5	0	0	0	0	0
	7581 / koniec	93,8	0,1	-1,1	0	1,4	0,4
7584 / Początek	15,3	0	-1,2	0	-1,7	0,1	

Naprężenia w płytach nie zostały przekroczone, stal S355 charakteryzuje się wytrzymałością na rozciąganie $f_u = 510$ MPa. Wg. tabeli 31 maksymalne wykorzystanie stali nie przekracza 70 %.

Tab. 31. Naprężenia w płytach – węzeł typ 1

Element	tp [mm]	σ_{Ed} [MPa]	ϵ_{PI} [%]	$\sigma_{c,Ed}$ [MPa]	Status
Środek- rura kwadratowa	16	356,0	0,5	0	OK
Błacha węzłowa	20	299,1	0	24,1	OK
Błacha łącząca	20	355,2	0,1	66,2	OK
Błacha czołowa	20	150,7	0	0	OK

5.3.1. Obliczanie łączników

Tab. 32. Łącznik – węzeł typ 1

Pozycja	Gatunek	$F_{t,Ed}$ [kN]	$F_{v,Ed}$ [kN]	$F_{b,Rd}$ [kN]	Utt [%]	Uts [%]	Utts [%]	Status
B6	M42 8.8	83,9	308	444,3	13	71,6	80,8	OK

Sposób obliczania łączników na przykładzie najbardziej wyjątkowego elementu przedstawiono poniżej, wykorzystano nośność w granicach 80 %.

Szczegółowe wyniki dla B6

Sprawdzenie wytrzymałości na rozciąganie (EN 1993-1-8 - Tabela 3.4)

$$F_{t,Rd} = \frac{k_2 f_{ub} A_s}{\gamma_{M2}} = 645,7 \text{ kN} \geq F_{t,Ed} = 83,9 \text{ kN}$$

Gdzie:

- $k_2 = 0,90$ – Współczynnik
- $f_{ub} = 800,0$ MPa – Wytrzymałość śruby na rozciąganie
- $A_s = 1121$ mm² – Pole przekroju czynnego śruby
- $\gamma_{M2} = 1,25$ – Współczynnik bezpieczeństwa

Sprawdzenie nośności na przeciągnięcie (EN 1993-1-8 - Tabela 3.4)

$$B_{p,Rd} = \frac{0,6 \pi d_m t_p f_u}{\gamma_{M2}} = 1048,2 \text{ kN} \geq F_{t,Ed} = 83,9 \text{ kN}$$

Gdzie:

- $d_m = 68$ mm – Średnia ze średnic wpisanej i opisanej na łbie śruby lub nakrętki (przyjmuje się mniejszą wartość średnią)
- $t_p = 20$ mm – Grubość płyty
- $f_u = 510,0$ MPa – Wytrzymałość na rozciąganie
- $\gamma_{M2} = 1,25$ – Współczynnik bezpieczeństwa

Sprawdzenie nośności ścinania (EN 1993-1-8 - Tabela 3.4)

$$F_{v,Rd} = \frac{\beta_v \alpha_v f_{ub} A}{\gamma_{M2}} = 430,5 \text{ kN} \geq F_{v,Ed} = 308,0 \text{ kN}$$

Gdzie:

- $\beta_v = 1,00$ – Współczynnik redukcyjny dla przekładek
- $\alpha_v = 0,60$ – Współczynnik redukcyjny dla naprężeń ścinających
- $f_{ub} = 800,0 \text{ MPa}$ – Wytrzymałość śruby na rozciąganie
- $A = 1121 \text{ mm}^2$ – Powierzchnia brutto przekroju śruby
- $\gamma_{M2} = 1,25$ – Współczynnik bezpieczeństwa

Nośność śruby na docisk (EN 1993-1-8 - Tabela 3.4)

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \alpha_b f_u d t}{\gamma_{M2}} = 444,3 \text{ kN} \geq F_{b,Ed} = 308,0 \text{ kN}$$

Gdzie:

- $k_1 = \min(2,8 \frac{e_2}{d_0} - 1,7, 1,4 \frac{p_2}{d_0} - 1,7, 2,5) = 2,50$ – Współczynnik odległości krawędzi i rozstawu śrub prostopadłej do kierunku przenoszenia obciążenia - EN 1993-1-8 - Tabela 3.4
- $\alpha_b = \min(\frac{e_1}{3d_0}, \frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4}, \frac{f_{ub}}{f_u}, 1) = 0,52$ – Współczynnik odległości końcowej i rozstawu śrub w kierunku działania obciążenia
- $e_2 = 85 \text{ mm}$ – Odległość do krawędzi blachy prostopadła do kierunku siły ścinającej
- $p_2 = \infty \text{ mm}$ – Odległość między śrubami prostopadłe do kierunku siły ścinającej
- $d_0 = 45 \text{ mm}$ – Średnica otworu na śrubę
- $e_1 = 70 \text{ mm}$ – Odległość do krawędzi blachy w kierunku siły ścinającej
- $p_1 = \infty \text{ mm}$ – Odległość między śrubami w kierunku siły ścinającej
- $f_{ub} = 800,0 \text{ MPa}$ – Wytrzymałość śruby na rozciąganie
- $f_u = 510,0 \text{ MPa}$ – Maksymalna wytrzymałość płyty
- $d = 42 \text{ mm}$ – Nominalna średnica łącznika
- $t = 20 \text{ mm}$ – Grubość blachy
- $\gamma_{M2} = 1,25$ – Współczynnik bezpieczeństwa

Wykorzystanie w rozciąganiu

$$\frac{F_{t,Ed}}{\min(F_{t,Rd}; B_{p,Rd})} = 0,13 \leq 1,0$$

Gdzie:

- $F_{t,Ed} = 83,9 \text{ kN}$ – Siła rozciągająca
- $F_{t,Rd} = 645,7 \text{ kN}$ – Nośność na rozciąganie
- $B_{p,Rd} = 1048,2 \text{ kN}$ – Nośność na przeciąganie

Wykorzystanie ścinania

$$\max(\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}}; \frac{F_{b,Ed}}{F_{b,Rd}}) = 0,72 \leq 1,0$$

Gdzie:

- $F_{v,Ed} = 308,0 \text{ kN}$ – Siła ścinająca (w decydującej płaszczyźnie ścinania)
- $F_{v,Rd} = 430,5 \text{ kN}$ – Nośność na ścinanie
- $F_{b,Ed} = 308,0 \text{ kN}$ – Siła docisku (dla płyty decydującej)
- $F_{b,Rd} = 444,3 \text{ kN}$ – Nośność na docisk

Interakcja rozciągania i ścinania (EN 1993-1-8 - Tabela 3.4)

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4 F_{t,Rd}} = 0,81 \leq 1,0$$

Gdzie:

$F_{v,Ed} = 308,0 \text{ kN}$ – Siła ścinająca (w decydującej płaszczyźnie ścinania)

$F_{v,Rd} = 430,5 \text{ kN}$ – Nośność na ścinanie

$F_{t,Ed} = 83,9 \text{ kN}$ – Siła rozciągająca

$F_{t,Rd} = 645,7 \text{ kN}$ – Nośność na rozciąganie

5.3.2. Spoiny

Przeprowadzone obliczenia spoin wykazały maksymalne wykorzystanie nośności U_t , sposób modelowania połączenia powoduje duże obciążenie dla spoin, należałoby rozważyć zastosowanie połączenia na widelec, w tabeli 33 zestawiono wyniki obliczeń.

Szczegółowe wyniki dla M649-w 3 / CPL6a

Sprawdzenie nośności spoiny (EN 1993-1-8 – Cl. 4.5.3.2)

$$\sigma_{w,Rd} = f_u / (\beta_w \gamma_{M2}) = 453,3 \text{ MPa} \geq \sigma_{w,Ed} = [\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)]^{0,5} = 447,8 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\perp,Rd} = 0,9 f_u / \gamma_{M2} = 367,2 \text{ MPa} \geq |\sigma_{\perp}| = 172,1 \text{ MPa}$$

gdzie:

$f_u = 510,0 \text{ MPa}$ – Wytrzymałość na rozciąganie

$\beta_w = 0,90$ – Współczynnik korelacji EN 1993-1-8 – Tabela 4.1

$\gamma_{M2} = 1,25$ – Współczynnik bezpieczeństwa

Wykorzystane naprężenie

$$U_t = \max\left(\frac{\sigma_{w,Ed}}{\sigma_{w,Rd}}; \frac{|\sigma_{\perp}|}{\sigma_{\perp,Rd}}\right) = 0,99 \leq 1,0$$

Gdzie:

$\sigma_{w,Ed} = 447,8 \text{ MPa}$ – Maksymalne naprężenie normalne poprzeczne do osi spoiny

$\sigma_{w,Rd} = 453,3 \text{ MPa}$ – Ekwiwalentna wytrzymałość naprężeniowa

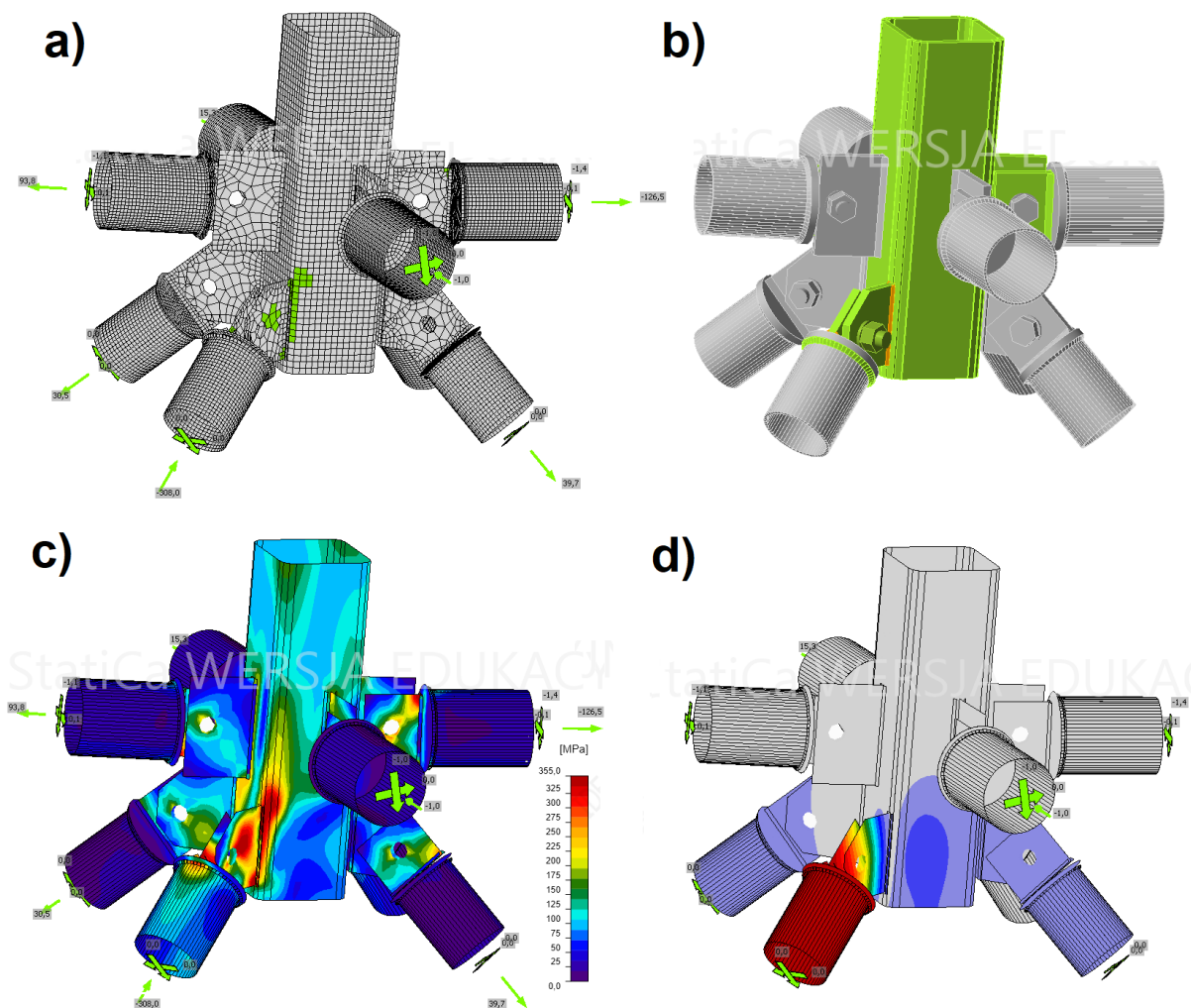
$|\sigma_{\perp}| = -172,1 \text{ MPa}$ – Naprężenie normalne prostopadłe do przekroju spoiny

$\sigma_{\perp,Rd} = 367,2 \text{ MPa}$ – Prostopadła wytrzymałość naprężeniowa

Tab. 33. Spoiny – węzeł typ 1

Element	Krawędź	Tw [mm]	L [mm]	$\sigma_{w,Ed}$ [MPa]	ϵ_{PI} [%]	σ_{\perp} [MPa]	τ_{\parallel} [MPa]	τ_{\perp} [MPa]	Ut [%]	Utc [%]	Status
Środek	Błacha węzłowa	8,00	198	444,7	0,2	-218,4	-191,0	-116,4	99,0	35,7	OK
			199	447,8	1,9	-172,1	158,6	178,4	98,8	65,6	OK
Błacha czołowa	Błacha łącząca	10,00	168	269,3	0	-119,8	82,5	-112,2	59,4	27,7	OK
			168	436,6	0	-209,8	105,2	194,4	96,3	55,5	OK

Oprogramowanie Idea Statica ujmuje w obliczeniach pełen zakres sił wewnętrznych modelowanie opiera się na metodzie CBFEM (Component Based Finite Element Model), utworzony model numeryczny przedstawiono na rysunku 79 poz. a). Największe wyężenie w połączeniu występuje w pręcie obciążonym siłą 308 kN, naprężenia w okolicy tego pręta można zaobserwować w pozycji c), Analiza stateczności przedstawiona na rysunku 79 poz. d) pierwszy kształt wyboczenia w pozycji d) wykazała współczynnik obciążenia krytycznego na poziomie 25,27.

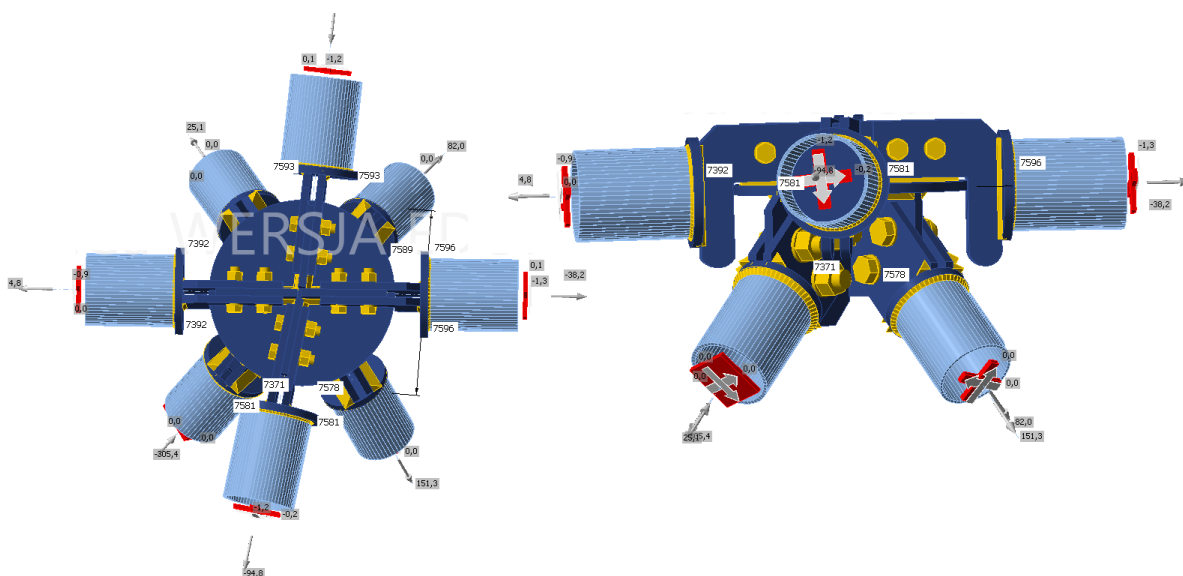


Rys. 79. Wyniki analizy połączenia z profilem

- a) siatka elementów skończonych;
- b) sprawdzenie ogólne;
- c) równoważne naprężenia;
- d) kształt lokalnego wyboczenia;

5.4. Węzeł siatka górna – wariant z blachą usztywniającą

Drugi wariant połączenia węzłowego zaprojektowano poprzez wprowadzenie dodatkowej blachy węzłowej do której zamocowano przy pomocy spoin blachy montażowe dla każdego pręta. Jest to modyfikacja zainspirowana systemem NASKA Prof. dr hab. inż. Jerzego K. Szlendaka. Z uwagi na kształt przekrycia każdy z węzłów należałoby zaprojektować indywidualnie. Pręty zakończono blachą czołową z podwójną blachą zamocowaną dwoma łącznikami śrubowymi. Proponowane rozwiązanie jest pracochłonne, wymaga użycia większej ilości materiałów, ale eliminuje część możliwych błędów montażowych.



Rys. 80. Połączenie blacha węzłowa

W tabeli 34 zestawiono siły węzłowe, nieznaczne różnice w stosunku do 1 wariantu wynikają z analizy sąsiedniego węzła.

Tab. 34. Obciążenia w węźle – wariant 2

Kombinacja obciążeń	Element	N [kN]	Vy [kN]	Vz [kN]	Mx [kNm]	My [kNm]	Mz [kNm]
LC NL 20 śnieg po9 + wiatr tyl po17(1)	7371 / koniec	-305,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	7384 / koniec	25,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	7392 / koniec	4,8	0,0	-0,9	0,0	1,3	0,0
	7578 / koniec	151,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	7581 / Początek	-94,8	-0,2	-1,2	0,0	-1,6	0,5
	7589 / koniec	82,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	7593 / koniec	-1,7	0,1	-1,2	0,0	1,5	0,5
	7596 / Początek	-38,2	0,1	-1,3	0,0	-1,8	-0,1

Przedstawiony sposób modelowania węzła wyróżnia się większymi naprężeniami w płytach, w tabeli 35 należy zauważyć, że płyta o grubości 8 mm osiąga wartość 4,2 % odkształcenia plastycznego, ale nie przekracza dopuszczalnych 5 %.

Tab. 35. Naprężenia w płytach – węzeł typ 2

Nazwa	tp [mm]	σ_{Ed} [MPa]	ϵ_{PI} [%]	$\sigma_{c,Ed}$ [MPa]	Status
Rura okrągła	8	363,8	4,2	0	OK
Blacha węzłowa	20	355,2	0,1	0	OK
Żebro	20	356,8	0,8	141,9	OK
Blacha łącząca	20	356,1	0,5	173,0	OK
Blacha czołowa	20	118,9	0	225,7	OK

Na łączniki działają zdecydowanie mniejsze siły tnące co pozwala na zastosowanie mniejszych rozmiarów, w tabeli 36 zawarto wartości nośności na rozciąganie i ścinanie wg. normy EN 1993-1-8.

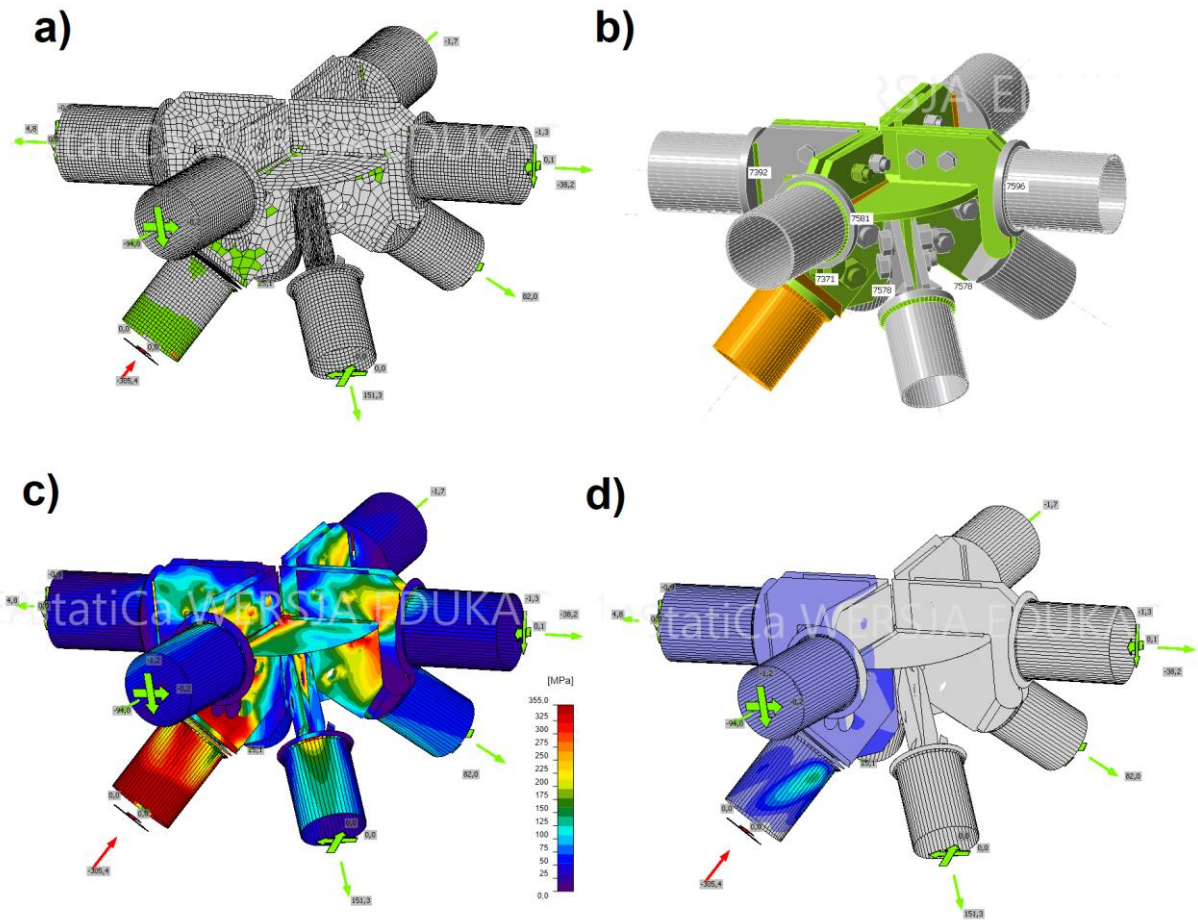
Tab. 36. Łączniki – węzeł typ 2

Pozycja	Gatunek	$F_{t,Ed}$ [kN]	$F_{v,Ed}$ [kN]	$F_{b,Rd}$ [kN]	U_{tt} [%]	U_{ts} [%]	U_{tts} [%]	$F_{t,Rd}$ [kN]	$F_{v,Rd}$ [kN]
B12	M27 8.8	66,5	84,3	429,5	25,1	47,9	65,8	264,4	176,3
B5	M36 8.8	44,9	107,3	420,1	9,5	36,0	41,0	470,6	313,7
B7	M42 8.8	41,1	162,4	427,1	6,4	38,0	42,3	645,7	430,5

Przedstawione rozwiązanie wykazuje mniejsze wykorzystanie nośności spoin, w tabeli 37 przedstawiono wyniki nie przekraczające 46 %.

Tab. 37. Spoiny – węzeł typ 2

Pozycja	Krawędź	T_w [mm]	L [mm]	$\sigma_{w,Ed}$ [MPa]	ϵ_{PI} [%]	σ_{\perp} [MPa]	$\tau_{ }$ [MPa]	τ_{\perp} [MPa]	U_t [%]	U_{tc} [%]	Status
Blacha czołowa	Rura okrągła	4,0	588	354,6	0	170,6	41,6	-174,6	78,2	23,8	OK
Blacha czołowa	Blacha łącząca	6,0	212	449,0	2,6	66,3	13,7	256,0	99,1	45,7	OK
Blacha węzłowa	Żebro	10,0	219	444,3	0	248,6	158,6	141,7	98,0	45,5	OK





Rys. 81. Wyniki analizy połączenia z blachą

- a) siatka elementów skończonych;
- b) sprawdzenie ogólne;
- c) równoważne naprężenia;
- d) kształt lokalnego wyboczenia;

5.5. Zestawienie materiałów – porównanie połączeń

W celach badawczych projektowano i badano dwa typy połączeń, ekonomiczne oraz inspirowane opatentowanym systemem. Obliczono nośności, a także porównano koszty wykonania wraz z oszacowaniem masy każdego z połączeń.

Tab. 38. Masa połączeń

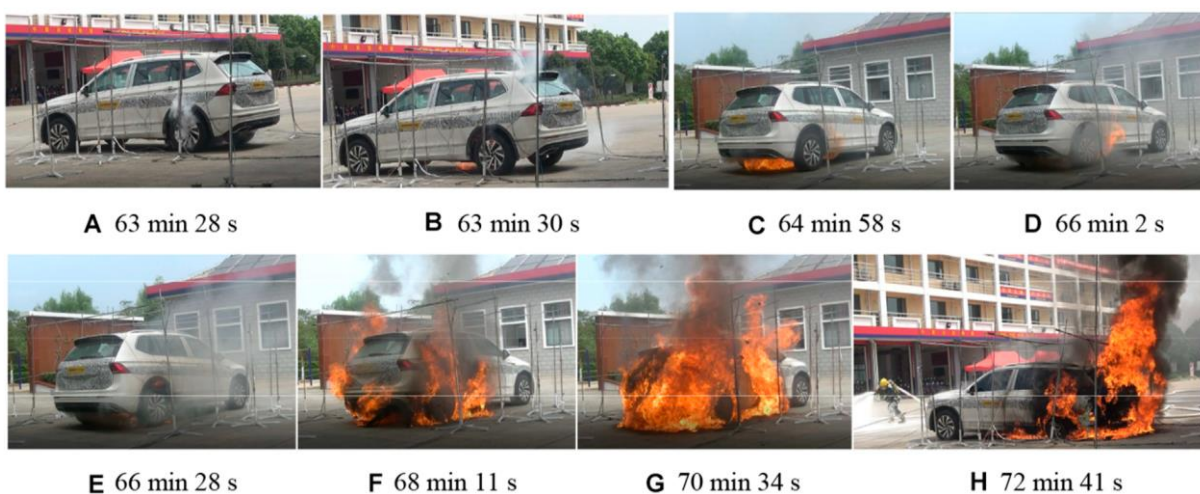
Połączenie	Stal [kg]	Zestaw śrub [kg]	Spoiny			Suma [kg]
			[mm]	[kg]	Suma	
	116,08	23,03	8	2,08	5,43	144,54
			6,3	1,21		
			10	2,14		
	241,11	26,83	4	0,3	8,98	267,94
			6	0,49		
			6,3	0,48		
			8	0,27		
			10	2,83		
			20	4,61		

Na podstawie obliczeń z tabeli 38 należy stwierdzić, że zastosowanie uproszczonego rozwiązania przynosi 50 % korzyści w masie całkowitej badanego połączenia, także pracochłonność jest zdecydowanie mniejsza, ilość blach, spoin i otworów jest zdecydowanie mniejsza. Wersja z blachą montażową jest dwukrotnie cięższa, ale umożliwia bardziej kontrolowany rozkład sił w węźle i poszczególnych elementach.

6. ANALIZA SYTUACJI WYJĄTKOWEJ

6.1. Pożar

Konstrukcja oparta jest na słupach o wysokości od 20 do 27 metrów nad poziomem gruntu. W związku z wysokością konstrukcja nośna nie jest narażona na znaczne obciążenie temperaturą na skutek pożaru. Wg. badań przedstawionych w literaturze [18] pożar samochodu elektrycznego osiąga temperaturę 843°C, a wysokość płomieni przedstawiona na rysunku 82 sięga 3 metrów. Nie ma także potrzeby stosowania systemów przewietrzania, ewakuację w razie pożaru można przeprowadzić w każdym kierunku, a ukształtowanie konstrukcji pozwala na odprowadzenie zadymienia na zewnątrz.



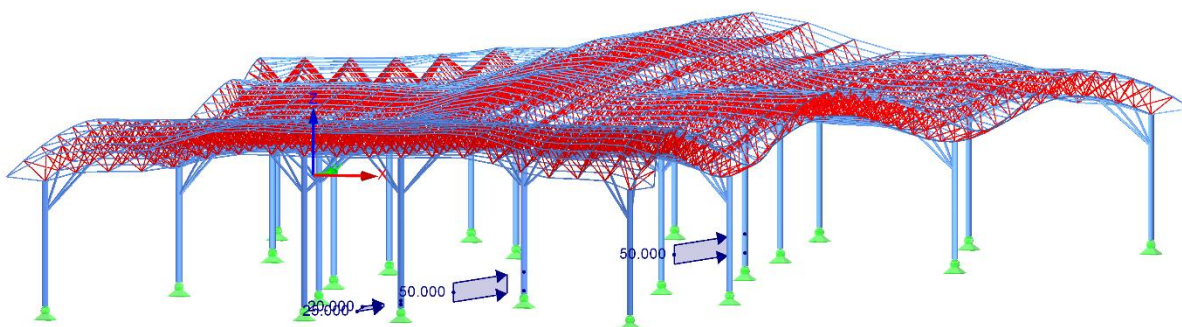
Rys. 82. Fazy pożaru samochodu elektrycznego wg. YanCui, BeihuaCong Characteristics and Hazards of Plug-In Hybrid Electric Vehicle Fires Caused by Lithium-Ion Battery Packs With Thermal Runaway

6.2. Uderzenie pojazdu

Przeprowadzono analizę sytuacji wyjątkowej w postaci uderzenia pojazdu w słup skrajny, a także w słup pośredni. Uderzenie samochodem osobowym z siłą 25 kN na wysokości 0,6 m i uderzenie autobusem o sile 50 kN przedstawiono na rysunku 80. Ze względu na średnicę i profil słupa, analizowane przypadki spowodowały dodatkowe przemieszczenia o wartości około 16-20 mm, konstrukcja wykazuje odporność na awarię spowodowaną dodatkowym obciążeniem poziomym w dolnej części.

PO18 : impact slup 1
 Obciążenia [kN/m]
 Typy prętów

Izometria

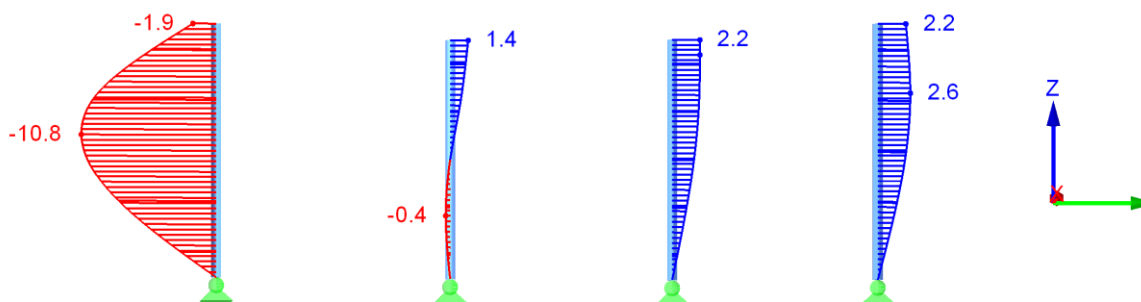


Rys. 83. Uderzenie pojazdu – lokalizacja

Na rysunku 84 przedstawiono odkształcenia spowodowane uderzeniem, w górnym rzędzie stan przed kolizją, a dolny odkształcenia w wyniku kolizji pojazdu. Do kombinacji obciążeniowej nr 13 wprowadzono dodatkowy przypadek PO18 z rysunku 83.

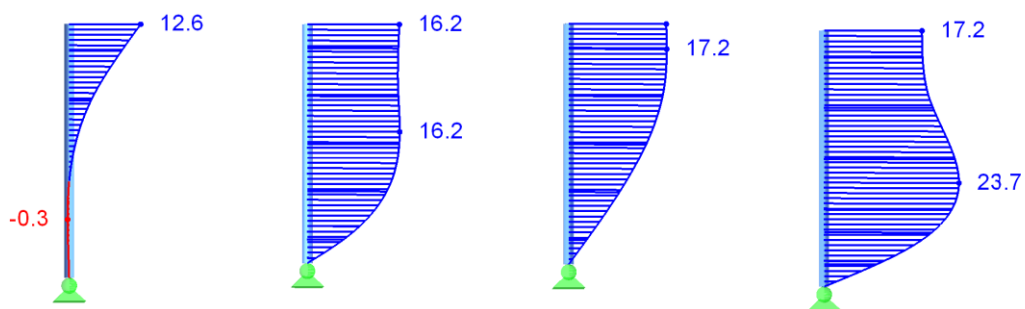
KO13 : śnieg po9 + wiatr z lewej po14
 Odkształcenia lokalne u-y

Max u-y: 2.6, Min u-y: -10.8 [mm]



KO27 : impact 1
 Odkształcenia lokalne u-y

Max u-y: 23.7, Min u-y: -0.3 [mm]



Rys. 84. Uderzenie pojazdu – odkształcenia słupa

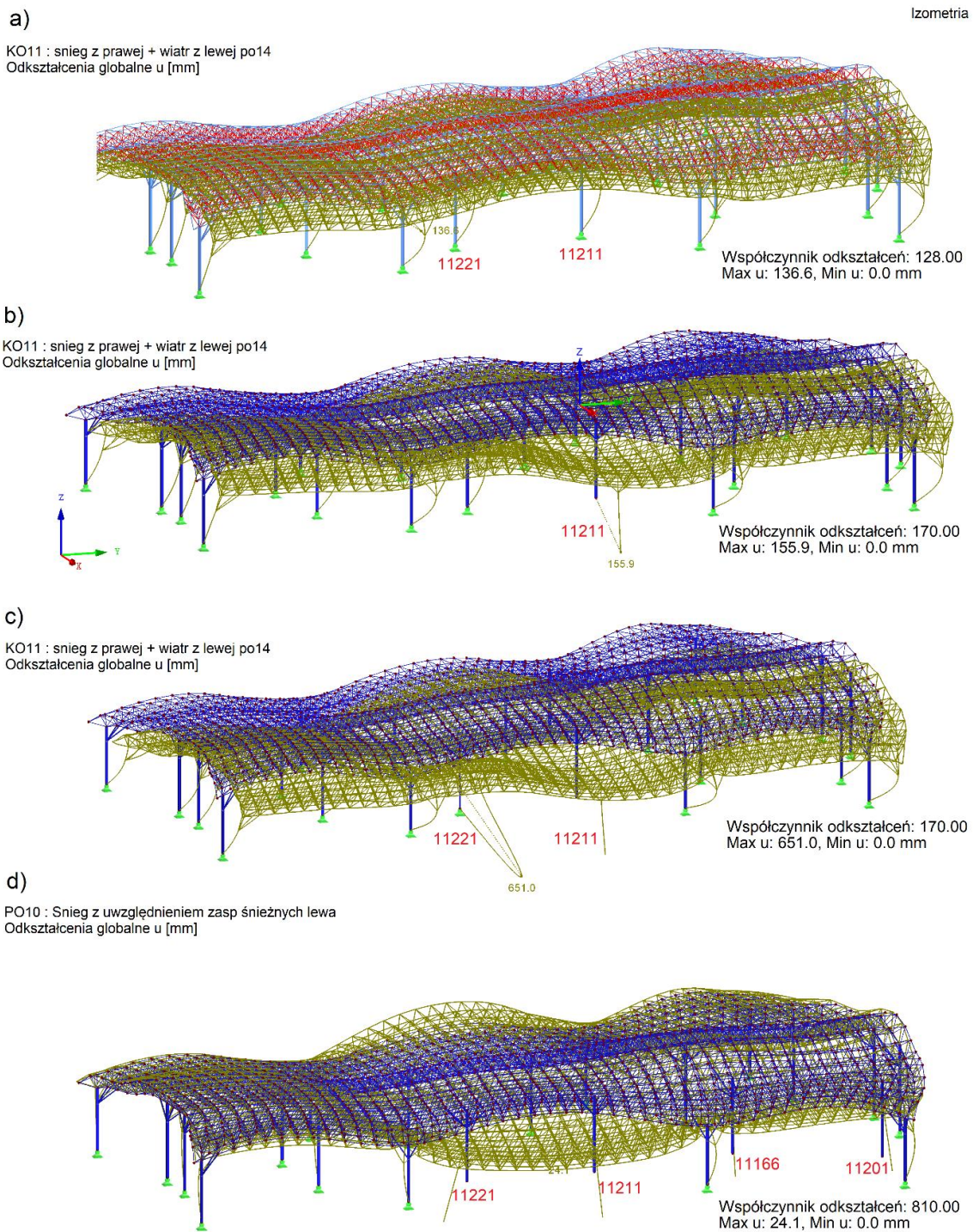
6.3. Uszkodzenie podstawy

Analizowano przypadek całkowitego uszkodzenia podstawy, podstawy wraz z częścią drugiego słupa, a także niestateczność 4 wewnętrznych słupów. Stan normalny konstrukcji wykazuje możliwe całkowite odkształcenie na poziomie 136,6 mm, konstrukcja przedstawiona na rysunku 82 pozycja a, w całości równomiernie ulega odkształceniu.

Po usunięciu podpory wewnętrznego słupa nr 11211 widocznego na rysunku 82 pozycja b), konstrukcja ulega stosunkowo niedużemu odkształceniu, wartość odkształcenia zwiększa się do 155,9 mm w obrębie uszkodzonego elementu, należy zauważyć, że znaczny obszar połączenia przy słupie ulega zapadnięciu, konstrukcja w dalszym ciągu zachowuje nośność, nie dochodzi do katastrofy budowlanej.

Drugi przypadek przedstawiony na rysunku c) przedstawia uszkodzenie podstawy słupa wewnętrznego nr 11211 wraz z częściowym uszkodzeniem sąsiedniego słupa nr 11221. Stan po uszkodzeniu przedstawia znaczne ugięcie konstrukcji, odkształcenie o wartości 651 mm nie powoduje zniszczenia konstrukcji, aczkolwiek elementy poszycia wraz z podkonstrukcją uległy by częściowemu zniszczeniu.

Trzeci przypadek na rysunku pozycja d) przedstawia uszkodzenie 4 kolejnych słupów. Konstrukcja obciążona śniegiem wykazuje się wystarczającą nośnością, wprowadzenie do obliczeń obciążeń wiatrowych powoduje utratę stateczności całej konstrukcji.



Rys. 85. Uszkodzenie podstawy słupa – 3 przypadki

- a) układ nieuszkodzony
- b) uszkodzona podstawa jednego słupa
- c) uszkodzona podstawa słupa wraz z częściowym zniszczeniem sąsiedniego słupa,
- d) uszkodzone 4 słupy

7. POSUMOWANIE

Zaprojektowanie przedstawionej w pracy konstrukcji o nietuzinkowym kształcie wiąże się z wieloma aspektami branży budowlanej. Poprzez zastosowanie rozwiązania w postaci przekryć strukturalnych pozwalających na zadaszenie znacznych obszarów przy zastosowaniu stosunkowo małej ilości podpór zaprojektowano wstępny ustrój nośny, który modyfikowano tak aby uzyskać kształt współgrający z siłami natury. Przeprowadzono wielokryterialne analizy optymalizujące elementy konstrukcji pod względem architektonicznym, funkcjonalnym, wytrzymałościowym a także kosztowym. Celem pracy było przedstawienie procesu projektowego wraz z analityczną optymalizacją poprzez zastosowanie zaawansowanych narzędzi obliczeniowych.

W ramach przeprowadzonego procesu projektowego poszukiwano optymalnej formy architektonicznej poprzez modyfikację kształtu na podstawie analiz oddziaływań śniegowych i wiatrowych. Metodą iteracyjną wprowadzano uwypuklenia i wypłaszczenia w celu osiągnięcia pożądanej formy. Przeprowadzono analizę geometryczną pojedynczego elementu wypełnienia eliminując doprowadzanie prętów pod zbyt dużymi kątami. Słupy nośne zlokalizowano po obwodzie konstrukcji, analizowano układ słupów wewnętrznych poprzez zmianę ilości i lokalizacji, optymalne i naturalne miejsca podpór określono w zagłębieniach połączenia dachowej.

Przeprowadzono analizę obciążeń śniegowych na podstawie obowiązujących norm, a także dostępnej literatury, należy zauważyć że normowe rozwiązanie wprowadza daleko idące uproszczenia w przypadku badanej konstrukcji. Przeprowadzono szczegółową analizę kształtu a następnie bazując na normowych rozwiązaniach zmodyfikowano współczynniki obciążeń wraz z wyznaczeniem poszczególnych obszarów. Analizę przeprowadzono wraz z szczegółowym badaniem konstrukcji w tunelu aerodynamicznym. Badano sposób pracy konstrukcji poprzez obserwację przepływu cząsteczek w newralgicznych obszarach, pozwoliło to na określenie poszczególnych stref obciążeń śniegiem wraz z obszarami występowania zasp, a także miejscami bez utrzymującego się śniegu.

Przeprowadzona analiza obciążeń w tunelu aerodynamicznym pozwoliła na wprowadzenie właściwych obciążeń skupionych w węzłach badanej konstrukcji, model obciążono jako powłokę tak aby wyeliminować przepływy pomiędzy poszczególnymi elementami konstrukcji. Analiza pozwoliła na pełną optymalizację kształtu stref okapowych a także określiła obciążenia jakimi poddawane są słupy nośne.

Na podstawie analizy statyczno-wytrzymałościowej stwierdzono, że konstrukcja przenosi obciążenia równomiernie na całej powierzchni, do współpracy włączone są wszystkie elementy połączeń, zróżnicowanie przekrojów poszczególnych pasów pozwala na łatwiejszą identyfikację przy montażu, a także ujednolica stopień wyężenia elementów. Analiza wykazała, że w miejscu dodatkowych podparć w postaci gałęzi występują większe obciążenia elementów, co skutkowało zwiększeniem przekroju w obrębie tych węzłów. Słupy przenoszą znaczne siły na fundament, ale kluczowym kryterium w doborze przekroju były względy architektoniczne a także ograniczenie występowania imperfekcji w obrębie podstawy i węzła gałęziowego. Na podstawie literatury określono dopuszczalne odkształcenia w stanie granicznym użyteczności, zastosowane przekroje powodują stosunkowo małe przemieszczenia węzłowe, a także małe ugięcia poszczególnych elementów.

W konstruowaniu węzłów charakteryzujących się znacznym stopniem skomplikowania posłużono się dedykowanym oprogramowaniem. Płyty trzonu słupa usztywniono dodatkowymi żebrami, które wykazały się znaczną wytrzymałością naprężeniową. Poprzez wprowadzenie dodatkowych elementów uniknięto miejscowych deformacji na styku z podstawą. Przeprowadzona analiza połączenia słupa z gałęzią podporową wykazała potrzebę zastosowania wzmocnienia trzonu słupa w obrębie węzła, zastosowanie nakładek rozkłada naprężenia na większym obszarze i ogranicza lokalne deformacje.

Przeprowadzono badanie dwóch rozwiązań połączeń węzłowych pasa górnego, poprzez zastosowanie ekonomicznego i lekkiego rozwiązania, a także zmodyfikowanego rozwiązania systemowego. Pierwsze z proponowanych rozwiązań spełnia założenia wytrzymałościowe, jednakże siły w poszczególnych elementach wywołują znaczne naprężenia, rozwiązanie może w dłuższej perspektywie sprawiać problemy natury zmęczeniowej. Drugie z proponowanych rozwiązań przenosi siły w sposób bardziej zrównoważony, mnogość blach, spoin i łączników pozwala na rozkład naprężenia na większej powierzchni. Analiza pracochłonności i użytych materiałów pozwoliła stwierdzić, że podejście uproszczone jest bardziej ekonomiczne, lecz wady tego rozwiązania eliminują możliwość jego zastosowania.

Przeprowadzono analizę zniszczenia elementów konstrukcji poprzez oddziaływanie wysokiej temperatury, uderzenia pojazdem w słup a także uszkodzeniem słupa np. w wyniku aktu terrorystycznego. Analiza możliwości zniszczenia przez pożar pojazdu elektrycznego wykazała wg. dostępnych opracowań, że ze względu na wysokość konstrukcji nad poziomem gruntu można wyeliminować zagrożenie pożarowe. Analiza uderzenia pojazdem w słup wykazała znaczną odporność elementu ze względu na zastosowanie dużego przekroju. Uszkodzenie jednego ze słupów nie spowoduje znacznych szkód w nośności całego obiektu,

w wyniku przeprowadzonych analiz wprowadzono wewnętrzne słupy aby ograniczyć ryzyko awarii.

Nawiązując do postawionych założeń projektowych można stwierdzić, że spełnienie szeregu norm i warunków wymaga szerokiego spojrzenia na projektowany ustrój, założenia zostały pozytywnie zweryfikowane badaniami i analizą numeryczną. Przeprowadzone prace badawcze wykazały potrzebę stosowania nowoczesnych metod analitycznych. Przy wykonywaniu konstrukcji tego typu należało by przeprowadzić odrębne analizy wraz z uwzględnieniem wszystkich występujących połączeń.

Bibliografia

1. PN-EN 1990. Eurokod: Podstawy projektowania konstrukcji
2. PN-EN 1991-1-1:2004 Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-1: Ciężar objętościowy, ciężar własny, obciążenia użytkowe w budynkach
3. PN-EN 1991-1-3:2005 Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-3: Obciążenie śniegiem
4. PN-EN 1991-1-4:2009 Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-4: Oddziaływania wiatru
5. PN-EN 1993-1-1: Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków
6. Bródka J. Przekrycia strukturalne, Arkady Warszawa, 1985
7. Bródka J. Łubiński M. Lekkie konstrukcje stalowe. Wyd. II. Arkady Warszawa 1971
8. Bródka J. Rurowe konstrukcje stalowe. Wyd. I. Arkady 1968
9. Pałkowski Sz.: Konstrukcje stalowe. Wybrane zagadnienia obliczania i projektowania Wyd. II. PWN Warszawa 2010r.
10. Kurzawa Z. Stalowe konstrukcje prętowe. Część 2. Struktury przestrzenne przekrycia ciągnowe maszty i wieże. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2011
11. Bródka J. Konstrukcje stalowe z kształtowników zamkniętych. Tom 1. PWT, 2016
12. Bródka J. Kozłowski A. Projektowanie i obliczanie połączeń i węzłów konstrukcji stalowych. Tom 1 i 2, Wyd. II PWT 2013r.
13. Jankowska-Sandberg J. Wybrane zagadnienia stateczności dźwigarów łukowych i kratowych. Wydawnictwo uczelniane Politechniki Koszalińskiej, 2018
14. Labocha S. Paluszyński J. Stalowe słupy powłokowe. PWN, 2017
15. Majewski M. Przekrycia powłokowe. Geometryczne kształtowanie w projektowaniu architektonicznym, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, 1997
16. Łubiński M. Filipowicz A. Żółtowski W. Konstrukcje metalowe. Część I i II. Arkady, Wyd. 2 zm. 2003
17. Szlendak J. Innowacyjne węzły konstrukcji stalowych. Wyd I. PWN, 2019
18. YanCui, Beihua Cong Characteristics and Hazardsof Plug-In Hybrid Electric Vehicle Fires Caused by Lithium-Ion Battery Packs With Thermal Runaway, 2022

Spis rysunków

Rys. 1. Plan zagospodarowania terenu	9
Rys. 2. Plan zagospodarowania	10
Rys. 3. Projekt parkingu– lokalizacja słupów	11
Rys. 4. Rzuty bryły konstrukcji	12
Rys. 5. Punkty kontrolne struktury	12
Rys. 6. Element konstrukcyjny.....	13
Rys. 7. Podkonstrukcja - przekroje.....	13
Rys. 8. Lokalizacja świetlików.....	14
Rys. 9. Siatka słupów	14
Rys. 10. Widok nawy bocznej wraz z rozstawem słupów.....	15
Rys. 11. Rozstaw słupów wewnętrznych [m].....	15
Rys. 12. Geometria przekroju słupa i gałęzi (RFEM).....	16
Rys. 13. Rozmieszczenie podpór gałęziowych	17
Rys. 14. Zastosowane sposoby podparcia konstrukcji.	17
Rys. 15. Proces modelowania modułu.....	18
Rys. 16. Przekrój z układem przestrzennym	19
Rys. 17. Konfiguracja prętów warstwowych.....	20
Rys. 18. Konstrukcja wsporcza	23
Rys. 19. Blacha trapezowa (Arcelor Mittal Construction Polska Sp. z o. o.)	23
Rys. 20. Typoszereg materiału pokrycia	24
Rys. 21. Przemieszczenia w konstrukcji wsporczej	25
Rys. 22. Obciążenie stałe PO2.....	26
Rys. 23. Obciążenie PO2	26
Rys. 24. Strefa obciążenia śniegiem.....	27
Rys. 25. Współczynnik kształtu dachu- dachy dwupołaciowe EN-1991-1-3; Rysunek 5.3	29
Rys. 26. Wyznaczenie wartości obciążenia węzłowego.....	29
Rys. 27. Obciążenie śniegiem wg. EN 1911-1-3, punkt 5.3.3.....	30
Rys. 28. Przypadki obciążenia śniegiem – lokalizacja obciążeń.....	30
Rys. 29. Przypadki obciążenia śniegiem – lokalizacja zasp.....	31
Rys. 30. Współczynnik kształtu dachu dla dachów walcowych	32
Rys. 31. Przypadki obciążenia śniegiem – lokalizacja obciążeń dla wiatru prostopadłego	33
Rys. 32. Interakcja poprzecznych obciążeń wiatrowych z śniegowymi	34
Rys. 33. Interakcja podłużna obciążeń wiatrowych z śniegowymi (RFEM)	34
Rys. 34. Strefa obciążenia wiatrem	35
Rys. 35. Profil wiatru – prędkość wiatru, intensywność turbulencji.....	36

Rys. 36. Wymiary tunelu - w zależności od kierunku wiatru (RWIND).....	37
Rys. 37. Lokalizacja punktów pomiarowych – do tabeli.....	37
Rys. 38. Mapa ciśnienia powierzchniowego (RWIND)	38
Rys. 39. Współczynnik C_p powierzchni (RWIND).....	39
Rys. 40. Pola przepływu (RWIND)	40
Rys. 41. Linie prądu – prędkość wiatru wokół i za konstrukcją (RWIND).....	41
Rys. 42. Linie prądu – detale (RWIND)	41
Rys. 43. Model 3D konstrukcji w programie RFEM.....	42
Rys. 44. Odształcenia globalne KO21	45
Rys. 45. Pas dolny – SGU.....	46
Rys. 46. Odształcenia SGU pasa dolnego.....	46
Rys. 47. Ściskanie i rozciąganie – siatka górna	47
Rys. 48. Wykres koncentracji wyników – siły normalne	49
Rys. 49. Wykres koncentracji wyników – siły tnące	49
Rys. 50. Wykres koncentracji wyników – momenty	50
Rys. 51. Ściskanie i rozciąganie – siatka dolna	51
Rys. 52. Wykres koncentracji wyników – siły normalne	52
Rys. 53. Wykres koncentracji wyników – siły tnące	52
Rys. 54. Wykres koncentracji wyników – momenty	53
Rys. 55. Ściskanie i rozciąganie – skratowanie	53
Rys. 56. Siły normalne – skratowanie.....	54
Rys. 57. Słup narożny- 11111	56
Rys. 58. Słup wewnętrzny-11147	56
Rys. 59. Siły normalne- słup (elementy skończone).....	57
Rys. 60. Siły tnące - słup.....	57
Rys. 61. Momenty – słup	58
Rys. 62. Siły normalne - gałąź.....	59
Rys. 63. Siły tnące - gałąź.....	60
Rys. 64. Momenty – gałąź	60
Rys. 65. Postacie drgań własnych.....	62
Rys. 66. Naprężenia od siły normalnej i momentów zginających	64
Rys. 67. Naprężenia – pas górny.....	64
Rys. 68. Naprężenia – pas dolny	65
Rys. 69. Naprężenia –skratowanie	66
Rys. 70. Naprężenia w słupach	66
Rys. 71. Postacie wybocheniowe – przekrój wielokątny	67
Rys. 72. Postacie wybożenia – przekrój rurowy	68

Rys. 73. Podstawa słupa	73
Rys. 74. Wyniki analizy – podstawa słupa	75
Rys. 75. Węzeł – słup	76
Rys. 76. Wyniki analizy – węzeł słup	77
Rys. 77. Mapa naprężeniowa – połączenie słup	79
Rys. 78. Połączenie profil	80
Rys. 79. Wyniki analizy połączenia z profilem	84
Rys. 80. Połączenie blacha węzłowa	85
Rys. 81. Wyniki analizy połączenia z blachą	87
Rys. 82. Fazy pożaru samochodu elektrycznego	89
Rys. 83. Uderzenie pojazdu – lokalizacja	90
Rys. 84. Uderzenie pojazdu – odkształcenia słupa	90
Rys. 85. Uszkodzenie podstawy słupa – 3 przypadki	92

Spis tabeli

Tab. 1. Charakterystyka przekroju słup i gałąź (RFEM)	16
Tab. 2. Charakterystyka przekroju siatki górnej i dolnej	20
Tab. 3. Charakterystyka skratownia.....	21
Tab. 4. Zestawienie ilościowe materiału.....	22
Tab. 5. Zestawienie reakcji węzłowych w stosunku do przemieszczeń	25
Tab. 6. Parametry profilu wiatru	36
Tab. 7. Wartość ciśnienia zewnętrznego z współczynnikiem C_p w punktach kontrolnych ..	38
Tab. 8. Przypadki obliczeniowe	43
Tab. 9. Sytuacje obliczeniowe	43
Tab. 10. Kombinacje obciążeniowe	44
Tab. 11. Zestawienie maksymalnych sił w siatce górnej	48
Tab. 12. Zestawienie maksymalnych sił w elementach siatki dolnej	51
Tab. 13. Wyniki dla skratowania	54
Tab. 14. Wyniki dla słupów	55
Tab. 15. Wyniki dla gałęzi	58
Tab. 16. Współczynniki obciążenia krytycznego	61
Tab. 17. Długości efektywne i obciążenia krytyczne	62
Tab. 18. Naprężenia na prętach według przekrojów	63
Tab. 19. Wymiarowanie - słup.....	69
Tab. 20. Wymiarowanie – gałąź	70
Tab. 21. Wymiarowanie –pas górny	70
Tab. 22. Wymiarowanie – pas dolny	71
Tab. 23. Wymiarowanie - skratowanie	72
Tab. 24. Wymiarowanie - skratowanie przy słupach.....	72
Tab. 25. Obciążenia podstawy słupa.....	74
Tab. 26. Naprężenia w płytach – podstawa słupa	74
Tab. 27. Wyniki - kotwy	74
Tab. 28. Wyniki – spoiny podstawy słupa	75
Tab. 29. Wyniki analizy – węzeł słup	79
Tab. 30. Obciążenie w węźle – wariant 1	80
Tab. 31. Naprężenia w płytach – węzeł typ 1	81
Tab. 32. Łącznik – węzeł typ 1	81
Tab. 33. Spoiny – węzeł typ 1.....	83
Tab. 34. Obciążenia w węźle – wariant 2	85
Tab. 35. Naprężenia w płytach – węzeł typ 2	86

Tab. 36. Łączniki – węzeł typ 2.....	86
Tab. 37. Spoiny –węzeł typ 2	86
Tab. 38. Masa połączeń	88