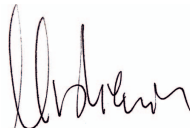





Katedra Wytrzymałości Materiałów  
ul. Gabriela Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk

Zadanie:	Weryfikacja projektu konstrukcji wsporczej stanowiska do badań łopat turbin wiatrowych		
Projekt:	Wireless sensing and charging for wind turbine blades condition monitoring system finansowanego z programu VENTUS-HYDROGENII-REDIVIVUS.		
Institucja Finansująca:	Politechnika Gdańska ul. Narutowicza 11/12 80-233 Gdańsk		
Jednostka kierująca:	Centrum Morskiej Energetyki Wiatrowej		
	Imię i nazwisko	Specjalność, numer uprawnień	Podpis
Zespół autorski:	dr hab. inż., prof. PG Mikołaj Miśkiewicz	upr. bud. do projektowania i kierowania rob. bud bez ograniczeń w specjalności mostowej POM/0074/PWOM/10, wpis do POIIB: POM/BM/0296/10	
	prof. dr hab. inż. Jacek Chróścielewski	upr. bud. do projektowania i kierowania rob. bud bez ograniczeń specjalności konstrukcyjno-budowlanej 8/Gd/01; wpis do POIIB POM/BO/0583/01	
	dr inż. Dawid Bruski		
	dr inż. Łukasz Pachocki		

Gdańsk, kwiecień 2023 r.

## Zawartość opracowania

1.	Podstawa opracowania .....	4
2.	Cel i zakres opracowania .....	4
3.	Wykorzystane materiały .....	5
4.	Opis konstrukcji wsporczej i Lokalizacja instalacji konstrukcji .....	6
5.	Opis modelu numerycznego.....	8
5.1	Masa i położenie środka ciężkości.....	8
5.2	Obliczenia statyczne .....	9
5.3	Obliczenia dynamiczne i zmęczeniowe.....	11
5.4	Analiza Modalna .....	12
5.5	Łopata turbiny wiatrowej .....	12
5.6	Oprogramowanie MES.....	13
5.7	Weryfikacja modelu.....	13
6.	Analiza modalna.....	14
6.1	Przypadek 1: Analiza modalna samej konstrukcji wsporczej .....	14
6.2	Przypadek 2: Analiza modalna konstrukcji wsporczej i łopaty w położeniu flapwise..	15
6.3	Przypadek 3: Analiza modalna konstrukcji wsporczej i łopaty w położeniu edgewise	16
7.	Obliczenia statyczne .....	16
7.1	Przypadek 1: $F_z = +20 \text{ kN}$ , $M_y = +200 \text{ kNm}$ .....	16
7.1.1	Konstrukcja wsporcza.....	17
7.1.2	Płyty pośrednie .....	18
7.1.3	Łączniki .....	20
7.1.4	Podłoże .....	21
7.2	Przypadek 2: $F_z = -20 \text{ kN}$ , $M_y = -200 \text{ kNm}$ .....	23
7.2.1	Konstrukcja wsporcza.....	23
7.2.2	Płyty pośrednie .....	25
7.2.3	Łączniki .....	26
7.2.4	Podłoże .....	27
8.	Obliczenia dynamiczne .....	29
8.1	Obciążenie dynamiczne .....	29
8.2	Przypadek 1: Łopata w położeniu flapwise .....	30
8.2.1	Konstrukcja wsporcza.....	31
8.2.2	Płyty pośrednie .....	32
8.2.3	Łączniki .....	34

---

8.2.4	Podłoże .....	35
8.3	Przypadek 2: Łopata w położeniu edgewise .....	38
8.3.1	Konstrukcja wsporcza.....	39
8.3.2	Płyty pośrednie.....	40
8.3.3	Łączniki .....	42
8.3.4	Podłoże .....	43
9.	Analiza zmęczeniowa.....	46
10.	Podsumowanie badań.....	47
11.	Podsumowanie, uwagi i wnioski.....	49
12.	Zalecenia .....	51
	Załącznik – Porównanie wyników obliczeń statycznych .....	52

## 1. Podstawa opracowania

Pracę zrealizowano w ramach projektu badawczego pt. Wireless sensing and charging for wind turbine blades condition monitoring system finansowanego z programu VENTUS-HYDROGENII-REDIVIVUS.

## 2. Cel i zakres opracowania

Celem opracowania jest weryfikacja wytrzymałości konstrukcji wsporczej stanowiska do badań łopat turbin wiatrowych. Weryfikacja konstrukcji wsporczej została wykonana na podstawie obliczeń numerycznych przeprowadzonych przy wykorzystaniu Metody Elementów Skończonych (MES).

**Zakres** przeprowadzonych badań obejmował następujące elementy:

1. wykonanie szczegółowego modelu teoretycznego w środowisku Metody Elementów Skończonych (MES);
2. wykonanie statycznej analizy wytrzymałościowej konstrukcji wsporczej wraz z wymiarowaniem łączników wykorzystywanych do montażu konstrukcji wsporczej do podłoża (2 schematy obciążenia);
3. wykonanie analizy dynamicznej konstrukcji wsporczej od obciążeń generowanych podczas badań łopat turbin wiatrowych (2 przypadki obliczeniowe);
4. przeprowadzenie analizy modalnej (3 przypadki);
5. przeprowadzenie statycznej i dynamicznej analizy wytrzymałościowej szczegółu mocowania łopaty w konstrukcji wsporczej (2 przypadki statyczne, 2 przypadki dynamiczne);
6. wykonanie analizy zmęczeniowej (2 przypadki).

**Założenia** dotyczące badań:

1. konstrukcja wsporcza powinna umożliwić przeprowadzania badań łopat turbin wiatrowych o długości maksymalnej 13 m i masie 700 kg;
2. stanowisko powinno umożliwić przeprowadzanie badań statycznych, dynamicznych oraz zmęczeniowych łopaty turbin wiatrowych;
3. oś kołnierza montażowego oraz oś podłużna łopaty znajduje się 1.5 m nad powierzchnią podłogi;
4. obciążenia statyczne przyjęto w formie siły skupionej o wartości  $\pm 20$  kN i momentu zginającego  $\pm 200$  kNm oddziałujących w płaszczyźnie pionowej, moment odpowiada sile 20 kN na ramieniu 10 m;

5. przewidywany zakres częstotliwości obciążeń dynamicznych wynosi 0.5 – 4.0 Hz, obliczenia dynamiczne przeprowadzono dla częstotliwości wymuszenia odpowiadającej pierwszej częstotliwości drgań własnych łopaty turbiny wiatrowej;
6. ugięcie pionowe końca łopaty zamontowanej w pozycji poziomej do konstrukcji wsporczej podczas badań nie powinno przekroczyć 1.0 m;
7. liczba cykli obciążeń zmęczeniowych dla pojedynczej łopaty: nieznana, minimum 2 miliony;
8. liczba cykli obciążeń zmęczeniowych dla konstrukcji wsporczej: nieznana, minimum 10 milionów;
9. dostarczony przez Zamawiającego model MES łopaty ma następujące parametry: długość 12.6 m, masa 392 kg, ten model zostanie uwzględniony w obliczeniach objętych niniejszym raportem;
10. urządzenie do wymuszania drgań łopaty o długości 12.6 m będzie zamontowane 4.76 m od nasady łopaty.

#### **Ograniczenia dotyczące badań:**

1. wyniki analiz opracowane do 16 kwietnia 2023 (warunkuje to szczegółowość modelu numerycznego oraz rozmiar elementów skończonych w kontekście obliczeń dynamicznych);
2. brak szczegółowej dokumentacji podłoża pod konstrukcją wsporczą;
3. brak informacji o modelu obliczeniowym wykorzystanym do opracowania projektu konstrukcji wsporczej (np. brak informacji o szczegółach modelu MES, liczbie węzłów, zastosowanych modelach materiałów, sposobie przykładania obciążenia);
4. brak szczegółowych wytycznych dotyczących analiz dynamicznych konstrukcji wsporczej;
5. model MES łopaty turbiny wiatrowej nie został przygotowany pod kątem użycia w systemie LS-DYNA, pełne dostosowanie tego modelu do obliczeń konstrukcji wsporczej wykracza poza zakres tego opracowania ze względu na czasochłonność tego zadania, wobec czego przyjęto uproszczone założenia dotyczące modelu materiału łopaty turbiny wiatrowej.

### **3. Wykorzystane materiały**

- [1] Projekt techniczny konstrukcji wsporczej dla stanowiska badawczego łopat turbin wiatrowych, autor projektu: Karol Niklas, wersja projektu v4 z dnia 01.03.2023r.

- [2] Rysunki techniczne konstrukcji wsporczej: rysunek ogólny, rysunek płyt pośrednich, rysunek schematu podnoszenia konstrukcji wsporczej, autor rysunków: Karol Niklas, 2023r.
- [3] Model CAD konstrukcji wsporczej, autor: Karol Niklas, udostępniony dnia 28.03.2023r.
- [4] Raport: Analiza wytrzymałości statycznej dla konstrukcji wsporczej stanowiska do badań łopat turbin wiatrowych, autor projektu: Karol Niklas, v1 z dnia 5.02.2023r.
- [5] Materiały przekazane przez Centrum Morskiej Energetyki Wiatrowej, Politechnika Gdańska.
- [6] J. Hallquist, LS-DYNA, Theory Manual, 2006r.
- [7] LS-DYNA, Keyword user's manual, vol. I and vol II, 2015r.
- [8] Chopra A.K., Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering, Prentice Hall, New Jersey, 1995.
- [9] Rucka M., Wilde K., Dynamika Budowli z przykładami w środowisku MATLAB, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, 2014.
- [10] Dokumentacja fotograficzna przeprowadzona przez Zespół Autorski z dnia 18.01.2023r.
- [11] Chen X., Semenov S., McGugan M., Madsen S.H., Yeniceli S.C., Berring P., Branner K., Fatigue testing of a 14.3 m composite blade embedded with artificial defects – Damage growth and structural health monitoring, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 140, 2021, doi: 10.1016/j.compositesa.2020.106189.
- [12] PN-EN 1993-1-9:2007, Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych - Część 1-9: Zmęczenie.

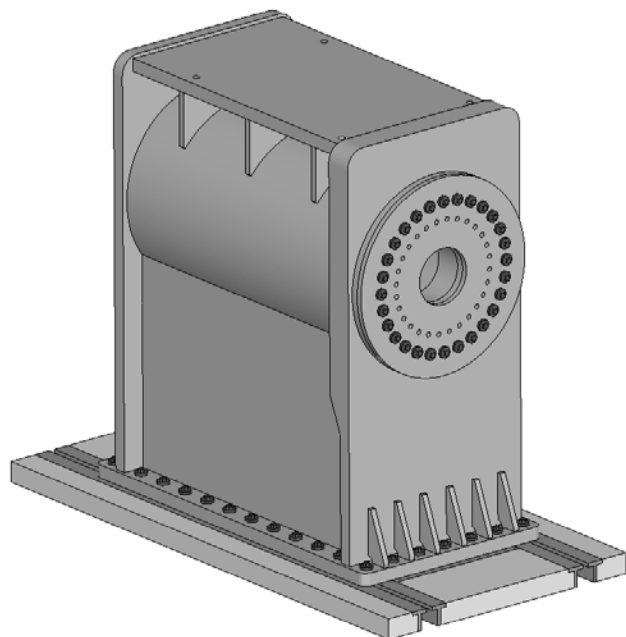
#### 4. Opis konstrukcji wsporczej i Lokalizacja instalacji konstrukcji

Konstrukcję wsporczą zaprojektowano jako konstrukcję stalową spawaną. Dla konstrukcji wsporczej oraz płyty pośredniej wewnętrznej zastosowano stal konstrukcyjną S355J2+N, natomiast dla płyty pośredniej zewnętrznej zastosowano stal zgodną z wymaganiami DNV Grade D690. Widok ogólny konstrukcji wsporczej wraz z fragmentem podłoża, do którego konstrukcja będzie montowana przedstawiono na Rys. 4.1.

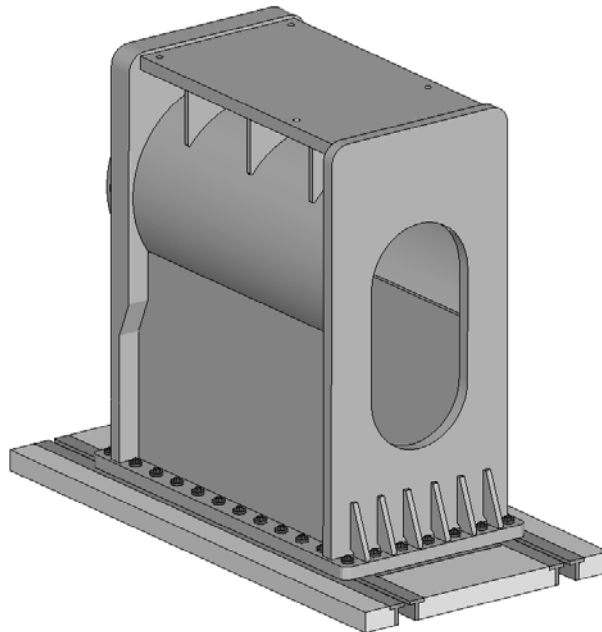
Wymiary zewnętrzne konstrukcji wsporczej wynoszą 2140x1140x2270 mm (długość x szerokość x wysokość). Do wykonania konstrukcji wsporczej i płyt pośrednich wykorzystano blachy o grubościach 30, 40, 50, 70 i 150 mm. Podstawa konstrukcji wsporczej o wymiarach 2140x1140 mm została zaprojektowana z blachy o grubości 70 mm. Pionowa płyta czołowa, do której będzie zamocowana łopata turbin wiatrowych, przy wykorzystaniu dodatkowych płyt pośrednich, została zaprojektowana z blachy o grubości 150mm, przy czym przy podstawie została pocieniona do 70 mm. W płycie czołowej zaprojektowano otwór umożliwiający dostęp do wnętrza łopaty turbiny wiatrowej w czasie badań. Pionowa płyta tylna została zaprojektowana z blachy o grubości 70 mm, w której przewidziano otwór umożliwiający dostęp do wnętrza konstrukcji wsporczej, a tym samym, przez otwór w płycie czołowej, dostęp do wnętrza łopaty turbiny wiatrowej.

Wewnątrz konstrukcji wsporczej zaprojektowano rurę stalową okrągłą o średnicy zewnętrznej 1050 mm z blachy o grubości 50 mm, która została wycięta od strony wejścia do konstrukcji wsporczej w celu dojścia i inspekcji wnętrza łopaty w trakcie badania

a) Widok od strony montażu łopaty turbiny wiatrowej

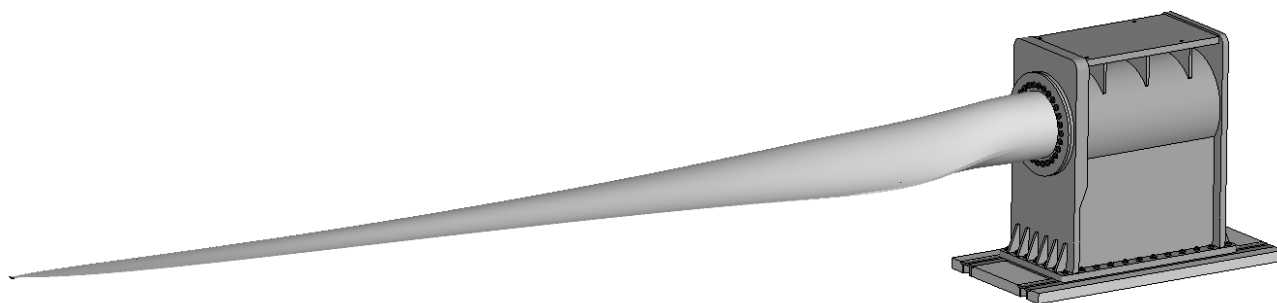


b) Widok od strony wejścia do konstrukcji wsporczej



Rys. 4.1 Widok ogólny konstrukcji wsporczej i fragmentu podłoża, do którego konstrukcja będzie zamocowana.

Montaż łopaty do konstrukcji wsporczej odbywa się przy wykorzystaniu dwóch kołowych płyt pośrednich o średnicy 1050 mm każda (widoczne na Rys. 4.1-a). Płyta pośrednia wewnętrzna została zaprojektowana z blachy o grubości 40 mm, która pełni rolę dystansu, w którym możliwe jest schowanie nakrętek śrub M24, które są wykorzystane do mocowania łopaty do płyty pośredniej zewnętrznej. Płyta pośrednia zewnętrzna, którą projektuje się z blachy o grubości 30 mm, służy do mocowania łopaty do konstrukcji wsporczej i przeniesienia obciążeń z kołnierza łopaty na konstrukcję wsporczą. Łopata łączy się z zewnętrzną płytą pośrednią za pomocą 28 śrub M24 klasy 8.8, które rozmieszczone są na okręgu o średnicy 600 mm. Projektowane napięcie tych śrub wynosi 125 kN. Montaż płyt pośrednich do pionowej płyty czołowej konstrukcji wsporczej odbywa się za pomocą 28 śrub M30, które rozmieszczone są na okręgu o średnicy 800 mm i napięte siłą wstępną 200 kN. Widok konstrukcji wsporczej oraz zamocowanej do niej łopaty turbiny wiatrowej przedstawiono na Rys. 4.2.



Rys. 4.2 Widok ogólny konstrukcji wsporczej i zamontowanej łopaty turbiny wiatrowej.

Przymocowanie konstrukcji wsporczej do podłoża w formie szyn o przekroju „T” przewidziano w formie połączeń śrubowych kotwami młotowymi M30. Napięcie wstępne tych śrub projektuje się jako 10 kN. Szyny są zabetonowane w płycie fundamentowej. Fragment szyn i podłoża betonowego widoczne są na Rys. 4.1

Miejsce instalacji konstrukcji wsporczej stanowiska do badań łopat turbin wiatrowych przewidziano w hali Laboratorium Wytrzymałości Konstrukcji na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa (WIMiO) Politechniki Gdańskiej (budynek nr 30 na mapie kampusu Politechniki Gdańskiej). Lokalizację budynku WIMiO na mapie kampusu Politechniki Gdańskiej pokazano na Rys. 4.3.



Rys. 4.3 Lokalizacja budynku WIMiO na mapie kampusu Politechniki Gdańskiej  
(źródło: [www.campus.pg.edu.pl](http://www.campus.pg.edu.pl), dostęp 07.04.2023r.)

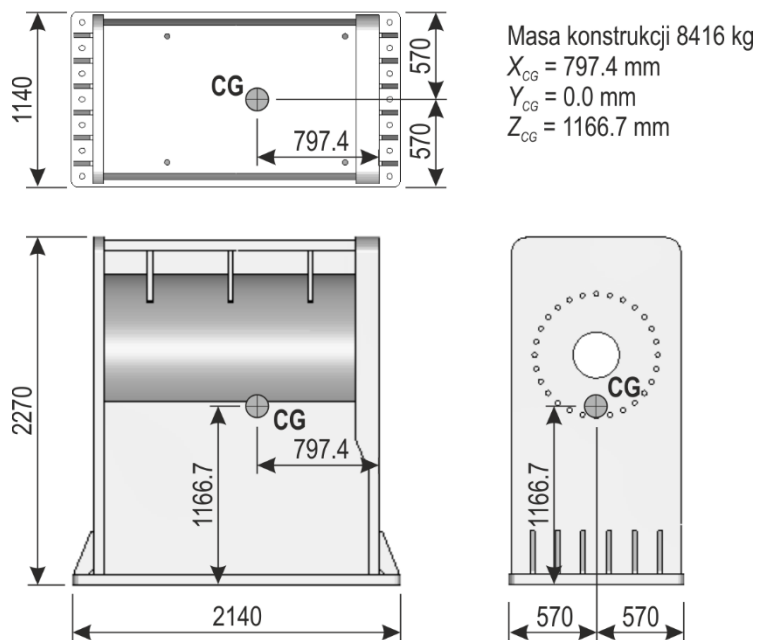
## 5. Opis modelu numerycznego

Na potrzeby prowadzonych analiz weryfikacji konstrukcji wsporczej stanowiska do badań łopat turbin wiatrowych opracowano modele obliczeniowe umożliwiające przeprowadzenie analiz modalnych, obliczeń statycznych, dynamicznych oraz zmęczeniowych. Przygotowane modele obliczeniowe zostały opisane w poniższych podpunktach.

### 5.1 Masa i położenie środka ciężkości

Masa samej konstrukcji wsporczej (bez płyt pośrednich i śrub mocujących) wynosi 8416 kg przy założeniu gęstości stali  $7850 \text{ kg/m}^3$ . Współrzędne położenia środka ciężkości konstrukcji wynoszą  $x_c = 797.4 \text{ mm}$ ,  $y_c = 0.0 \text{ mm}$ ,  $z_c = 1166.7 \text{ mm}$ . Położenie środka ciężkości zaznaczono na Rys. 5.1. Masa płyty pośredniej wewnętrznej wynosi 219.7 kg, masa płyty pośredniej zewnętrznej wynosi 178.5 kg.





Rys. 5.1 Masa i położenie środka ciężkości konstrukcji wsporczej.

## 5.2 Obliczenia statyczne

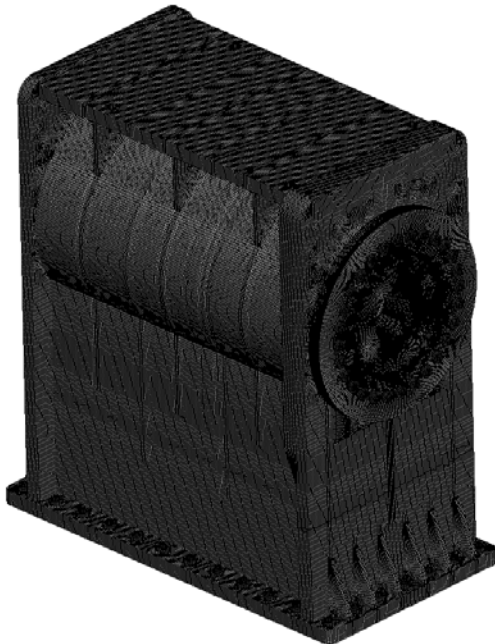
W ramach modelu wyróżniono konstrukcję wsporczą, płyty pośrednie, łączniki oraz podłoże wraz z szynami. Założono, że średnio rozmiar boku elementu skończonego wynosi 10 mm. Szczegóły dotyczące dyskretyzacji przedstawiono w Tabeli 5.1.

Widok ogólny modelu MES oraz szczegół dyskretyzacji przedstawiono na Rys. 5.2. Dyskretyzację płyt pośrednich konstrukcji można zobaczyć na Rys. 5.3. Model podłoża pod konstrukcję wsporczą przedstawiono na Rys. 5.4. Cały model sumarycznie składa się z **2,594,413 węzłów** oraz **2,246,400 8-węzłowych elementów skończonych** typu SOLID. W celu zapobiegnięcia nie-fizycznym stanom deformacji w elementach ze zredukowanym całkowaniem zastosowano dodatkową kontrolę klepsydrowania typu *Belytschko-Bindeman assumed strain co-rotational stiffness form*. Konstrukcja oraz szyny wykonane są z elementów stalowych, które zamodelowano materiałem sprężystym o gęstości  $7850 \text{ kg/m}^3$ , module Younga 210 GPa oraz liczbie Poissona równej 0.3. Dla betonowej części podłoża zastosowano materiał sprężysty o gęstości  $2200 \text{ kg/m}^3$ , module Younga 30 GPa oraz liczbie Poissona 0.20. Do modelowania kontaktu zastosowano kontakt *penalty-based* typu *mortar* ze współczynnikiem tarcia 0.2 między częściami stalowymi oraz 0.4 między betonem, a stalą. Obciążenia przykładano dwuetapowo, gdzie w pierwszym etapie sprężano łączniki aż do pełnej stabilizacji, a następnie, w drugim etapie, przykładano obciążenie zasadnicze. Obciążenie zasadnicze zadawano w obszarze otworów na śruby kotwiące łopatę do zewnętrznej blachy przejściowej. Analizę wykonano przy wykorzystaniu solvera LS-Dyna MPP R11.2 podwójnej precyzji wykorzystując równolegle 60 procesorów. Przy takich parametrach obliczenia trwały około 11 godzin. Wyniki obliczeń statycznych przedstawiono w punkcie 7.

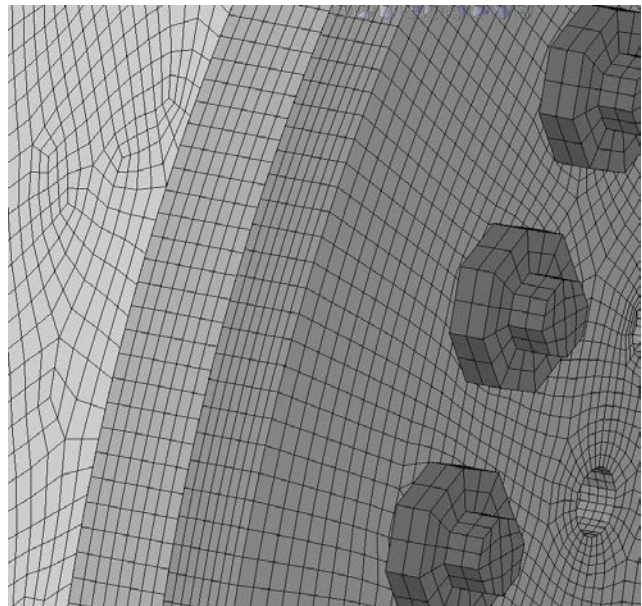
Tabela 5.1. Dyskretyzacja modelu MES.

Parametr	Konstrukcja wsporcza	Wewnętrzna płyta pośrednia	Zewnętrzna płyta pośrednia	Łączniki młotkowe (39 sztuk)	Łączniki dwustronne (28 sztuk)	Szyny	Płyta betonowa
Liczba węzłów	1 720 155	157 392	165 780	24 609	32 676	102 684	418 460
Liczba elementów skończonych	1 507 040	130 784	140 096	14 976	20 608	64 904	367 992
Sformułowanie elementu skończonego	8-węzłowy SOLID ze zredukowanym całkowaniem			8-węzłowy SOLID z pełnym całkowaniem, selektywnie zredukowanym		8-węzłowy SOLID ze zredukowanym całkowaniem	

a) Widok ogólny modelu MES

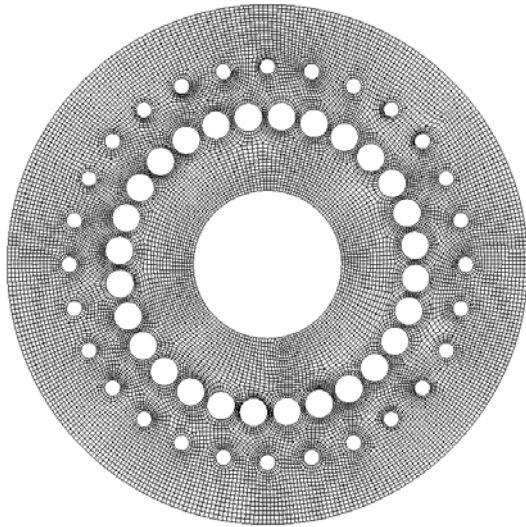


b) Szczegół dyskretyzacji układu, widok płyty czołowej, płyt pośrednich i śrub

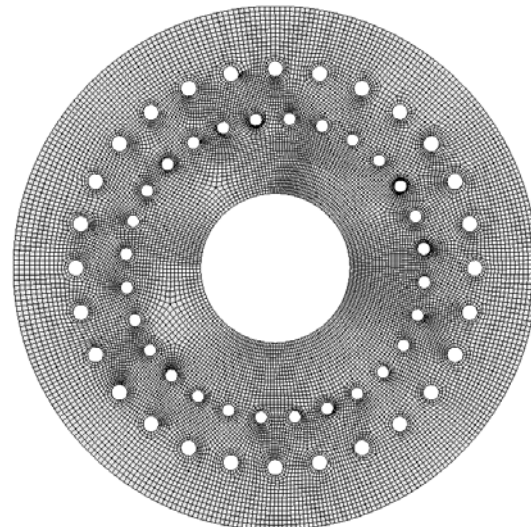


Rys. 5.2 Model MES konstrukcji wsporczej, a) widok ogólny, b) szczegół dyskretyzacji układu.

a) Model MES płyty pośredniej wewnętrznej

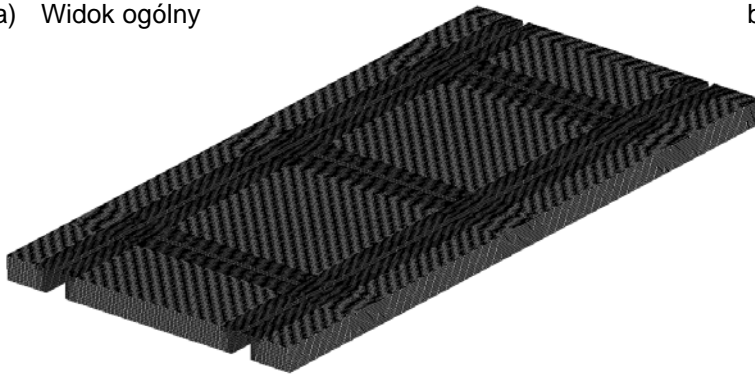


b) Model MES płyty pośredniej zewnętrznej

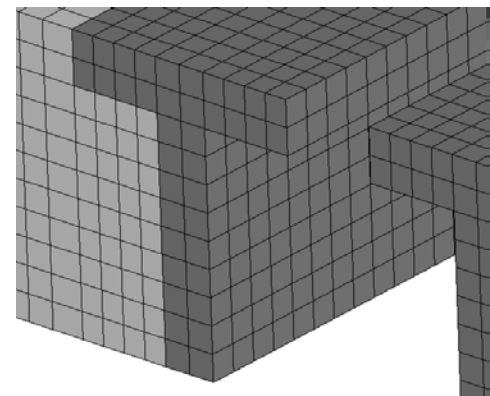


Rys. 5.3 Model MES płyt pośrednich

a) Widok ogólny



b) Szczegół dyskretyzacji



Rys. 5.4 Widok modelu MES posadzki i szyn, do których zamontowano konstrukcję wsporczą.

### 5.3 Obliczenia dynamiczne i zmęczeniowe

Model MES do analiz dynamicznych bazuje na modelu przygotowanym do obliczeń statycznych, w tym m.in. zgodność modeli i danych materiałowych, wykorzystanych typów elementów skończonych, natomiast składa się z mniejszej liczby elementów skończonych.

Model MES do obliczeń dynamicznych, który uwzględnia konstrukcję wsporczą, płyty pośrednie, łopatę turbiny wiatrowej, fragment podłoża betonowego z szynami, wszystkie łączniki śrubowe przewidziane projektem, składa się z 1,198,723 węzłów i 868,328 elementów skończonych. Średni rozmiar boku elementu skończonego typu SOLID wynosi 20 mm (dwa razy większy niż wymiar wykorzystany do dyskretyzacji układu na potrzeby obliczeń statycznych). Taka dyskretyzacja układu jest podyktowana ograniczeniem czasu potrzebnego na przeprowadzenie obliczeń dynamicznych. Na początku analizy dynamicznej przykładano obciążenie ciężarem własnym konstrukcji oraz sprężeniem łączników. W kolejnym etapie stosowane było założone wymuszenie zasadnicze. Początkowy krok czasowy symulacji wynosi 6.22E-07 s. Dla symulacji pracy konstrukcji wsporczej z zamocowaną łopatą w położeniu „flapwise”, która trwała 0.9356 s i była

przebiegła na 60 procesorach, czas prowadzenia obliczeń wyniósł około 112 godzin (4.7 dnia). Dla symulacji z łopata w położeniu „edgewise” czas obliczeń był podobny.

Model MES do obliczeń dynamicznych dla łopaty w położeniu „flapwise” przedstawiono na Rys. 5.5. Wykonano jeszcze drugi model analogiczny do opisanego powyżej, w którym łopata jest w położeniu „edgewise”.



Rys. 5.5 Widok modelu MES do obliczeń dynamicznych, konfiguracja „flapwise”.

## 5.4 Analiza Modalna

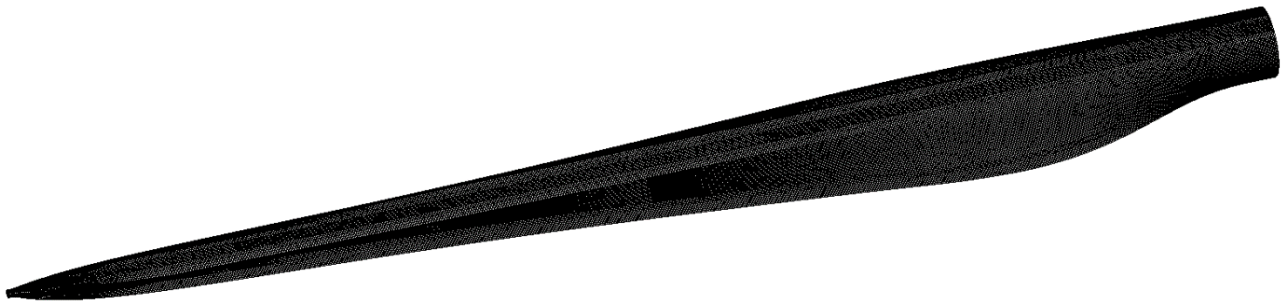
Model MES do analizy modalnej samej konstrukcji wsporczej jest taki sam, jak do analizy statycznej, jednak nie uwzględnia podłoża, płyt pośrednich i łączników śrubowych. Model ten składa się z 1,720,155 węzłów i 1,507,040 elementów skończonych.

Przeprowadzono również analizę modalną dla konstrukcji wsporczej i zamontowanej łopaty turbiny wiatrowej w dwóch konfiguracjach: „flapwise” oraz „edgewise”. Model ten uwzględnia konstrukcję wsporczą, płyty pośrednie oraz łopatę, nie uwzględnia łączników śrubowych oraz podłoża. Do analiz modalnych konstrukcji wsporczej i łopaty wykorzystano model przygotowany do obliczeń dynamicznych. Na dyskretyzację modelu MES konstrukcji wsporczej i łopaty składają się 694,386 węzły oraz 430,984 elementy skończone.

Wyniki analiz modalnych przedstawiono w punkcie 6.

## 5.5 Łopata turbiny wiatrowej

Podstawowy model MES łopaty turbiny wiatrowej został przekazany przez Centrum Morskiej Energetyki Wiatrowej, Politechnika Gdańska [5]. Przykład badań dla podobnej łopaty można znaleźć w artykule [11]. Pierwotny model MES łopaty nie został przygotowany pod kątem obliczeń programem LS-DYNA (zobacz pkt. 5.6), zaś czasochłonność pełnego dostosowania tego modelu do obliczeń w środowisku LS-DYNA znacznie przekracza czas przeznaczony na realizację niniejszego zadania „Weryfikacja Wytrzymałości Konstrukcji Wsporczej Stanowiska Do Badań Łopat Turbin Wiatrowych”, co zaznaczono również w pkt. 0. W związku z tym model został dostosowany w stopniu umożliwiającym przeprowadzenie obliczeń weryfikacyjnych konstrukcji wsporczej stanowiska, a w szczególności pod kątem zgodności masy całkowitej łopaty turbiny wiatrowej (392 kg) oraz zgodności pierwszej częstotliwości drgań własnych łopaty (2.14 Hz). Model MES łopaty składa się z 405,678 węzłów i 208,744 elementów skończonych typu *thickshell* [6][7]. Dyskretyzację zastosowaną w modelu MES łopaty przedstawiono na Rys. 5.6.



Rys. 5.6 Widok modelu MES łopaty turbiny wiatrowej.

## 5.6 Oprogramowanie MES

Obliczenia przeprowadzono przy wykorzystaniu programu LS-DYNA [6][7]. Program ten umożliwia zarówno przeprowadzenie obliczeń statycznych, jak i dynamicznych. W ramach niniejszego zadania przeprowadzono nieliniową analizę statyczną przy użyciu solvera *Full-Newton nonlinear with BFGS updates + optional arclength* [6][7]. Do całkowania równań ruchu w obliczeniach dynamicznych wykorzystano jawny schemat metody różnic centralnych (tzw. wariant sumowy) [6][7].

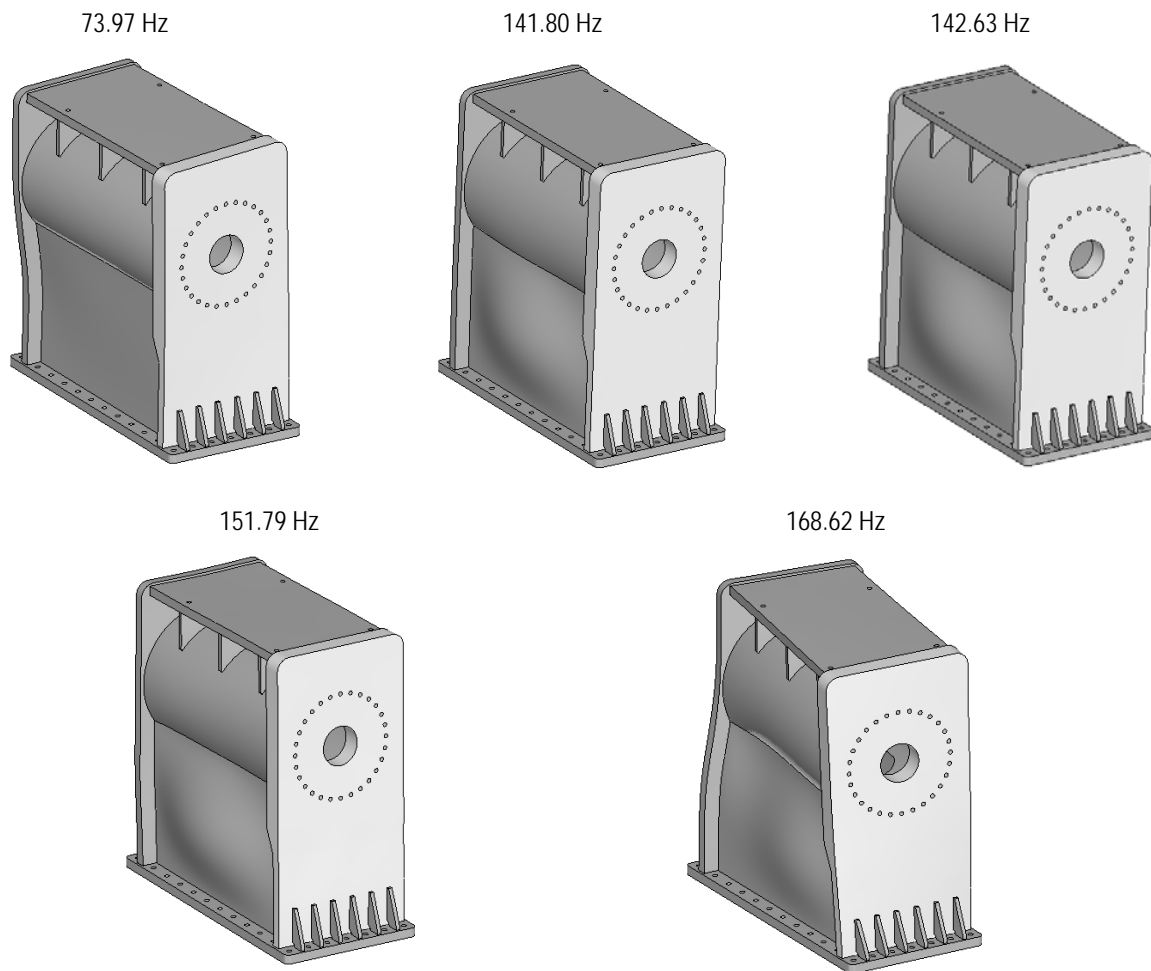
## 5.7 Weryfikacja modelu

Wyniki uzyskane z opracowanego modelu numerycznego zostały porównane z wynikami obliczeń statycznych, które zostały przeprowadzone w czasie projektowania konstrukcji wsporczej [4]. Wyniki porównawcze zestawiono w załączniku na stronie 52 – „Porównanie wyników obliczeń statycznych”. Obliczenia przedstawione w raporcie [4] zawierają jedynie obliczenia statyczne dla dwóch przypadków obciążenia: pierwszy przypadek dla zginania łopaty w płaszczyźnie pionowej w kierunku do góry, drugi przypadek od zginania łopaty w płaszczyźnie pionowej do dołu. W obu przypadkach założono następujące bezwzględne wartości obciążenia: moment zginający 200 kNm i siła pionowa 20 kN.

## 6. Analiza modalna

### 6.1 Przypadek 1: Analiza modalna samej konstrukcji wsporczej

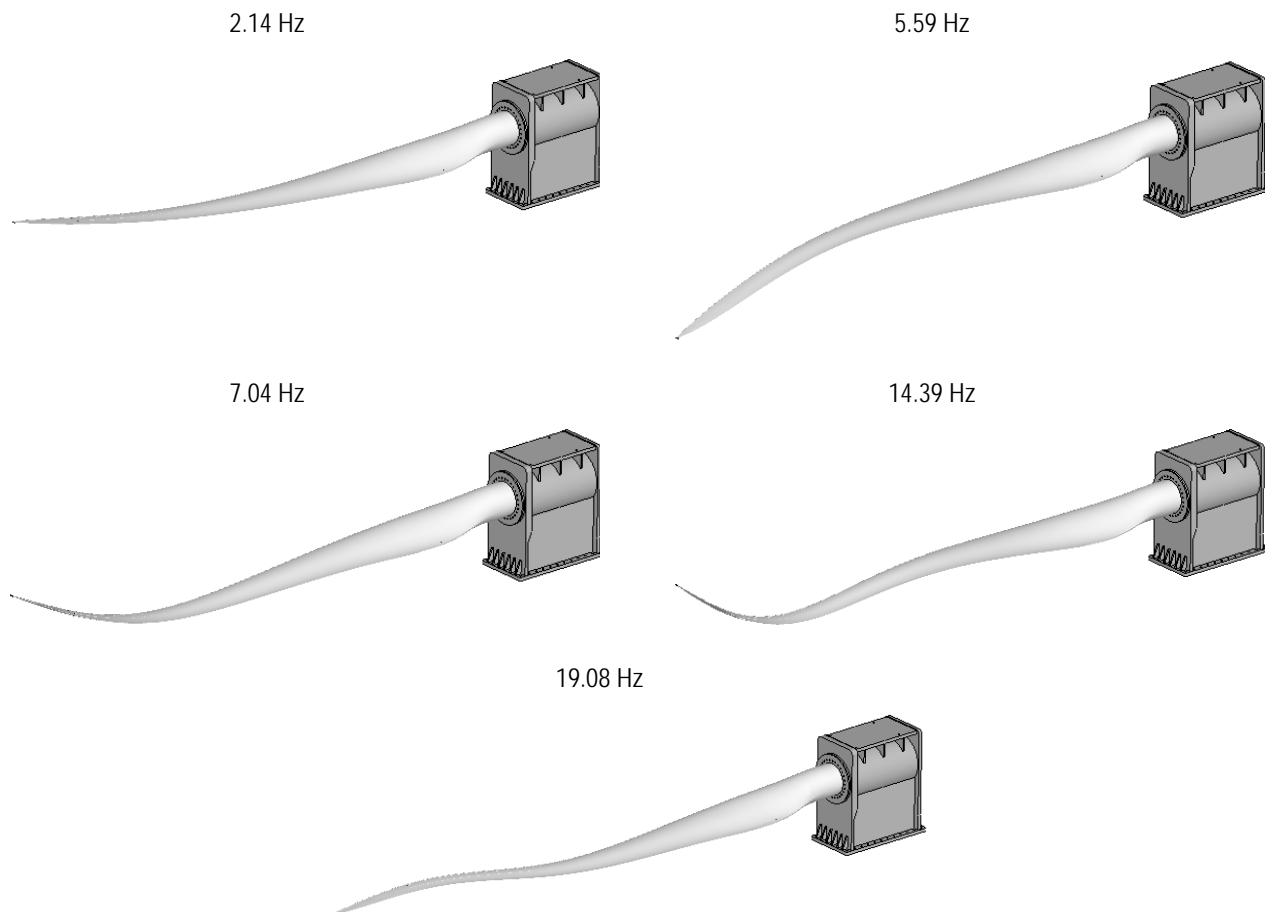
Pierwsze 5 częstotliwości drgań własnych konstrukcji wsporczej są następujące: 73.97 Hz, 141.80 Hz, 142.63 Hz, 151.79 Hz, 168.62 Hz. Odpowiadające im postacie drgań własnych układu przedstawiono na Rys. 6.1.



Rys. 6.1 Częstotliwości i postacie drgań własnych konstrukcji wsporczej.

## 6.2 Przypadek 2: Analiza modalna konstrukcji wsporczej i łopaty w położeniu flapwise

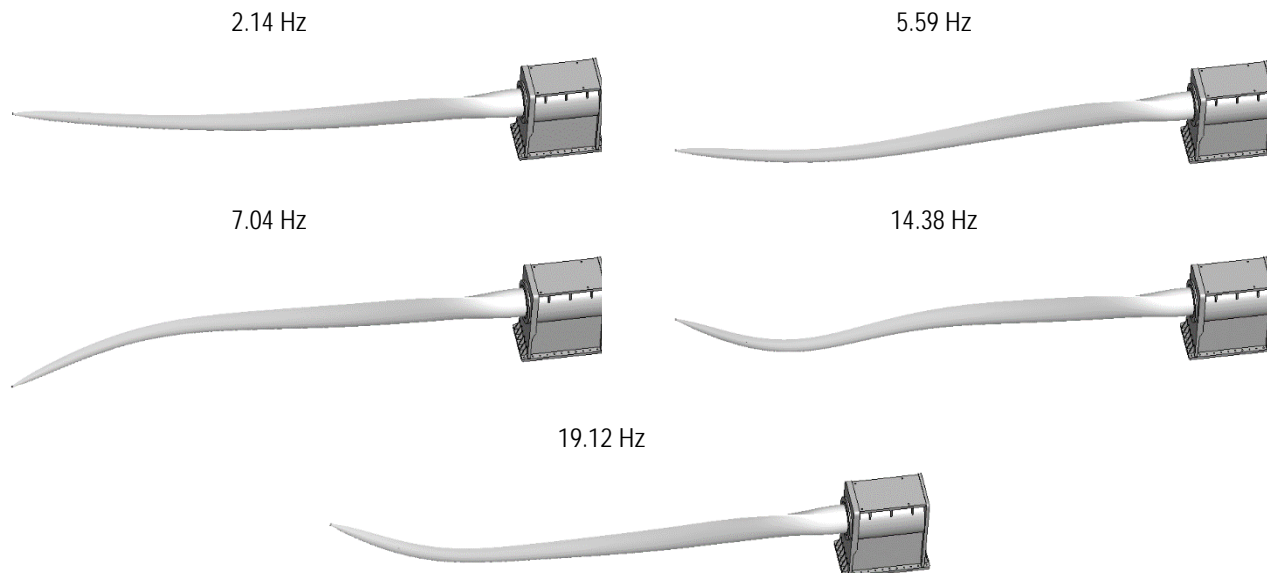
Pierwsze 5 częstotliwości drgań własnych konstrukcji wsporczej wraz z zamontowaną łopata w położeniu „flapwise” są następujące: 2.14 Hz, 5.59 Hz, 7.04 Hz, 14.39 Hz, 19.08 Hz. Odpowiadające im postacie drgań własnych układu konstrukcja+łopata przedstawiono na Rys. 6.2.



Rys. 6.2 Częstotliwości i postacie drgań własnych konstrukcji wsporczej i łopaty w położeniu flapwise.

### 6.3 Przypadek 3: Analiza modalna konstrukcji wsporczej i łopaty w położeniu edgewise

Pierwsze 5 częstotliwości drgań własnych konstrukcji wsporczej wraz z zamontowaną łopata w położeniu „edgewise” są następujące: 2.14 Hz, 5.59 Hz, 7.04 Hz, 14.38 Hz, 19.12 Hz. Odpowiadające im postacie drgań własnych układu konstrukcja+łopata przedstawiono na Rys. 6.3.

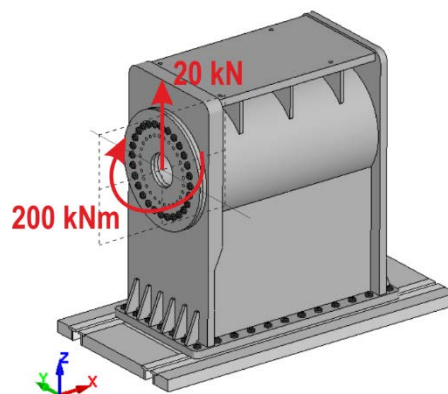


Rys. 6.3 Częstotliwości i postacie drgań własnych konstrukcji wsporczej i łopaty w położeniu edgewise.

## 7. Obliczenia statyczne

### 7.1 Przypadek 1: $F_z = +20$ kN, $M_y = +200$ kNm

Konstrukcję wsporczą obciążono siłą pionową o wartości 20 kN oraz momentem zginającym o wartości 200 kNm zgodnie ze schematem przedstawionym na Rys. 7.1.

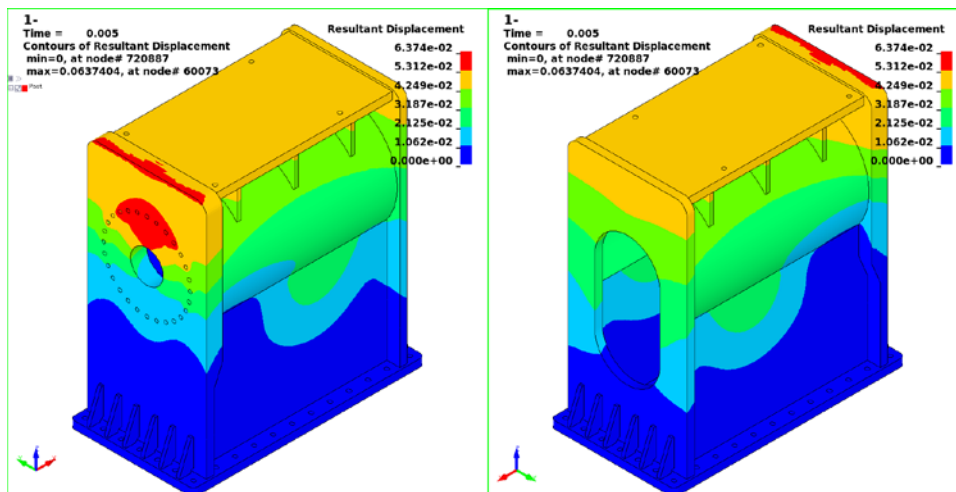


Rys. 7.1 Schemat obciążenia nr 1:  $F_z = +20$  kN,  $M_y = +200$  kNm

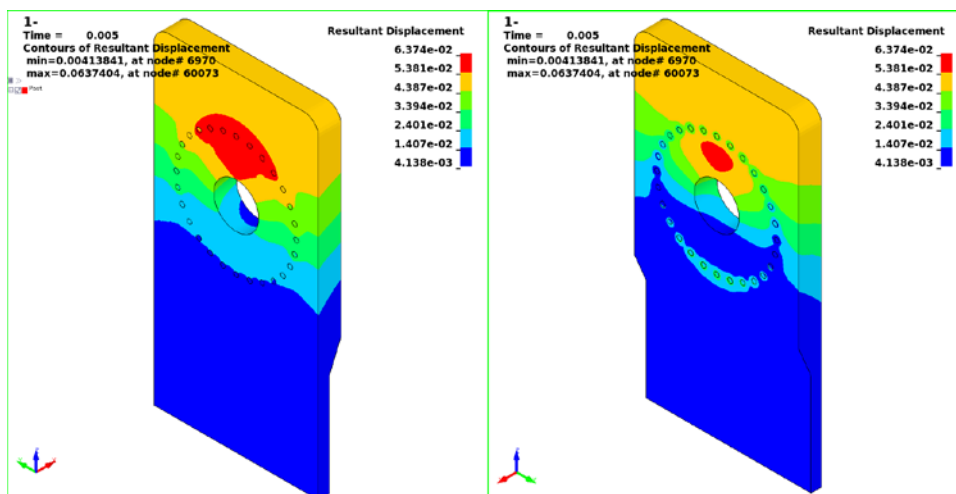


### 7.1.1 Konstrukcja wsporcza

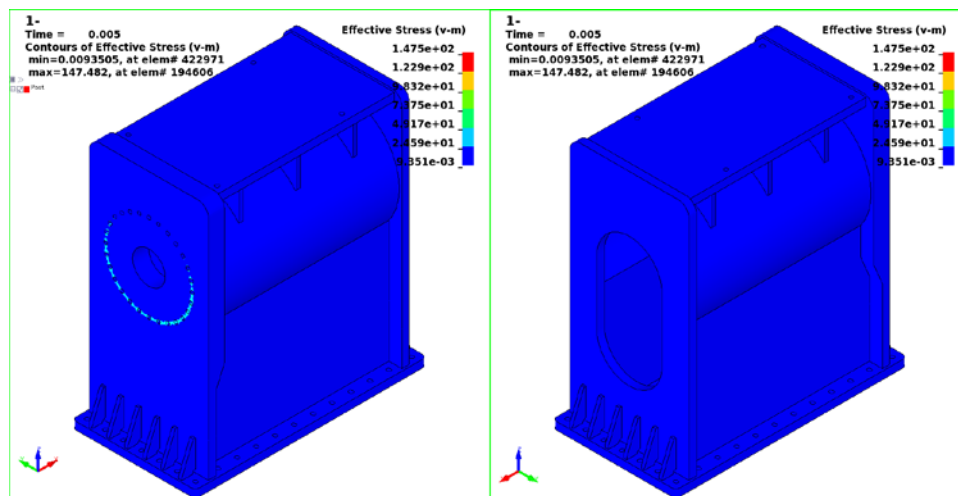
W tej sekcji znajdują się rezultaty wypadkowych przemieszczeń oraz naprężeń zredukowanych HMH dla konstrukcji wsporczej i przedstawiono je na Rys. 7.2, Rys. 7.3, Rys. 7.4 i Rys. 7.5. Największe wartości zarówno dla przemieszczeń jak i naprężeń znajdują się na płycie czołowej konstrukcji, w okolicach otworów łączących konstrukcję z płytami pośrednimi. Maksymalna wartość przemieszczeń wynosi ok. 0.06 mm. Maksymalna wartość naprężeń zredukowanych HMH wynosi 147.5 MPa. Naprężenia zredukowane w pozostałych elementach tej części konstrukcji nie przekraczają 11 MPa. Naprężenia w spoinach konstrukcji nie przekraczają maksymalnej wartości 10.2 MPa.



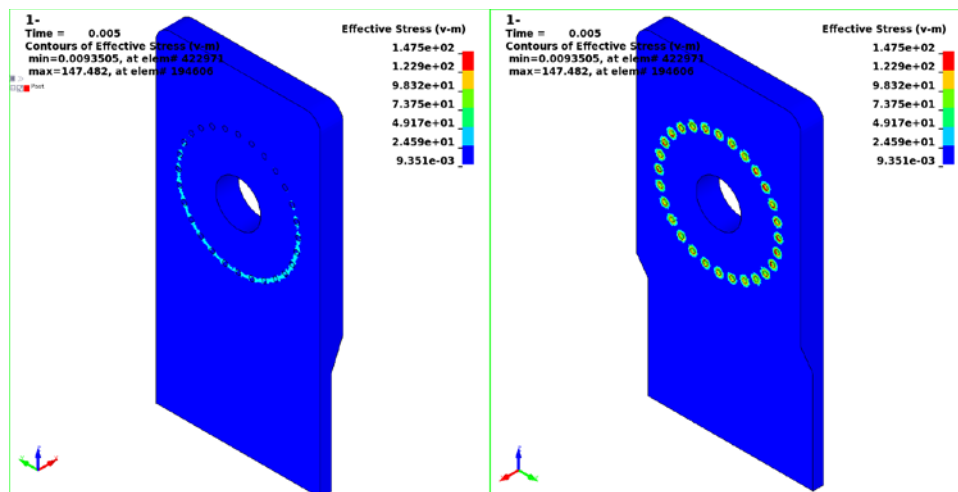
Rys. 7.2 Wypadkowe przemieszczenia (mm) konstrukcji wsporczej w widoku od przodu oraz od tyłu.



Rys. 7.3 Wypadkowe przemieszczenia (mm) płyty czołowej konstrukcji wsporczej w widoku od przodu oraz od tyłu.



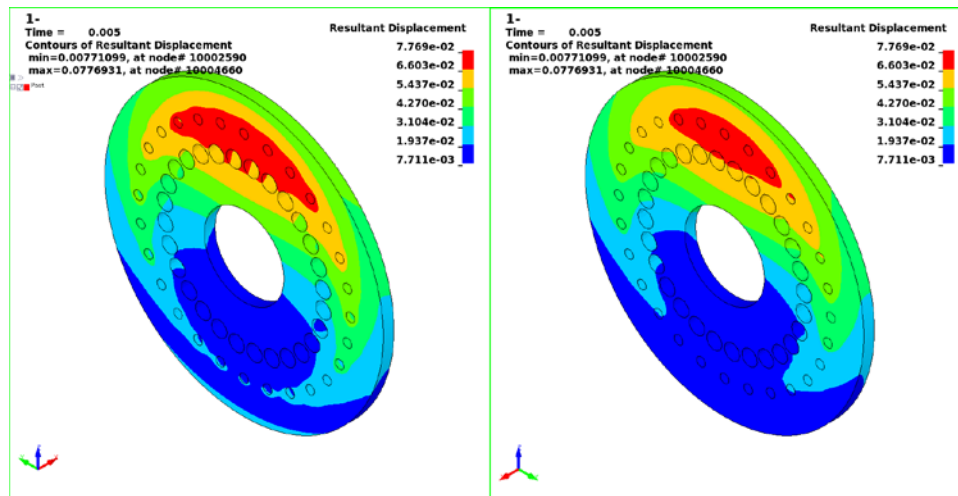
Rys. 7.4 Naprężenia zredukowane HMH (MPa) konstrukcji wsporczej w widoku od przodu oraz od tyłu.



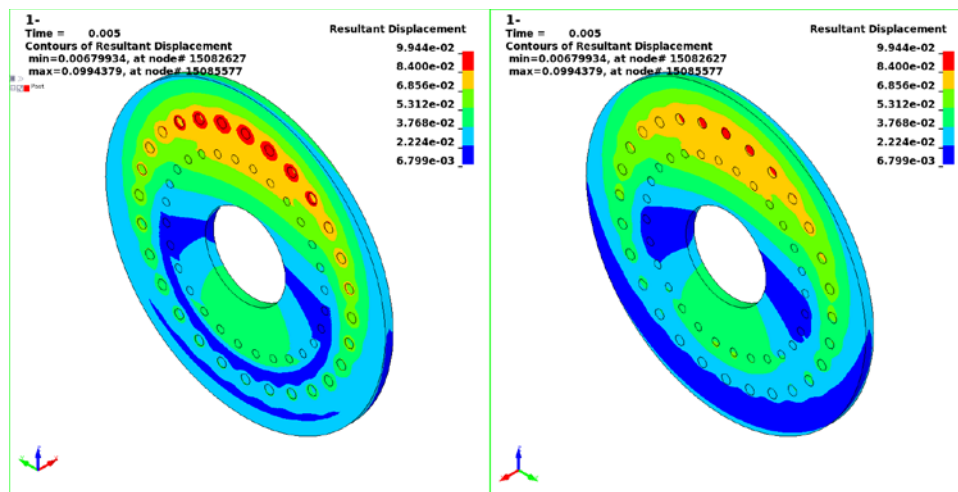
Rys. 7.5 Naprężenia zredukowane HMH (MPa) płyty czołowej konstrukcji wsporczej w widoku od przodu oraz od tyłu.

### 7.1.2 Płyty pośrednie

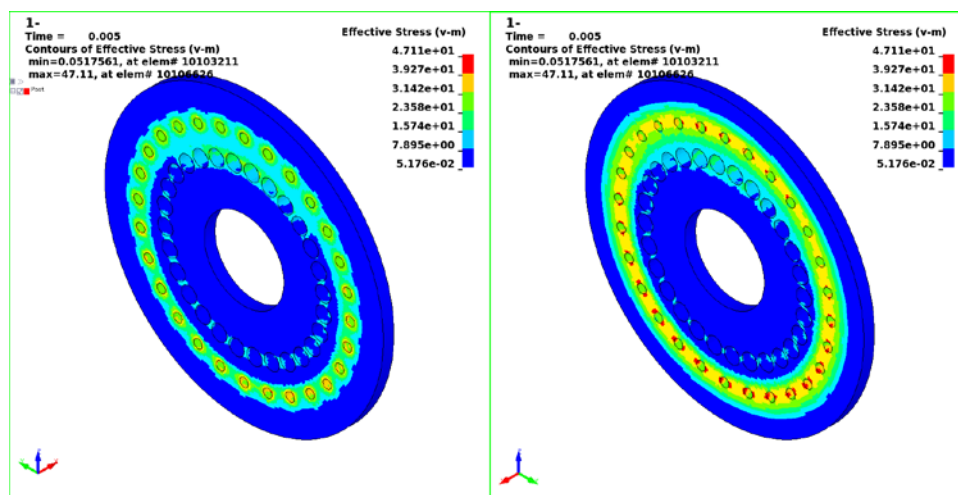
W tej sekcji znajdują się rezultaty wypadkowych przemieszczeń oraz naprężeń zredukowanych HMH dla płyt pośrednich (Rys. 7.6, Rys. 7.7, Rys. 7.8 i Rys. 7.9). Największa wartość przemieszczenia wypadkowego dla wewnętrznej płyty pośredniej wynosi ok. 0.08 mm, natomiast dla płyty zewnętrznej wartość ta wynosi ok. 0.1 mm. Wartości maksymalne przemieszczeń dla obu przypadków znajdują się w górnej części zewnętrznego okręgu otworów na śruby łączące. Maksymalna wartość naprężenia zredukowanego HMH dla wewnętrznej płyty pośredniej wynosi ok. 47.1 MPa, natomiast dla płyty zewnętrznej wartość ta wynosi ok. 190.9 MPa. Maksymalne naprężenia HMH dla obu przypadków wystąpiły w okolicach zewnętrznego okręgu otworów na śruby łączące.



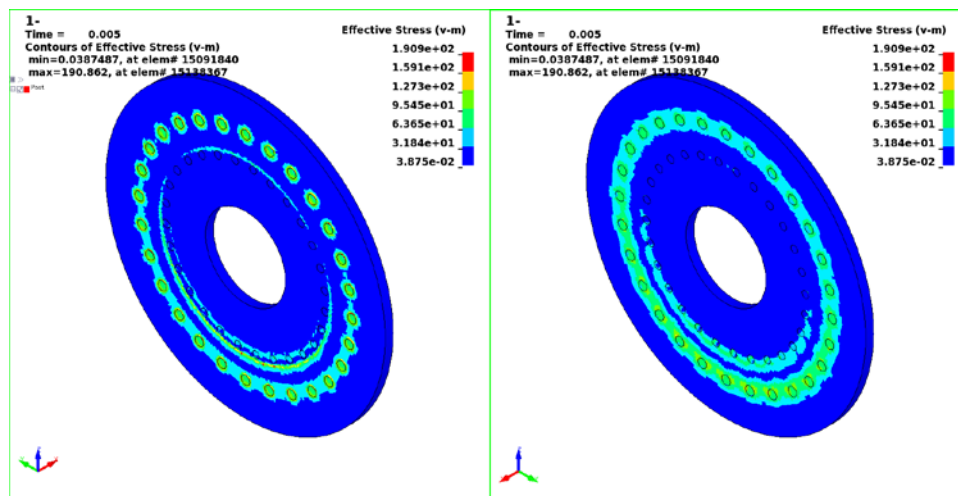
Rys. 7.6 Wypadkowe przemieszczenia (mm) wewnętrznej płyty pośredniej w widoku od przodu oraz od tyłu.



Rys. 7.7 Wypadkowe przemieszczenia (mm) zewnętrznej płyty pośredniej w widoku od przodu oraz od tyłu.



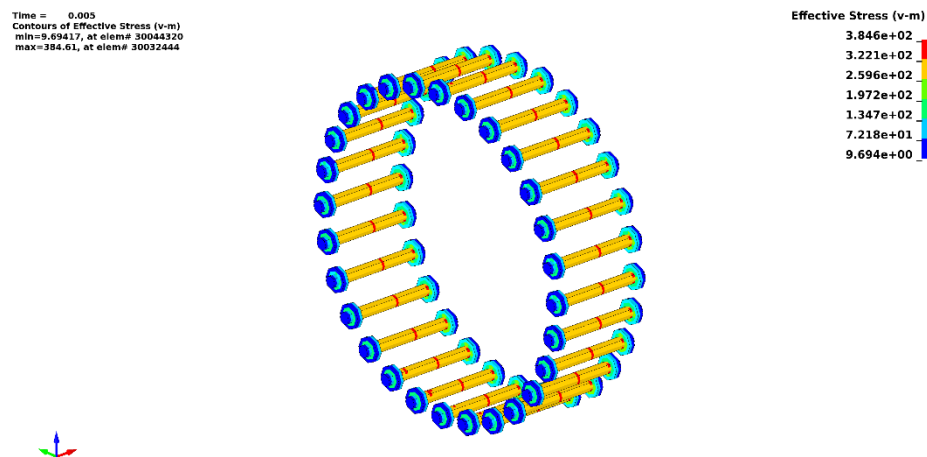
Rys. 7.8 Naprężenia zredukowane HMH (MPa) wewnętrznej płyty pośredniej w widoku od przodu oraz od tyłu.



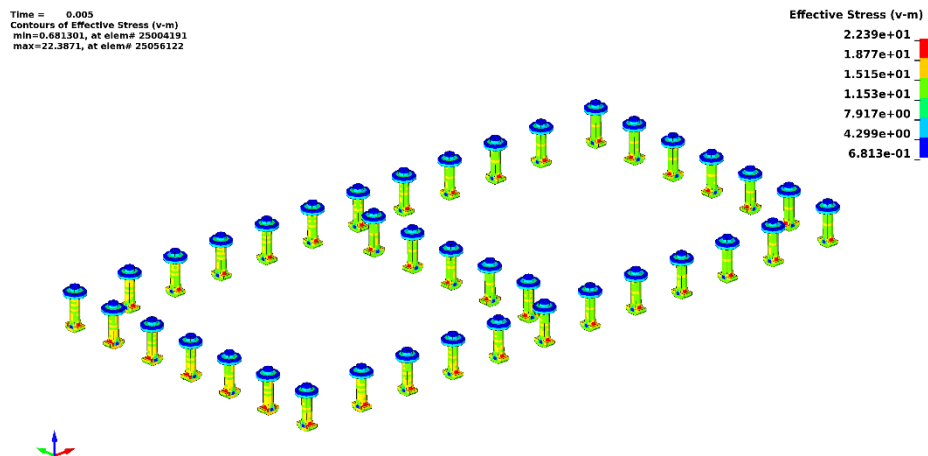
Rys. 7.9 Naprężenia zredukowane HMH (MPa) zewnętrznej płyty pośredniej w widoku od przodu oraz od tyłu.

### 7.1.3 Łączniki

W tej sekcji znajdują się rezultaty naprężeń zredukowanych HMH dla łączników płyt pośrednich do płyty czołowej (Rys. 7.10) oraz łączników podstawy stanowiska do szyn umocowanych w podłożu (Rys. 7.11). Największa wartość naprężeń zredukowanych HMH dla łączników płyt pośrednich wynosi 384.6 MPa, natomiast w przypadku łączników podstawy jest to 22.4 MPa. Odpowiada to maksymalnej sile w łącznikach dla płyt pośrednich równej ok. 200 kN, natomiast dla łączników w podstawie ok. 10 kN.



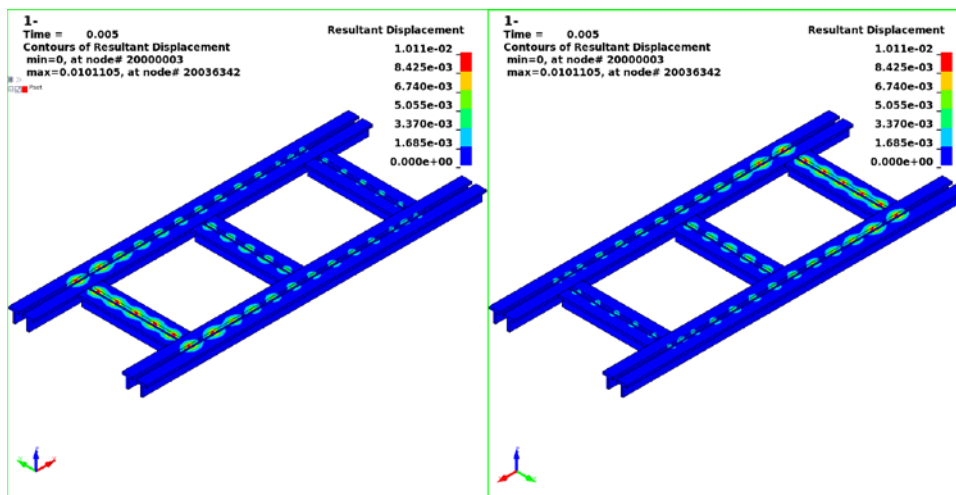
Rys. 7.10 Naprężenia zredukowane HMH (MPa) łączników płyt pośrednich do płyty czołowej.



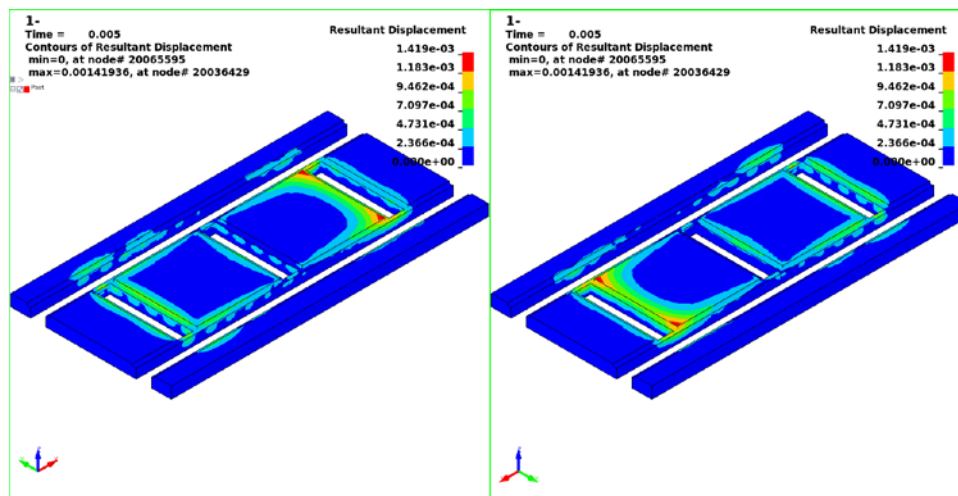
Rys. 7.11 Naprężenia zredukowane HMH (MPa) łączników podstawy stanowiska do szyn.

### 7.1.4 Podłoże

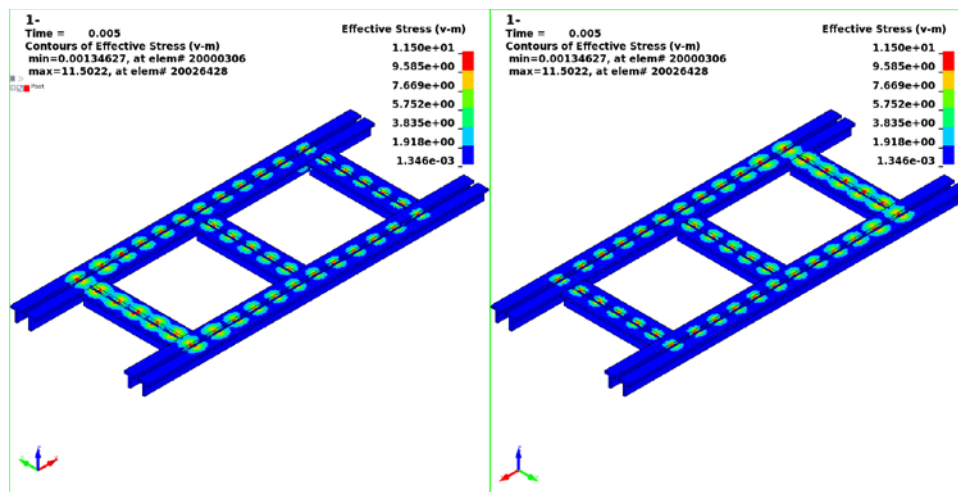
W tej sekcji znajdują się rezultaty wypadkowych przemieszczeń oraz naprężeń zredukowanych HMH dla podłoża, składającego się ze stalowych szyn oraz betonowej płyty wypełniającej (Rys. 7.12, Rys. 7.13, Rys. 7.14 i Rys. 7.15). Największa wartość przemieszczenia wypadkowego dla szyn wynosi ok. 0.01 mm, natomiast dla części betonowej 0.001 mm. Dla szyn maksymalne przemieszczenie wystąpiło w przedniej części szyn, gdzie konstrukcja jest wrywana momentem zginającym. W przypadku części betonowej maksymalne przemieszczenie znajduje się z tyłu, gdzie płyta jest dociskana. Maksymalna wartość naprężenia zredukowanego HMH w szynach wynosi 11.5 MPa, natomiast w części betonowej 1.4 MPa. Maksymalne wartości naprężeń w obu przypadkach wystąpiły w przedniej części konstrukcji, gdzie podłoże jest wrywane.



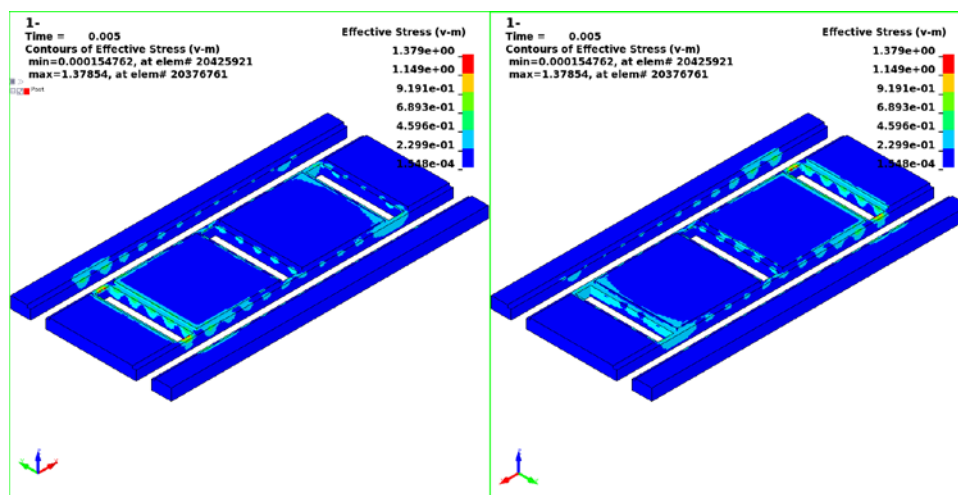
Rys. 7.12 Wypadkowe przemieszczenia (mm) szyn w widoku od przodu oraz od tyłu.



Rys. 7.13 Wypadkowe przemieszczenia (mm) betonu w podstawie w widoku od przodu oraz od tyłu.



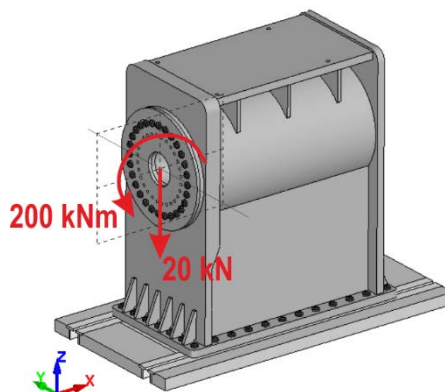
Rys. 7.14 Naprężenia zredukowane HMH (MPa) szyn w widoku od przodu oraz od tyłu.



Rys. 7.15 Naprężenia zredukowane HMH (MPa) betonu w podstawie w widoku od przodu oraz od tyłu.

## 7.2 Przypadek 2: $F_z = -20 \text{ kN}$ , $M_y = -200 \text{ kNm}$

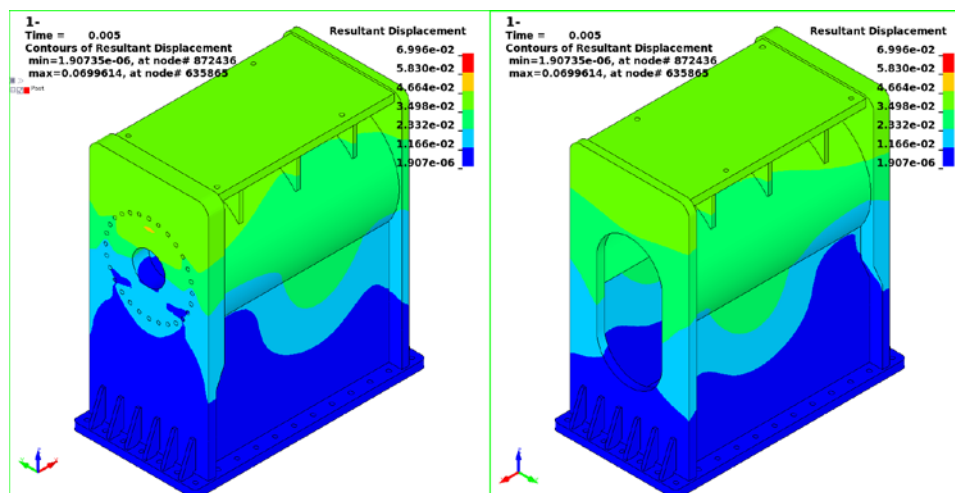
Konstrukcję wsporcą obciążono siłą pionową o wartości  $-20 \text{ kN}$  oraz momentem zginającym o wartości  $-200 \text{ kNm}$  zgodnie ze schematem przedstawionym na Rys. 7.1.



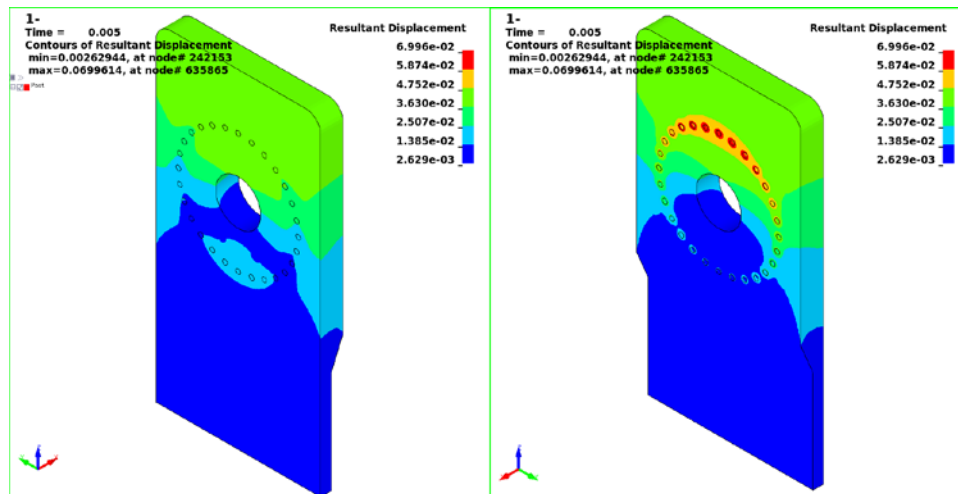
Rys. 7.16 Schemat obciążenia nr 2:  $F_z = -20 \text{ kN}$ ,  $M_y = -200 \text{ kNm}$

### 7.2.1 Konstrukcja wsporcza

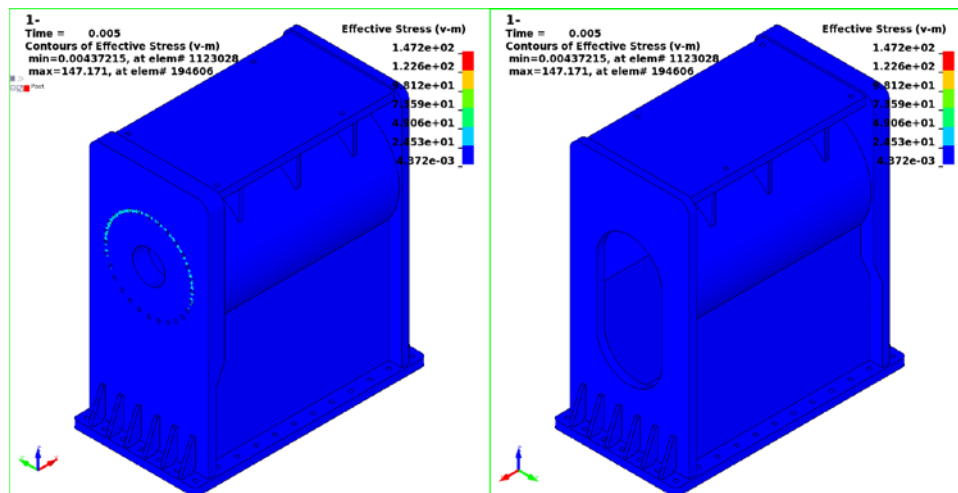
W tej sekcji znajdują się rezultaty wypadkowych przemieszczeń oraz naprężeń zredukowanych HMM dla konstrukcji wsporczej i przedstawiono je na Rys. 7.17, Rys. 7.18, Rys. 7.19 i Rys. 7.20. Największe wartości zarówno dla przemieszczeń jak i naprężeń znajdują się na płycie czołowej konstrukcji, w okolicach otworów łączących konstrukcję z płytami pośrednimi. Maksymalna wartość przemieszczeń wynosi ok.  $0.07 \text{ mm}$ . Maksymalna wartość naprężeń zredukowanych HMM wynosi  $147.2 \text{ MPa}$ . Naprężenia zredukowane w pozostałych elementach tej części konstrukcji nie przekraczają  $11 \text{ MPa}$ . Naprężenia w spoinach konstrukcji nie przekraczają maksymalnej wartości  $10.43 \text{ MPa}$ .



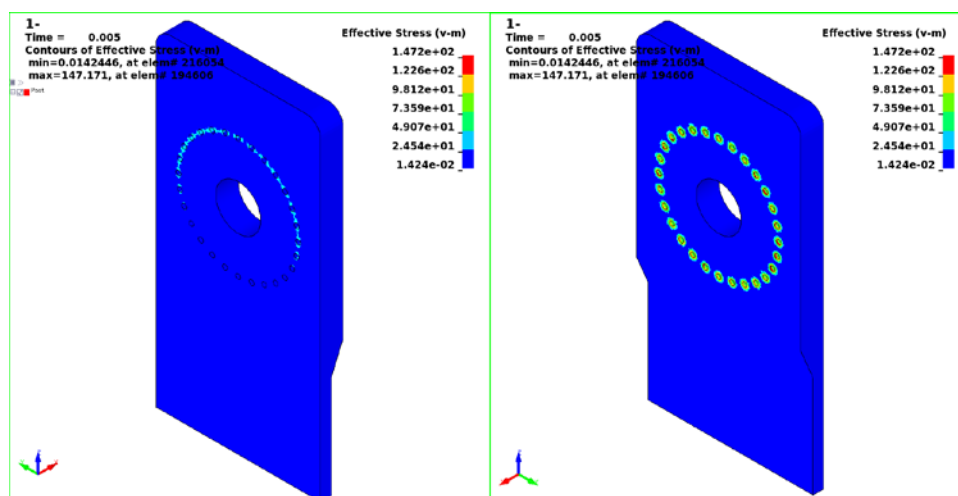
Rys. 7.17 Wypadkowe przemieszczenia (mm) konstrukcji wsporczej w widoku od przodu oraz od tyłu.



Rys. 7.18 Wypadkowe przemieszczenia (mm) płyty czołowej konstrukcji wsporczej w widoku od przodu oraz od tyłu.



Rys. 7.19 Naprężenia zredukowane HMH (MPa) konstrukcji wsporczej w widoku od przodu oraz od tyłu.

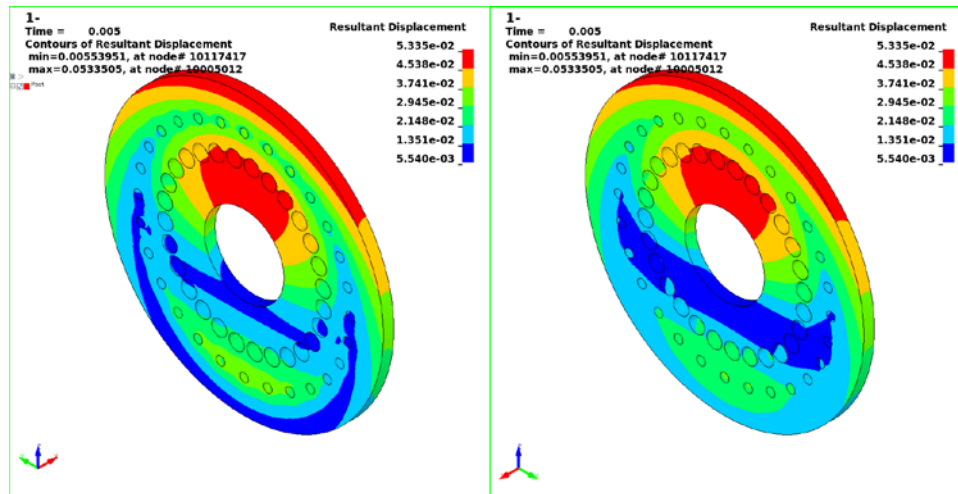


Rys. 7.20 Naprężenia zredukowane HMH (MPa) płyty czołowej konstrukcji wsporczej w widoku od przodu oraz od tyłu.

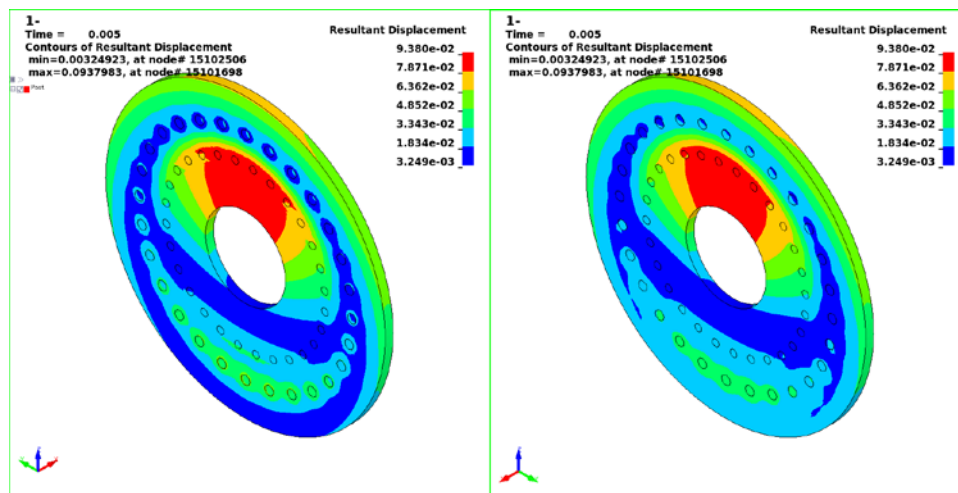


## 7.2.2 Płyty pośrednie

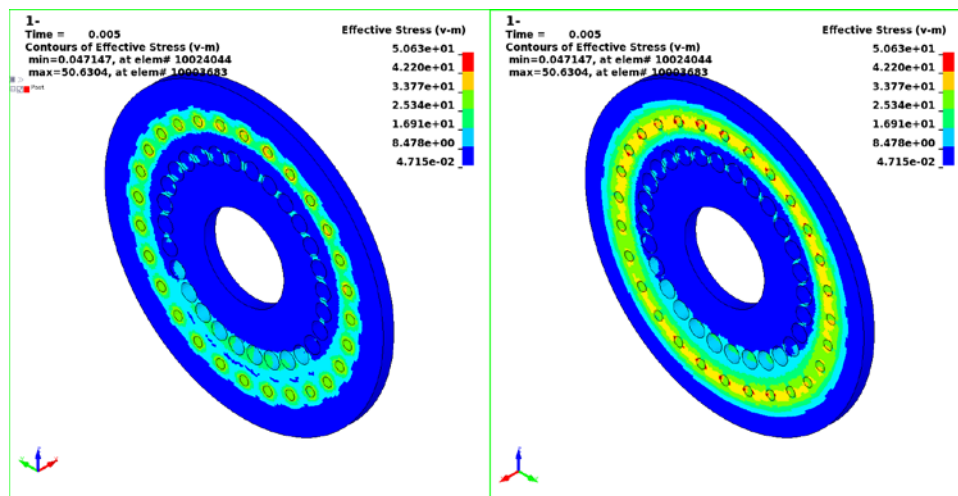
W tej sekcji znajdują się rezultaty wypadkowych przemieszczeń oraz naprężeń zredukowanych HMH dla płyt pośrednich (Rys. 7.21, Rys. 7.22, Rys. 7.23 i Rys. 7.24). Największa wartość przemieszczenia wypadkowego dla wewnętrznej płyty pośredniej wynosi ok. 0.05 mm, natomiast dla płyty zewnętrznej wartość ta wynosi ok. 0.09 mm. Wartości maksymalne przemieszczeń dla obu przypadków znajdują się w okolicach wewnętrznego okręgu otworów na śruby łączące. Maksymalna wartość naprężenia zredukowanego HMH dla wewnętrznej płyty pośredniej wynosi ok. 50.6 MPa, natomiast dla płyty zewnętrznej wartość ta wynosi ok. 189.8 MPa. Maksymalne naprężenia HMH dla obu przypadków wystąpiły w okolicach zewnętrznego okręgu otworów na śruby łączące.



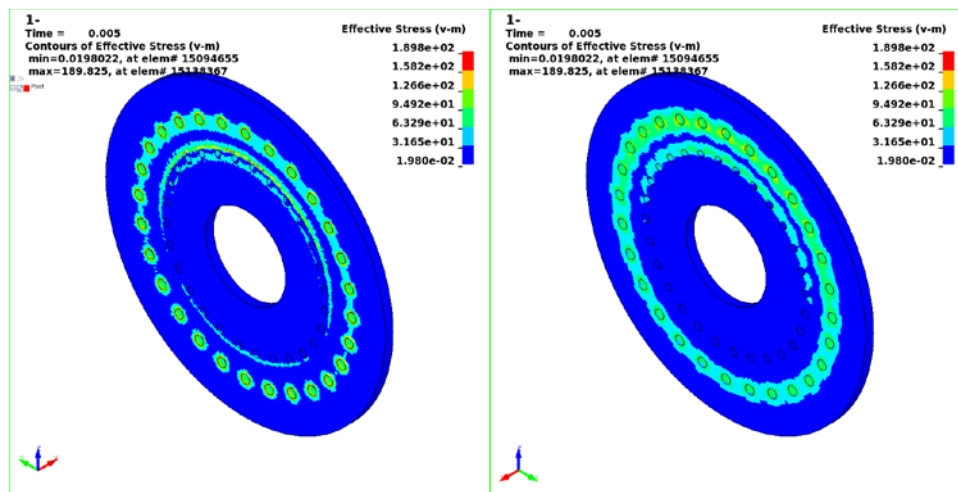
Rys. 7.21 Wypadkowe przemieszczenia (mm) wewnętrznej płyty pośredniej w widoku od przodu oraz od tyłu.



Rys. 7.22 Wypadkowe przemieszczenia (mm) zewnętrznej płyty pośredniej w widoku od przodu oraz od tyłu.



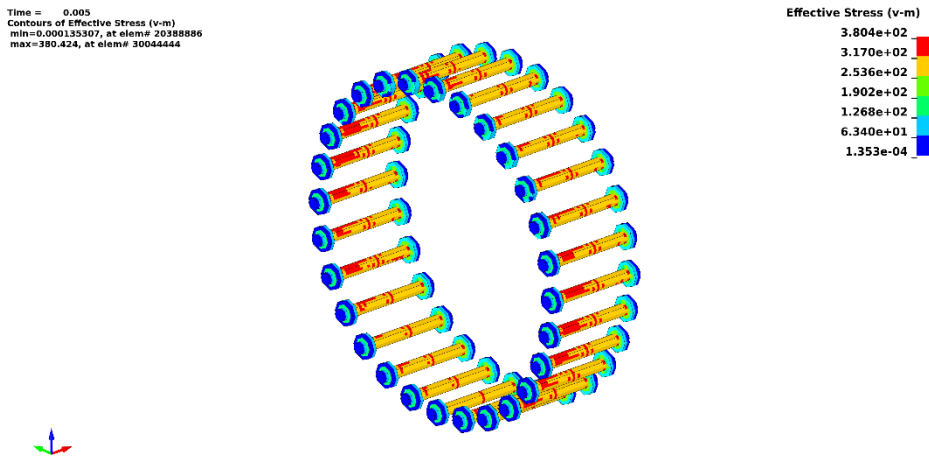
Rys. 7.23 Naprężenia zredukowane HMM (MPa) wewnętrznej płyty pośredniej w widoku od przodu oraz od tyłu.



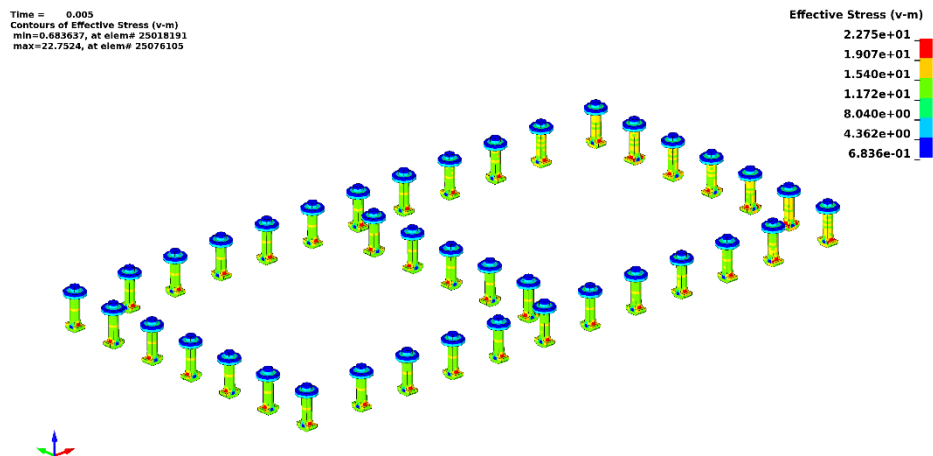
Rys. 7.24 Naprężenia zredukowane HMM (MPa) zewnętrznej płyty pośredniej w widoku od przodu oraz od tyłu.

### 7.2.3 Łączniki

W tej sekcji znajdują się rezultaty naprężeń zredukowanych HMM dla łączników płyt pośrednich do płyty czołowej (Rys. 7.25) oraz łączników podstawy stanowiska do szyn umocowanych w podłożu (Rys. 7.26). Największa wartość naprężeń zredukowanych HMM dla łączników płyt pośrednich wynosi 380.4 MPa, natomiast w przypadku łączników podstawy jest to 22.8 MPa. Odpowiada to maksymalnej sile w łącznikach dla płyt pośrednich równej ok. 200 kN, natomiast dla łączników w podstawie ok. 10.2 kN.



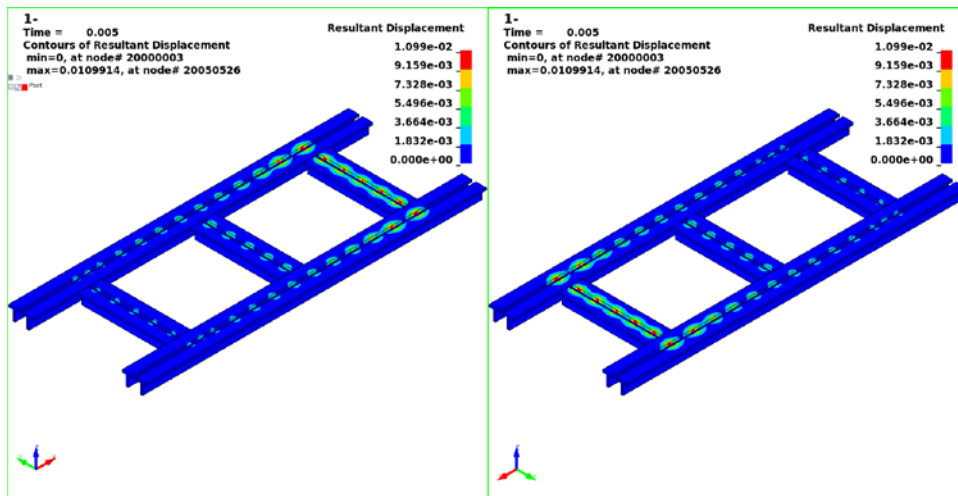
Rys. 7.25 Naprężenia zredukowane HMM (MPa) łączników płyt pośrednich do płyty czołowej.



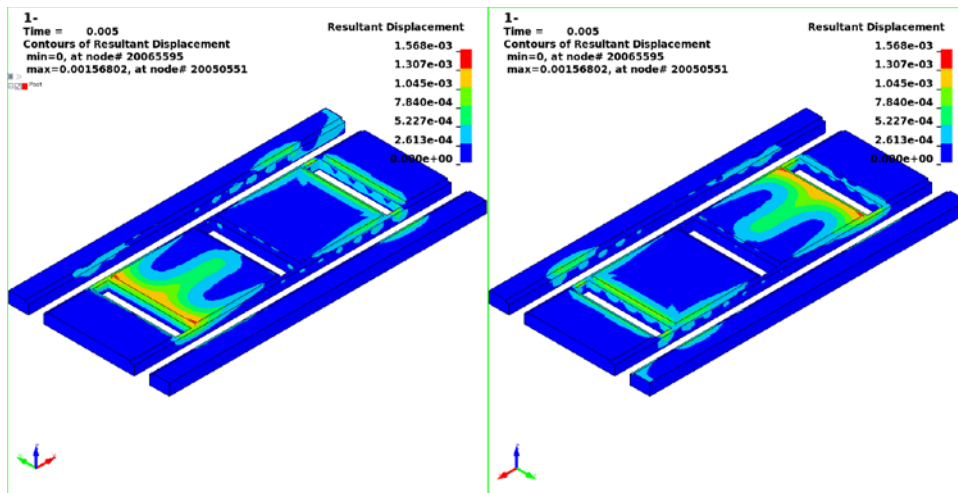
Rys. 7.26 Naprężenia zredukowane HMM (MPa) łączników podstawy stanowiska do szyn.

## 7.2.4 Podłoże

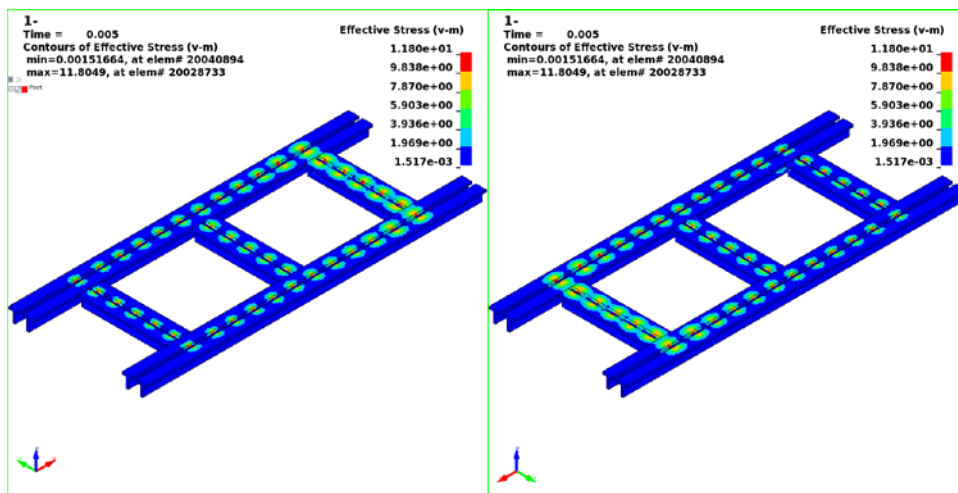
W tej sekcji znajdują się rezultaty wypadkowych przemieszczeń oraz naprężeń zredukowanych HMM dla podłoża, składającego się ze stalowych szyn oraz betonowej płyty wypełniającej (Rys. 7.27, Rys. 7.28, Rys. 7.29 i Rys. 7.30). Największa wartość przemieszczenia wypadkowego dla szyn wynosi ok. 0.01 mm, natomiast dla części betonowej 0.002 mm. Dla szyn maksymalne przemieszczenie wystąpiło w tylnej części szyn, gdzie konstrukcja jest wrywana momentem zginającym. W przypadku części betonowej maksymalne przemieszczenie znajduje się z przodu, gdzie płyta jest dociskana. Maksymalna wartość naprężenia zredukowanego HMM w szynach wynosi 11.8 MPa, natomiast w części betonowej 1.5 MPa. Maksymalne wartości naprężeń w obu przypadkach wystąpiły w tylnej części konstrukcji, gdzie podłoże jest wrywane.



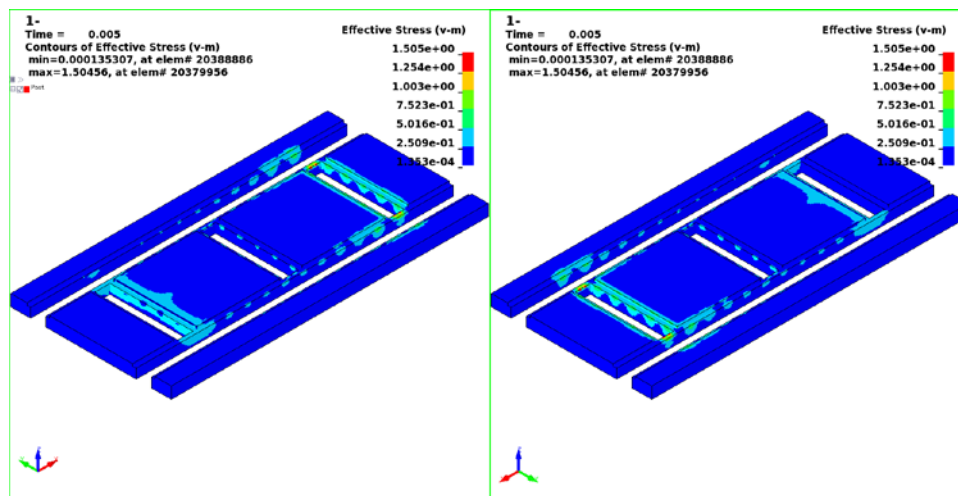
Rys. 7.27 Wypadkowe przemieszczenia (mm) szyn w widoku od przodu oraz od tyłu.



Rys. 7.28 Wypadkowe przemieszczenia (mm) betonu w podstawie w widoku od przodu oraz od tyłu.



Rys. 7.29 Naprężenia zredukowane HMM (MPa) szyn w widoku od przodu oraz od tyłu.

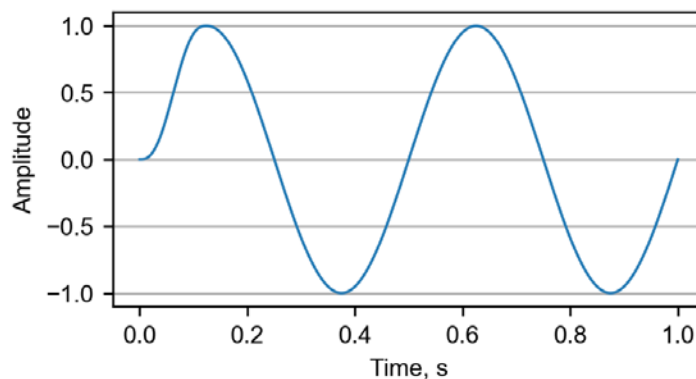


Rys. 7.30 Naprężenia zredukowane HMH (MPa) betonu w podstawie w widoku od przodu oraz od tyłu.

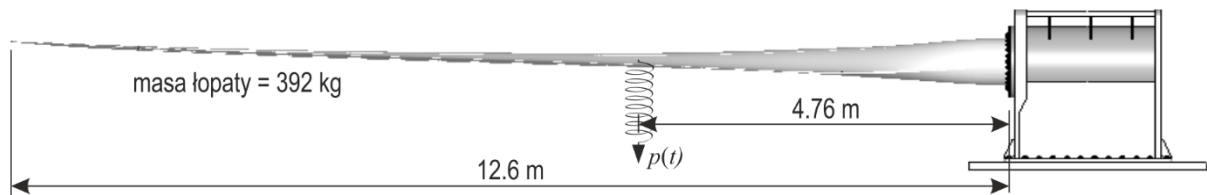
## 8. Obliczenia dynamiczne

### 8.1 Obciążenie dynamiczne

Obciążenie dynamiczne przyjęto zgodnie z założeniami dotyczącymi badań (punkt 0), tj. częstotliwość wymuszenia odpowiada pierwszej częstotliwości drgań własnych łopaty turbiny wiatrowej (**2.14 Hz**, patrz punkty 6.2 i 6.3). Częstotliwość ta mieści się w zakresie częstotliwości wymuszeń, na którą przewidziano konstrukcję wsporczą, tj. 0.5 – 4.0 Hz. **Amplituda wymuszenia** wynosi **125 mm** dla badania łopaty w położeniu „**flapwise**” oraz **50 mm** dla łopaty w położeniu „**edgewise**”. Wielkości te przyjęto analogicznie jak w artykule [11]. Wymuszenie przyłożono w odległości 4.76 m od zamocowania łopaty w konstrukcji wsporczej, wielkość tą ustalono analogicznie jak to przyjęto w badaniach przedstawionych w artykule [11], przy założeniu długości łopaty równej 12.6 m. Czas obliczeń dynamicznych ustalono na 0.9356 s, co pozwala wykonać 2 pełne cykle obciążenia. Wykres przyłożonego wymuszenia w czasie przedstawiono na Rys. 8.1 (uwaga, jest to znormalizowany wykres, dla którego oś rzędnych i odciętych należy odpowiednio przeskalować w zależności od częstości i amplitudy wymuszenia). Schemat obciążenia dynamicznego przedstawiono na Rys. 8.2.



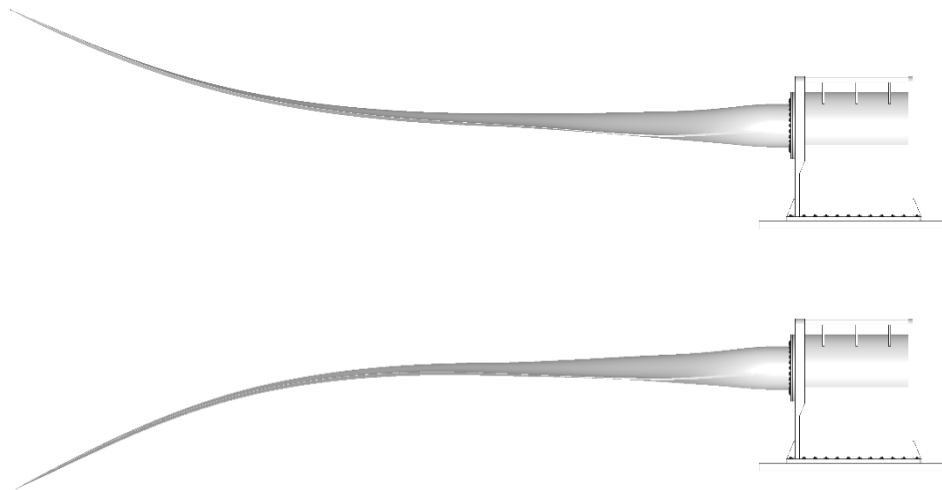
Rys. 8.1 Znormalizowana krzywa wymuszenia wykorzystana do analiz dynamicznych.



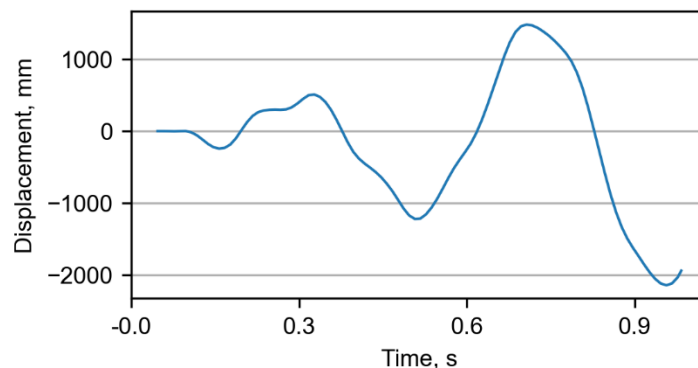
Rys. 8.2 Schemat obciążenia dynamicznego.

## 8.2 Przypadek 1: Łopata w położeniu flapwise

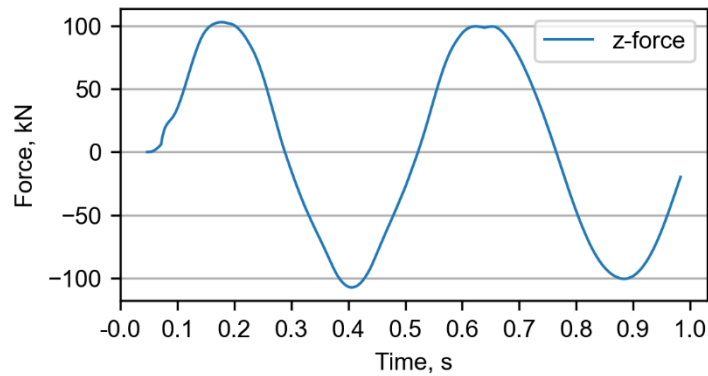
Pierwsza z analiz dotyczy łopaty w położeniu „flapwise”, której widok na dwie przeciwstawne amplitudy przedstawiono na Rys. 8.3. Krzywa przemieszczenia końca łopaty w czasie znajduje się na Rys. 8.4. Maksymalna wartość bezwzględna przemieszczenia w analizie wyniosła 2193,8 mm. Dodatkowo, na Rys. 8.5 przedstawiono siłę wymuszającą w czasie, gdzie maksymalna wartość bezwzględna siły wymuszającej wyniosła 107,4 kN.



Rys. 8.3 Skrajne położenia końca łopaty w czasie badań dynamicznych.



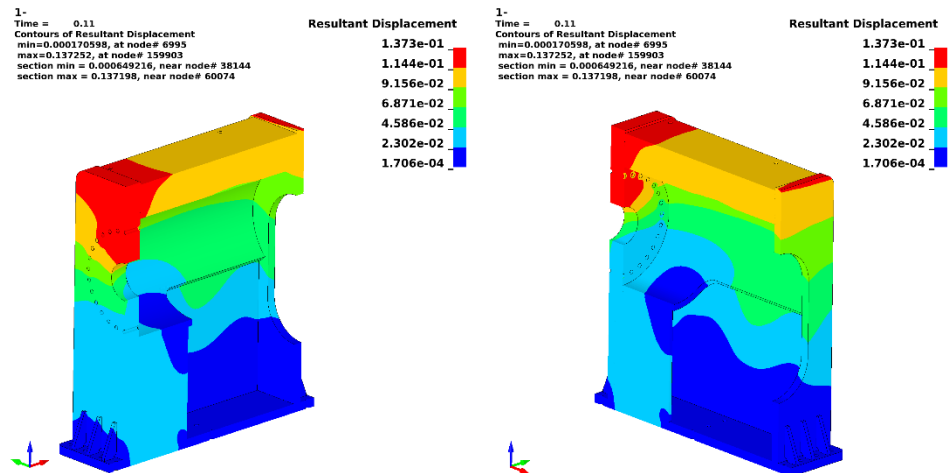
Rys. 8.4 Wykres przemieszczenia pionowego końca łopaty w czasie badań dynamicznych.



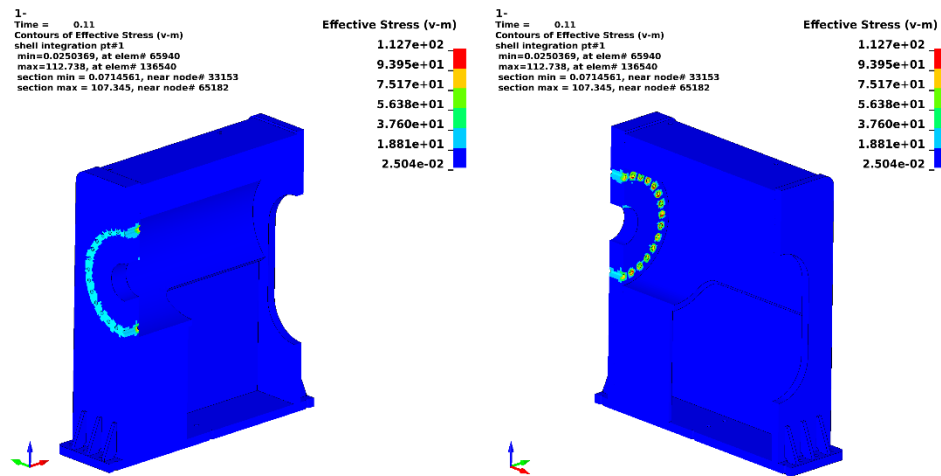
Rys. 8.5 Wykres siły wymuszającej w czasie przyłożonej w odległości 4.76 m od mocowania łopaty do konstrukcji.

### 8.2.1 Konstrukcja wsporcza

W tej sekcji znajdują się rezultaty wypadkowych przemieszczeń oraz naprężeń zredukowanych HMH dla konstrukcji wsporczej i przedstawiono je na Rys. 8.6 i Rys. 8.7. Największe wartości zarówno dla przemieszczeń jak i naprężeń znajdują się w płycie czołowej konstrukcji, w okolicach otworów łączących konstrukcję z płytami pośrednimi. Maksymalna wartość przemieszczeń wynosi ok. 0.14 mm (0.11 s). Maksymalna wartość naprężeń zredukowanych HMH wynosi 112.7 MPa (0.11 s). Naprężenia zredukowane w pozostałych miejscach w tym elemencie nie przekraczają 19.5 MPa (0.35 s). Naprężenia w spoinach konstrukcji nie przekraczają maksymalnej wartości 19.5 MPa (0.35 s).



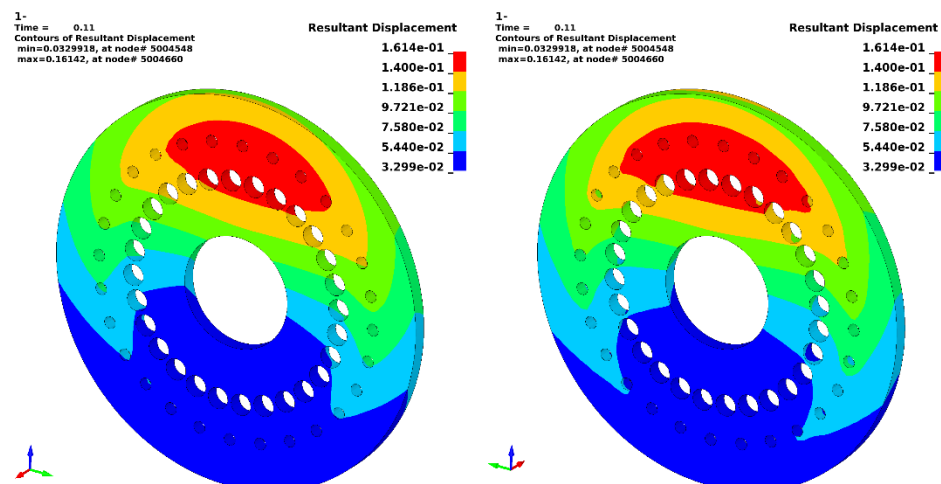
Rys. 8.6 Wypadkowe przemieszczenia (mm) konstrukcji wsporczej w widoku od przodu oraz od tyłu dla chwili czasowej 0.11 s.



Rys. 8.7 Naprężenia zredukowane HMH (MPa) konstrukcji wsporczej w widoku od przodu oraz od tyłu dla chwili czasowej 0.11 s.

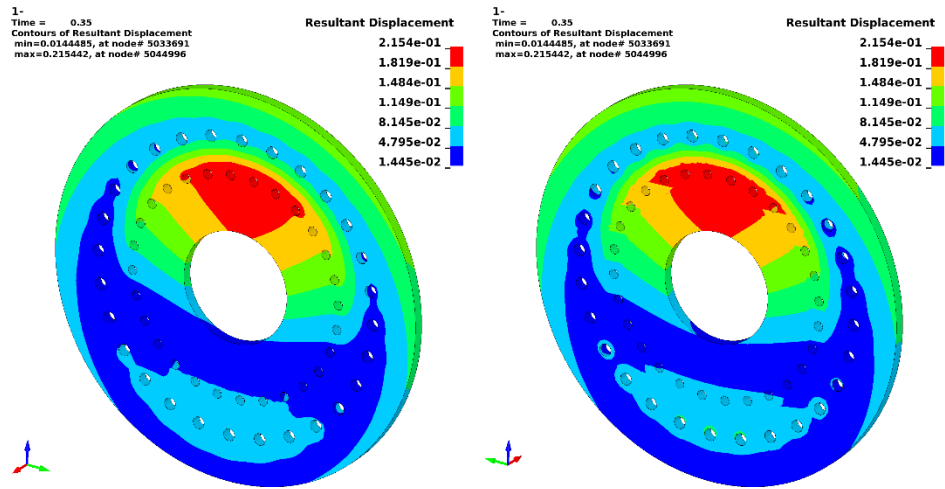
### 8.2.2 Płyty pośrednie

W tej sekcji znajdują się rezultaty wypadkowych przemieszczeń oraz naprężeń zredukowanych HMH dla płyt pośrednich (Rys. 8.8, Rys. 8.9, Rys. 8.10 i Rys. 8.11). Największa wartość przemieszczenia wypadkowego dla wewnętrznej płyty pośredniej wynosi ok. 0.16 mm (0.11 s), natomiast dla płyty zewnętrznej maksymalne przemieszczenie wynosi ok. 0.22 mm (0.35 s). Wartości maksymalne przemieszczeń dla obu przypadków znajdują się w okolicach wewnętrznego okręgu otworów na śruby łączące. Maksymalna wartość naprężenia zredukowanego HMH dla wewnętrznej płyty pośredniej wynosi ok. 63.3 MPa (0.90 s), natomiast dla płyty zewnętrznej wartość ta wynosi ok. 261.9 MPa (0.35 s). Maksymalne naprężenia HMH dla obu przypadków wystąpiły w okolicach zewnętrznego okręgu otworów na śruby łączące.

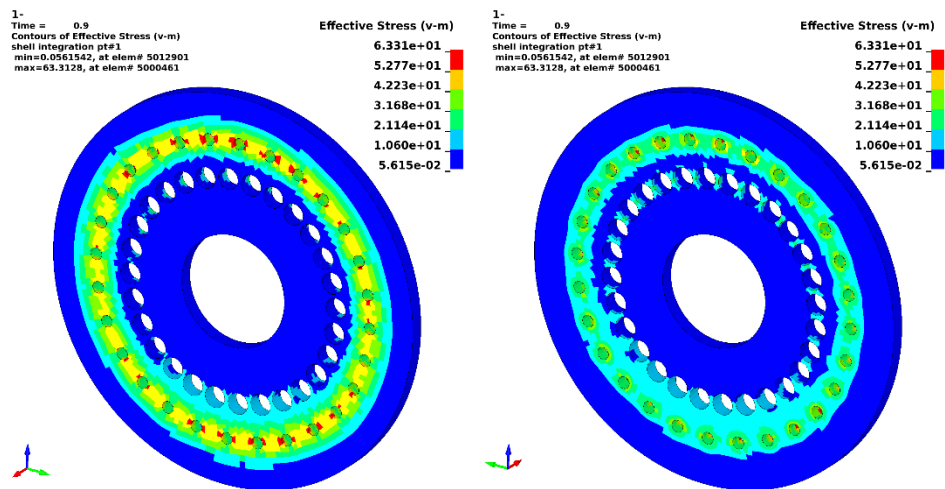


Rys. 8.8 Wypadkowe przemieszczenia (mm) wewnętrznej płyty pośredniej w widoku od przodu oraz od tyłu dla chwili czasowej 0.11 s.

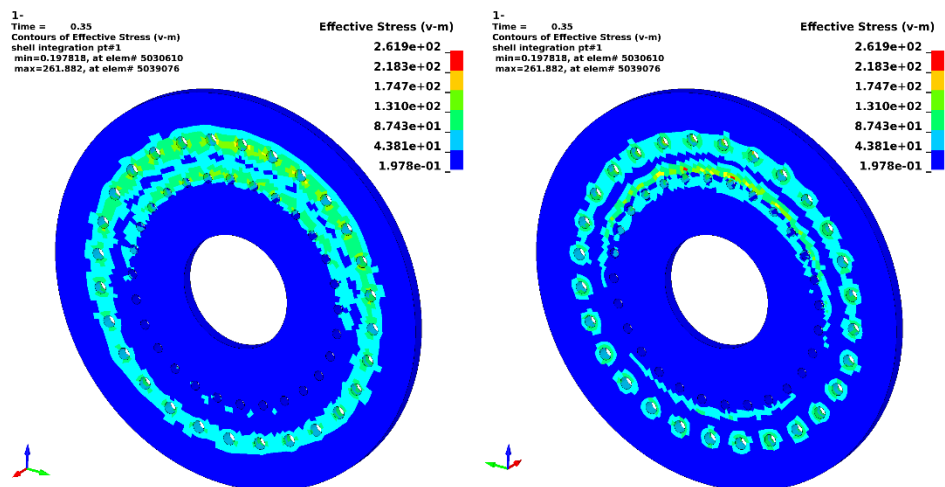




Rys. 8.9 Wypadkowe przemieszczenia (mm) zewnętrznej płyty pośredniej w widoku od przodu oraz od tyłu dla chwili czasowej 0.35 s.



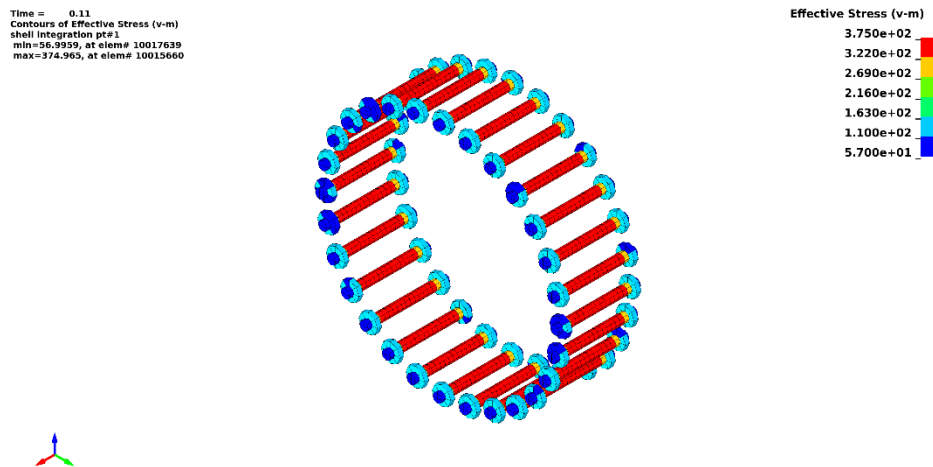
Rys. 8.10 Naprężenia zredukowane HMM (MPa) wewnętrznej płyty pośredniej w widoku od przodu oraz od tyłu dla chwili czasowej 0.90 s.



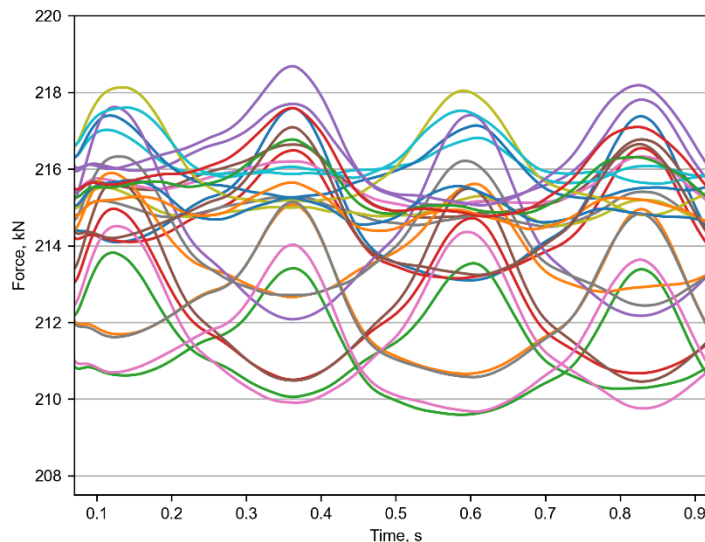
Rys. 8.11 Naprężenia zredukowane HMM (MPa) zewnętrznej płyty pośredniej w widoku od przodu oraz od tyłu dla chwili czasowej 0.35 s.

### 8.2.3 Łączniki

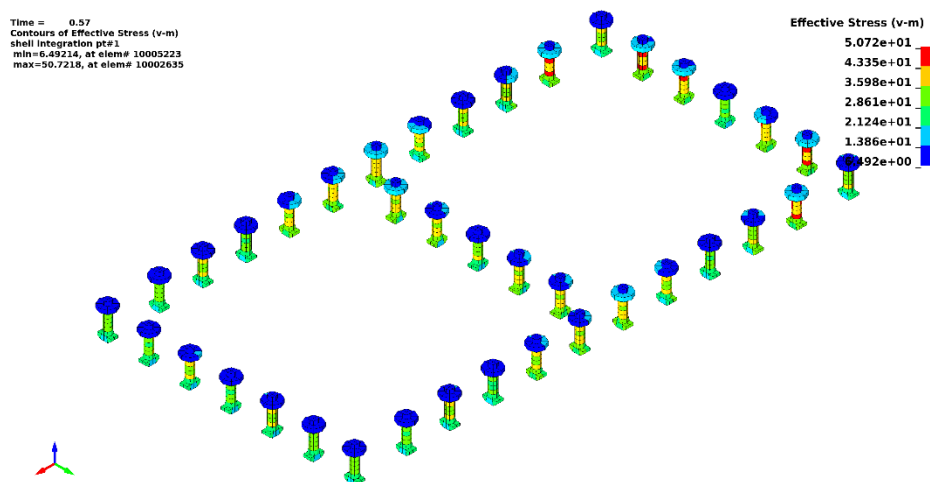
W tej sekcji znajdują się rezultaty naprężeń zredukowanych HMM dla łączników płyt pośrednich do płyty czołowej (Rys. 8.12) oraz łączników podstawy stanowiska do szyn umocowanych w podłożu (Rys. 8.14). Największa wartość naprężeń zredukowanych HMM dla łączników płyt pośrednich wynosi 375.0 MPa (0.11 s), natomiast w przypadku łączników podstawy jest to 50.7 MPa (0.57 s). Odpowiada to maksymalnej sile w łącznikach dla płyt pośrednich równej ok. 218.1 kN, natomiast dla łączników w podstawie ok. 26.3 kN. Przebiegi sił w czasie dla łączników płyt pośrednich przedstawiono na Rys. 8.13, a dla łączników podstawy na Rys. 8.15.



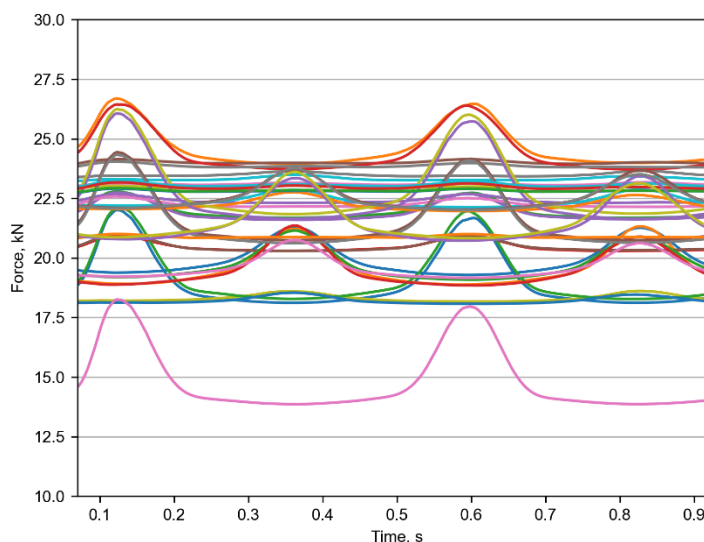
Rys. 8.12 Naprężenia zredukowane HMM (MPa) łączników płyt pośrednich do płyty czołowej dla chwili czasowej 0.11 s.



Rys. 8.13 Wykresy siły normalnej w czasie dla przekrojów łączników płyt pośrednich do płyty czołowej.



Rys. 8.14 Naprężenia zredukowane HMM (MPa) łączników podstawy stanowiska do szyn dla chwili czasowej 0.57 s.

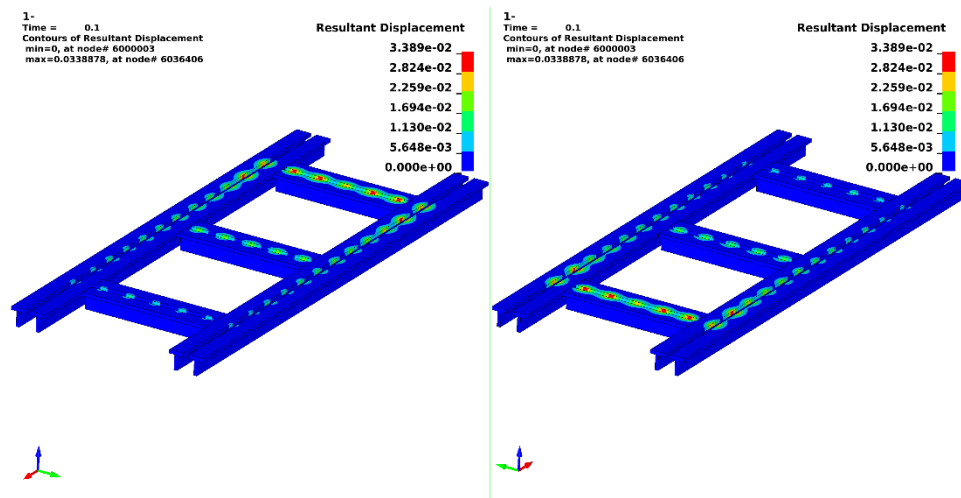


Rys. 8.15 Wykresy siły normalnej w czasie dla przekrojów łączników podstawy konstrukcji do szyn.

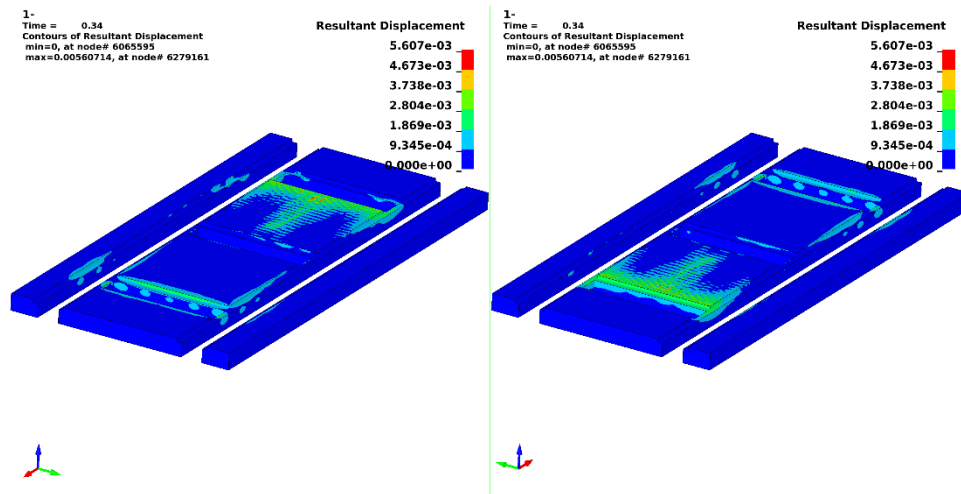
## 8.2.4 Podłoże

W tej sekcji znajdują się rezultaty wypadkowych przemieszczeń oraz naprężeń zredukowanych HMM dla podłoża, składającego się ze stalowych szyn oraz betonowej płyty wypełniającej (Rys. 8.16, Rys. 8.17, Rys. 8.18 i Rys. 8.19). Największa wartość przemieszczenia wypadkowego dla szyn wynosi ok. 0.034 mm (0.10 s), natomiast dla części betonowej 0.006 mm (0.34 s). Dla szyn maksymalne przemieszczenie występuje naprzemiennie w przedniej oraz tylnej części szyn, zależnie od tego gdzie aktualnie konstrukcja jest wrywana momentem zginającym. W przypadku części betonowej maksymalne przemieszczenie znajduje w miejscu, gdzie płyta jest dociskana. Maksymalna wartość naprężenia zredukowanego HMM w szynach wynosi 36.4 MPa (0.10 s), natomiast w części betonowej 9.4 MPa (0.34 s). Maksymalne wartości naprężeń w obu przypadkach występują w miejscu, gdzie podłoże jest wrywane. Na Rys. 8.20 przedstawiono przebieg reakcji pionowej (na kierunku z) w czasie dla utwierdzonej części podłoża, gdzie maksymalna wartość wynosi 210 kN na docisk, a minimalna wartość 5 kN na wrywanie.

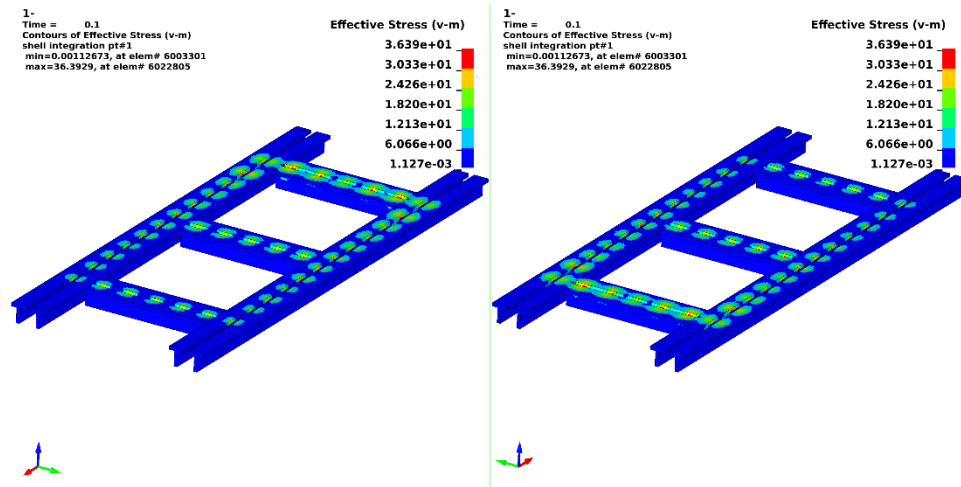
Należy zaznaczyć, że reakcję odczytano w miejscu warunków brzegowych, tzn. na głębokości 11 cm poniżej poziomu gruntu (tzn. masa części szyn oraz płyty betonowej jest wliczana do wyznaczonego ciężaru). Oprócz tego, na Rys. 8.21 przedstawiono również przebiegi w czasie reakcji poziomych (na kierunkach x oraz y), gdzie ich maksymalne wartości wynoszą odpowiednio 2.4 kN oraz 4.9 kN.



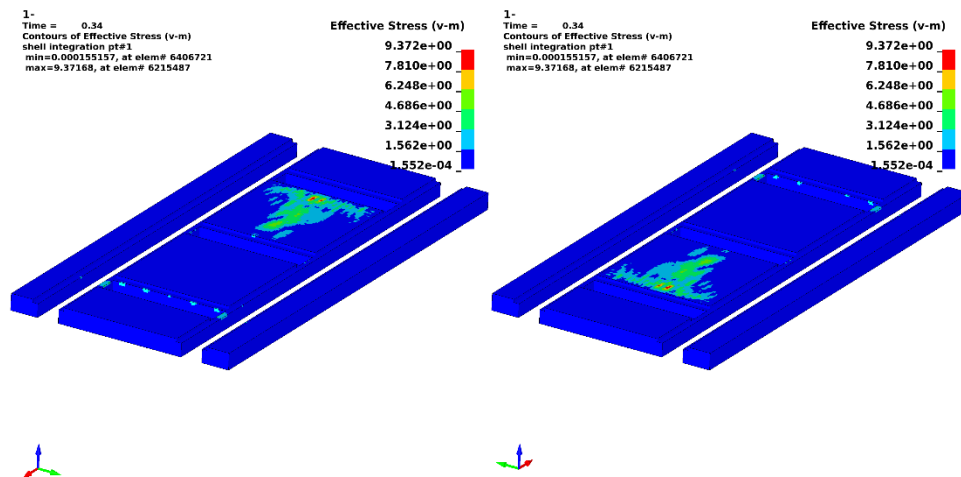
Rys. 8.16 Wypadkowe przemieszczenia (mm) szyn w widoku od przodu oraz od tyłu dla chwili czasowej 0.10 s.



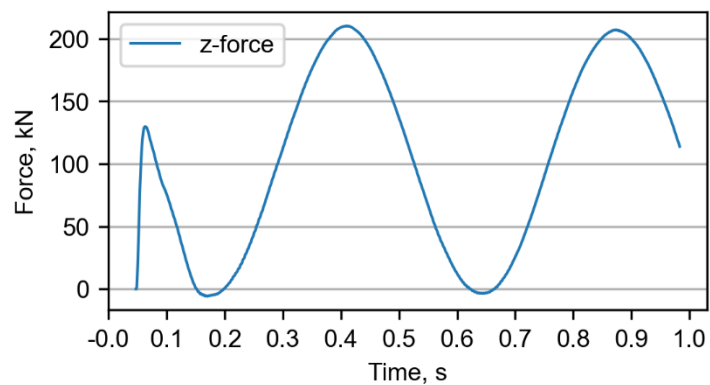
Rys. 8.17 Wypadkowe przemieszczenia (mm) betonu w podstawie w widoku od przodu oraz od tyłu dla chwili czasowej 0.34 s.



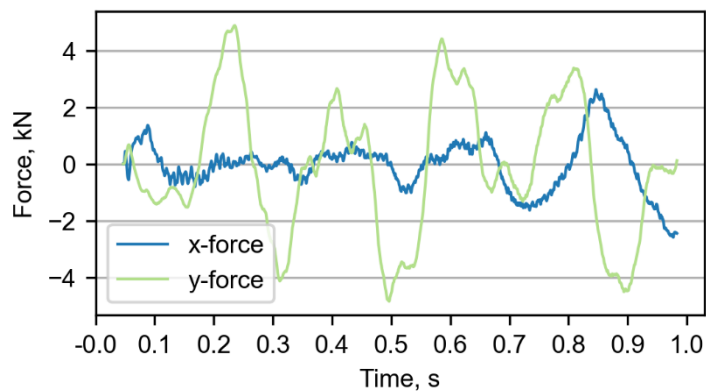
Rys. 8.18 Naprężenia zredukowane HMM (MPa) szyn w widoku od przodu oraz od tyłu dla chwili czasowej 0.10 s.



Rys. 8.19 Naprężenia zredukowane HMM (MPa) betonu w podstawie w widoku od przodu oraz od tyłu dla chwili czasowej 0.34 s.



Rys. 8.20 Wykres reakcji pionowej w czasie odczytanej z miejsca zastosowanych warunków brzegowych



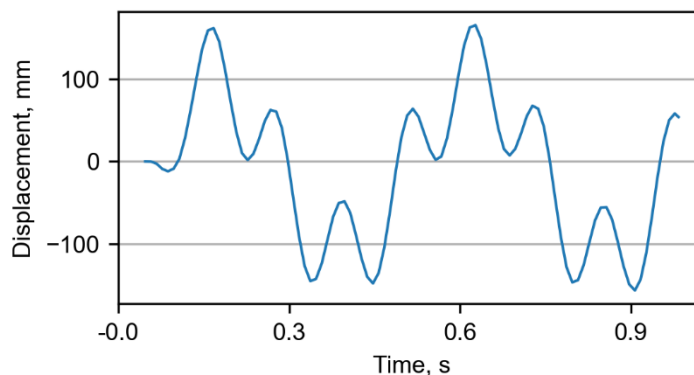
Rys. 8.21 Wykres reakcji poziomych w czasie odczytanych z miejsca zastosowanych warunków brzegowych.

### 8.3 Przypadek 2: Łopata w położeniu edgewise

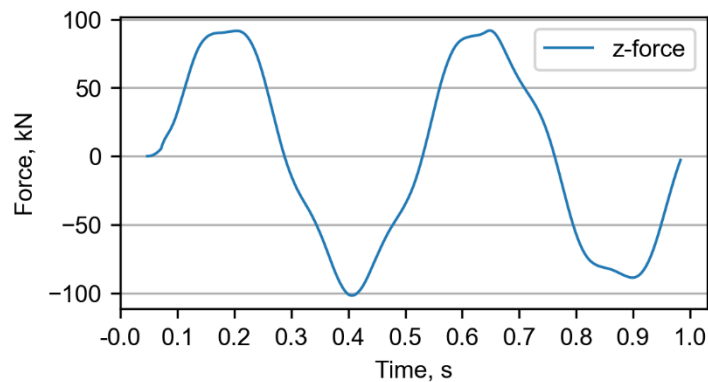
Druga z analiz dotyczy łopaty w położeniu „edgewise”, której widok na dwie przeciwstawne amplitudy przedstawiono na Rys. 8.22. Krzywa przemieszczenia końca łopaty w czasie znajduje się na Rys. 8.23. Maksymalna wartość bezwzględna przemieszczenia w analizie wyniosła 167.1 mm. Dodatkowo, na Rys. 8.24 przedstawiono siłę wymuszającą w czasie, gdzie maksymalna wartość bezwzględna siły wymuszającej wyniosła 101.9 kN.



Rys. 8.22 Skrajne położenia końca łopaty w czasie badań dynamicznych.



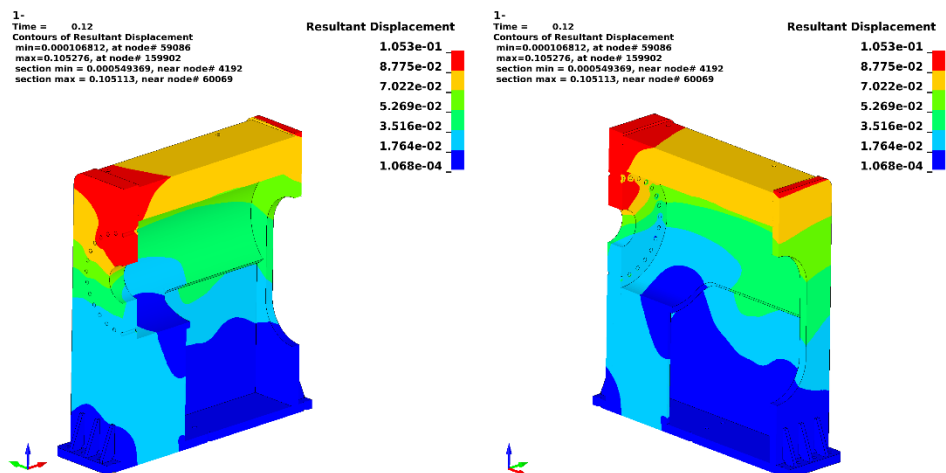
Rys. 8.23 Wykres przemieszczenia pionowego końca łopaty w czasie badań dynamicznych.



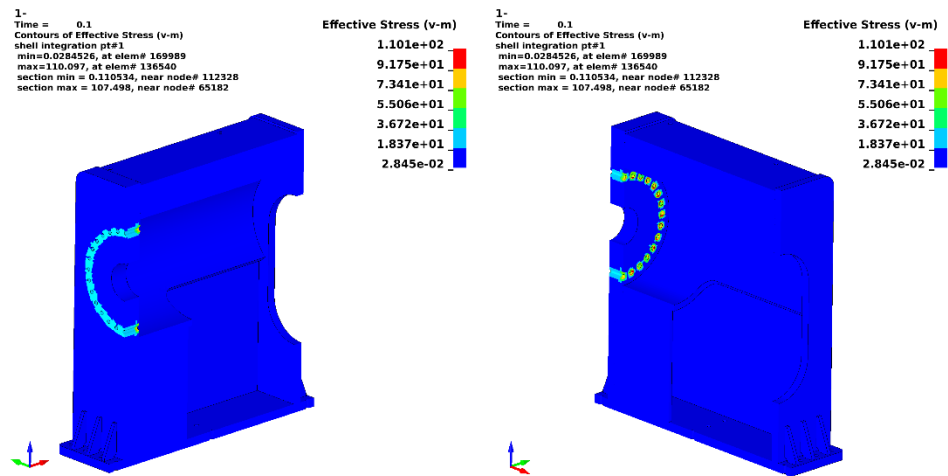
Rys. 8.24 Wykres siły wymuszającej w czasie przyłożonej w odległości 4.76 m od mocowania łopaty do konstrukcji.

### 8.3.1 Konstrukcja wsporcza

W tej sekcji znajdują się rezultaty wypadkowych przemieszczeń oraz naprężeń zredukowanych HMH dla konstrukcji wsporczej i przedstawiono je na Rys. 8.25 i Rys. 8.26. Największe wartości zarówno dla przemieszczeń jak i naprężeń znajdują się w płycie czołowej konstrukcji, w okolicach otworów łączących konstrukcję z płytami pośrednimi. Maksymalna wartość przemieszczeń wynosi ok. 0.11 mm (0.12 s). Maksymalna wartość naprężeń zredukowanych HMH wynosi 110.1 MPa (0.10 s). Naprężenia zredukowane w pozostałych miejscach w tym elemencie nie przekraczają 14.7 MPa (0.35 s). Naprężenia w spoinach konstrukcji nie przekraczają maksymalnej wartości 14.7 MPa (0.35 s).



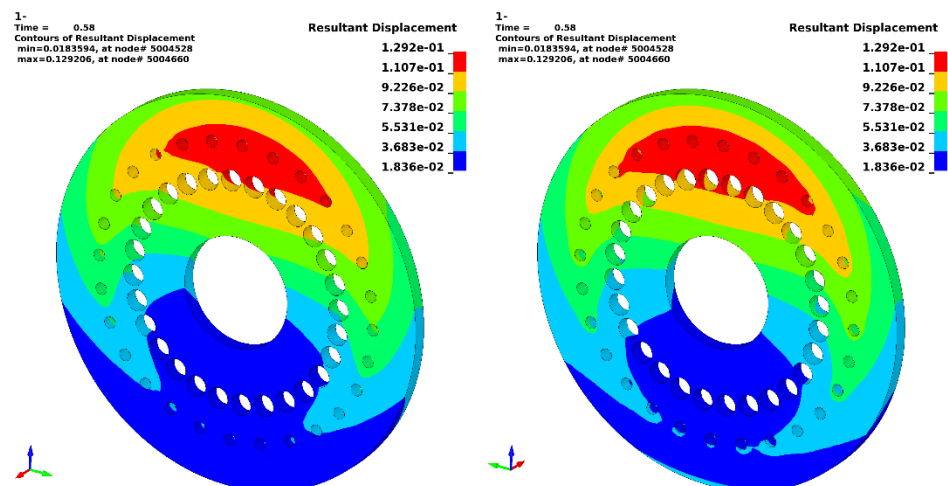
Rys. 8.25 Wypadkowe przemieszczenia (mm) konstrukcji wsporczej w widoku od przodu oraz od tyłu dla chwili czasowej 0.12 s.



Rys. 8.26 Naprężenia zredukowane HMM (MPa) konstrukcji wsporczej w widoku od przodu oraz od tyłu dla chwili czasowej 0.10 s.

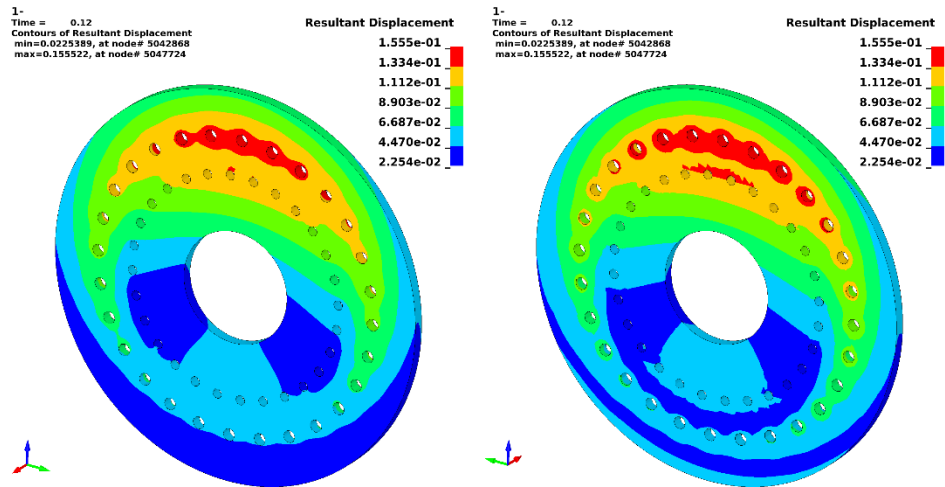
### 8.3.2 Płyty pośrednie

W tej sekcji znajdują się rezultaty wypadkowych przemieszczeń oraz naprężeń zredukowanych HMM dla płyt pośrednich (Rys. 8.27, Rys. 8.28, Rys. 8.29, Rys. 8.30). Największa wartość przemieszczenia wypadkowego dla wewnętrznej płyty pośredniej wynosi ok. 0.13 mm (0.58 s), natomiast dla płyty zewnętrznej maksymalne przemieszczenie wynosi ok. 0.16 mm (0.12 s). Wartości maksymalne przemieszczeń dla obu przypadków znajdują się w okolicach wewnętrznego okręgu otworów na śruby łączące. Maksymalna wartość naprężenia zredukowanego HMM dla wewnętrznej płyty pośredniej wynosi ok. 59.7 MPa (0.52 s), natomiast dla płyty zewnętrznej wartość ta wynosi ok. 202.2 MPa (0.35 s). Maksymalne naprężenia HMM dla obu przypadków wystąpiły w okolicach zewnętrznego okręgu otworów na śruby łączące.

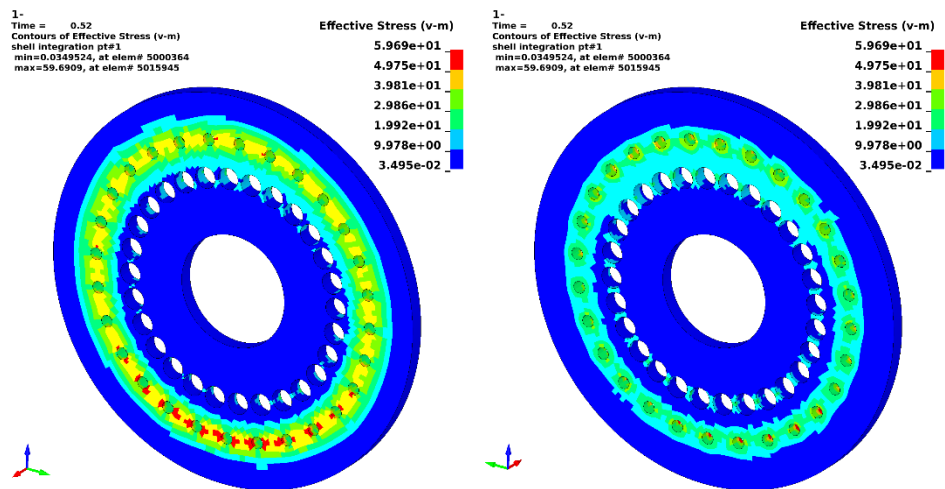


Rys. 8.27 Wypadkowe przemieszczenia (mm) wewnętrznej płyty pośredniej w widoku od przodu oraz od tyłu dla chwili czasowej 0.58 s.

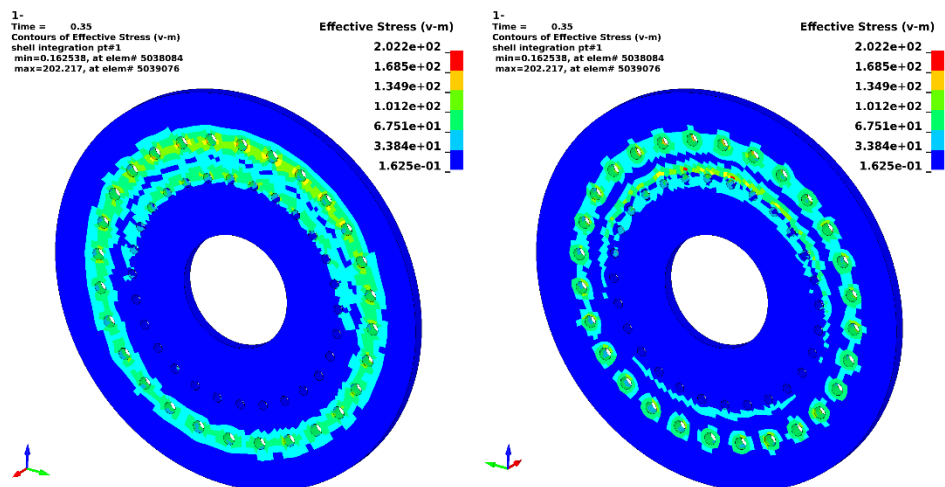




Rys. 8.28 Wypadkowe przemieszczenia (mm) zewnętrznej płyty pośredniej w widoku od przodu oraz od tyłu dla chwili czasowej 0.12 s.



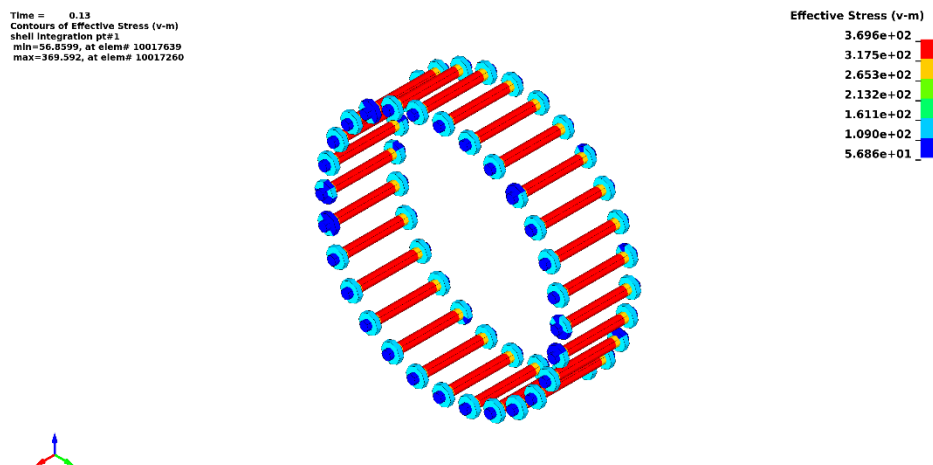
Rys. 8.29 Naprężenia zredukowane HMM (MPa) wewnętrznej płyty pośredniej w widoku od przodu oraz od tyłu dla chwili czasowej 0.52 s.



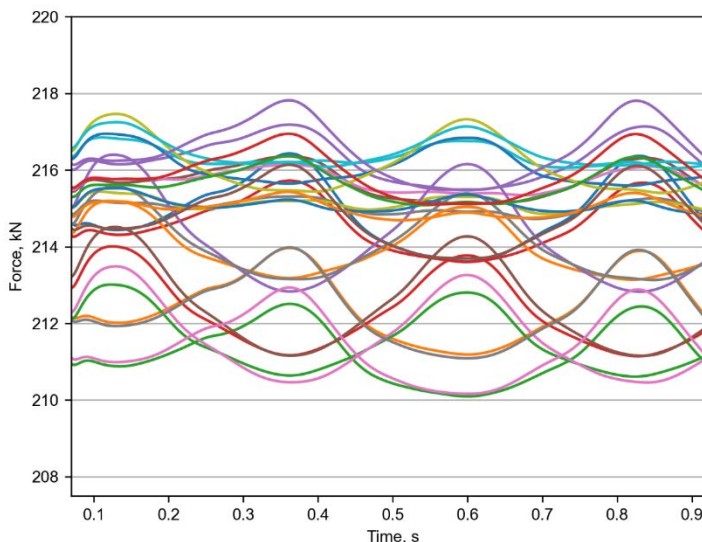
Rys. 8.30 Naprężenia zredukowane HMM (MPa) zewnętrznej płyty pośredniej w widoku od przodu oraz od tyłu dla chwili czasowej 0.35 s.

### 8.3.3 Łączniki

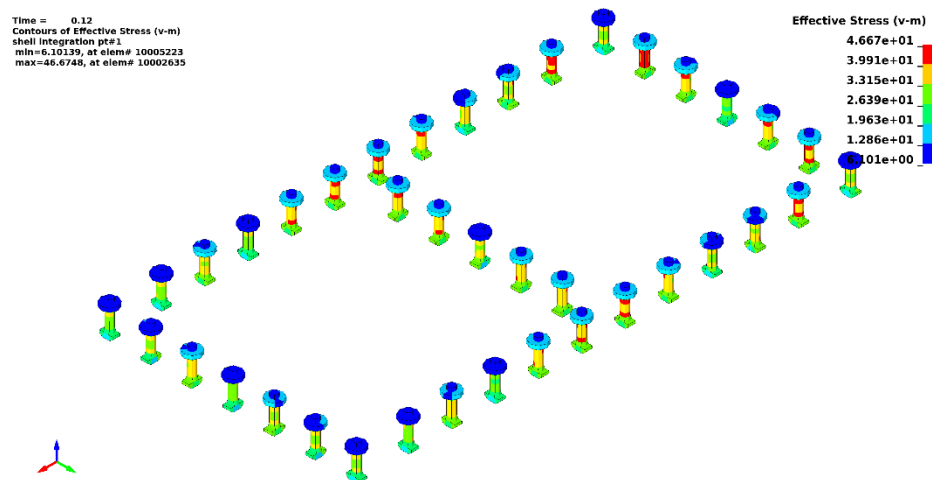
W tej sekcji znajdują się rezultaty naprężeń zredukowanych HMM dla łączników płyt pośrednich do płyty czołowej (Rys. 8.31) oraz łączników podstawy stanowiska do szyn umocowanych w podłożu (Rys. 8.33). Największa wartość naprężeń zredukowanych HMM dla łączników płyt pośrednich wynosi 369.6 MPa (0.13 s), natomiast w przypadku łączników podstawy jest to 46.7 MPa (0.12 s). Odpowiada to maksymalnej sile w łącznikach dla płyt pośrednich równej ok. 217.4 kN, natomiast dla łączników w podstawie ok. 25.5 kN. Przebiegi sił w czasie dla łączników płyt pośrednich przedstawiono na Rys. 8.32, a dla łączników podstawy na Rys. 8.34.



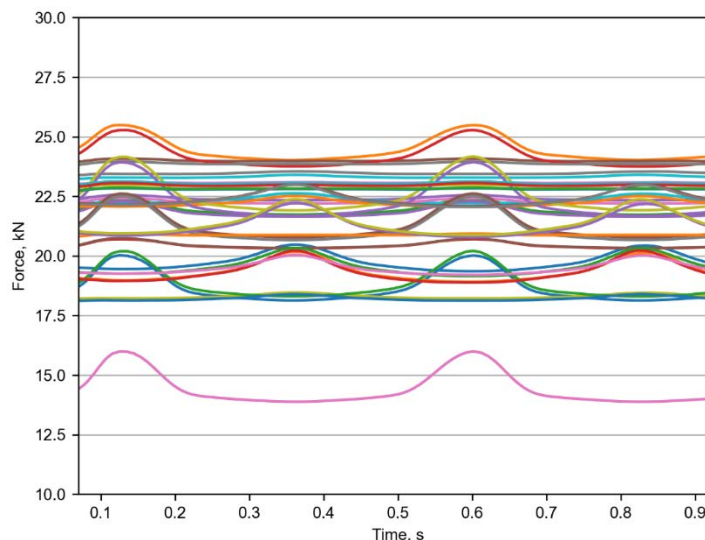
Rys. 8.31 Naprężenia zredukowane HMM (MPa) łączników płyt pośrednich do płyty czołowej dla chwili czasowej 0.13 s.



Rys. 8.32 Wykresy siły normalnej w czasie dla przekrojów łączników płyt pośrednich do płyty czołowej.



Rys. 8.33 Naprężenia zredukowane HMH (MPa) łączników podstawy stanowiska do szyn dla chwili czasowej 0.12 s.

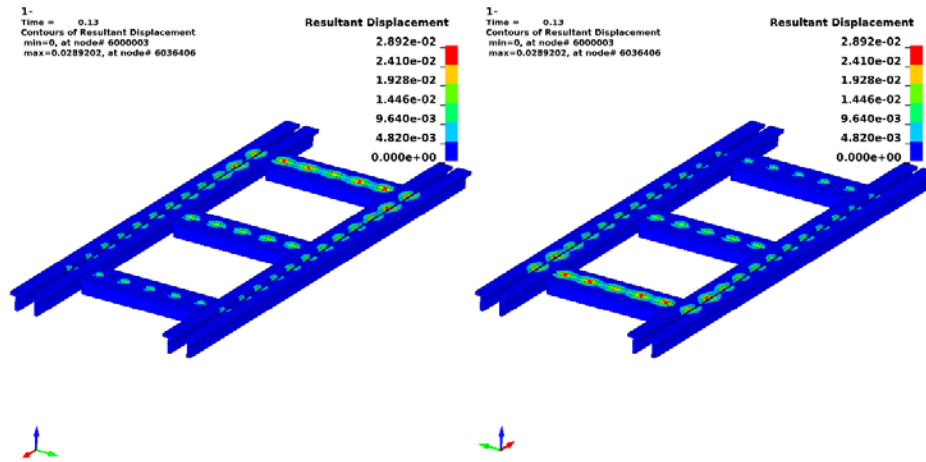


Rys. 8.34 Wykresy siły normalnej w czasie dla przekrojów łączników podstawy konstrukcji do szyn.

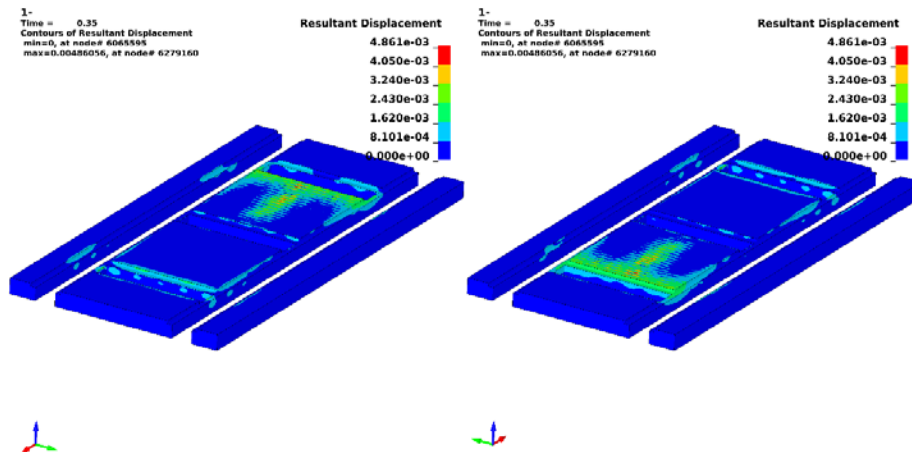
### 8.3.4 Podłoże

W tej sekcji znajdują się rezultaty wypadkowych przemieszczeń oraz naprężeń zredukowanych HMH dla podłoża, składającego się ze stalowych szyn oraz betonowej płyty wypełniającej (Rys. 8.35, Rys. 8.36, Rys. 8.37, Rys. 8.38). Największa wartość przemieszczenia wypadkowego dla szyn wynosi ok. 0.029 mm (0.13 s), natomiast dla części betonowej 0.005 mm (0.35 s). Dla szyn maksymalne przemieszczenie występuje naprzemiennie w przedniej oraz tylnej części szyn, zależnie od tego gdzie aktualnie konstrukcja jest wrywana momentem zginającym. W przypadku części betonowej maksymalne przemieszczenie znajduje w miejscu, gdzie płyta jest dociskana. Maksymalna wartość naprężenia zredukowanego HMH w szynach wynosi 33.0 MPa (0.11 s), natomiast w części betonowej 10.2 MPa (0.34 s). Maksymalne wartości naprężeń w obu przypadkach występują w miejscu, gdzie podłoże jest wrywane. Na Rys. 8.20 przedstawiono przebieg reakcji pionowej (na kierunku z) w czasie dla utwierdzonej części podłoża, gdzie maksymalna wartość wynosi 210 kN na docisk, a minimalna wartość 5 kN na wrywanie.

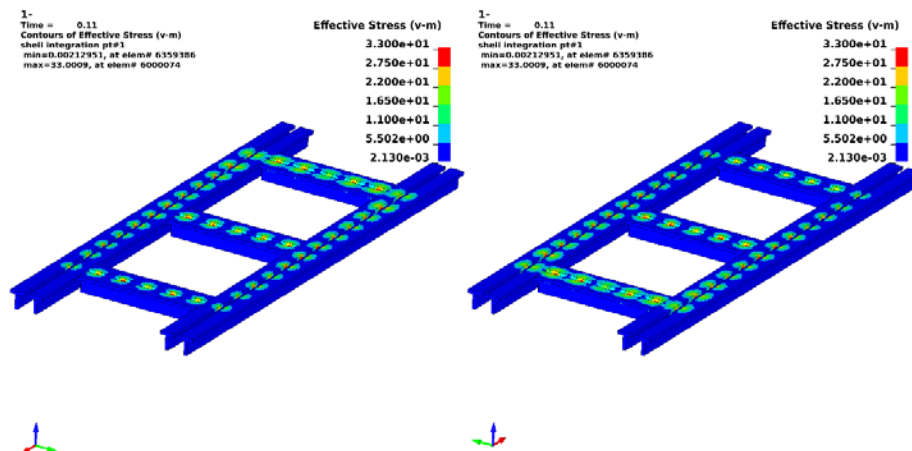
Należy zaznaczyć, że reakcję odczytano w miejscu warunków brzegowych, tzn. na głębokości 11 cm poniżej poziomu gruntu (tzn. masa części szyn oraz płyty betonowej jest wliczana do wyznaczonego ciężaru). Oprócz tego, na Rys. 8.40 przedstawiono również przebiegi w czasie reakcji poziomych (na kierunkach x oraz y), gdzie ich maksymalne wartości wynoszą odpowiednio 2.4 kN oraz 4.9 kN.



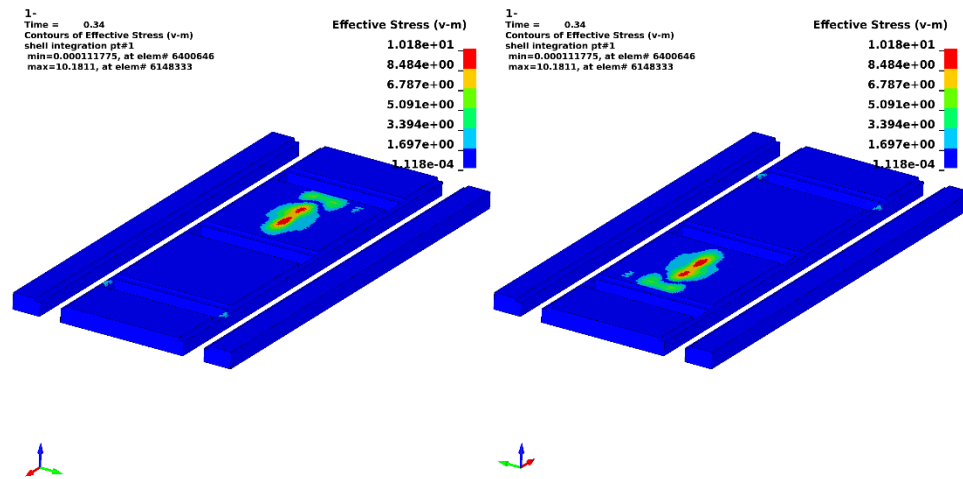
Rys. 8.35 Wypadkowe przemieszczenia (mm) szyn w widoku od przodu oraz od tyłu dla chwili czasowej 0.13 s.



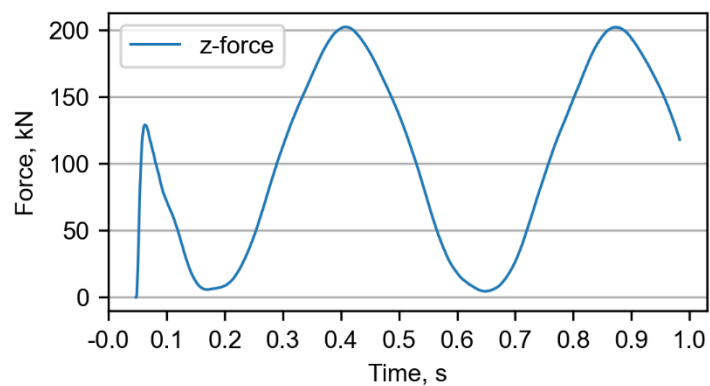
Rys. 8.36 Wypadkowe przemieszczenia (mm) betonu w podstawie w widoku od przodu oraz od tyłu dla chwili czasowej 0.35 s.



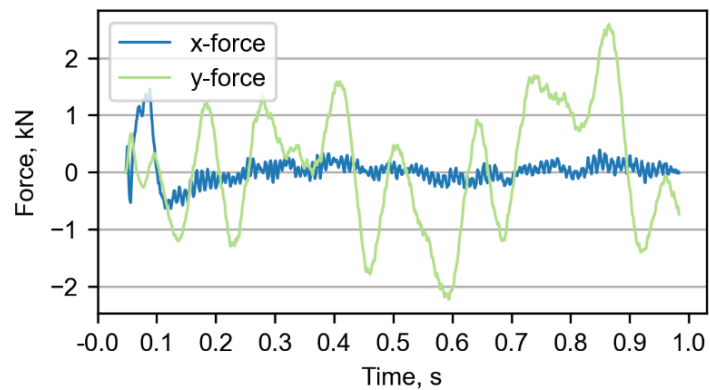
Rys. 8.37 Naprężenia zredukowane HMH (MPa) szyn w widoku od przodu oraz od tyłu dla chwili czasowej 0.11 s.



Rys. 8.38 Naprężenia zredukowane HMH (MPa) betonu w podstawie w widoku od przodu oraz od tyłu dla chwili czasowej 0.34 s.



Rys. 8.39 Wykres reakcji pionowej w czasie odczytanej z miejsca zastosowanych warunków brzegowych



Rys. 8.40 Wykres reakcji poziomych w czasie odczytanych z miejsca zastosowanych warunków brzegowych.

## 9. Analiza zmęczenia

Analizę zmęczeniową wykonano dla konstrukcji wsporczej, płyt pośrednich, wszystkich łączników śrubowych oraz szyn, które są zabetonowane w podłożu, zgodnie z Eurokodem 3 „Projektowanie konstrukcji stalowych, Część 1-9: Zmęczenie” [12]. Zakres zmienności naprężeń w konstrukcji ustalono na podstawie obliczeń dynamicznych, których wyniki znajdują się w punkcie 8. Należy zaznaczyć, że jest to przypadek, w którym częstotliwość wymuszenia równa jest pierwszej częstotliwości drgań własnych łopaty, w związku z tym mamy do czynienia ze zjawiskiem rezonansu. Dla innych częstotliwości wymuszenia naprężenia w konstrukcji mogą się zmienić. Ponieważ wytrzymałość zmęczeniowa konstrukcji jest silnie uzależniona od zakresu zmienności naprężeń  $\Delta\sigma$  w konstrukcji, dlatego dla innych przypadków obciążenia wyniki mogą ulec zmianie.

Wyniki analizy zmęczeniowej, w tym obliczeniową trwałość elementów konstrukcji wyrażoną liczbą cykli  $N$  o stałej amplitudzie, dla dwóch przypadków zamocowania łopaty turbiny wiatrowej („flapwise” i „edgewise”) przedstawiono w Tabeli 9.1.

Tabela 9.1. Wyniki analizy zmęczeniowej

Element		Konfiguracja ułożenia łopaty			
		Flapwise		Edgewise	
		$\Delta\sigma$ , MPa	$N$ , mln	$\Delta\sigma$ , MPa	$N$ , mln
Konstrukcja wsporcza	Płyta czołowa przy łopacie	30	>100	18	>100
	Płyta czołowa tylnia (wejście)	39	>100	8	>100
	Rura stalowa	17	>100	12	>100
	Płyta podstawy	8	>100	10	>100
	Pozostałe elementy stalowe	<24	>100	<18	>100
Spoiny	Poziome dolne	16	>100	13	>100
	Poziome środkowe	24	>100	18	>100
	Poziome górne	11	>100	14	>100
	Pionowe dolne	10	>100	8	>100
	Pionowe górne	11	>100	9	>100
	Rura-płyta wejście	8	>100	6	>100
	Płyta czołowa-rura	15	>100	12	>100
Płyty pośrednie	Wewnętrzna	51	47.75	20	>100
	Zewnętrzna	350	0.06	288	0.11
Łączniki	Dwustronne	35	3.21	10	>100
	Młotowe	15	>100	5	>100
Podłoże	Szyny	12	>100	6	>100

Zgodnie z założeniami, konstrukcję wsporczą powinna wytrzymać min. 10 mln. cykli obciążeń (patrz punkt 0). Elementy konstrukcji wsporczej, spoiny, łączniki młotowe oraz szyny w podłożu nie są narażone na utratę nośności zmęczeniowej.

Obliczenia wykazały, że dla badań łopaty w położeniu „flapwise”, żywotność łączników do montażu łopaty do konstrukcji wsporczej wynosi 3.21 mln cykli obciążeń, czyli mniej niż założone 10 mln. Jednakże, w projekcie technicznym konstrukcji wsporczej [1] zaleca się ich wymianę co 0.5 mln cykli.

Elementem, który jest najbardziej narażony na zmęczeniową utratę wytrzymałości jest płyta pośrednia zewnętrzna. Trwałość tego elementu wynosi 60 tys. cykli dla badań łopaty w konfiguracji „flapwise” oraz 110 tys. cykli dla konfiguracji w położeniu „edgewise”. Ta liczba cykli wynika ze znacznego zakresu zmienności naprężeń w tym elemencie w pobliżu otworów śrubowych, który wynosi 350 MPa dla konfiguracji badania łopaty „flapwise” oraz 288 MPa dla konfiguracji „edgewise”. W projekcie technicznym [1] wskazano, że tę płytę należy wymieniać po 1 mln cykli obciążeń. Znacznie niższe wartości liczby cykli obciążeń, które uzyskano przeprowadzając niniejsze badania, wynikają ze znacznych zakresów zmienności naprężeń, które z kolei wynikają z założenia przeprowadzenia obliczeń dla badania łopaty w rezonansie, tj. częstotliwość wymuszenia dynamicznego odpowiada pierwszej częstotliwości drgań własnych konstrukcji. Należy wyraźnie zaznaczyć, co pokazano w punkcie 8, że dla tego przypadku ugięcia końca łopaty mogą przekraczać założenie o maksymalnym przemieszczeniu końca łopaty równym 1.0 m, w związku z tym wymuszenia w rzeczywistych badaniach eksperymentalnych będą mniejsze, co wpłynie na zmniejszenie zakresu zmienności naprężeń, co w rezultacie zwiększy trwałość zmęczeniową płyty pośredniej zewnętrznej. Przykładowo, aby było spełnione założenie przedstawione w projekcie technicznym [1], tj. płytę pośrednią zewnętrzną należy wymieniać co 1 mln cykli obciążeń, zakres zmienności naprężeń nie może przekroczyć 136 MPa.

## 10. Podsumowanie badań

W poniższych tabelach Tabela 10.1 - Tabela 10.4 zestawiono najważniejsze wyniki z przeprowadzonych badań.

Tabela 10.1. Analiza modalna – podsumowanie

Częstotliwość drgań własnych	Konstrukcja wsporcza (Rys. 6.1)	Konstrukcja wsporcza + łopata w poz. flapwise (Rys. 6.2)	Konstrukcja wsporcza + łopata w poz. edgewise (Rys. 6.3)
$f_1$	73.97 Hz	2.14 Hz	2.14 Hz
$f_2$	141.80 Hz	5.59 Hz	5.59 Hz
$f_3$	142.63 Hz	7.04 Hz	7.04 Hz
$f_4$	151.79 Hz	14.39 Hz	14.38 Hz
$f_5$	168.62 Hz	19.08 Hz	19.12 Hz

Tabela 10.2. Analiza statyczna – podsumowanie

Wynik	Element	Przypadek 1: Fz = +20 kN, My = +200 kNm	Przypadek 2: Fz = -20 kN, My = -200 kNm
Maksymalne przemieszczenie wypadkowe, mm	Konstrukcja wsporcza	0.064 (Rys. 7.2)	0.070 (Rys. 7.17)
	Płyty pośrednie	0.099 (Rys. 7.7)	0.094 (Rys. 7.22)
	Podłoże	0.010 (Rys. 7.12)	0.011 (Rys. 7.27)
Maksymalne naprężenie zredukowane HMM, MPa	Konstrukcja wsporcza	147.48 (Rys. 7.4)	147.17 (Rys. 7.19)
	Płyty pośrednie	190.86 (Rys. 7.9)	189.83 (Rys. 7.24)
	Łącznik dwustronny	384.61 (Rys. 7.10)	380.42 (Rys. 7.25)
	Łącznik młotowy	22.39 (Rys. 7.11)	22.75 (Rys. 7.26)
	Podłoże	11.50 (Rys. 7.14)	11.80 (Rys. 7.29)

Tabela 10.3. Analiza dynamiczna – podsumowanie

Wynik	Element	Przypadek 1: łopata w położeniu <i>flapwise</i>	Przypadek 2: łopata w położeniu <i>edgewise</i>
Maksymalne przemieszczenie wypadkowe, mm	Konstrukcja wsporcza	0.14 (Rys. 8.6)	0.11 (Rys. 8.25)
	Płyty pośrednie	0.22 (Rys. 8.9)	0.16 (Rys. 8.28)
	Podłoże	0.034 (Rys. 8.16)	0.029 (Rys. 8.35)
Maksymalne naprężenie zredukowane HMM, MPa	Konstrukcja wsporcza	112.7 (Rys. 8.7)	110.1 (Rys. 8.26)
	Płyty pośrednie	261.9 (Rys. 8.11)	202.2 (Rys. 8.30)
	Łącznik dwustronny	375.0 (Rys. 8.12)	369.6 (Rys. 8.31)
	Łącznik młotkowy	50.7 (Rys. 8.14)	46.7 (Rys. 8.33)
	Podłoże	36.4 (Rys. 8.18)	33.0 (Rys. 8.37)

Uwaga: obliczenia przeprowadzono dla częstotliwości wymuszenia odpowiadającej pierwszej częstotliwości drgań własnych łopaty turbiny wiatrowej.



Tabela 10.4. Analiza zmęczenia - podsumowanie

Element	Trwałość zmęzeniowa wyrażona w mln cykli obciążeń $N$	
	Flapwise	Edgewise
Konstrukcja wsporcza	>100	>100
Spoiny	>100	>100
Płyty pośrednie	0.06	0.11
Łączniki	3.21	>100
Podłoże	>100	>100

Uwaga: obliczenia przeprowadzono dla częstotliwości wymuszenia odpowiadającej pierwszej częstotliwości drgań własnych łopaty turbiny wiatrowej

## 11. Podsumowanie, uwagi i wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań obejmujących obliczenia statyczne, dynamiczne, analizę modalną oraz zmęczeniową przedstawiony projekt konstrukcji wsporczej stanowiska do badań łopat turbin wiatrowych można ogólnie uznać za poprawny, umożliwiający wykonanie badań w pewnym zakresie zgodnie z przyjętymi założeniami. Tym niemniej, jak przedstawiono w poniższych uwagach i wnioskach, występują w nim pewne obszary w których zaleca się go uzupełnić/dopracować.

1. Przedstawiony do zaopiniowania projekt nie zawiera wyciągu z obliczeń. Oryginalne wyniki przedstawione w [4] oraz porównane w punkcie „Załącznik – Porównanie wyników obliczeń statycznych” wskazują na podobną odpowiedź konstrukcji wsporczej, jednak występują różnice w ekstremalnych wartościach przemieszczeń i naprężeń zredukowanych HMH. Dodatkowo, oryginalne obliczenia wskazują na niesymetryczne przemieszczenia płyty pośredniej wewnętrznej dla analizy statycznej, czego nie zaobserwowano w autorskiej analizie.
2. Wykonane obliczenia sprawdzające wskazują, że elementy konstrukcji wsporczej zarówno w testach statycznych jak i dynamicznych, z wyjątkiem lokalnych koncentracji, wykazują znaczny zapas nośności. Naprężenia w większości miejsc konstrukcji są minimalne, a ekstremalne wartości występują jedynie lokalnie. Można wręcz uznać, że konstrukcja jest w znacznym stopniu przewymiarowana.
3. W konstrukcji występują lokalne koncentracje naprężeń, związane ze sposobem montażu łopat turbin wiatrowych do konstrukcji wsporczej. Dokręcenie śrub powoduje powstanie koncentracji naprężeń w okolicy otworów. Elementem najbardziej obciążonym w czasie badań jest płyta pośrednia zewnętrzna.
4. Analiza modalna wykazała, że częstotliwości drgań własnych konstrukcji wsporczej (>70 Hz) znacznie wykraczają poza zakres planowanych częstotliwości wymuszenia w czasie badań łopaty (0.5-4.0 Hz).

5. Obliczenia dynamiczne, przeprowadzone dla łopaty o długości 12.6 m i masie 392 kg, dla częstotliwości wymuszenia odpowiadającej pierwszej częstotliwości drgań własnych łopaty (2.14 Hz), wykazały, że ugięcia łopaty mogą przekroczyć wartość 1.0 m, która wynika z założeń projektowych. Pomimo przekroczenia zakładanych wartości ugięć łopaty, naprężenia w konstrukcji wsporczej były na bezpiecznym poziomie. Należy zaznaczyć, że ugięcie końca łopaty zależy od parametrów łopaty i wymuszenia dynamicznego, natomiast w niewielkim stopniu zależy od konstrukcji wsporczej, której budowa umożliwi zamocowanie łopaty w schemacie wspornika.
6. Odpowiedź konstrukcji wsporczej w czasie badań dynamicznych silnie zależy od parametrów łopaty, w tym jej masy i sztywności. Tymczasem dostarczony model łopaty jest nieedytowalny i z tego względu na potrzeby symulacji dynamicznych stanowiska przyjęto dostosowany model zastępczy. Dokładniejsze analizy dynamiczne są możliwe po dostarczeniu większej ilości danych dotyczących parametrów łopat, wymuszeń dynamicznych, liczby cykli pod zadaniem wymuszeniem itd. Należy każdorazowo przed badaniem łopat przeprowadzić analizę i weryfikację ugięć łopaty dla zadanych parametrów siły dynamicznej i weryfikację, czy te ugięcia nie przekraczają zakładanej wartości 1.0 m.
7. Wyniki symulacji ściśle zależą od przyjętych warunków brzegowych, w tym właściwości śrub młotowych oraz sztywności podłoża pod konstrukcją wsporcą.
8. Wstępne analizy wykazały istotny wpływ siły dokręcenia śrub młotowych, na zachowanie konstrukcji wsporczej. Zbyt słabe dokręcenie śrub młotowym może umożliwić występowanie poziomych drgań konstrukcji w czasie badań dynamicznych.
9. Symulacje dynamiczne wykazały, że wypadkowa reakcja przekazywana na podłoże będzie zmienna w zakresie od -5 kN na wrywanie do 200 kN na docisk. Dodatkowo mogą się również pojawić reakcje poziome do 5 kN.
10. Analiza zmęczeniowa wykazała, że płyta pośrednia zewnętrzna oraz łączniki mocujące łopatę do konstrukcji wsporczej są elementami najbardziej narażonymi na zmęczeniową utratę nośności. Trwałość zmęczeniowa konstrukcji silnie zależy od zakresu zmienności naprężeń w konstrukcji, który z kolei zależy od parametrów badań, w tym parametrów łopaty oraz siły wymuszającej. Zakładając skrajnie niekorzystne warunki badań dynamicznych, wykazano, że utrata nośności może nastąpić szybciej niż podano w projekcie [1].
11. Wyniki mają charakter poglądowy i uzyskano je dla badań przeprowadzonych dla konkretnych parametrów łopaty turbiny wiatrowej oraz wymuszenia dynamicznego, dlatego nie należy ich uogólniać na inne konfiguracje badań.

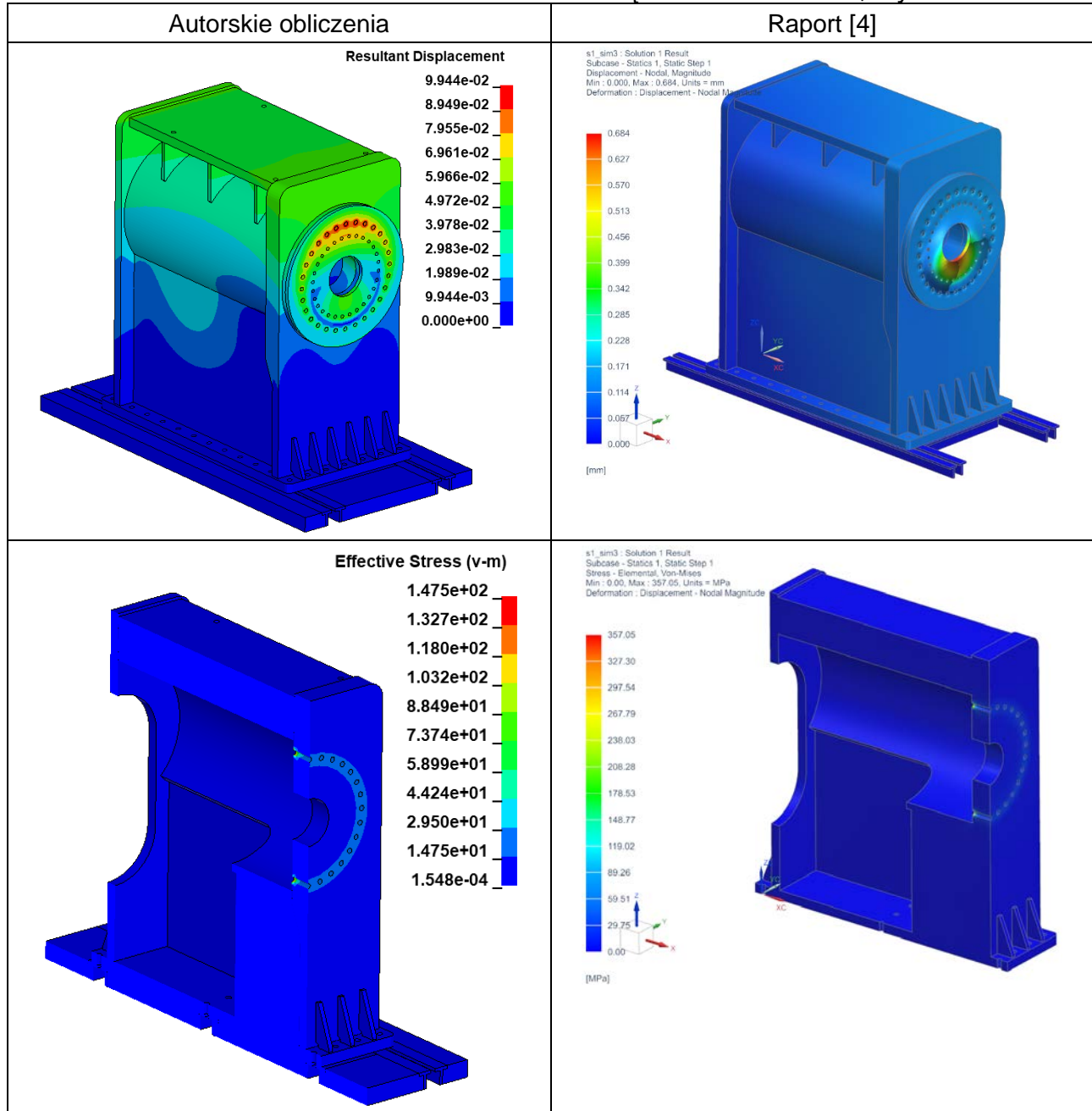
## 12. Zalecenia

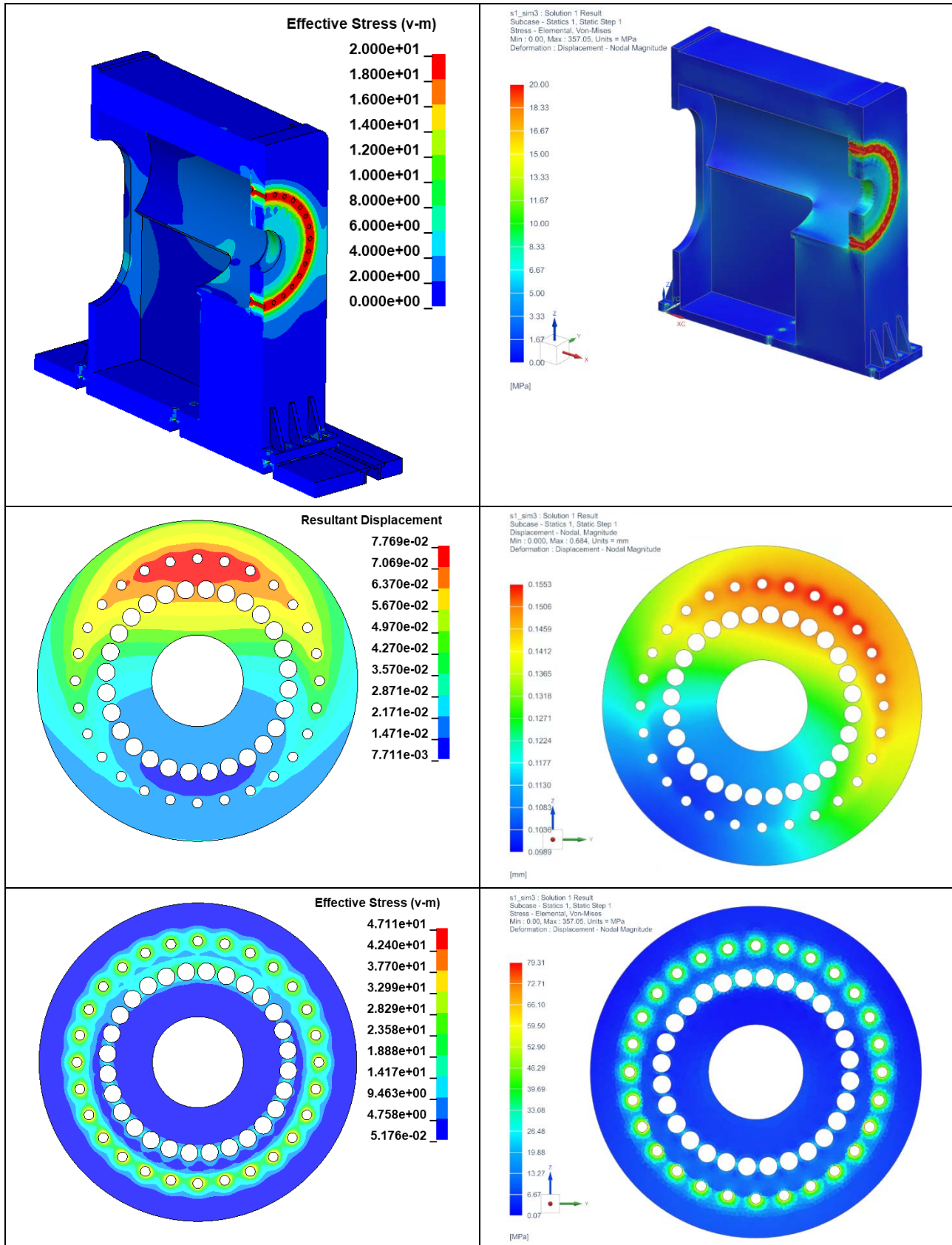
1. Z uwagi na lokalne koncentracje naprężeń w okolicy otworów związane ze sposobem montażu łopatek turbin wiatrowych do konstrukcji wsporczej zaleca się zmianę grubości zewnętrznej płyty pośredniej.
2. Z uwagi na zmiany wartości wypadkowych reakcji pionowych od -5kN na wrywanie do 200 kN na docisk oraz możliwość pojawienia się reakcji poziomych zaleca się przed zamówieniem konstrukcji wsporczej wykonać badania podłoża w miejscu, gdzie stanowisko ma zostać wykonane.
3. Wykonane analizy wskazują na duży wpływ warunków brzegowych na zachowanie konstrukcji wsporczej. Z tego względu po wykonaniu stanowiska zaleca się monitorować stan posadowienia oraz śrub młotowych podczas docelowych testów łopaty na stanowisku badawczym.
4. W celu określenia rzeczywistych zmian naprężeń i tym samym wytrzymałości zmęczeniowej elementów stanowiska zaleca się wykonanie monitoringu zmian odkształceń (naprężeń) w najbardziej wyczerpanych punktach. Zebrane w ten sposób dane pozwolą na ocenę zmęczenia konstrukcji, m.in. poprzez wyznaczenie wartości sumarycznego uszkodzenia  $D_d$  wg Eurokodu 3 [12].
5. Zakładaną trwałość płyty pośredniej zewnętrznej (1 mln cykli obciążeń) uzyska się ograniczając zakres zmienności naprężeń do 136 MPa. W przypadku wykorzystania stanowiska do badań generujących inny niż podano zakres zmienności naprężeń zaleca się przeprowadzić dodatkowe analizy zmęczeniowe.
6. Ze względu na duże zapasy bezpieczeństwa dla większości elementów konstrukcji wsporczej, z pominięciem lokalnych koncentracji naprężeń, zaleca się rozważyć przeprojektowanie konstrukcji w celu obniżenia kosztów wykonania stanowiska.

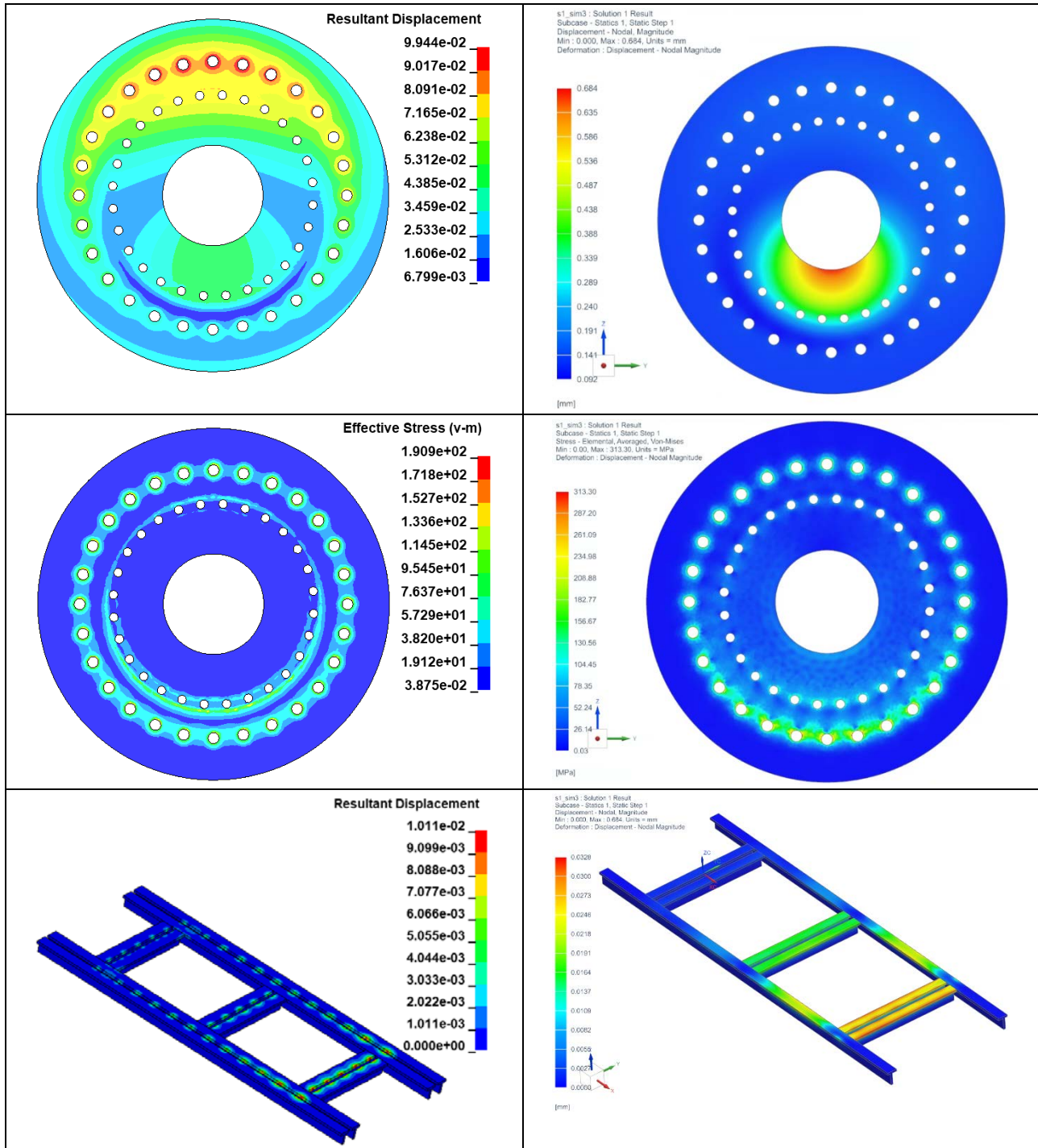
## Załącznik – Porównanie wyników obliczeń statycznych

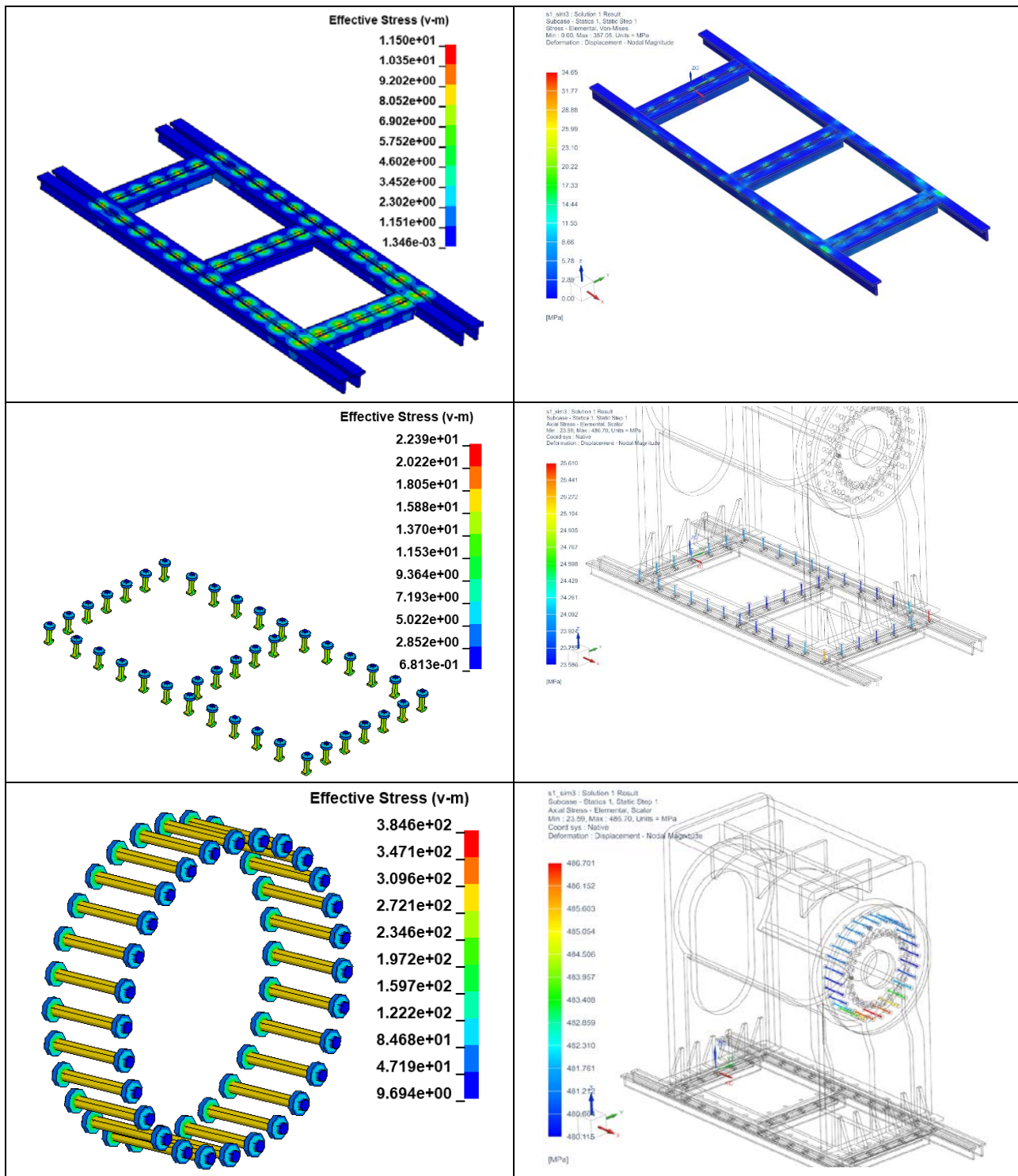
Poniżej zestawiono porównanie wyników autorskich obliczeń z wynikami obliczeń opisanych w raporcie [4].

**Tabela Z1.** Porównanie obliczeń. Schemat obciążenia  $F_z = +20 \text{ kN}$ ,  $M_y = +200 \text{ kNm}$









**Tabela Z2.** Porównanie obliczeń. Schemat obciążenia  $F_z = -20 \text{ kN}$ ,  $M_y = -200 \text{ kNm}$

