

POLITECHNIKA POZNAŃSKA  
WYDZIAŁ BUDOWY MASZYN I ZARZĄDZANIA



## MODELOWANIA I SYMULACJA ZAGADNIENIA BIOMEDYCZNYCH

### **Analiza wytrzymałościowa ramy podopiecznego pacjenta**

Agata Mikołajczak

Weronika Mruk

Adam Michałowski

Inżynieria Biomedyczna

Rok 2015/16

## Spis treści

1. Wstęp teoretyczny .....	3
Opis modelu .....	3
2. Metoda elementów skończonych .....	6
3. Zastosowanie Metody Elementów Skończonych .....	8
4. Wady i zalety Metody Elementów Skończonych.....	8
5. Analiza wytrzymałościowa .....	9
Przygotowanie modelu .....	9
Przygotowanie do symulacji obciążenia .....	10
Wyniki symulacji .....	12
6. Wnioski analizy .....	29

# 1. Wstęp teoretyczny

## Opis modelu

Model jest elementem podnośnika pacjenta - urządzeniem do łatwego i bez siłowego podnoszenia i przenoszenia oraz transportu osoby o ograniczonych możliwościach motorycznych.

Założenia projektowe:

- Urządzenie ma udźwignąć 150 kg.
- Podnoszenie jest zautomatyzowane (napęd elektryczny)
- Do podnoszenia ruchomego ramienia służy siłownik elektryczny
- Przenoszenie (transport) wymaga asysty osoby która będzie pchała urządzenie.
- Urządzenie jest wyposażone w zaczep umożliwiający zamocowanie wieszaka wraz z nosidłem którego kształt i właściwości umożliwiają zastosowanie podnośnika w różnych środowiskach i sytuacjach.
- Urządzenie musi być bezprzewodowe aby mogło przenosić pacjenta bez konieczności ciągnięcia podłazki do sieci – wyposażenie z akumulator
- Przycisk bezpieczeństwa, jego naciśnięcie powoduje natychmiastowe zatrzymanie podnośnika
- Koła tylne wyposażone w hamulce

Obliczenia:

- Siła siłownika elektrycznego:

$F_1$  – obciążenie podnośnika

$F_2$  – siła siłownika

$r_1$  – długość ramienia w osi x

$r_2$  – położenie miejsca zamocowania siłownika względem osi x

$$F_1 = 150 \text{ kg} = 1500 \text{ N}$$

$$r_1 = 650 \text{ mm}$$

$$r_2 = 300 \text{ mm}$$

Aby układ pozostał w równowadze musi zostać spełniona zależność:

$$M_1 = M_2$$

$$F_1 \cdot r_1 = F_2 \cdot r_2$$

$$1500 \cdot 650 = F_2 \cdot 300$$

$$F_2 = 4750 \text{ N}$$

- Dobór profilu

Obliczono moment gnący w przekroju z siłownikiem  $M_g$ :

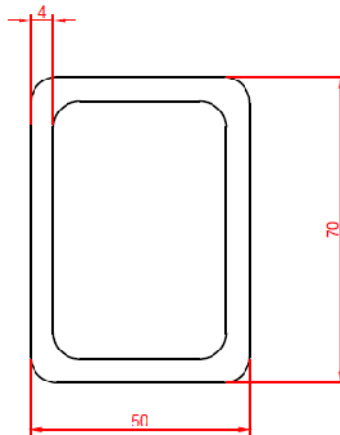
$$M_g = F_2 \cdot r_2$$

$$M_g = 1425 \text{ Nm}$$

Dobrano profil prostokątny z katalogu

<http://pobox.mech.pk.edu.pl/~hsa/Kształtowniki%20zamknięte.pdf>

Wskaźnik wytrzymałości  $W_x = 12,89 \text{ cm}^3$



Rys.1.: Dobrany profil

Obliczono naprężenia w przekroju z siłownikiem:

$$\sigma_g = M_g / W_x$$

$$\sigma_g = 110,55 \text{ MPa}$$

- Dobór materiału

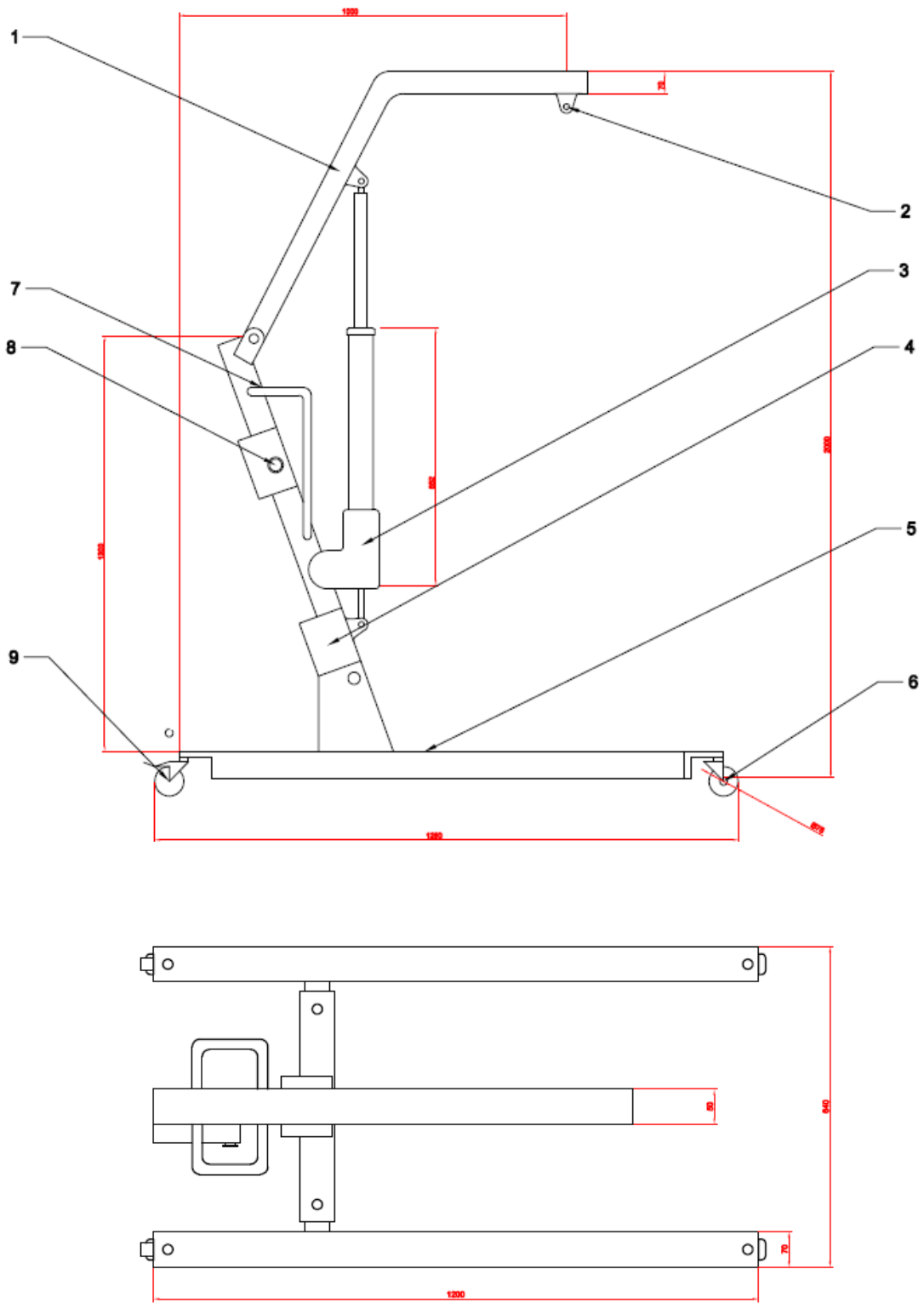
Dobry materiał musi mieć naprężenia dopuszczalne na zginanie większe niż naprężenia wynikające z powyższych obliczeń.

$$k_g > \sigma_g$$

$$k_g > 110,5 \text{ MPa}$$

Dobrano stal konstrukcyjną wyżej jako C45 (1045) o  $k_g = 258 \text{ MPa}$

$$258 \text{ MPa} > 110,5 \text{ MPa}$$



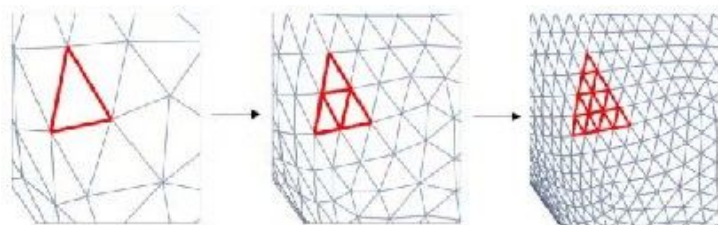
Rys.2.: Model podno nika pacjenta

## 2. Metoda elementów skończonych

MES czyli **Metoda Elementów Skończonych** jest narzędziem matematycznym coraz powszechniej stosowanym do obliczeń inżynierskich które pozwala przekształcić zbiór równań różniczkowych opisujących zachowanie, czy właściwość jakiegoś ciała w układ równań nieliniowych. Taki układ równań może być rozwiązany przy pomocy komputera. Pierwsze obliczenia przy użyciu metod elementów skończonych dotyczyły obiektów o nieskomplikowanych kształtach i zjawisk opisanych liniowymi równaniami różniczkowymi. Rozwój technik informatycznych i wzrost mocy obliczeniowych uzyskiwanych komputerów spowodował że metod elementów skończonych zaczęto stosować do rozwiązywania problemów nieliniowych dla obiektów o prostych kształtach jedno i dwuwymiarowych. Od lat osiemdziesiątych MES można z powodzeniem stosować do rozwiązywania problemów nieliniowych dla obiektów o dowolnych kształtach trójwymiarowych.

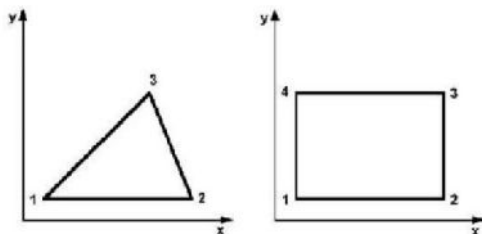
Podstawowym etapem przy rozwiązywaniu problemu przy pomocy MES jest podział rozpatrywanego obiektu na skończoną liczbę geometrycznych elementów, zwanych elementami skończonymi. Zakłada się, że te elementy połączone są ze sobą w skończonej liczbie punktów znajdujących się na obwodach. Najczęściej są to punkty narożne i noszą nazwę węzłów. By jak najdokładniej opisać dany obiekt odpowiednio dobiera się geometryczną siatkę, a kształt tych elementów dobiera się tak by funkcje aproksymujące rozwiązanie wewnątrz nich były jak najprostsze.

W zależności od tego z jakim obiektem mamy do czynienia elementy skończone będą przybierały odpowiedni kształt. Dla kratownic i belek elementy skończone będą miały kształt prętów, traktowanych jako elementy jednowymiarowe, dla płyt elementy skończone będą dwuwymiarowe i w zależności od potrzeb mogą to być trójkąty lub czworokąty. Przy rozwiązywaniu problemów dotyczących obiektów przestrzennych (bryły) elementy skończone będą czworocianami lub sześciocianami.



**Rys.3.: Różne geometrie siatki dla wybranego elementu**

Kolejnym etapem rozwiązywania problemu przy pomocy MES jest odpowiednie ponumerowanie wszystkich węzłów. Najczęściej robi się to tak jak na poniższym schemacie który przedstawia numerację lokalną w obrębie jednego elementu skończonego. W obrębie całego obiektu stosuje się numerację globalną.



**Rys.4.: Lokalna numeracja w ziów**

W elementach skończonych definiuje się proste funkcje, najczęściej funkcje liniowe lub wielomiany niskiego stopnia, zwane funkcjami kształtu. Elementem sformułowania MES jest określenie w jaki sposób z funkcji kształtu konstruuje się funkcje aproksymujące rozwiązanie. Konstrukcja przebiega w dwóch etapach:

- z funkcji kształtu określonych w pojedynczych elementach konstruuje się funkcje określone w całym obszarze obliczeniowym (będącym sumą elementów). Proces ten można określić jako sklejanie wielu funkcji w małych podobszarach w jedną funkcję w całym podobszarze – te funkcje określone w całym obszarze nazywane są funkcjami bazowymi
- definiuje się w jaki sposób ostateczne rozwiązanie ma być otrzymywane z funkcji bazowych. Zasada jest tutaj prosta, rozwiązanie przybliżone MES jest kombinacją liniową funkcji bazowych (czyli sumą ze współczynnikami różnymi dla każdej funkcji). Zbiór wszystkich możliwych kombinacji liniowych funkcji bazowych stanowi zbiór wszystkich możliwych rozwiązań przybliżonych danego problemu, czyli stanowi przestrzeń funkcji, w której poszukiwane jest rozwiązanie konkretnego zadania.

Rozwiązanie konkretnego zadania MES polega na skorzystaniu z programu MES zawierającego odpowiedni model MES. Proces ten rozpoczyna się od realizacji następujących etapów:

- **wybór modelu** (każdy program MES oferuje zazwyczaj kilka modeli MES, odpowiadających konkretnej aproksymacji RRC i warunkom brzegowym)
- **definicja obszaru obliczeniowego i podział obszaru na elementy** (w programach MES mogą pojawiać się rozmaite elementy jedno, dwu i trójwymiarowe)
- **definicja przestrzeni, w której poszukiwane są funkcje niewiadome czyli wybór aproksymacji** (programy MES mogą oferować rozmaite zestawy funkcji kształtu dla elementów i funkcji bazowych w całym obszarze obliczeniowym)
- **określenie parametrów modelowanego procesu** (najczęściej parametry te związane są ze współczynnikami RRC i warunkami brzegowymi, w praktyce odpowiadają np. parametrom materiałów w modelowanych obiektach, zasadom interakcji obiektów ze światem zewnętrznym, itp.)

### 3. Zastosowanie Metody Elementów Skończonych

Za pomocą tej metody bada się w mechanice komputerowej (CAE) wytrzymałość konstrukcji, symuluje odkształcenia, naprężenia, przemieszczenia, przepływ ciepła, przepływ cieczy. Bada się również dynamikę, kinematykę i statykę maszyn, jak również oddziaływania elektrostatyczne, magnetyczne i elektromagnetyczne.

Obliczenia MES mogą być przeprowadzane w przestrzeni dwuwymiarowej (2D), gdzie dyskretyzacja sprowadza się najczęściej do podziału obszaru na trójkąty. Rozwiązanie takie pozwala na obliczenie wartości pojawiających się w przekroju danego układu. Związane są z tym jednak pewne ograniczenia wynikające ze specyfiki rozwiązywanego problemu (np. kierunek przepływu tylko przenikający modelowaną powierzchnię, itp.). Z uwagi na postępy techniki komputerowej w ostatnich latach większość pakietów symulacyjnych wyposażona jest w możliwość rozwiązywania zagadnień w przestrzeni trójwymiarowej (3D). Dyskretyzacja zazwyczaj polega na podziale obszaru na czworokąty. Modelowanie takie pozbawione jest fundamentalnych ograniczeń technologii 2D, ale jest znacznie bardziej wymagające pod względem pamięci i mocy obliczeniowej komputera.

### 4. Wady i zalety Metody Elementów Skończonych

Podstawową zaletą MES jest możliwość uzyskania wyników dla skomplikowanych kształtów, dla których niemożliwe jest przeprowadzenie obliczeń analitycznych. Oznacza to, że dane zagadnienie może być symulowane w pamięci komputera, bez konieczności budowania prototypu, co znacznie ułatwia proces projektowania.

Podział obszaru na coraz mniejsze elementy skutkuje zazwyczaj dokładniejszymi wynikami obliczeń, ale jest to okupione zwiększonym zapotrzebowaniem na moc obliczeniową komputera. Dodatkowo należy liczyć się z nakładającymi się błędami obliczeń wynikającymi z wielokrotnych przybliżeń (zaokrąglenia) przetwarzanych wartości. Jeśli obszar składa się z kilkuset tysięcy elementów, które mają nieliniowe własności wówczas obliczenia muszą być odpowiednio modyfikowane w kolejnych iteracjach tak, aby końcowe rozwiązanie było poprawne. Dlatego też w wyjątkowych sytuacjach kumulujące się błędy obliczeniowe mogą okazać się niezaniechwalne. Celem minimalizacji tych błędów pomiędzy różnymi wersjami tego samego problemu (np. zmiany parametrów materiałowych przy takich samych wymiarach) stosuje się identyczną dyskretyzację problemu tak, aby ewentualne błędy zaokrąglenia były takie same, a ewentualne różnice w obliczeniach wynikały rzeczywiście ze zmian własności materiału.

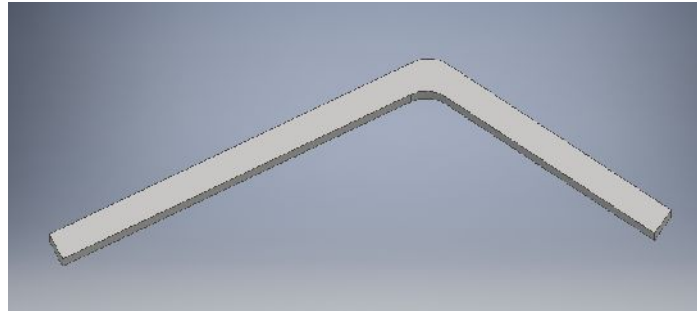
Symulacje MES nie mogą być przeprowadzane w czasie rzeczywistym, ponieważ dla bardzo skomplikowanych układów rozwiązanie danego problemu może być bardzo długotrwałe (w zależności od stopnia skomplikowania i mocy obliczeniowej komputera czas ten może wynosić od kilku sekund do kilku dni, a nawet i dłużej). Dodatkowo, wartości obliczone metodą MES obarczone mogą być błędami, których wartości zależą od założeń przyjętych podczas formułowania problemu do rozwiązania, jak również i dokładności dostarczonych danych materiałowych. Dlatego też, jeśli to tylko możliwe należy dane obliczone zweryfikować z danymi zmierzonymi na rzeczywistym urządzeniu lub układzie.



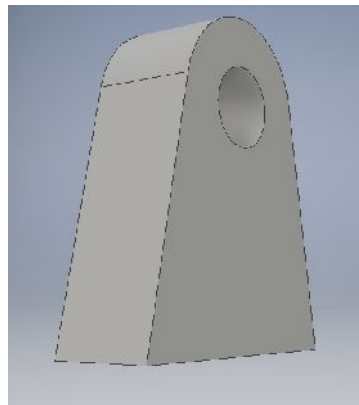
## 5. Analiza wytrzymała ciowa

### Przygotowanie modelu

Model ramy podno nika został przygotowany w programie Autodesk Inventor Professional 2016 na podstawie projektu zawartego we wst. pie.



Rys.5.: Zamodelowana rama w programie Inventor



Rys.6.: Zamodelowany uchwyt w programie Inventor

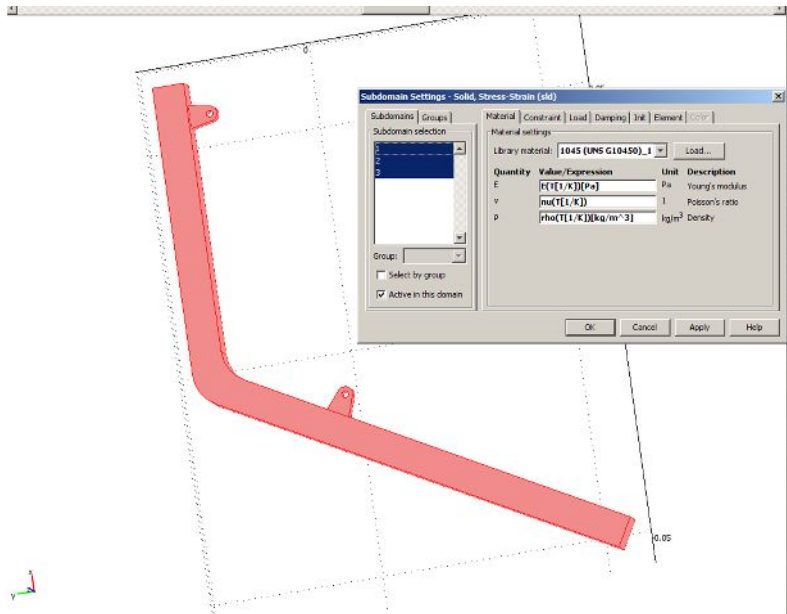


Rys.7.: Zamodelowana rama podno nika w cało ci

## Przygotowanie do symulacji obciążenia

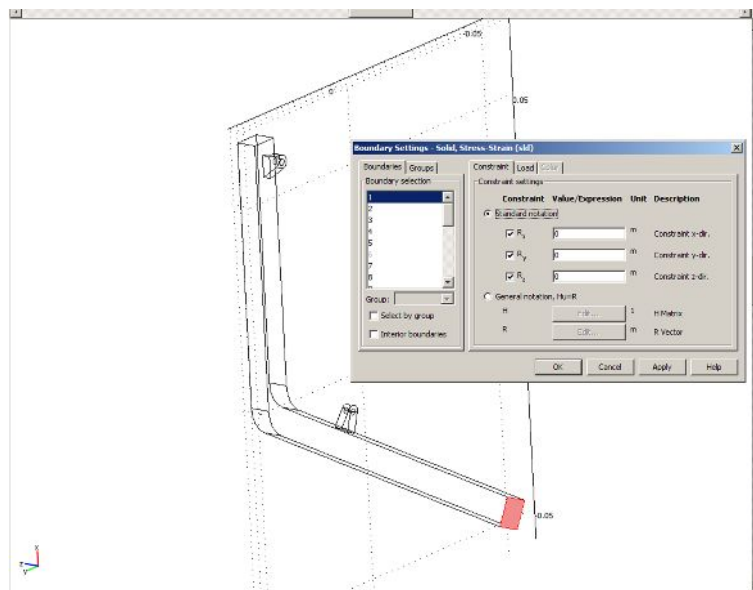
Model ramy, który poddany zostanie obciążeniu składał się z trzech elementów:

- Wyprofilowanego prostokątnego cianu,
- Dwóch uchwytych utwierdzonych bezpośrednio na ramie



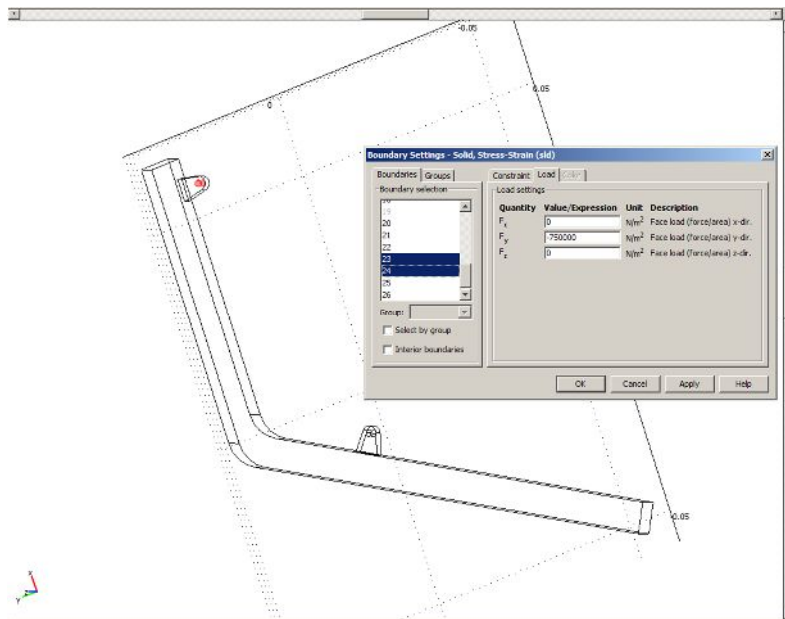
Rys.8.: Zaimportowany model CAD do programu COMSOL Multiphysics

Kolejnym krokiem było określenie warunków brzegowych. Został wbrany jeden element (1), który został utwierdzony, tzn. ruchowi w trzech osiach została przyporzątkowana wartość zero.

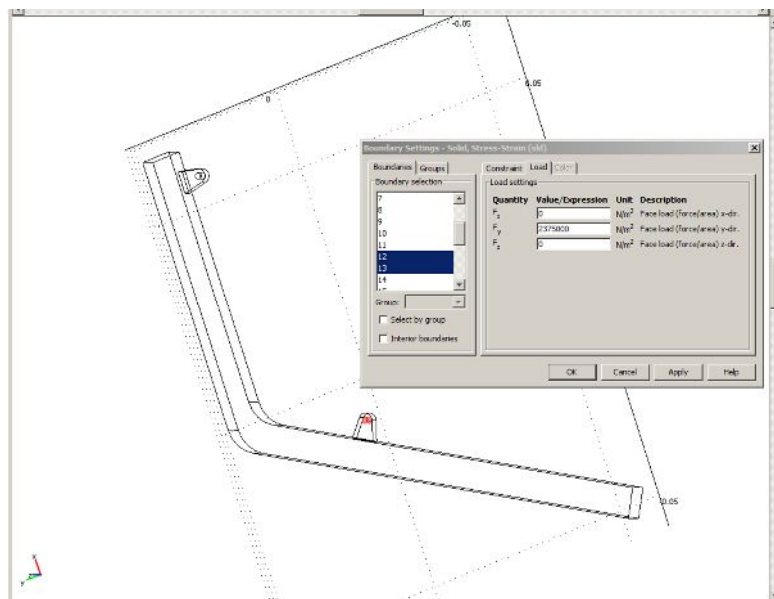


Rys.9.: Utwierdzenie modelu ramy

Następnie zostały przypisane dwóm uchwytom odpowiednie siły działające w osi  $o_y$ , odpowiednio dla uchwytu trzymającego tego pacjenta  $F_y = -750000 \text{ N/m}^2$  i dla uchwytu siłownika  $F_y = 2375000$ .



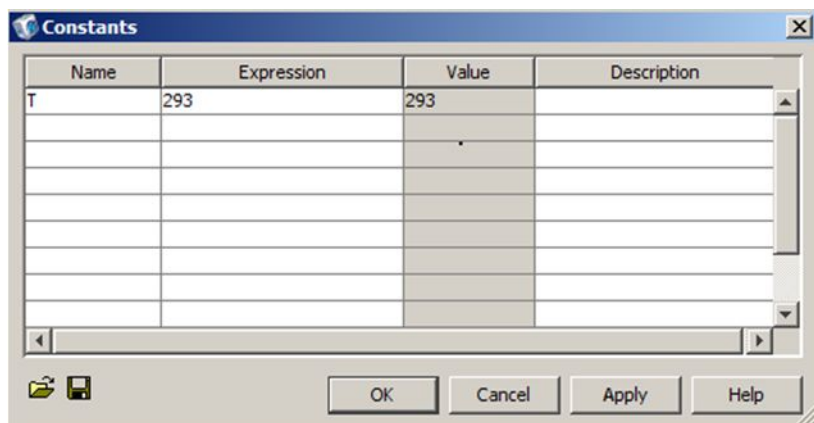
Rys.10.: Wyznaczenie siły dla uchwytu podtrzymującego tego pacjenta



Rys.11.: Wyznaczenie siły dla uchwytu siłownika

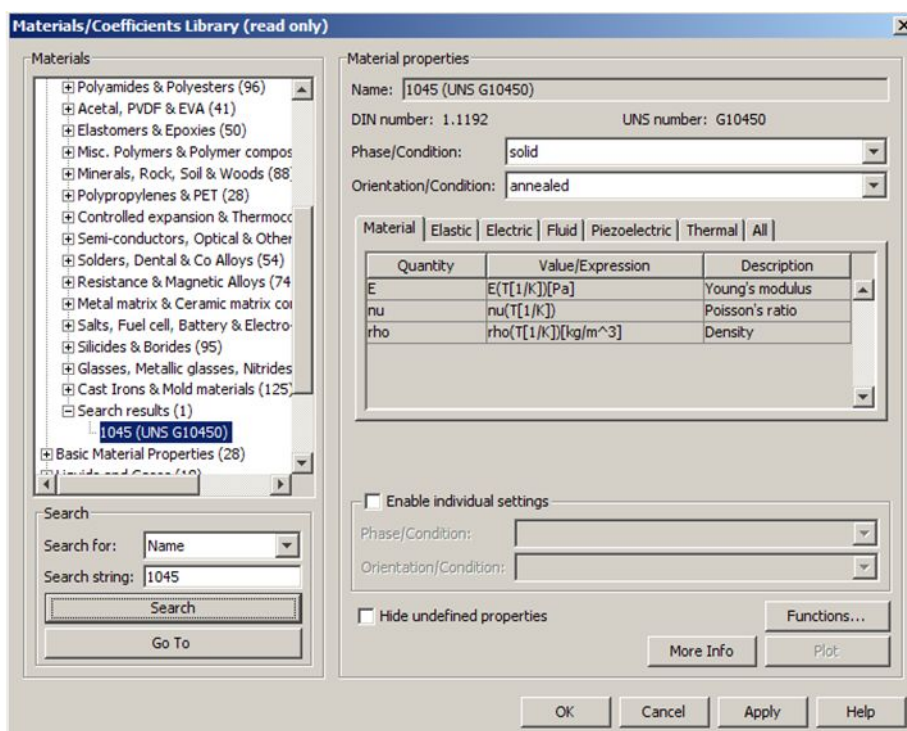
Należy również wprowadzić stałą  $T$ , czyli temperaturę otoczenia w jakiej ma być wykonana symulacja.

$$T = 293\text{K}$$



Rys.12.: Określenie stałej T

Następnym krokiem było określenie materiału z którego ma być wykonana rama podnośnika. Wybrano go z biblioteki materiałów dostępnej w programie COMSOL Multiphysics. Wybrany materiał to Stal 1045. Program odpowiednio dobrał niezbędne parametry materiału takie jak: moduł Younga, współczynnik Poissona oraz gęstość.



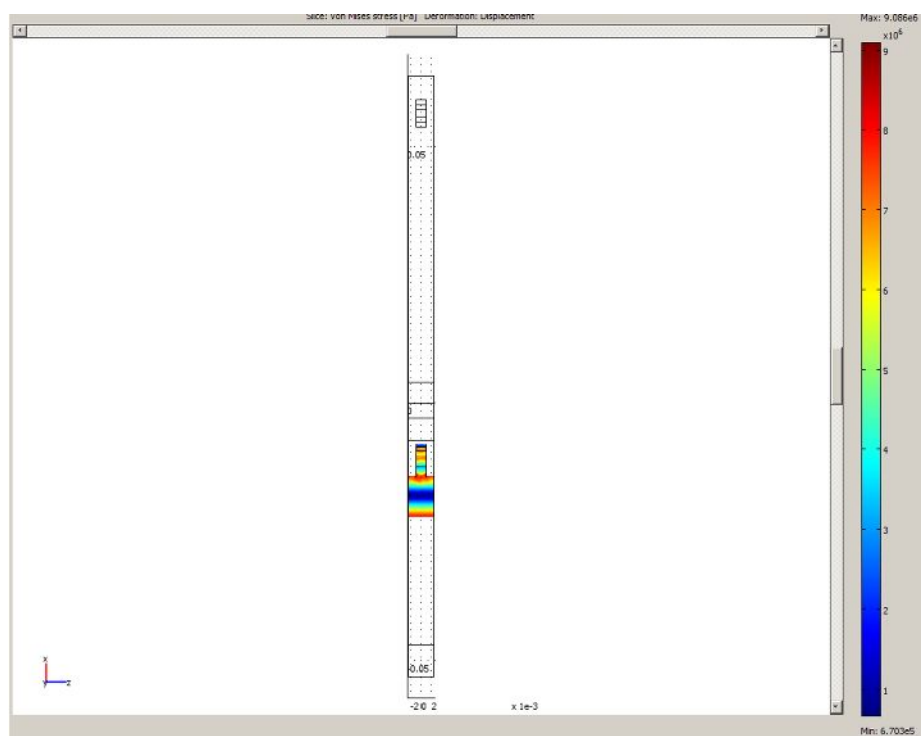
Rys.13.: Dobór materiału ramy

Ostatnim etapem pracy było utworzenie siatki za pomocą opcji *Mesh*. Wygenerowana siatka składała się z 8046 trójkątów. Następnie wczytano model oraz otrzymano wyniki symulacji.

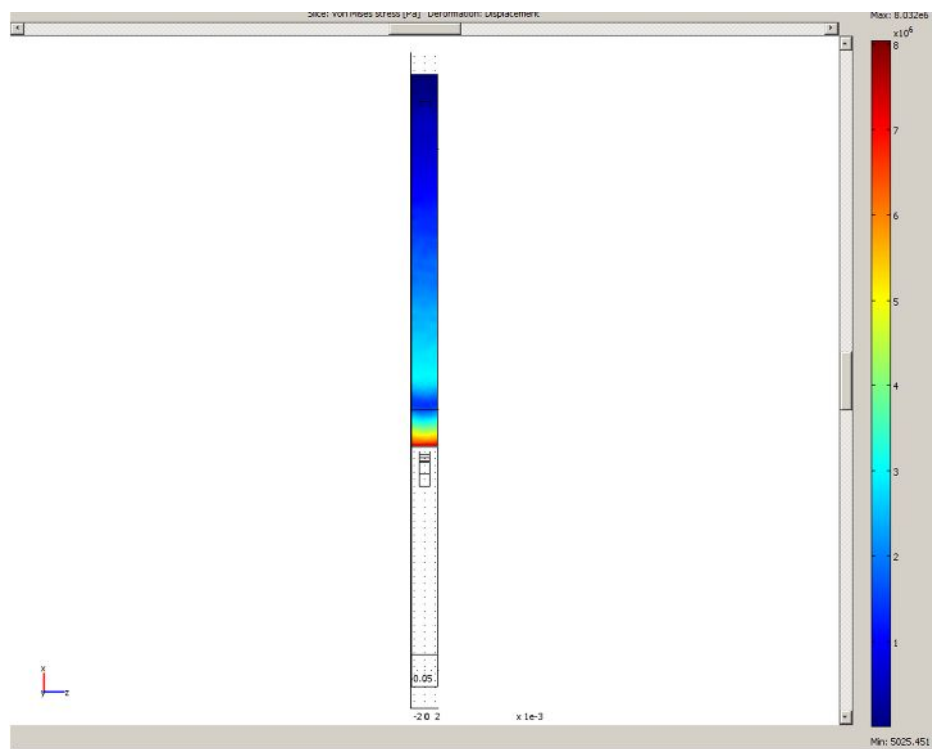
### Wyniki symulacji

Symulacja została przeprowadzona dla maksymalnej siły obciążającej, w tym celu wybrano materiał. Poniżej zamieszczone są wykresy różnych przekrojów modelu przedstawione w różnych osiach.

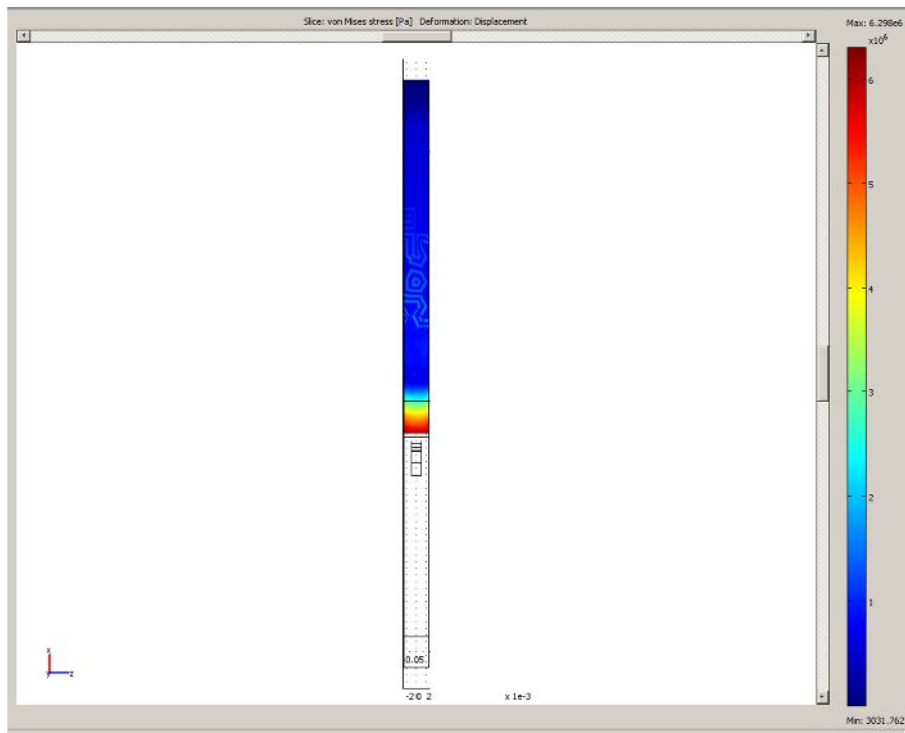
Wykresy odkształceń wzdłuż osi x.



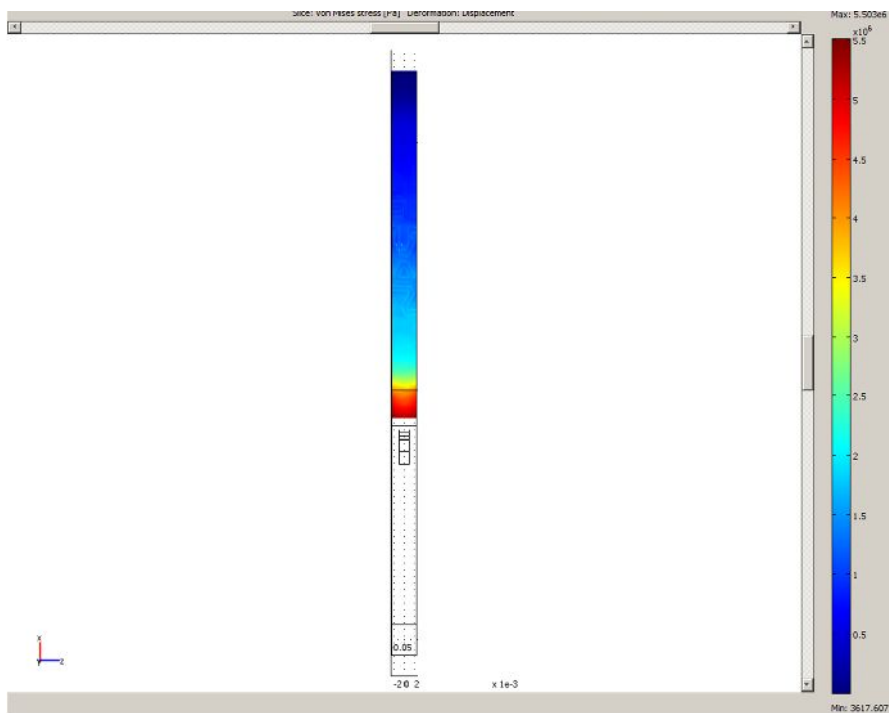
Rys.14.: Wykres odkształceń koordynaty osi x



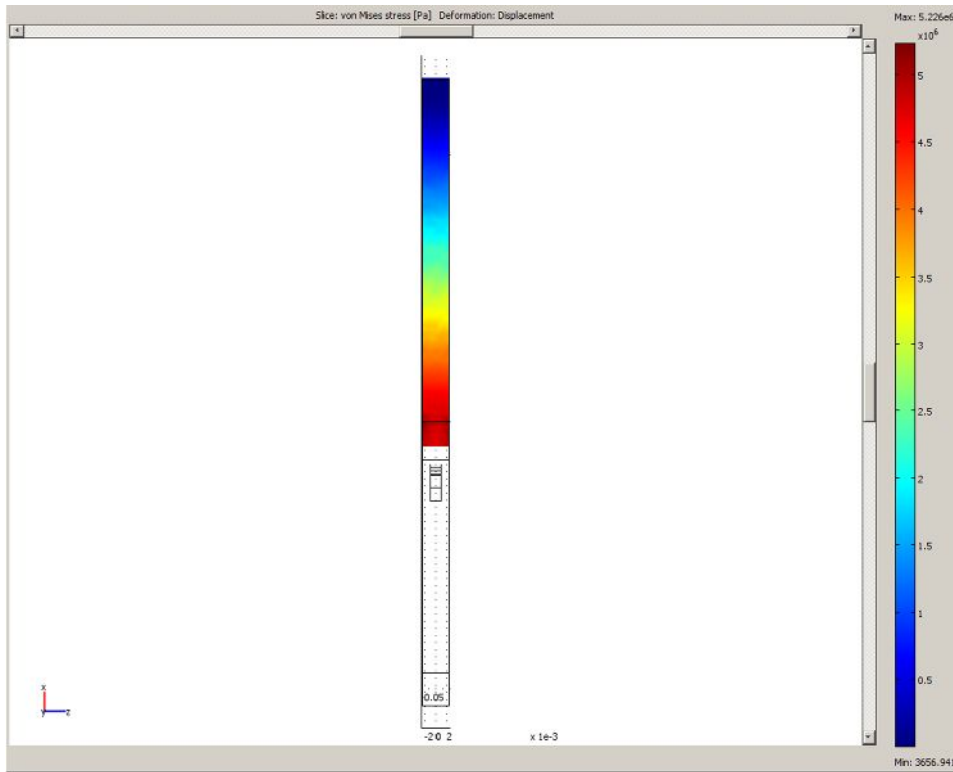
Rys.15.: Wykres odkształceń koordynaty osi x



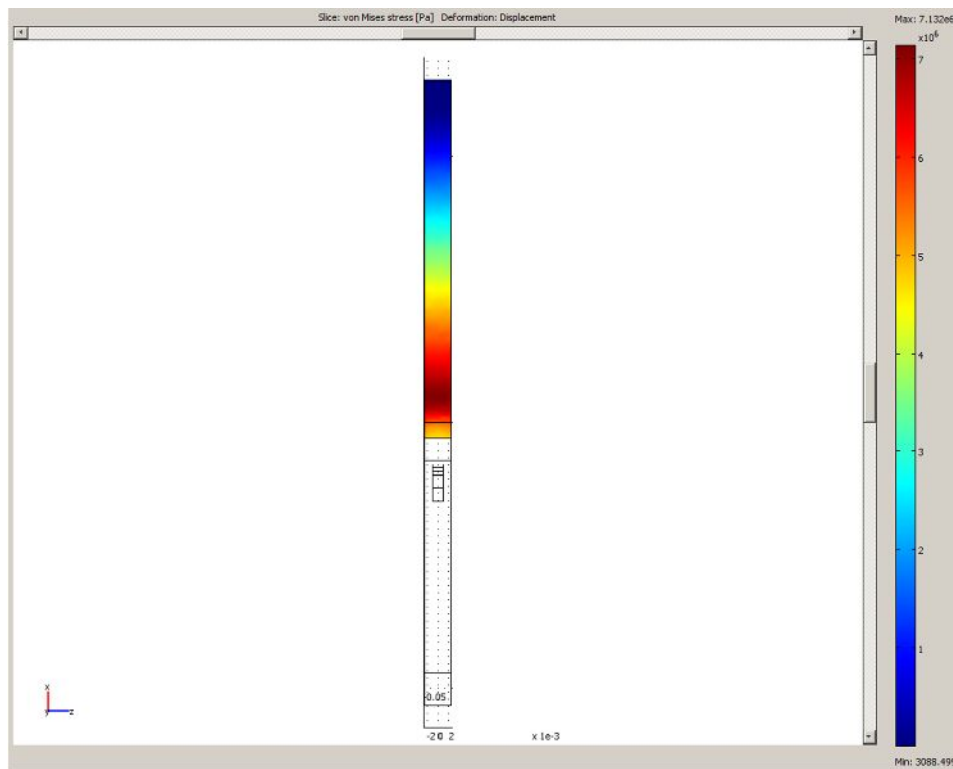
Rys.16.: Wykres odkształce koordynaty osi x



Rys.17.: Wykres odkształce koordynaty osi x

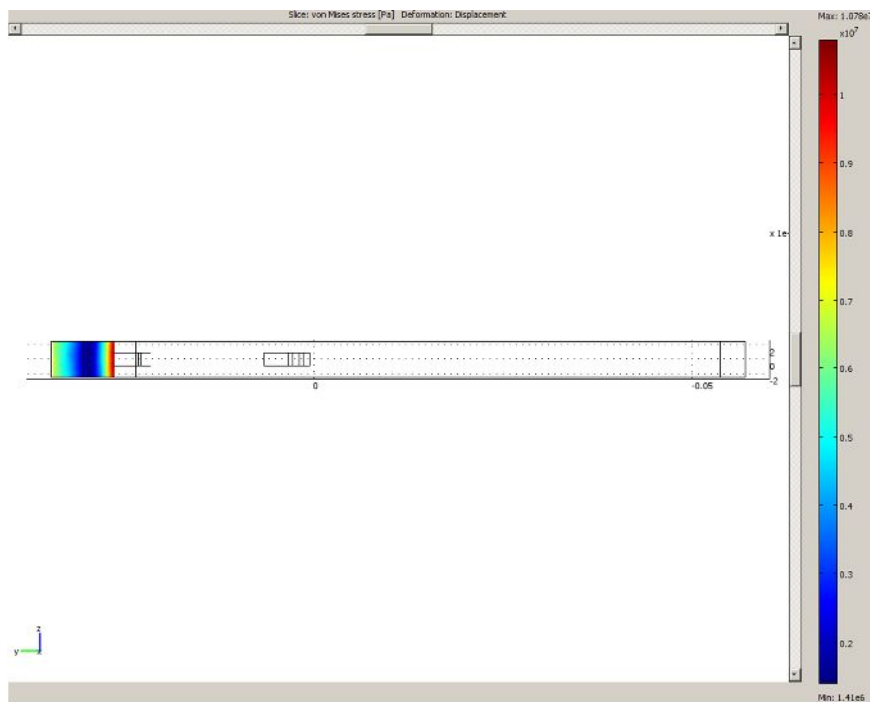


Rys.18.: Wykres odkształce koordynaty osi x

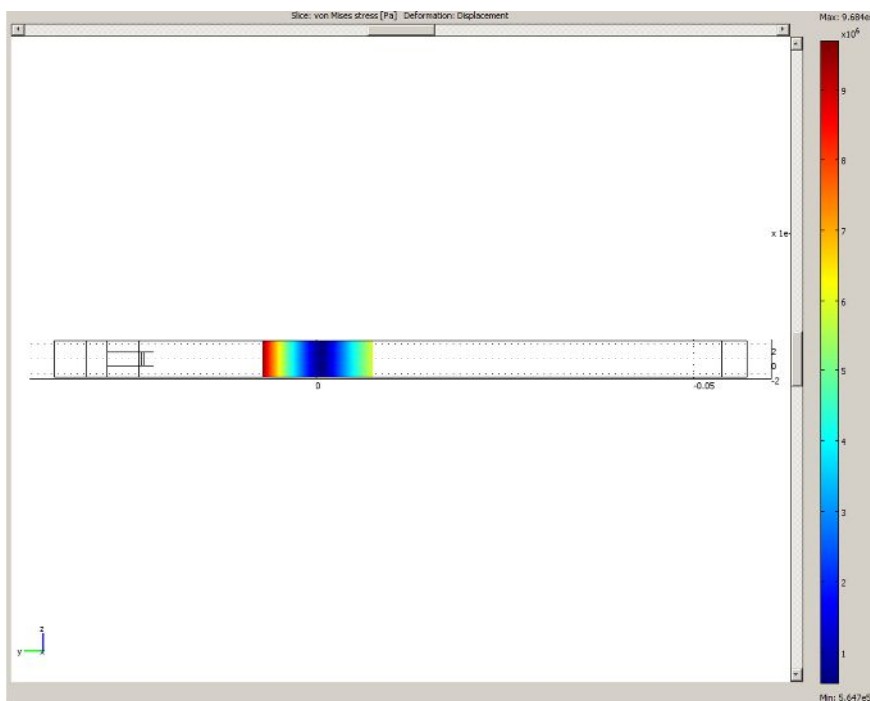


Rys.19.: Wykres odkształce koordynaty osi x

Wykresy odkształceń koordynaty osi y.

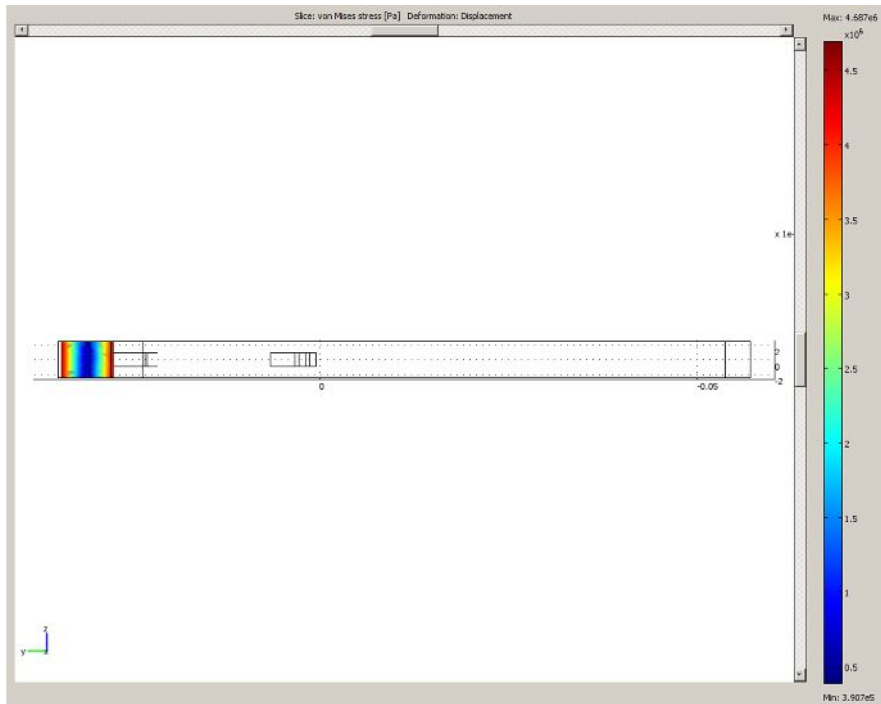


Rys.20.: Wykres odkształceń koordynaty osi y

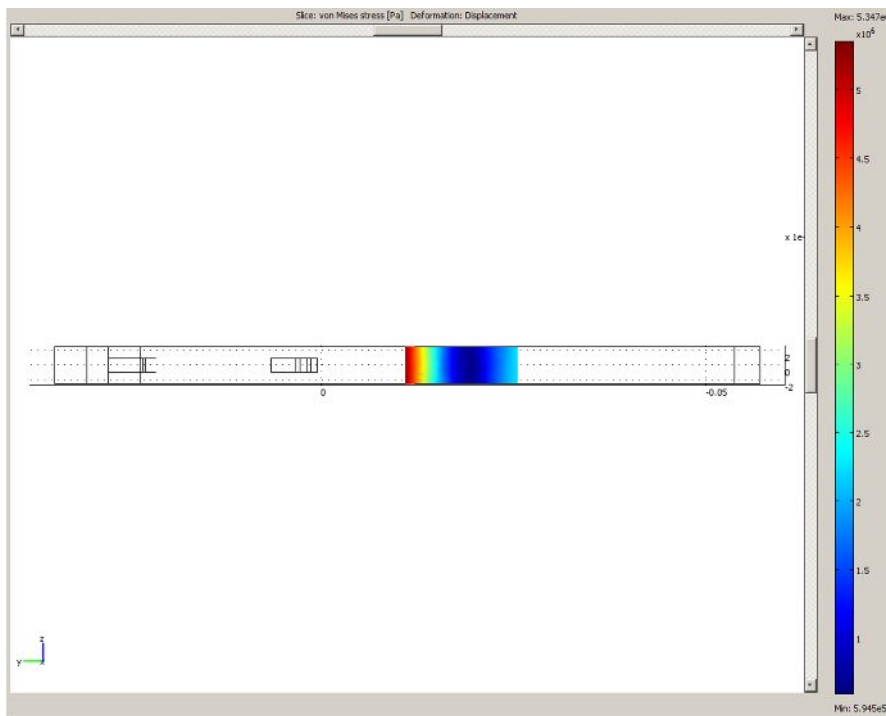


Rys.21.: Wykres odkształceń koordynaty osi y

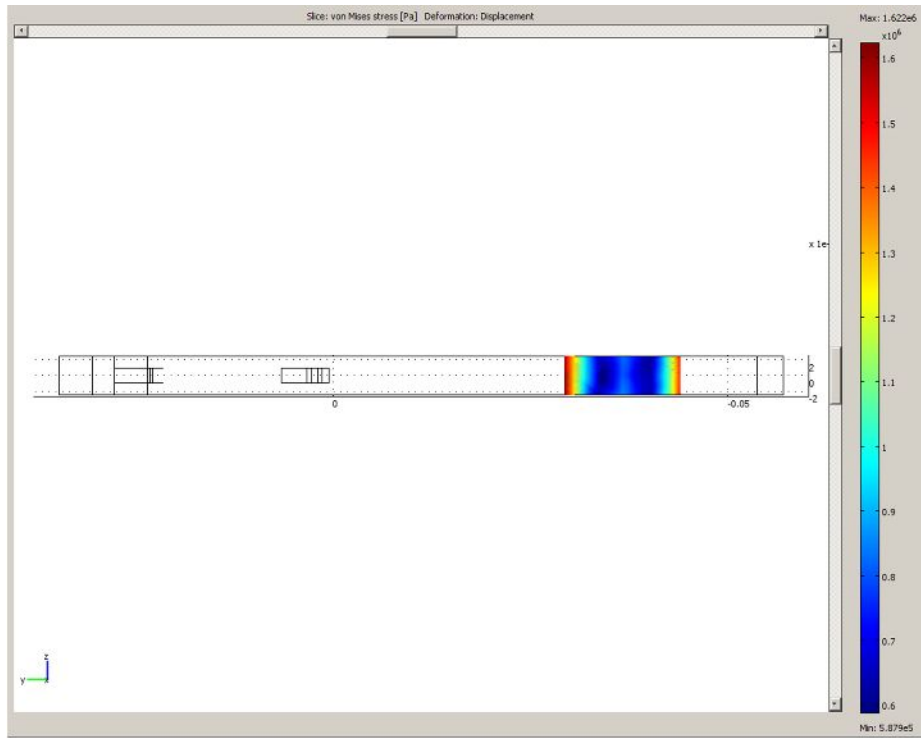




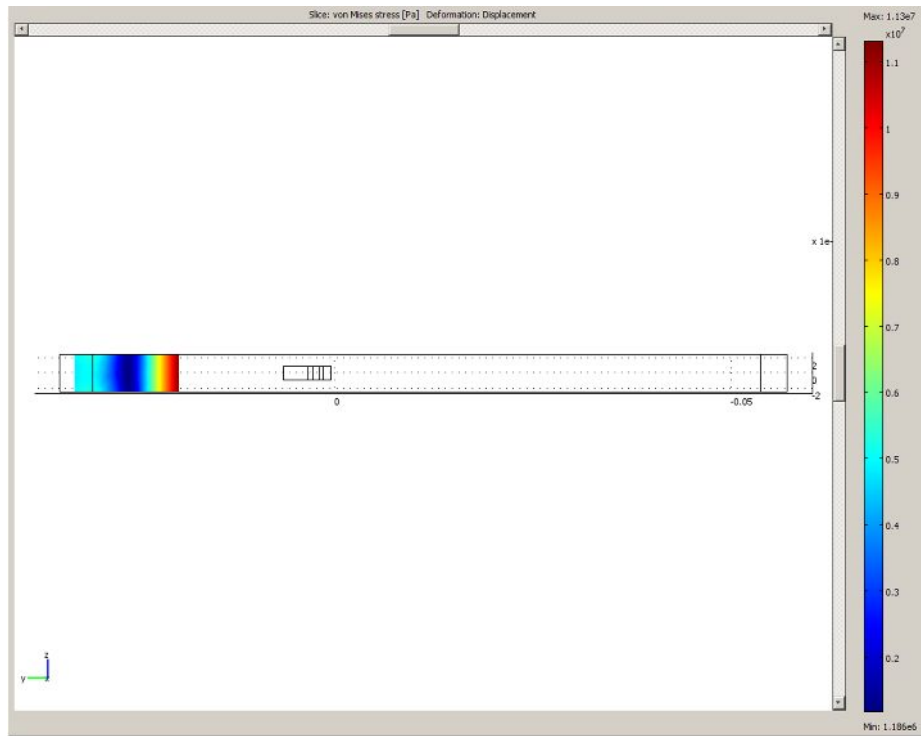
Rys.22.: Wykres odkształce koordynaty osi y



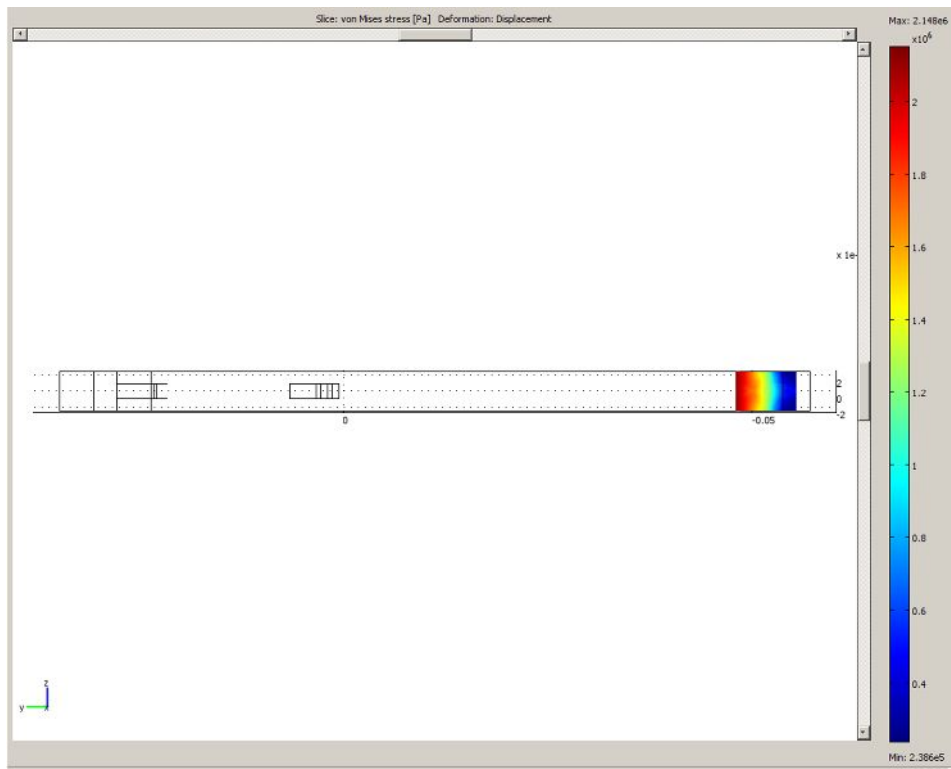
Rys.23.: Wykres odkształce koordynaty osi y



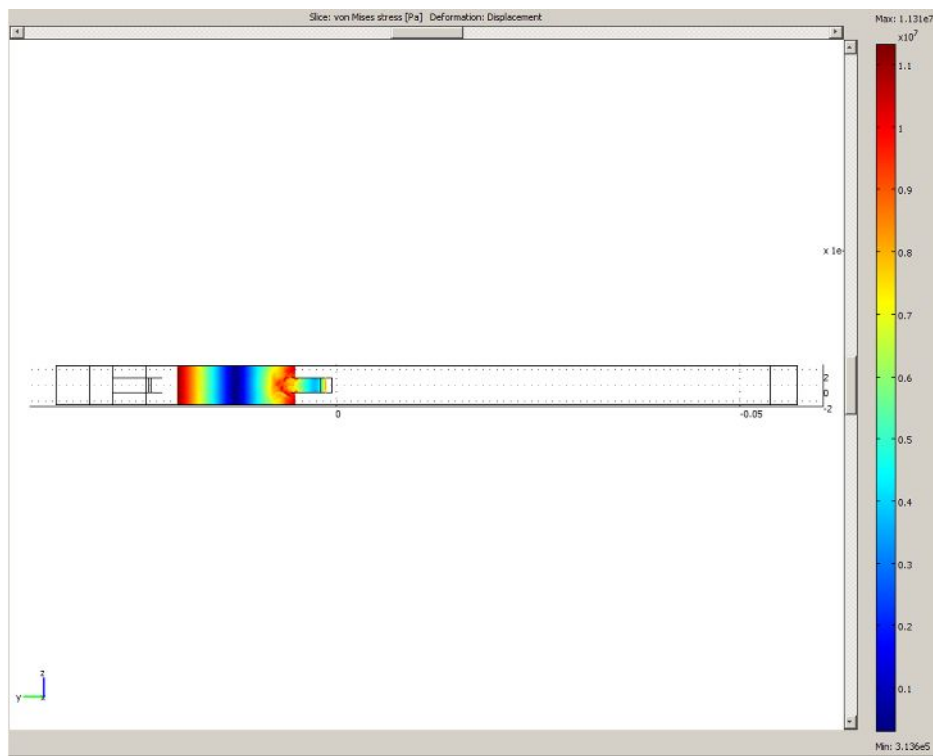
Rys.24.: Wykres odkształce koordynaty osi y



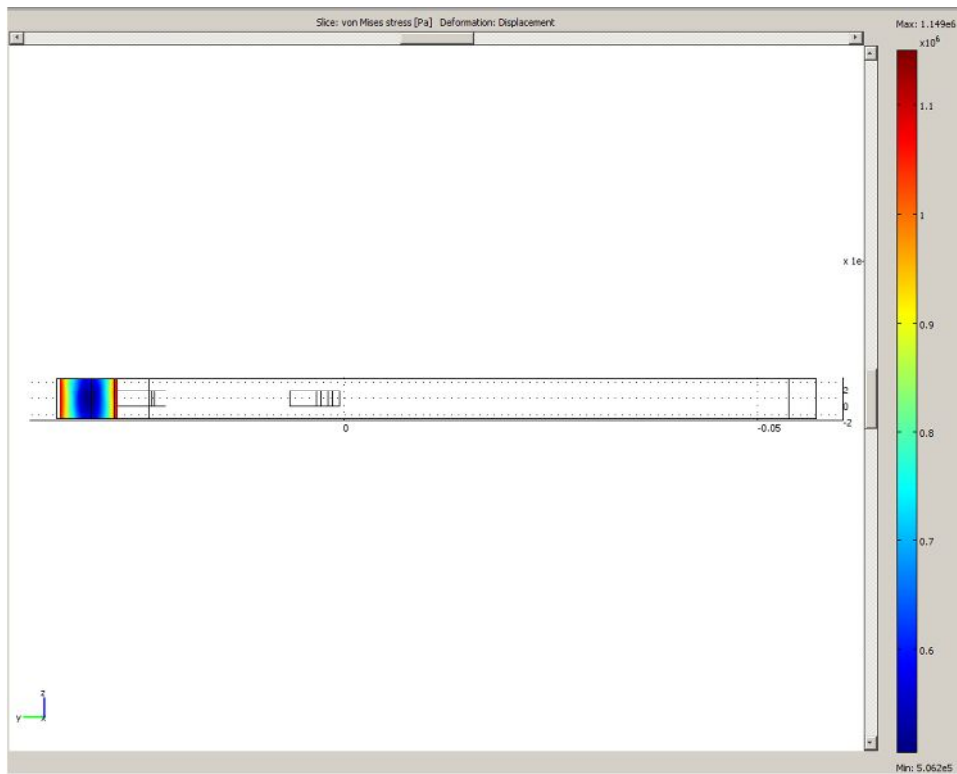
Rys.25.: Wykres odkształce koordynaty osi y



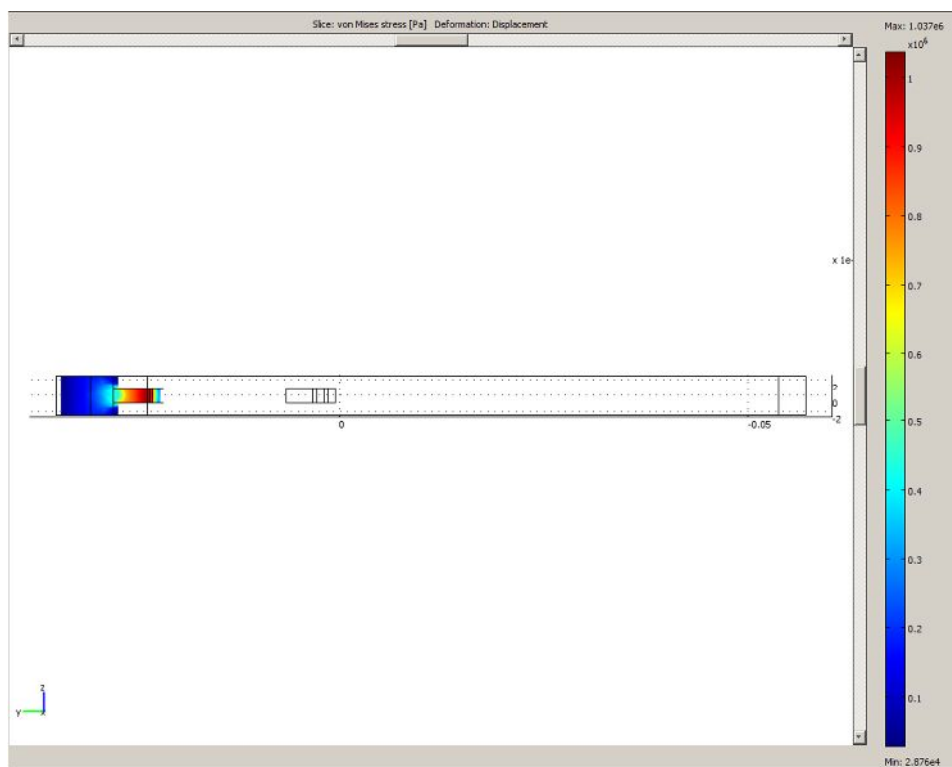
Rys.26.: Wykres odkształce koordynaty osi y



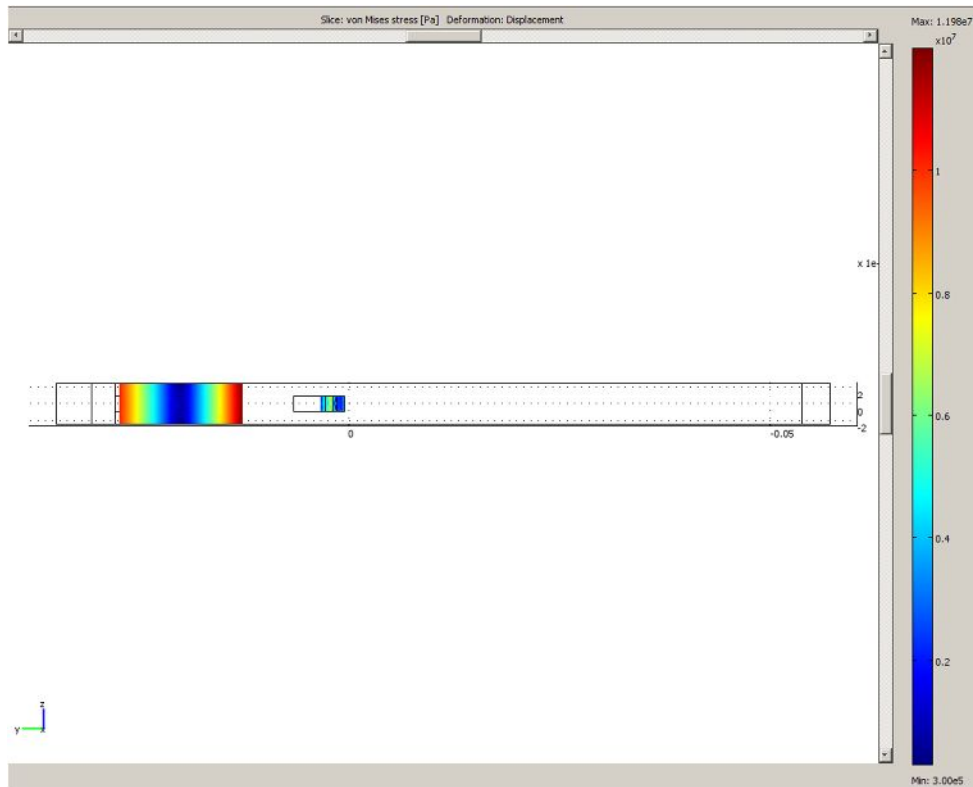
Rys.27.: Wykres odkształce koordynaty osi y



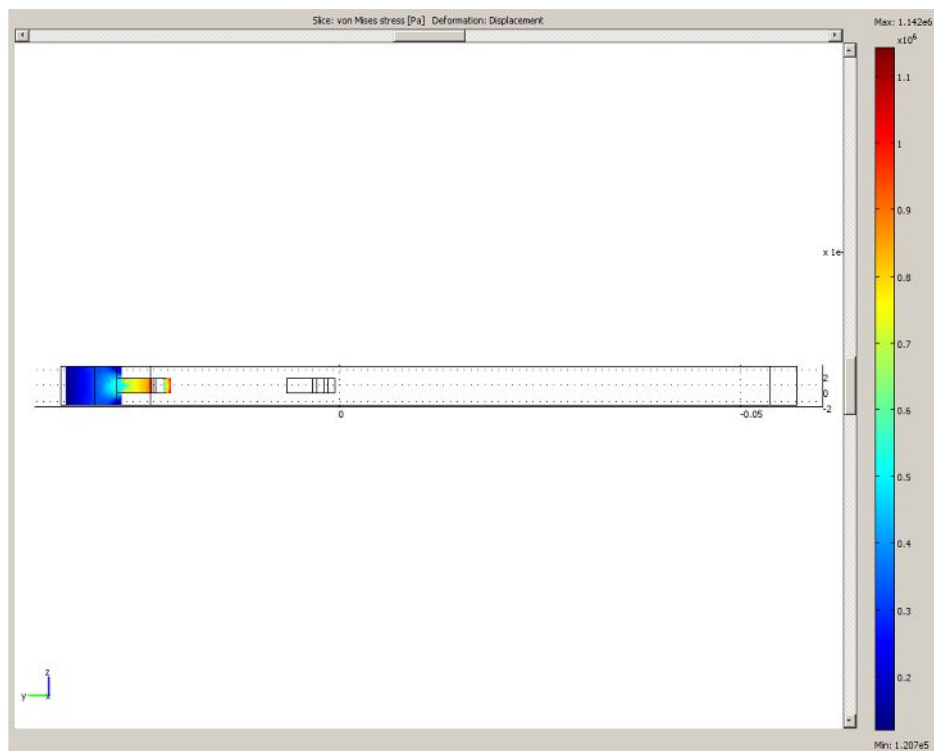
Rys.28.: Wykres odkształce koordynaty osi y



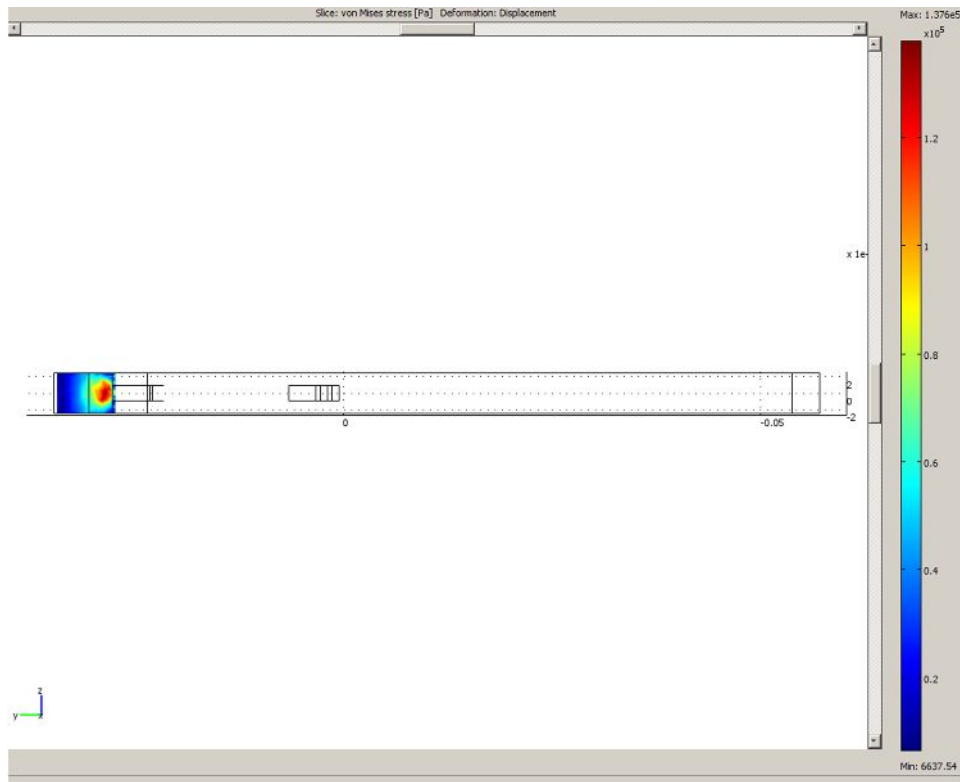
Rys.29.: Wykres odkształce koordynaty osi y



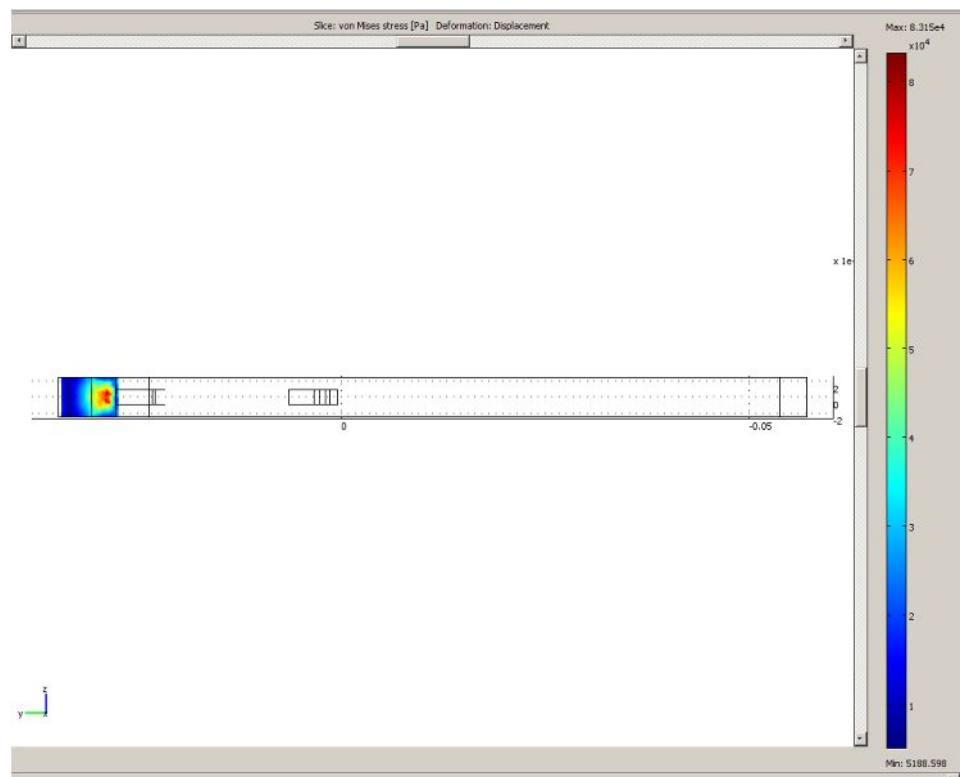
Rys.30.: Wykres odkształceń koordynaty osi y



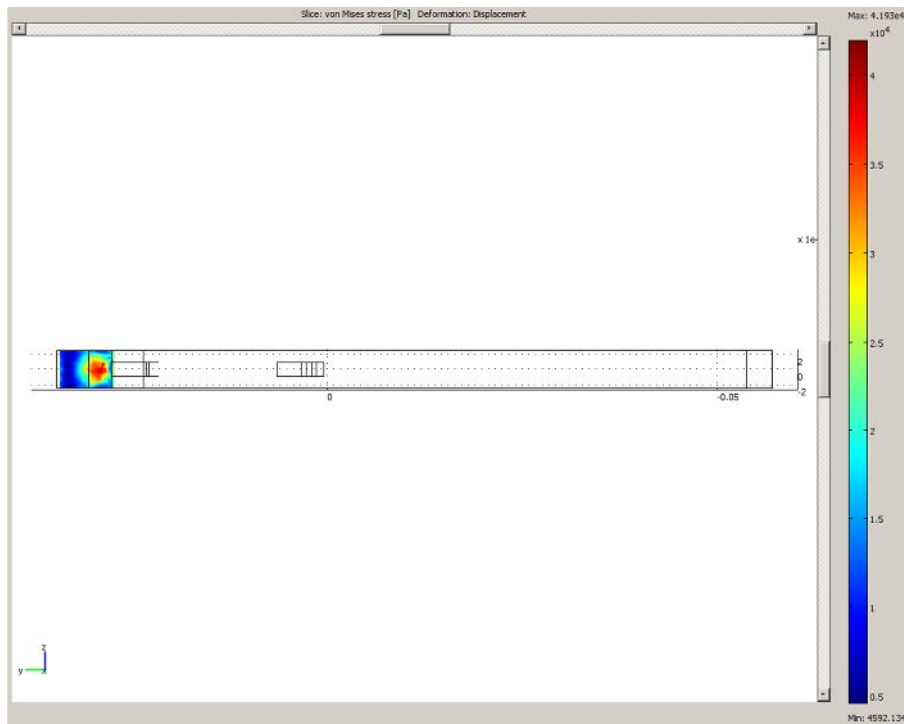
Rys.31.: Wykres odkształceń koordynaty osi y



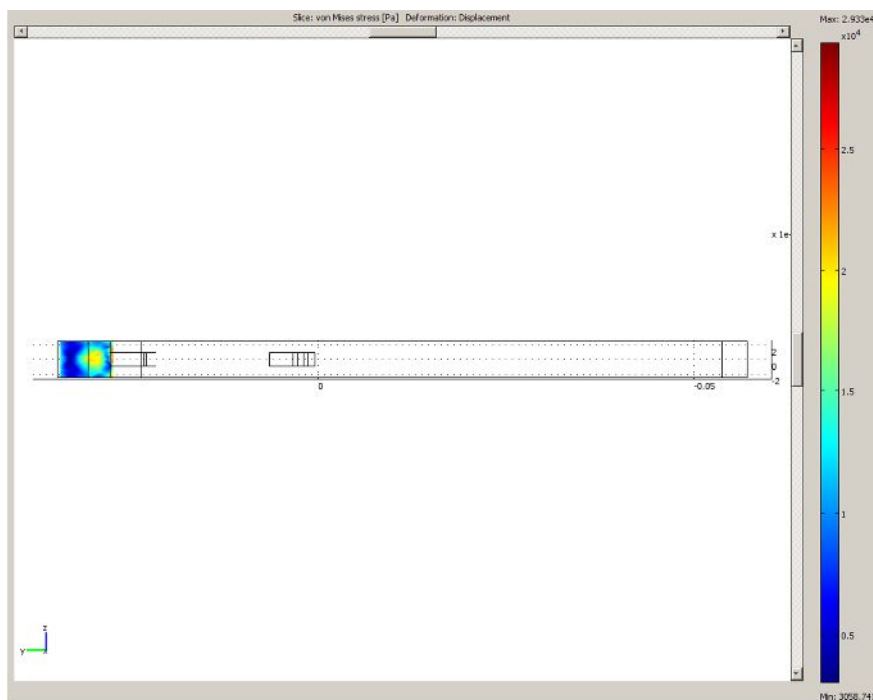
Rys.32.: Wykres odkształce koordynaty osi y



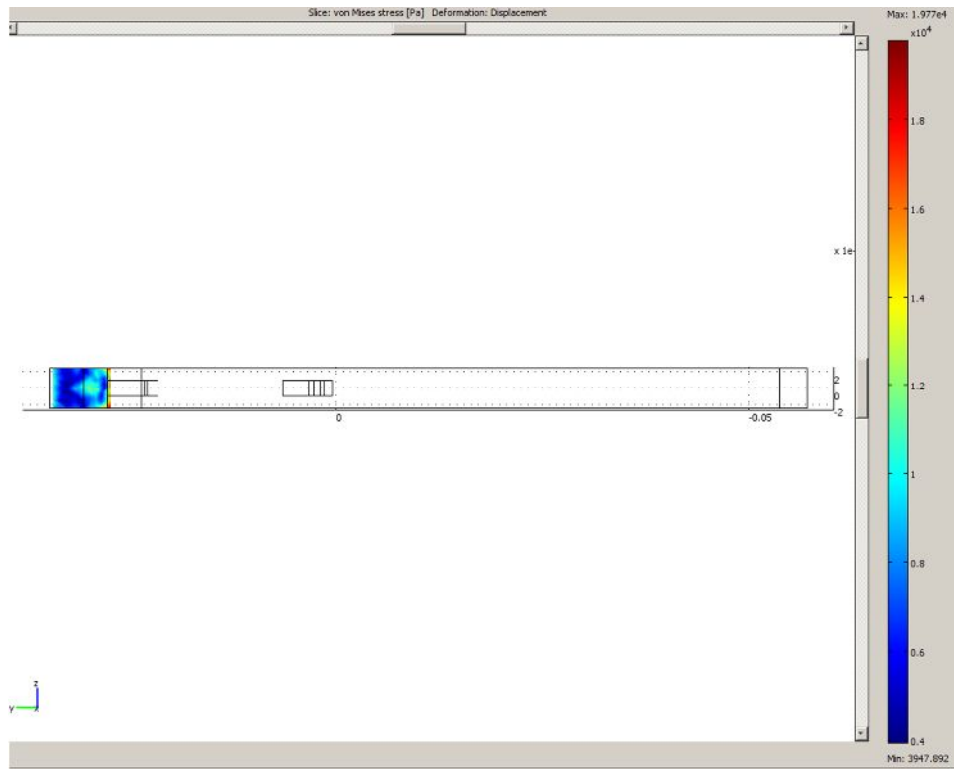
Rys.33.: Wykres odkształce koordynaty osi y



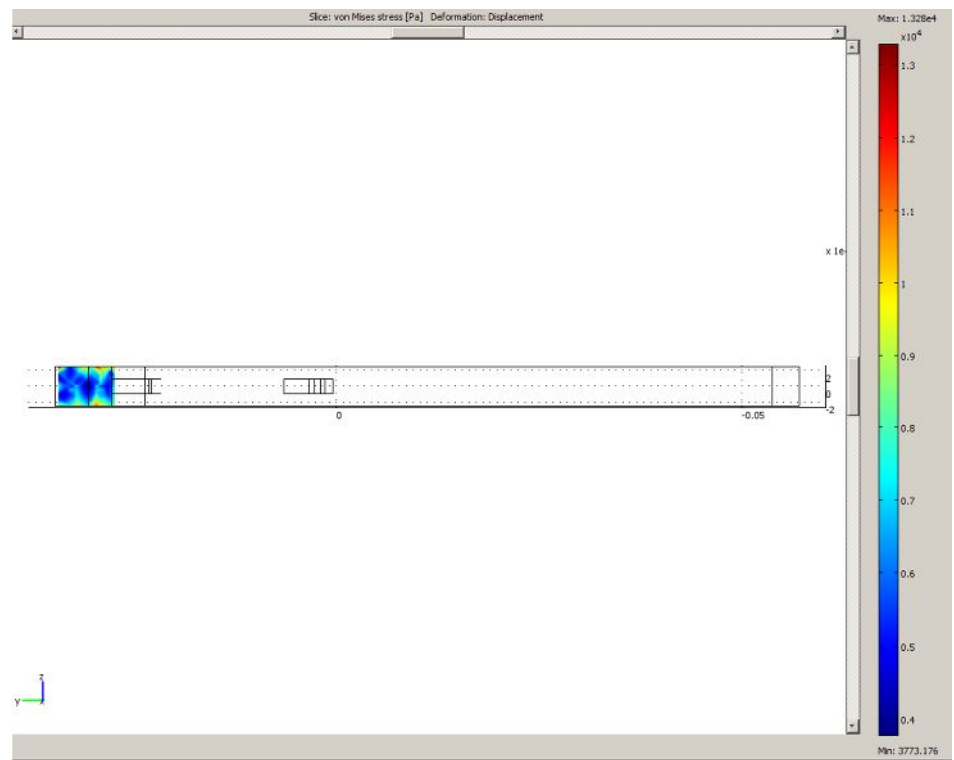
Rys.34.: Wykres odkształce koordynaty osi y



Rys.35.: Wykres odkształce koordynaty osi y

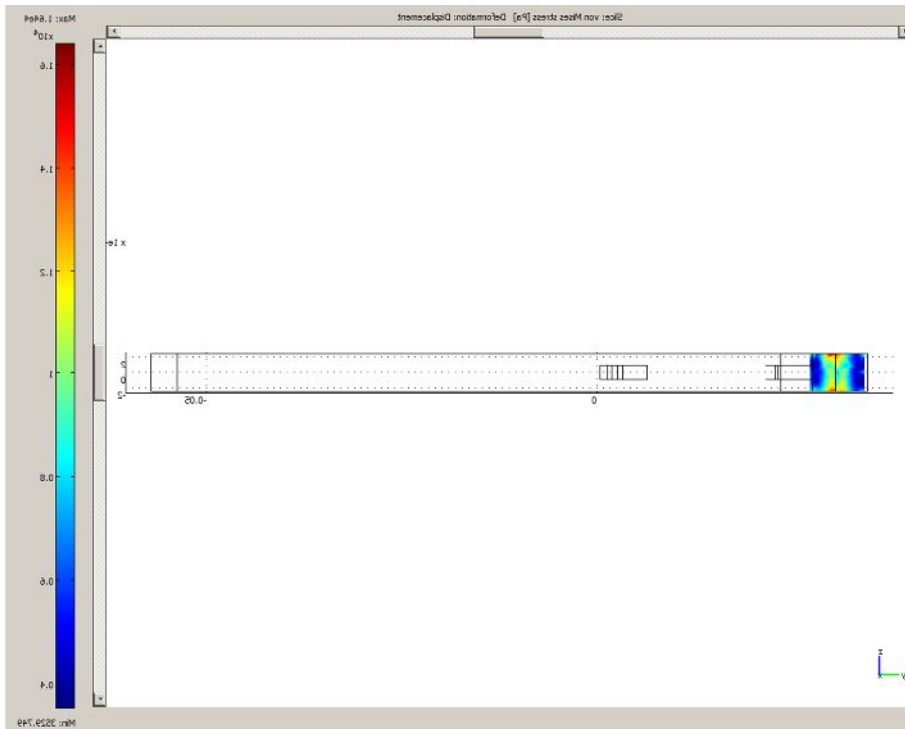


Rys.36.: Wykres odkształce koordynaty osi y

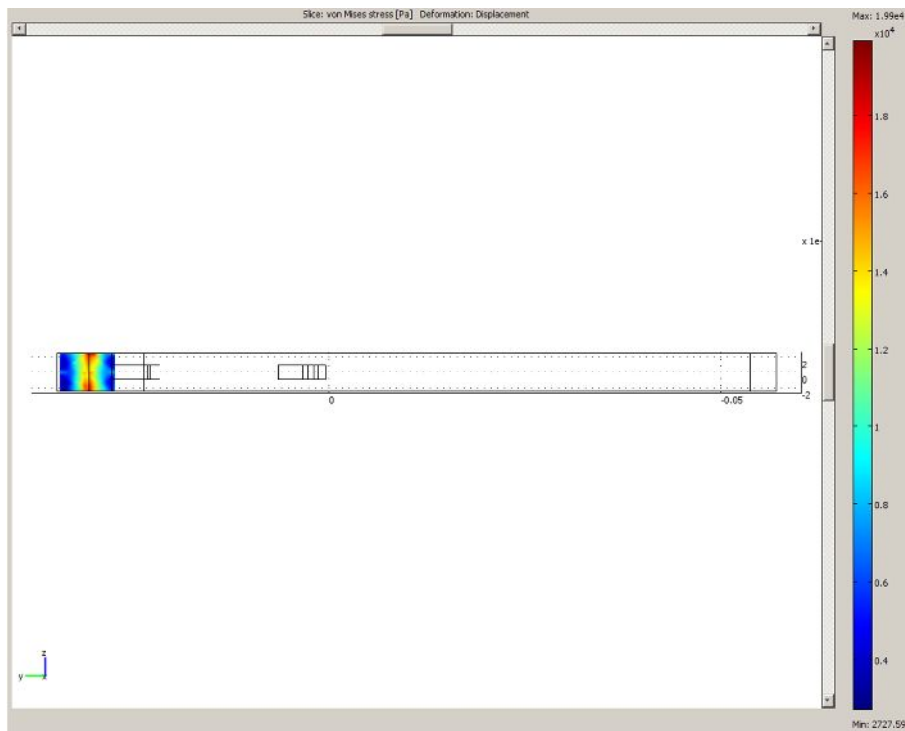


Rys.37.: Wykres odkształce koordynaty osi y



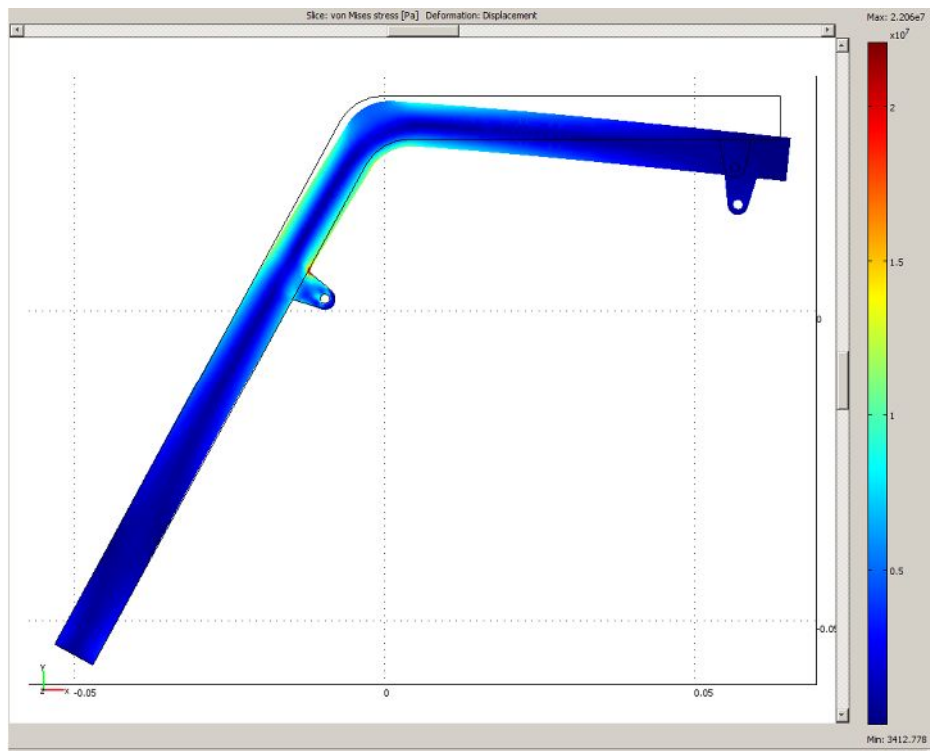


Rys.38.: Wykres odkształceń koordynaty osi y

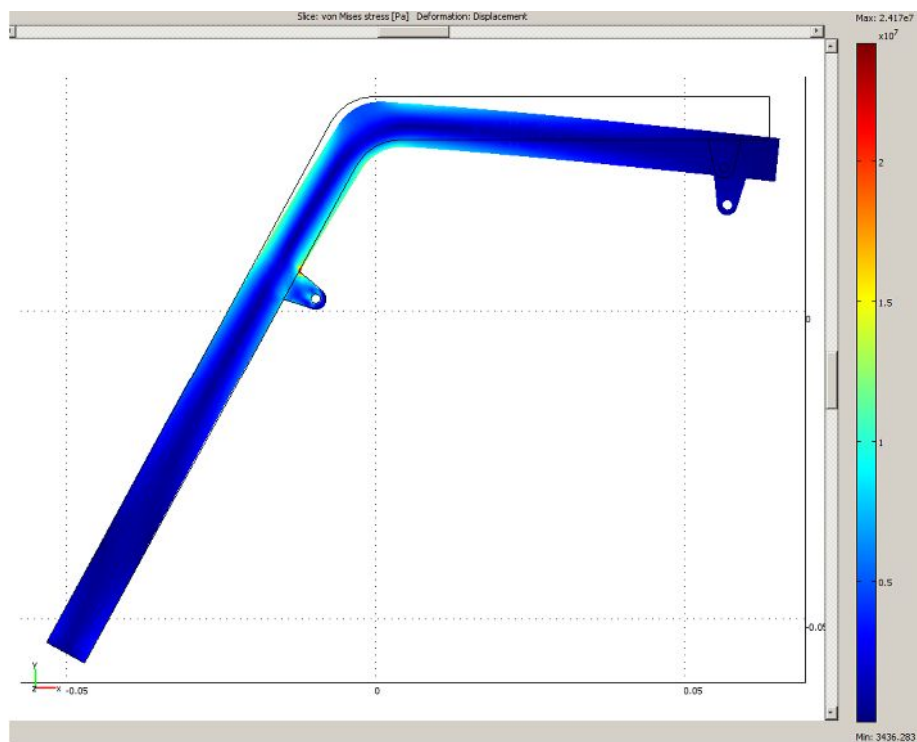


Rys.39.: Wykres odkształceń koordynaty osi y

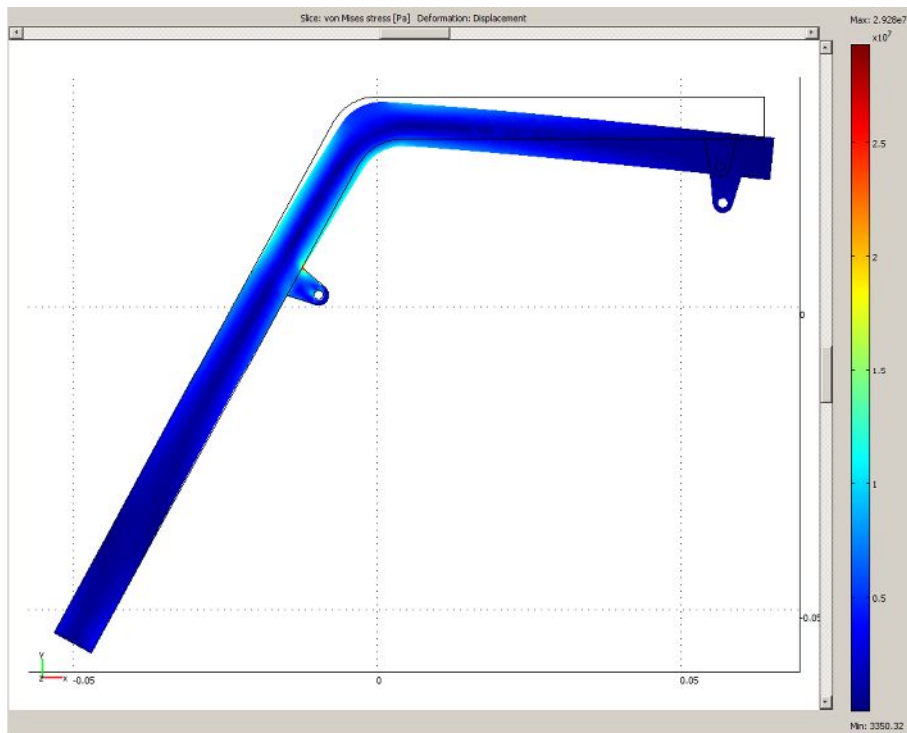
Wykresy odkształceń koordynaty osi z.



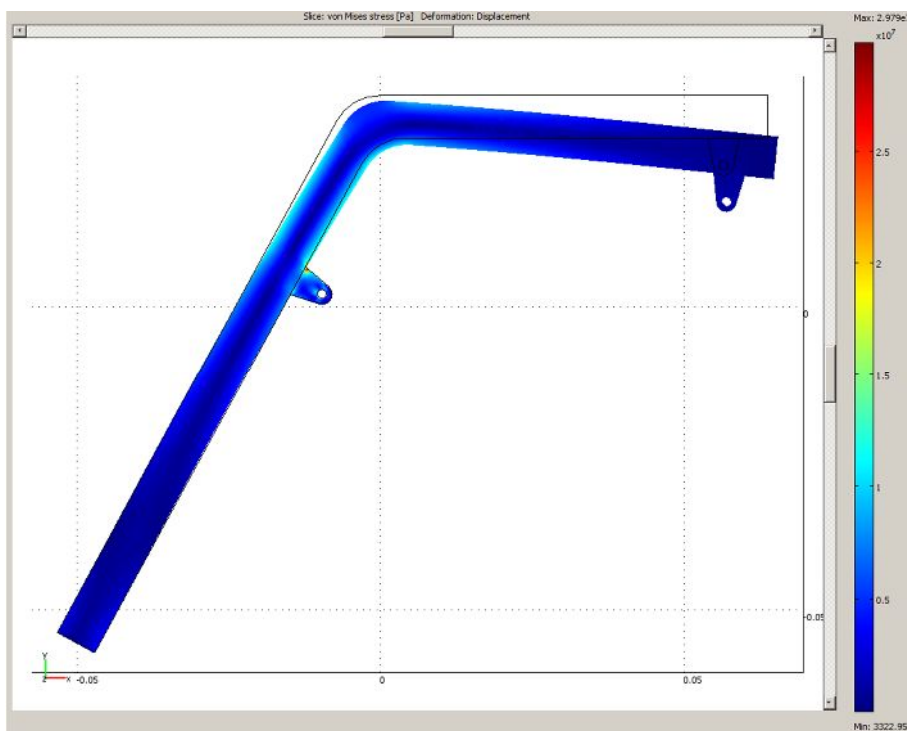
Rys.40.: Wykres odkształceń koordynaty osi z



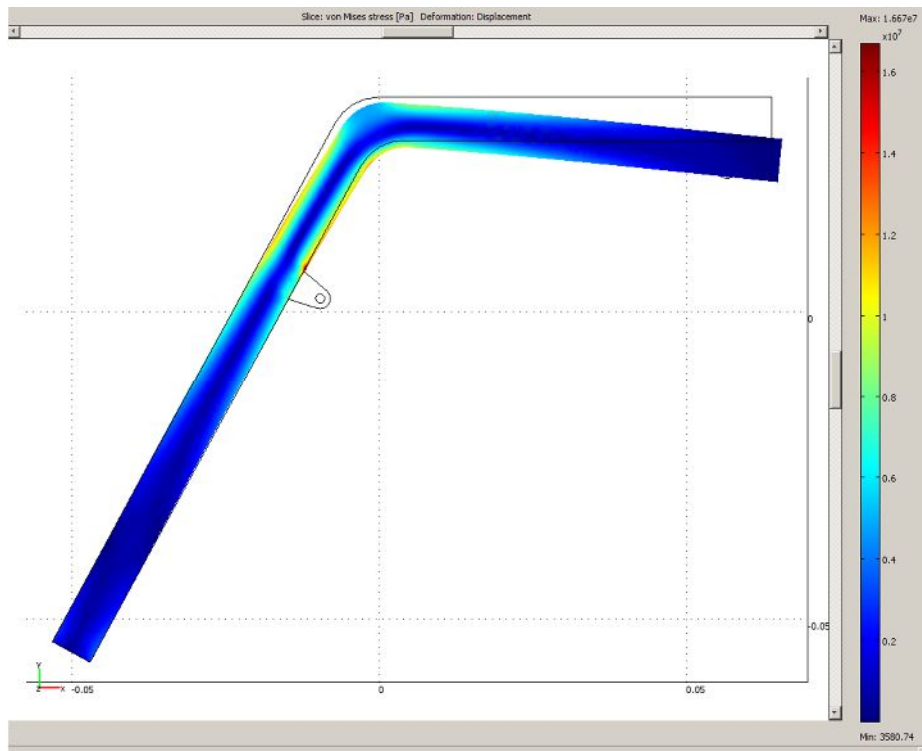
Rys.41.: Wykres odkształceń koordynaty osi z



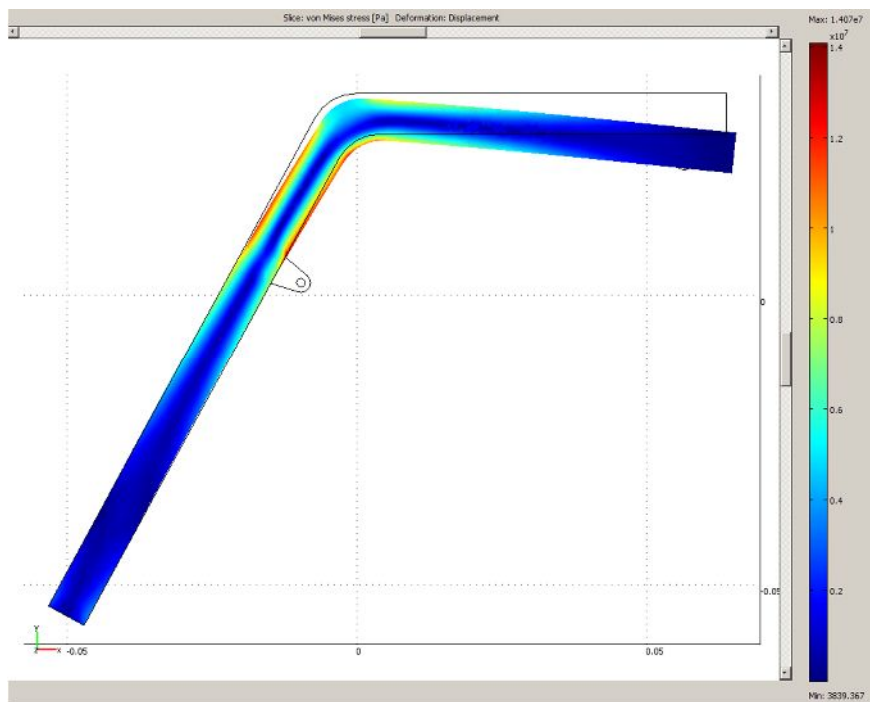
Rys.42.: Wykres odkształce koordynaty osi z



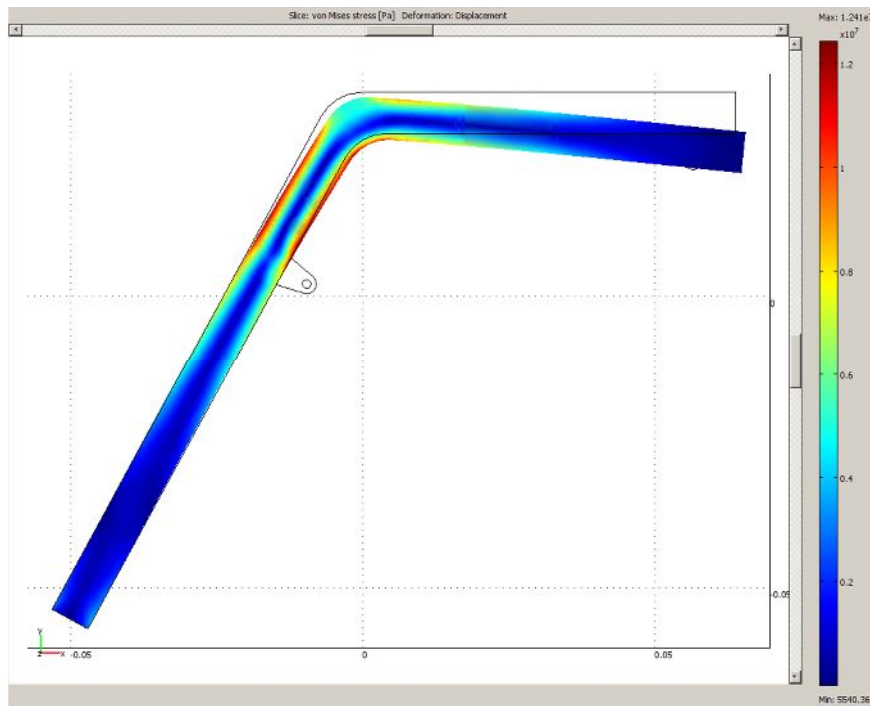
Rys.43.: Wykres odkształce koordynaty osi z



Rys.44.: Wykres odkształce koordynaty osi z



Rys.45.: Wykres odkształce koordynaty osi z



Rys.46.: Wykres odkształce koordynaty osi z

## 6. Wnioski analizy

Oprogramowanie COMSOL Multiphysics jest do intuicyjne i przyjazne w obsłudze. Wystarczyło kilka godzin lekcyjnych, aby się z nim zaznajomić i poznać metody wykonywania prostych analiz i symulacji w bardzo szerokim zakresie zagadnień. Program ten jest bardzo rozbudowanym systemem do uzyskiwania rozwiązań w wielu problemach, wykorzystywane są w nim metody numeryczne do badań symulacyjnych.

### Przygotowanie modelu

Pierwsza przygotowana rama była zaokrąglona na wszystkich krawędziach promieniem 0,2. Program COMSOL Multiphysics nie poradził sobie z przetworzeniem tego modelu, ponieważ był zbyt skomplikowany. Należało zlikwidować zaokrąglenia, aby program działał poprawnie. Kolejnym problemem, na który się natknęliśmy, był format pliku. Pierwotnie model był zapisany w rozszerzeniu \*.stl. Dla takiego rozszerzenia program nie poradził sobie z wygenerowaniem siatki. Aby można było wprowadzić ten etap do projektu, jakim jest tworzenie siatki, należało zmienić rozszerzenie modelu na \*.igs. Po wprowadzeniu zmian siatka generowała się bez problemu.

Siatka, dla której wykonano symulację, była złożona z 8046 trójkątów. Była to największa ilość przy której komputer był zdolny do pracy. Przy większej liczbie trójkątów (około 14000) moc obliczeniowa komputera była za słaba. Przy uzupełnianiu parametrów

warunków brzegowych, podane siły należy przedstawić w  $\text{N/m}^2$ . Aby to zrobić trzeba było przekształcić dobrane wcześniej wartości sił, które były w niutonach, korzystając z odpowiedniego wzoru.

### Symulacja obciążenia

Wyniki badań pokazane zostały w wielu przekrojach w różnych osiach, aby szczegółowo pokazać zmiany naprężeń powstających w materiale. Naprężenia na wykresach wyrażone są w Pa, ponadto skalę znajdując się po prawej stronie modelu należy pomnożyć przez odpowiedni potęg 10-ciu.

Na wykresach, które przedstawiają przekroje modelu w osi x wyraźnie widać, że największe naprężenia pojawiają się w okolicach łezienia uchwytu siłownika z ram podnośnika oraz w miejscu wygięcia profilu ramy. Zakres wartości tych naprężeń wynosi od  $4,5 \times 10^6$  do  $7 \times 10^6$  Pa.

Zakres wartości największych naprężeń, które występują w analizie wytrzymałościowej przekrojów modelu w osi y jest większy niż w przypadku przekrojów w osi x. Zawiera się on w przedziale od  $2 \times 10^4$  do  $1 \times 10^7$  Pa i jest zależny od konkretnego przekroju. W tym przypadku również największe naprężenia odnoszą się do połączenia uchwyt – rama podnośnika. Zaobserwowano również znaczne naprężenia pojawiające się na krawędziach ramy.

Analizując wykres przekrojów w osi z widzimy, że największe naprężenia, o wartościach  $2,5 \times 10^7$  Pa, występują na łezieniu uchwytu siłownika. Dodatkowo wykresy ukazują nam odkształcenie ramy przy tak dużym obciążeniu.

Podsumowując największe naprężenia występują bezpośrednio w połączeniu między uchwytem siłownika, a ramą podnośnika. Dzieje się tak, dlatego że siła pochodząca od siłownika nie działa w osi uchwytu. Wykresy pokazują, że uchwyt zachowuje się tak, jakby chciał oderwać się od ramy. Mimo tego, naprężenia nie są na tyle duże, aby to się stało, nawet przy maksymalnym obciążeniu. Cała konstrukcja jest bezpieczna i nie ma przeciwwskazań do jej stosowania w praktyce.