



Politechnika
Wroclawska

Politechniki Wroclawska
Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

(Zał. 5a do procedury Pr 08)



SPECJALNOŚĆ: Inżynieria Budowlana (IBB)

INŻYNIERSKA

PRACA DYPLOMOWA

TYTUŁ: Projekt konstrukcji stalowej struktury sferycznej z wykorzystaniem sztucznej inteligencji

Autor: Florian Marzec

Opiekun: dr inż. Rowiński Sławomir

Recenzent: dr inż. Jan Gierczak

Rok akademicki: 2024/25

Spis treści

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | Opis techniczny | 4 |
| 1.1 | Przedmiot opracowania | 4 |
| 1.2 | Cel opracowania | 4 |
| 1.3 | Podstawa opracowania | 4 |
| 1.4 | Dane materiałowe..... | 4 |
| 1.4.1 | Zabezpieczenia antykorozyjne | 4 |
| 1.5 | Obciążenia..... | 5 |
| 1.5.1 | Obciążenie wiatrem..... | 5 |
| 1.5.2 | Obciążenie śniegiem | 5 |
| 1.5.3 | Obciążenie użytkowe | 5 |
| 1.5.4 | Obciążenia stałe..... | 5 |
| 2 | Założenia architektoniczne..... | 6 |
| 3 | Zestawienie obciążeń | 7 |
| 3.1 | Obciążenia środowiskowe..... | 7 |
| 3.1.1 | Obciążenie śniegiem wg PN-EN 1991-1-3 | 7 |
| 3.1.2 | Obciążenie wiatrem wg PN-EN 1991-1-4 | 9 |
| 3.2 | Obciążenia użytkowe | 17 |
| 3.2.1 | Obciążenia eksploatacyjne wg PN-EN 1991-1-4 pkt 6.3.4..... | 17 |
| 3.3 | Obciążenia stałe..... | 17 |
| 4 | Projekt wstępny | 18 |
| 4.1 | Projekt geometrii konstrukcji z wykorzystaniem sztucznej inteligencji..... | 18 |
| 4.1.1 | Założenia główne | 18 |
| 4.1.2 | Podstawowa implementacja bibliotek oraz funkcji wywoławczych do poprawnego współdziałania skryptu z programem..... | 18 |
| 4.1.3 | Generowanie skryptu tworzącego geometrię za pośrednictwem sztucznej inteligencji z wykorzystaniem wiedzy matematycznej..... | 19 |
| 4.1.4 | Komentarz dotyczący projektowania z wykorzystaniem sztucznej inteligencji | 31 |
| 4.1.5 | Ostateczna geometria | 32 |
| 5 | Projekt techniczny | 35 |
| 5.1 | Obliczenia statyczno- wytrzymałościowe | 35 |
| 5.1.1 | Przekroje prętów | 35 |
| 5.1.2 | Materiał | 35 |
| 5.1.3 | Obciążenia zadane w modelu | 35 |
| 5.1.4 | Kombinacje obciążeń wg PN-EN 1990 SGN oraz SGU..... | 39 |
| 5.1.5 | Wstępne wymiarowanie ustrojów prętowych | 42 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 5.1.6 | Stopnie wykorzystania nośności w prętach..... | 64 |
| 5.2 | Analiza globalna stateczności | 65 |
| 5.2.1 | Założenia | 65 |
| 5.2.2 | Wpływ deformacji wg PN EN 1993-1-1, 5.2.1 | 65 |
| 5.2.3 | Ostateczna stateczność konstrukcji poddanej analizie drugiego rzędu | 72 |
| 5.3 | Wymiarowanie globalne modelu z założonymi imperfekcjami | 73 |
| 5.3.1 | Przypadki imperfekcji | 73 |
| 5.3.2 | Wyniki finalnej analizy stateczności konstrukcji | 78 |
| 5.3.3 | Optymalizacja konstrukcji dla zadanych obciążeń oraz imperfekcji | 79 |
| 5.4 | Wymiarowanie połączeń w węzłach | 82 |
| 5.4.1 | Połączenie Pł-1 u podstawy konstrukcji między wieńcem betonowym a prętami | 82 |
| 5.4.2 | Połączenie Pł-2 w węźle łączącym pręty skratowania KR-1 ze skratowaniem KR-2 oraz prętami BP-101 pierścienia P-1 | 93 |
| 5.5 | Wnioski | 102 |
| 6 | Załączniki | 103 |

1 Opis techniczny

1.1 Przedmiot opracowania

Przedmiotem opracowania jest projekt stalowej konstrukcji sferycznej zadaszenia hali wystawowej. Obiekt zlokalizowany jest we Wrocławiu. Teren działki jest płaski, znajduje się na obszarach handlowych, na których znajduje się zabudowa. Działka ta jest położona na wysokości 156 m.n.p.m., znajduje się w 1 strefie wiatrowej.

1.2 Cel opracowania

Celem opracowania jest projekt stalowej konstrukcji zadaszenia sferycznego o złożonej budowie w formie jednowarstwowej sieci lamella za pomocą zaawansowanych programów do projektowania oraz z wykorzystaniem parametrycznego projektowania geometrii z pomocą sztucznej inteligencji.

1.3 Podstawa opracowania

Podstawą niniejszego opracowania są przyjęte założenia architektoniczne zaakceptowane przez promotora. Podstawa merytoryczna niniejszego opracowania to obowiązujące normy, przepisy, a także programy komputerowe:

- PN-EN 1990,
- PN-EN 1991-1-1,
- PN-EN 1991-1-3,
- PN-EN 1991-1-4,
- PN-EN 1993-1-1,
- PN-EN 1993-1-6,
- PN-EN 1993-1-8,
- W. Bogucki, M. Żybertowicz “Tablice do projektowania konstrukcji metalowych”
- „Przekrycia strukturalne” 13 lis 14 : Lech Chodor,
- „STABILITY ANALYSIS METHOD FOR LATTICE SHELLS ACCOUNTING FOR MEMBER BUCKLING” TIAN Wei , ZHAO Yang , DONG Shi-lin,
- Autocad,
- Rwind,
- Rfem 6.0,
- Phyton,
- Visual Studio,
- ChatGPT,
- Tekla Structures.

1.4 Dane materiałowe

Do wzniesienia budynku, wykorzystano:

- profile stalowe gorącowalcowane typu SHS,
- stal S235J2 wg opracowania.

1.4.1 Zabezpieczenia antykorozyjne

Kategorię agresywności środowiska określono jako C2 (mała agresywność), natomiast oczekiwaną trwałość systemu malarskiego jako długą (H- 25 lat).

Zabezpieczenie antykorozyjne w formie powłok malarskich przewidziano na etap prefabrykacji elementów. Zastosowano zestaw alkidowy – podkład gruntowy oraz warstwy nawierzchniowe.

1.5 Obciążenia

1.5.1 Obciążenie wiatrem

Zgodnie z PN-EN 1991-1-4 dla I trefy wiatrowej rozpatrzono jeden przypadek obciążenia wiatru z uwagi na aerodynamiczną i powtarzalną pod każdym kątem konstrukcję. Szczytowe ciśnienie prędkości wynosi $q_{pz} = 0,59$ [kN/m²].

1.5.2 Obciążenie śniegiem

Charakterystyczna wartość obciążenia śniegiem wyznaczona na podstawie PN-EN 1991-1-3 dla III strefy śniegowej wynosi $q_{k,dome} = 0,70$ [kN/m²].

1.5.3 Obciążenie użytkowe

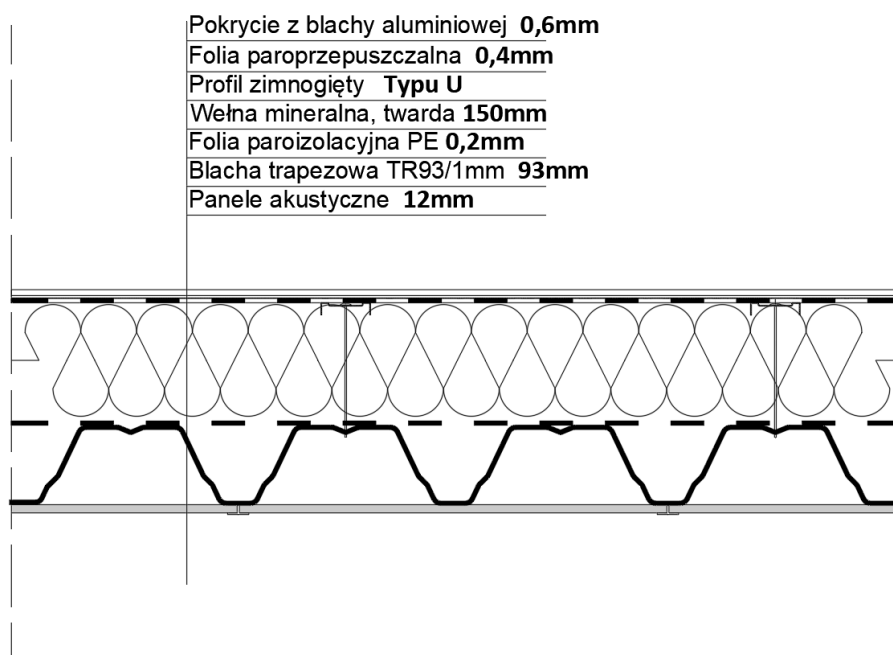
Założono że dach będzie bez dostępu dla ludzi, z wyjątkiem zwykłego utrzymania i napraw, zatem zgodnie z wytycznymi PN-EN 1991-1-4 tab. 6.10 dach kwalifikuje się do kategorii obciążonej powierzchni: **H**.

Przyjmuje się obciążenie równomiernie rozłożone $q_k = 0,4$ [kN/m²]

1.5.4 Obciążenia stałe

Jako obciążenia stałe uwzględnione zostało pokrycie hali wykonane z warstwowego przekrycia z blachy trapezowej, wełny mineralnej i membrany aluminiowej wraz z warstwami izolacyjnymi jak na rysunku nr 1. Planuje się bezpośredni montaż paneli dźwiękochłonnych między konstrukcją stalową.

Dodatkowo w obliczeniach uwzględnia się obciążenie technologiczne zmienne wynoszące 0,22 [kN/m²].

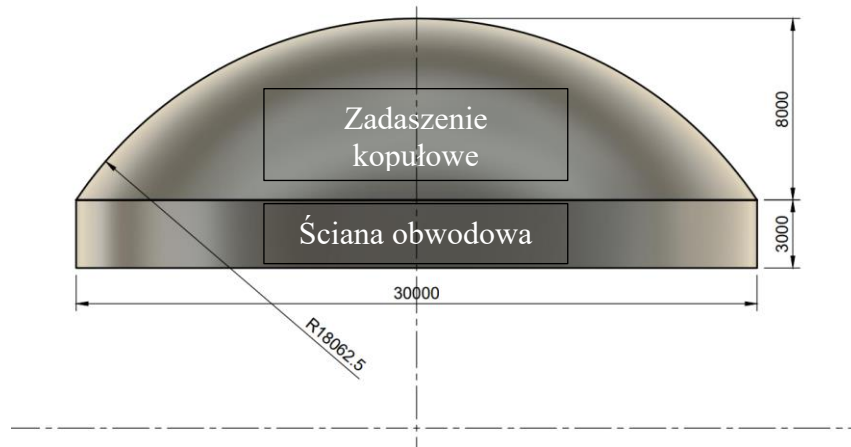


Rysunek 1. Przekrój pokrycia dachowego wraz z opisem warstw

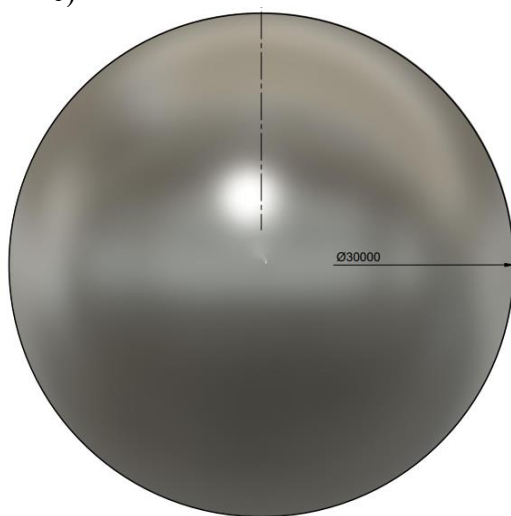
2 Założenia architektoniczne

- Wymiary zewnętrzne hali: średnica **30m**, wysokość całkowita **11m**, wysokość kopuły **8m**, wysokość ścian obwodowych **3m**;
- Konstrukcja sfery powinna być jednopłaszczyznowa bez dodatkowych stężeń w kubaturze, by nie ograniczyć funkcji w obiekcie;
- Ściana obwodowa będzie wykonana w formie skratowania ze słupów żelbetowych o wymiarach 300x400 zamocowanych sztywno do fundamentu pierścieniowego i łączących się w węzłach tworzących konstrukcję stalową. Słupy będą zwieńczone wieńcem w kształcie pierścienia o wymiarach 400x300;
- Pokrycie zadaszenia ma stanowić barierę izolacyjną z zewnętrzną atmosferą w formie warstw izolacji termicznej oraz membrany hydroizolacyjnej, a także stanowić barierę akustyczną;
- Ściany zostaną pokryte oszkleniem na aluminiowej konstrukcji wsporczej zamocowanej na konstrukcji żelbetowej.

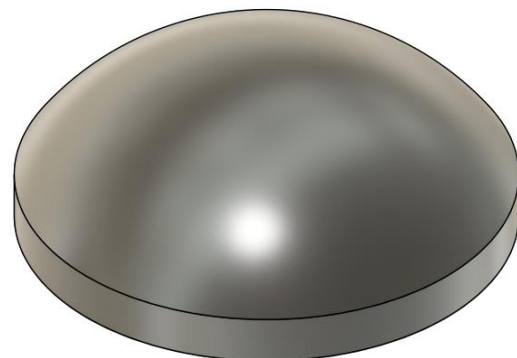
a)



c)



b)



Rysunek 2 zakładane wymiary konstrukcji: a) widok z boku konstrukcji, b) widok z góry, c) widok w aksonometrii

3 Zestawienie obciążeń

3.1 Obciążenia środowiskowe

Założenia:

- Lokalizacja: **Wrocław**;
- Wymiary zewnętrzne: średnica **30m**, wysokość całkowita **11m**, wysokość kopuły **8m**, wysokość ściany obwodowej **3m**.

3.1.1 Obciążenie śniegiem wg PN-EN 1991-1-3

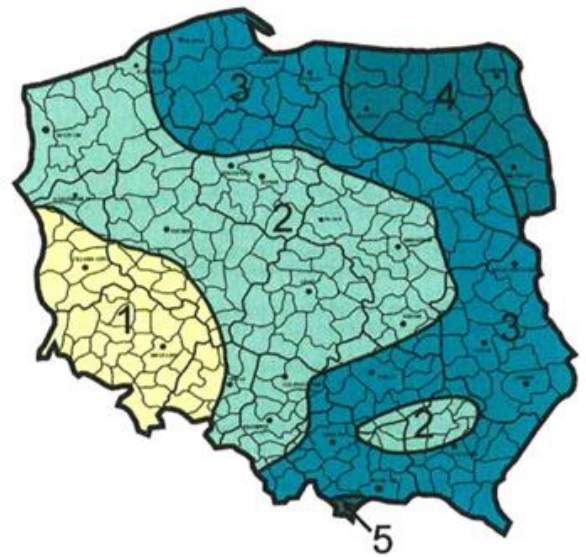
Wrocław znajduje się w 1-wszej strefie obciążenia śniegiem:

- warunki lokalizacyjne: normalne, przypadek A (brak wyjątkowych opadów i zamieci);
- sytuacja obliczeniowa: trwała i przejściowa;
- współczynnik ekspozycji:

$$C_e = 1.00$$

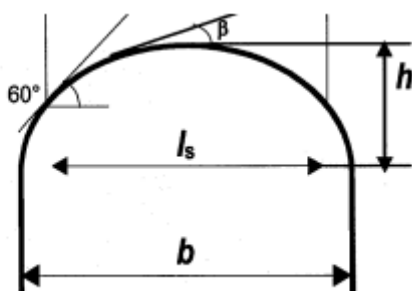
- teren normalny (obszar na którym występuje znaczące przenoszenie śniegu przez wiatr na budowlę z powodu ukształtowania terenu, innych budowli lub drzew);
- Współczynnik termiczny (wysoki współczynnik przenikania ciepła)

$$C_t \stackrel{\text{def}}{=} 1.00 .$$



Rysunek 3 Podział Polski na strefy obciążenia śniegiem [NB.1 PN-EN 1991-1-3]

3.1.1.1 Przypadki obciążeń charakterystycznych



Rysunek 4 Współczynniki dachu dla dachów walcowych [PN-EN 1991-1-3 Rys. 5.6]

$$h \stackrel{\text{def}}{=} 8m$$
$$b \stackrel{\text{def}}{=} 30m$$

- Promień sfery

$$R \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\left(\frac{b}{2}\right)^2 + h^2}{2 \cdot h} = \frac{\left(\frac{30}{2}\right)^2 + 8^2}{2 \cdot 8} = 18.0625m$$

- Kąt maksymalny θ_{\max}

Ten kąt to wartość kąta pomiędzy osią z , a promieniem sfery przechodzącym przez obwód podstawy sfery, co pozwala określić maksymalny zakres wysokości:

$$\theta_{\max} \stackrel{\text{def}}{=} \arccos\left(\frac{R-h}{R}\right) = \arccos\left(\frac{18.0625-8}{18.0625}\right) = 56.145^\circ$$

- Kąt θ dla punktu styczności

Aby znaleźć punkt na sferze, gdzie promień tworzy kąt 60° z podstawą (kąt pomiędzy promieniem a osią z wyniesie 30°), ustawiamy:

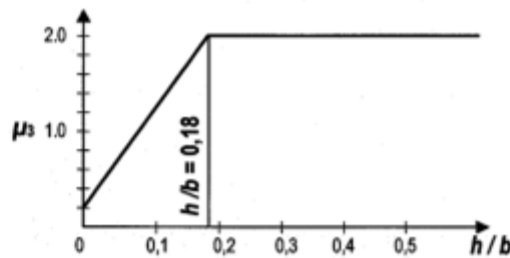
$$\theta \stackrel{\text{def}}{=} 30^\circ$$

- Promień poziomy r punktu styczności
Promień poziomy r (odległość od osi z do punktu styczności w płaszczyźnie xy) wynosi:

$$r \stackrel{\text{def}}{=} R \cdot \sin(\theta) = 18.0625 \cdot \sin(30^\circ) = 9.0312\text{m}$$

$$I_s \stackrel{\text{def}}{=} 2 \cdot r = 2 \cdot 9.031 = 18,0625\text{m}$$

- Współczynnik kształtu dachu:



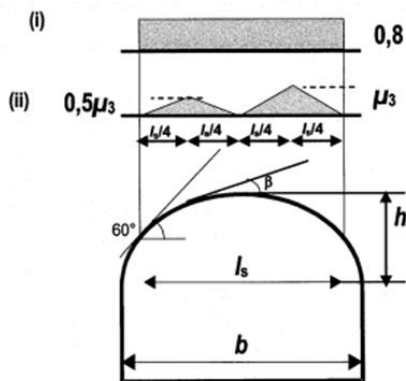
Rysunek 5 [PN-EN 1991-1-3 Rys. 5.5]

$$\frac{h}{b} = \frac{8}{30} = 0.2667$$

$$\mu_3 \stackrel{\text{def}}{=} \begin{cases} \frac{h}{b} \cdot \left(\frac{1.8}{0.18}\right) + 0.2 & \text{if } \left(0 \leq \frac{h}{b}\right) \wedge \left(\frac{h}{b} \leq 0.18\right) \\ 2.0 & \text{if } \left(0.18 \leq \frac{h}{b}\right) \end{cases} = 2$$

$$q_{k,\text{dome}} \stackrel{\text{def}}{=} s_k \cdot C_e \cdot C_t = 0,7 \cdot 1 \cdot 1 = \mathbf{0.7\text{kPa}}$$

Przypadek



Rysunek 6 [PN-EN 1991-1-3 Rys. 5.6]

- Przypadek nr 1

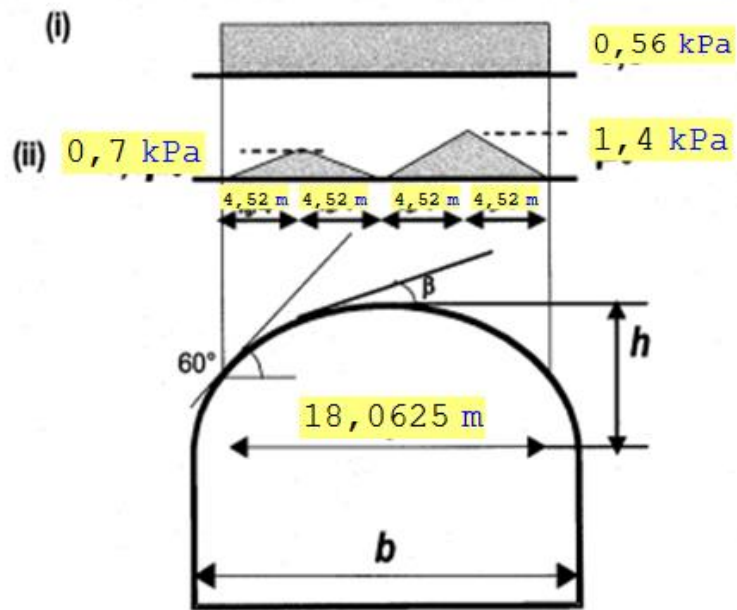
$$q_{k,\text{dome}1} \stackrel{\text{def}}{=} 0.8 \cdot q_{k,\text{dome}} = 0.56\text{kPa}$$

- Przypadek nr 2

$$q_{k,\text{dome}2} \stackrel{\text{def}}{=} 0.5 \cdot \mu_3 \cdot q_{k,\text{dome}} = 0.7\text{kPa}$$

$$q_{k,\text{dome}3} \stackrel{\text{def}}{=} \mu_3 \cdot q_{k,\text{dome}} = 1.4\text{kPa}$$

- Obrazowe przedstawienie obciążenia:

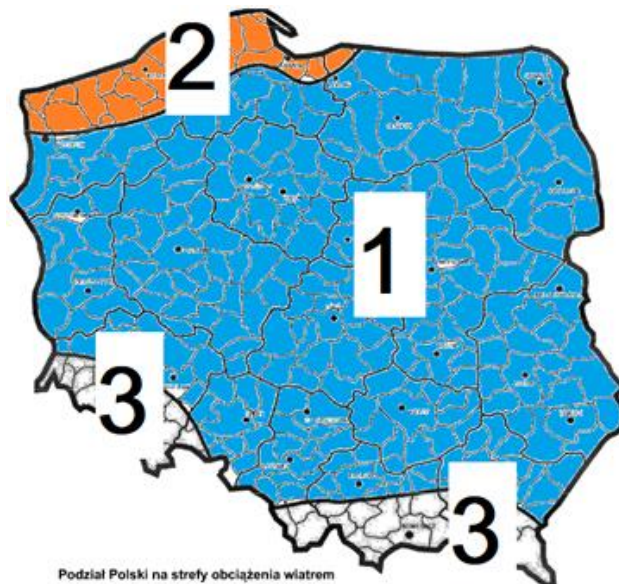


Rysunek 7 rozkład obciążenia śniegiem na kopułę [kPa]

3.1.2 Obciążenie wiatrem wg PN-EN 1991-1-4

Strefa terenu:

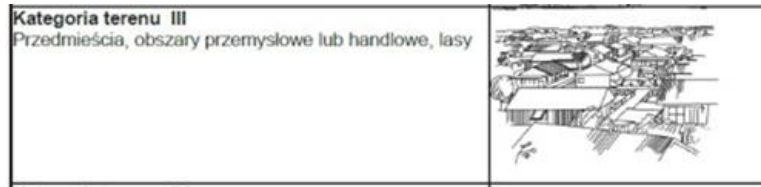
Budynek będzie znajdował się w okolicach Wrocławia więc, należy do **strefy 1**



Rysunek 8 Podział Polski na strefy obciążenia wiatrem [PN-EN 1991-1-4 NA.5]

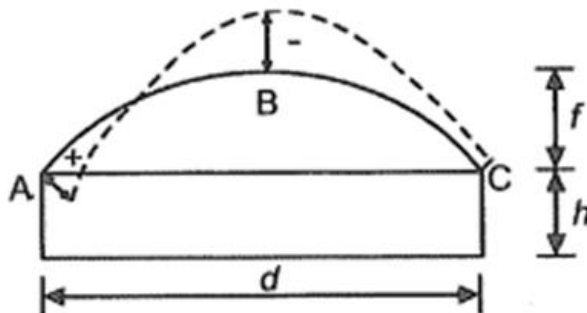
Kategoria terenu:

Budynek będzie znajdował się w przedmieściach Wrocławia w obszarze handlowym, należy więc do **III kategorii terenu**.



Rysunek 9 Kategorie terenu [PN-EN 1991-1-4 Zał. A.1]

Parametry zakładane do obliczeń:



Rysunek 10 Wartości współczynnika ciśnienia zewnętrznego kopuł na rzucie kołowym [PN-EN 1991-1-4 Rys. 7.12]

Średnica kopuły:

$$d \stackrel{\text{def}}{=} 30 \text{ m}$$

Wysokość odciętej części sfery:

$$f \stackrel{\text{def}}{=} 8 \text{ m}$$

Wysokość konstrukcji pod sferą:

$$h \stackrel{\text{def}}{=} 3 \text{ m}$$

Wysokość posadowienia budynku wyrażona w m.n.p.m:

$$A \stackrel{\text{def}}{=} 156 \text{ m}$$

Bazowa prędkość wiatru:

$$V_{b0} \stackrel{\text{def}}{=} \begin{cases} 22 \frac{m}{s} & \text{if } (A \leq 300 \text{ m}) \wedge (\text{strefa1}) \\ 26 \frac{m}{s} & \text{if } (A \leq 300 \text{ m}) \wedge (\text{strefa2}) \\ 22 \frac{m}{s} & \text{if } (A \leq 300 \text{ m}) \wedge (\text{strefa3}) \\ 22 \frac{m}{s} \cdot \left(1 + 0.0006 \cdot \left(\frac{A}{m} - 300\right)\right) & \text{if } (A > 300 \text{ m}) \wedge (\text{strefa1}) \\ 26 \frac{m}{s} & \text{if } (A > 300 \text{ m}) \wedge (\text{strefa2}) \\ 22 \frac{m}{s} \cdot \left(1 + 0.0006 \cdot \left(\frac{A}{m} - 300\right)\right) & \text{if } (A > 300 \text{ m}) \wedge (\text{strefa3}) \end{cases}$$

$$V_{b0} = 22.00 \frac{m}{s}$$

Współczynnik kierunkowy wg tablicy N.A. 2

$$c_{dir} \stackrel{\text{def}}{=} 1.0 \text{ (wartość zalecana)}$$

Współczynnik konstrukcyjny:

$$C_s C_d \stackrel{\text{def}}{=} 1 \text{ (wartość zalecana dla budynków do 15m wysokości)}$$

Współczynnik sezonowy:

$$c_{\text{season}} \stackrel{\text{def}}{=} 1$$

Na podstawie tablicy 4.1 z PN-EN 1991-1-4 wartość dla trzeciej kategorii gruntu:

$$z_0 = 0.3 \text{ m}$$

Na podstawie tablicy N.A.3 z PN-EN 1991-1-4 wartość dla trzeciej kategorii gruntu:

$$z_{\text{min}} = 5 \text{ m}$$

$$z_{\text{max}} = 400 \text{ m}$$

Wysokość całkowita budynku:

$$z \stackrel{\text{def}}{=} h + f = 3 + 8 = 11 \text{ m}$$

Podstawowa prędkość wiatru:

$$v_b \stackrel{\text{def}}{=} c_{\text{dir}} \cdot c_{\text{season}} \cdot V_{b0} = 1 \cdot 1 \cdot 22 = 22.00 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Gęstość powietrza:

$$\rho \stackrel{\text{def}}{=} 1.25 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Współczynnik chropowatości terenu

$$C_r \stackrel{\text{def}}{=} \begin{cases} 1.3 \cdot \left(\frac{z}{10 \text{ m}}\right)^{0.11} & \text{if } \text{Kat. terenu} 0 \\ 1.2 \cdot \left(\frac{z}{10 \text{ m}}\right)^{0.13} & \text{if } \text{Kat. terenu} I \\ 1 \cdot \left(\frac{z}{10 \text{ m}}\right)^{0.17} & \text{if } \text{Kat. terenu} II \\ 0.8 \cdot \left(\frac{z}{10 \text{ m}}\right)^{0.19} & \text{if } \text{Kat. terenu} III \\ 0.6 \cdot \left(\frac{z}{10 \text{ m}}\right)^{0.24} & \text{if } \text{Kat. terenu} IV \end{cases}$$

$$C_r = 0.8 \cdot \left(\frac{z}{10 \text{ m}}\right)^{0.19} = 0.8 \cdot \left(\frac{11 \text{ m}}{10 \text{ m}}\right)^{0.19} = 0.815$$

Współczynnik orografii

$$C_0 \stackrel{\text{def}}{=} 1$$

Średnia prędkość wiatru

$$V_{\text{mz}} \stackrel{\text{def}}{=} C_r \cdot C_0 \cdot v_b = 0.815 \cdot 1 \cdot 22 = 17.92 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Intensywność turbulencji:

$$I_v \stackrel{\text{def}}{=} \begin{cases} \frac{k_1}{C_0 \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} & \text{if } (z \leq z_{\max}) \wedge (z \geq z_{\min}) \\ \frac{k_1}{C_0 \cdot \ln\left(\frac{z_{\min}}{z_0}\right)} & \text{else} \end{cases}$$

Współczynnik turbulencji:

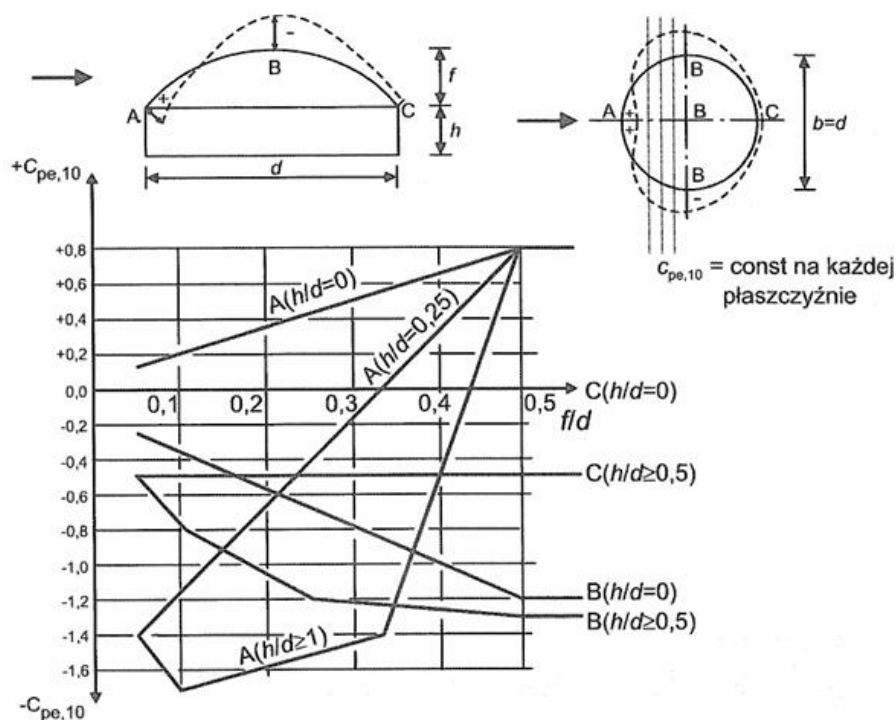
$$k_1 = 1.000$$

$$I_v = \frac{k_1}{C_0 \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} = \frac{1}{1 \cdot \ln\left(\frac{11}{0,3}\right)} = 0.2776$$

Szczytowe ciśnienie prędkości wiatru

$$q_{pz} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{(1 + 7 \cdot I_v) \cdot 1}{2} \cdot \rho \cdot V_{mz}^2 = \frac{(1 + 7 \cdot 0.2776) \cdot 1}{2} \cdot 1.25 \cdot 17.92^2 = 0.591 \frac{kN}{m^2}$$

Współczynniki i wartości ciśnienia zewnętrznego dla kopuły:



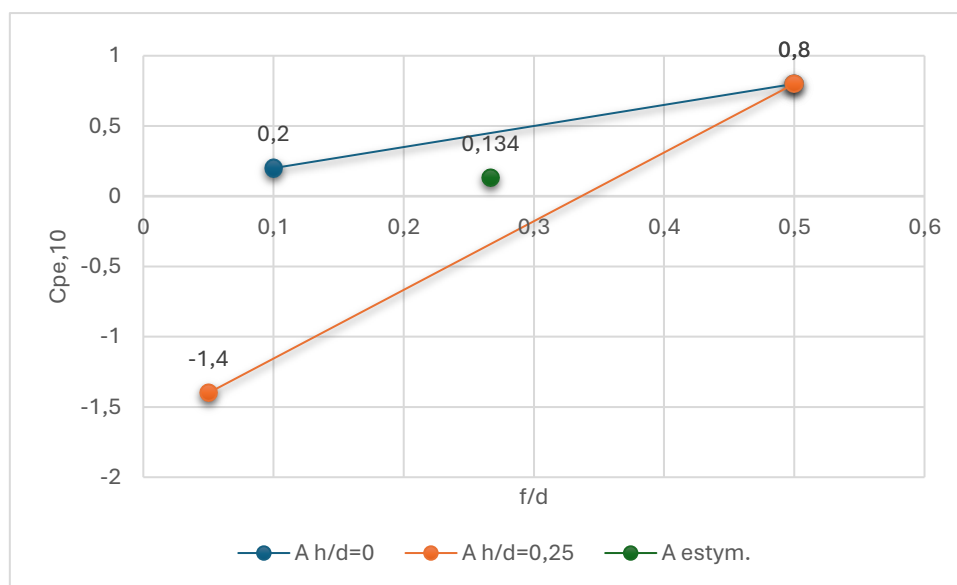
Rysunek 11 wartości współczynnika ciśnienia zewnętrznego kopuły na rzucie kołowym [PN-EN 1991-1-4 Rys. 7.12]

$$\frac{h}{d} = \frac{3}{30} = 0.100; \quad \frac{f}{d} = \frac{8}{30} = 0.267$$

- Estymacja wartości $C_{pe,10}$ dla punktu odniesienia A

Tabela 1 Tabelka przedstawiająca dane z wykresu z Rys. 7.12 z PN-EN 1991-1-4 do estymacji współczynnika $C_{pe,10}$

| | h/d | f/d | C_{pe10} |
|-----------------|------------|-------------|--------------|
| A h/d=0 | 0 | 0,1 | 0,2 |
| | | 0,5 | 0,8 |
| A h/d=0,25 | 0,25 | 0,05 | -1,4 |
| | | 0,5 | 0,8 |
| A estym. | 0,1 | 0,27 | 0,134 |

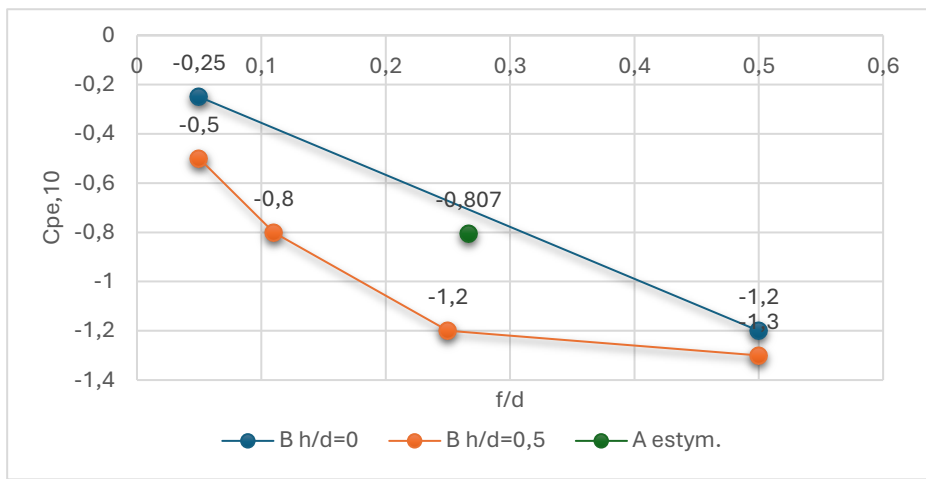


Wykres 1 estymacja wartości $C_{pe,10}$ dla zadanego projektu

- Estymacja wartości $C_{pe,10}$ dla punktu odniesienia B

Tabela 2 Tabelka przedstawiająca dane z wykresu z Rys. 7.12 z PN-EN 1991-1-4 do estymacji współczynnika $C_{pe,10}$

| | h/d | f/d | C_{pe10} |
|-----------------|------------|-------------|---------------|
| B h/d=0 | 0 | 0,05 | -0,25 |
| | | 0,5 | -1,2 |
| B h/d=0,5 | 0,5 | 0,05 | -0,5 |
| | | 0,11 | -0,8 |
| | | 0,25 | -1,2 |
| | | 0,5 | -1,3 |
| B estym. | 0,1 | 0,27 | -0,807 |

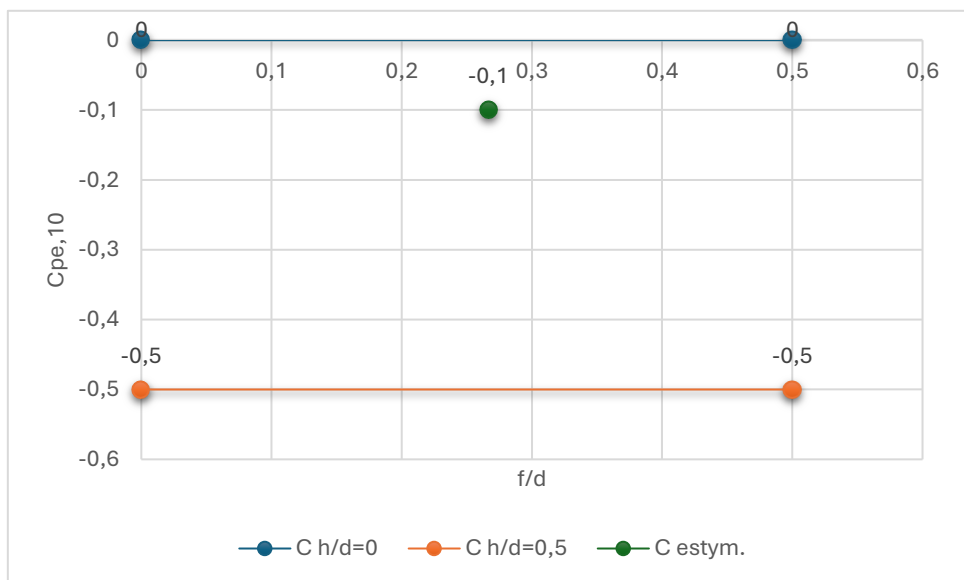


Wykres 2 estymacja wartości $C_{pe,10}$ dla danego projektu

- Estymacja wartości $C_{pe,10}$ dla punktu odniesienia C

Tabela 3 Tabelka przedstawiająca dane z wykresu z Rys. 7.12 z PN-EN 1991-1-4 do estymacji współczynnika $C_{pe,10}$

| | h/d | f/d | $C_{pe,10}$ |
|-----------------|------------|-------------|-------------|
| C h/d=0 | 0 | 0 | 0 |
| | | 0,5 | 0 |
| C h/d=0,5 | 0,5 | 0 | -0,5 |
| | | 0,5 | -0,5 |
| C estym. | 0,1 | 0,27 | -0,1 |



Wykres 3 estymacja wartości $C_{pe,10}$ dla danego projektu

$$C_{pe10.A} \stackrel{\text{def}}{=} 0.134$$

$$C_{pe10.B} \stackrel{\text{def}}{=} -0.807$$

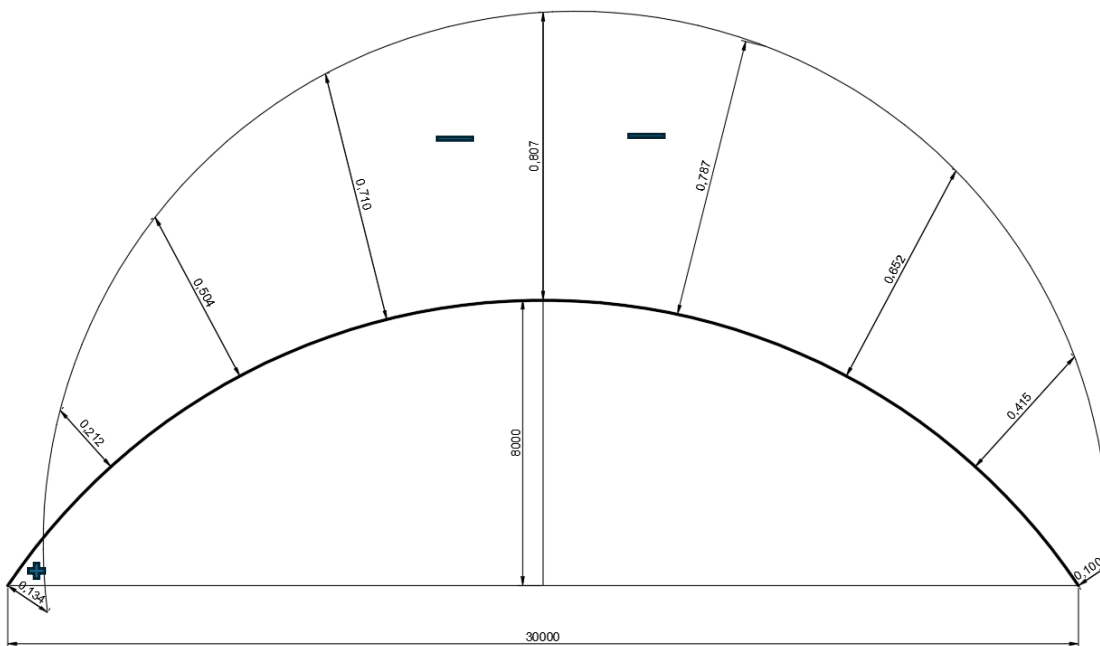
$$C_{pe10.C} \stackrel{\text{def}}{=} -0.1$$

$$W_{eA} \stackrel{\text{def}}{=} C_{pe10.A} \cdot q_{pz} = 0.134 \cdot 0.591 = 0.0792 \frac{kN}{m^2}$$

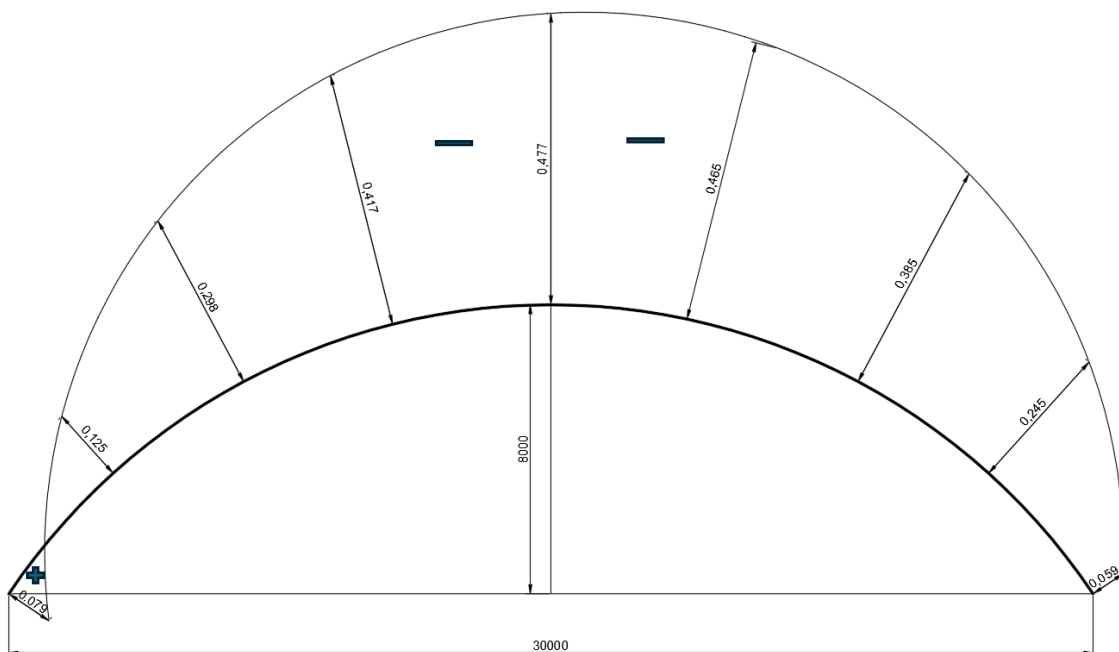
$$W_{eB} \stackrel{\text{def}}{=} C_{pe10.B} \cdot q_{pz} = -0.807 \cdot 0.591 = -0.4768 \frac{kN}{m^2}$$

$$W_{eC} \stackrel{\text{def}}{=} C_{pe10.C} \cdot q_{pz} = -0.1 \cdot 0.591 = -0.0591 \frac{kN}{m^2}$$

Wyznaczenie wartości pośrednich za pomocą funkcji „dopasowania do splajnu” w Programie Autocad:



Rysunek 12 Wykres wartości $C_{pe,10}$ na powierzchni obiektu [-]



Rysunek 13 Wykres wartości parcia wiatru W_e na powierzchni obiektu [kPa]

Współczynnik i wartości ciśnienia wewnętrznego dla obiektu:

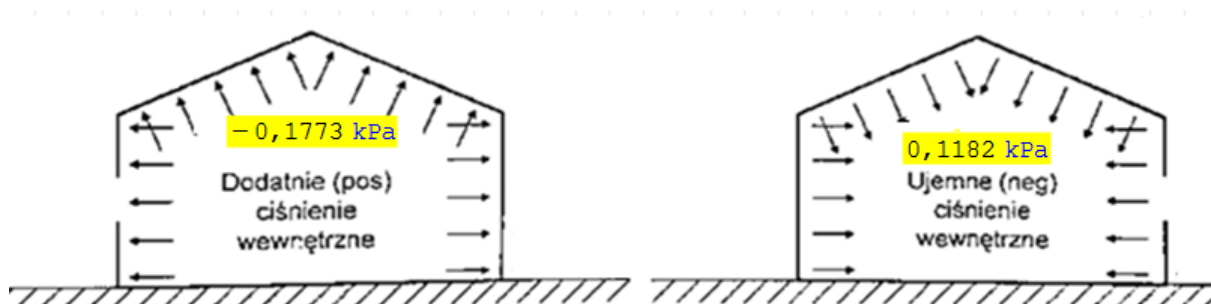
Ciśnienie wewnętrzne jest obliczane na podstawie przyjętych współczynników $C_{pi} = +0,2$ oraz $C_{pi} = -0,3$, gdyż oszacowanie otworów uznano za nieuzasadnione, zgodnie z uwagą 2 roz. 7.2.9.

$$C_{pi1} \stackrel{\text{def}}{=} 0,2$$

$$C_{pi2} \stackrel{\text{def}}{=} -0,3$$

$$W_{i1} \stackrel{\text{def}}{=} 0,591 \cdot 0,2 = 0,1182 \frac{kN}{m^2}$$

$$W_{i2} \stackrel{\text{def}}{=} q_{pz} \cdot C_{pi2} = 0,591 \cdot -0,3 = -0,1773 \frac{kN}{m^2}$$



Rysunek 14 obciążenie wewnętrznego oddziaływania wiatru na konstrukcję

3.2 Obciążenia użytkowe

3.2.1 Obciążenia eksploatacyjne wg PN-EN 1991-1-4 pkt 6.3.4

3.2.1.1 Założenia:

Kategoria obciążonej powierzchni: **H** (Dachy bez dostępu, z wyjątkiem zwykłego utrzymania i napraw)

3.2.1.2 Obciążenie użytkowe

Wg PN-EN 1991-1-4 tab. 6.10 zalecaną wartością obciążającą połac dachową jest siła rozproszona:

$$q_k=0.4 \text{ kN/m}^2$$

3.3 Obciążenia stałe

Ciężar konstrukcji stalowej został automatycznie uwzględniony przez program. Do obciążeń założono pokrycie z blachy trapezowej TR 93.260.1040 która będzie wsparta na krzyżulce konstrukcji, nie obciążając jednocześnie pierścieni. Kolejno następuje warstwa paroizolacji, ocieplenia z wełny mineralnej grubości 150mm, warstwa folii paroprzepuszczalnej, oraz warstwa poszycia z blachy aluminiowej grubości 0,6mm łączonej na rąbek. Blacha będzie mocowana do rusztu z profili typu U 6-cio giętych, układanych równo z warstwą ocieplenia i mocowanych za pomocą specjalnych łączników teleskopowych do blachy. Od wewnętrznej strony budynku planuje się wykonanie osłony w postaci paneli akustycznych montowanych bezpośrednio na dolną część blachy trapezowej za pomocą profili T wg. wytycznych producenta. Dodatkowo w obliczeniach uwzględnia się obciążenie technologiczne zmienne.

Tabela 4 Obciążenia poszczególnych warstw pokrycia dachowego.

| Opis | gr. | masa | Obciążenie |
|--|------|----------------------|--|
| | [mm] | [kg/m ²] | g _k [kN/m ²] |
| pokrycie z blachy aluminiowej | 0,6 | 2,30 | 0,023 |
| folia paroprzepuszczalna | 0,4 | 0,09 | 0,001 |
| profil sześciogięty z łącznikami teleskopowymi | - | 2,44 | 0,024 |
| wełna mineralna | 150 | 13,50 | 0,132 |
| folia paroizolacyjna PE | 0,2 | 0,12 | 0,001 |
| Blacha trapezowa TR 93/1mm gr. | 93 | 11,32 | 0,111 |
| panele dźwiękochłonne | 12 | 2,90 | 0,028 |
| obciążenie od stałych instalacji | - | - | 0,22 |
| SUMA: | | | 0,540 |

$$g_k=0.54 \text{ kN/m}^2$$

4 Projekt wstępny

Celem pracy jest przedstawić nowe możliwości wykorzystania zaawansowanych narzędzi informatycznych w postaci modelu językowego jakim jest ChatGPT-4o. Jest on używany w dużej mierze przez programistów do ułatwienia pisania skryptów w różnych językach programowania. W budownictwie również wykorzystuje się aspekty programowania w celu sparаметryzowania niektórych modeli i tym samym ułatwienia późniejszej modyfikacji. Celem jest więc połączyć kodowanie algorytmów w wybranym języku programowania Python, który z kolei jest kompatybilny z programem Rfem 6 oraz z sztuczną inteligencją, mogącą odwzorować matematyczne zapisy oraz słowne sformułowania w kod.

Odrębne konstruowanie modelu kopuły jako siatki prętowej wydaje się być czasochłonne, a ze względu na stopień skomplikowania może wiązać się z dużą liczbą popełnianych błędów. Odpowiednim rozwiązaniem jest matematyczne, tudzież programistyczne podejście do zadania, czyli sparаметryzowania geometrii konstrukcji, w celu uzyskania dokładnego modelu oraz ułatwienia jego modyfikacji co może ułatwić proces optymalizacji konstrukcji. Kolejnym celem jest poznanie możliwości sztucznej inteligencji (AI) w zakresie projektowania obiektów budowlanych oraz odkrycie w jakim zakresie może ona okazać się pomocna w branży projektowej.

4.1 Projekt geometrii konstrukcji z wykorzystaniem sztucznej inteligencji

4.1.1 Założenia główne

Na podstawie wymiarów konstrukcji stworzyć skrypt który umożliwi:

- w łatwy sposób modyfikację i dostosowanie położenia węzłów na płaszczyźnie sfery za pomocą parametrów. Tym samym możliwość dostosowywania długości prętów;
- Możliwość modyfikacji liczby węzłów w celu wytworzenia odpowiedniej siatki prętów tworzących konstrukcję;
- Szybkiego grupowania prętów na sekcje w zależności od ich przekroju, które będą pomocne w dalszej części wymiarowania ;
- Generowanie dowolnych wariantów konstrukcji za pomocą parametrów w celu dobrania optymalnej geometrii siatki prętów w celu zbadania najlepszego wariantu konstrukcji.

4.1.2 Podstawowa implementacja bibliotek oraz funkcji wywoławczych do poprawnego współdziałania skryptu z programem

- Importujemy niezbędne biblioteki Rfem które umożliwiają wywoływanie odpowiednich funkcji już w samym programie poprzez skrypt, który zadamy. Funkcje te można znaleźć w gotowych bibliotekach i wystarczy je skopiować do skryptu:

```
from RFEM.enums import *  
from RFEM.initModel import *  
from RFEM.BasicObjects.node import Node  
from RFEM.BasicObjects.member import Member  
from RFEM.BasicObjects.section import Section  
from RFEM.BasicObjects.material import Material  
from RFEM.TypesForNodes.nodalSupport import *  
from RFEM.BasicObjects.surface import Surface  
from RFEM.BasicObjects.line import Line
```

- Za pomocą funkcji wywoławczej jesteśmy w stanie połączyć się z aktywnym modelem w programie Rfem:

```
Model(False)
Model.clientModel.service.begin_modification()
```

- Funkcja wieńcząca skrypt- zakończenie modyfikacji modelu:

```
Model.clientModel.service.finish_modification()
```

- Importujemy także bibliotekę, która umożliwi korzystanie z formuł matematycznych w skrypcie:

```
import math
```

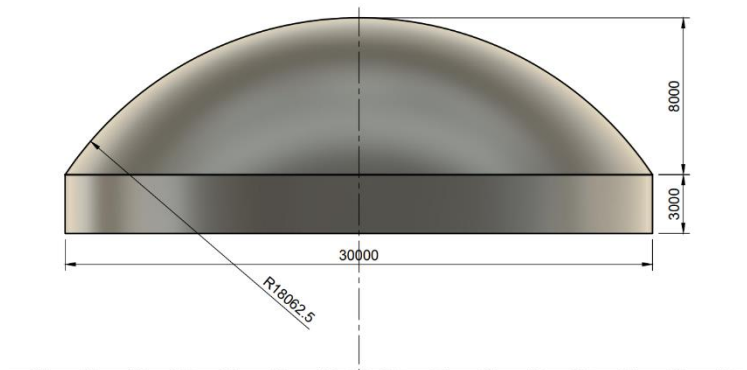
4.1.3 Generowanie skryptu tworzącego geometrię za pośrednictwem sztucznej inteligencji z wykorzystaniem wiedzy matematycznej

Opisane kolejne etapy wytwarzania elementów zakładanej geometrii będą składać się z **założeń** w postaci tekstu, wzorów matematycznych oraz rysunków, które mają zostać wykorzystane przez sztuczną inteligencję do wytworzenia skryptu w języku programowania Python, który z kolei jest kompatybilny z programem Rfem i umożliwi w czasie rzeczywistym wytworzenie modelu z poszczególnych etapów. Skrypt i wyjaśnienia wytworzone przez sztuczną inteligencję będą opisywane jako **odpowiedź ChatGPT**. Wyjaśnienia i analiza danych etapów będą zawierały się w **komentarzach**.

Etap 1 Założenie podstawowych parametrów sfery

Założenie:

projekt obejmuje model konstrukcji w formie kopuły. Głównymi parametrami będzie promień podstawy odciętej części sfery równy 15 metrom, oraz wysokość samej sfery licząc od podstawy do czubka sfery pod kątem prostym do podstawy równą 8 metrom.



Rysunek 15 Poglądowy widok zakładanej konstrukcji wraz z wymiarami [mm]

Odpowiedź ChatGPT:

Zostały utworzone dwa podstawowe parametry odciętej części sfery:

```
# Parametry sfery
r_podstawa = 15 # Promień podstawy odciętej sfery (15 metrów)
total_wysokosc = 8 # Całkowita wysokość od podstawy do szczytu sfery (8 metrów)
```

Rysunek 16 Kod wywołujący wartości podstawowych parametrów promienia podstawy oraz wysokości sfery

Etap 2 Definicja oraz grupowanie prętów ze względu na ich przekrój

Założenie:

skrypt ma utworzyć łącznie 12 grup prętowych (6 pierścieni oraz 6 kratownic) do których będzie można przydzielić poszczególne typy przekrojów stalowych. Pierwsze 6 grup mają być przeznaczone na pierścienie, następne 6 grup na kratownice. Zakładany wstępny przekrój prętowy to SHS 100 (tylko i wyłącznie do celów wizualnych). Materiał elementów został zdefiniowany jako stal klasy S235J2.

Odpowiedź ChatGPT:

```
# Definiujemy materiał S235 (materiał o numerze 1)
material_name = 'S235'
material_no = 1
Material(no=material_no, name=material_name)

# Profil SHS 120x5 dla wszystkich sekcji
section_name = 'SHS 120x5'

# Definiowanie przekrojów dla każdej sekcji z użyciem SHS 120x5
section_types = [
    {'no': 1, 'name': section_name, 'material_no': material_no},
    {'no': 2, 'name': section_name, 'material_no': material_no},
    {'no': 3, 'name': section_name, 'material_no': material_no},
    {'no': 4, 'name': section_name, 'material_no': material_no},
    {'no': 5, 'name': section_name, 'material_no': material_no},
    {'no': 6, 'name': section_name, 'material_no': material_no}, # Nowa sekcja
    {'no': 7, 'name': section_name, 'material_no': material_no},
    {'no': 8, 'name': section_name, 'material_no': material_no},
    {'no': 9, 'name': section_name, 'material_no': material_no}, # sekcja kratownic
    {'no': 10, 'name': section_name, 'material_no': material_no},
    {'no': 11, 'name': section_name, 'material_no': material_no},
    {'no': 12, 'name': section_name, 'material_no': material_no},
]
```

Rysunek 17 Kod przedstawiający definiowane grupy prętowe oraz charakterystykę materiałową.

Etap 3 Generowanie funkcji tworzącej pierścienie

Założenie:

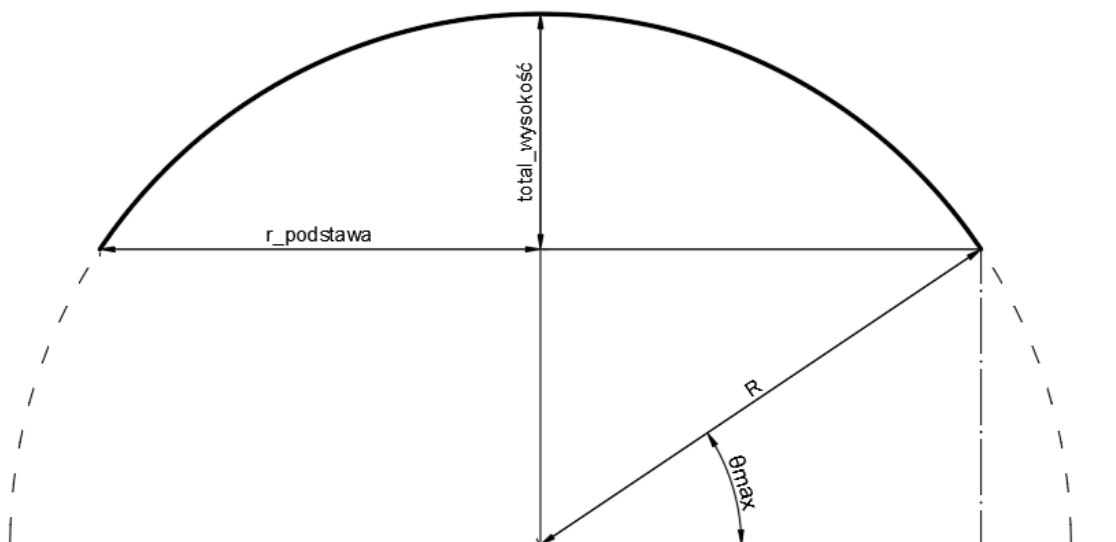
należy zdefiniować powierzchnię cięcia sfery w zależności od zadanych podstawowych parametrów wysokości oraz promienia podstawy odciętej części sfery.

- Wzór na obliczenie promienia sfery za pomocą parametrów definiujących kopułę:

$$R \stackrel{\text{def}}{=} \frac{r_{\text{podstawa}}^2 + \text{total_wysokość}^2}{2 \cdot \text{total_wysokość}}$$

- Kąt między płaszczyzną przechodzącą przez środek sfery, a podstawą jej odciętej części.

$$\theta_{\text{max}} \stackrel{\text{def}}{=} \arccos\left(\frac{R - \text{total_wysokość}}{R}\right)$$



Rysunek 18 Główne parametry odciętej sfery

Odpowiedź ChatGPT:

```
# Funkcja do obliczenia maksymalnego kąta theta_max
def oblicz_theta_max(r_podstawa, total_wysokosc):
    R = (r_podstawa ** 2 + total_wysokosc ** 2) / (2 * total_wysokosc) # Promień sfery R
    theta_max = math.acos((R - total_wysokosc) / R) # Kąt maksymalny theta_max
    return theta_max, R

# Obliczamy theta_max i promień sfery R
theta_max, R = oblicz_theta_max(r_podstawa, total_wysokosc)
```

Rysunek 19 Kod obliczający podstawowe parametry matematyczne niezbędne do definiowania dalszych elementów konstrukcji

Założenie:

konstrukcja sferyczna będzie składać się z 6 pierścieni, które będą tworzone na przecięciu kolejnych płaszczyzn równoległych do płaszczyzny podstawy. Odległość między płaszczyznami będzie definiowana jako suma kolejnych odległości kątowych, między kolejno następującymi płaszczyznami jak w przedstawionym wzorze:

$$\theta_0 \stackrel{\text{def}}{=} \theta_{\max}$$

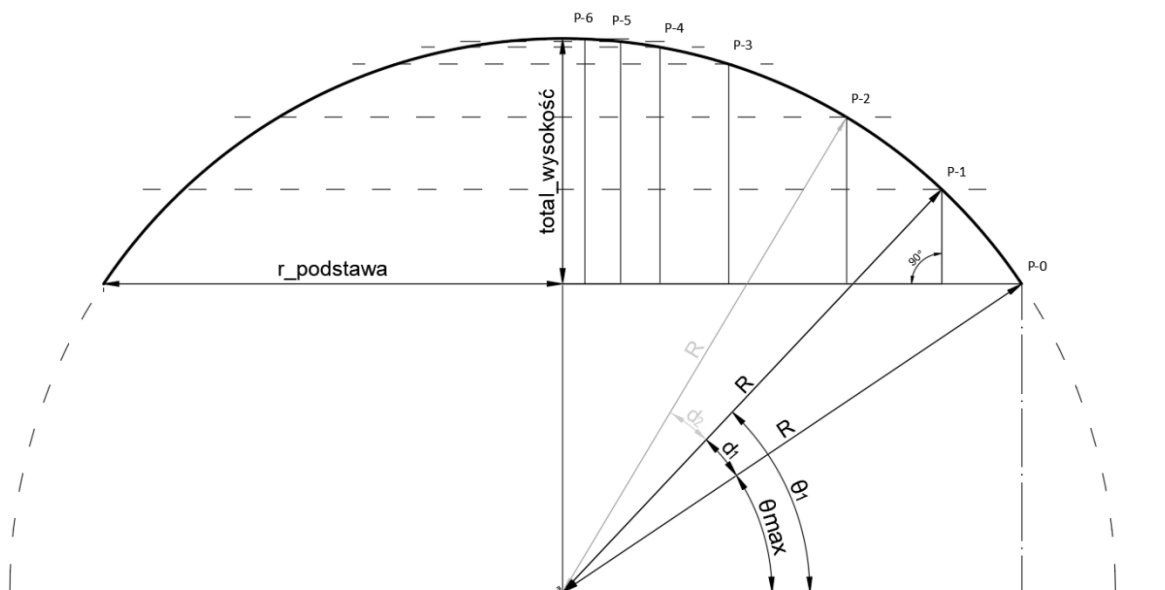
θ_0 - długość kątowa tworząca płaszczyznę podstawy odciętej sfery

$$\theta_i \stackrel{\text{def}}{=} \theta_0 + \sum_{i=1}^i d_i$$

θ_i - kolejne odległości kątowe od płaszczyzny sfery przecinającej środek sfery do płaszczyzn tworzących pierścienie P-i na przecięciu ze sferą

$$d_i \stackrel{\text{def}}{=} [d_1, d_2, d_3, d_4, d_5, d_6]$$

d_i - macierz kolejnych odległości kątowych między płaszczyznami przecięcia



Rysunek 20 Zobrazowanie wzoru tworzącego płaszczyzny przecięcia definiujące pierścienie

Odpowiedź ChatGPT:

2. Redukowanie kąta przy kolejnych poziomach:

- Funkcja `oblicz_katy_theta` tworzy listę kątów θ dla każdego poziomu, zaczynając od θ_{\max} .
- Skrypt odejmuje każdą wartość z listy `angle_decrements` kolejno od poprzednio obliczonego kąta.
- Wynikiem jest lista kątów dla kolejnych poziomów sfery: `theta_levels = [\theta_{\text{max}}, \theta_{\text{max}} - \text{angle_decrements}[0], \theta_{\text{max}} - \text{angle_decrements}[0] - \text{angle_decrements}[1], ...]`.

Rysunek 21 Tłumaczenie kodu wytwarzającego płaszczyzny tworzące pierścienie

```
angle_decrements = [math.pi / 14.55, math.pi / 14, math.pi / 13.55, math.pi / 24,
```

Rysunek 22 macierz poszczególnych odległości kątowych zapisanych w skrypcie

```
# Funkcja do obliczenia kątów theta
def oblicz_katy_theta(theta_max, angle_decrements):
    theta_levels = [theta_max]
    current_theta = theta_max
    for decrement in angle_decrements:
        current_theta -= decrement
        theta_levels.append(current_theta)
    return theta_levels

# Obliczamy kąty theta dla każdego poziomu
theta_levels = oblicz_katy_theta(theta_max, angle_decrements)
```

Rysunek 23 Kod przedstawiający funkcję dodawania następnych odległości kątowych tworzących płaszczyznę

Definiowanie skryptu do tworzenia pierścieni

Komentarz:

do wytworzenia węzłów leżących na poszczególnych pierścieniach oraz prętów tworzących pierścienie zastosujemy możliwości sztucznej inteligencji w interpretowaniu słownego opisu założeń matematycznych. Celem jest sprawdzenie w jak sprawny sposób nowe założenia będą kompatybilne z dotychczas wykreowanym kodem opisującym przestrzeń za pomocą skryptu zgodnie z układem współrzędnych biegunowych.

Założenie:

pierścienie powinny być stworzone z podanej ilości węzłów w równym ich rozstawie, a same węzły niech zostaną powiązane kolejno prętami, aż do połączenia ostatniego węzła z pierwszym. Węzły następnych pierścieni powinny być na przemian przesunięte o długość kątową w płaszczyźnie pierścienia równą połowie odległości między dwoma węzłami. Same pręty powinny być obrócone w swojej osi o kąt równy odległości kątowej tworzącej wysokość płaszczyzny przecięcia sfery w celu utworzenia pierścienia, tak by oś x przekroju prętów tworzących pierścien był równoległa w punkcie styczności do płaszczyzny sfery.

Odpowiedź ChatGPT:

Dla każdego poziomu sfery, opis pozycji węzłów zależy od parametrów:

1. Promień poziomu w płaszczyźnie XY : $r = R \sin(\theta)$
2. Wysokość poziomu: $z = R \cos(\theta)$
3. Kąt wokół osi Z (dla kolejnych węzłów): $\phi_i = \frac{2\pi i}{\text{num_nodes}} + \text{shift_angle}$

Wzór na współrzędne x, y, z dla każdego węzła

Dla każdego węzła na pierścieniu o indeksie i , współrzędne (x_i, y_i, z_i) obliczamy tak:

1. $z = R \cos(\theta)$
2. $r = R \sin(\theta)$
3. $\phi_i = \frac{2\pi i}{\text{num_nodes}} + \text{shift_angle}$
4. $x_i = r \cos(\phi_i)$
5. $y_i = r \sin(\phi_i)$

Objaśnienie przesunięcia węzłów (parametr `shift`)

Parametr `shift` pozwala na przesunięcie węzłów o dodatkowy kąt $\text{shift_angle} = \frac{\pi}{\text{num_nodes}}$, co tworzy konstrukcję z przesuniętymi pierścieniami.

Rysunek 24 Odpowiedź chatGPT-4o na prośbę wyjaśnienia kodu

```
# Funkcja do tworzenia węzłów na danym poziomie
def create_nodes_on_sphere(level, theta, R, num_nodes, shift):
    z = R * math.cos(theta)
    r = R * math.sin(theta)
    nodes = []
    shift_angle = 0
    if shift:
        shift_angle = math.pi / num_nodes

    for i in range(num_nodes):
        phi = 2 * math.pi * i / num_nodes + shift_angle
        x = r * math.cos(phi)
        y = r * math.sin(phi)

        node_id = sum(nodes_per_level[:level]) + i + 1
        Node(node_id, x, y, -z)
        nodes.append(node_id)
    return nodes
```

Rysunek 25 Kod przedstawiający tworzenie węzłów w równym rozstawie na pierścieniu

1. **Łączenie węzłów w pierścieni:** Funkcja tworzy zamknięty pierścień prętów łączących węzły wzdłuż obwodu na danym poziomie z . Każdy pręt łączy kolejno węzeł i z węzłem $i + 1$, a ostatni pręt łączy ostatni węzeł z pierwszym, zamykając pierścień.
 - **Wzór na pręt:** Dla każdego węzła o indeksie i na poziomie z , pręt jest definiowany jako odcinek pomiędzy:
 - `start_node = nodes[i]`
 - `end_node = nodes[(i + 1) mod num_nodes]`
2. **Numerowanie prętów:** Każdy pręt dostaje unikalny numer `member_id`, który jest obliczany jako suma liczby węzłów na wszystkich poprzednich poziomach plus $i + 1$. Dzięki temu każdy pręt w modelu ma swój własny numer.
3. **Kąt obrotu pręta:** Pręty w pierścieniu mają przypisany kąt obrotu, co wpływa na ich orientację w przestrzeni. Kąt obrotu pręta jest ustawiony jako:

$$\text{rotation_angle} = \frac{\pi}{2} - \theta$$

Kąt ten dostosowuje pozycję prętów tak, aby były one odpowiednio nachylone względem osi radialnej poziomu.

Rysunek 26 Odpowiedź chatGPT-4o na prośbę wyjaśnienia kodu

```
# Funkcja do tworzenia pierścieni prętów
def create_ring_members(level, nodes, section_no, theta):
    num_nodes = len(nodes)
    for i in range(num_nodes):
        start_node = nodes[i]
        end_node = nodes[(i + 1) % num_nodes]
        rotation_angle = (math.pi / 2) - theta
        member_id = sum(nodes_per_level[:level]) + i + 1
        Member(member_id, start_node, end_node, rotation_angle=
            rotation_angle, start_section_no=section_no,
            end_section_no=section_no)
```

Rysunek 27 Funkcja tworzenia prętów między utworzonymi węzłami na pierścieniu

Komentarz:

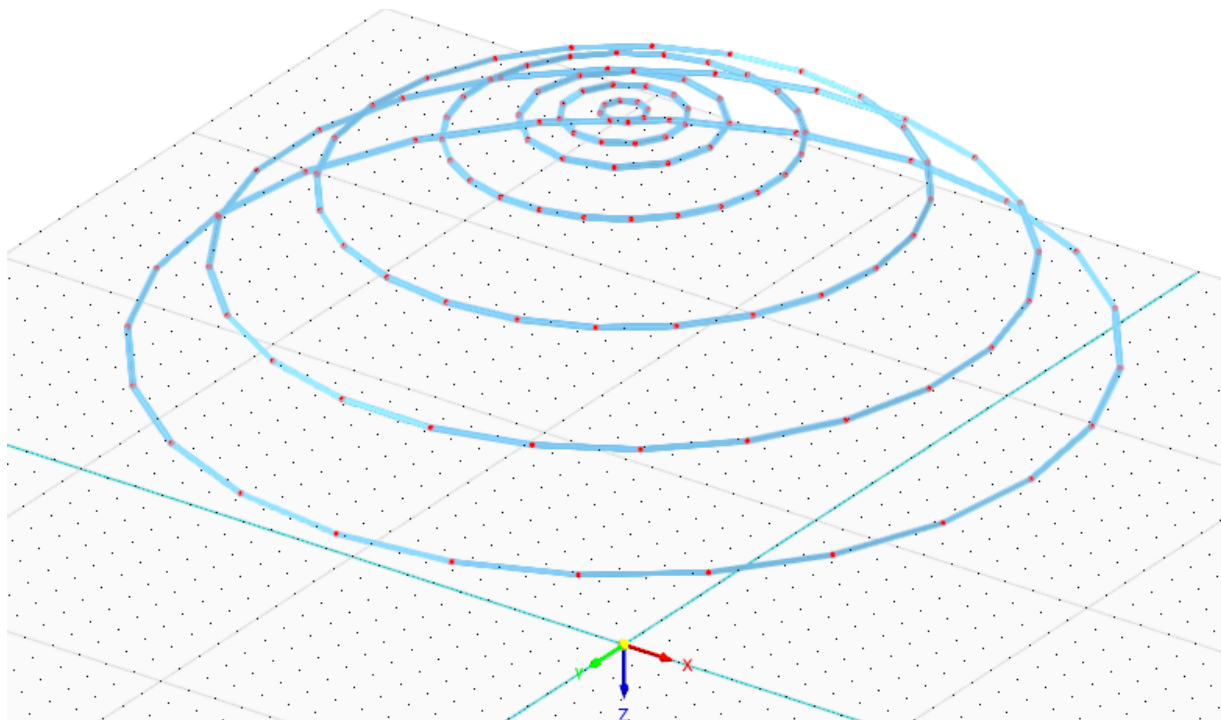
skrypt został wytworzony zgodnie z matematycznymi założeniami i opisany w sposób umożliwiający analizę matematyczną. Została dodatkowo utworzona macierz liczby węzłów na każdym z pierścieni umożliwiająca zmianę na dogodną liczbę.

Zdefiniowano więc na pierwszych czterech pierścieniach licząc od dołu po 24 węzły, następne dwa mają po 12 węzłów a ostatni 8.

```
nodes_per_level = [24, 24, 24, 24, 12, 12, 8]
```

Rysunek 28 macierz liczby węzłów na pierścieniach zdefiniowana w skrypcie

Końcowa geometria pierścieni przedstawiona została na rysunku nr 29. Sieć lamella zakłada że między pierścieniami zostaną utworzone kratownice wieńczące a co za tym idzie liczba węzłów będzie taka sama na każdym pierścieniu z przesunięciem tak jak było to opisane wyżej.



Rysunek 29 Rysunek modelu w programie Rfem powstałego na skutek zadziałania skryptu związanego z tworzeniem pierścieni

Etap 4 Skrypt tworzący pręty w formie kratownic między pierścieniami

Założenie:

węzeł dolny łączy się z górnym w taki sposób, że jeżeli mamy zdefiniowane n węzłów na dolnym oraz na górnym pierścieniu, wtedy węzeł nr i z poziomu 0 powinien połączyć się z węzłem $n+i$ na poziomie 1. Kolejno powinny tworzyć się także pręty które łączą się pomiędzy węzłem wyższego poziomu o numerze $n+i$ a węzłem niższym o wartość o jeden wyższą niż poprzednio $i+1$.

- n to liczba węzłów na jednym pierścieniu,
- i to indeks węzła dolnego pierścienia, $i \in \{1, 2, \dots, n\}$,
- j to indeks węzła górnego pierścienia, $j \in \{n + 1, n + 2, \dots, 2n\}$,

Indeks węzła górnego $j(i)$ połączonego z węzłem dolnym i :

$$j(i) = n + i$$

Indeks następnego węzła dolnego $i'(i)$:

$$i'(i) = \begin{cases} i + 1 & i < n, \\ 1 & i = n, \end{cases}$$

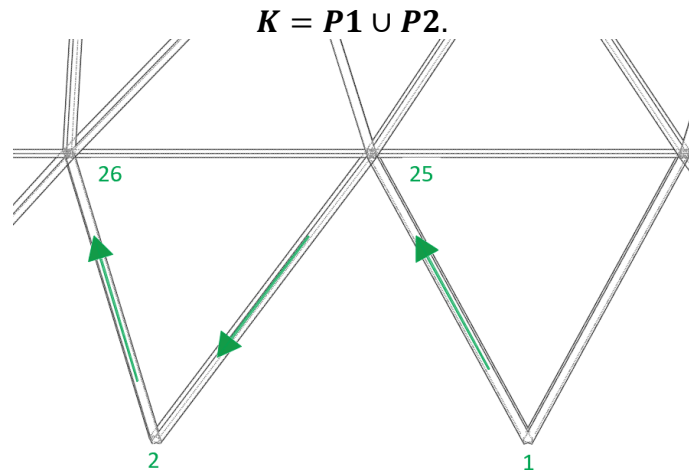
Zbiór par węzłów łączących się od dolnego pierścienia do górnego:

$$P_1 = \bigcup_{i=1}^n \{(i, j(i))\}$$

Zbiór par węzłów łączących się od górnego pierścienia do dolnego:

$$P_2 = \bigcup_{i=1}^n \{(i'(i), j(i))\}$$

Suma obu zbiorów w celu zapętlenia tworzenia węzłów:



Rysunek 30 Schemat tworzenia prętów

Z powyższego zbioru powstanie kratownica która łączy kolejno węzły 1 z 25, 25 z 2, 2 z 26, 26 z 3 i tak dalej aż węzły się zapętlą. Ważnym aspektem jest możliwość przesunięcia indeksowania wyższego poziomu węzłów ze względu na odmienną numerację węzłów z powodu obrotu pierścieni względem siebie o długość kątową w poziomie równą połowie odległości między dwoma węzłami i tym samym możliwość dostosowania numeracji za pomocą parametru.

Odpowiedź ChatGPT:

1. Łączenie węzłów pionowymi prętami kratownicowymi: Funkcja `create_truss_between_levels`

łączy odpowiadające sobie węzły z dwóch poziomów, tworząc między nimi pionowe pręty kratownicowe, co przedstawia poniższy wzór:

- Pionowy pręt kratownicowy między węzłem i na niższym poziomie L i odpowiadającym mu węzłem $i + \text{upper_node_offset}$ na wyższym poziomie U jest tworzony jako:

$$\text{pręt}_i = (\text{lower_node}[i], \text{upper_node}[(i + \text{upper_node_offset}) \bmod \text{num_upper_nodes}])$$

Wzór uwzględnia ewentualne przesunięcie o `upper_node_offset`, co pozwala na zachowanie odpowiedniego kąta między prętami ukośnymi.

2. Tworzenie prętów ukośnych: Funkcja łączy również węzły między poziomami ukośnymi prętami.

Każdy węzeł na wyższym poziomie jest łączony z kolejnym węzłem na niższym poziomie, co tworzy kratownicę diagonalną.

- Pręt ukośny między węzłem i na poziomie U i $i + 1$ na poziomie L jest dany wzorem:

$$\text{pręt ukośny}_i = (\text{upper_node}[(i + \text{upper_node_offset}) \bmod \text{num_upper_nodes}], \text{lower_node}[(i + 1)])$$

Dzięki modyfikatorowi modulo `\bmod`, pręt ukośny między ostatnim węzłem na górnym poziomie a pierwszym na dolnym poziomie także się tworzy, zapewniając zamknięcie pierścienia.

Rysunek 31 Objaśnienia kodu wykreowanego przez ChatGPT-4o

```
# Funkcja do tworzenia prętów kratownic między dwoma poziomami węzłów
def create_truss_between_levels(lower_nodes, upper_nodes, section_no, offset, upper_node_offset=0):
    num_lower_nodes = len(lower_nodes)
    num_upper_nodes = len(upper_nodes)

    # Sprawdzamy, czy liczba węzłów na poziomach jest taka sama
    if num_lower_nodes != num_upper_nodes:
        raise ValueError("Liczba węzłów na poziomach nie zgadza się!")

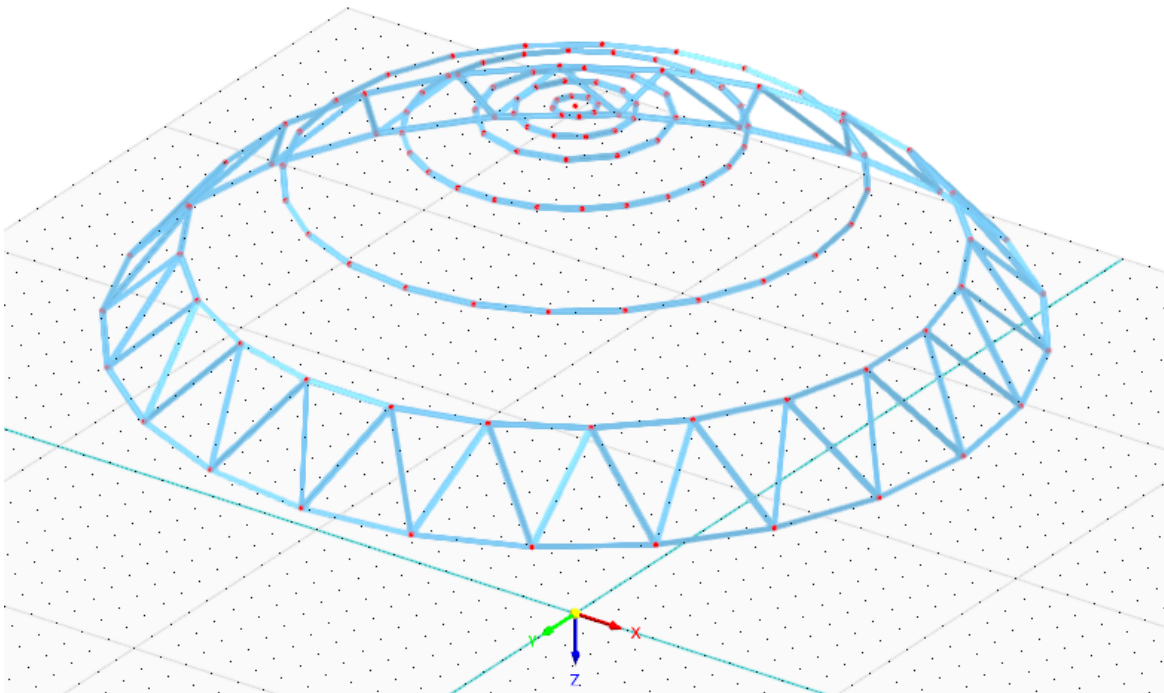
    for i in range(num_lower_nodes):
        lower_node = lower_nodes[i] # Węzeł na niższym poziomie
        upper_node_index = (i + upper_node_offset) % num_upper_nodes # Indeks górnego węzła z
        # uwzględnieniem przesunięcia
        upper_node = upper_nodes[upper_node_index] # Węzeł na wyższym poziomie

        # Tworzymy pręt między węzłem na niższym poziomie a następnym węzłem na wyższym poziomie
        next_upper_node_index = (upper_node_index + 1) % num_upper_nodes # Indeks następnego górnego
        # węzła
        next_lower_node = lower_nodes[(i + 1) % num_lower_nodes] # łączy ostatni z pierwszym na
        # niższym poziomie

        # Tworzymy pręty kratownicy
        Member(i + offset, lower_node, upper_node, start_section_no=section_no, end_section
            #_no=section_no) # Połączenie pionowe
        Member(i + offset + 100, upper_node, next_lower_node, start_section_no=section_no,
            #_end_section_no=section_no) # Połączenie ukośne

    # Tworzenie kratownicy między poziomem 0 a poziomem 1 (sekcja 8)
    create_truss_between_levels(node_ids[0], node_ids[1], section_no=8, offset=1000)
```

Rysunek 32 Kod przedstawiający funkcje tworzenia kratownicy między poziomami pierścieni



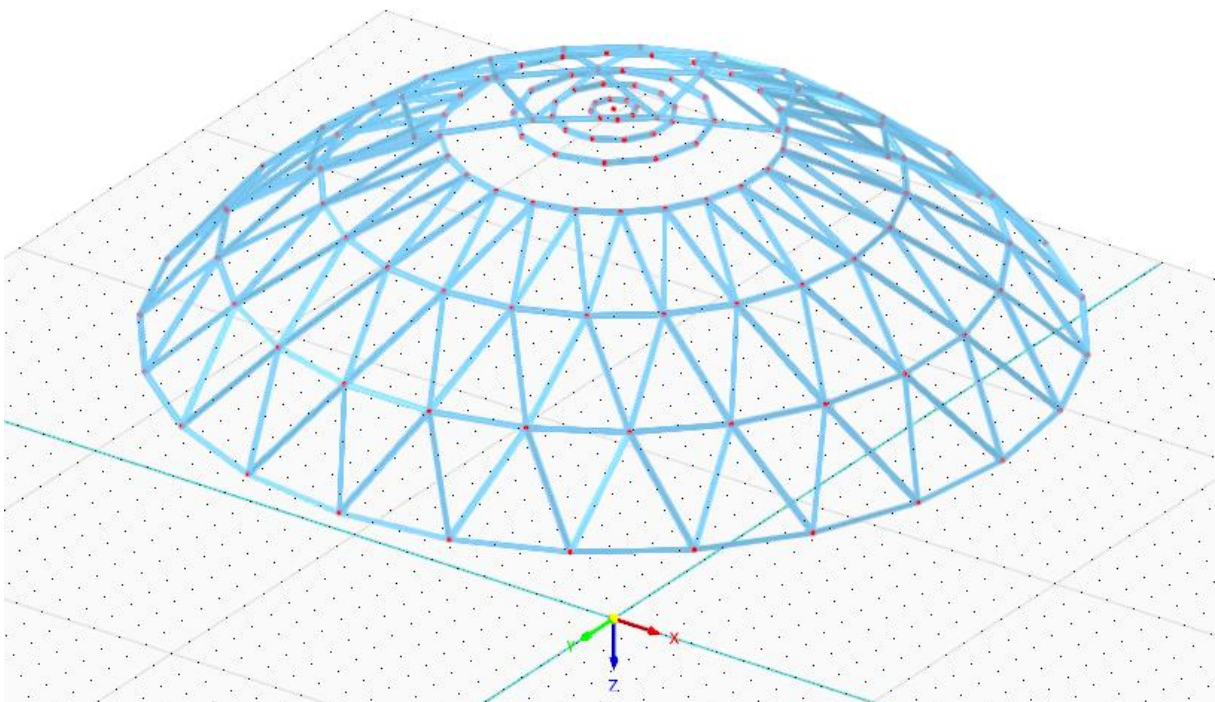
Rysunek 33 kratownica między poziomem 0 a poziomem 1 za pomocą utworzonego skryptu.

Etap 5 Powielenie funkcji tworzenia kratownic dla następnych poziomów

Założenie:

kolejnym etapem jest powielenie funkcji dla kolejnych kratownic między poziomem 1 a 2 oraz 2 a 3. Założony efekt uzyskano informując sztuczną inteligencję między którymi pierścieniami ma ją stworzyć.

Odpowiedź ChatGPT:



Rysunek 34 Utworzone kratownice za pomocą powielenia funkcji dla następnych węzłów

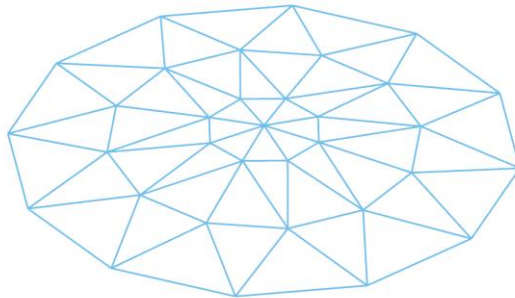
Komentarz:

zakłada się że między 3 a 4 poziomem zostanie utworzone skratowanie usztywniające w formie krzyżulców. Ten etap zostanie zamodelowany ręcznie z uwagi na skomplikowanie wzoru który musiałby opisywać wytworzenie prętów między konkretnymi węzłami. Zamierzony efekt jest taki aby usztywnić w tym miejscu konstrukcję w celu zredukowania oddziaływań na tak zwaną latarnię(górna część kopuły obejmująca skratowania trzech ostatnich pierścieni), która z uwagi na swoje niewielkie skratowania będzie narażona na znaczną podatność na obciążenie bifurakcyjne. Z tego względu nie wyklucza się dodatkowej modyfikacji położenia węzłów ostatnich dwóch pierścieni.

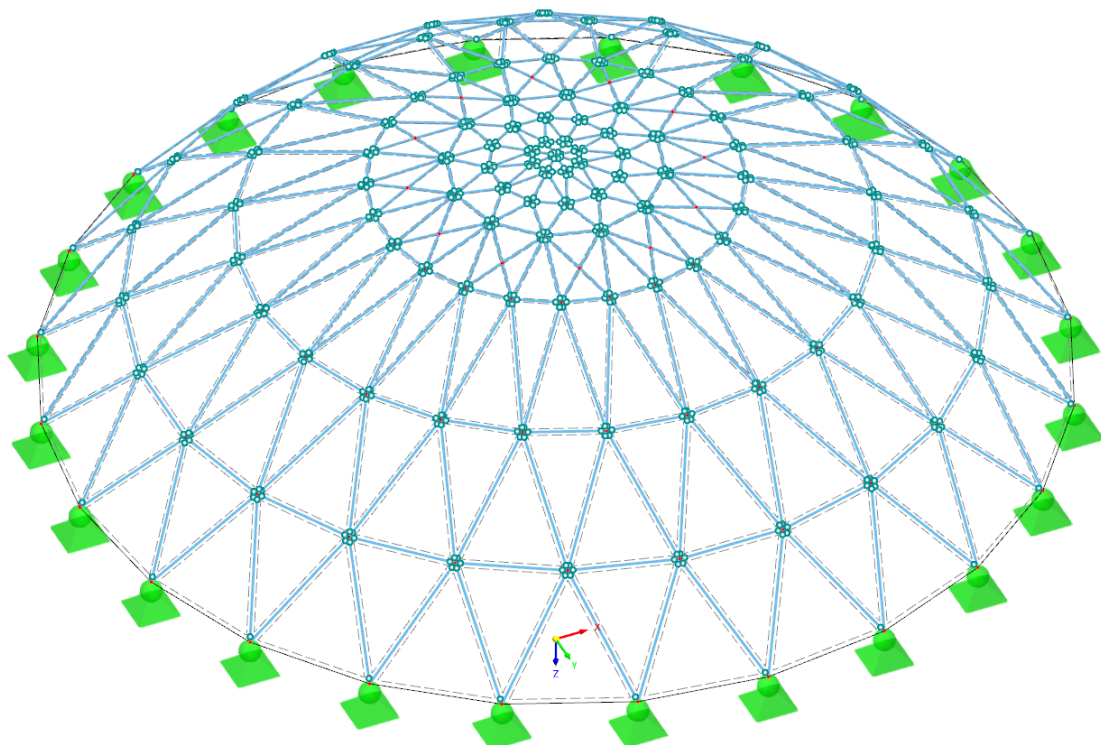
Powyżej opisany zabieg umożliwi również redukcję węzłów w ostatnich pierścieniach w celu ułatwienia wykonania odpowiednich połączeń stalowych i ułatwienia ich budowy.

Etap 6 Własnoręczne modelowanie krzyżulców oraz latarni sfery.**- zakończenie modelowania****Komentarz:**

pręty są definiowane za pomocą węzłów, które to z kolei są generowane przez skrypt. Oznacza to że można połączyć ręczne modelowanie z parametrycznym, umożliwiając późniejszą modyfikację konstrukcji za pomocą zdefiniowanych parametrów w skrypcie. Może to ułatwić konstruowanie niestandardowych tudzież nieschematycznych elementów konstrukcji.



Rysunek 36 konstrukcja latarni



Rysunek 35 Model konstrukcji w programie RFEM, widok aksonometryczny

4.1.4 Komentarz dotyczący projektowania z wykorzystaniem sztucznej inteligencji

4.1.4.1 Cechy użytkowania narzędzi umożliwiających wytwarzanie skryptu

Sztuczna inteligencja może usprawnić w znaczący sposób kreowanie skomplikowanych, lecz modułowych geometrii. Poniżej przedstawiam charakterystyczne cechy dla korzystania z narzędzi umożliwiających wytwarzanie skryptu:

Zalety:

- szybkie kreowanie geometrii bez skomplikowanych zabiegów tworzenia konstrukcji w samym programie do wymiarowania;
- matematyczna dokładność i przejrzystość geometrii przez opisanie jej za pomocą wzorów matematycznych;
- generowanie skryptu tylko za pomocą założeń opisanych słownie;
- możliwość parametryzowania poszczególnych elementów umożliwiająca dowolną modyfikację konstrukcji w czasie rzeczywistym jak np. rozmiary konstrukcji, długości prętów, liczba węzłów itp. ;
- sprawne tworzenie grup prętowych oraz uporządkowana numeracja węzłów oraz prętów;
- własnoręczne modelowanie dodatkowych elementów jest kompatybilne z późniejszą modyfikacją konstrukcji za pomocą parametrów,(tzn. wygenerowane węzły można ze sobą dowolnie łączyć prętami, a następnie modyfikować geometrię prętową za pomocą skryptu, co umożliwiło mi wykonstruowanie skratowań z możliwością ich późniejszego dostosowywanie ze względu na długość kątową skratowania).

Wady:

- potrzeba zaznajomienia sztucznej inteligencji ze skryptami kompatybilnymi z programem do wymiarowania konstrukcji(np. tworzenie węzłów opisuje się komendą node(), co musiałem mu zasugerować do użycia);
- iteracyjne podejście do tworzenia skryptu. Należy za każdym razem sprawdzić działanie poszczególnych etapów generowania skryptu i sprawdzić ich kompatybilność z całością;
- potrzeba dokładnego opisu matematycznego problematyki danych etapów wytwarzania geometrii.

4.1.4.2 Potencjalny rozwój technologii AI w branży konstruktorskiej

Zauważa się że sztuczna inteligencja w bardzo sprawny sposób radzi sobie z interpretacją słownych informacji, umożliwiających tworzenie skryptu. Charakteryzuje się kreatywnością jeśli chodzi o założenia matematyczne zawarte w danych funkcjach. Z uwagi na fakt że AI może korzystać z ogólnych informacji zawartych w internecie jest ona w stanie wspomóc projektowanie geometrii od strony matematycznej.

Dużym potencjałem jest kreowanie geometrii, korzystając z opisanych już w artykułach bądź książkach przeróżnych brył czy też siatek modułowych. Wystarczy zatem „nakarmić” sztuczną inteligencję daną wiedzą, a następnie wytworzyć własną geometrię na ich podstawie, zakładając parametryzację w celu dostosowania do własnych założeń.

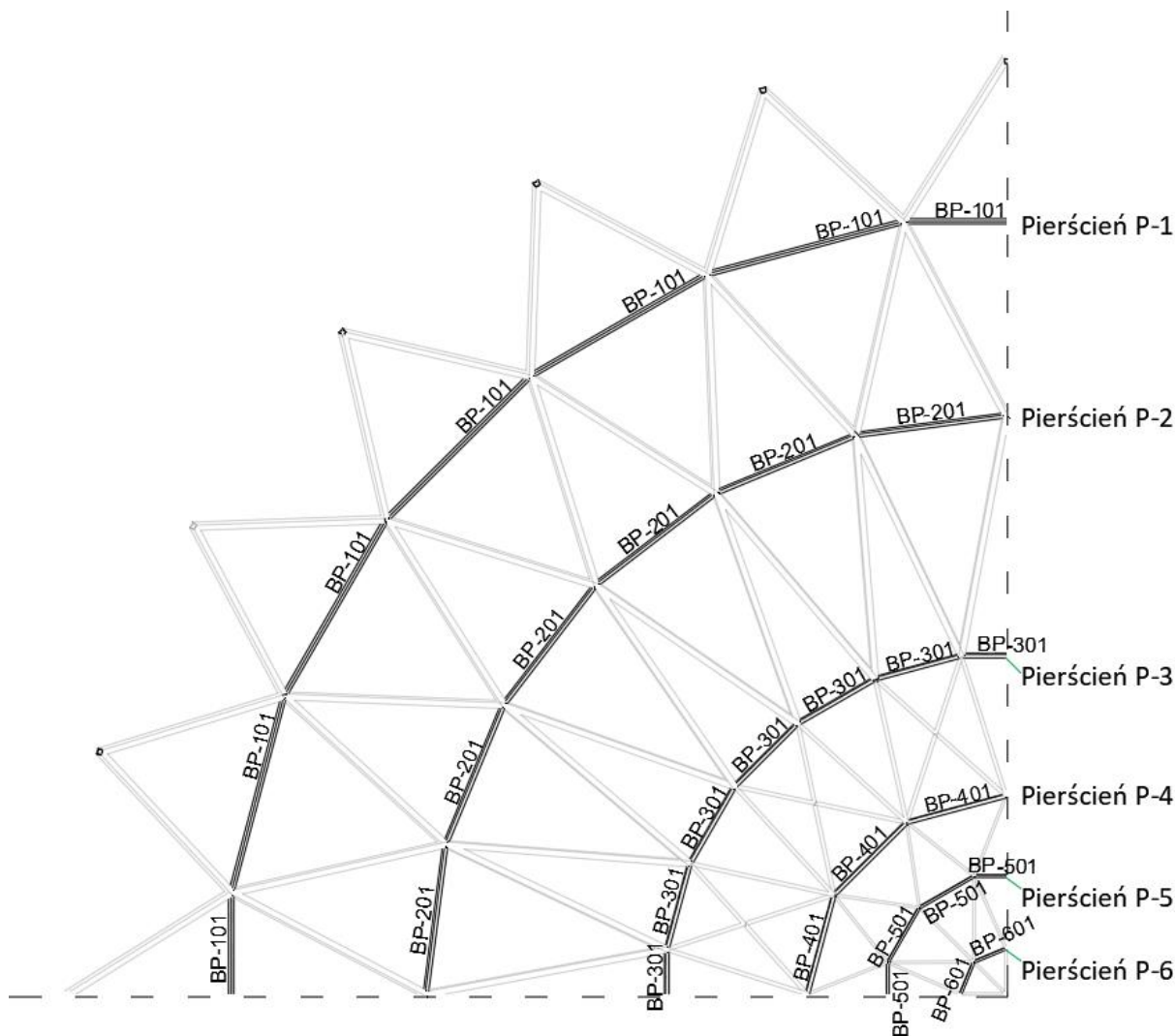
4.1.5 Ostateczna geometria

W modelu założono że stalowa konstrukcja oparta jest przegubowo na żelbetowym wieńcu pierścieniowym podpartym krzyżulcowymi podporami żelbetowymi połączonymi na sztywno z fundamentami. Klasa betonu w konstrukcji żelbetowej to C30/37. Z uwagi na duży przekrój wieńca 400x300, efekty rozciągania osiowego z uwagi na towarzyszące naprężenia rozciągające są na tyle małe że nie wpływają na przemieszczenia podpór konstrukcji stalowej. Stąd przyjmuje się przegubowo- nieprzesuwne podparcie konstrukcji kopuły.

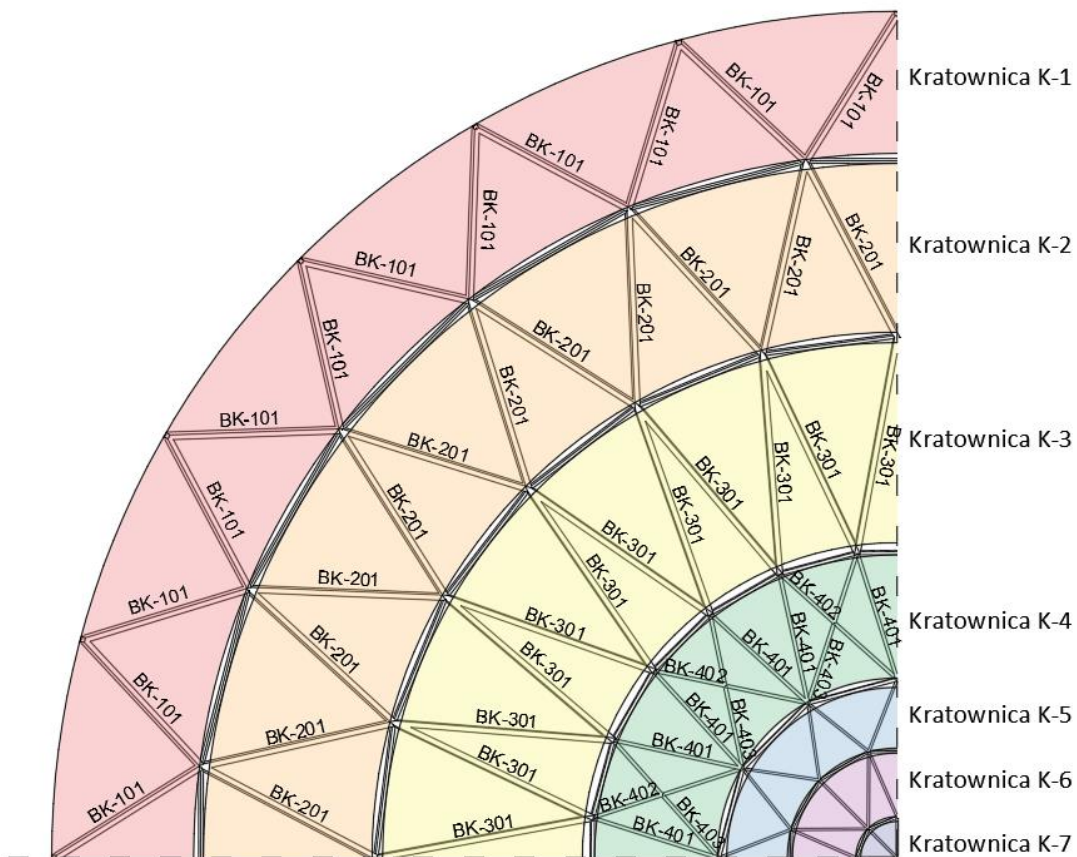
We wstępnym wariancie przyjmujemy że pręty są ze sobą połączone przegubowo, oprócz stężeń w czwartym rzędzie kratownic licząc od dołu.

Węzeł w najwyższym punkcie sfery został geometrycznie przesunięty o 10cm w osi globalnej Z a pierścień nr 7 o 5cm ze względu na występowanie efektu bifurkacji struktury prętowej, to znaczy wypadnięcia węzła ze struktury stabilnej w mechanizm ze względu na odkształcenie osiowe wywołane dużą siłą osiową spowodowaną z kolei efektem dźwigni.

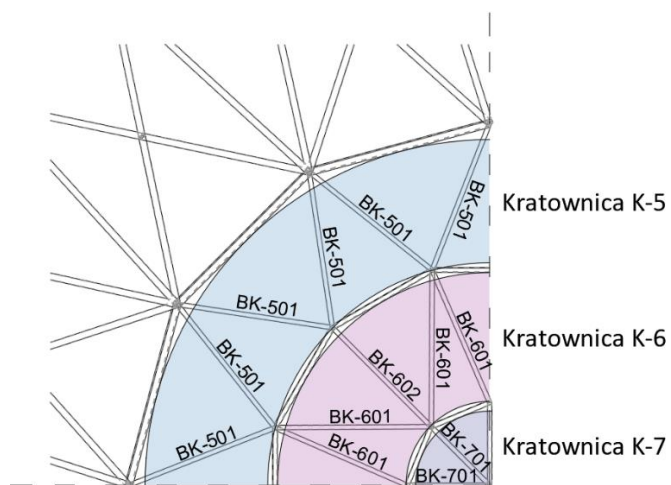
- Oznaczenia grup prętów oraz samych prętów



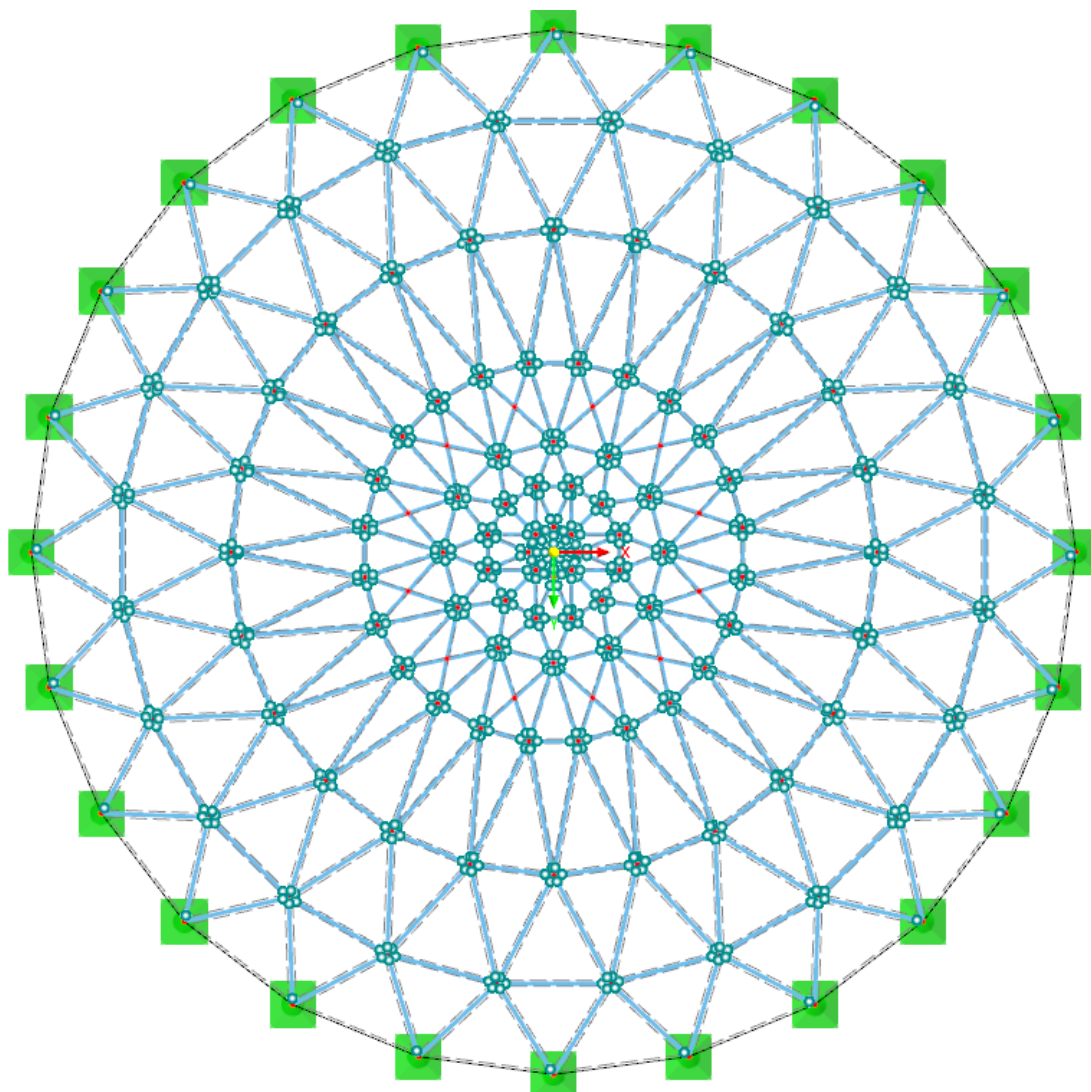
Rysunek 37 Oznaczenia grup pierścieni z indeksem [P], oraz numerów prętów o indeksie [BP]



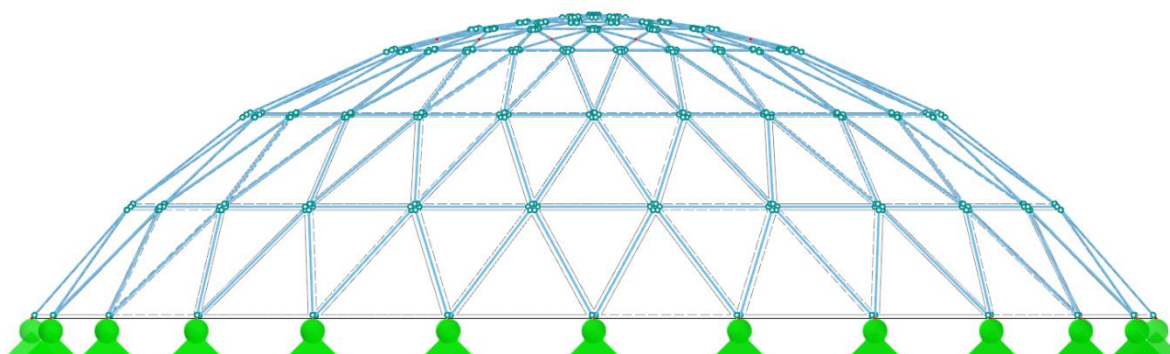
Rysunek 38 Oznaczenia grup kratownic z indeksem [K], oraz numerów prętów o indeksie [BK]



Rysunek 39 Oznaczenia grup kratownic latarni z indeksem [K], oraz numerów prętów o indeksie [BK]



Rysunek 40 Model konstrukcji w programie RFEM, rzut z góry



Rysunek 41 Model konstrukcji w programie RFEM, rzut z boku

5 Projekt techniczny

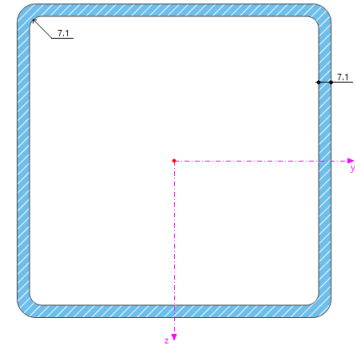
5.1 Obliczenia statyczno- wytrzymałościowe

5.1.1 Przekroje prętów

Przyjmujemy pręty z przekrojów gorącowalcowanych kwadratowych z grupy SHS ze ścianką nie cieńszą niż 3,2 mm.

5.1.2 Materiał

Materiał stosowany dla profili stalowych to stal niskowęglowa klasy S235 o klasie udarności J2.

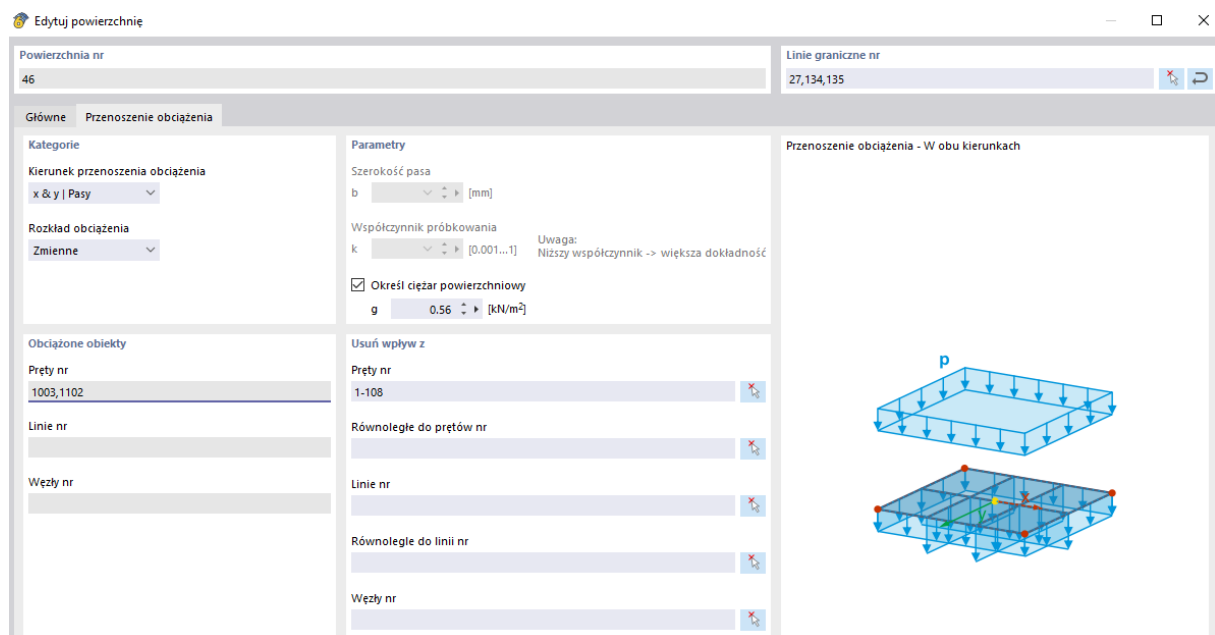


Rysunek 42 Przykładowy przekrój typu SHS

5.1.3 Obciążenia zadane w modelu

5.1.3.1 Obciążenie ciężarem własnym, PO1

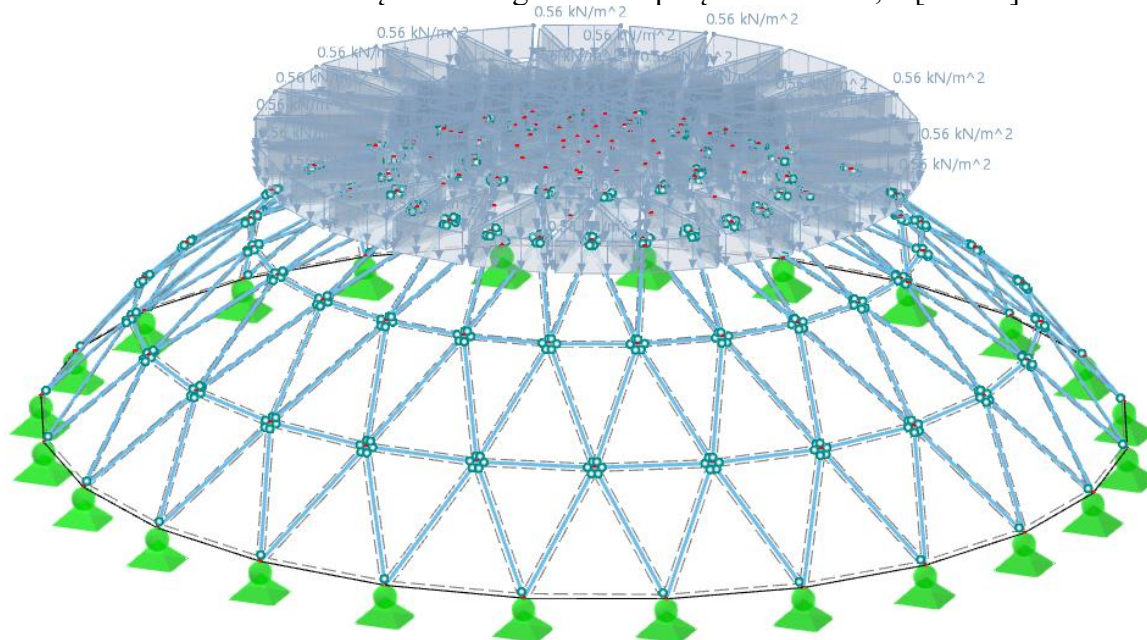
Obciążenie ciężarem własnym jest przyjmowane przez program automatycznie i będzie zmienne dla prętów w zależności od optymalizacji konstrukcji. Obciążenie od pokrycia zostało przyjęte jako ciężar zadanej powierzchni w programie o wartości $0,56 \text{ kN/m}^2$, które przechodzi tylko i wyłącznie na pręty kratownicy bez oparcia na pierścienie z uwagi na ortotropowość działania blachy trapezowej.



Rysunek 43 ustawienia ciężaru powierzchniowego

5.1.3.2 Obciążenie śniegiem-przypadek 1, PO2

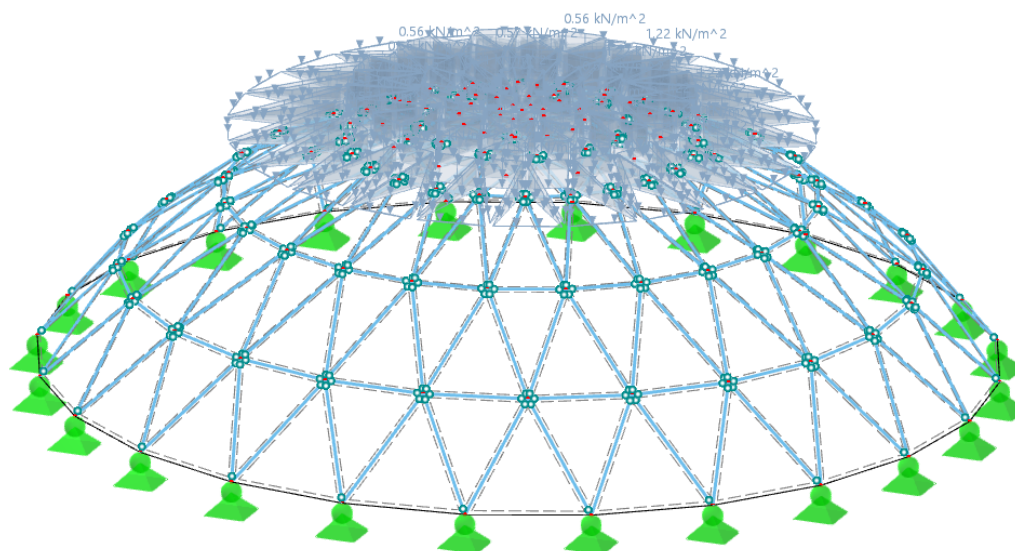
Równomierne rzutowane obciążenie śniegiem na kopułę o wartości $0,56[\text{kN}/\text{m}^2]$.



Rysunek 44 Przedstawienie pierwszego przypadku równomiernego obciążenia śniegiem $[\text{kN}/\text{m}^2]$

5.1.3.3 Obciążenie śniegiem-przypadek 2, PO3/PO8

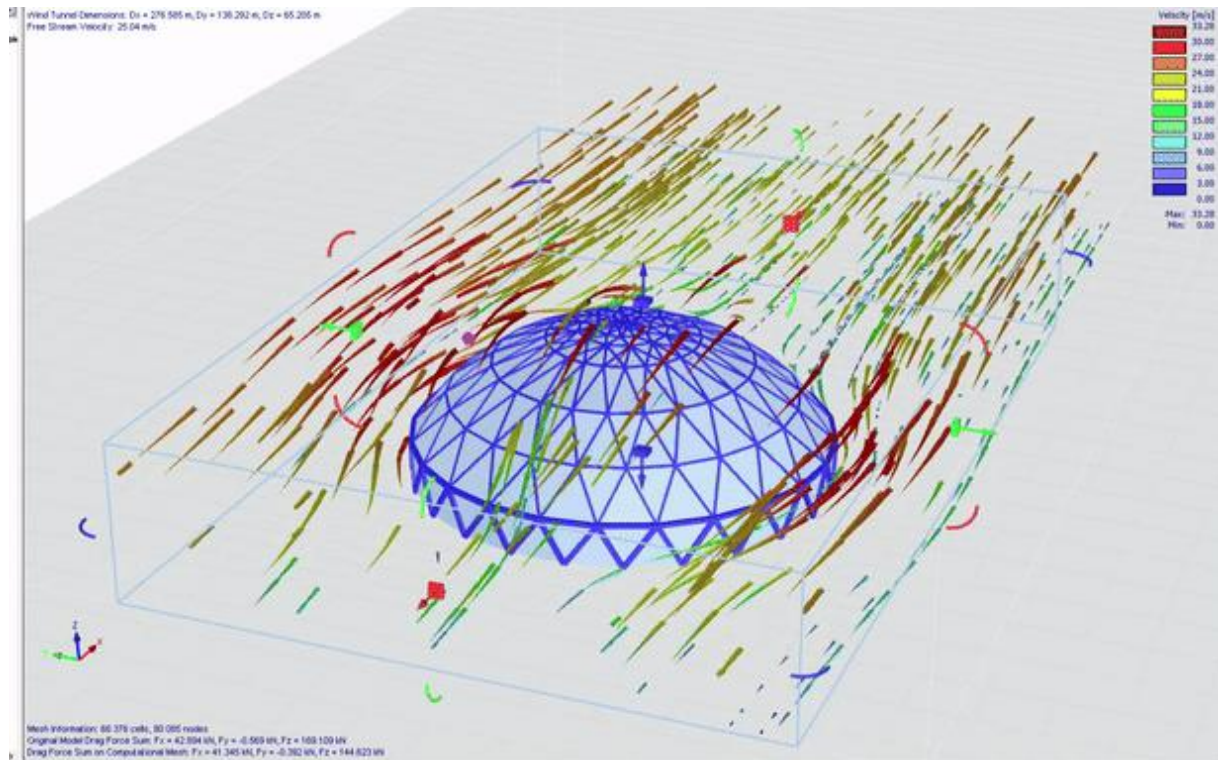
Obciążenie rozłożone promieniowo w formie trójkątnego rozkładu. Połowa sfery jest obciążona do wartości szczytowej $1,4\text{kN}/\text{m}^2$; natomiast druga połowa obciążeniem o połowę mniejszym co ma zasymulować obciążenie częściowo usuniętego śniegu poprzez działanie wiatru, który tworzy zasypy śnieżne na zawietrznej części obiektu. Przyjęto dwa przypadki wystąpienia obciążenia PO3, oraz PO8 jako odbicie lustrzane w płaszczyźnie YZ w celu określenia najniekorzystniejszego działania obciążenia śniegiem oraz wiatru.



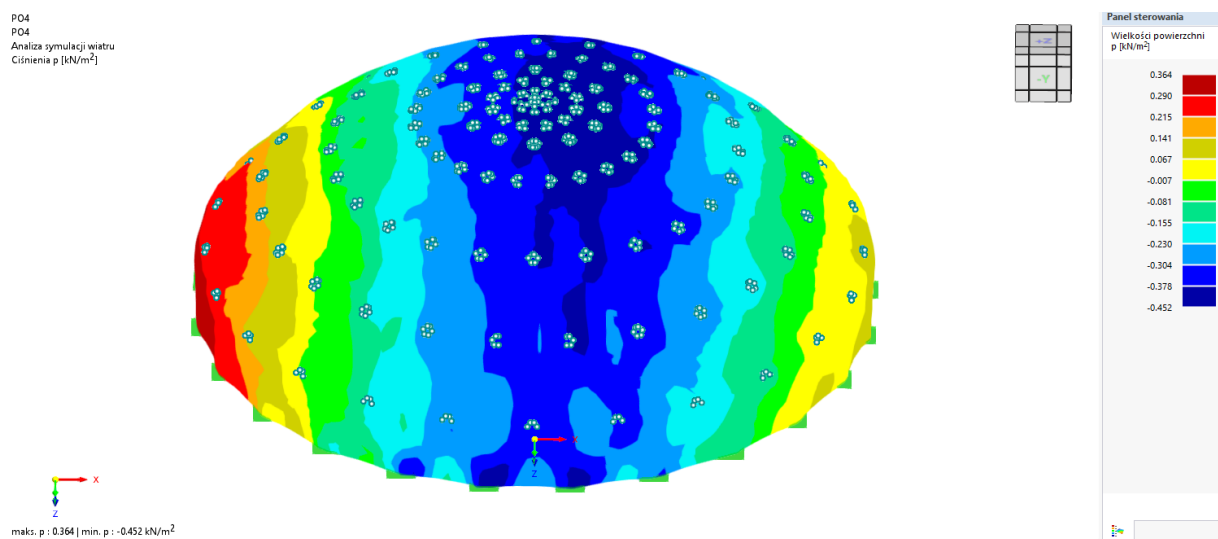
Rysunek 45 Przedstawienie drugiego przypadku równomiernego obciążenia śniegiem $[\text{kN}/\text{m}^2]$

5.1.3.4 Obciążenie wiatrem na zewnątrz konstrukcji PO4

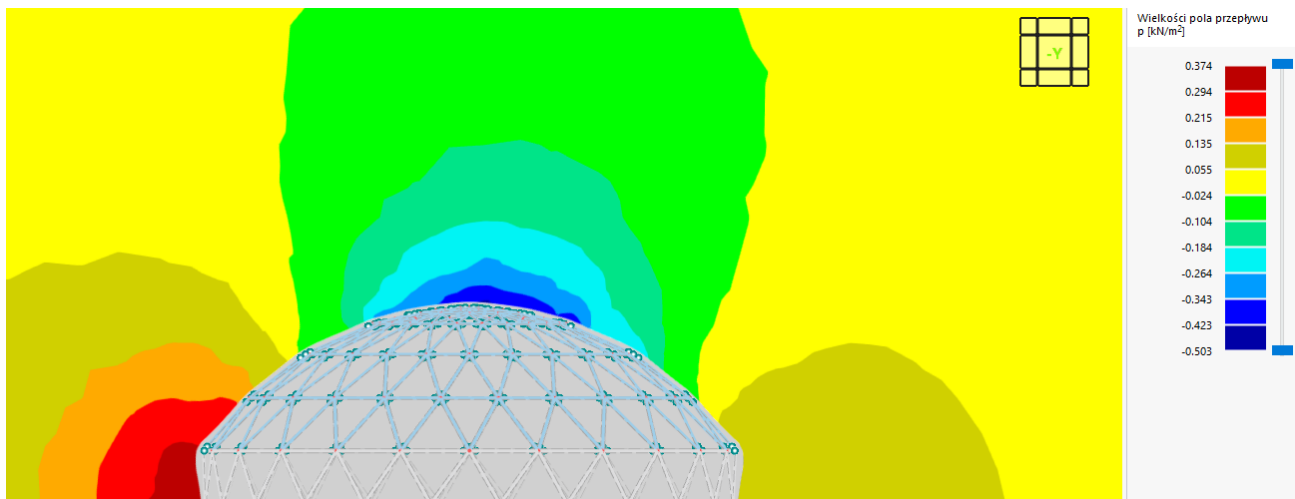
Obciążenie wiatrem zostało wygenerowane poprzez zasymulowanie tunelu aerodynamicznego w programie RWind dedykowanym dla programu Rfem. W samym programie zostały ustawione analogiczne parametry do przedstawionych w obliczeniach wg PN-EN 1991-1-4. Turbulencje wiatru zostały wg zaleceń producentów programu ustawione na stałe wynoszące 17% w celu zawyżenia wyników i otrzymania zgodności z obliczonymi wartościami. Dodatkowo została wymodelowana dolna część ściany wysokości 3m w celu uzyskania wiarygodnych wyników, która jednak nie jest uwzględniana w dalszych obliczeniach.



Rysunek 46 Przedstawienie wektorów prędkości przepływu wiatru [m/s]



Rysunek 47 Mapa ciśnienia od wiatru wynikająca z symulacji wiatrowej [kN/m²]

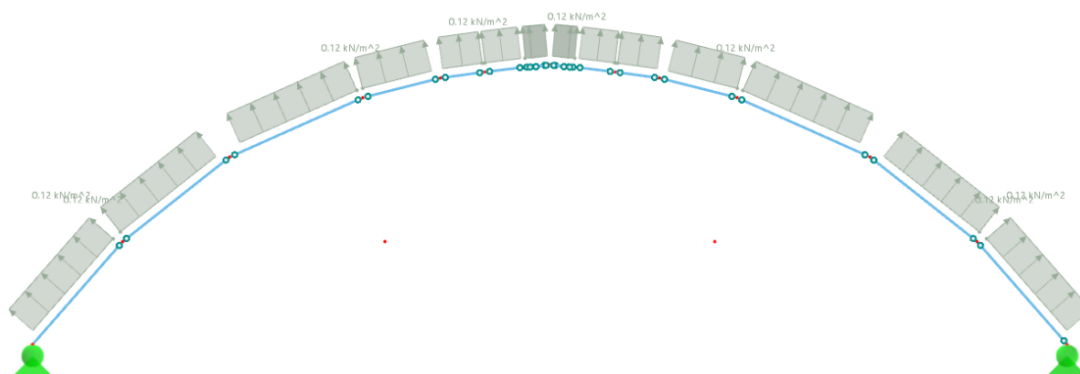


Rysunek 48 Przekrój przedstawiający ciśnienie w płaszczyźnie przecięcia przez środek konstrukcji [kN/m²]

5.1.3.5 Obciążenie wiatrem wewnątrz konstrukcji PO5, PO6

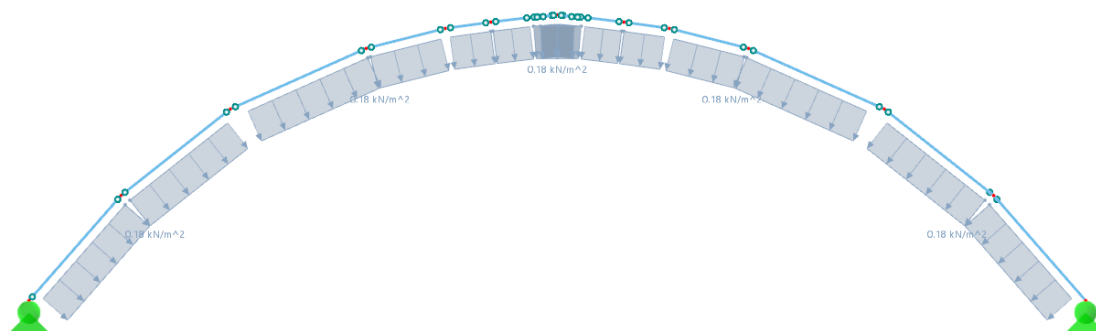
Obciążenie parcia i ssania wewnętrznego zdefiniowane jest jako ciśnienie wewnętrzne równoległe do lokalnej osi z prostopadłej do powierzchni działania.

- Parcie PO5 o wartości $W_{i1} = 0,12\text{kN/m}^2$



Rysunek 49 Parcie wiatru wewnątrz budynku [kN/m²]

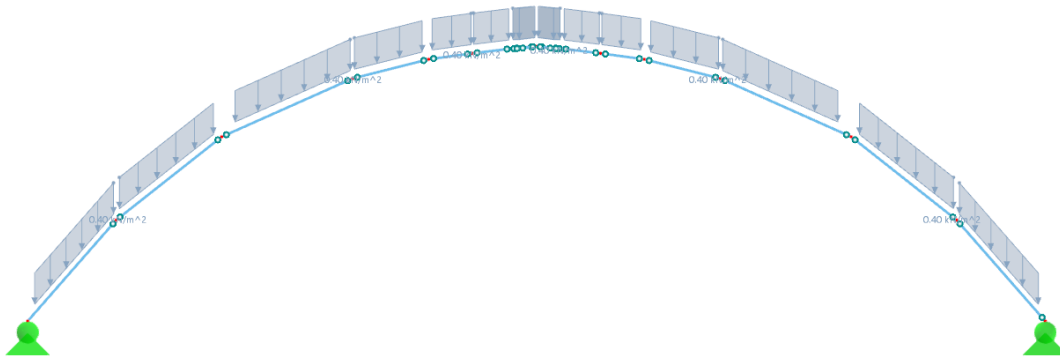
- Ssanie PO6 o wartości $W_{i2} = 0,18\text{kN/m}^2$



Rysunek 50 Ssanie wiatru wewnątrz budynku [kN/m²]

5.1.3.6 Obciążenia użytkowe kat. H PO7

Obciążenie użytkowe zdefiniowano jako nierzutowane obciążenie równomiernie rozłożone na powierzchni tworzące pokrycie o zwrocie równoległym do globalnej osi Z. Wartość obciążenia to $q_k = 0,4$ [kN/m²].



Rysunek 51 Obciążenie użytkowe kat. H dla dachów nieużytkowych [kN/m²]

5.1.4 Kombinacje obciążeń wg PN-EN 1990 SGN oraz SGU

5.1.4.1 Lista obciążeń wchodzących w skład obliczeń

- PO1- Obciążenie stałe;
- PO2- Obciążenie śniegiem, przypadek 1;
- PO3- Obciążenie śniegiem przypadek 2;
- PO8- Obciążenie śniegiem przypadek 3;
- PO4 Obciążenie wiatrem zewnętrzne ;
- PO5 Obciążenie wiatrem wewnętrzne parcie;
- PO6 Obciążenie wiatrem wewnętrzne ssanie;
- PO7 Obciążenie użytkowe .

5.1.4.2 Kombinacje obciążeń obliczeniowych SGN

Kombinacje będą generowane zgodnie z założeniami PN-EN 1990 6.10a i 6.10b -Tab. A1.2(B)

$$\Sigma \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_{Q,1} \cdot \Psi_{0,1} \cdot Q_{k,1} + \Sigma \gamma_{Q,i} \cdot \Psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$$

$$\Sigma \xi_j \cdot \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \Sigma \gamma_{Q,i} \cdot \Psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$$

Tabela 5 Kombinacje obciążeń wygenerowane poprzez program na podstawie założeń zgodnie z PN-EN 1990 6.10a i 6.10b

| | | | |
|------|---|-------------|--|
| KO3 | $1.35 * PO1 + 0.75 * PO3$ | KO51 | $1.15 * PO1 + 0.75 * PO3 + 1.50 * PO4 + 0.90 * PO6$ |
| KO4 | $1.35 * PO1 + 0.75 * PO8$ | KO52 | $1.15 * PO1 + 0.75 * PO8 + 1.50 * PO4 + 0.90 * PO5$ |
| KO5 | $1.35 * PO1 + 0.75 * PO2 + 0.90 * PO4$ | KO53 | $1.15 * PO1 + 0.75 * PO8 + 1.50 * PO4 + 0.90 * PO6$ |
| KO6 | $1.35 * PO1 + 0.75 * PO3 + 0.90 * PO4$ | KO54 | $1.15 * PO1 + 1.50 * PO4 + 0.90 * PO5$ |
| KO7 | $1.35 * PO1 + 0.75 * PO8 + 0.90 * PO4$ | KO55 | $1.15 * PO1 + 1.50 * PO4 + 0.90 * PO6$ |
| KO8 | $1.35 * PO1 + 0.75 * PO2 + 0.90 * PO4 + 0.90 * PO5$ | KO56 | $1.15 * PO1 + 1.50 * PO7$ |
| KO9 | $1.35 * PO1 + 0.75 * PO2 + 0.90 * PO4 + 0.90 * PO6$ | KO57 | $1.15 * PO1 + 0.75 * PO2 + 1.50 * PO7$ |
| KO10 | $1.35 * PO1 + 0.75 * PO3 + 0.90 * PO4 + 0.90 * PO5$ | KO58 | $1.15 * PO1 + 0.75 * PO3 + 1.50 * PO7$ |
| KO11 | $1.35 * PO1 + 0.75 * PO3 + 0.90 * PO4 + 0.90 * PO6$ | KO59 | $1.15 * PO1 + 0.75 * PO8 + 1.50 * PO7$ |
| KO12 | $1.35 * PO1 + 0.75 * PO8 + 0.90 * PO4 + 0.90 * PO5$ | KO60 | $1.15 * PO1 + 0.75 * PO2 + 0.90 * PO4 + 1.50 * PO7$ |
| KO13 | $1.35 * PO1 + 0.75 * PO8 + 0.90 * PO4 + 0.90 * PO6$ | KO61 | $1.15 * PO1 + 0.75 * PO3 + 0.90 * PO4 + 1.50 * PO7$ |
| KO14 | $1.35 * PO1 + 0.75 * PO2 + 0.90 * PO5$ | KO62 | $1.15 * PO1 + 0.75 * PO8 + 0.90 * PO4 + 1.50 * PO7$ |
| KO15 | $1.35 * PO1 + 0.75 * PO2 + 0.90 * PO6$ | KO63 | $1.15 * PO1 + 0.75 * PO2 + 0.90 * PO4 + 1.50 * PO7 + 0.90 * PO5$ |
| KO16 | $1.35 * PO1 + 0.75 * PO3 + 0.90 * PO5$ | KO64 | $1.15 * PO1 + 0.75 * PO2 + 0.90 * PO4 + 1.50 * PO7 + 0.90 * PO6$ |
| KO17 | $1.35 * PO1 + 0.75 * PO3 + 0.90 * PO6$ | KO65 | $1.15 * PO1 + 0.75 * PO3 + 0.90 * PO4 + 1.50 * PO7 + 0.90 * PO5$ |
| KO18 | $1.35 * PO1 + 0.75 * PO8 + 0.90 * PO5$ | KO66 | $1.15 * PO1 + 0.75 * PO3 + 0.90 * PO4 + 1.50 * PO7 + 0.90 * PO6$ |
| KO19 | $1.35 * PO1 + 0.75 * PO8 + 0.90 * PO6$ | KO67 | $1.15 * PO1 + 0.75 * PO8 + 0.90 * PO4 + 1.50 * PO7 + 0.90 * PO5$ |
| KO20 | $1.35 * PO1 + 0.90 * PO4$ | KO68 | $1.15 * PO1 + 0.75 * PO8 + 0.90 * PO4 + 1.50 * PO7 + 0.90 * PO6$ |
| KO21 | $1.35 * PO1 + 0.90 * PO4 + 0.90 * PO5$ | KO69 | $1.15 * PO1 + 0.75 * PO2 + 1.50 * PO7 + 0.90 * PO5$ |
| KO22 | $1.35 * PO1 + 0.90 * PO4 + 0.90 * PO6$ | KO70 | $1.15 * PO1 + 0.75 * PO2 + 1.50 * PO7 + 0.90 * PO6$ |
| KO23 | $1.35 * PO1 + 0.90 * PO5$ | KO71 | $1.15 * PO1 + 0.75 * PO3 + 1.50 * PO7 + 0.90 * PO5$ |
| KO24 | $1.35 * PO1 + 0.90 * PO6$ | KO72 | $1.15 * PO1 + 0.75 * PO3 + 1.50 * PO7 + 0.90 * PO6$ |
| KO25 | $1.15 * PO1$ | KO73 | $1.15 * PO1 + 0.75 * PO8 + 1.50 * PO7 + 0.90 * PO5$ |
| KO26 | $1.15 * PO1 + 1.50 * PO2$ | KO74 | $1.15 * PO1 + 0.75 * PO8 + 1.50 * PO7 + 0.90 * PO6$ |
| KO27 | $1.15 * PO1 + 1.50 * PO3$ | KO75 | $1.15 * PO1 + 0.90 * PO4 + 1.50 * PO7$ |
| KO28 | $1.15 * PO1 + 1.50 * PO8$ | KO76 | $1.15 * PO1 + 0.90 * PO4 + 1.50 * PO7 + 0.90 * PO5$ |
| KO29 | $1.15 * PO1 + 1.50 * PO2 + 0.90 * PO4$ | KO77 | $1.15 * PO1 + 0.90 * PO4 + 1.50 * PO7 + 0.90 * PO6$ |
| KO30 | $1.15 * PO1 + 1.50 * PO3 + 0.90 * PO4$ | KO78 | $1.15 * PO1 + 1.50 * PO7 + 0.90 * PO5$ |
| KO31 | $1.15 * PO1 + 1.50 * PO8 + 0.90 * PO4$ | KO79 | $1.15 * PO1 + 1.50 * PO7 + 0.90 * PO6$ |
| KO32 | $1.15 * PO1 + 1.50 * PO2 + 0.90 * PO4 + 0.90 * PO5$ | KO80 | $1.15 * PO1 + 1.50 * PO5$ |
| KO33 | $1.15 * PO1 + 1.50 * PO2 + 0.90 * PO4 + 0.90 * PO6$ | KO81 | $1.15 * PO1 + 1.50 * PO6$ |
| KO34 | $1.15 * PO1 + 1.50 * PO3 + 0.90 * PO4 + 0.90 * PO5$ | KO82 | $1.15 * PO1 + 0.75 * PO2 + 1.50 * PO5$ |
| KO35 | $1.15 * PO1 + 1.50 * PO3 + 0.90 * PO4 + 0.90 * PO6$ | KO83 | $1.15 * PO1 + 0.75 * PO2 + 1.50 * PO6$ |
| KO36 | $1.15 * PO1 + 1.50 * PO8 + 0.90 * PO4 + 0.90 * PO5$ | KO84 | $1.15 * PO1 + 0.75 * PO3 + 1.50 * PO5$ |
| KO37 | $1.15 * PO1 + 1.50 * PO8 + 0.90 * PO4 + 0.90 * PO6$ | KO85 | $1.15 * PO1 + 0.75 * PO3 + 1.50 * PO6$ |
| KO38 | $1.15 * PO1 + 1.50 * PO2 + 0.90 * PO5$ | KO86 | $1.15 * PO1 + 0.75 * PO8 + 1.50 * PO5$ |
| KO39 | $1.15 * PO1 + 1.50 * PO2 + 0.90 * PO6$ | KO87 | $1.15 * PO1 + 0.75 * PO8 + 1.50 * PO6$ |
| KO40 | $1.15 * PO1 + 1.50 * PO3 + 0.90 * PO5$ | KO88 | $1.15 * PO1 + 0.75 * PO2 + 0.90 * PO4 + 1.50 * PO5$ |
| KO41 | $1.15 * PO1 + 1.50 * PO3 + 0.90 * PO6$ | KO89 | $1.15 * PO1 + 0.75 * PO2 + 0.90 * PO4 + 1.50 * PO6$ |
| KO42 | $1.15 * PO1 + 1.50 * PO8 + 0.90 * PO5$ | KO90 | $1.15 * PO1 + 0.75 * PO3 + 0.90 * PO4 + 1.50 * PO5$ |
| KO43 | $1.15 * PO1 + 1.50 * PO8 + 0.90 * PO6$ | KO91 | $1.15 * PO1 + 0.75 * PO3 + 0.90 * PO4 + 1.50 * PO6$ |
| KO44 | $1.15 * PO1 + 1.50 * PO4$ | KO92 | $1.15 * PO1 + 0.75 * PO8 + 0.90 * PO4 + 1.50 * PO5$ |
| KO45 | $1.15 * PO1 + 0.75 * PO2 + 1.50 * PO4$ | KO93 | $1.15 * PO1 + 0.75 * PO8 + 0.90 * PO4 + 1.50 * PO6$ |
| KO46 | $1.15 * PO1 + 0.75 * PO3 + 1.50 * PO4$ | KO94 | $1.15 * PO1 + 0.90 * PO4 + 1.50 * PO5$ |
| KO47 | $1.15 * PO1 + 0.75 * PO8 + 1.50 * PO4$ | KO95 | $1.15 * PO1 + 0.90 * PO4 + 1.50 * PO6$ |
| KO48 | $1.15 * PO1 + 0.75 * PO2 + 1.50 * PO4 + 0.90 * PO5$ | KO96 | $1.15 * PO1 + 0.90 * PO4 + 1.50 * PO6$ |
| KO49 | $1.15 * PO1 + 0.75 * PO2 + 1.50 * PO4 + 0.90 * PO6$ | | |
| KO50 | $1.15 * PO1 + 0.75 * PO3 + 1.50 * PO4 + 0.90 * PO5$ | | |

5.1.4.3 Kombinacje obciążeń charakterystycznych SGU

Kombinacje będą generowane zgodnie z założeniami PN-EN 1990 (6.14b)

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

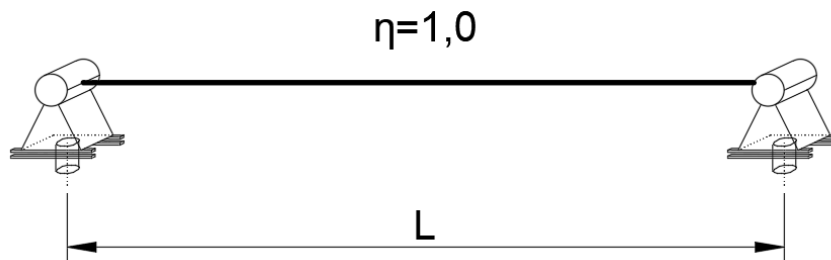
Tabela 6 Kombinacje obciążeń wygenerowane poprzez program na podstawie założeń zgodnie z PN-EN 1990 (6.14b)

| | | | |
|-------|-------------------------------------|-------|--|
| KO96 | PO1 | KO132 | PO1 + 0.50 * PO3 + 0.60 * PO4 + PO7 |
| KO97 | PO1 + PO2 | KO133 | PO1 + 0.50 * PO8 + 0.60 * PO4 + PO7 |
| KO98 | PO1 + PO3 | KO134 | PO1 + 0.50 * PO2 + 0.60 * PO4 + PO7 + 0.60 * PO5 |
| KO99 | PO1 + PO8 | KO135 | PO1 + 0.50 * PO2 + 0.60 * PO4 + PO7 + 0.60 * PO6 |
| KO100 | PO1 + PO3 + 0.60 * PO4 | KO136 | PO1 + 0.50 * PO3 + 0.60 * PO4 + PO7 + 0.60 * PO5 |
| KO101 | PO1 + PO8 + 0.60 * PO4 | KO137 | PO1 + 0.50 * PO3 + 0.60 * PO4 + PO7 + 0.60 * PO6 |
| KO102 | PO1 + PO2 + 0.60 * PO4 + 0.00 * PO7 | KO138 | PO1 + 0.50 * PO8 + 0.60 * PO4 + PO7 + 0.60 * PO5 |
| KO103 | PO1 + PO2 + 0.60 * PO4 + 0.60 * PO5 | KO139 | PO1 + 0.50 * PO8 + 0.60 * PO4 + PO7 + 0.60 * PO6 |
| KO104 | PO1 + PO2 + 0.60 * PO4 + 0.60 * PO6 | KO140 | PO1 + 0.50 * PO2 + PO7 + 0.60 * PO5 |
| KO105 | PO1 + PO3 + 0.60 * PO4 + 0.60 * PO5 | KO141 | PO1 + 0.50 * PO2 + PO7 + 0.60 * PO6 |
| KO106 | PO1 + PO3 + 0.60 * PO4 + 0.60 * PO6 | KO142 | PO1 + 0.50 * PO3 + PO7 + 0.60 * PO5 |
| KO107 | PO1 + PO8 + 0.60 * PO4 + 0.60 * PO5 | KO143 | PO1 + 0.50 * PO3 + PO7 + 0.60 * PO6 |
| KO108 | PO1 + PO8 + 0.60 * PO4 + 0.60 * PO6 | KO144 | PO1 + 0.50 * PO8 + PO7 + 0.60 * PO5 |
| KO109 | PO1 + PO2 + 0.60 * PO5 | KO145 | PO1 + 0.50 * PO8 + PO7 + 0.60 * PO6 |
| KO110 | PO1 + PO2 + 0.60 * PO6 | KO146 | PO1 + 0.60 * PO4 + PO7 |
| KO111 | PO1 + PO3 + 0.60 * PO5 | KO147 | PO1 + 0.60 * PO4 + PO7 + 0.60 * PO5 |
| KO112 | PO1 + PO3 + 0.60 * PO6 | KO148 | PO1 + 0.60 * PO4 + PO7 + 0.60 * PO6 |
| KO113 | PO1 + PO8 + 0.60 * PO5 | KO149 | PO1 + PO7 + 0.60 * PO5 |
| KO114 | PO1 + PO8 + 0.60 * PO6 | KO150 | PO1 + PO7 + 0.60 * PO6 |
| KO115 | PO1 + PO4 | KO151 | PO1 + PO5 |
| KO116 | PO1 + 0.50 * PO3 + PO4 | KO152 | PO1 + PO6 |
| KO117 | PO1 + 0.50 * PO8 + PO4 | KO153 | PO1 + 0.50 * PO2 + PO5 |
| KO118 | PO1 + 0.50 * PO2 + PO4 + 0.00 * PO7 | KO154 | PO1 + 0.50 * PO2 + PO6 |
| KO119 | PO1 + 0.50 * PO2 + PO4 + 0.60 * PO5 | KO155 | PO1 + 0.50 * PO3 + PO5 |
| KO120 | PO1 + 0.50 * PO2 + PO4 + 0.60 * PO6 | KO156 | PO1 + 0.50 * PO3 + PO6 |
| KO121 | PO1 + 0.50 * PO3 + PO4 + 0.60 * PO5 | KO157 | PO1 + 0.50 * PO8 + PO5 |
| KO122 | PO1 + 0.50 * PO3 + PO4 + 0.60 * PO6 | KO158 | PO1 + 0.50 * PO8 + PO6 |
| KO123 | PO1 + 0.50 * PO8 + PO4 + 0.60 * PO5 | KO159 | PO1 + 0.50 * PO2 + 0.60 * PO4 + PO5 |
| KO124 | PO1 + 0.50 * PO8 + PO4 + 0.60 * PO6 | KO160 | PO1 + 0.50 * PO2 + 0.60 * PO4 + PO6 |
| KO125 | PO1 + PO4 + 0.60 * PO5 | KO161 | PO1 + 0.50 * PO3 + 0.60 * PO4 + PO5 |
| KO126 | PO1 + PO4 + 0.60 * PO6 | KO162 | PO1 + 0.50 * PO3 + 0.60 * PO4 + PO6 |
| KO127 | PO1 + PO7 | KO163 | PO1 + 0.50 * PO8 + 0.60 * PO4 + PO5 |
| KO128 | PO1 + 0.50 * PO2 + PO7 | KO164 | PO1 + 0.50 * PO8 + 0.60 * PO4 + PO6 |
| KO129 | PO1 + 0.50 * PO3 + PO7 | KO165 | PO1 + 0.60 * PO4 + PO5 |
| KO130 | PO1 + 0.50 * PO8 + PO7 | KO166 | PO1 + 0.60 * PO4 + PO6 |
| KO131 | PO1 + 0.50 * PO2 + 0.60 * PO4 + PO7 | | |

5.1.5 Wstępne wymiarowanie ustrojów prętowych

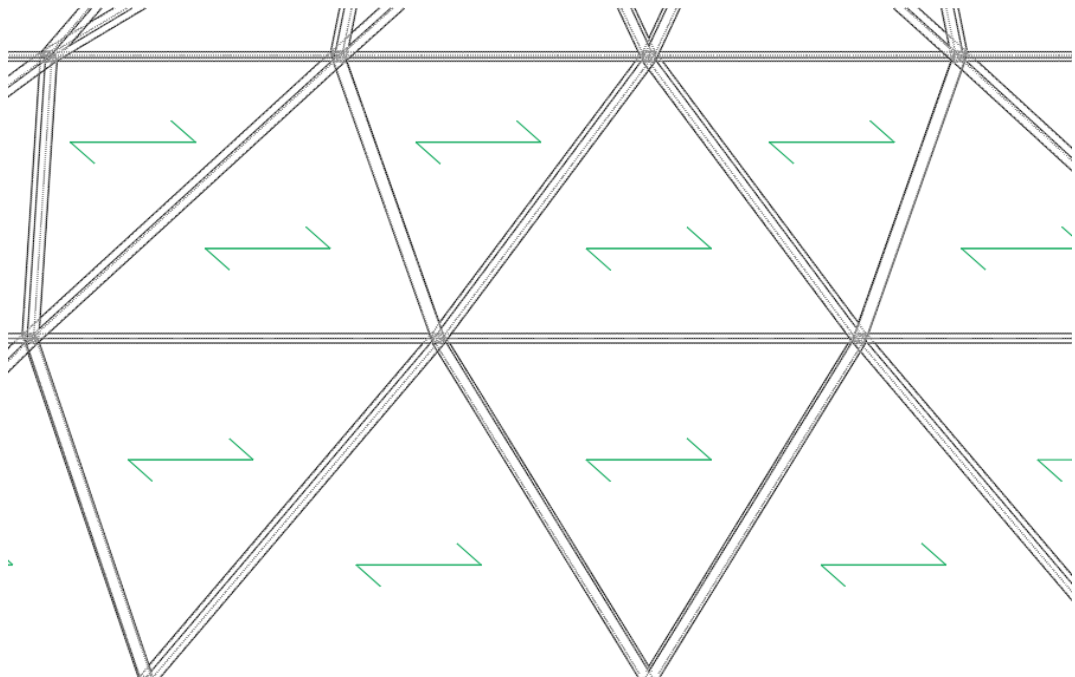
5.1.5.1 Założenia

- wymiarowanie zostanie przeprowadzone na podstawie statyki liniowej. Poszczególne pręty będą wymiarowane na podstawie złożenia sił wewnętrznych w krytycznym punkcie za pomocą zaimplementowanej w programie Rfem analizy i wymiarowania stali.
- Przewiduje się przegubowy schemat podparcia belek do wymiarowania i wyznaczania α_{cr} z zablokowaną możliwością obrotu we własnej osi x w podporach, a także odblokowanym obrotem w osi z jak w poniższym schemacie.



Rysunek 52 Schemat oparcia prętów wykorzystany w wymiarowaniu poszczególnych elementów

- Przewiduje się projektowanie sprężyste, czyli ograniczenie naprężeń, do naprężeń sprężystych bez względu na klasę przekroju pręta. Konstrukcja z uwagi na budowę z prętów połączonych przegubowo jest podatna na globalną utratę stateczności po utworzeniu dodatkowego przegubu plastycznego w dowolnym pręcie.
- Z uwagi na założony brak podparcia blachy trapezowej jako pokrycia dachowego na pierścieniu obciążenia od ciężaru własnego profili takie jak siły tnące i momenty gnące w ich przypadku są pomijalnie małe, nie wchodzą do kryteriów wymiarowania.

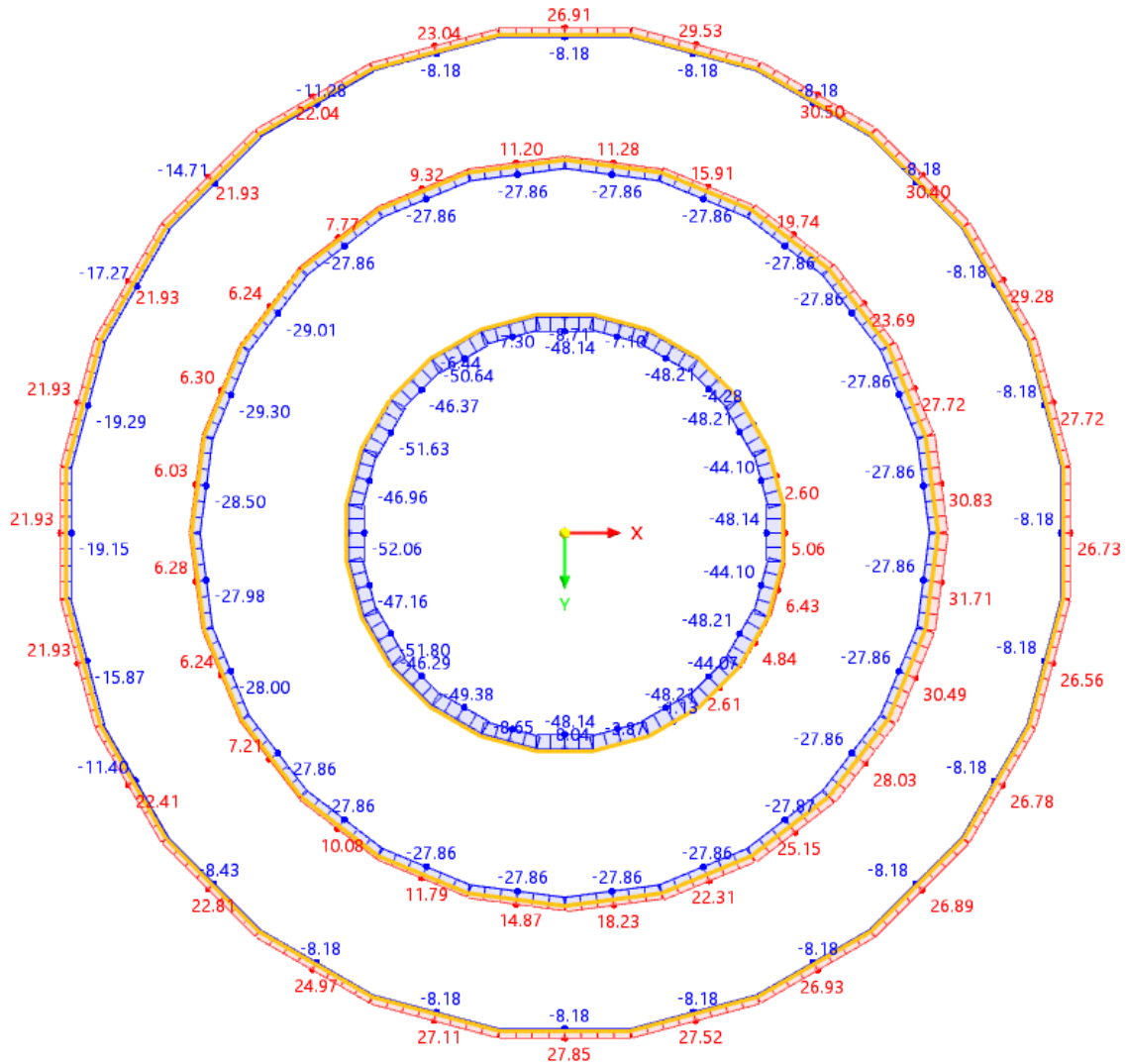


Rysunek 53 Poglądowy schemat podparcia pokrycia dachowego na elementy konstrukcji

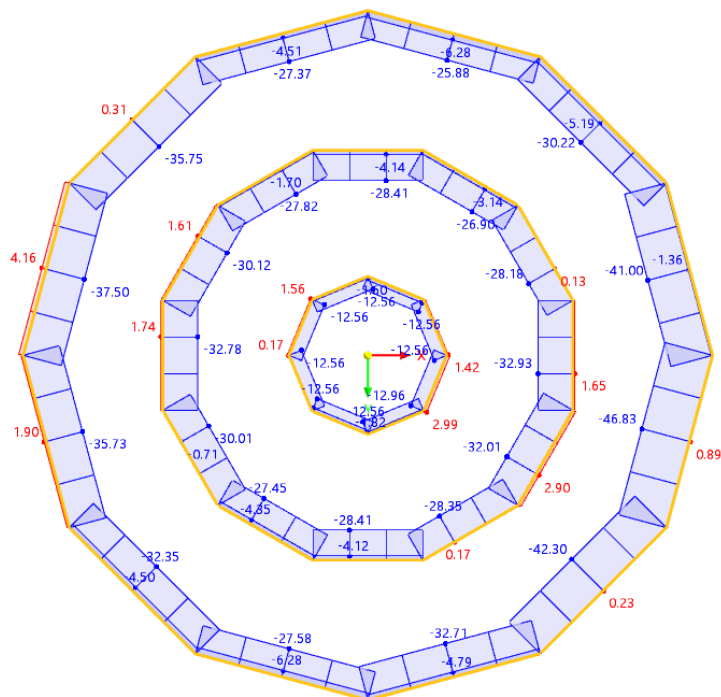
5.1.5.2 Pierścienie

Wstępny dobór profili wspomagany jest za pomocą programu komputerowego. Każda z grup prętowych zostanie analitycznie zwymiarowana, a ich wyniki przedstawione tabelarycznie w formie wytyczenia.

- **Obwiednia sił osiowych N**



Rysunek 54 Obwiednia sił osiowych N dla pierścieni BP-1, BP-2, BP-3 [kN]



Rysunek 55 Obwiednia sił osiowych N dla pierścieni numer BP-4, BP-5, BP-6 [kN]

Przykładowe wymiarowanie Pierścienia P-1

- Wymiarowanie ze względu na wyboczenie giętkie wg EN 1993-1-1, 6.3.1

Przyjęty przekrój stalowy: SHS 50x2,6

Charakterystyki przekroju:

$$W_{el,y} \stackrel{\text{def}}{=} 7.27 \text{ cm}^3$$

$$W_{el,z} \stackrel{\text{def}}{=} W_{el,y}$$

$$I_y \stackrel{\text{def}}{=} 18.20 \text{ cm}^4$$

$$I_z \stackrel{\text{def}}{=} I_y$$

$$I_t \stackrel{\text{def}}{=} 28.00 \text{ cm}^4$$

$$i_y \stackrel{\text{def}}{=} 1.9 \text{ cm}$$

$$i_z \stackrel{\text{def}}{=} i_y$$

Geometria:

$$t \stackrel{\text{def}}{=} 2.6 \text{ mm}$$

$$r \stackrel{\text{def}}{=} 2.6 \text{ mm}$$

$$a \stackrel{\text{def}}{=} 5 \text{ cm}$$

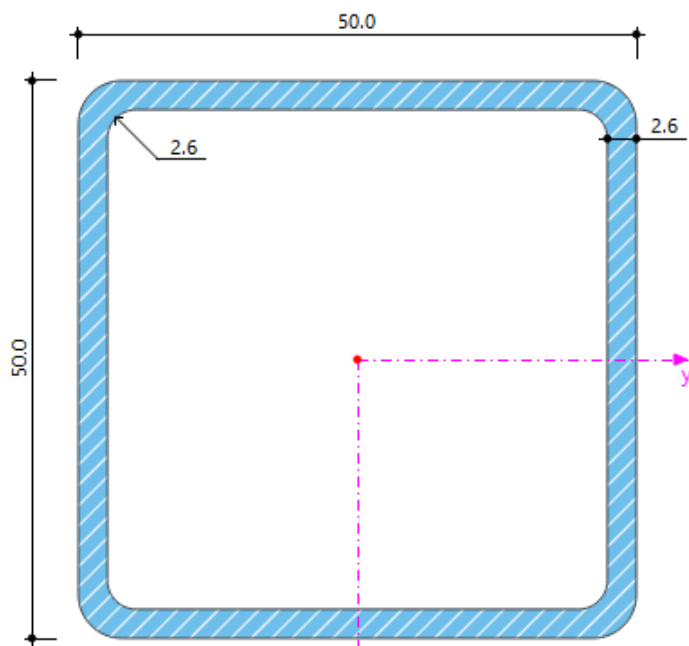
$$d \stackrel{\text{def}}{=} a - 2 \cdot r - 2 \cdot t = 39.6 \text{ mm}$$

Pole przekroju:

$$A \stackrel{\text{def}}{=} 4.87 \text{ cm}^2$$

Masa:

$$G_p \stackrel{\text{def}}{=} 3.8 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$



Rysunek 56 Przekrój pręta zastosowany do pierścieni nr BP-1

Właściwości materiałowe:

$$f_y \stackrel{\text{def}}{=} 235\text{MPa}$$

$$E \stackrel{\text{def}}{=} 210\text{GPa}$$

$$\gamma_{M0} \stackrel{\text{def}}{=} 1$$

$$\gamma_{M1} \stackrel{\text{def}}{=} 1$$

Odczytana największa siła osiowa ściskająca:

$$N_{Ed} \stackrel{\text{def}}{=} 19.29\text{kN}$$

Długości wyboczeniowe:

$$L_{cr,y} \stackrel{\text{def}}{=} 3,262\text{m}$$

$$L_{cr,z} \stackrel{\text{def}}{=} L_{cr,y}$$

Klasa przekroju przy zginaniu względem osi y

współczynnik:

$$\varepsilon \stackrel{\text{def}}{=} \sqrt{\frac{235\text{MPa}}{f_y}} = 1.00$$

stosunek szerokości do grubości

$$c_t \stackrel{\text{def}}{=} \frac{d}{t} = 16.231 < \varepsilon \cdot 33 = 33 \text{ klasa 1}$$

Zakładamy że pomimo klasy 1 przyjmujemy wymiarowanie sprężyste przekrojów zginanych

Krzywa wyboczenia wg 6.3.1.2 (1)

Sprężysta siła krytyczna:

$$N_{cr,y} \stackrel{\text{def}}{=} \pi^2 \cdot E \cdot \frac{I_y}{L_{cr,y}^2} = 35.45\text{kN}$$

Smukłość bezwymiarowa:

$$\lambda_y \stackrel{\text{def}}{=} \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr,y}}} = 1.797$$

Krzywa wyboczenia

krzywa wyboczenia a dla przekrojów rurowych goręcowałcowanych:

$$\alpha_y \stackrel{\text{def}}{=} 0.21$$

Parametr krzywej niestateczności:

$$\Phi_y \stackrel{\text{def}}{=} 0.5 \cdot (1 + \alpha_y \cdot (\lambda_y - 0.2) + \lambda_y^2) = 2.282$$

Współczynnik redukcyjny:

$$\chi_y \stackrel{\text{def}}{=} \begin{cases} \frac{1}{\Phi_y + \sqrt{\Phi_y^2 - \lambda_y^2}} & \text{if } \frac{1}{\Phi_y + \sqrt{\Phi_y^2 - \lambda_y^2}} \leq 1 \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} = 0.27$$

Obliczeniowa nośność na wyboczenie pręta ściskanego:

$$N_{b.Rd} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\chi_y \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = 31.03 \text{ kN}$$

Sprawdzenie warunku nośności:

$$\eta \stackrel{\text{def}}{=} \frac{N_{Ed}}{N_{b.Rd}} = 0.622$$

$$\eta < 1$$

Warunek został spełniony

- **Sprawdzenie przekroju na rozciąganie wg PN EN 1993-1-1, 6.2.3**

Odczytana największa siła osiowa rozciągająca:

$$N_{t.Ed} \stackrel{\text{def}}{=} 30,50 \text{ kN}$$

$$N_{pl.Rd} \stackrel{\text{def}}{=} A \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 114.445 \text{ kN}$$

$$\eta_R \stackrel{\text{def}}{=} \frac{N_{t.Ed}}{N_{pl.Rd}} = 0.267$$

$$\eta_R < 1$$

Warunek został spełniony

- **Sprawdzenie przekroju na ściskanie wg PN EN 1993-1-1, 6.2.4**

Odczytana największa siła osiowa ściskająca:

$$N_{c.Ed} \stackrel{\text{def}}{=} 19.29 \text{ kN}$$

$$N_{c.Rd} \stackrel{\text{def}}{=} A \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 114,445 \text{ kN}$$

$$\eta_N \stackrel{\text{def}}{=} \frac{N_{c.Ed}}{N_{c.Rd}} = 0.169$$

$$\eta_N < 1$$

Warunek został spełniony

Tabela 7 Wytyżenie prętów pierścienia dla statyki liniowej

| Pręt | Obciążenie | Stopień wykorzystania | |
|-----------------------|------------|----------------------------------|--|
| nr | nr | warunku projektowego η [--] | Opis |
| SHS 50x2.6 1 - S235 | | | |
| BP-101 | KO31 | 0,267 | Sprawdzenie przekroju Rozciąganie wg EN 1993-1-1, 6.2.3 |
| | KO54 | 0,169 | Sprawdzenie przekroju Ściskanie wg EN 1993-1-1, 6.2.4 |
| | KO54 | 0,622 | Stateczność Wyboczenie giętne względem głównej osi y wg EN 1993-1-1, 6.3.1 |
| | KO125 | 0,082 | Użytkowalność Ugięcia w kierunku y |
| SHS 40x3.2 1 - S235 | | | |
| BP-201 | KO33 | 0,292 | Sprawdzenie przekroju Rozciąganie wg EN 1993-1-1, 6.2.3 |
| | KO76 | 0,270 | Sprawdzenie przekroju Ściskanie wg EN 1993-1-1, 6.2.4 |
| | KO76 | 0,971 | Stateczność Wyboczenie giętne względem głównej osi y wg EN 1993-1-1, 6.3.1 |
| | KO147 | 0,066 | Użytkowalność Ugięcia w kierunku y |
| SHS 40x2.6 1 - S235 | | | |
| BP-301 | KO33 | 0,071 | Sprawdzenie przekroju Rozciąganie wg EN 1993-1-1, 6.2.3 |
| | KO73 | 0,578 | Sprawdzenie przekroju Ściskanie wg EN 1993-1-1, 6.2.4 |
| | KO73 | 0,884 | Stateczność Wyboczenie giętne względem głównej osi y wg EN 1993-1-1, 6.3.1 |
| | KO144 | 0,015 | Użytkowalność Ugięcia w kierunku y |
| SHS 40x2.6 1 - S235 | | | |
| BP-401 | KO53 | 0,046 | Sprawdzenie przekroju Rozciąganie wg EN 1993-1-1, 6.2.3 |
| | KO40 | 0,520 | Sprawdzenie przekroju Ściskanie wg EN 1993-1-1, 6.2.4 |
| | KO40 | 0,925 | Stateczność Wyboczenie giętne względem głównej osi y wg EN 1993-1-1, 6.3.1 |
| | KO111 | 0,023 | Użytkowalność Ugięcia w kierunku y |
| SHS 40x2.6 1 - S235 | | | |
| BP-501 | KO33 | 0,032 | Sprawdzenie przekroju Rozciąganie wg EN 1993-1-1, 6.2.3 |
| | KO40 | 0,366 | Sprawdzenie przekroju Ściskanie wg EN 1993-1-1, 6.2.4 |
| | KO40 | 0,527 | Stateczność Wyboczenie giętne względem głównej osi y wg EN 1993-1-1, 6.3.1 |
| | KO144 | 0,104 | Użytkowalność Ugięcia w kierunku y |
| SHS 40x2.6 1 - S235 | | | |
| BP-601 | KO53 | 0,033 | Sprawdzenie przekroju Rozciąganie wg EN 1993-1-1, 6.2.3 |
| | KO71 | 0,144 | Sprawdzenie przekroju Ściskanie wg EN 1993-1-1, 6.2.4 |
| | KO1 | 0,000 | Stateczność Wyboczenie giętne względem głównej osi y wg EN 1993-1-1, 6.3.1 |
| | KO95 | 0,009 | Użytkowalność Pomijalne ugięcia |

Komentarz:

Przekrój pręta BP-101 nie jest wytyżony tylko w 62%. Jest to zabieg celowy związany z optymalizacją ciężaru profilu. Ze względu na większą sztywność z uwagi na parametry takie jak moment bezwładności przekroju profil SHS50x2.6 został dobrany zamiast profilu SHS40x4, który również spełniał warunki nośności (był wytyżony w 90%) jednak ma on o wiele wyższą masę własną.

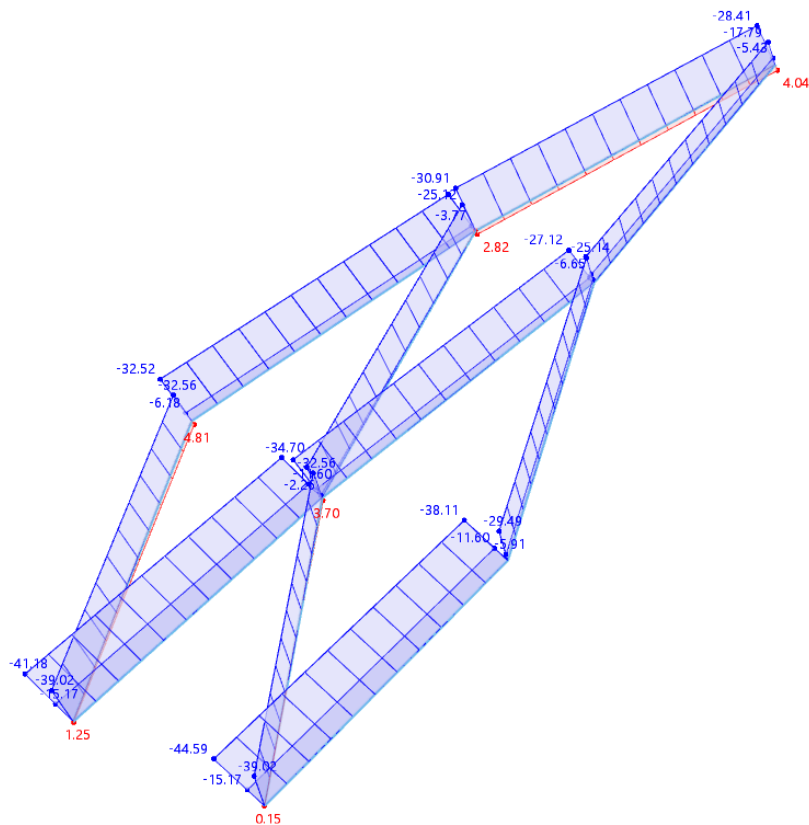
Pręty BP-501 oraz BP-601 nie są w pełni wytyżone ponieważ został dla nich dobrany najmniejszy unormowany przekrój gorącocalcowany typu SHS.

5.1.5.3 Skratowania

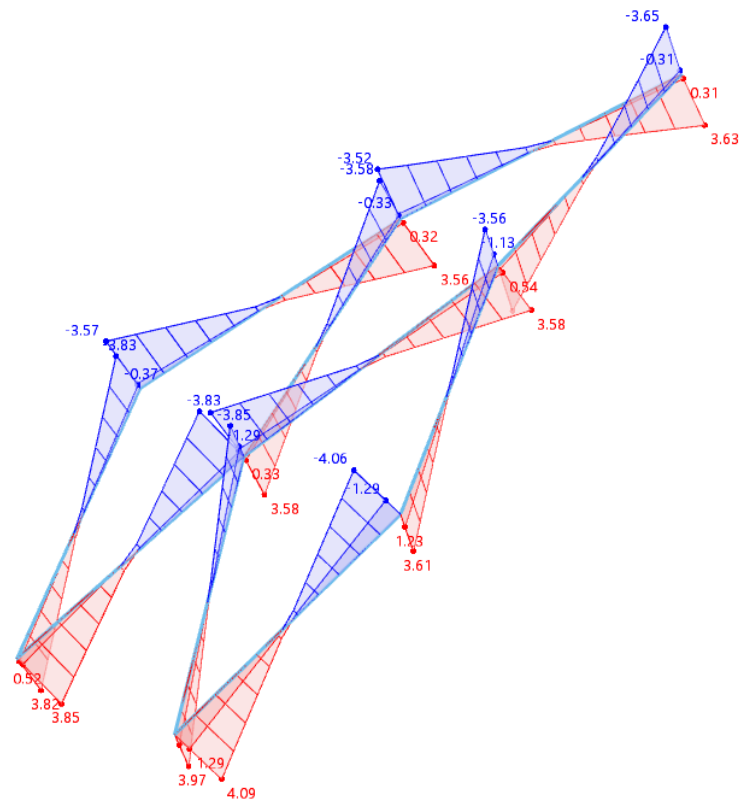
- Założenia

- Pierwsze trzy rzędy skratowań KR-1, KR-2, KR-3 zostały tak zaprojektowane by posiadać tę samą długość, co za tym idzie długość wyboczeniowa będzie taka sama w analizie wyboczeniowej dla każdego z prętów;
- Z uwagi na założenia dotyczące oparcia pokrycia na skratowaniach będą występować momenty gnące oraz siły ścinające jako siły wewnętrzne w prętach, które należy wziąć pod uwagę w obliczeniach;
- Przewiduje się zastosowanie tego samego rozmiaru profilu SHS dla skratowań KR-1, KR-2, KR-3 i KR-4 z uwagi na zachowanie równego pokrycia oraz usystematyzowane elementy połączeń węzłowych.

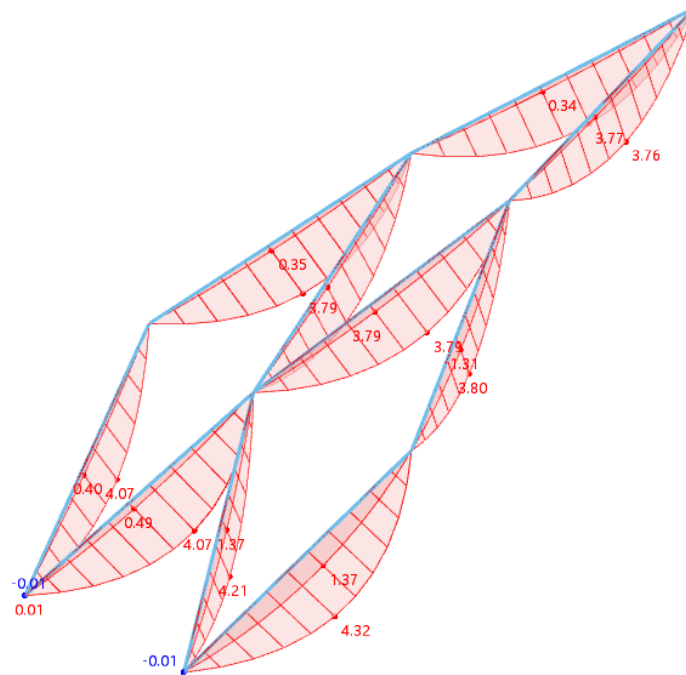
- Obwiednie sił wewnętrznych



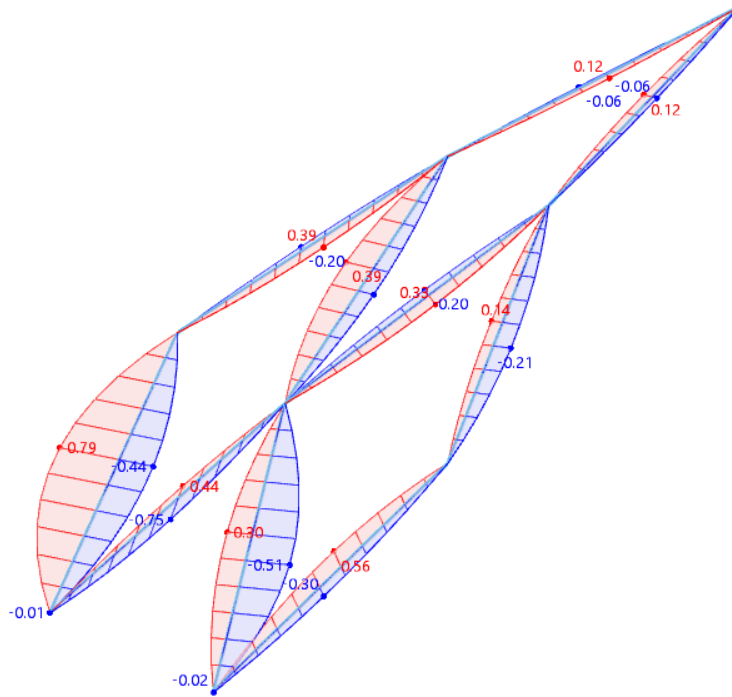
Rysunek 57 Obwiednia sił osiowych wewnątrz skratowań K-1, K-2, K-3 [kN]



Rysunek 58 Obwiednia sił tnących V_z dla skratowań K-1, K-2, K-3 [kN]

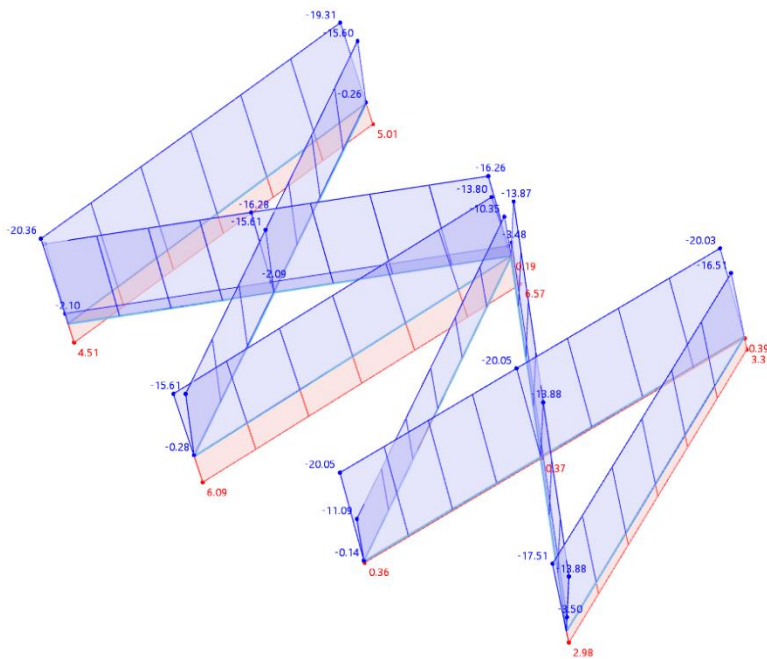


Rysunek 59 Obwiednia momentów gnących M_y dla skratowań K-1, K-2, K-3 [kNm]

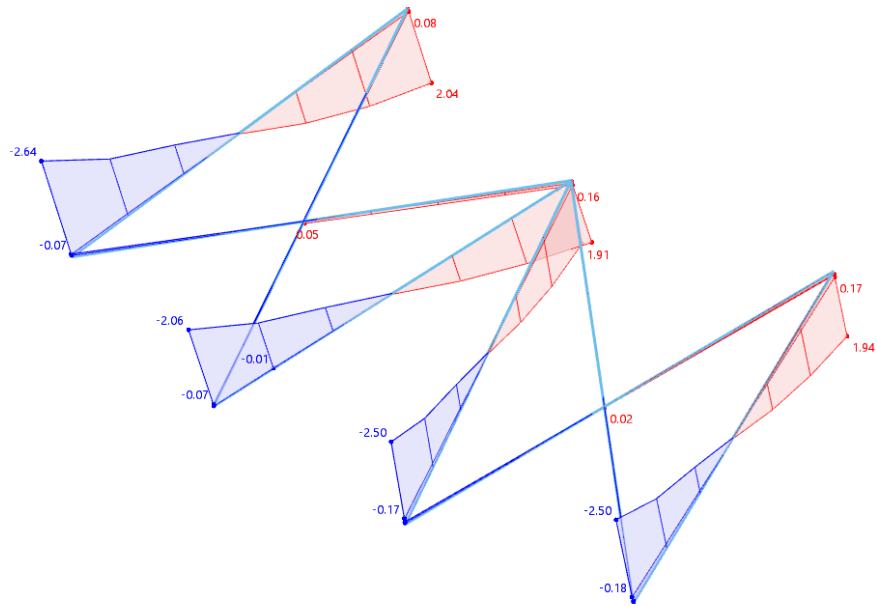


Rysunek 60 Obwiednia momentów gnących M_z dla skratowań K-1, K-2, K-3 [kN]

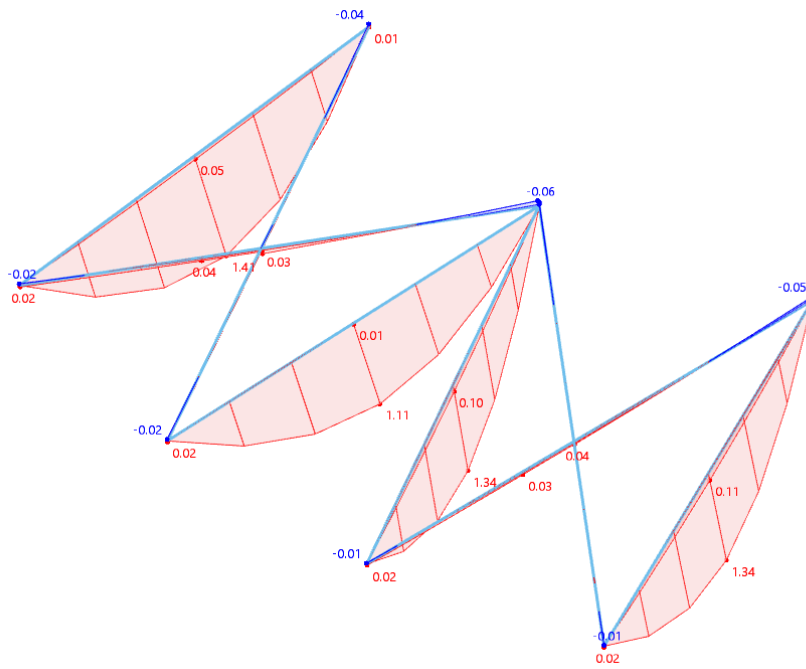
- Skratowanie K-4



Rysunek 61 Obwiednia sił osiowych wewnątrz skratowania K-4 [kN]

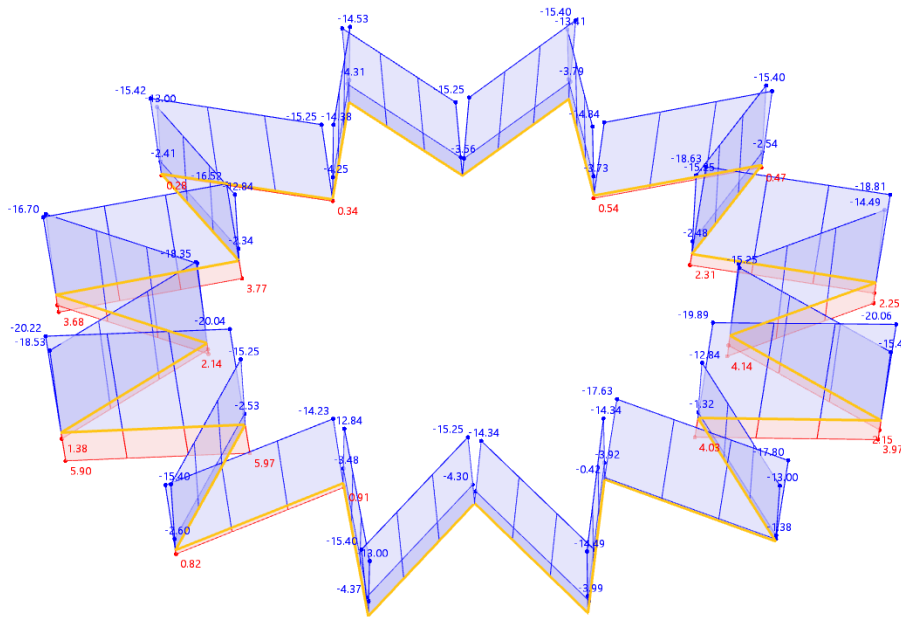


Rysunek 62 Obwiednia sił tnących V_z dla skratowania K-4 [kN]

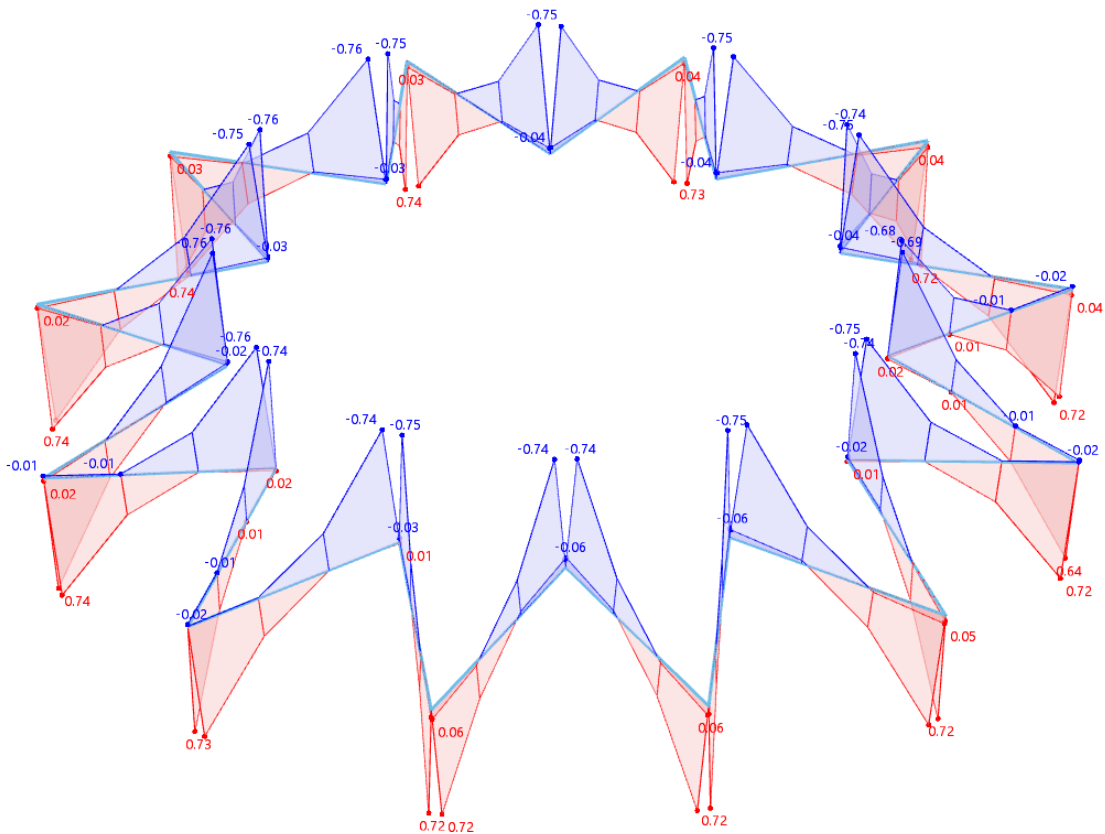


Rysunek 63 Obwiednia momentów gnących M_y dla skratowania K-4 [kN]

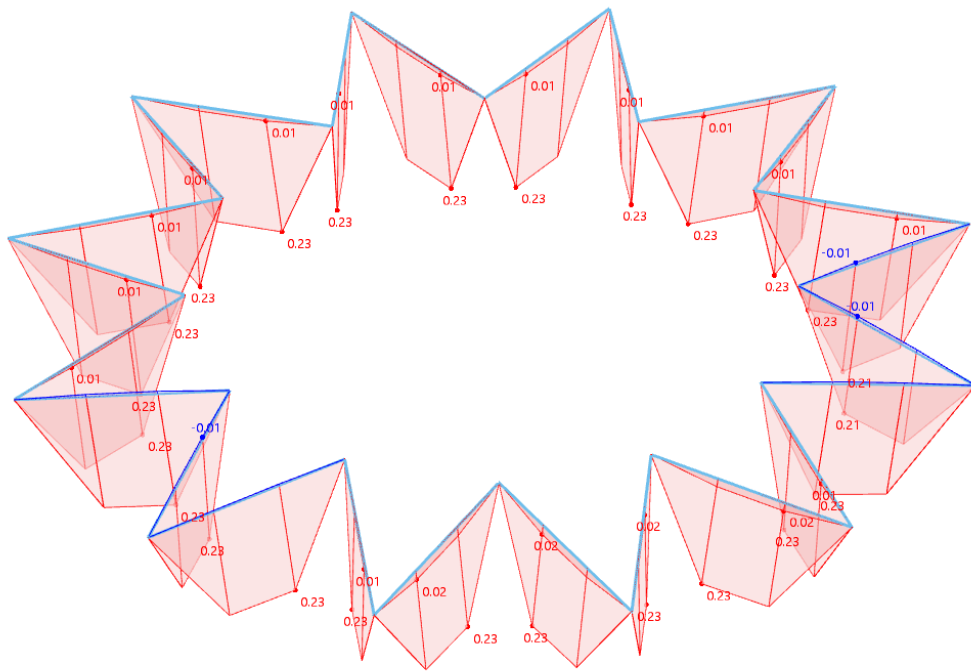
- Skratowanie K-5



Rysunek 64 Obwiednia sił osiowych wewnątrz skratowania K-5 [kN]

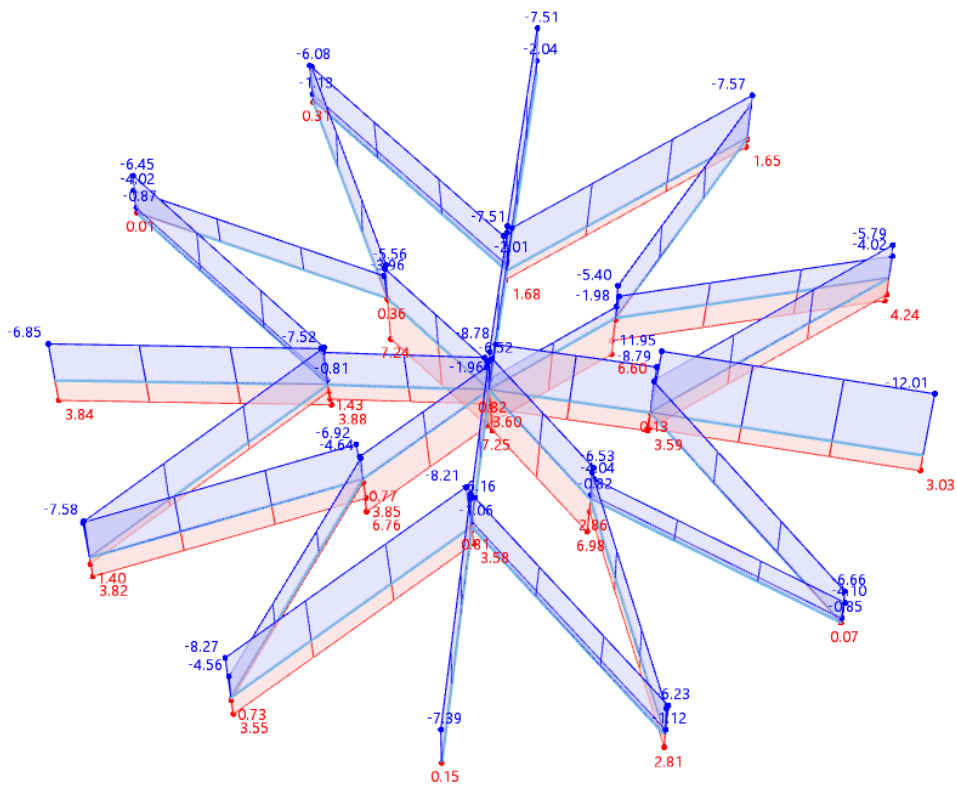


Rysunek 65 Obwiednia sił tnących V_z dla skratowania K-5 [kN]

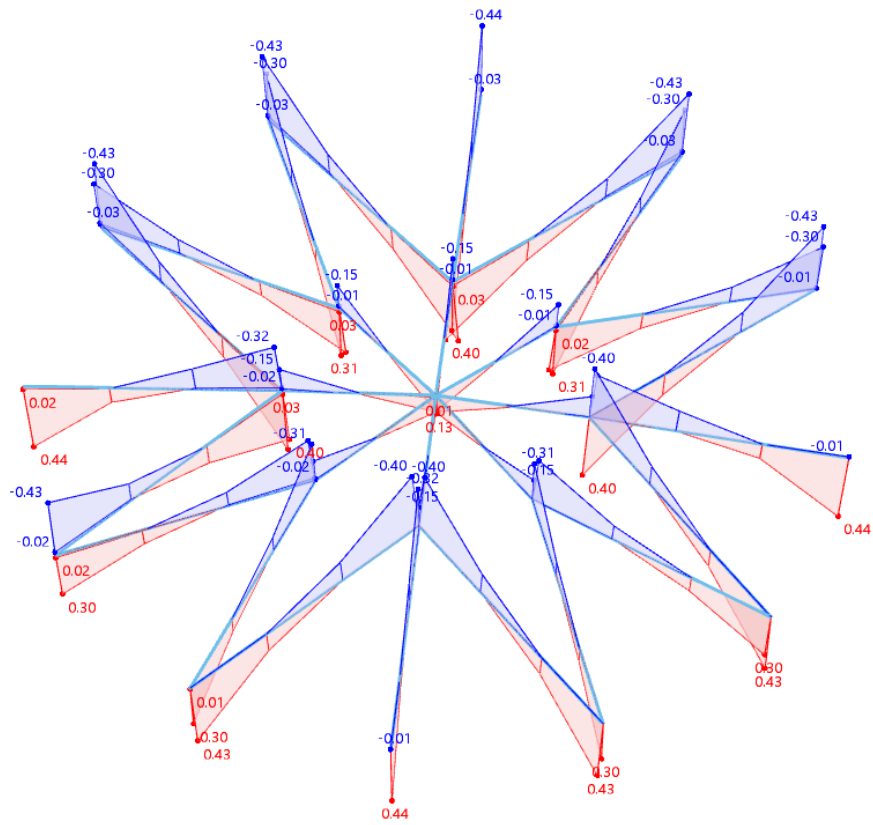


Rysunek 66 Obwiednia momentów giących M_y dla skratowania K-5 [kN]

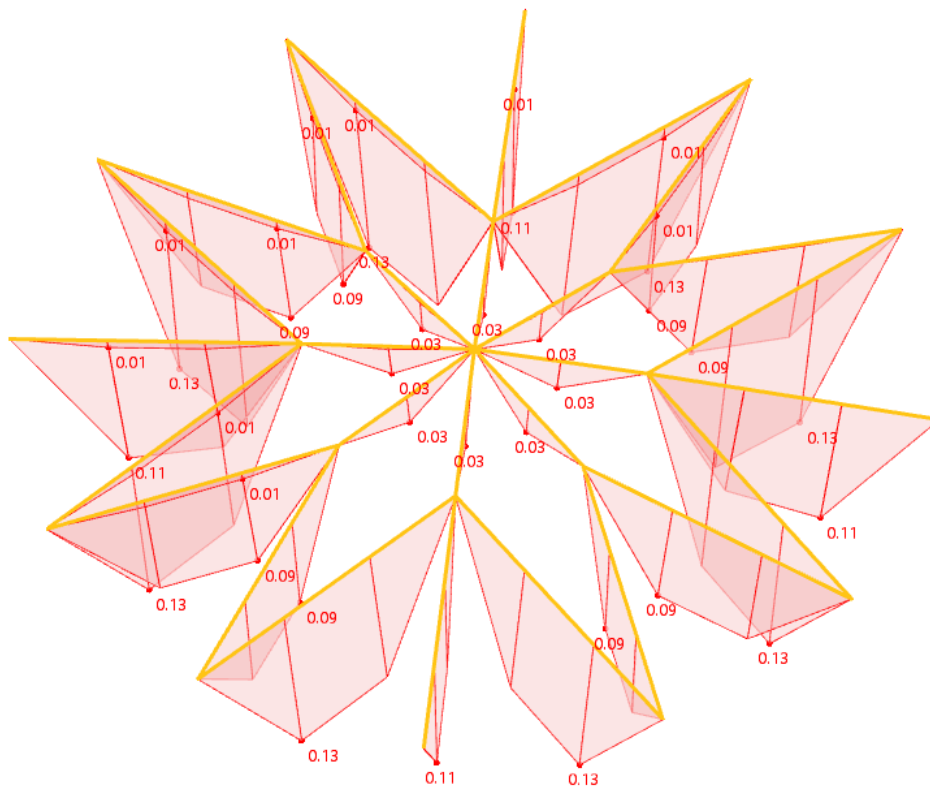
- Skratowanie K-6 oraz K-7



Rysunek 67 Obwiednia sił osiowych wewnątrz skratowania K-6 i K-7 [kN]

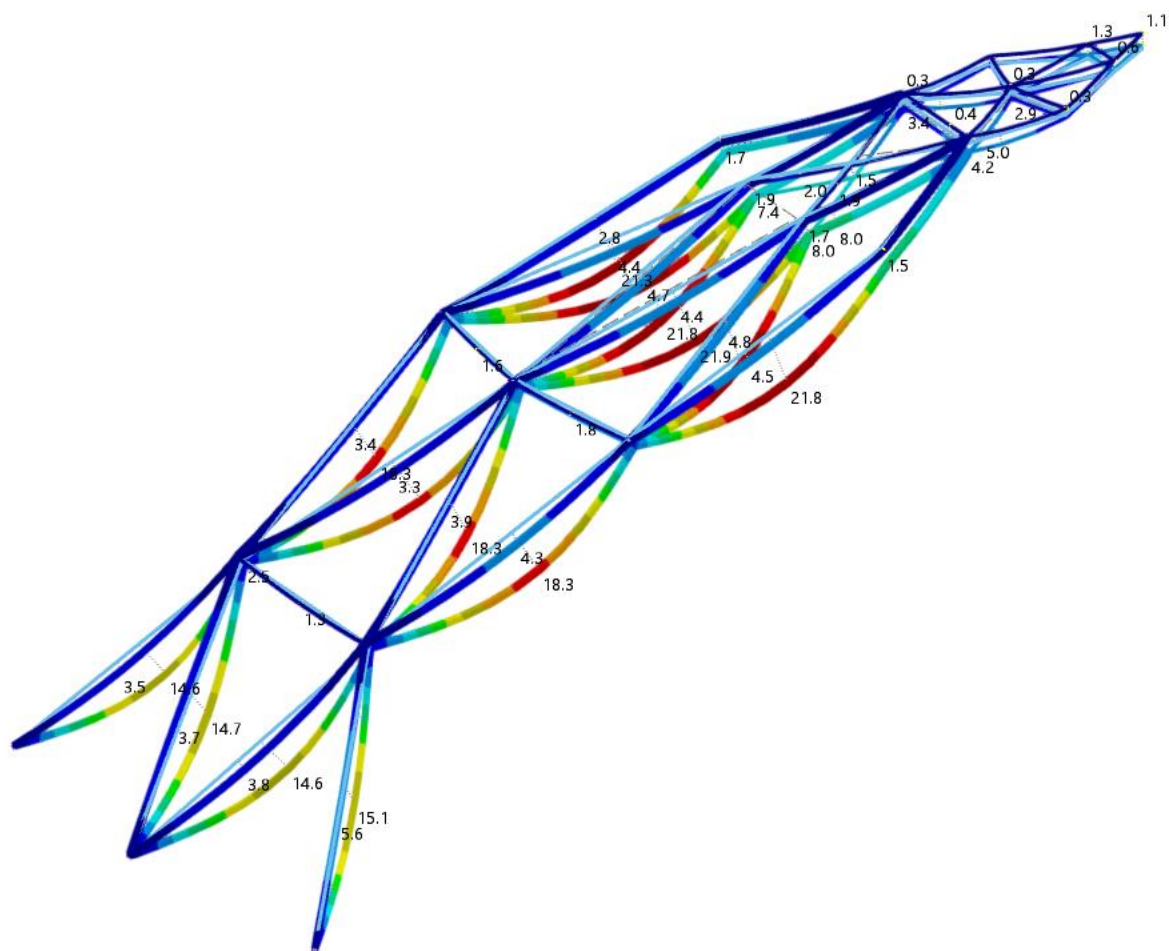


Rysunek 68 Obwiednia sił tnących V_z dla skratowania K-6 i K-7 [kN]



Rysunek 69 Obwiednia Momentów gnących M_y dla skratowania K-6 i K-7 [kN]

Wyniki minimalnych oraz maksymalnych odkształceń prętów wg kombinacji charakterystycznych oddziaływań SGU:



Rysunek 70 Maksymalne i minimalne odkształcenia prętów na podstawie SGU

Przykładowe wymiarowanie prętów BK-101 skratowania K-1

Przyjęty przekrój stalowy: SHS 90x5

Charakterystyki przekroju:

$$W_{el.y} \stackrel{\text{def}}{=} 44.70 \text{cm}^3$$

$$W_{el.z} \stackrel{\text{def}}{=} W_{el.y}$$

$$I_y \stackrel{\text{def}}{=} 201 \text{cm}^4$$

$$I_t \stackrel{\text{def}}{=} 311 \text{cm}^4$$

$$S \stackrel{\text{def}}{=} 13.25 \text{cm}^3$$

$$i_y \stackrel{\text{def}}{=} 3.46 \text{cm}$$

$$i_z \stackrel{\text{def}}{=} i_y$$

Geometria:

$$t \stackrel{\text{def}}{=} 5.0 \text{mm}$$

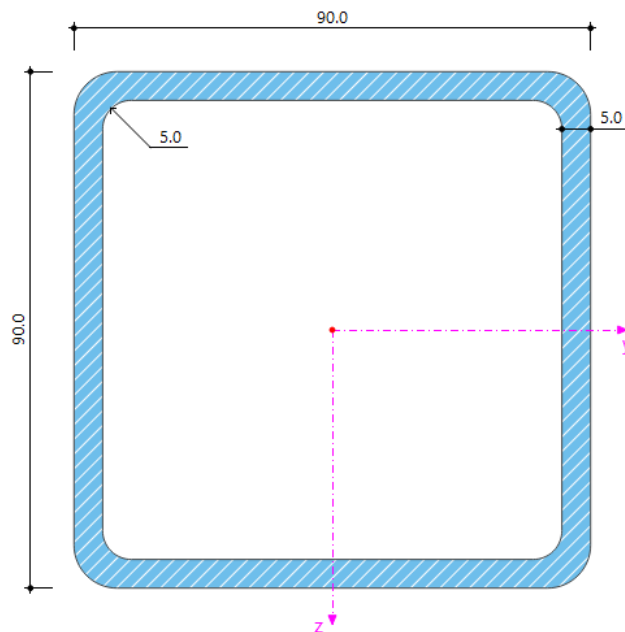
$$r \stackrel{\text{def}}{=} 5.0 \text{mm}$$

$$a \stackrel{\text{def}}{=} 9.0 \text{cm}$$

$$d \stackrel{\text{def}}{=} a - 2 \cdot r - 2 \cdot t = 70.0 \text{mm}$$

Pole przekroju:

$$A \stackrel{\text{def}}{=} 16.80 \text{cm}^2$$



Rysunek 72 Przyjęty przekrój stalowy dla prętów BK-101

Masa:

$$G_p \stackrel{\text{def}}{=} 10.8 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

Właściwości materiałowe:

$$f_y \stackrel{\text{def}}{=} 235 \text{MPa}$$

$$E \stackrel{\text{def}}{=} 210 \text{GPa}$$

$$\gamma_{M0} \stackrel{\text{def}}{=} 1$$

$$\gamma_{M1} \stackrel{\text{def}}{=} 1$$

Długości wyboczeniowe:

$$L_{cr.y} \stackrel{\text{def}}{=} 4.285 \text{m}$$

$$L_{cr.z} \stackrel{\text{def}}{=} L_{cr.y}$$

Klasa przekroju

współczynnik:

$$\varepsilon \stackrel{\text{def}}{=} \sqrt{\frac{235 \text{MPa}}{f_y}} = 1.00$$

stosunek szerokości do grubości

$$c_t \stackrel{\text{def}}{=} \frac{d}{t} = 15.00 < \varepsilon \cdot 33 = 33 \text{ klasa 1}$$

Zakładamy że pomimo klasy 1 przyjmujemy wymiarowanie sprężyste przekrojów zginanych

- **Wymiarowanie ze względu na wyboczenie giętkie wg EN 1993-1-1, 6.3.3**

Odczytane siły wewnętrzne w pręcie:

$$\begin{aligned} N_{\text{Ed}} &\stackrel{\text{def}}{=} 39.64\text{kN} \\ M_{\text{y.Ed}} &\stackrel{\text{def}}{=} 4.32\text{kNm} \\ M_{\text{z.Ed}} &\stackrel{\text{def}}{=} 0.56\text{kNm} \end{aligned}$$

Krzywa wyboczenia

Sprężysta siła krytyczna:

$$N_{\text{cr,y}} \stackrel{\text{def}}{=} \pi^2 \cdot E \cdot \frac{I_y}{L_{\text{cr,y}}^2} = 226.93\text{kN}$$

Smukłość bezwymiarowa:

$$\lambda_y \stackrel{\text{def}}{=} \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{\text{cr,y}}}} = 1.319$$

Krzywa wyboczenia względem osi lokalnej y

krzywa wyboczenia α dla przekrojów rurowych gorącowalcowanych:

$$\alpha_y \stackrel{\text{def}}{=} 0.21$$

Parametr krzywej niestateczności:

$$\Phi_y \stackrel{\text{def}}{=} 0.5 \cdot (1 + \alpha_y \cdot (\lambda_y - 0.2) + \lambda_y^2) = 1.487$$

Współczynnik redukcyjny:

$$\chi_y \stackrel{\text{def}}{=} \begin{cases} \frac{1}{\Phi_y + \sqrt{\Phi_y^2 - \lambda_y^2}} & \text{if } \frac{1}{\Phi_y + \sqrt{\Phi_y^2 - \lambda_y^2}} \leq 1 \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} = 0.46$$

Krzywa wyboczenia względem osi lokalnej z

krzywa wyboczenia α dla przekrojów rurowych gorącowalcowanych:

$$\alpha_z \stackrel{\text{def}}{=} 0.21$$

Parametr krzywej niestateczności:

$$\Phi_z \stackrel{\text{def}}{=} 0.5 \cdot (1 + \alpha_z \cdot (\lambda_z - 0.2) + \lambda_z^2) = 1.487$$

Współczynnik redukcyjny:

$$\chi_z \stackrel{\text{def}}{=} \begin{cases} \frac{1}{\Phi_z + \sqrt{\Phi_z^2 - \lambda_z^2}} & \text{if } \frac{1}{\Phi_z + \sqrt{\Phi_z^2 - \lambda_z^2}} \leq 1 \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} = 0.46$$

Współczynnik redukcyjny dla zwiczenia

Obciążenie krytyczne:

$$\alpha_{\text{cr,y}} \stackrel{\text{def}}{=} 54,10$$

$$M_{\text{cr,y}} \stackrel{\text{def}}{=} \alpha_{\text{cr,y}} \cdot M_{\text{y.Ed}} = 261,91\text{kNm}$$

$$\lambda_{LT,y} \stackrel{\text{def}}{=} \sqrt{\frac{W_{el,y} \cdot f_y}{M_{cr,y}}} = 0.20$$

Współczynnik redukcyjny

$\alpha_{LT} \stackrel{\text{def}}{=} 0.76$ – Na podstawie tabelki 6.4 PN EN 1993-1-1

$$\phi_{LT,y} \stackrel{\text{def}}{=} 0.5 \cdot (1 + \alpha_{LT} \cdot (\lambda_{LT,y} - 0.2) + \lambda_{LT,y}^2) = 0.520$$

$$\chi_{LT,y} \stackrel{\text{def}}{=} \begin{cases} \frac{1}{\phi_{LT,y} + \sqrt{\phi_{LT,y}^2 - \lambda_{LT,y}^2}} & \text{if } \frac{1}{\phi_{LT,y} + \sqrt{\phi_{LT,y}^2 - \lambda_{LT,y}^2}} \leq 1 \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} = 1$$

Obciążenie krytyczne:

$$\alpha_{cr,z} \stackrel{\text{def}}{=} 396.83$$

$$M_{cr,z} \stackrel{\text{def}}{=} \alpha_{cr,z} \cdot M_{z,Ed} = 261,91 \text{ kNm}$$

$$\lambda_{LT,z} \stackrel{\text{def}}{=} \sqrt{\frac{W_{el,z} \cdot f_y}{M_{cr,z}}} = 0.20$$

Współczynnik redukcyjny

$\alpha_{LT} \stackrel{\text{def}}{=} 0.76$ – Na podstawie tabelki 6.4 PN EN 1993-1-1

$$\phi_{LT,z} \stackrel{\text{def}}{=} 0.5 \cdot (1 + \alpha_{LT} \cdot (\lambda_{LT,z} - 0.2) + \lambda_{LT,z}^2) = 0.514$$

$$\chi_{LT,z} \stackrel{\text{def}}{=} \begin{cases} \frac{1}{\phi_{LT,z} + \sqrt{\phi_{LT,z}^2 - \lambda_{LT,z}^2}} & \text{if } \frac{1}{\phi_{LT,z} + \sqrt{\phi_{LT,z}^2 - \lambda_{LT,z}^2}} \leq 1 \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} = 1$$

Charakterystyczne wartości nośności:

$$N_{Rk} \stackrel{\text{def}}{=} A \cdot f_y = 394.80 \text{ kN}$$

$$M_{y,Rk} \stackrel{\text{def}}{=} W_{el,y} \cdot f_y = 10.50 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Rk} \stackrel{\text{def}}{=} W_{el,z} \cdot f_y = 10.50 \text{ kNm}$$

Współczynniki równoważnego stałego momentu:

$$c_{my} \stackrel{\text{def}}{=} 0.95$$

$$c_{mLT} \stackrel{\text{def}}{=} 0.95$$

$$c_{mz} \stackrel{\text{def}}{=} 0.95$$

Współczynniki interakcji wg 6.3.3(4) Metoda 2 Zał. B PN EN 1993-1-1

$$k_{yy} \stackrel{\text{def}}{=} c_{my} \cdot \left(1 + \frac{(0.6 \cdot \lambda_y) \cdot N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rk}} \right) = 1.114$$

$$k_{yy} \stackrel{\text{def}}{=} \begin{cases} k_{yy} & \text{if } k_{yy} < c_{my} \cdot \left(1 + \frac{0.6 \cdot N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rk}} \right) \\ c_{my} \cdot \left(1 + \frac{0.6 \cdot N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rk}} \right) & \text{otherwise} \end{cases} = 1.074$$

$$k_{yz} \stackrel{\text{def}}{=} c_{mz} \cdot \left(1 + \frac{(0.6 \cdot \lambda_z) \cdot N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{Rk}} \right) = 1.114$$

$$k_{yz} \stackrel{\text{def}}{=} \begin{cases} k_{yz} & \text{if } k_{yz} < c_{mz} \cdot \left(1 + \frac{0.6 \cdot N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{Rk}} \right) \\ c_{mz} \cdot \left(1 + \frac{0.6 \cdot N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{Rk}} \right) & \text{otherwise} \end{cases} = 1.074$$

$$k_{zz} \stackrel{\text{def}}{=} k_{yz}$$

$$k_{zy} \stackrel{\text{def}}{=} 0.8 \cdot k_{yy} = 0.984$$

Składowe obliczeń:

$$\eta_{N6.61} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rk}} = 0.218$$

$$\eta_{My6.61} \stackrel{\text{def}}{=} k_{yy} \cdot \frac{M_{y.Ed}}{\chi_{LT,y} \cdot \frac{M_{y.Rk}}{\gamma_{M1}}} = 0.495$$

$$\eta_{Mz6.61} \stackrel{\text{def}}{=} k_{yz} \cdot \frac{M_{z.Ed}}{\frac{M_{z.Rk}}{\gamma_{M1}}} = 0.067$$

$$\eta_{6.61} \stackrel{\text{def}}{=} \eta_{N6.61} + \eta_{My6.61} + \eta_{Mz6.61} = 0.781$$

$$\eta_{N6.62} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{Rk}} = 0.218$$

$$\eta_{My6.62} \stackrel{\text{def}}{=} k_{zy} \cdot \frac{M_{y.Ed}}{\chi_{LT,y} \cdot \frac{M_{y.Rk}}{\gamma_{M1}}} = 0.454$$

$$\eta_{Mz6.62} \stackrel{\text{def}}{=} k_{zz} \cdot \frac{M_{z.Ed}}{\frac{M_{z.Rk}}{\gamma_{M1}}} = 0.067$$

$$\eta_{6.62} \stackrel{\text{def}}{=} \eta_{N6.62} + \eta_{My6.62} + \eta_{Mz6.62} = 0.739$$

Stopień wykorzystania nośności:

$$\eta_{\max} \stackrel{\text{def}}{=} \text{Max}(\eta_{6.61}; \eta_{6.62}) = 0.781 < 1$$

Warunek został spełniony

- **Sprawdzenie nośności na ścinanie, wpływ ścinania na nośność przekroju wg EN 1993-1-1, 6.2.6(4)**

Odczytane siły wewnętrzne w przęciu:

$$V_{Ed} \stackrel{\text{def}}{=} 4.57 \text{ kN}$$

Pole przekroju czynnego:

$$A_{v,z} \stackrel{\text{def}}{=} 2 \cdot d \cdot t = 7.0 \text{ cm}^2$$

$$V_{c,Rd} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{A_{v,z} \cdot \left(\frac{f_y}{\sqrt{3}}\right)}{\gamma_{M0}} = 131.19 \text{ kN}$$

$$V_{pl,Rd} \stackrel{\text{def}}{=} V_{c,Rd} = 131.19 \text{ kN}$$

$$V_{Ed} \stackrel{\text{def}}{=} 4.37 \text{ kN}$$

Warunek nośności

$$\frac{V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} = 0.05 \leq 1.00$$

Warunek został spełniony

Wpływ siły podłużnej:

$$V_{Ed} = 4.57 \text{ kN}$$

$$0.5 \cdot V_{c,Rd} = 65.67 \text{ kN} > V_{Ed} = 4.57 \text{ kN}$$

Siła ścinająca nie wpływa na nośność przekroju przy zginaniu z siłą podłużną

- **Sprawdzenie przekroju na rozciąganie wg PN EN 1993-1-1,6.2.3**

Odczytana największa siła osiowa rozciągająca:

$$N_{t.Ed} \stackrel{\text{def}}{=} 7.38\text{kN}$$

$$N_{pl.Rd} \stackrel{\text{def}}{=} A \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 394.80\text{kN}$$

$$\eta_R \stackrel{\text{def}}{=} \frac{N_{t.Ed}}{N_{pl.Rd}} = 0.267$$

$$\eta_R < 1$$

Warunek został spełniony

- **Sprawdzenie przekroju na ściskanie wg PN EN 1993-1-1,6.2.4**

Odczytana największa siła osiowa ściskająca:

$$N_{c.Ed} \stackrel{\text{def}}{=} 44.59\text{kN}$$

$$N_{c.Rd} \stackrel{\text{def}}{=} A \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 384,80\text{kN}$$

$$\eta_N \stackrel{\text{def}}{=} \frac{N_{c.Ed}}{N_{c.Rd}} = 0.113$$

$$\eta_N < 1$$

Warunek został spełniony

- **Sprawdzenie przekroju na ściskanie wg PN EN 1993-1-1, 6.2.9.2, 6.2.9.3, 6.2.10 | Projektowanie sprężyste**

Maksymalne naprężenie którego nie można przekroczyć ze względu na wymiarowanie sprężyste:

$$\sigma_{x.Rd} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 235 \text{Mpa}$$

Naprężenie wynikający z sumy składowych naprężeń:

$$\sigma_{x.Ed} \stackrel{\text{def}}{=} \sigma_{x.N.Ed} + \sigma_{x.My.Ed} + \sigma_{x.Mz.Ed} = 142.466 \text{Mpa}$$

$$\sigma_{x.N.Ed} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{N_{Ed}}{A}$$

$$\sigma_{x.My.Ed} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{M_{y.Ed}}{I_y} \cdot z_{lok}$$

$$\sigma_{x.Mz.Ed} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{M_{z.Ed}}{I_z} \cdot y_{lok}$$

$$\tau_{Ed} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{V_{z.Ed} \cdot S_y(z_{lok})}{b(z_{lok}) \cdot I_y}$$

gdzie: (y_{lok}, z_{lok}) to współrzędne dla układu osi głównych przekroju pręta

$$\eta_{6.1} \stackrel{\text{def}}{=} \sqrt{\left(\frac{\sigma_{x.Ed}}{\sigma_{x.Rd}}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{\tau_{Ed}}{\sigma_{x.Rd}}\right)^2} = 0.606$$

$$\eta_{6.1} < 1$$

Warunek został spełniony

- **Sprawdzenie dopuszczalnego ugięcia prętów zgodnie z charakterystycznymi oddziaływaniami SGU**

Maksymalne ugięcie dźwigarów prętowych sfery determinowane jest zgodnie z założeniami PN-EN1993-1-1 NA 22-ad7.2.1 (1)B:

$$w_{\max} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{L}{250}$$

$$w_{\max} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{4,285\text{m}}{250} = 17.1 \text{mm}$$

$$\eta_w \stackrel{\text{def}}{=} \frac{|w|}{w_{\max}} = 0.971 < 1$$

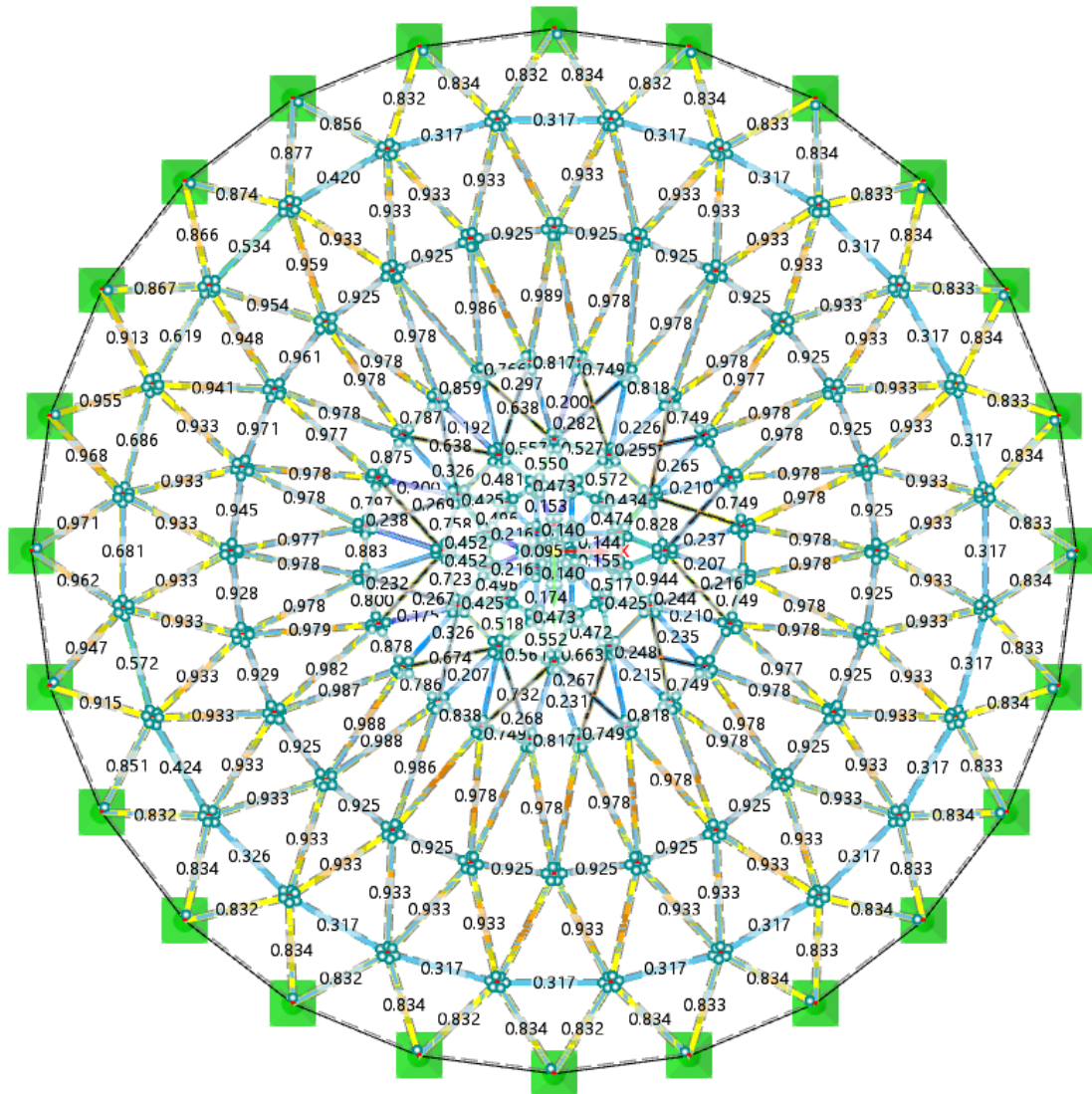
Warunek został spełniony

Tabela 8 Wyświetlenie prętów pierścienia dla statyki liniowej

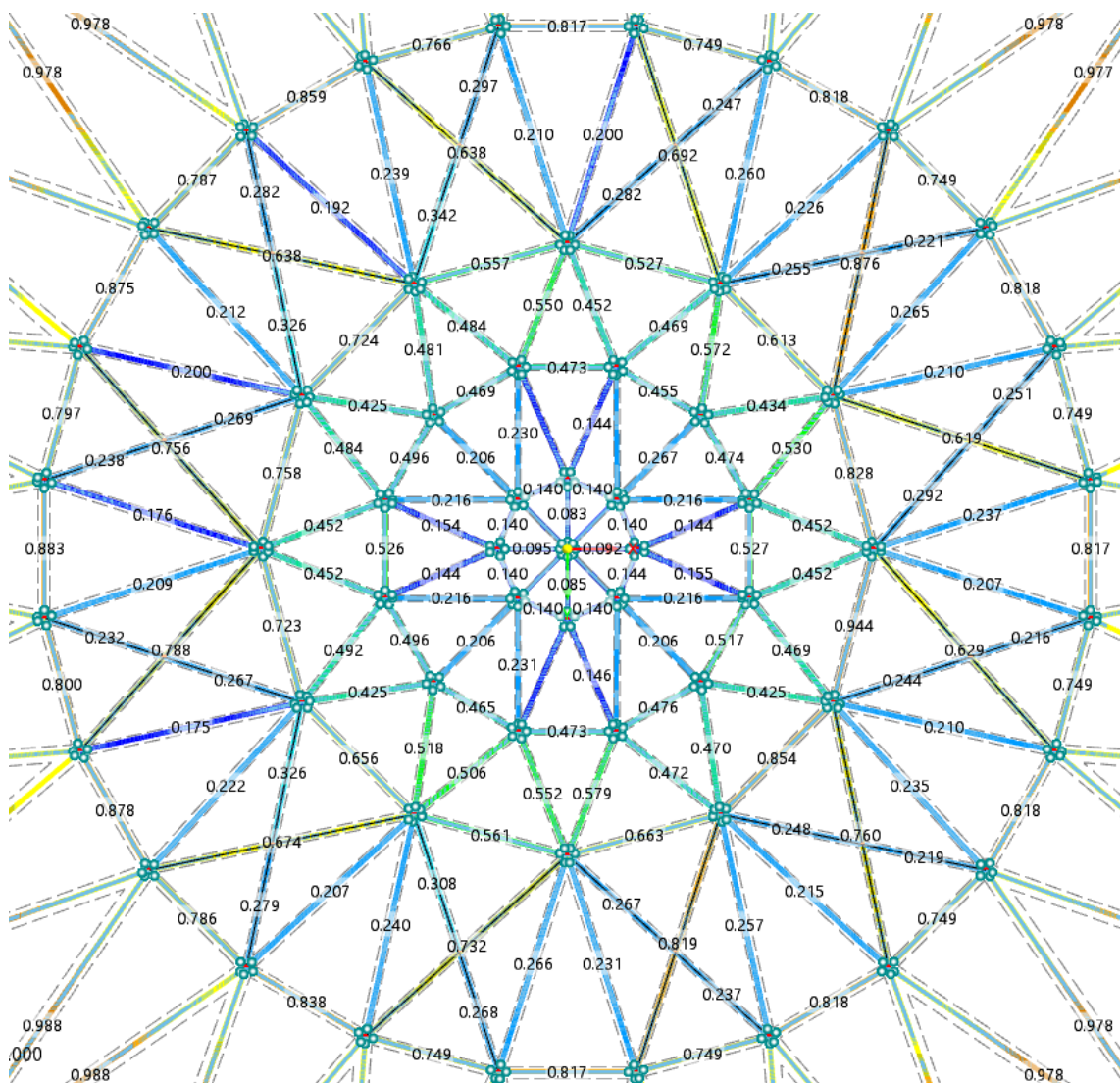
| | | | |
|-----------------------|-------|-------|---|
| SHS 90x5 1 - S235 | | | |
| BK-101 | KO53 | 0.019 | Sprawdzenie przekroju Rozciąganie wg EN 1993-1-1, 6.2.3 |
| | KO67 | 0.113 | Sprawdzenie przekroju Ściskanie wg EN 1993-1-1, 6.2.4 |
| | KO67 | 0.044 | Sprawdzenie przekroju Ścinanie wg EN 1993-1-1, 6.2.6(4) Projektowanie sprężyste |
| | KO63 | 0.606 | Sprawdzenie przekroju Zginanie, siła osiowa i ścinanie wg EN 1993-1-1, 6.2.9.2, 6.2.9.3, 6.2.10 Projektowanie sprężyste |
| | KO63 | 0.781 | Stateczność Zginanie i wyboczenie względem osi głównych wg EN 1993-1-1, 6.3.3 |
| | KO134 | 0.971 | Użytkowność Ugięcia w kierunku z |
| SHS 90x4 1 - S235 | | | |
| BK-201 | KO51 | 0.026 | Sprawdzenie przekroju Rozciąganie wg EN 1993-1-1, 6.2.3 |
| | KO67 | 0.105 | Sprawdzenie przekroju Ściskanie wg EN 1993-1-1, 6.2.4 |
| | KO63 | 0.045 | Sprawdzenie przekroju Ścinanie wg EN 1993-1-1, 6.2.6(4) Projektowanie sprężyste |
| | KO67 | 0.561 | Sprawdzenie przekroju Zginanie, siła osiowa i ścinanie wg EN 1993-1-1, 6.2.9.2, 6.2.9.3, 6.2.10 Projektowanie sprężyste |
| | KO67 | 0.721 | Stateczność Zginanie i wyboczenie względem osi głównych wg EN 1993-1-1, 6.3.3 |
| | KO138 | 0.959 | Użytkowność Ugięcia w kierunku z |
| SHS 90x3.6 1 - S235 | | | |
| BK-301 | KO51 | 0.053 | Sprawdzenie przekroju Rozciąganie wg EN 1993-1-1, 6.2.3 |
| | KO42 | 0.125 | Sprawdzenie przekroju Ściskanie wg EN 1993-1-1, 6.2.4 |
| | KO73 | 0.060 | Sprawdzenie przekroju Ścinanie wg EN 1993-1-1, 6.2.6(4) Projektowanie sprężyste |
| | KO63 | 0.564 | Sprawdzenie przekroju Zginanie, siła osiowa i ścinanie wg EN 1993-1-1, 6.2.9.2, 6.2.9.3, 6.2.10 Projektowanie sprężyste |
| | KO42 | 0.736 | Stateczność Zginanie i wyboczenie względem osi głównych wg EN 1993-1-1, 6.3.3 |
| | KO144 | 0.989 | Użytkowność Ugięcia w kierunku z |
| SHS 40x2.6 1 - S235 | | | |
| BK-501 | KO53 | 0.066 | Sprawdzenie przekroju Rozciąganie wg EN 1993-1-1, 6.2.3 |
| | KO40 | 0.225 | Sprawdzenie przekroju Ściskanie wg EN 1993-1-1, 6.2.4 |
| | KO73 | 0.035 | Sprawdzenie przekroju Ścinanie wg EN 1993-1-1, 6.2.6(4) Projektowanie sprężyste |
| | KO40 | 0.445 | Sprawdzenie przekroju Zginanie, siła osiowa i ścinanie wg EN 1993-1-1, 6.2.9.2, 6.2.9.3, 6.2.10 Projektowanie sprężyste |
| | KO40 | 0.579 | Stateczność Zginanie i wyboczenie względem osi głównych wg EN 1993-1-1, 6.3.3 |
| | KO113 | 0.375 | Użytkowność Ugięcia w kierunku z |
| SHS 40x3.2 1 - S235 | | | |
| BK-401 | KO49 | 0.027 | Sprawdzenie przekroju Rozciąganie wg EN 1993-1-1, 6.2.3 |
| | KO40 | 0.185 | Sprawdzenie przekroju Ściskanie wg EN 1993-1-1, 6.2.4 |
| | KO40 | 0.003 | Sprawdzenie przekroju Ścinanie wg EN 1993-1-1, 6.2.6(4) Projektowanie sprężyste |
| | KO42 | 0.230 | Sprawdzenie przekroju Zginanie, siła osiowa i ścinanie wg EN 1993-1-1, 6.2.9.2, 6.2.9.3, 6.2.10 Projektowanie sprężyste |
| | KO40 | 0.876 | Stateczność Zginanie i wyboczenie względem osi głównych wg EN 1993-1-1, 6.3.3 |
| | KO111 | 0.117 | Użytkowność Ugięcia w kierunku z |
| SHS 90x3.6 1 - S235 | | | |
| BK-402 | KO49 | 0.023 | Sprawdzenie przekroju Rozciąganie wg EN 1993-1-1, 6.2.3 |
| | KO40 | 0.075 | Sprawdzenie przekroju Ściskanie wg EN 1993-1-1, 6.2.4 |
| | KO40 | 0.035 | Sprawdzenie przekroju Ścinanie wg EN 1993-1-1, 6.2.6(4) Projektowanie sprężyste |
| | KO42 | 0.250 | Sprawdzenie przekroju Zginanie, siła osiowa i ścinanie wg EN 1993-1-1, 6.2.9.2, 6.2.9.3, 6.2.10 Projektowanie sprężyste |
| | KO40 | 0.266 | Stateczność Zginanie i wyboczenie względem osi głównych wg EN 1993-1-1, 6.3.3 |
| | KO111 | 0.201 | Użytkowność Ugięcia w kierunku z |
| SHS 40x2.6 1 - S235 | | | |
| BK-601 | KO42 | 0.081 | Sprawdzenie przekroju Rozciąganie wg EN 1993-1-1, 6.2.3 |
| | KO40 | 0.145 | Sprawdzenie przekroju Ściskanie wg EN 1993-1-1, 6.2.4 |
| | KO69 | 0.021 | Sprawdzenie przekroju Ścinanie wg EN 1993-1-1, 6.2.6(4) Projektowanie sprężyste |
| | KO40 | 0.221 | Sprawdzenie przekroju Zginanie, siła osiowa i ścinanie wg EN 1993-1-1, 6.2.9.2, 6.2.9.3, 6.2.10 Projektowanie sprężyste |
| | KO40 | 0.267 | Stateczność Zginanie i wyboczenie względem osi głównych wg EN 1993-1-1, 6.3.3 |
| | KO140 | 0.206 | Użytkowność Ugięcia w kierunku z |

5.1.6 Stopnie wykorzystania nośności w prętach

Stopień wykorzystania jest przedstawiony numerycznie. Wartość poniżej 1.0 spełnia warunki nośności prętów na podstawie analizy pierwszego rzędu zgodnie z wynikami SGN. Obliczenia w programie zostały przeprowadzone zgodnie z PN EN 1993-1-1 zakładając wymiarowanie sprężyste.



Rysunek 73 Mapa wykorzystania nośności prętów



Rysunek 74 Mapa wykorzystania nośności prętów (latarnia)

5.2 Analiza globalna stateczności

5.2.1 Założenia

Analiza stateczności z wykorzystaniem efektów II rzędu pozwoli przede wszystkim na zbadaniu efektów przeskoku węzłów. Z uwagi na złożoność konstrukcji, a co za tym idzie różną podatność przemieszczeń węzłów, określenie krytycznej wartości siły bifurkacyjnej, za pomocą stabilaryzowanym nomogramów jest bardzo utrudnione. Numeryczny model konstrukcji jest w stanie w bardzo dokładny sposób określić jak w danej konstrukcji zachowują się poszczególne elementy konstrukcji.

5.2.2 Wpływ deformacji wg PN EN 1993-1-1, 5.2.1

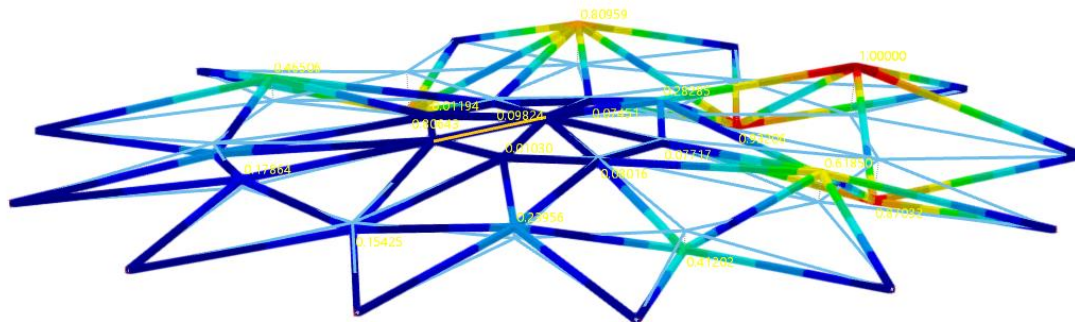
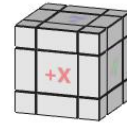
Jeżeli spełniony jest poniższy warunek wpływ analizy drugiego rzędu może być pomijalny.

$$\alpha_{cr} = \frac{F_{cr}}{F_{Ed}} > 10$$

dla analizy sprężystej

Analiza stateczności metodą II rzędu wykazała że dla górnej części kopuły występuje obciążenie bifurakcyjne, które powoduje mechanizm destabilizujący konstrukcję.

Tryb widoczności
 KO11 - 1.35 * PO1 + 0.75 * PO3 + 0.90 * PO4 + 0.90 * PO6
 Analiza stateczności
 Postać własna nr 1 - 1.159
 Znormalizowane przemieszczenia [u]



Rysunek 75 Przedstawienie bifurkacji na górnym skratowaniu kopuły powodującą niestateczność konstrukcji.

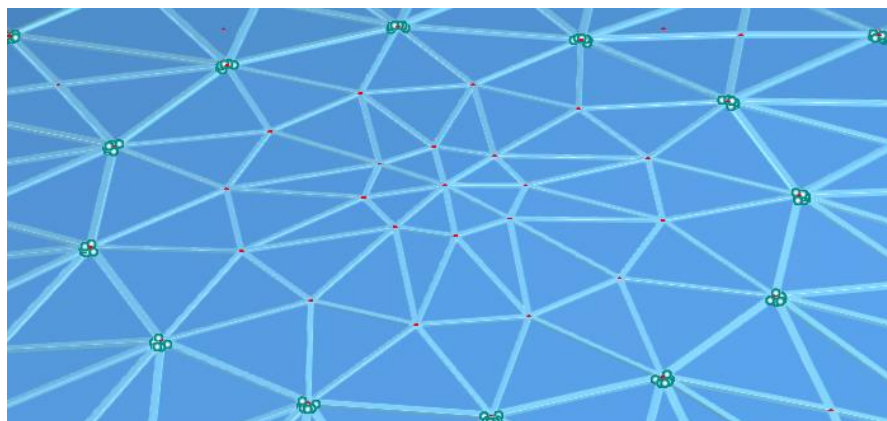
Współczynnik globalny obciążenia krytycznego wyniósł poniżej wartości granicznej 1.00

$$\alpha_{cr} = 0,66 < 1,00$$

Konstrukcja niestateczna

Wniosek: konstrukcja pomimo zwymiarowania poszczególnych prętów na podstawie jest osobiwa z uwagi na bifurkację węzłów z płaszczyzny sfery. Zgodnie z opisywaną praktyką projektową w artykule „Przekrycia strukturalne” 13 lis 14 : Lech Chodor niezbędnym sprawdzeniem konstrukcji będzie jej analiza stateczności na podstawie analizy nieliniowej, która wyłoni najsłabsze ogniwa konstrukcji i umożliwi korektę konstrukcji i jej optymalizację.

W górnym skratowaniu latarni zostaną zastosowane sztywne węzły w celu uniknięcia przebijania się węzłów. Następnie ponownie zostanie przeprowadzona analiza stateczności konstrukcji.

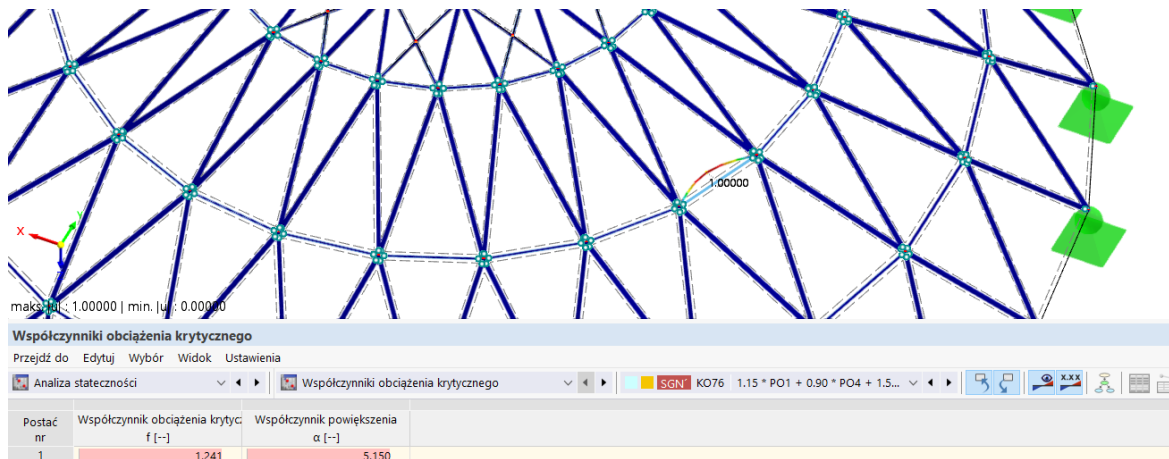


Rysunek 76 Widok górnego skratowania jako sztywnego, z elementów bez węzłów przegubowych (białe kropki to węzły przegubowe)

Analiza stateczności wykazała po zmianie węzłów w górnej części skratowania, że mnożnik obciążenia krytycznego przyjmuje następującą wartość dla najbardziej niekorzystnej kombinacji

Kombinacja nr 76:

$$F_{Ed} = 1.15 \cdot PO1 + 0.90 \cdot PO4 + 1.5 \cdot PO7 + 0.9 \cdot PO6$$

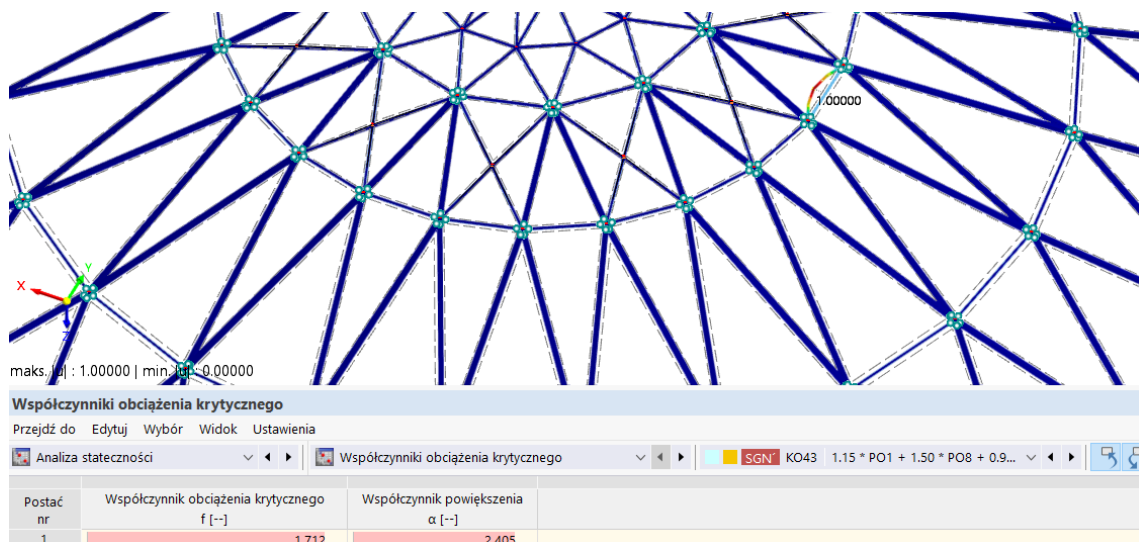


Rysunek 77 Wyboczenie elementu pierścienia P-2 determinujący jej stateczność, bez zadanych imperfekcji dla kombinacji 76

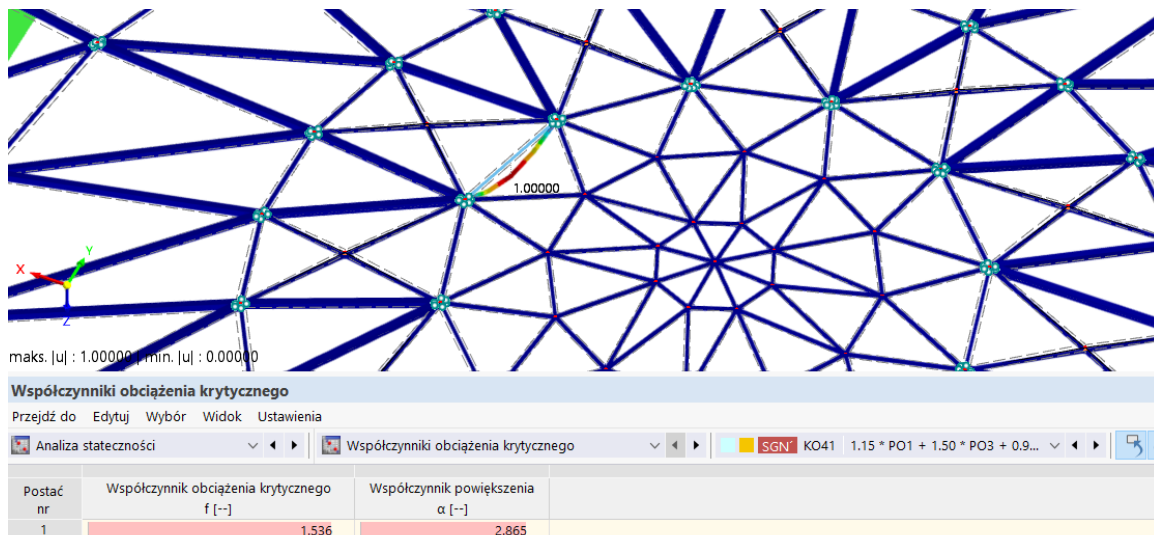
Obliczeniowy maksymalny współczynnik globalny obciążenia krytycznego wynoszący:

$$\alpha_{cr} = 1.241$$

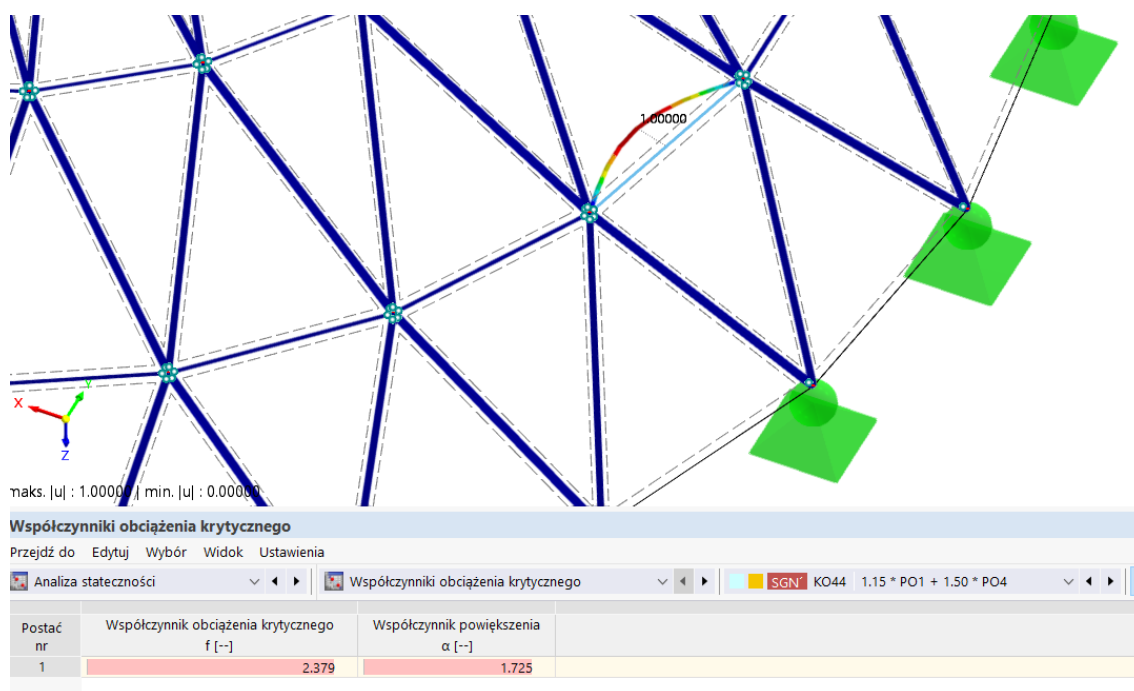
Według analizy stateczności elementy które narażają konstrukcję na niestateczność to pierścien P-1, P-2, P-3 oraz P-4, dla których występują w zależności od kombinacji niskie współczynniki obciążenia krytycznego oraz związane z analizą wyboczeniową następujące deformacje:



Rysunek 78 Wyboczenie elementu pierścienia P-3 determinujący jej stateczność, bez zadanych imperfekcji dla kombinacji 43



Rysunek 79 Wyboczenie elementu pierścienia P-4 determinujący jej stateczność, bez zadanych imperfekcji dla kombinacji 41







Rysunek 80 Wyboczenie elementu pierścienia P-1 determinujący jej stateczność, bez zadanych imperfekcji dla kombinacji 44

Według założeń PN EN 1993-1-1 pkt. 5.2.1 konstrukcja (analizowana sprężysto) nie spełnia warunku (5.1) i należy konstrukcję analizować za pomocą **efektów drugiego rzędu**.

$$\alpha_{cr} = 1.241 < 10.00$$

Dodatkowo po szczegółowej analizie wyboczeniowej przeprowadzonej na każdym przypadku kombinacji można założyć dobranie mocniejszego przekroju dla prętów pierścieni P-1, P-2, P-3 oraz P-4 dla zwiększenia współczynnika krytycznego. Przewiduje się zatem sprawdzenie stateczności z zadanymi imperfekcjami lokalnymi wygięcia prętów i zbadanie zmiany współczynnika krytycznego obciążenia.

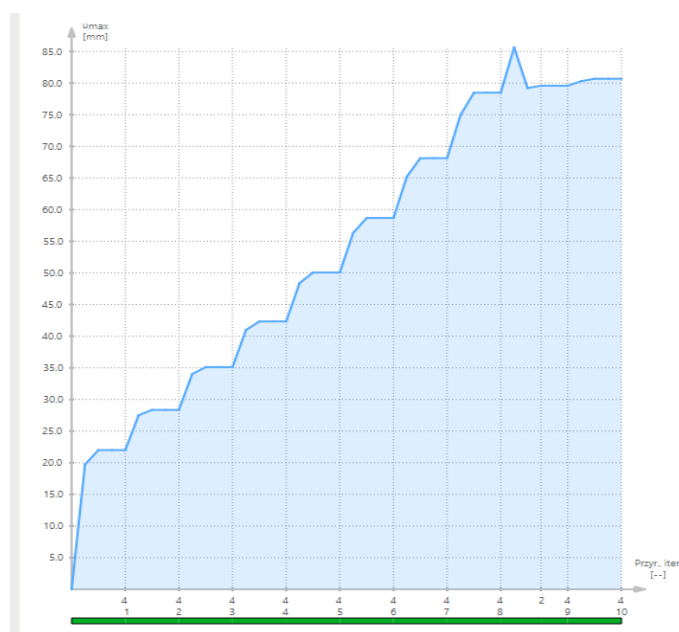
Tabela 9 Wytężenie prętów pierścieni dla analizy drugiego rzędu (porównanie)

| Pręt | Obciążenie | Stopień wykorzystania warunku projektowego η [--] obliczenia liniowo-sprężyste | Stopień wykorzystania warunku projektowego η [--] obliczenia wg teorii II rzędu z imperfekcjami lokalnymi | Procentowa różnica wykorzystania prętów [%] | Opis |
|-----------------------|------------|---|--|---|---|
| SHS 50x2.6 1 - S235 | | | | | |
| BP-101 | KO31 |  0,414 |  0,552 | 13,80% | Sprawdzenie przekroju Zginanie, siła osiowa i ścinanie wg EN 1993-1-1, 6.2.9.2, 6.2.9.3, 6.2.10 Projektowanie sprężyste |
| | KO125 |  0,082 |  0,627 | 54,50% | Użytkowność Ugięcia w kierunku y |
| SHS 40x3.2 1 - S235 | | | | | |
| BP-201 | KO147 |  0,006 |  1,475 | 146,90% | Sprawdzenie przekroju Zginanie, siła osiowa i ścinanie wg EN 1993-1-1, 6.2.9.2, 6.2.9.3, 6.2.10 Projektowanie sprężyste |
| | KO147 |  0,066 |  1,432 | 136,60% | Użytkowność Ugięcia w kierunku y |
| SHS 40x2.6 1 - S235 | | | | | |
| BP-301 | KO73 |  0,869 |  1,270 | 40,06% | Sprawdzenie przekroju Zginanie, siła osiowa i ścinanie wg EN 1993-1-1, 6.2.9.2, 6.2.9.3, 6.2.10 Projektowanie sprężyste |
| | KO144 |  0,015 |  0,697 | 68,20% | Użytkowność Ugięcia w kierunku y |
| SHS 40x2.6 1 - S235 | | | | | |
| BP-401 | KO40 |  0,919 |  1,164 | 24,48% | Sprawdzenie przekroju Zginanie, siła osiowa i ścinanie wg EN 1993-1-1, 6.2.9.2, 6.2.9.3, 6.2.10 Projektowanie sprężyste |
| | KO111 |  0,023 |  0,696 | 67,30% | Użytkowność Ugięcia w kierunku y |
| SHS 40x2.6 1 - S235 | | | | | |
| BP-501 | KO40 |  0,584 |  0,645 | 6,10% | Sprawdzenie przekroju Zginanie, siła osiowa i ścinanie wg EN 1993-1-1, 6.2.9.2, 6.2.9.3, 6.2.10 Projektowanie sprężyste |
| | KO144 |  0,104 |  0,092 | -1,20% | Użytkowność Ugięcia w kierunku y |
| SHS 40x2.6 1 - S235 | | | | | |
| BP-601 | KO1 |  0,098 |  0,287 | 18,90% | Sprawdzenie przekroju Zginanie, siła osiowa i ścinanie wg EN 1993-1-1, 6.2.9.2, 6.2.9.3, 6.2.10 Projektowanie sprężyste |
| | KO95 |  0,009 |  0,074 | 6,50% | Użytkowność Ugięcia w kierunku y |

Analiza naprężeń wewnątrz przekrojów prętów pierścieni pokazała że występuje uplastycznienie przekroju, które powoduje powstawanie przegubu plastycznego. W przypadku konstrukcji statycznie wyznaczalnej jest to niedopuszczalne ponieważ powoduje niestateczność.

Dobrano nowe wielkości profili o tym samym rozmiarze w celu ułatwienia wykonania połączeń. Wyniki optymalizacji przedstawione są w tabelce nr 10 poniżej. Analiza stateczności wykazała znaczący przyrost krytycznego współczynnika obciążenia o wartości $\alpha_{cr} = 2.967$.

W celu przeprowadzenia analizy zachowania się konstrukcji w skutek obciążenia krytycznego przeprowadzono nieliniową analizę stateczności. Zauważa się liniowy przyrost odkształceń w stosunku do przyrostu obciążenia, do momentu osiągnięcia obciążenia krytycznego. Oznacza to że podczas przyrostu obciążeń nie występuje bifurkacja ani wyboczenie prętów, a konstrukcja zachowuje się w zakresie dopuszczalnych obciążeń liniowo-sprężysto.



Wykres 4 Stosunek odkształceń do iteracyjnego przyrostu obciążenia (zoptymalizowane pierścienie)

Tabela 10 Optymalizacja prętów pierścieni, wymiarowanie wg analizy drugiego rzędu

| Pręt | Obciążenie | Stopień wykorzystania warunku projektowego η [--] obliczenia wg teorii II rzędu | Opis |
|-----------------------|------------|--|---|
| SHS 50x2.6 1 - S235 | | | |
| BP-101 | KO31 | 0,552 | Sprawdzenie przekroju Zginanie, siła osiowa i ścinanie wg EN 1993-1-1, 6.2.9.2, 6.2.9.3, 6.2.10 Projektowanie sprężyste |
| | KO125 | 0,627 | Użytkowność Ugięcia w kierunku y |
| SHS 50x2.6 1 - S235 | | | |
| BP-201 | KO147 | 0,633 | Sprawdzenie przekroju Zginanie, siła osiowa i ścinanie wg EN 1993-1-1, 6.2.9.2, 6.2.9.3, 6.2.10 Projektowanie sprężyste |
| | KO147 | 0,061 | Użytkowność Ugięcia w kierunku y |
| SHS 50x2.6 1 - S235 | | | |
| BP-301 | KO73 | 0,481 | Sprawdzenie przekroju Zginanie, siła osiowa i ścinanie wg EN 1993-1-1, 6.2.9.2, 6.2.9.3, 6.2.10 Projektowanie sprężyste |
| | KO144 | 0,012 | Użytkowność Ugięcia w kierunku y |
| SHS 50x2.6 1 - S235 | | | |
| BP-401 | KO41 | 0,409 | Sprawdzenie przekroju Zginanie, siła osiowa i ścinanie wg EN 1993-1-1, 6.2.9.2, 6.2.9.3, 6.2.10 Projektowanie sprężyste |
| | KO112 | 0,019 | Użytkowność Ugięcia w kierunku y |
| SHS 40x2.6 1 - S235 | | | |
| BP-501 | KO40 | 0,532 | Sprawdzenie przekroju Zginanie, siła osiowa i ścinanie wg EN 1993-1-1, 6.2.9.2, 6.2.9.3, 6.2.10 Projektowanie sprężyste |
| | KO144 | 0,074 | Użytkowność Ugięcia w kierunku y |
| SHS 40x2.6 1 - S235 | | | |
| BP-601 | KO1 | 0,285 | Sprawdzenie przekroju Zginanie, siła osiowa i ścinanie wg EN 1993-1-1, 6.2.9.2, 6.2.9.3, 6.2.10 Projektowanie sprężyste |
| | KO95 | 0,069 | Użytkowność Ugięcia w kierunku y |

Analiza wyężenia stali wykazała że pręty skratowań nie osiąają granicy plastyczności w przekrojach, jednak nie spełniają warunku dopuszczalnych ugięć zdefiniowanych jako $L/250$. Zostanie zatem zwiększona sztywność prętów w celu uniknięcia nadmiernych ugięć, gdzie preferowanym kryterium będzie zwiększenie wymiaru profilu jednocześnie stosując cieńsze ścianki.

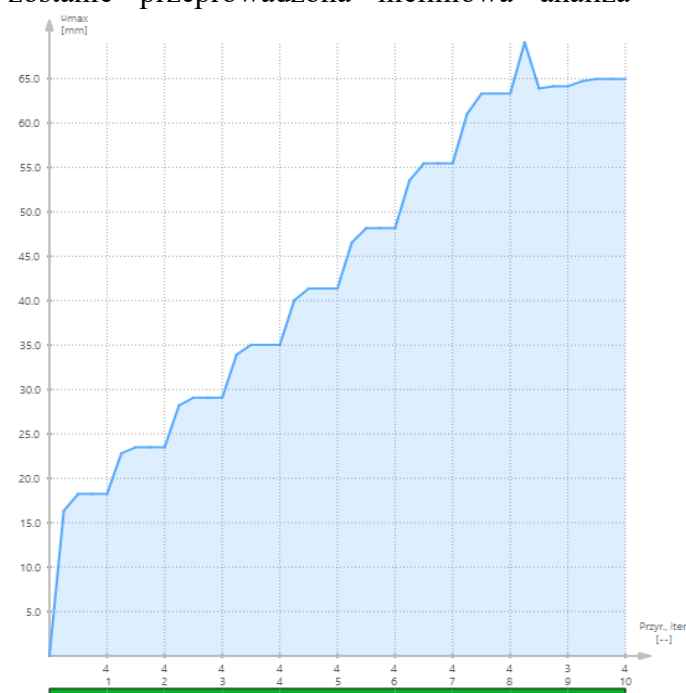
Na podstawie zestawienia wyężenia stali zauważa się różnicę wyężenia prętów między analizą I a II rzędu wynoszącą około 10%.

Tabela 11 Wytężenie prętów skratowań dla analizy drugiego rzędu (porównanie)

| Pręt | Obciążenie | Stopień wykorzystania warunku projektowego η [--] wg analizy I rzędu | Stopień wykorzystania warunku projektowego η [--] wg analizy II rzędu | Procentowa różnica wykorzystania prętów [%] | Opis |
|-----------------------|------------|---|--|---|---|
| SHS 90x5 1 - S235 | | | | | |
| BK-101 | KO63 | 0,606 | 0,713 | 10,70% | Sprawdzenie przekroju Zginanie, siła osiowa i ścinanie wg EN 1993-1-1, 6.2.9.2, 6.2.9.3, 6.2.10 Projektowanie sprężyste |
| | KO134 | 0,971 | 1,107 | 13,60% | Użytkowność Ugięcia w kierunku z |
| SHS 90x4 1 - S235 | | | | | |
| BK-201 | KO67 | 0,561 | 0,656 | 9,50% | Sprawdzenie przekroju Zginanie, siła osiowa i ścinanie wg EN 1993-1-1, 6.2.9.2, 6.2.9.3, 6.2.10 Projektowanie sprężyste |
| | KO138 | 0,959 | 1,094 | 13,50% | Użytkowność Ugięcia w kierunku z |
| SHS 90x3.6 1 - S235 | | | | | |
| BK-301 | KO63 | 0,564 | 0,670 | 10,60% | Sprawdzenie przekroju Zginanie, siła osiowa i ścinanie wg EN 1993-1-1, 6.2.9.2, 6.2.9.3, 6.2.10 Projektowanie sprężyste |
| | KO144 | 0,989 | 1,122 | 13,30% | Użytkowność Ugięcia w kierunku z |
| SHS 90x3.6 1 - S235 | | | | | |
| BK-401 | KO42 | 0,230 | 0,263 | 3,30% | Sprawdzenie przekroju Zginanie, siła osiowa i ścinanie wg EN 1993-1-1, 6.2.9.2, 6.2.9.3, 6.2.10 Projektowanie sprężyste |
| | KO111 | 0,117 | 0,208 | 9,10% | Użytkowność Ugięcia w kierunku z |
| SHS 40x2.6 1 - S235 | | | | | |
| BK-402 | KO42 | 0,250 | 0,211 | -3,90% | Sprawdzenie przekroju Zginanie, siła osiowa i ścinanie wg EN 1993-1-1, 6.2.9.2, 6.2.9.3, 6.2.10 Projektowanie sprężyste |
| | KO111 | 0,201 | 0,134 | -6,70% | Użytkowność Ugięcia w kierunku z |
| SHS 40x3.2 1 - S235 | | | | | |
| BK-501 | KO40 | 0,445 | 0,465 | 2,00% | Sprawdzenie przekroju Zginanie, siła osiowa i ścinanie wg EN 1993-1-1, 6.2.9.2, 6.2.9.3, 6.2.10 Projektowanie sprężyste |
| | KO113 | 0,375 | 0,341 | -3,40% | Użytkowność Ugięcia w kierunku z |
| SHS 40x2.6 1 - S235 | | | | | |
| BK-601 | KO40 | 0,221 | 0,219 | -0,20% | Sprawdzenie przekroju Zginanie, siła osiowa i ścinanie wg EN 1993-1-1, 6.2.9.2, 6.2.9.3, 6.2.10 Projektowanie sprężyste |
| | KO140 | 0,206 | 0,089 | -11,70% | Użytkowność Ugięcia w kierunku z |

Następujące przekroje grup prętowych skratowań zostaną tak dobrane, by spełniać warunki użytkowności konstrukcji. Następnie zostanie przeprowadzona nieliniowa analiza stateczności, na podstawie której będzie można stwierdzić czy zwiększenie sztywności prętów skratowań wpływa na wartość obciążenia krytycznego. Jeżeli nie zostaną wykazane większe różnice można stwierdzić, że krytycznym elementem tej konstrukcji będą pręty pierścieni.

Analiza stateczności dowiodła że wartość współczynnika krytycznego obciążenia różni się tylko nieznacznie i wynosi $\alpha_{cr} = 2.982$, (przed zmianą przekrojów skratowań wynosił $\alpha_{cr} = 2.967$). Różnica rzędu 1,5% wykazuje, że stateczność konstrukcji determinują pierścienie. Zwiększenie sztywności prętów skratowań przyniosło za to skutki w postaci mniejszych deformacji pod wpływem obciążenia.



Wykres 5 Stosunek odkształceń do iteracyjnego przyrostu obciążenia (zoptymalizowane skratowania)

Tabela 12 Optymalizacja prętów skratowań, wymiarowanie wg analizy drugiego rzędu

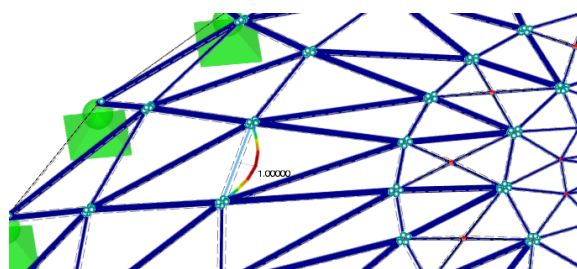
| Pręt | Obciążenie | Stopień wykorzystania warunku projektowego η [--] | Opis |
|------------------------|------------|--|---|
| SHS 100x4 1 - S235 | | | |
| BK-101 | KO63 | 0,682 | Sprawdzenie przekroju Zginanie, siła osiowa i ścinanie wg EN 1993-1-1, 6.2.9.2, 6.2.9.3, 6.2.10 Projektowanie sprężyste |
| | KO134 | 0,933 | Użytkowność Ugięcia w kierunku z |
| SHS 100x3.6 1 - S235 | | | |
| BK-201 | KO67 | 0,563 | Sprawdzenie przekroju Zginanie, siła osiowa i ścinanie wg EN 1993-1-1, 6.2.9.2, 6.2.9.3, 6.2.10 Projektowanie sprężyste |
| | KO138 | 0,835 | Użytkowność Ugięcia w kierunku z |
| SHS 100x3.6 1 - S235 | | | |
| BK-301 | KO63 | 0,523 | Sprawdzenie przekroju Zginanie, siła osiowa i ścinanie wg EN 1993-1-1, 6.2.9.2, 6.2.9.3, 6.2.10 Projektowanie sprężyste |
| | KO144 | 0,784 | Użytkowność Ugięcia w kierunku z |
| SHS 100x3.6 1 - S235 | | | |
| BK-401 | KO42 | 0,217 | Sprawdzenie przekroju Zginanie, siła osiowa i ścinanie wg EN 1993-1-1, 6.2.9.2, 6.2.9.3, 6.2.10 Projektowanie sprężyste |
| | KO111 | 0,150 | Użytkowność Ugięcia w kierunku z |
| SHS 40x3.2 1 - S235 | | | |
| BK-402 | KO42 | 0,210 | Sprawdzenie przekroju Zginanie, siła osiowa i ścinanie wg EN 1993-1-1, 6.2.9.2, 6.2.9.3, 6.2.10 Projektowanie sprężyste |
| | KO111 | 0,126 | Użytkowność Ugięcia w kierunku z |
| SHS 40x2.6 1 - S235 | | | |
| BK-501 | KO40 | 0,464 | Sprawdzenie przekroju Zginanie, siła osiowa i ścinanie wg EN 1993-1-1, 6.2.9.2, 6.2.9.3, 6.2.10 Projektowanie sprężyste |
| | KO113 | 0,340 | Użytkowność Ugięcia w kierunku z |
| SHS 40x2.6 1 - S235 | | | |
| BK-601 | KO40 | 0,218 | Sprawdzenie przekroju Zginanie, siła osiowa i ścinanie wg EN 1993-1-1, 6.2.9.2, 6.2.9.3, 6.2.10 Projektowanie sprężyste |
| | KO140 | 0,088 | Użytkowność Ugięcia w kierunku z |

5.2.3 Ostateczna stateczność konstrukcji poddanej analizie drugiego rzędu

Globalna analiza stateczności poszczególnych przypadków kombinacji SGN wykazała, że dla kombinacji KO 64 przypada najmniejszy współczynnik obciążenia krytycznego o wartości:

$$\alpha_{cr} = 2.571$$

Postać wyboczeniowa przyjmuje formę niestateczności pojedynczego pręta konstrukcji. Z uwagi na wyidealizowaną geometrię nie zachodzi zjawisko bifurkacji węzłów. Jest to spowodowane również kręłą budową siatki prętów. Należy zatem zadać odpowiednie imperfekcje, które zasymulują rzeczywiste zachowanie się konstrukcji.



Rysunek 81 Postać wyboczeniowa konstrukcji optymalizacji z udziałem efektów II rzędu

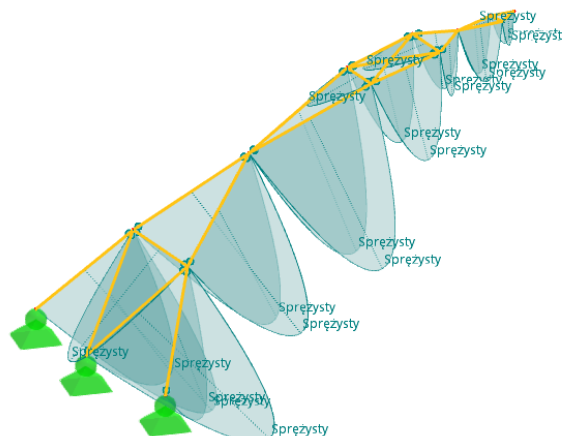
5.3 Wymiarowanie globalne modelu z założonymi imperfekcjami

W celu pełnego zwymiarowania konstrukcji zgodnie z 5.2.2 (7) PN-EN 1993-1-1 należy dla analizy 2-go rzędu oraz analizy stateczności zadać odpowiednie imperfekcje, które mają zasymulować możliwe, dopuszczalne odchyłki elementów konstrukcji. Do takich form deformacji będą zaliczać się zarówno imperfekcje lokalne prętów, związane z niedoskonałościami wykonania profili stalowych, a także imperfekcje globalne, które wg opracowania STABILITY ANALYSIS METHOD FOR LATTICE SHELLS ACCOUNTING FOR MEMBER BUCKLING autorstwa TIAN Wei, ZHAO Yang, DONG Shi-lin szczególnie narażają konstrukcję na redukcję współczynnika krytycznego obciążenia. Do tej grupy imperfekcji należą przede wszystkim odchyłki węzłów od płaszczyzny konstrukcji. Aby uzyskać możliwie wiarygodne wyniki stateczności globalnej, zostaną zdefiniowane 4 przypadki różnych możliwych imperfekcji węzłowych, skombinowane z lokalnymi przechyłami prętów. Następnie konstrukcja zostanie poddana analizie dla wszystkich przypadków kombinacji, gdzie wyłonią się najniekorzystniejsze przypadki obciążeń dla poszczególnych przypadków imperfekcji.

5.3.1 Przypadki imperfekcji

5.3.1.1 Imperfekcja lokalna

Pierwszy przypadek obejmuje lokalne imperfekcje łukowe prętów zgodnie z PN EN 1993-1-1. Ma on na celu symulację niedokładności wykonawczych prętów oraz wewnętrznych naprężeń, wynikających z walcowania. Elementy prętowe narażone są na wyboczenie z uwagi na działanie sił osiowych. Zgodnie z tabelicą 5.1 kwadratowe przekroje zamknięte, dla których przypada krzywa wyboczenia a (wg tabelicy 6.1) oraz zgodnie z przyjętą analizą sprężystą wartości obliczeniowe wstępnych imperfekcji łukowych e_0/L wynoszą $1/300$. Rfem umożliwia autonomiczne obliczanie imperfekcji po uprzednim zdefiniowaniu go w przecie.



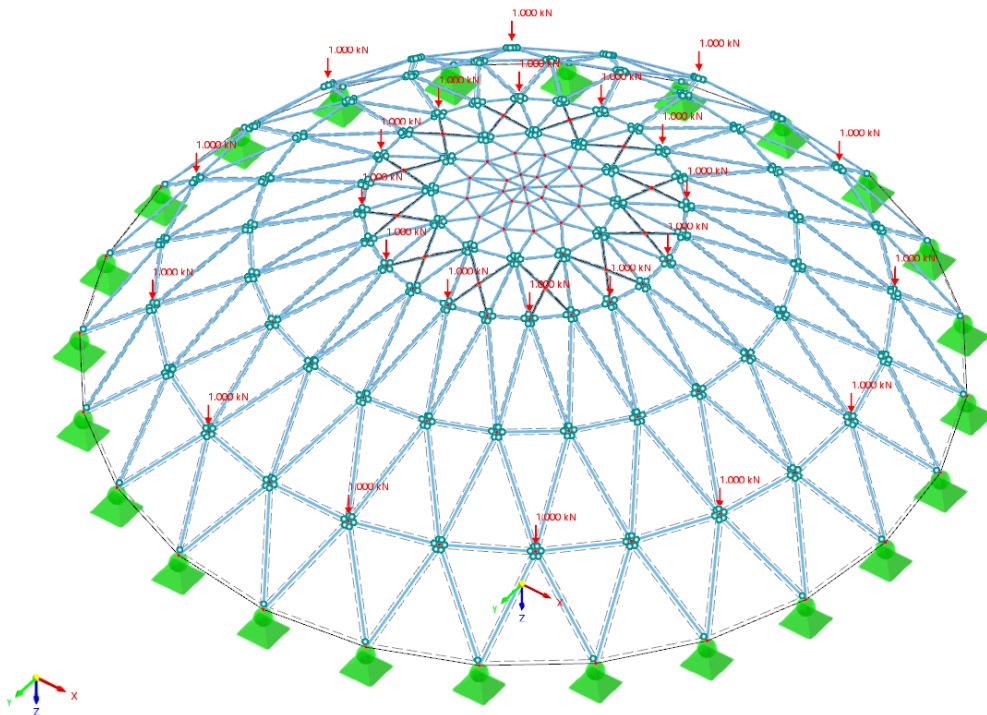
Rysunek 82 Zadane imperfekcje lokalne w programie Rfem

5.3.1.2 Imperfekcja globalna

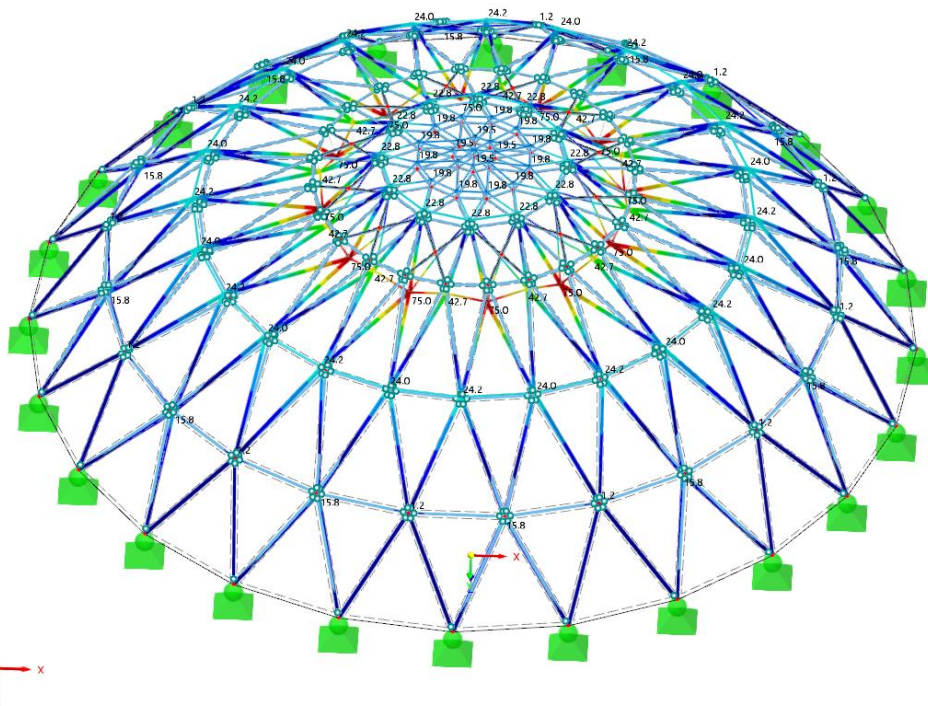
Następne przypadki imperfekcji, są to przemieszczenia węzłów z uwagi na odchyłki montażowe konstrukcji. Aby odchyłki były efektywne zastosowano kolejną funkcję programu Rfem do generowania imperfekcji. Po odpowiednim dostosowaniu sił do konstrukcji powstała deformacja statyczna, która jest odpowiednio amplifikowana o wartość L/x , gdzie L to długość rozpiętości kopuły, a x będzie współczynnikiem imperfekcji zawierającym wartość od 500 do wartości granicznej 300. Zgodnie z zaleceniami zawartymi w pracy STABILITY ANALYSIS METHOD FOR LATTICE SHELLS ACCOUNTING FOR MEMBER BUCKLING autorstwa TIAN Wei, ZHAO Yang, DONG Shi-lin najbardziej rzeczywistą nośność krytyczną dla konstrukcji jednowarstwowych kopułowych osiąga się przy imperfekcjach o następującej amplitudzie:

$$L/300$$

Imperfekcja nr 1

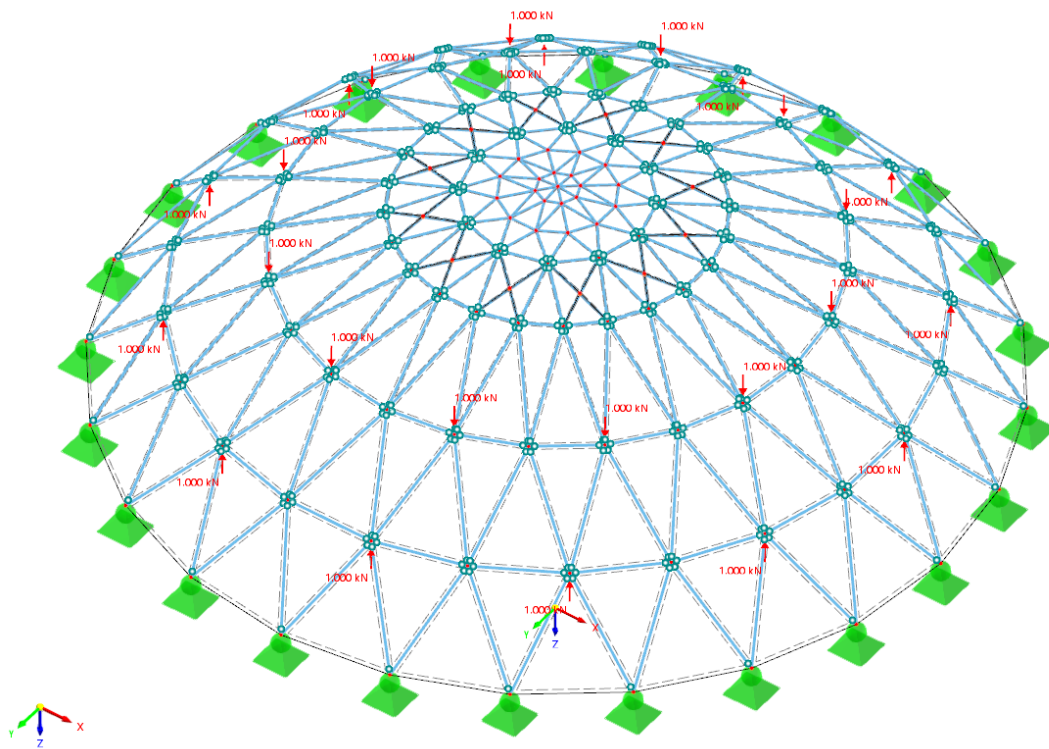


Rysunek 83 założone obciążenie statyczne dla imperfekcji nr 1

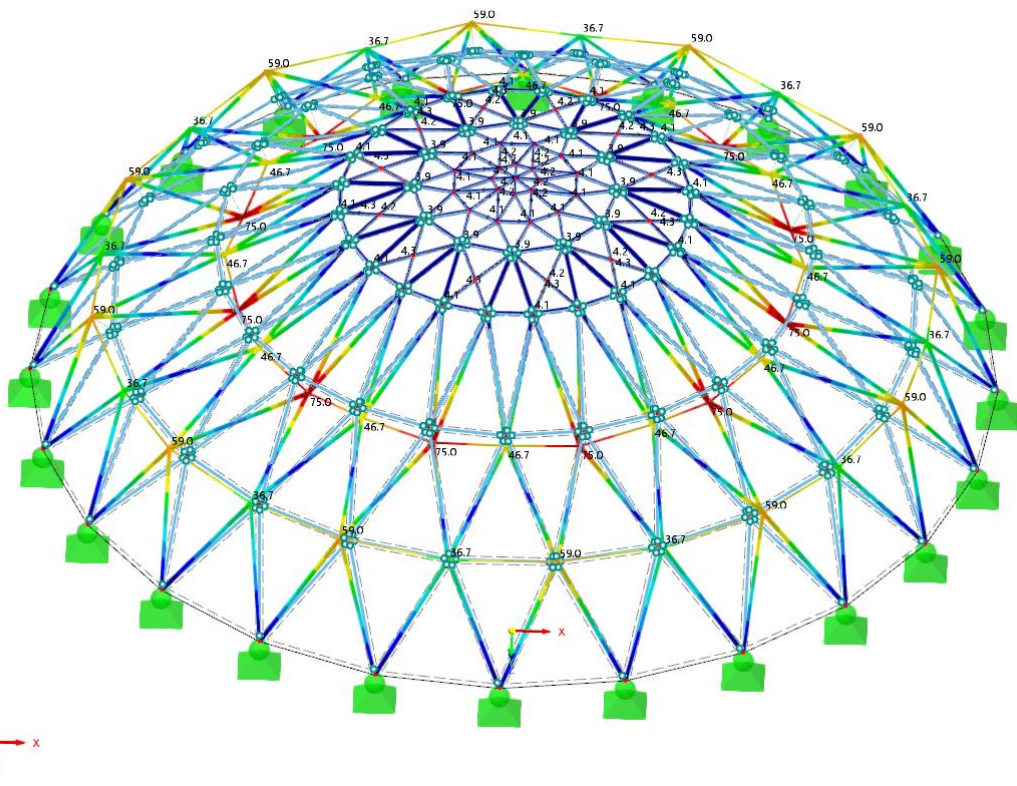


Rysunek 84 deformacja statyczna węzłów na skutek działania przyjętych sił, imperfekcja nr 1

Imperfekcja nr 2

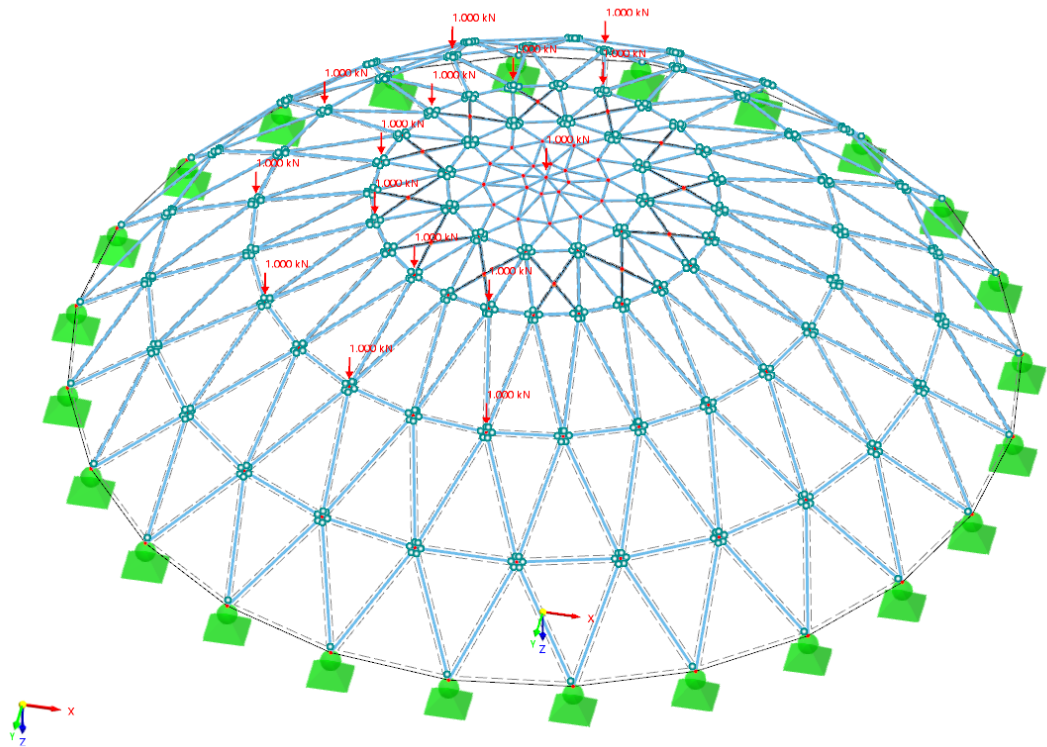


Rysunek 85 założone obciążenie statyczne dla imperfekcji nr 2

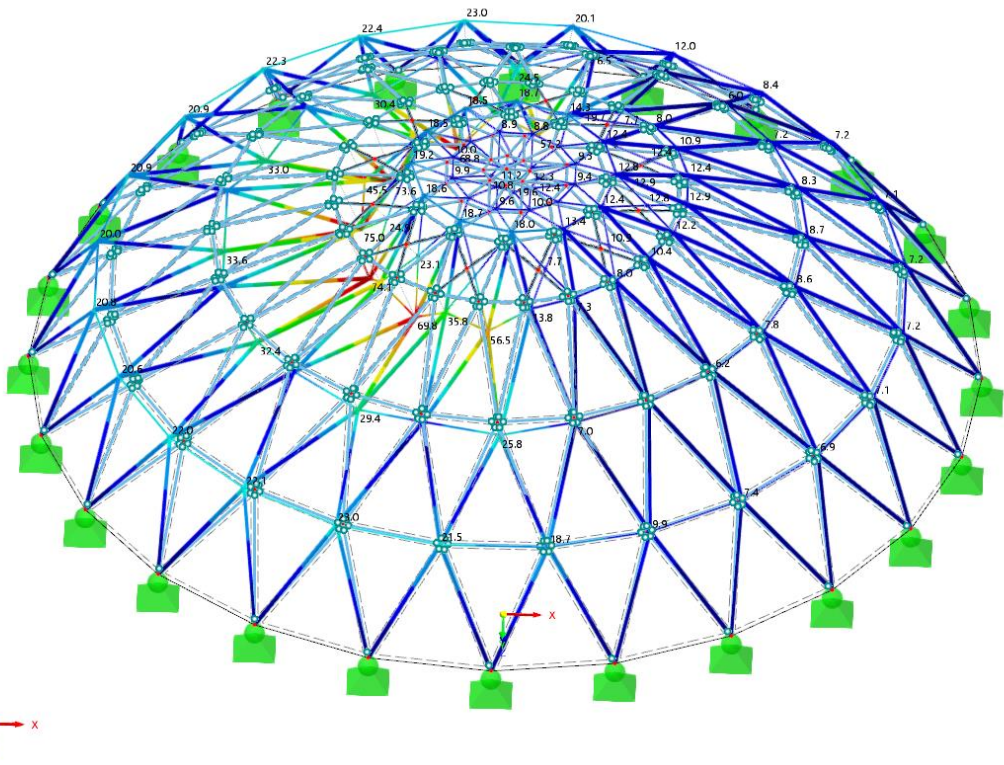


Rysunek 86 deformacja statyczna węzłów na skutek działania przyjętych sił, imperfekcja nr 2

Imperfekcja nr 3

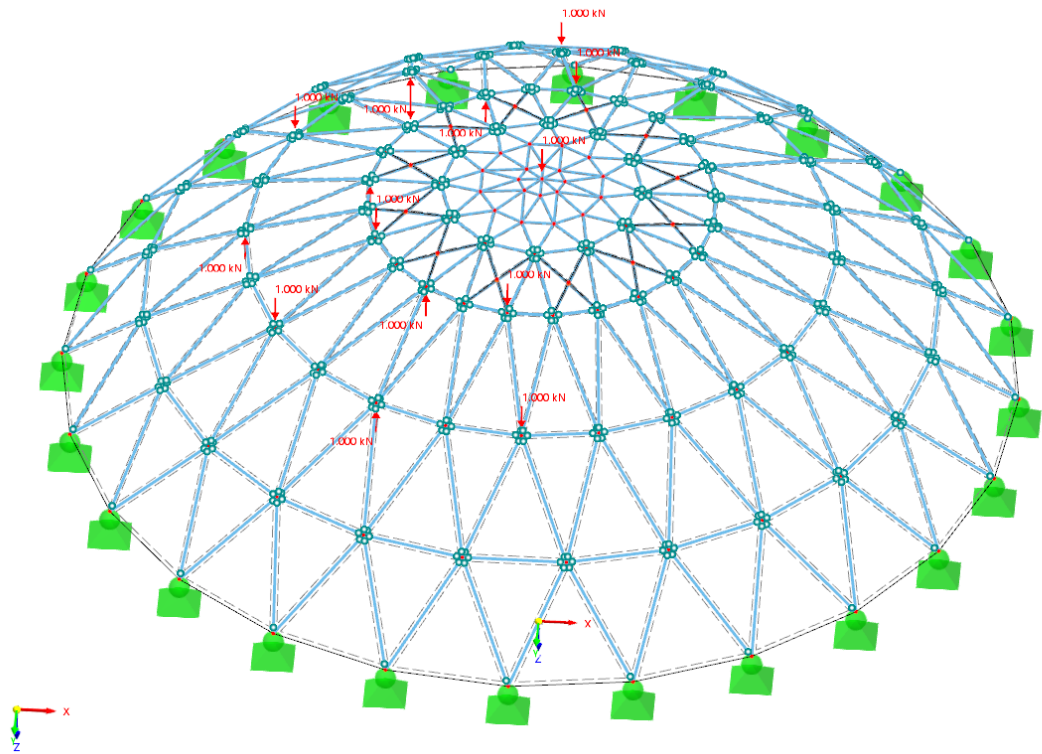


Rysunek 87 założone obciążenie statyczne dla imperfekcji nr 3

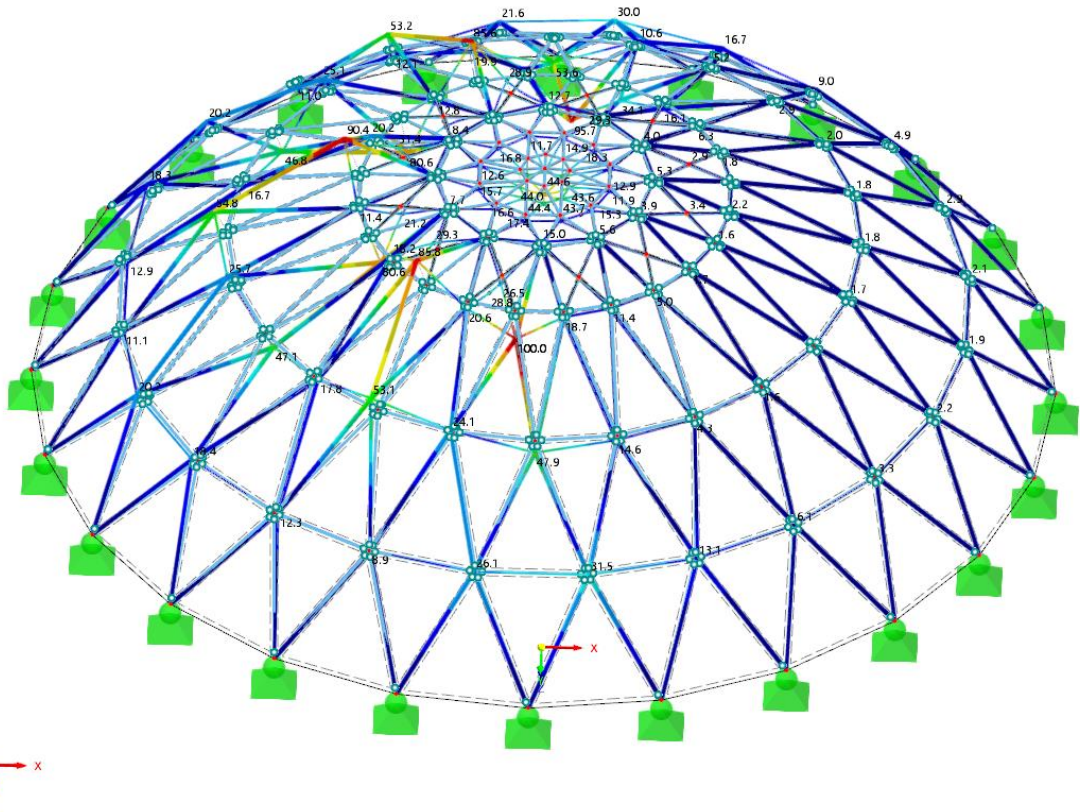


Rysunek 88 deformacja statyczna węzłów na skutek działania przyjętych sił, imperfekcja nr 3

Imperfekcja nr 4



Rysunek 89 założone obciążenie statyczne dla imperfekcji nr 4



Rysunek 90 deformacja statyczna węzłów na skutek działania przyjętych sił, imperfekcja nr 4

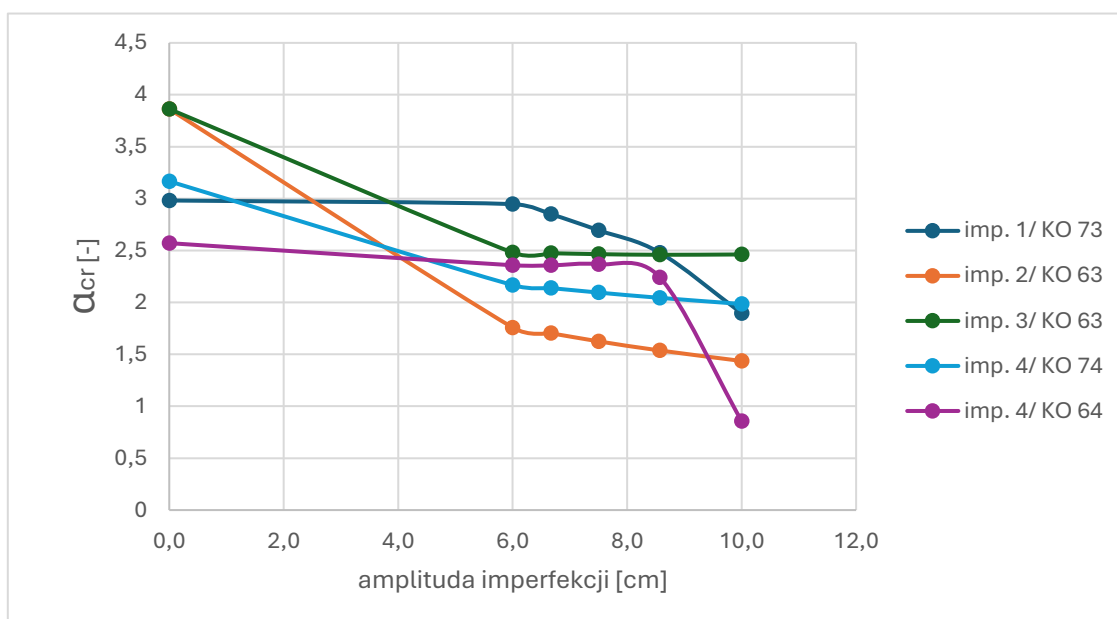
5.3.2 Wyniki finalnej analizy stateczności konstrukcji

Ze względu na fakt iż do analizy globalnej stateczności konstrukcji zostały uwzględnione efekty drugiego rzędu oraz odpowiednie imperfekcje, zgodnie z 5.2.2 (7) PN-EN 1993-1-1, nie jest konieczne ponowne lokalne analizowanie stateczności elementów wg 6.3 PN-EN 1993-1-1.

W celu dokładniejszej oceny wpływu działania imperfekcji na konstrukcję zbadano kilka ich krytycznych skorelowań z kombinacjami obciążeń, które dawały najmniejszy współczynnik α_{cr} .

Tabela 13 Korelacja współczynnika obciążenia krytycznego do amplitudy imperfekcji

| Obciążenie | | KO 73 | KO 63 | KO 63 | KO 64 | KO 74 |
|------------------------|------|---------------|-------|-------|-------|-------|
| Przypadki imperfekcji | | 1 | 2 | 3 | 4 | 4 |
| amplituda imperf. [cm] | | α_{cr} | | | | |
| 0 | 0,0 | 2,982 | 3,863 | 3,863 | 2,571 | 3,167 |
| L/500 | 6,0 | 2,947 | 1,758 | 2,48 | 2,358 | 2,167 |
| L/450 | 6,7 | 2,85 | 1,703 | 2,474 | 2,357 | 2,138 |
| L/400 | 7,5 | 2,695 | 1,625 | 2,465 | 2,367 | 2,095 |
| L/350 | 8,6 | 2,479 | 1,537 | 2,459 | 2,241 | 2,044 |
| L/300 | 10,0 | 1,896 | 1,436 | 2,462 | 0,857 | 1,985 |

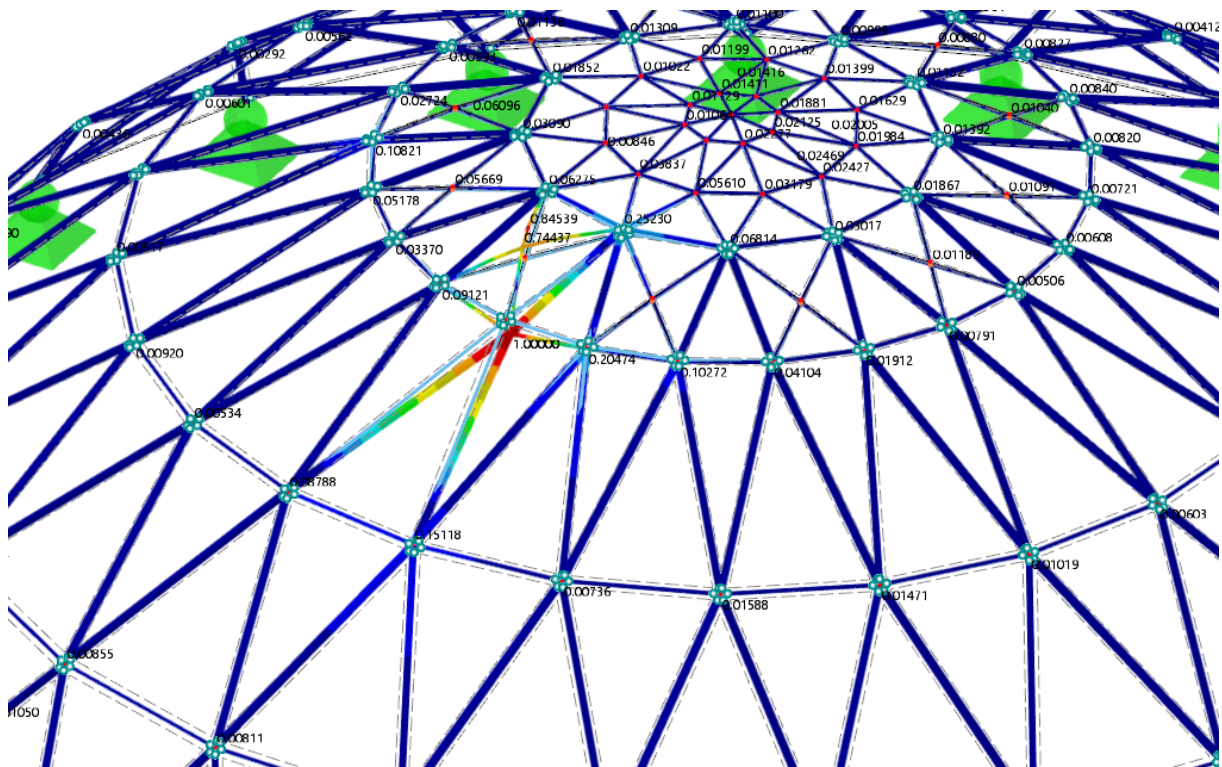


Wykres 6 Korelacja współczynnika obciążenia krytycznego do amplitudy imperfekcji

Wykres przedstawia 5 różnych odczytów, dzięki którym możemy zauważyć jak konstrukcja zachowuje się pod wpływem zwiększania amplitudy imperfekcji. Dla wykresu imp.2/KO 63, imp.3/KO 63, imp.4/KO 74, imp. Zauważa się liniowy przebieg wartości. W przypadku wykresu imp.1/KO 73 oraz imp.4/KO 64 zachodzi nagły przeskok w stronę niższych wartości. Kombinacje te są wrażliwe na przeskok węzła z płaszczyzny sfery, co udowadnia że zadane imperfekcje przedstawiają rzeczywiste zachowanie się konstrukcji zgodnie z założeniami. Odnotowuje się dla przypadku imp.4/KO 64 niestateczność dla amplitudy L/300. Należy zatem podjąć działania optymalizacji konstrukcji w celu zapobieżenia bifurkacji.

5.3.3 Optymalizacja konstrukcji dla zadanych obciążeń oraz imperfekcji

Dzięki analizie stateczności został zasymulowany przeskok węzła, który jest zobrazowany na poniższym rysunku 91:



Rysunek 91 Bifurkacja węzła spowodowana obciążeniem konstrukcji zadanymi imperfekcjami

Najbardziej adekwatnym i miarodajnym działaniem będzie zwiększenie przekrojów stężeń BK-402. Poprawiając ich sztywność będą działać przeciwko bifurkacji.

Zmieniono profil pręta BK-402 z SHS 40x2.6 na profil SHS 60x3,6. Pozwoliło to dla przypadku kombinacji KO 64 uzyskać $\alpha_{cr} = 1.925$. Oznacza to że konstrukcja jest stabilna i nie występuje wcześniejszy efekt przeskoku węzła.

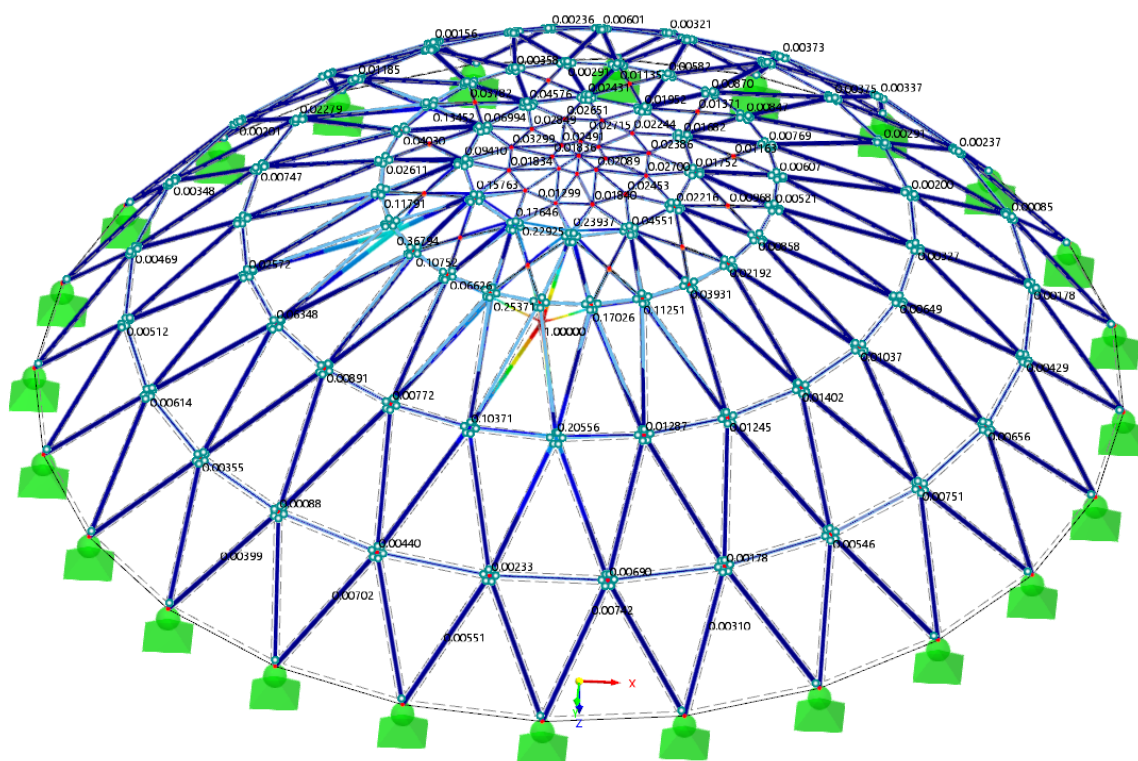
W celu ostatecznego zwymiarowania konstrukcji analizie poddane zostaną naprężenia wewnątrz poszczególnych prętów oraz przede wszystkim ich lokalne odkształcenia od osi dla SGU. Z uwagi na to kryterium zostaną dobrane odpowiednie profile. Zakładamy że jeżeli maksymalny współczynnik obciążenia krytycznego będzie wynosił $\alpha_{cr} > 2$, konstrukcję można uznać za stabilną, co oznacza koniec wymiarowania.

Tabela 14 Optymalizacja prętów, wymiarowanie wg analizy drugiego rzędu z zadanymi imperfekcjami

| Pręt | Obciążenie | Stopień wykorzystania warunku projektowego η [-] | Opis |
|------------------------|------------|---|---|
| SHS 100x4.5 1 - S235 | | | |
| BK-101 | KO63 | 0,669 | Sprawdzenie przekroju Zginanie, siła osiowa i ścinanie wg EN 1993-1-1, 6.2.9.2, 6.2.9.3, 6.2.10 Projektowanie sprężyste |
| | KO134 | 0,939 | Użytkowność Ugięcia w kierunku z |
| SHS 100x4 1 - S235 | | | |
| BK-201 | KO67 | 0,617 | Sprawdzenie przekroju Zginanie, siła osiowa i ścinanie wg EN 1993-1-1, 6.2.9.2, 6.2.9.3, 6.2.10 Projektowanie sprężyste |
| | KO138 | 0,906 | Użytkowność Ugięcia w kierunku z |
| SHS 100x4.5 1 - S235 | | | |
| BK-301 | KO63 | 0,793 | Sprawdzenie przekroju Zginanie, siła osiowa i ścinanie wg EN 1993-1-1, 6.2.9.2, 6.2.9.3, 6.2.10 Projektowanie sprężyste |
| | KO144 | 0,920 | Użytkowność Ugięcia w kierunku z |
| SHS 100x3.6 1 - S235 | | | |
| BK-401 | KO42 | 0,405 | Sprawdzenie przekroju Zginanie, siła osiowa i ścinanie wg EN 1993-1-1, 6.2.9.2, 6.2.9.3, 6.2.10 Projektowanie sprężyste |
| | KO111 | 0,201 | Użytkowność Ugięcia w kierunku z |
| SHS 60x4 1 - S235 | | | |
| BK-402 | KO42 | 0,701 | Sprawdzenie przekroju Zginanie, siła osiowa i ścinanie wg EN 1993-1-1, 6.2.9.2, 6.2.9.3, 6.2.10 Projektowanie sprężyste |
| | KO111 | 0,294 | Użytkowność Ugięcia w kierunku z |
| SHS 40x2.6 1 - S235 | | | |
| BK-501 | KO40 | 0,626 | Sprawdzenie przekroju Zginanie, siła osiowa i ścinanie wg EN 1993-1-1, 6.2.9.2, 6.2.9.3, 6.2.10 Projektowanie sprężyste |
| | KO113 | 0,604 | Użytkowność Ugięcia w kierunku z |
| SHS 40x2.6 1 - S235 | | | |
| BK-601 | KO40 | 0,305 | Sprawdzenie przekroju Zginanie, siła osiowa i ścinanie wg EN 1993-1-1, 6.2.9.2, 6.2.9.3, 6.2.10 Projektowanie sprężyste |
| | KO140 | 0,125 | Użytkowność Ugięcia w kierunku z |
| SHS 50x2.6 1 - S235 | | | |
| BP-101 | KO31 | 0,602 | Sprawdzenie przekroju Zginanie, siła osiowa i ścinanie wg EN 1993-1-1, 6.2.9.2, 6.2.9.3, 6.2.10 Projektowanie sprężyste |
| | KO125 | 0,690 | Użytkowność Ugięcia w kierunku y |
| SHS 50x3.2 1 - S235 | | | |
| BP-201 | KO147 | 0,876 | Sprawdzenie przekroju Zginanie, siła osiowa i ścinanie wg EN 1993-1-1, 6.2.9.2, 6.2.9.3, 6.2.10 Projektowanie sprężyste |
| | KO147 | 0,775 | Użytkowność Ugięcia w kierunku y |
| SHS 50x4 1 - S235 | | | |
| BP-301 | KO73 | 0,941 | Sprawdzenie przekroju Zginanie, siła osiowa i ścinanie wg EN 1993-1-1, 6.2.9.2, 6.2.9.3, 6.2.10 Projektowanie sprężyste |
| | KO144 | 0,328 | Użytkowność Ugięcia w kierunku y |
| SHS 50x3.6 1 - S235 | | | |
| BP-401 | KO40 | 0,443 | Sprawdzenie przekroju Zginanie, siła osiowa i ścinanie wg EN 1993-1-1, 6.2.9.2, 6.2.9.3, 6.2.10 Projektowanie sprężyste |
| | KO111 | 0,183 | Użytkowność Ugięcia w kierunku y |
| SHS 40x2.6 1 - S235 | | | |
| BP-501 | KO40 | 0,691 | Sprawdzenie przekroju Zginanie, siła osiowa i ścinanie wg EN 1993-1-1, 6.2.9.2, 6.2.9.3, 6.2.10 Projektowanie sprężyste |
| | KO144 | 0,109 | Użytkowność Ugięcia w kierunku y |
| SHS 40x2.6 1 - S235 | | | |
| BP-601 | KO1 | 0,363 | Sprawdzenie przekroju Zginanie, siła osiowa i ścinanie wg EN 1993-1-1, 6.2.9.2, 6.2.9.3, 6.2.10 Projektowanie sprężyste |
| | KO95 | 0,103 | Użytkowność Ugięcia w kierunku y |

Analiza stateczności wykazała że minimalny współczynnik obciążenia krytycznego po optymalizacji prętów zgodnie z zakładanymi kryteriami wzrósł nieznacznie do zamierzonej wartości większej od 2,00 :

$$\alpha_{cr} = 2.368$$



Rysunek 92 Analiza wybozeniowa dla kombinacji krytycznej dla konstrukcji

Największy wpływ na stateczność konstrukcji ma zjawisko bifurkacji. Jest to spowodowane tym że pręty zostały zaprojektowane tak by nie dochodziło do uplastycznienia przekroju oraz ich wybożenia w stanie dokrytycznym. Ze względu na założone przegubowe połączenie prętów jedynym możliwym sposobem przeciwdziałania wypadaniu węzłów z płaszczyzny konstrukcji jest przeciwdziałanie nadmiernym odkształceniom osiowym prętów.

Tabela 15 Zestawienie ogólnej masy konstrukcji oraz wartości α_{cr} , w zależności od przeprowadzonej analizy

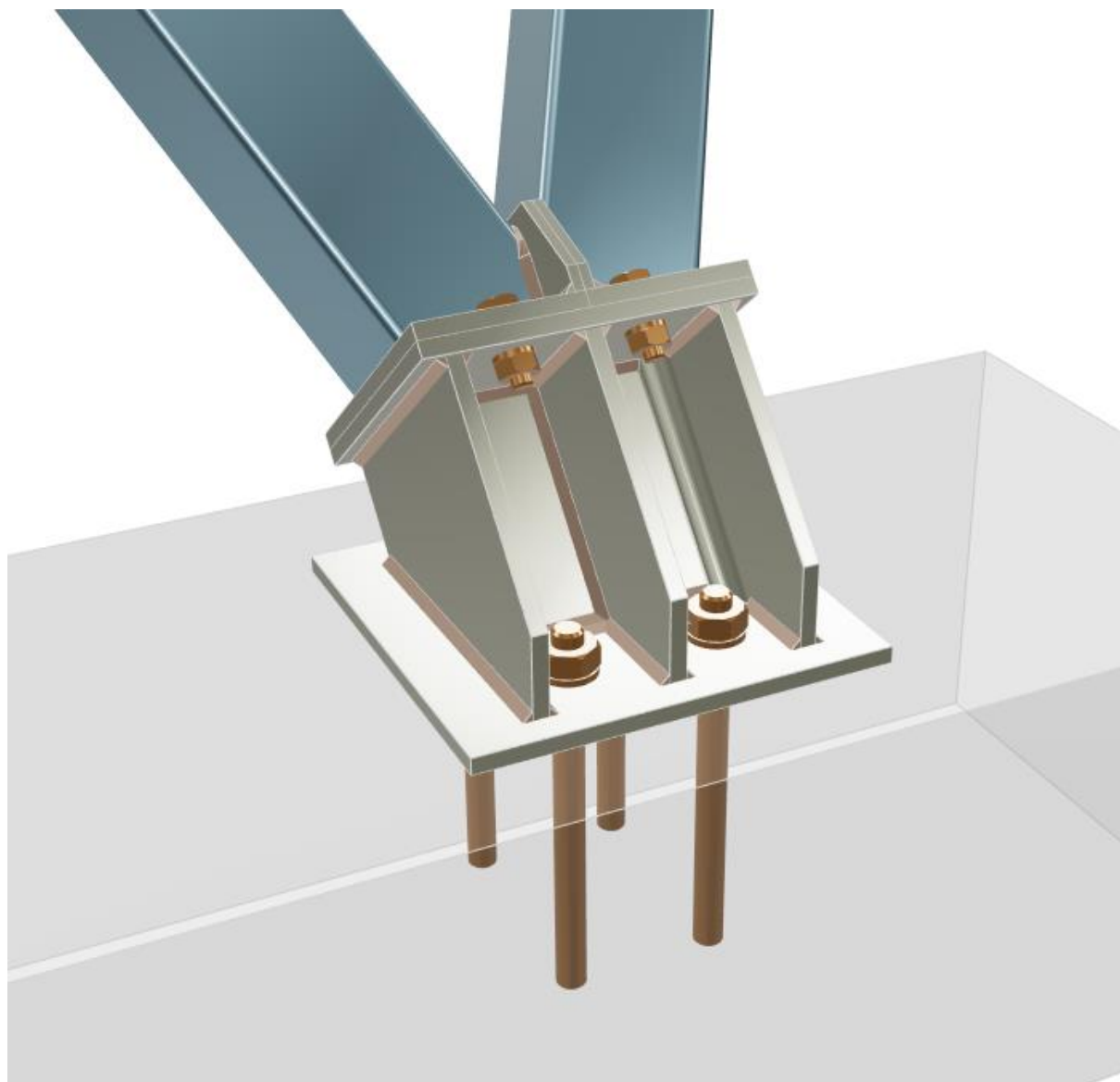
| Rodzaj analizy użytej do optymalizacji | Ciężar konstrukcji stalowej [t] | procentowe zwiększenie stali w stosunku do poprzedniej analizy [%] | Współczynnik krytycznego obciążenia α_{cr} [-] |
|--|---------------------------------|--|---|
| analiza liniowa | 8,622 | - | 0,66 |
| analiza drugiego rzędu | 8,762 | 1,62% | 1,925 |
| analiza drugiego rzędu z imperfekcjami | 10,159 | 15,94% | 2,368 |

Z zestawienia bezpośrednio wynika że zwiększenie dokładności analizy sprawia że masa stali jest większa, ponieważ uwzględnia się większą liczbę efektów zachodzących w konstrukcji. Analiza drugiego rzędu wraz z imperfekcjami przyniosła wzrost masy stali aż o 16%. Reasumując niedokładna analiza konstrukcji może spowodować że występujące efekty zostaną niedoszacowane, a sama konstrukcja pomimo pozornie dobrych wyników analizy stateczności w rzeczywistości może okazać się mechanizmem.

5.4 Wymiarowanie połączeń w węzłach

5.4.1 Połączenie Pł-1 u podstawy konstrukcji między wieńcem betonowym a prętami

Połączenie to z uwagi na skomplikowanie zostanie zaprojektowane z pomocą analizy metodą elementów skończonych dokładnego modelu tego połączenia. W modelu zostaną przeanalizowane naprężenia samych prętów zdefiniowanych jako powłoki, spawów oraz śrub. Z pomocą przychodzi rozszerzenie programu Rfem do modelowania i wymiarowania połączeń. Wstępnie w sposób ręcznych obliczeń zostaną dobrane wymiary blachy podstawy, stykającej się z wieńcem betonowym oraz kotwy mające przenosić ścinanie w tej płaszczyźnie.



Rysunek 93 Poglądowy widok projektowanego połączenia Pł-1

5.4.1.1 Obliczenie nośności płyty podstawy ze względu na docisk do betonu

Połączenie będzie składać się z dospawanego profilu HEA 200 tak by budowa połączenia była prosta w wykonaniu i przenosiła siły z prętów skratowań na blachę podstawy. Zostanie obliczona wstępna nośność łączników blachy, samej blachy oraz betonu pod podstawą, tak by dobrać odpowiedni jej rozmiar.

Wg EN 1993-1-8, 6.2.8.1 (5) w podstawach posiadających strefę docisku do betonu należy policzyć nośność następujących elementów:

- opór tarcia w węźle między blachą podstawy a podłożem
- nośność śrub kotwiących na ścinanie
- nośność otaczającej części betonu

Przyjęte parametry do obliczeń:

$$f_y \stackrel{\text{def}}{=} 235\text{MPa}$$

$$f_{cd} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{30\text{MPa}}{1.4} = 21.4286\text{MPa}$$

f_y – granica plastyczności stali

f_{cd} – granica plastyczności betonu

przyjęte współczynniki obliczeniowe:

$$\gamma_{M0} \stackrel{\text{def}}{=} 1.00$$

$$\gamma_{M2} = 1.25$$

wymiary profilu HEA 200 spawanego do podstawy pod kątem:

$$h_c \stackrel{\text{def}}{=} 190\text{mm}$$

$$b_{c,r} \stackrel{\text{def}}{=} 200\text{mm}$$

$$\alpha_{y,\text{pręta}} \stackrel{\text{def}}{=} 48.8^\circ$$

$$b_c \stackrel{\text{def}}{=} \frac{b_{c,r}}{\sin(\alpha_{y,\text{pręta}})} = 265.8108\text{mm}$$

$$t_c \stackrel{\text{def}}{=} 10\text{mm}$$

h_c – wysokość profilu

$b_{c,r}$ – szerokość profilu

b_c – szerokość profilu ciętego pod kątem

t_c – grubość pasa

$\alpha_{y,\text{pręta}}$ – kąt nachylenia prętów skratowań

wymiary wieńca żelbetowego:

$$d_f \stackrel{\text{def}}{=} 300\text{mm}$$

$$b_f \stackrel{\text{def}}{=} 400\text{mm}$$

d_f – wysokość przekroju wieńca

b_f – szerokość przekroju wieńca

przyjęte wymiary blachy podstawy:

$$h_p \stackrel{\text{def}}{=} 210\text{mm}$$

$$b_p \stackrel{\text{def}}{=} 280\text{mm}$$

h_p – długość płyty

b_p – szerokość płyty

odległości między płytą a krawędzią elementu betonowego:

$$e_h \stackrel{\text{def}}{=} \frac{b_f - b_p}{2} = 60\text{mm}$$

$$e_b \stackrel{\text{def}}{=} 3m$$

odczytane siły działające na podporę:

$$N_{c.Ed} \stackrel{\text{def}}{=} 66.46\text{kN}$$

$$V_{Ed,x} \stackrel{\text{def}}{=} 41.03\text{kN}$$

$$V_{Ed,y} \stackrel{\text{def}}{=} 40.47\text{kN}$$

$$V_{Ed} \stackrel{\text{def}}{=} \sqrt{V_{Ed,x}^2 + V_{Ed,y}^2} = 57.6306\text{kN}$$

Określenie nośności obliczeniowej krańców teowych na docisk do podłoża betonowego wg PN-EN 1993-1-8, 6.2.5:

$$\alpha_{bf} \stackrel{\text{def}}{=} \text{Min} \left(1 + \frac{d_f}{\text{Max}(h_p; b_p)}; 1 + 2 \cdot \frac{e_h}{h_p}; 1 + 2 \cdot \frac{e_b}{b_p}; 3 \right) = 1.5714$$

$$\beta_j \stackrel{\text{def}}{=} \frac{2}{3}$$

$$f_{jd} \stackrel{\text{def}}{=} \beta_j \cdot \alpha_{bf} \cdot f_{cd} = 22.449\text{MPa}$$

$$f_{yp} \stackrel{\text{def}}{=} f_y$$

$$c \stackrel{\text{def}}{=} t_p \cdot \sqrt{\frac{f_{yp}}{3 \cdot f_{jd} \cdot \gamma_{M0}}} = 11.208\text{mm}$$

wymiary dociskanej powierzchni od pasa dwuteownika:

$$l_{\text{eff}} \stackrel{\text{def}}{=} \text{Min}(b_p; b_c + 2 \cdot c) = 280\text{mm}$$

$$b_{\text{eff}} \stackrel{\text{def}}{=} \text{Min} \left(c; \frac{(h_p - h_c)}{2} \right) + t_c + \text{Min} \left(c; \frac{h_c}{2} - t_c \right) = 31.208\text{mm}$$

$$F_{c,bw.Rd} \stackrel{\text{def}}{=} 2 \cdot f_{jd} \cdot b_{\text{eff}} \cdot l_{\text{eff}} = 392.3285\text{kN}$$

$$\eta_{c,bw} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{N_{c.Ed}}{F_{c,bw.Rd}} = 0.1694$$

Warunek został spełniony

Obliczenie nośności połączenia przy ścinaniu wg wg PN-EN 1993-1-8 6.2.2:

obliczwanie ze względu na poślizg wg PN-EN 1993-1-8 6.2.2 (6)

$$c_{f,d} \stackrel{\text{def}}{=} 0.2$$

$$F_{f,Rd} \stackrel{\text{def}}{=} c_{f,d} \cdot N_{c.Ed} = 13.292\text{kN}$$

Obliczanie nośności na ścinanie śruby kotwiącej:

Parametry dobranej śruby:
typ śruby- M16 4.6

$$d \stackrel{\text{def}}{=} 16\text{mm}$$

$$f_{ub} \stackrel{\text{def}}{=} 400\text{MPa}$$

$$f_u \stackrel{\text{def}}{=} f_{ub} \cdot 0.6 = 240\text{MPa}$$

$$\alpha_{bc} \stackrel{\text{def}}{=} 0.44 - 0.0003 \cdot \frac{f_u}{1\text{MPa}} = 0.368$$

$$A \stackrel{\text{def}}{=} \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 = 201.0619\text{mm}^2$$

$$F_{v,Rd} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\alpha_{bc} \cdot f_{ub} \cdot A}{\gamma_{M2}} = 23.6771\text{kN}$$

Obliczeniowa nośność przy obciążaniu siłą poprzeczną i ściskaniu wg PN-EN 1993-1-8 6.2.2 (8):

liczba łączników:

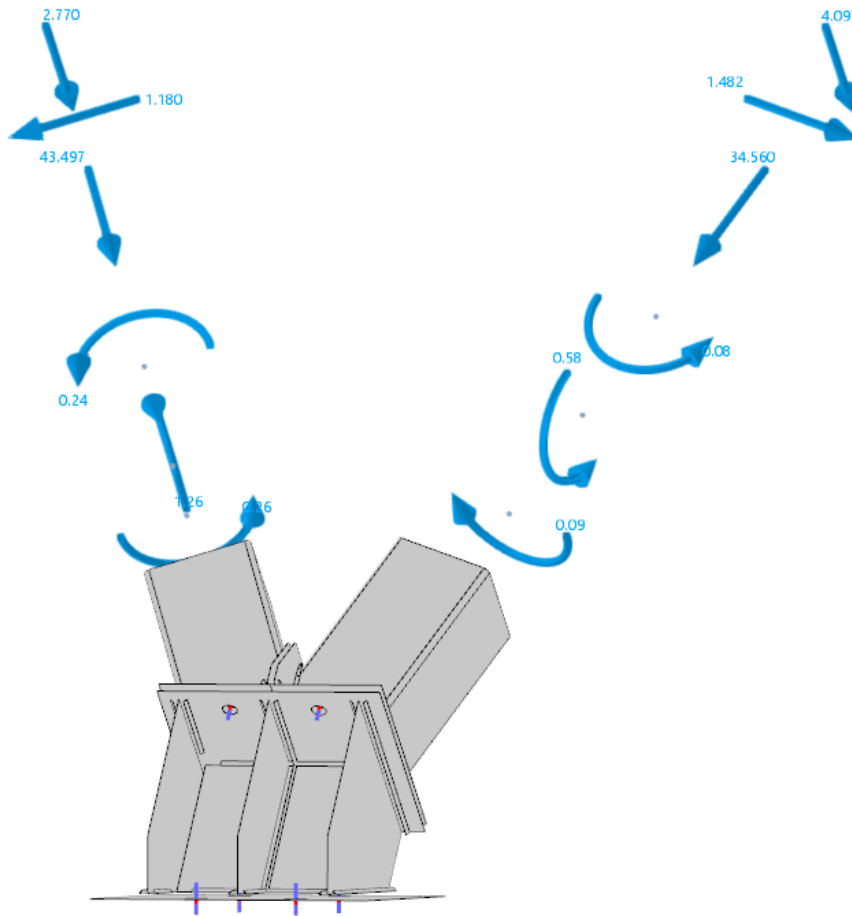
$$n \stackrel{\text{def}}{=} 2$$

Nośność całkowita połączenia na ścinanie:

$$F_{v,Rd,sum} \stackrel{\text{def}}{=} F_{t,Rd} + n \cdot F_{v,Rd} = 60.6461\text{kN}$$

$$\eta_v \stackrel{\text{def}}{=} \frac{V_{Ed}}{F_{v,Rd,sum}} = 0.9503$$

Warunek został spełniony



Rysunek 94 Najbardziej krytyczna kombinacja sił oddziałujących na połączenie Pł-1

Jako połączeń elementów stalowych zastosowano spawy pachwinowe po obwodzie zewnętrznych krawędzi prętów o grubości 4mm. Jako łączniki blach doczołowych użyto śruby M12 8.8 z założeniem że część gwintowa nie jest dociskana do blachy. Grubość blach doczołowych oraz blachy usztywniającej to 10mm.

Obliczenie nośności śrub M12 w połączeniu doczołowym wg PN-EN 1993-1-8, 3.6.1 :

Przyjęte parametry do obliczeń:

$$\gamma_{M2} \stackrel{\text{def}}{=} 1.25$$

Średnica śruby:

$$d \stackrel{\text{def}}{=} 12\text{mm}$$

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

$$f_u \stackrel{\text{def}}{=} f_{ub} \cdot 0.8 = 640\text{MPa}$$

$$A \stackrel{\text{def}}{=} \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 = 113.0973\text{mm}^2$$

$$A_s \stackrel{\text{def}}{=} 84.26\text{mm}^2$$

średnia średnica łba śruby lub nakrętki:

$$d_m \stackrel{\text{def}}{=} 20\text{mm}$$

grubość blachy przy sprawdzaniu przebicia::

$$t_p \stackrel{\text{def}}{=} 6\text{mm}$$

$$A_s \stackrel{\text{def}}{=} 84.26\text{mm}^2$$

Odległość od śruby do krawędzi płyty w kierunku prostopadłym do wynikowej siły docisku:

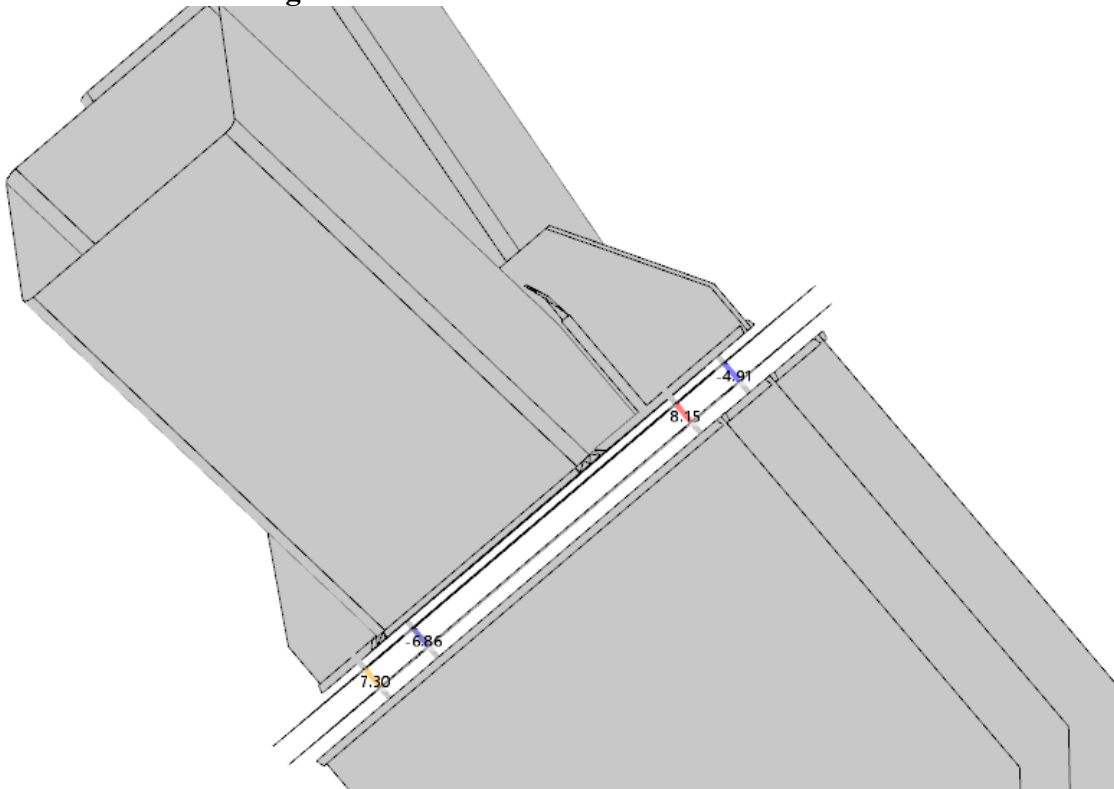
$$e_{2,\text{rig}} \stackrel{\text{def}}{=} 24.3\text{mm}$$

$$e_1 \stackrel{\text{def}}{=} 59.7\text{mm}$$

grubość płyty:

$$t \stackrel{\text{def}}{=} 10\text{mm}$$

Nośność na ścinanie wg EN 1993 1 8 tab. 3.4:



Rysunek 95 96 siły ścinające w połączeniu doczołowym śrubowym Pł-1

$$F_{v,Ed} \stackrel{\text{def}}{=} 8.15\text{kN}$$

$$\alpha_v \stackrel{\text{def}}{=} 0.6$$

$$F_{v,Rd} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A}{\gamma_{M2}} = 43.4294\text{kN}$$

$$\eta_{Fv} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} = 0.1948$$

Warunek został spełniony

Nośność na docisk wg EN 1993 1 8 3.6.1 tab 3.4

$$k_{1,\text{lef}} \stackrel{\text{def}}{=} 2.5$$

Skrajne położenie śruby, po prawej do kierunku siły

$$d_0 \stackrel{\text{def}}{=} d + 1\text{mm} = 0.013\text{m}$$

$$k_{1,\text{rig}} \stackrel{\text{def}}{=} \text{Min} \left(2.8 \cdot \left(\frac{e_{2,\text{rig}}}{d_0} \right) - 1.7; 2.5 \right) = 2.5$$

$$k_1 \stackrel{\text{def}}{=} \text{Min}(k_{1,\text{lef}}; k_{1,\text{rig}}) = 2.5$$

Skrajne położenie śruby, w kierunku siły:

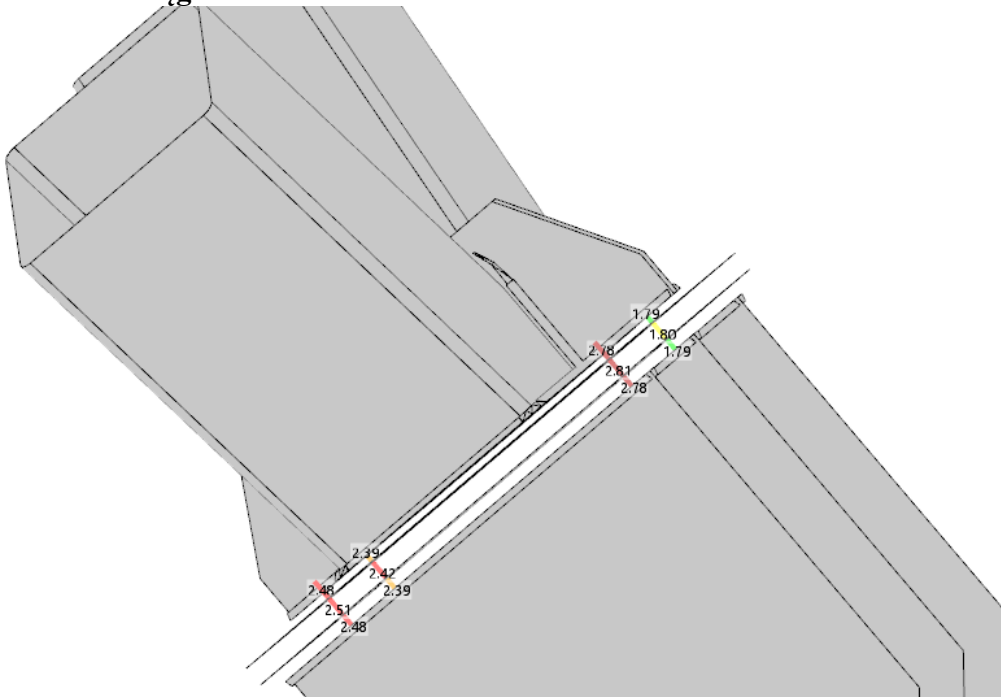
$$\alpha_b \stackrel{\text{def}}{=} \text{Min} \left(\frac{e_1}{3 \cdot d_0}; \frac{f_{\text{ub}}}{f_u}; 1 \right) = 1$$

$$F_{\text{b,Rd}} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{\text{M2}}} = 153.6 \text{ kN}$$

$$\eta_{\text{Fb}} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{F_{\text{v,Ed}}}{F_{\text{b,Rd}}} = 0.0551$$

Warunek został spełniony

Nośność na rozciągane EN1993 1 8 3.6.1 tab. 3.4



Rysunek 97 siły osiowe w połączeniu doczołowym śrubowym Pt-1

$$F_{\text{t,Ed}} \stackrel{\text{def}}{=} 2.81 \text{ kN}$$

$$k_2 \stackrel{\text{def}}{=} 0.9$$

$$F_{\text{t,Rd}} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{k_2 \cdot f_{\text{ub}} \cdot A_s}{\gamma_{\text{M2}}} = 48.5338 \text{ kN}$$

$$\eta_{\text{Ft}} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{F_{\text{t,Ed}}}{F_{\text{t,Rd}}} = 0.0583$$

Warunek został spełniony

Nośność na ścinanie przy przebiciu EN 1993 1 8, 3.6.1, tab. 3.4

$$B_{p,Rd} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{0.6 \cdot \pi \cdot d_m \cdot t_p \cdot f_u}{\gamma_{M2}} = 115.8117 \text{ kN}$$

$$\eta_{Bp} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{F_{t,Ed}}{B_{p,Rd}} = 0.0244$$

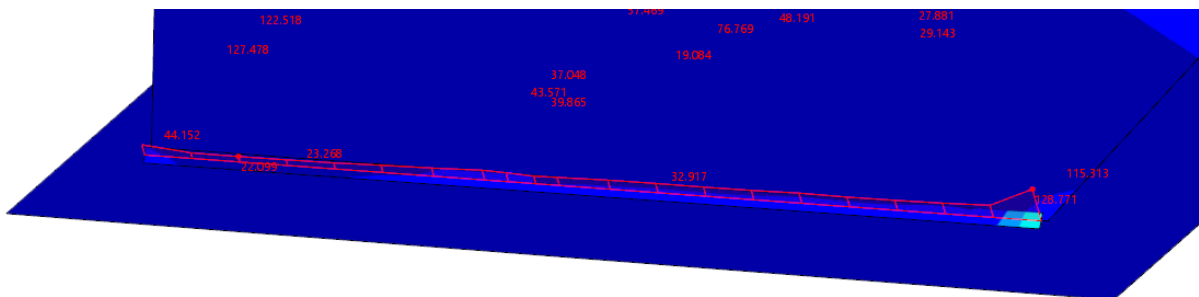
Warunek został spełniony

Nośność na ścinanie z rozciąganiem EN 1993 1 8, 3.6.1, tab. 3.4

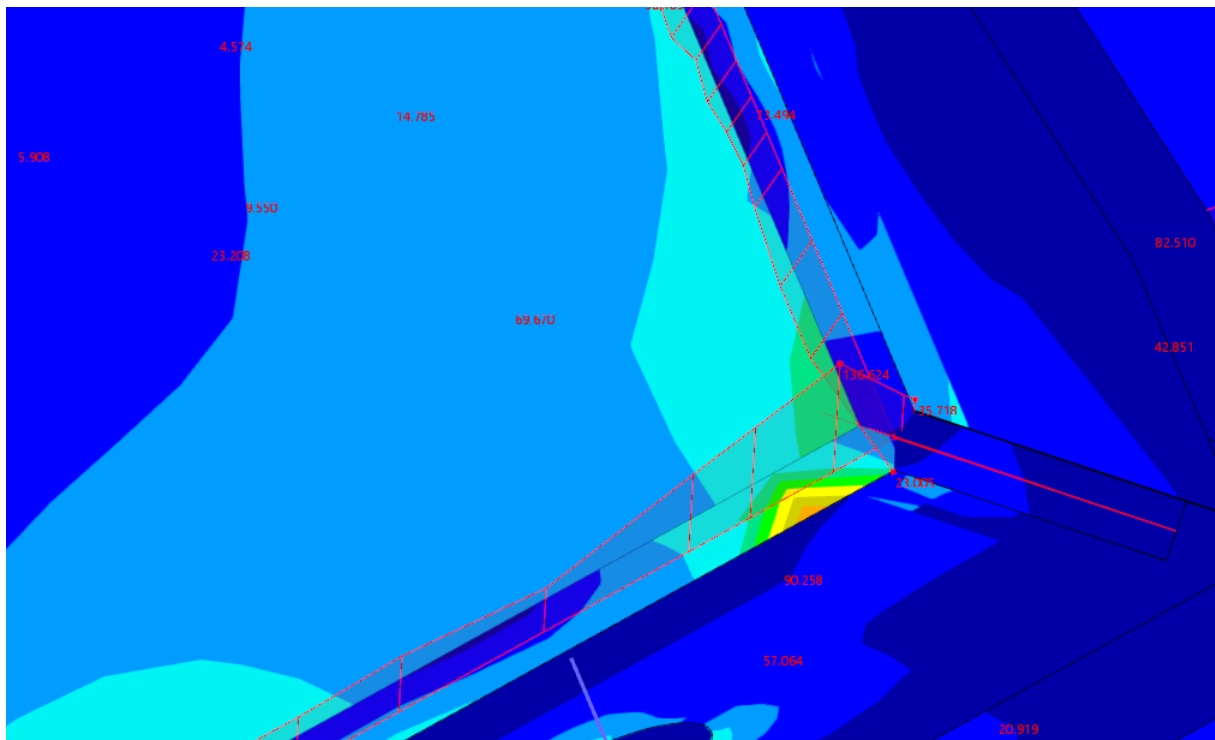
$$\eta_{Ft,Fv} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1.4 \cdot F_{t,Rd}} = 0.2364$$

Warunek został spełniony

Naprężenia w spawach :

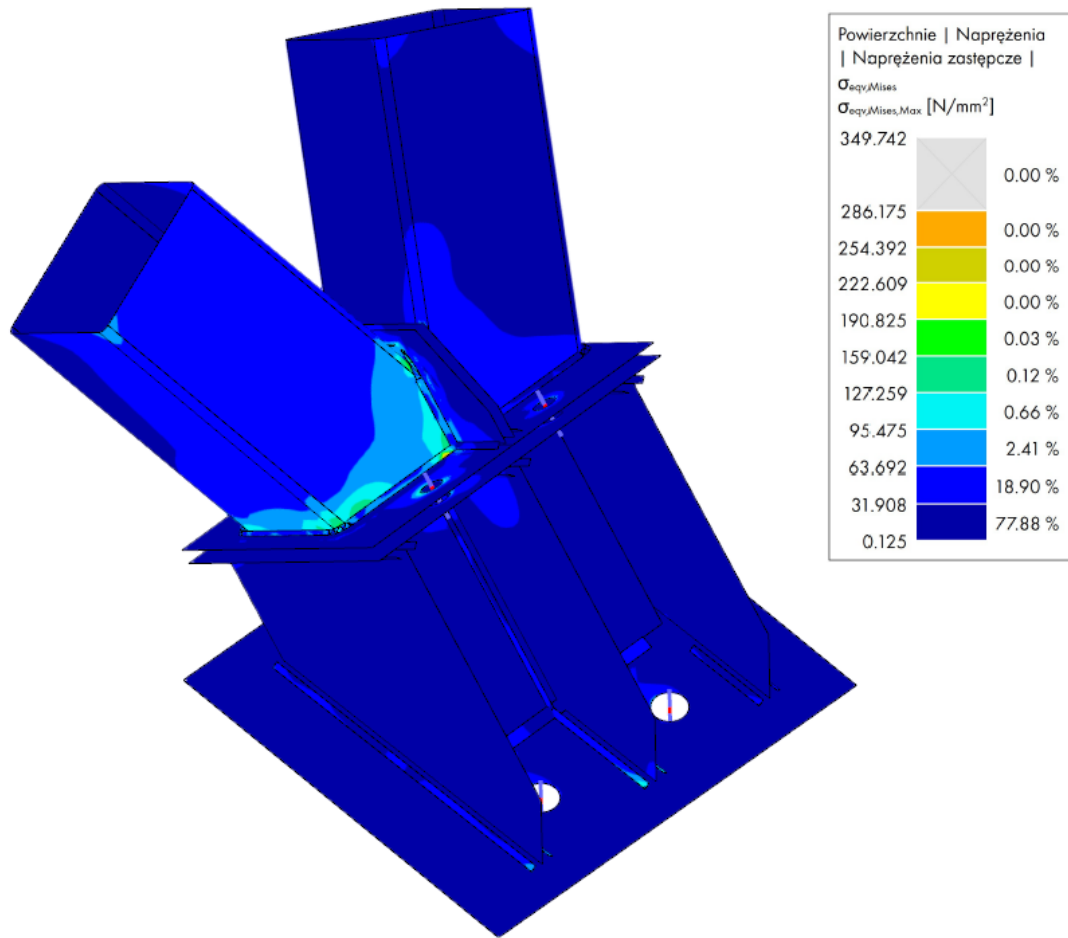


Rysunek 98 Maksymalne naprężenia styczne dla spawu pachwinowego podstawy połączenia Pł-1 [MPa]

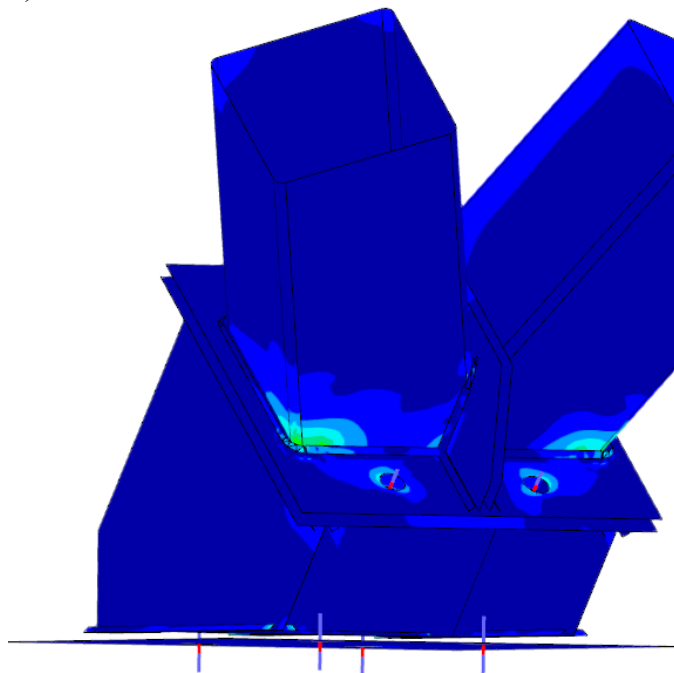


Rysunek 99 Krytyczne naprężenia połączenia spawami pachwinowymi obwodowymi gr. 4mm pręta BK-101 z blachą doczołową połączenia Pł-1 [MPa]

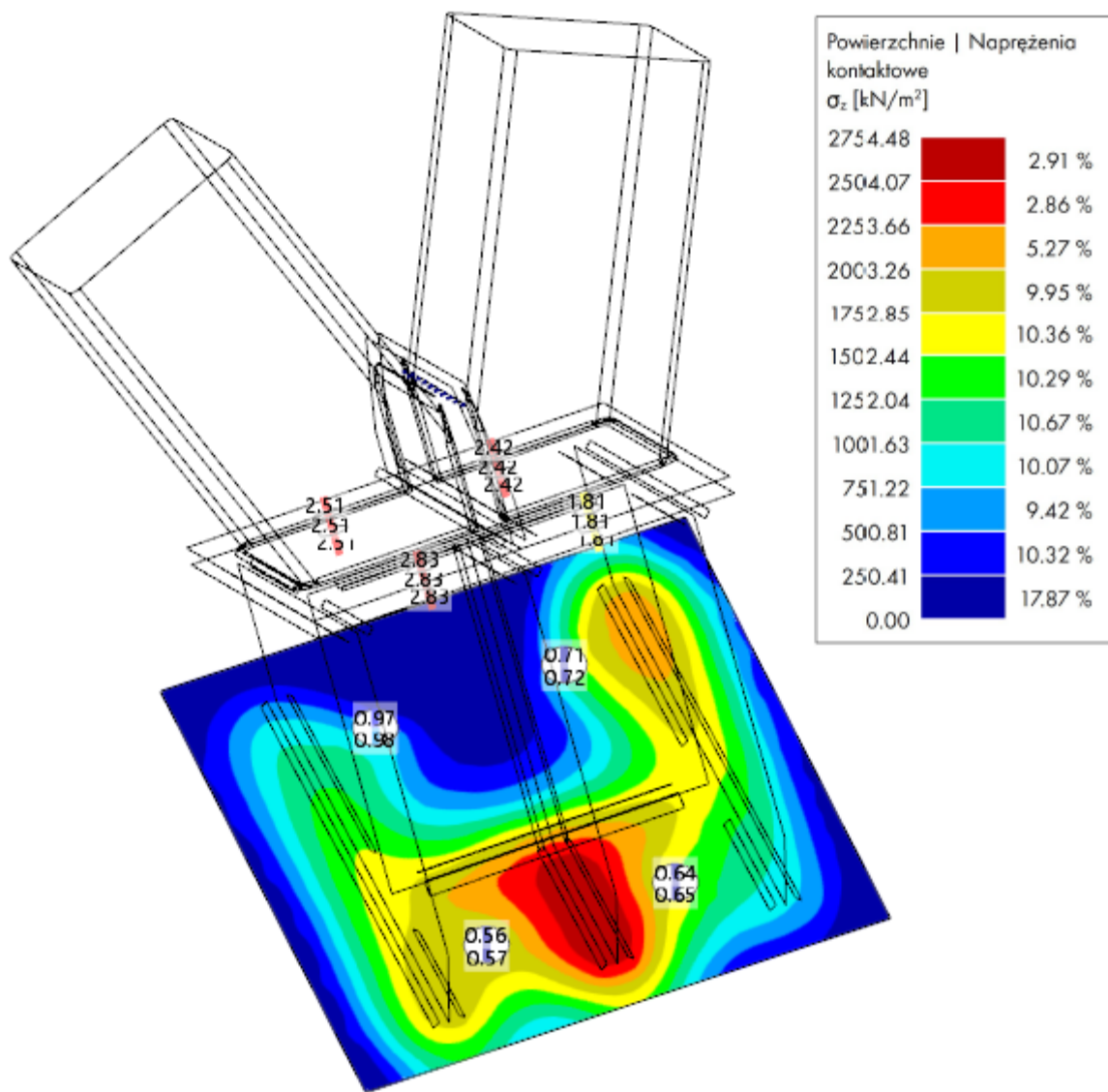
a)



b)



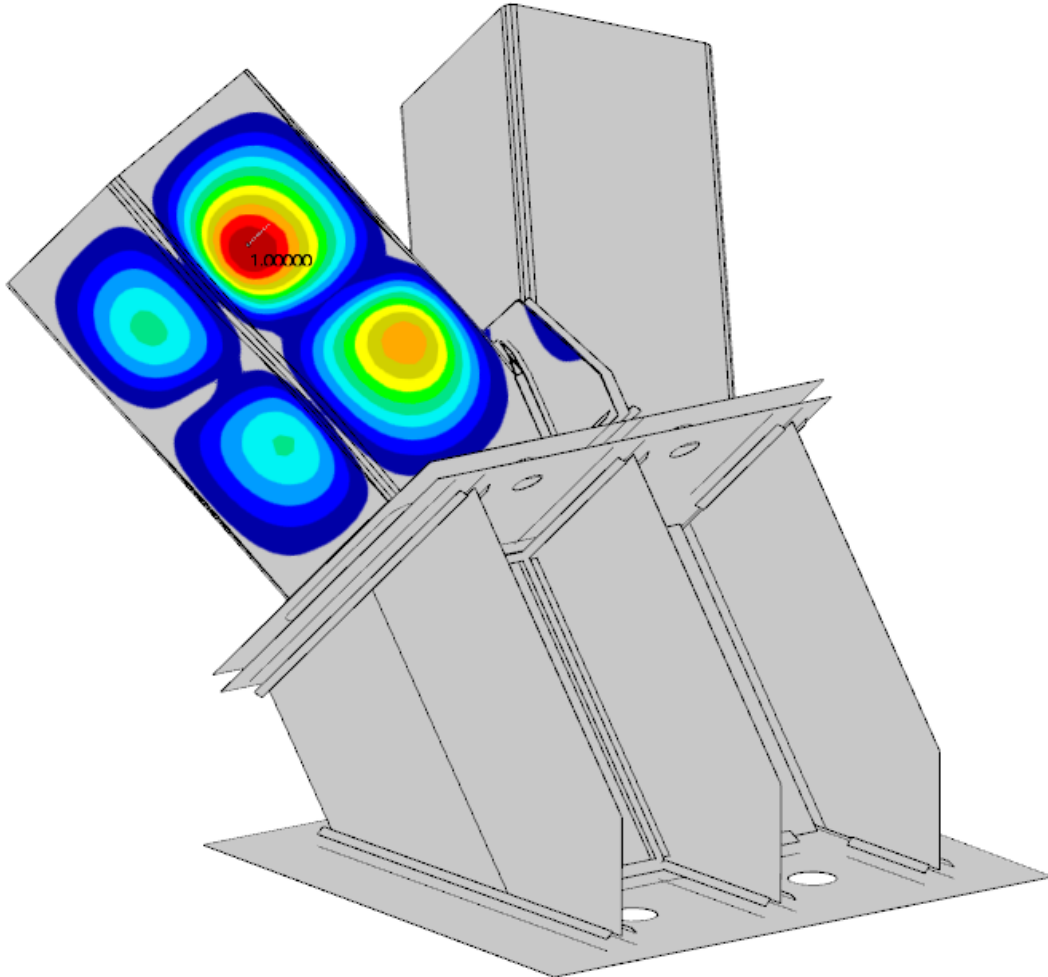
Rysunek 100 Naprężenia stali zaprojektowanego połączenia Pt-1: a)widok z tyłu; b)widok z przodu



Rysunek 101 Naprężenie kontaktowe połączenia Pt-1 [kN/m²]

Analiza wyboczeniowa połączenia:

Najniższy współczynnik obciążenia krytycznego przypadł dla kombinacji KO 72. Połączenie jest na tyle sztywne że przegub plastyczny realizuje się w pręcie. Zostaną sprawdzone konkretne parametry sztywności w zależności od osi działania połączenia. W celu optymalizacji połączenia można zrezygnować z dodatkowej blachy usztywniającej przyspawanej na środku dwuteownika oraz redukcję grubości blachy doczołowej, która w tej chwili wynosi 10mm.



Rysunek 102 Postać wyboczeniowa połączenia Pt-1

$$\eta_{st} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{f_{lim}}{f} = \frac{15.00}{55.42} = 0.271$$

Warunek został spełniony

f_{lim} – Współczynnik obciążenia granicznego

f – Współczynnik obciążenia krytycznego

Analiza sztywności połączenia:

Analiza sztywności wykazała następujące parametry sztywności połączenia w zależności od wektora oddziaływania:

$$S_{N+} = 85.4 \left[\frac{MN}{m} \right]$$

$$S_{N-} = 498.2 \left[\frac{MN}{m} \right]$$

$$S_{My+} = 0.6 \left[\frac{MNm}{rad} \right]$$

$$S_{My-} = 0.6 \left[\frac{MNm}{rad} \right]$$

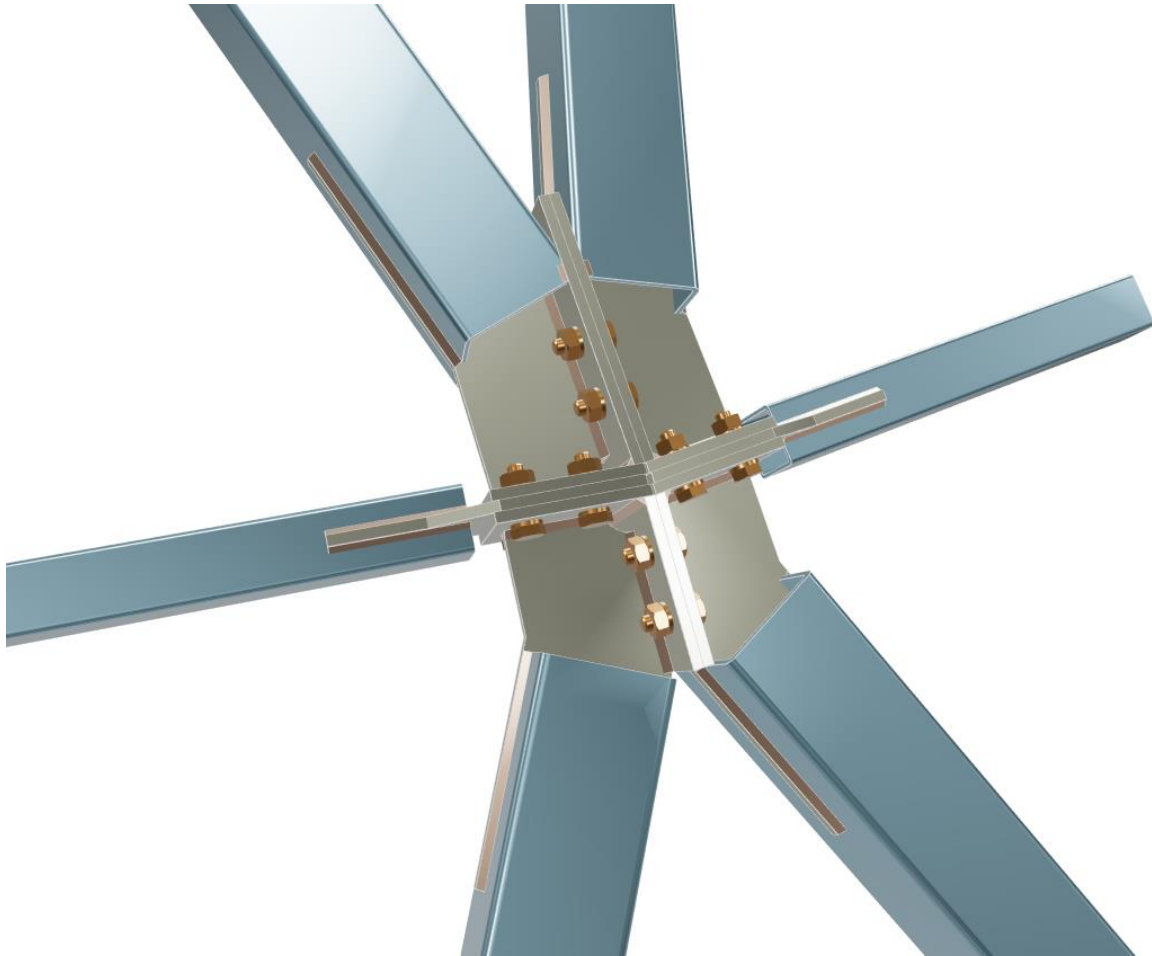
$$S_{Mz+} = 0.1 \left[\frac{MNm}{rad} \right]$$

$$S_{Mz-} = 0.2 \left[\frac{MNm}{rad} \right]$$

Obliczone sztywności sprężyste można użyć do ostatecznej analizy stateczności konstrukcji w celu jej optymalizacji. Wstępna zakładana sztywność jeśli chodzi o sztywność obrotową była zerowa. Oznacza to że rozkład energii w postaci naprężeń po zmianie sztywności podpór zrównoważy się, to znaczy przede wszystkim moment gnący zostanie zredukowany i wystąpi również u podstawy pręta co pozwoli na redukcję naprężeń na środku pręta gdzie pierwotnie moment gnący był największy.

5.4.2 Połączenie Pł-2 w węźle łączącym pręty skratowania KR-1 ze skratowaniem KR-2 oraz prętami BP-101 pierścienia P-1

Połączenie to z uwagi na skomplikowanie zostanie zaprojektowane z pomocą analizy metodą elementów skończonych dokładnego modelu tego połączenia. Zostaną przeanalizowane naprężenia samych prętów zdefiniowanych jako powłoki, spawów oraz śrub, jak w powyższym przypadku. Wstępnie za pomocą ręcznych obliczeń zostaną dobrane wymiary blachy węzłowej oraz spawów mocujących pręt do blachy. Wstępnemu wymiarowaniu podlegać będzie również połączenie cierne dla prętów pierścienia P-1 z uwagi na liczbę potrzebnych śrub do sprężenia.



Rysunek 103 Poglądowy widok projektowanego połączenia węzłowego Pt-2

Określenie nośności obliczeniowej spoin pachwinowych dla połączenia pręta BK-101 do blachy węzłowej:

$$F_{Ed} \stackrel{\text{def}}{=} 42.05 \text{ kN}$$

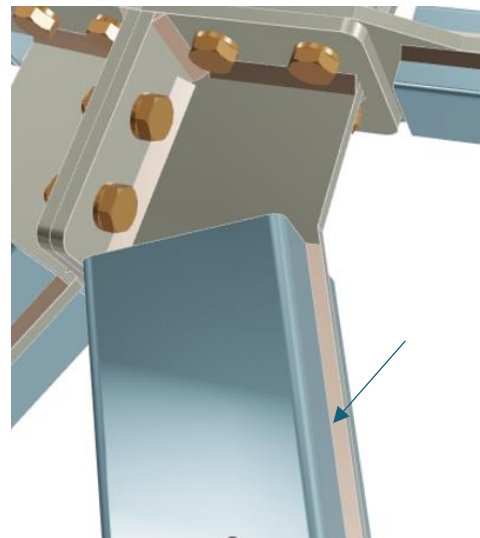
$$a_{sp} \stackrel{\text{def}}{=} 3 \text{ mm}$$

$$l_{sp} \stackrel{\text{def}}{=} 50 \text{ mm}$$

$$n_{sp} \stackrel{\text{def}}{=} 4$$

$$\tau_{II} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{F_{Ed}}{n_{sp} \cdot a_{sp} \cdot l_{sp}} = 70.0833 \text{ MPa}$$

$$\beta_{Lw} \stackrel{\text{def}}{=} \begin{cases} 1 & \text{if } l_{sp} < 150 \cdot a_{sp} \\ 1.2 - \frac{0.2 \cdot l_{sp}}{150 \cdot a_{sp}} & \text{if } l_{sp} > 150 \cdot a_{sp} \\ 1.1 & \text{if } l_{sp} > 1.7 \text{ m} \\ \text{"BŁĄD"} & \text{otherwise} \\ = 1.000 & \end{cases}$$



Rysunek 104 Spaw mocujący płytę węzłową z prętem BK-101 poddany wstępnemu obliczeniu

$$\sigma_{sp} \stackrel{\text{def}}{=} \sqrt{3} \cdot \tau_{II} = 121.3879 \text{MPa}$$

$$f_y \stackrel{\text{def}}{=} 235 \text{MPa}$$

$$f_u \stackrel{\text{def}}{=} 360 \text{MPa}$$

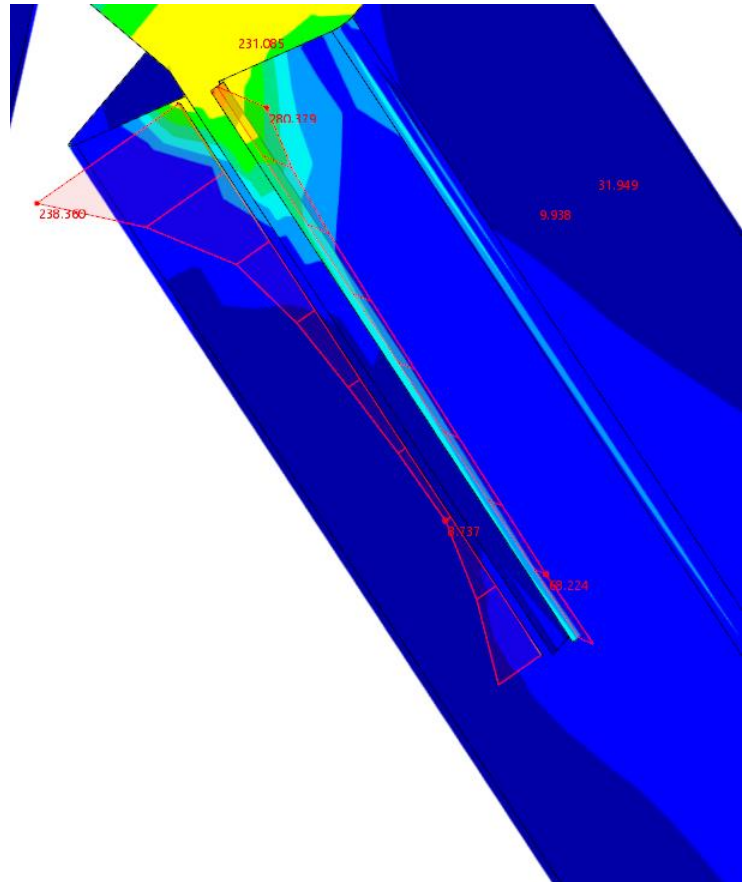
$$\gamma_{M0} \stackrel{\text{def}}{=} 1.0$$

$$\gamma_{M2} \stackrel{\text{def}}{=} 1.25$$

$$\sigma_{sp,max} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{f_u}{\beta_{Lw} \cdot \gamma_{M2}} = 288 \text{MPa}$$

$$\frac{\sigma_{sp}}{\sigma_{sp,max}} = 0.4215 < 1.00$$

Warunek został spełniony



Rysunek 105 Naprężenia styczne w połączeniu spawanym pręta BK-01 do blachy węzłowej w zamodelowanym połączeniu Pł-2 [MPa]

Analiza przekroju blachy węzłowej:

$$H_g \stackrel{\text{def}}{=} 110 \text{mm}$$

$$t_g \stackrel{\text{def}}{=} 8 \text{mm}$$

$$A_{g1} \stackrel{\text{def}}{=} H_g \cdot t_g = 880 \text{mm}^2$$

H_g – szerokość blachy

t_g – grubość blachy

Nośność na ścinanie:

$$V_{g1,pl.Rd} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{A_{g1} \cdot f_y}{\gamma_{M0} \cdot \sqrt{3}} = 119.396 \text{kN}$$

$$V_{Ed} \stackrel{\text{def}}{=} 4.06 \text{kN}$$

$$\eta_V \stackrel{\text{def}}{=} \frac{V_{Ed}}{V_{g1,pl.Rd}} = 0,034$$

Warunek został spełniony

Nośność ze względu na siłę osiową:

$$N_{g1.pl.Rd} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{A_{g1} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 206.8 \text{ kN}$$

$$N_{Ed} \stackrel{\text{def}}{=} 42.05 \text{ kN}$$

$$\eta_N \stackrel{\text{def}}{=} \frac{N_{Ed}}{N_{g1.pl.Rd}} = 0.203$$

Warunek został spełniony

Określenie nośności obliczeniowej spoin pachwinowych dla połączenia pręta BP-101 do blachy węzłowej:

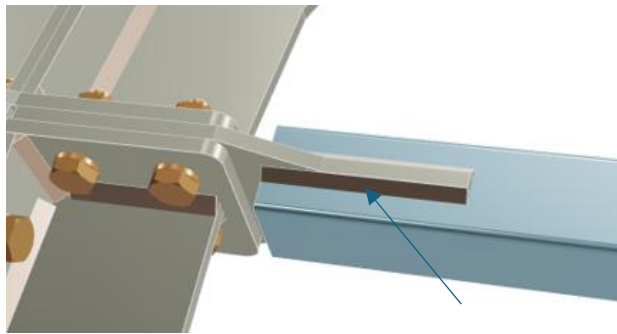
$$F_{Ed} \stackrel{\text{def}}{=} 40.80 \text{ kN}$$

$$a_{sp} \stackrel{\text{def}}{=} 3 \text{ mm}$$

$$l_{sp} \stackrel{\text{def}}{=} 50 \text{ mm}$$

$$n_{sp} \stackrel{\text{def}}{=} 4$$

$$\tau_{II} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{F_{Ed}}{n_{sp} \cdot a_{sp} \cdot l_{sp}} = 68 \text{ MPa}$$



Rysunek 106 Spaw mocujący płytę węzłową z prętem BP-101 poddany wstępnemu obliczeniu

$$\beta_{LW} \stackrel{\text{def}}{=} \begin{cases} 1 & \text{if } l_{sp} < 150 \cdot a_{sp} \\ 1.2 - \frac{0.2 \cdot l_{sp}}{150 \cdot a_{sp}} & \text{if } l_{sp} > 150 \cdot a_{sp} = 1.000 \\ 1.1 & \text{if } l_{sp} > 1.7m \\ \text{"BŁĄD"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\sigma_{sp} \stackrel{\text{def}}{=} \sqrt{3} \cdot \tau_{II} = 117.7795 \text{ MPa}$$

$$f_y \stackrel{\text{def}}{=} 235 \text{ MPa}$$

$$f_u \stackrel{\text{def}}{=} 360 \text{ MPa}$$

$$\gamma_{M0} \stackrel{\text{def}}{=} 1.0$$

$$\gamma_{M2} \stackrel{\text{def}}{=} 1.25$$

$$\sigma_{sp.max} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{f_u}{\beta_{LW} \cdot \gamma_{M2}} = 288 \text{ MPa}$$

$$\frac{\sigma_{sp}}{\sigma_{sp.max}} = 0.409$$

Warunek został spełniony

Analiza przekroju blachy węzłowej:

$$H_g \stackrel{\text{def}}{=} 60\text{mm}$$

$$t_g \stackrel{\text{def}}{=} 8\text{mm}$$

$$A_{g1} \stackrel{\text{def}}{=} H_g \cdot t_g = 480\text{mm}^2$$

H_g – szerokość blachy

t_g – grubość blachy

Nośność ze względu na siłę osiową:

$$N_{g1.pl.Rd} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{A_{g1} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 112,8\text{kN}$$

$$N_{Ed} \stackrel{\text{def}}{=} 40,80\text{kN}$$

$$\eta_N \stackrel{\text{def}}{=} \frac{N_{Ed}}{N_{g1.pl.Rd}} = 0.36$$

Warunek został spełniony

Określenie nośności obliczeniowej połączenia ciernego łączącego elementy prętowe w węzle wg PN-EN 1993-1-8, 3.9:

$$\gamma_{M3} \stackrel{\text{def}}{=} 1.25$$

$k_s \stackrel{\text{def}}{=} 1.0$ - śruby w otworach normalnych

liczba styków ciernych:

$$n \stackrel{\text{def}}{=} 2$$

współczynnik tarcia wg tab. 3.7 :

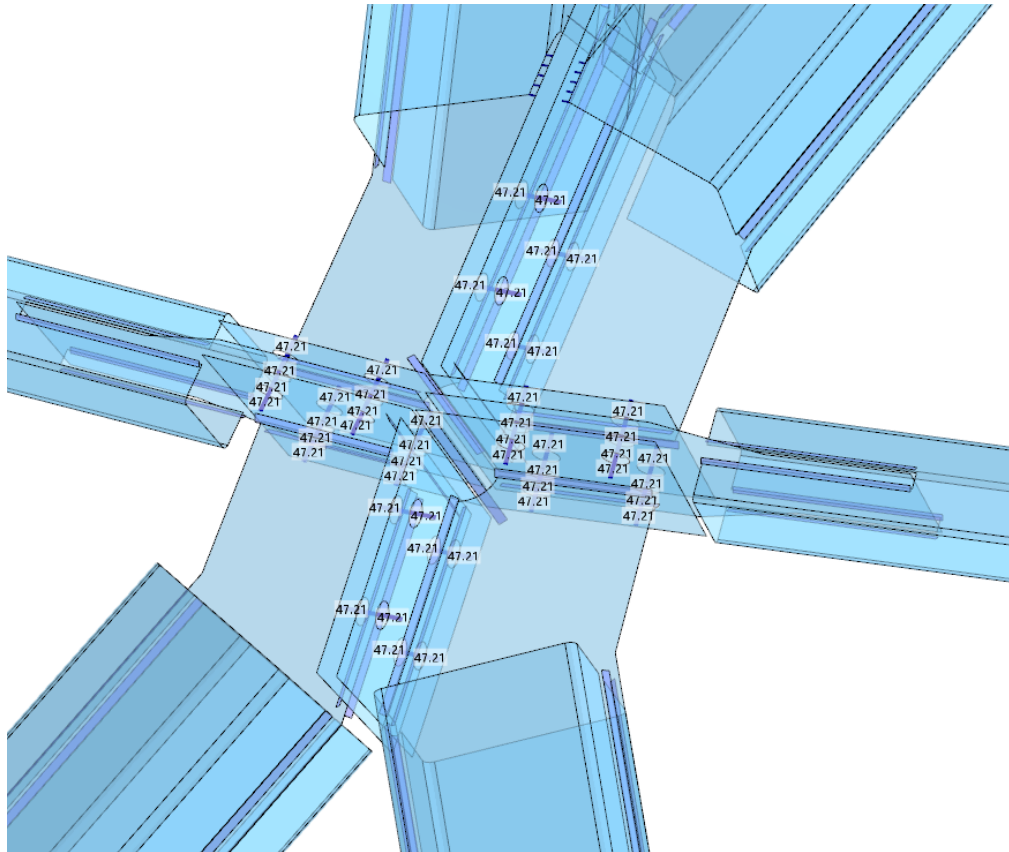
Klasa A - powierzchnia piaskowana bez wżerów z usunięciem luźnej rdzy

$$\mu \stackrel{\text{def}}{=} 0.5$$

Zgodnie z Tablicą 19 EN-1090-2 przyjęto dla śruby M12 8.8 następującą siłę sprężającą:

$$n_s = 4$$

$$F_{p.c} \stackrel{\text{def}}{=} 47\text{kN} \cdot n_s = 188\text{kN}$$



Rysunek 107 Sprężenie wstępne śrub w połączeniu ciernym Pt-2 zamodelowane w Rfem [kN]

Nośność połączenia ciernego:

$$F_{s.Rd} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{k_s \cdot n \cdot \mu}{\gamma_{M3}} \cdot F_{p.C} = 150,4 \text{ kN}$$

Wartość momentu dokręcającego śruby:

$k_m \stackrel{\text{def}}{=} 0.15$ - Śruby klasy K0 z gwintem smarowanym pastą molibdenową MoS2

$d \stackrel{\text{def}}{=} 12 \text{ mm}$

$$M_o \stackrel{\text{def}}{=} k_m \cdot d \cdot F_{p.C} = \mathbf{84.6 \text{ Nm}}$$

Nośność na ścinanie śrub wg EN 1993-1-8 tab. 3.4

$F_{v.Ed} \stackrel{\text{def}}{=} 40.80 \text{ kN}$

$$A \stackrel{\text{def}}{=} \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 = 113.0973 \text{ mm}^2$$

$\alpha_v \stackrel{\text{def}}{=} 0.6$

$n_{\text{śrub}} \stackrel{\text{def}}{=} 4$

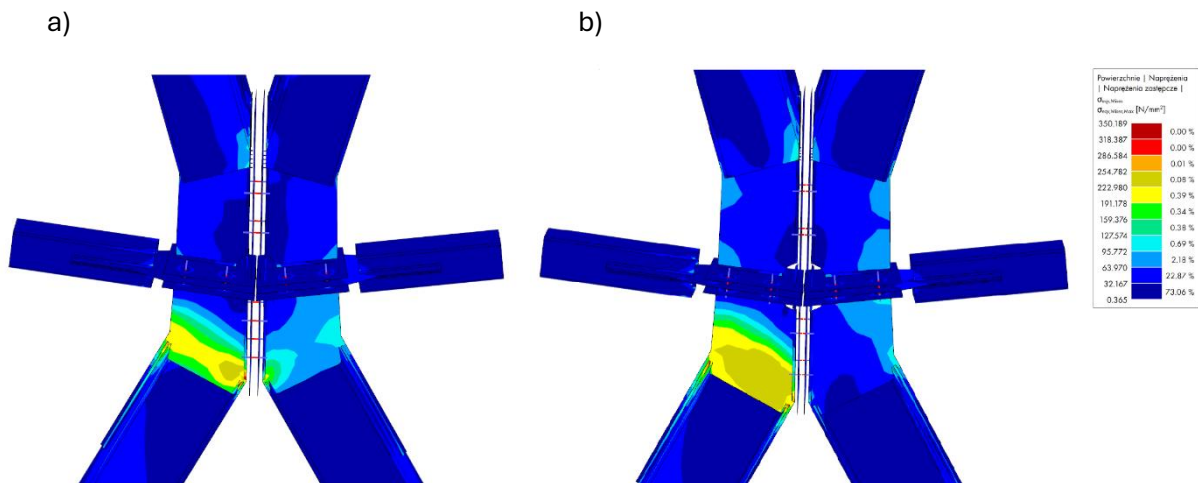
$$F_{v.Rd} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{n_{\text{śrub}} \cdot \alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A \cdot 2}{\gamma_{M2}} = 347,436 \text{ kN}$$

$$\eta_{Fv} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{F_{Ed}}{F_{v.Rd}} = 0.1174$$

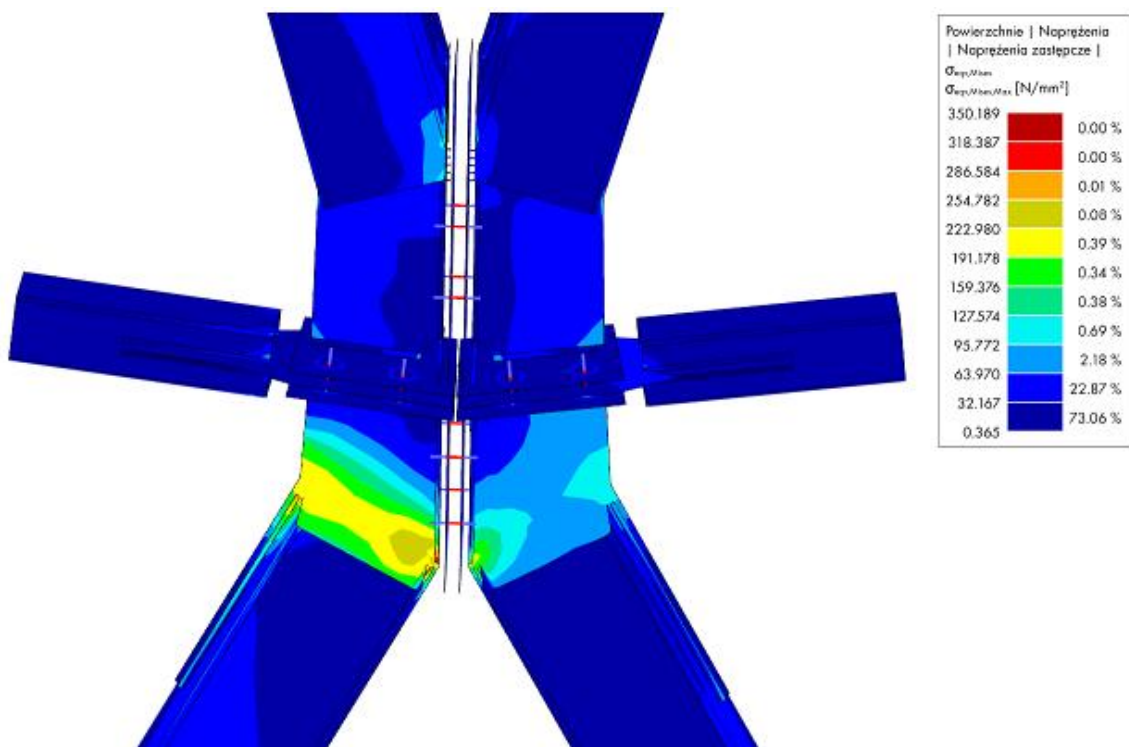
Warunek został spełniony

Dokładniejsza analiza MES pozwoliła na analizę wewnętrznych naprężeń w poszczególnych elementach tak by stwierdzić czy następuje np. zerwanie blokowe w przypadku blach z otworami pod śruby, pęknięcie spawów, uplastycznienie blach węzłowych, niedostateczna siła cierna powodująca przeskok blachy i obciążającej śruby ścinaniem.

Przeanalizowano zachowanie się połączenia w zależności od grubości blach węzłowych odpowiednio dla a) blacha gr. 10mm oraz b) blacha gr. 8mm. W przypadku blachy o grubości 8mm węzeł zachowuje co prawda sztywność lecz następuje uplastycznienie przekroju ze względu na przekroczenie granicy plastyczności. Zapobiegając nadmiernemu zmęczeniu elementów blach węzłowych przyjmujemy blachę o grubości 10mm.



Rysunek 108 Naprężenia wewnątrz połączenia Pt-2 w zależności od grubości blachy węzłowej: a) 8mm; b) 10mm [MPa]



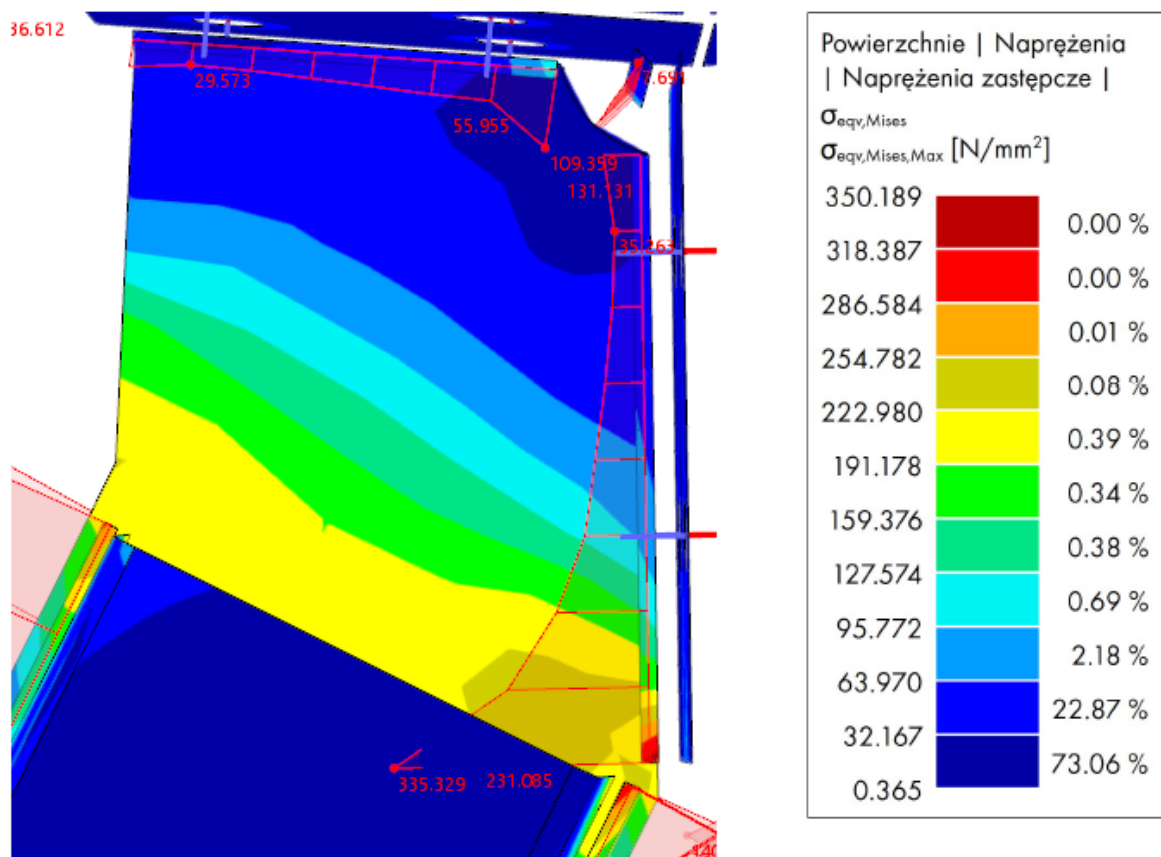
Rysunek 109 Naprężenia wewnątrz połączenia Pt-2 dla grubości blach węzłowych 10mm [MPa]

Analiza naprężeń wewnątrz spawów o grubości 4mm wykazała że nie przekraczają one granicznej wytrzymałości stali na rozciąganie $f_u \stackrel{\text{def}}{=} 360\text{MPa}$.

Wykorzystanie spawów ze względu na nośność stali:

$$\sigma_{sp} = 335.329\text{MPa}$$

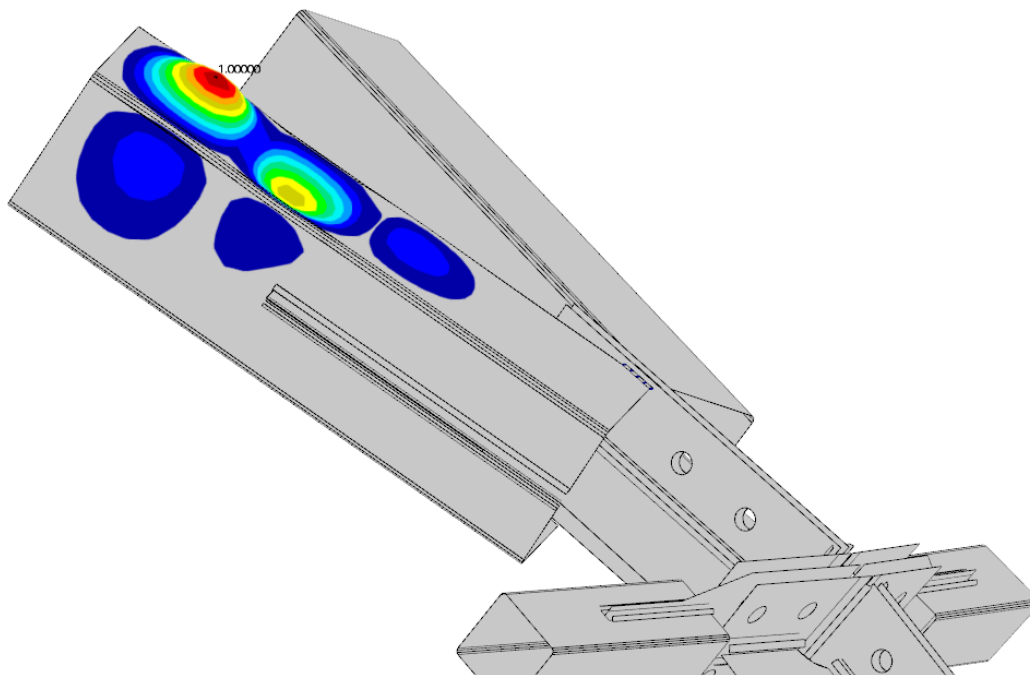
$$\frac{\sigma_{sp}}{f_u} = 0.931$$



Rysunek 110 Wykresy naprężeń stycznych dla spawów pachwinowych blachy węzłowej [MPa]

Analiza wyboczeniowa połączenia:

Najniższy współczynnik obciążenia krytycznego przypadł dla kombinacji KO 74. Połączenie przegubowe realizuje się w blasze węzłowej z uwagi na niski moment bezwładności względem osi, na którą działa moment gnący od obciążenia zadaszona. Najsłabszym elementem w połączeniu okazuje się jednak pręt BK-201, który przy analizie wyboczeniowej doznał deformacji:



Rysunek 111 Deformacja z uwagi na analizę wyboczeniową połączenia węzłowego Pt-2

$$\eta_{st} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{f_{\text{lim}}}{f} = \frac{15.00}{42.11} = 0.356$$

Warunek został spełniony

f_{lim} – Współczynnik obciążenia granicznego

f – Współczynnik obciążenia krytycznego

Analiza sztywności połączenia:

Analiza sztywności pręta BK-101, wykazała następujące parametry sztywności połączenia w zależności od wektora oddziaływania:

$$S_{N+} = 846.5 \left[\frac{MN}{m} \right]$$

$$S_{N-} = 1039.5 \left[\frac{MN}{m} \right]$$

$$S_{My+} = 0.0 \left[\frac{MNm}{rad} \right]$$

$$S_{My-} = 0.0 \left[\frac{MNm}{rad} \right]$$

$$S_{Mz+} = 1.6 \left[\frac{MNm}{rad} \right]$$

$$S_{Mz-} = 2.8 \left[\frac{MNm}{rad} \right]$$

Analiza sztywności pręta BP-101, wykazała następujące parametry sztywności połączenia w zależności od wektora oddziaływania:

$$S_{N+} = 377.2 \left[\frac{MN}{m} \right]$$

$$S_{N-} = 1522.9 \left[\frac{MN}{m} \right]$$

$$S_{My+} = 0.0 \left[\frac{MNm}{rad} \right]$$

$$S_{My-} = 0.0 \left[\frac{MNm}{rad} \right]$$

$$S_{Mz+} = 0.4 \left[\frac{MNm}{rad} \right]$$

$$S_{Mz-} = 0.5 \left[\frac{MNm}{rad} \right]$$

Obliczone sztywności sprężyste można użyć do ostatecznej analizy stateczności konstrukcji w celu jej optymalizacji.

5.5 Wnioski

W celu dokładniejszej optymalizacji konstrukcji należy dobrać odpowiednie połączenia w węzłach, które z uwagi na swoją budowę charakteryzują się pewną sztywnością w osiach obrotu prętów. Spowoduje to znaczną stabilizację konstrukcji. Należy jednak zwrócić uwagę na konsekwencję wzrostu wartości momentów gnących w prętach.

Tak szczegółowa analiza stateczności z uwzględnieniem efektów drugiego rzędu oraz imperfekcji powoduje że macierz układu staje się rozbudowana oraz powstaje tylekroć więcej przypadków kombinacji ile jest założonych imperfekcji. Powoduje to że analiza staje się czasochłonna i wymaga dużych mocy obliczeniowych. Należy zatem działać efektywnie zgodnie z inżynierskim zamysłem, tak by sprawdzać daną sytuację obliczeniową dla przypadków decyzyjnych. Takie podejście znacząco przyspiesza pracę.

6 Załączniki

- Rys. A-01: Rysunek zestawczo-montażowy;
- Rys. A-02: Rysunek przekroju A-A (architektoniczny);
- Rys. W-01: Rysunek warsztatowy elementu BK-101;
- Rys. W-02: Rysunek warsztatowy elementu BP-101;
- Rys. W-03: Rysunek warsztatowy elementu P-1.

Zał. 1.

Załącznik dotyczący sposobu optymalizacji konstrukcji z użyciem parametryzacji.

Kombinacja obciążeń użyta do równomiernego obciążenia kopuły w celu otrzymania wyników wstępnej optymalizacji:

- Obciążenie stałe:

$$\gamma_G \stackrel{\text{def}}{=} 1.35$$

$$G_k \stackrel{\text{def}}{=} 0.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

- Obciążenie wiodące użytkowe dachu kat. H:

$$\gamma_{Q,1} \stackrel{\text{def}}{=} 1.5$$

$$Q_{k,1} \stackrel{\text{def}}{=} 0.4 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

- Obciążenie śniegiem $H < 1000 \text{m.n.p.m.}$

$$\psi_0 \stackrel{\text{def}}{=} 0.5$$

$$Q_{k,2} \stackrel{\text{def}}{=} 0.7 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

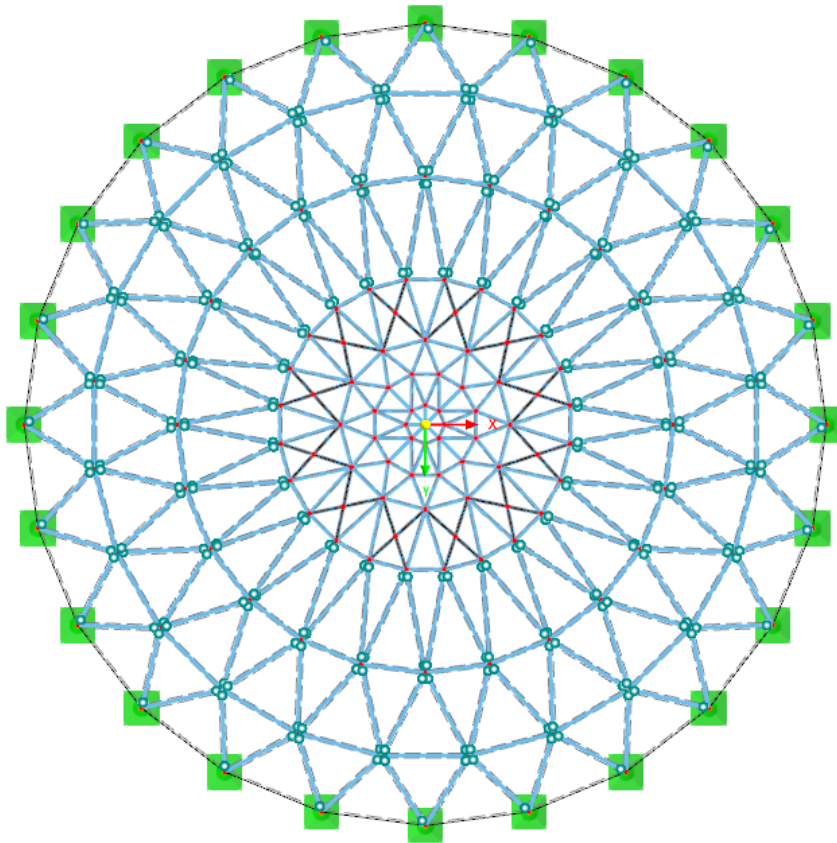
- Kombinacja:

$$E_d \stackrel{\text{def}}{=} G_k \cdot \gamma_G + Q_{k,1} \cdot \gamma_{Q,1} + Q_{k,2} \cdot \gamma_{Q,1} \cdot \psi_0 = 1.8 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

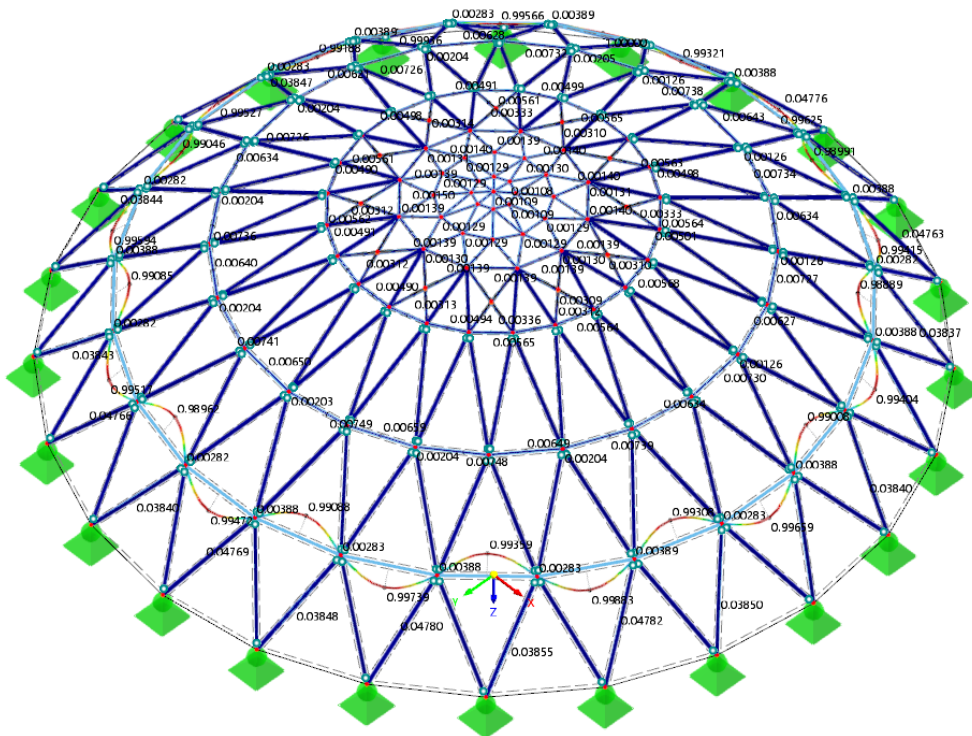
W celu zredukowania kombinacji ograniczymy się do jednego przypadku obciążenia uwzględniając obciążenie od ciężaru własnego prętów. Aby zapobiec automatycznemu pomnożeniu obliczonej wartości obciążenia przez program w zdefiniowanym przypadku dzielimy je przez odpowiedni współczynnik:

$$\frac{E_d}{\gamma_G} = 1.3333 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Pierścienie dzielone na 24 węzły

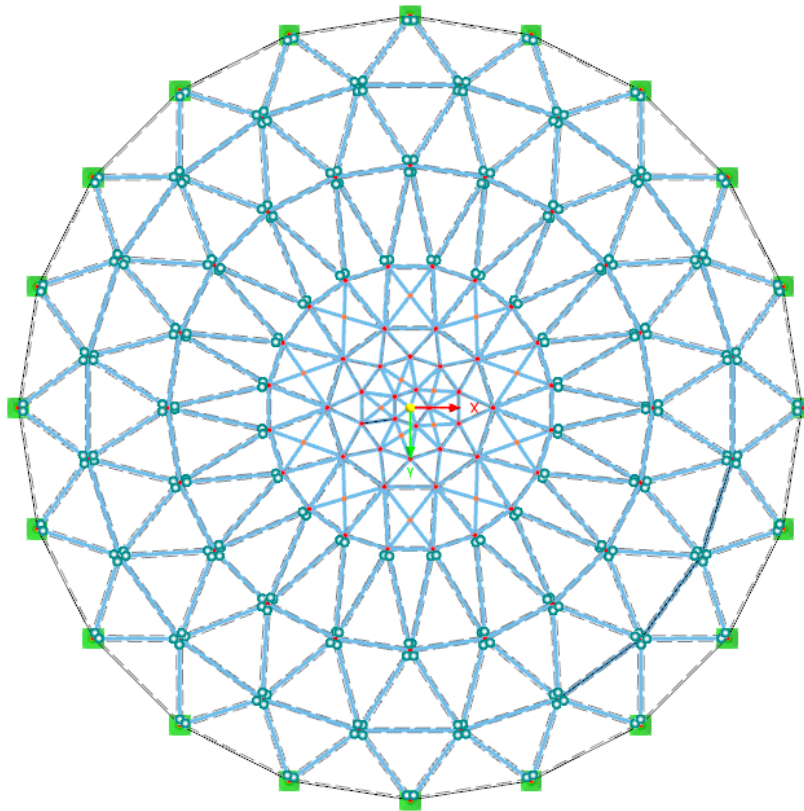


Rysunek 1 Geometria konstrukcji z podziałem pierścieni na 24 węzłów

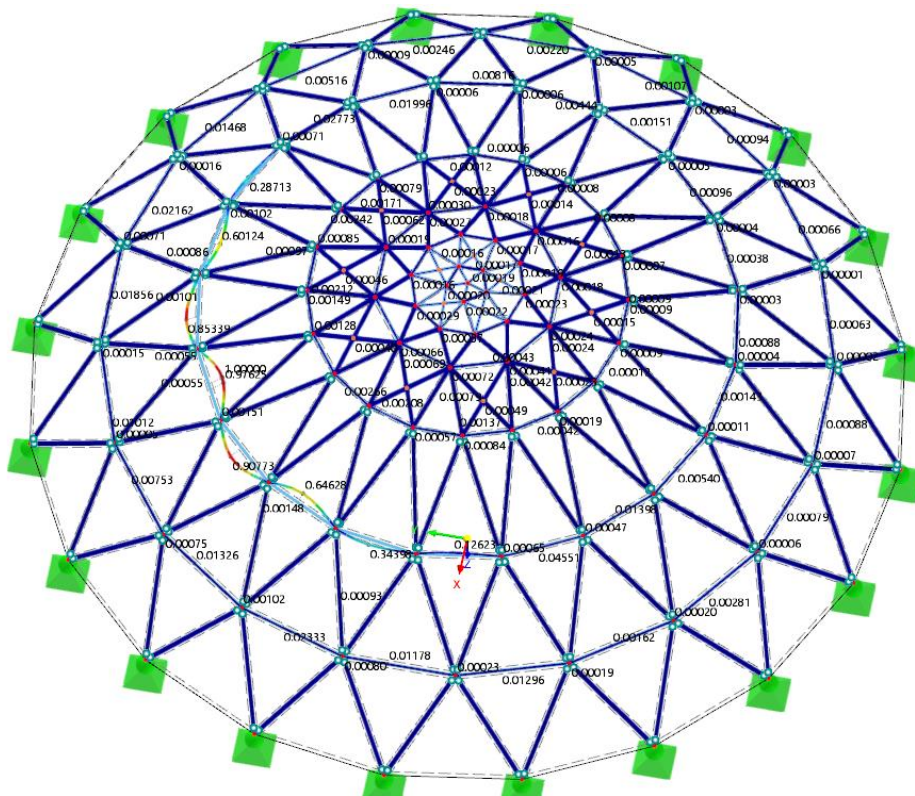


Rysunek 2 Postać wyboyczeniowa dla podziału pierścieni na 24 węzłów

Pierścienie dzielone na 20 węzły

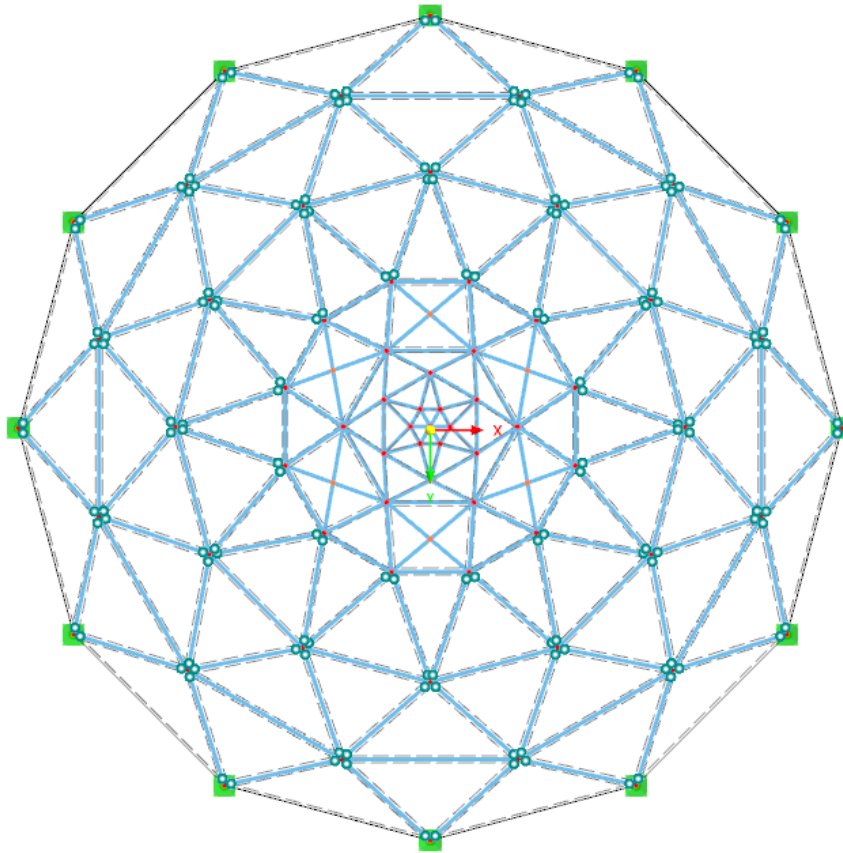


Rysunek 3 Geometria konstrukcji z podziałem pierścieni na 20 węzłów

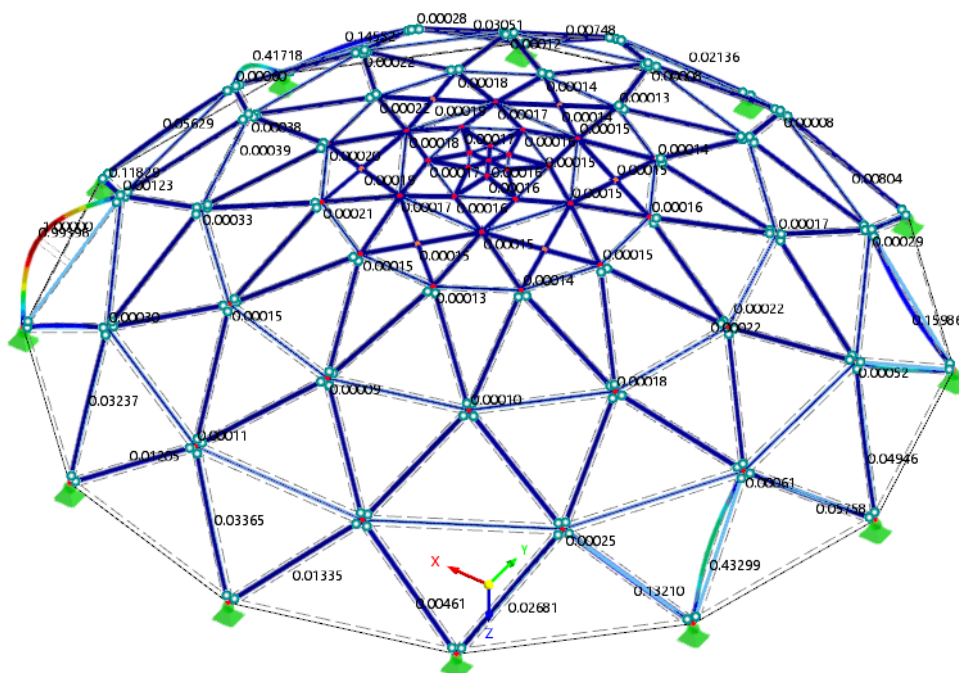


Rysunek 4 Postać wybozczeniowa dla podziału pierścieni na 20 węzłów

Pierścienie dzielone na 12 węzły



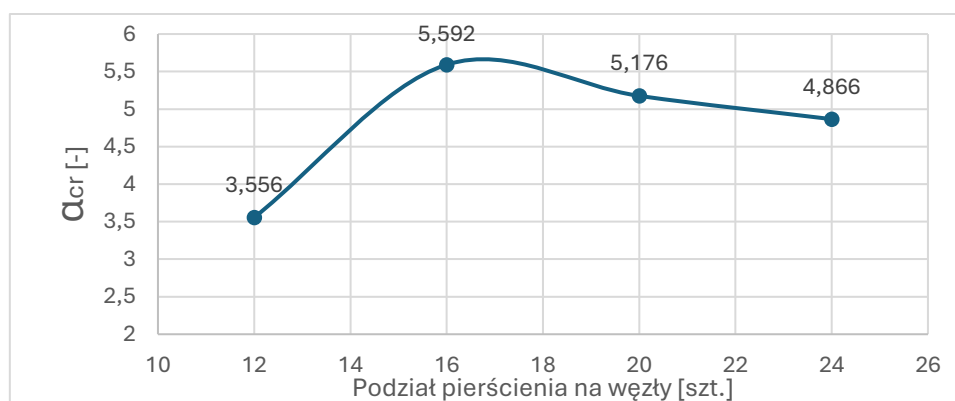
Rysunek 7 Geometria konstrukcji z podziałem pierścieni na 12 węzłów



Rysunek 8 Postać wyboyczeniowa dla podziału pierścieni na 12 węzłów

Tabela 1 Zestawienie wyników współczynnika obciążenia krytycznego oraz oszczędności w zależności od podziału pierścieni na węzły

| liczba węzłów na pierścieniu [szt.] | Współczynnik obc. krytycznego [-] | liczba węzłów ogółem [szt.] | Średni koszt węzła [zł/szt.] | Różnica węzłów w porównaniu do pierwotnej konstrukcji [szt.] |
|-------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|------------------------------|--|
| 24 | 4,866 | 117 | 812,00 | - |
| 20 | 5,176 | 95 | | 22 |
| 16 | 5,592 | 80 | | 37 |
| 12 | 3,556 | 60 | | 57 |



Wykres 1 Współczynnik obciążenia krytycznego w zależności od podziału pierścienia na węzły