

# Numerička analiza i optimizacija konstrukcije odbojnika željezničkog vagona

---

Težak, Karlo

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:248255>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-12**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ STROJARSTVA

DIPLOMSKI RAD

**NUMERIČKA ANALIZA I OPTIMIZACIJA  
KONSTRUKCIJE ODBOJNIKA ŽELJEZNIČKOG  
VAGONA**

Karlo Težak

0069082258

RIJEKA, 2024.

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ STROJARSTVA

DIPLOMSKI RAD

**NUMERIČKA ANALIZA I OPTIMIZACIJA  
KONSTRUKCIJE ODBOJNIKA ŽELJEZNIČKOG  
VAGONA**

Mentor: prof. dr. sc. Marino Brčić

Karlo Težak

0069082258

RIJEKA, 2024.

Rijeka, 7. ožujka 2023.

Zavod: **Zavod za tehničku mehaniku**  
Predmet: **Metoda konačnih elemenata čvrstih tijela**  
Grana: **2.15.06 tehnička mehanika (mehanika krutih i deformabilnih tijela)**

## ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: **Karlo Težak (0069082258)**  
Studij: Sveučilišni diplomski studij strojarstva  
Modul: Konstruiranje i mehatronika

Zadatak: **Numerička analiza i optimizacija konstrukcije odbojnika željezničkog vagona / Numerical analysis and design optimization of railway car absorber**

Opis zadatka:

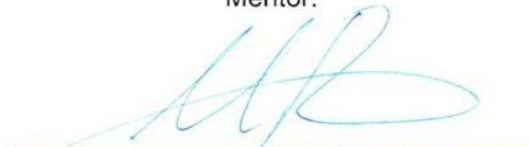
Metodom konačnih elemenata napraviti numeričku analizu naprezanja i zamora te optimizaciju dizajna konstrukcije odbojnika udara dijela konstrukcije željezničkog vagona. Izračunati opterećenja koja djeluju na spomenute komponente sklopa, analizirati konstrukciju. Predložiti novi dizajn sklopa odbojnika, s obzirom na zadane parametre.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.


*Karlo Težak*

Zadatak uručen pristupniku: 20. ožujka 2023.

Mentor:

  
Izv. prof. dr. sc. Marino Brčić

Predsjednik povjerenstva za  
diplomski ispit:

  
Izv. prof. dr. sc. Igor Bonefačić

## IZJAVA

*Prema pravilniku o diplomskom radu, diplomskom ispitu i završetku diplomskih sveučilišnih studija Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, izjavljujem da sam diplomski rad samostalno izradio primjenjujući stečeno znanje tijekom studija, koristeći navedenu literaturu uz pomoć mentora prof. dr. sc. Marina Brčića.*

---

Karlo Težak

## ZAHVALA

*Ovim putem zahvaljujem se prof.dr.sc Marinu Brčiću na prihvaćanju mentorstva i pružanom stručnom vođenju kroz izradu diplomskog rada.*

*Također zahvaljujem se svojoj obitelji i prijateljima na velikoj podršci i razumijevanju kroz cijeli studij. Bez vas ovaj rad ne bi postojao.*

*Hvala vam!*

## **SAŽETAK**

U ovom diplomskom radu izrađena je numerička analiza i optimizacija konstrukcije odbojnika udara željezničkog vagona, za zadani materijal i zadane radne uvjete. Rad u devet poglavlja objašnjava pozadinu čvrstoće konstrukcija, metodu konačnih elemenata, odbojnik udara te rad u programu Catia V5. Na početku je izrađen osnovni model kojeg se podvrgnulo radnim uvjetima kojeg se zatim optimiziralo kako bi se konstrukciji smanjila masa. Iteracijama se dolazi do konačne konstrukcije koja se detaljno provjerava pomoću numeričkih analiza. Na kraju je napravljena analiza na zamor materijala kako bi se osiguralo da će konstrukcija izdržati dugi niz godina upotrebe na željezničkom vagonu.

Ključne riječi: metoda konačnih elemenata, MKE, numerička analiza, optimizacija oblika, zamor materijala, Catia, naprezanja, deformacije, odbojnik udara

## **SUMMARY**

In this master's thesis, a numerical analysis and optimization of the crash buffer construction for a railway wagon were conducted, considering specified material and working conditions. The work is divided into nine chapters, explaining the background of structural strength, the finite element method, crash buffer, and the use of Catia V5 software. Initially, a baseline model was created and subjected to working conditions, followed by optimization to reduce the construction's mass. Through multiple iterations, the final design was achieved, which underwent detailed numerical analyses to ensure it meets the specified working conditions. In conclusion, a fatigue analysis of the material was conducted to ensure the construction's durability over an extended period of use on a railway wagon.

Keywords: finite element method, FEM, numerical analysis, shape optimization, fatigue, Catia, stress, deformation, crash buffer

# SADRŽAJ

1. Uvod.....	3
2. Osnovni pojmovi.....	4
2.1 Opterećenje.....	4
2.2 Naprezanje.....	6
2.3 Deformacija.....	8
2.4 Teorije čvrstoće.....	9
2.4.1 Teorija najvećeg normalnog naprezanja.....	10
2.4.2 Teorija najveće duljinske deformacije.....	11
2.4.3 Teorija najvećeg tangencijalnog naprezanja.....	11
2.4.4 Teorija najveće distorzijske energije.....	12
2.5 Dijagram $\sigma - \epsilon$ .....	12
2.6 Trajnost.....	15
2.7 Mehanika loma.....	15
2.7.1 S-N krivulja ( <i>Stress-Cycles</i> ).....	16
2.8 Odbojnik – apsorber udara.....	17
3. Odabrani materijal.....	20
4. Metoda konačnih elemenata (MKE – FEM).....	22
4.1 Jednodimenzijski konačni elementi.....	23
4.2 Dvodimenzijski konačni elementi.....	25
4.3 Trodimenzijski konačni elementi.....	27
4.4 Linearni i parabolični tip elemenata.....	29
5. Oblikovanje konstrukcije i numerička analiza.....	30
5.1 Početna konstrukcija.....	31
5.2 Početna numerička analiza.....	32
5.2.1 Postavljanje <i>Mesh-a</i> .....	33
5.3 Postavljanje veza.....	39



5.4	Postavljanje rubnih uvjeta opterećenja.....	44
5.5	Postavljanje rubnih uvjeta pomaka .....	45
5.6	Postavljanje drugog slučaja.....	45
5.7	Analiza rezultata.....	47
5.8	Završna konstrukcija .....	51
6.	Rezultati numeričke analize .....	55
6.1	Rezultati <i>Von Misess Stress</i> .....	55
6.2	Pomaci.....	59
7.	Izvijanje.....	61
8.	Zamor materijala .....	67
8.1	Norma - HRN EN 61373 – Oprema za željeznička vozila – Ispitivanje na udare i vibracije.....	67
8.2	Grafički prikaz cikličkih opterećenja .....	68
8.3	Postavljanje cikličkih opterećenja.....	69
8.4	Rezultati .....	71
8.4.1	Akceleracije po osi x .....	71
8.4.2	Akceleracije po osi y .....	74
8.4.3	Akceleracije po osi z .....	76
9.	Zaključak.....	78
10.	Popis slika .....	79
11.	Popis tablica .....	82
12.	Izvori .....	83
13.	Prilog.....	84

## 1. UVOD

U dinamičkom svijetu kontinuirano unapređivanje sigurnosnih karakteristika vozila postaje vrlo bitan zahtjev. Ovaj zahtjev je izrazito bitan u željezničkom prijevozu gdje se može nalaziti puno ljudi u samom vlaku i izvan njega. Bitnu ulogu ima odbojnik udara koji je smješten na prednjem dijelu željezničkog vagona. Ovakav sustav mora biti sposoban osigurati raspodjelu i apsorpciju energije koja se generirala tijekom snažnog udara (sudara). Kako bi se vlak smatrao sigurnom za prometovanje željezničkom prugom, nakon udara integritet vlaka mora biti sačuvan, a što je najvažnije putnici moraju biti sigurno.

Numerička analiza je inženjerski alat, kojim se precizno simuliraju različite fizičke pojave unutar konstrukcije. U ovom radu to će biti naprezanja, deformacije i zamor materijala. Dobivenim rezultatima takve analize možemo optimizirati samu konstrukciju i smanjiti joj masu. Odbojnici udara kao dio vagona igraju ključnu ulogu, stoga je analiza i optimizacija konstrukcije odbojnika neizostavni dio razvoja željezničkih vozila.

Optimizacija konstrukcije je postupak kada konstrukciji optimiziramo geometriju kako bi dobili optimalnu konstrukciju i tako joj smanjili masu. Višak mase znatno utječe na potrošnju goriva i performanse. Uz smanjenje troškova dolazi i smanjenje cijena prijevoza putnika i tereta.

Vagoni su opterećeni s dinamičkim silama koje su rezultat interakcije kotača i tračnica. Ove dinamičke sile uzrokuju promjenjiva naprezanja koja dugoročno mogu dovesti do zamora materijala, a nepažnjom i do samog loma materijala. Numerička analiza omogućuje nam da predvidimo kako će se materijal ponašati pod tim rubnim uvjetima naprezanja. Optimizacijom konstrukcije moramo smanjiti mogućnost pojave zamora materijala i dugovječnost konstrukcijskog dijela u eksploataciji.

Kombinacijom ovih numeričkih analiza razvit će se konstrukcija koja će zadovoljavati sigurnosne standarde, dugotrajan i siguran rad u uvjetima eksploatacije.

## 2. OSNOVNI POJMOVI

U sklopu ovog diplomskog rada, bitno je definirati osnovne pojmove koji su navedeni i ukratko objašnjeni u nastavku. Tematika numeričke analize i analize konstrukcije na zamor usko su vezane za pojmove opterećenja, naprezanja, deformacija i trajnosti, odnosno zamora materijala.

### 2.1 Opterećenje

Nauka o čvrstoći bavi se proučavanjem kako opterećenja djeluju na čvrsta tijela, a pod opterećenjima smatramo sile, momente, akceleracije i slično. Kada čvrsto tijelo dođe pod utjecaj takvih opterećenja ono mijenja svoj izvorni oblik i volumen. Ove promjene u obliku nazivamo deformacijama, a one uzrokuju unutrašnje sile unutar čvrstog tijela.

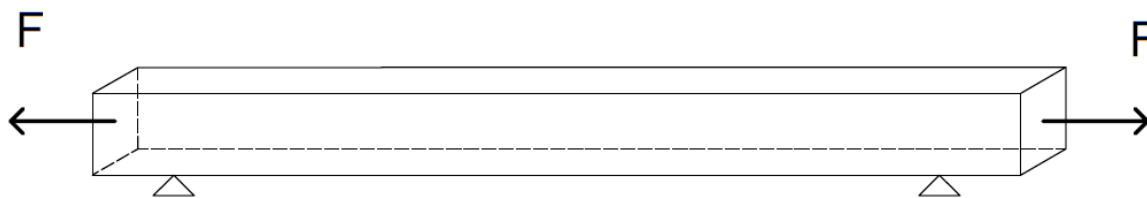
U ovisnosti o vremenu u kojem djeluje vanjsko opterećenje ono može biti:

- Statičko
- Dinamičko.

Dinamičko opterećenje mijenja svoji intenzitet tijekom vremena, za razliku od statičkog koje nema promjene tijekom vremena. Kod dinamičkog opterećenja postoji pojam kvazistatičko opterećenje koje nastaje kada se mogu zanemariti dinamički efekti koje ono uzrokuje svojim uvođenjem i djelovanje. [1]

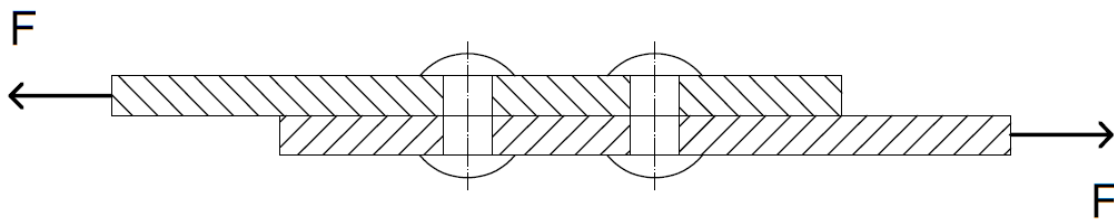
Osnovni oblici vanjskog opterećenja:

- Vlačno ili tlačno aksijalno opterećenje



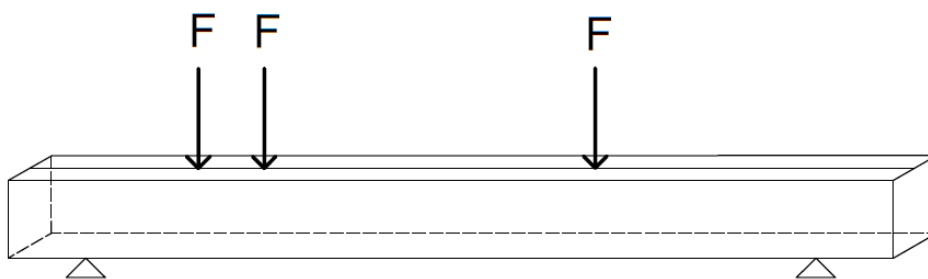
Slika 2.1 Aksijalno opterećenje na vlak [1]

- Smicanje (rez)



Slika 2.2 Smicanje [1]

- Ravno savijanje



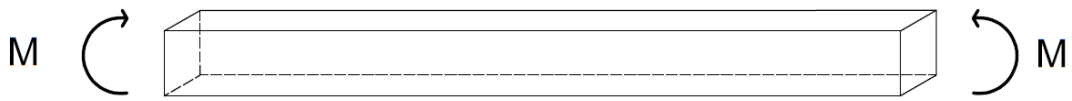
Slika 2.3 Ravno savijanje silama [1]

- Uvijanje (torzija)



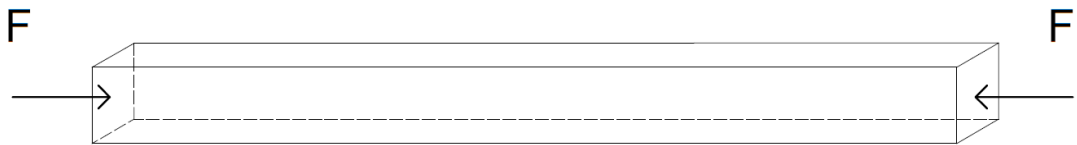
Slika 2.4 Uvijanje [1]

- Savijanje



Slika 2.5 Čisto ravno savijanje [1]

- Izvijanje



Slika 2.6 Izvijanje [1]

## 2.2 Naprezanje

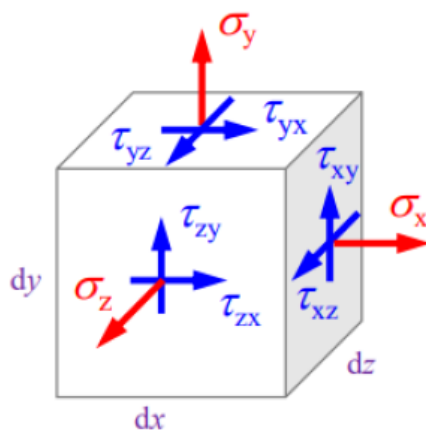
Naprezanje je pojava koja se može opisati unutarnjom silom koja se raspoređuje po nekoj površini presjeka čvrstog tijela, a pojavljuje se kao reakcija zbog djelovanja nekih vanjskih sila.

Naprezanje možemo podijeliti prema:

- Vrsti naprezanja
  - Normalno naprezanje
    - Vlačno
    - Tlačno
  - Tangencijalno naprezanje (smično naprezanje)
- Složenosti
  - Osnovno
  - Složeno
- Glavnim naprezanjima
  - Linearno (jednoosno – 1D)
  - Ravninsko (dvoosno – 2D)
  - Prostorno (troosno – 3D)

Da bi se mogla odrediti veličina naprezanja u nekoj točki potrebno je poznavati orijentaciju presjeka tog istog tijela. Vektor koji je prema normali položen pod kutom se može rastaviti na tri komponente: jedna os je normalno naprezanje (x os) dok su preostale dvije tangencijalna naprezanja (y i z os). Ako bi se svaka os uzela kao normala na promatrani presjek dobivamo da svaka točka tijela ima devet komponenti naprezanja koje su vezane uz jedan koordinatni sustav. Tih devet komponenti čine tenzor naprezanja drugog reda. Takvi tenzor je simetričan te se time šest komponenti međusobno razlikuju.

Svaka točka može se orijentirati tako da samo normale naprezanja imaju vrijednost koja neće biti nula, a preostala tangencijalna naprezanja će biti jednaka nuli. Ta se tri naprezanja zovu glavna naprezanja.



Slika 2.7 Troosno stanje naprezanja infintezimalnog elementa [1]

Za troosno stanje naprezanja na infintezimalnom elementu s slike 2.7 tenzor naprezanja izgleda:

$$\sigma_{ij} = \begin{vmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{vmatrix}$$

(2.1)

Gdje su:

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  – komponente normalnog naprezanja

$\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yx}, \tau_{yz}, \tau_{zx}, \tau_{zy}$  – komponente tangencijalnog naprezanja

Zbog simetričnosti koja je spomenuta prije vrijedi:

$$\tau_{xy} = \tau_{yx}, \tau_{yz} = \tau_{zy}, \tau_{zx} = \tau_{xz} \quad (1.2)$$

Pa tako kada koordinatni sustav postavimo da se osi koordinatnog sustava poklapaju s osima glavnih naprezanja dobiva se sljedeće:

$$\sigma_{ij} = \begin{vmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{vmatrix} \quad (2.3)$$

Gdje su:

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – glavna naprezanja

### 2.3 Deformacija

Nanošenjem vanjskih sila materijalne čestice tijela se pomiču, a iz tog razloga se čitavo tijelo giba.

Takva gibanja mogu se rastaviti na:

- Translaciju: sve čestice nekog tijela imaju jednake brzine i pomake
- Rotaciju: česticama se ne mijenja njihov međusobni položaj, a čestice imaju različite pomake
- Deformaciju: česticama tijela mijenja se i međusobni položaj, pa tako tijelo mijenja svoji oblik i volumen.

Ako razmatramo samo translaciju i rotaciju tijelo se smatra krutim tijelom.

Deformacija može biti elastična i neelastična. Ako smo u zoni elastičnosti tijelo će se nakon prestanka djelovanja opterećenja vratiti u početan oblik, a ako smo u zoni neelastičnosti (plastičnosti) tijelo će ostati u deformiranom obliku. Postoje dva oblika deformacije, to su dilatacija i distorzija. Kod dilatacije dolazi do promjene volumena, a kod distorzije do promjene oblika.

Također postoje tri stanja deformacija:

- jednoosno (linearno)
- dvoosno (ravninsko)
- troosno (prostorno).

Isti princip koji je primijenjen na tenzoru naprezanja može se primijeniti na definiranju tenzora deformacije koji sadrži isto devet komponenti, od kojih je šest različitih. Ako su te komponente deformacije poznate, možemo reći da je tenzor deformacija definiran. Te komponente su definirane s tri pravca kroz proizvoljnu točku, a koji ne smiju biti u istoj ravnini. Za slučaj prostornog stanja deformacije (troosnog), tenzor naprezanja u matričnom obliku izgleda:

$$\varepsilon_{ij} = \begin{vmatrix} \varepsilon_x & \frac{1}{2}\gamma_{xy} & \frac{1}{2}\gamma_{xz} \\ \frac{1}{2}\gamma_{yx} & \varepsilon_y & \frac{1}{2}\gamma_{yz} \\ \frac{1}{2}\gamma_{zx} & \frac{1}{2}\gamma_{zy} & \varepsilon_z \end{vmatrix}$$

(2.4)

Gdje su:

$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$  – komponente duljinske deformacije

$\frac{1}{2}\gamma_{xy}, \frac{1}{2}\gamma_{xz}, \frac{1}{2}\gamma_{yx}, \frac{1}{2}\gamma_{yz}, \frac{1}{2}\gamma_{zx}, \frac{1}{2}\gamma_{zy}$  – komponente kutne deformacije

Analogno konjugiranosti tangencijalnih naprezanja:

$$\frac{1}{2}\gamma_{xy} = \frac{1}{2}\gamma_{yx}, \frac{1}{2}\gamma_{yz} = \frac{1}{2}\gamma_{zy}, \frac{1}{2}\gamma_{zx} = \frac{1}{2}\gamma_{xz}$$

(2.5)

## 2.4 Teorije čvrstoće

Konstruktivski elementi, u upotrebi, su izloženi prije navedenim vrstama opterećenja. Posljedica takvih opterećenja su složena stanja naprezanja. Mnogo je faktora koji utječu na čvrstoću tijela te se promatra njihov utjecaj na pojavu plastičnih deformacija (trajnih deformacija).



Ispitivanja koja bi objasnila utjecaj tih faktora na pojavu plastičnih deformacija su jako skupa i dugotrajna, pa su kao alternative razvijene teorije čvrstoće. Za različite vrste materijala razvijena posebna teorija čvrstoće: za duktilne materijale razvijene su teorije koje se zovu kriterijem tečenja, a za krhke nazivamo kriterij loma. [2]

Teorijama čvrstoće moguće je predvidjeti pojavu kritičnih stanja kada vrijednost najutjecajnijeg faktora dosegne neku graničnu vrijednost kod koje dolazi do plastičnih deformacija.

Ako bi usporedili kritično stanje jednoosnog stanja naprezanja s kritičnim stanjem naprezanja kod višeosnog naprezanja dobiva se kriterij čvrstoće višeosnog stanja naprezanja:

$$\sigma_{dop} \geq \sigma_{ekv} \tag{2.6}$$

Gdje je:

$\sigma_{dop}$  – Dopušteno naprezanje, slučaj jednoosnog stanja naprezanja

$\sigma_{ekv}$  – Ekvivalentno naprezanje određeno, dobiveno primjenom neke od teorija čvrstoće

#### 2.4.1 Teorija najvećeg normalnog naprezanja

Ova metoda poznata je i kao Rankinov kriterij tečenja za kritično stanje naprezanja. Kod ove teorije uzima se trenutak kada se prođe kritična vrijednost normalnog naprezanja kod jednoosnog stanja naprezanja, s apsolutnim normalnim naprezanjem.

$$\sigma_{ekv} = \sigma_{max} = \max(|\sigma_1|, |\sigma_2|, |\sigma_3|) \leq \sigma_{dop} \tag{2.7}$$

## 2.4.2 Teorija najveće duljinske deformacije

Teorija najveće duljinske deformacije naziva se još i Saint-Venantov kriterij tečenja. Kritično stanje naprezanje nastupa kada najveća duljinska deformacija dostigne kritičnu vrijednost. Ovo vrijedi kada je kritično stanje naprezanja složenog stanja naprezanja i kada se radi o jednoosnom stanju naprezanja. Najveće duljinske dilatacije računaju se prema sljedećem izrazu:

$$\varepsilon_{ekv} = \varepsilon_{max} = \max(|\varepsilon_1|, |\varepsilon_2|, |\varepsilon_3|) \leq \varepsilon_{dop} \quad (2.8)$$

Vidimo da se radi o formuli istoj kao i kod teorije najvećeg normalnog naprezanja, samo su naprezanja zamijenjena s deformacijama.

Kriterij čvrstoće glasi:

$$\sigma_{ekv} = \frac{1-\nu}{2} \sigma \pm \frac{1-\nu}{2} \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2} \leq \sigma_{dop} \quad (2.9)$$

## 2.4.3 Teorija najvećeg tangencijalnog naprezanja

Drugi naziv je Trescin kriterij tečenja. Kritično stanje prilikom složenog stanja naprezanja pojavljuje se pri maksimalno tangencijalnom naprezanju, odnosno kada prođe kritičnu vrijednost za jednoosno stanje naprezanja. Kritičnu vrijednost možemo dobiti iz sljedećeg izraza:

$$\tau_{dop} = \frac{\sigma_{dop}}{2}, \quad (2.10)$$

a kriterij čvrstoće glasi:

$$\sigma_{ekv} = \sigma_{max} = \max(|\sigma_2 - \sigma_3|, |\sigma_1 - \sigma_3|, |\sigma_1 - \sigma_2|) \leq \sigma_{dop} \quad (2.11)$$

#### 2.4.4 Teorija najveće distorzijske energije

Često korištena teorija naziva se još i von Mises teorija. Ova metoda je najmodernija i najpreciznija te se koristi za konstruiranje kod plastičnih materijala. Krhki materijali u ovoj teoriji ne daju točne rezultate. Kritično stanje naprezanja nastaje kada gustoća distorzijske energije poprimi kritičnu vrijednost iste za slučaj jednoosnog stanja naprezanja:

$$U_{0d} \leq U_{0d,dop} \quad (2.12)$$

Kriterij čvrstoće glasi:

$$\sigma_{ekv} \leq \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]} \leq \sigma_{dop} \quad (2.13)$$

Kada bi morali prikazati slučaj s poznatim normalnim i tangencijalnim naprezanjima izraz bi izgledao ovako:

$$\sigma_{ekv} \leq \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \leq \sigma_{dop} \quad (2.14)$$

#### 2.5 Dijagram $\sigma - \epsilon$

Često upotrjebljeni način usporedbe odnosa naprezanja i deformacije, za određeni materijal, je vlačni test koji se vrši na kidalici. Upotrebljava se standardni uzorak (često zvan epruveta) koji se u kontroliranim uvjetima opterećuje vlačnom silom koja se postepeno povećava. Tijekom cijelog procesa prati se produljenje epruvete.

Naprezanje proizlazi iz sljedeće formule:

$$\sigma_i = \frac{F_i}{A} \quad (2.15)$$

Deformacija epruvete proizlazi iz sljedeće formule:

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta l_i}{l}$$

(2.16)

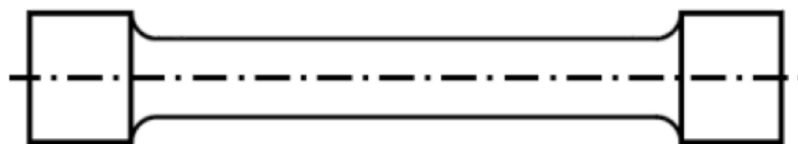
Gdje je:

$F_i$  – Vlačna sila

$A$  – Površina poprečnog presjeka uzorka

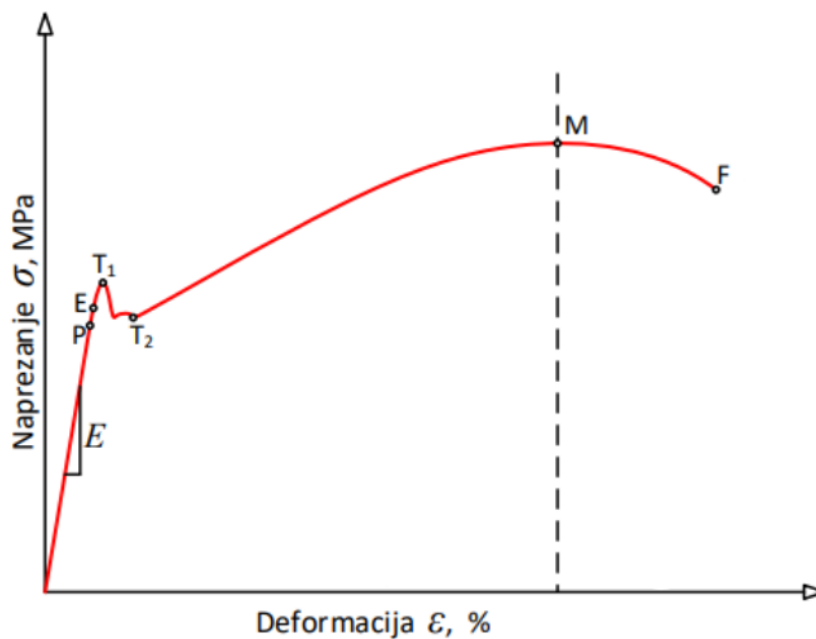
$\Delta l_i$  – Produljenje uzorka

$l$  – Početna duljina uzorka



Slika 2.8 Primjer uzorka za ispitivanje

Na slici 2.10 prikazan je primjer jednog vlačnog testa s označenim točkama koje su bitne za razumijevanje grafa.



Slika 2.9 Dijagram naprezanje-deformacija za čelik [3]

Karakteristične točke vidljive na prethodnoj slici:

- **P** – Granica proporcionalnosti
  - Od ishodišta dijagrama do točke P odnos naprezanja i deformacije je linearan.
  - Odnos je propisa Hookeovim zakonom:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2.17)$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \textit{konstantno} \quad (2.18)$$

- **E** – Granica elastičnosti
  - Iznad točke P odnos naprezanja i deformacije nije linearan. Uzorak će se nalaziti u elastičnom području sve dok naprezanje ne prelazi točku E. Rasterećenjem uzorak se vraća u stanje prije opterećenja, prvobitno stanje. Do ove točke nema trajnih deformacija.
  - Ovo je bitan podatak o svojstvu materijala, ali ga je teško odrediti. Iz tog razloga upotrebljava se tehnička granica elastičnosti, pri kojoj se pojavljuju mali postotak plastičnih deformacija. Primjer je često korišteno  $\sigma_{0.02}$  koji predstavlja naprezanje pri kojem nastaje samo 0.02% plastičnih, trajnih, deformacija
- **T<sub>1</sub>** – Gornja granica tečenja ; **T<sub>2</sub>** – donja granica tečenja
  - Kada se uzorak optereti iznad točke E počinju trajne deformacije. Do gornje granice tečenja, deformacija i naprezanje se povećavaju. Kad naprezanje prijeđe gornju granicu tečenja deformacija i dalje raste, dok naprezanja počnu padati.
- **M** – granica čvrstoće
  - Kod konvencionalnog dijagrama točka M predstavlja najveće naprezanje materijala na vlačnom testu. Do granice čvrstoće u epruveti se događaju ravnomjerne deformacije po duljini epruvete. Točno u točki M, zbog geometrijske nesavršenosti uzorka, šupljine ili nehomogenost materijala, dolazi do kontrakcije poprečnog presjeka. Deformacija nije homogena te je dilatacija povećana na tom području

- **F** – granica loma
  - Najveće dilatacije dolaze na mjestu kontrakcije presjeka. Posljedica toga je lom uzorka.

## 2.6 Trajnost

Glavna tema ovoga rada je numerička analiza naprezanja i deformacija, ali i sama analiza vijeka trajanja konstrukcije. Lomovi uslijed zamora metalnih konstrukcija dobro su poznati tehnički problem. Istraživanja početkom 19. stoljeća pokazala su da samo statičko opterećenje koje je bilo daleko ispod čvrstoće konstrukcije nije učinilo oštećenja struktura, ali ako se isto opterećenje ponavlja mnogo puta može prouzročiti zamor materijala, odnosno nastanak pukotine i na kraju lom. Trajnost nekog materijala je njegova sposobnost da se suprotstavi svim promjenama svojstva.

Pukotine nastale zbog zamora materijala počinju kao nevidljive mikropukotine u samom materijalu, i ova pojava zove se **inicijacija pukotine**. Ove mikropukotine počinju vrlo rano u životu konstrukcije, odnosno odmah pri primjeni cikličkih naprezanja iznad granice zamora.

Nakon što pukotine postanu vidljive, preostali vijek trajanja je obično mali u odnosu na ukupni vijek trajanja ali to vrijedi za uzorke koji se koriste u laboratorijima za testiranje. Na konstrukcijama poput vlakova, aviona i brodova taj vijek trajanja može biti veći. Iako su mikropukotine narasle, njihov daljnji rast i dalje može biti vrlo spor, a pojam povećavanja inicijalne pukotine zove se **rast pukotine**. Ova dva pojma „inicijacija pukotine“ i „rast pukotine“ su najvažnije točke kada gledamo životni vijek neke konstrukcije.

## 2.7 Mehanika loma

Pojava i širenje novonastale pukotine je najčešće glavni krivac lomova konstrukcija. Pukotine nastaju zbog loše geometrije konstrukcije, a veliki utjecaj ima i faktor okoliša, nesavršenosti u materijalu ili oštećenja tijekom eksploatacije konstrukcije. U konstrukciji pri cikličkim naprezanjima dolazi do pucanja veza između samih atoma i dolazi do nakupljanja dislokacija što predstavlja pojavu i širenje pukotine, a to je u skladu s teorijom dislokacija.

Dosta često, do inicijacije pukotine, dolazi na površini konstrukcije. Ova činjenica nam ukazuje na to da trajnost konstrukcije uvelike ovisi o kvaliteti obrade površine poput brušenja, poliranja, lakiranja i premazivanja, toplinske obrade, itd. Pa će tako gruba obrada ostaviti nepravilniju površinu i samim time veće koncentratore naprezanja koji imaju veće predispozicije da će doći do stvaranje površinske pukotine. Okoliš također jako utječe na sami vijek trajanja. Te utjecaje nije lako protumačiti jer uključuju razne kemijske i fizičke procese i njihove kombinacije.

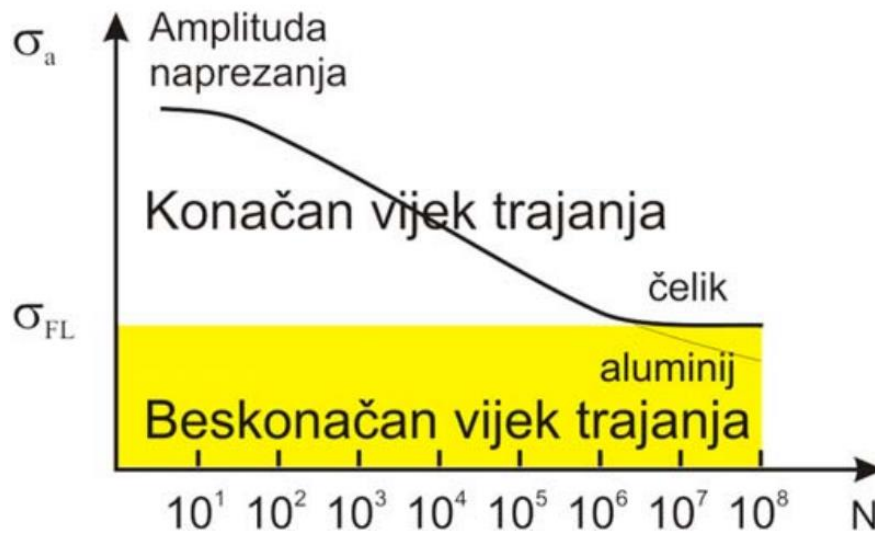
Korozija je jedna od posljedica utjecaja okoliša koja uzrokuje mikroskopske nepravilnosti koje su također koncentratori naprezanja. Korozija je sveprisutna, a pogotovo u blizini mora, mjestima s velikim vlažnostima zraka i slično.

Ovakvim problemima se bavi mehanika loma – znanost koja proučava pukotine u pogledu trajnosti konstrukcija.

### 2.7.1 S-N krivulja (*Stress-Cycles*)

U August Wöhlerovim istraživanjima napravljena je jedna od prvih analiza zamora. August Wöhler provodio je eksperimentalna istraživanja na željezničkim osovinama te je shvatio da je otpornost zamoru veća što je amplituda naprezanja manja, a ako je naprezanje ispod granične vrijednosti da ne dolazi do loma (beskonačan vijek trajanja). Ovo je bio temelj za kasniji razvoj S-N metode (S-N krivulja) odnosno često zване Wöhlerovi dijagrami.

Ako želimo saznati ispod kojeg naprezanja neće nastati lom moramo epruvetu ciklički opterećivati i brojati cikluse do loma. Da bi napravili cijelu S-N krivulju potrebno je napraviti eksperiment na velikom broju epruveta (uzorka). Ovaj postupak je jako skup i dugotrajan, a iz tog razloga se često izrađuju statičke krivulje. Položeni pravac možemo aproksimirati s osam uzoraka, a dok se horizontalni pravac koji označava beskonačan vijek trajanja može aproksimirati sa šest uzorka.



Slika 2.10 S-N krivulja čelika i aluminija [3]

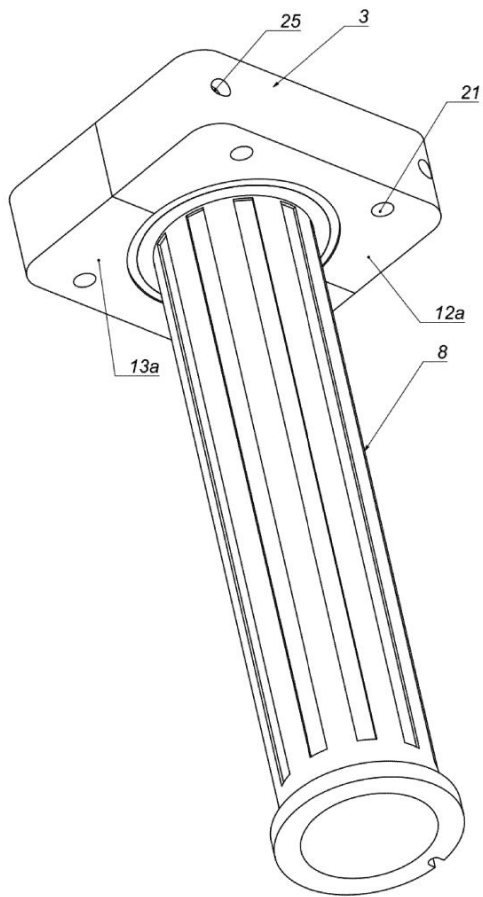
S-N krivulje omogućavaju brzi i jednostavni uvid u ponašanje materijala pri cikličkim naprezanjima. Ova metoda nije sasvim točna jer se zanemaruju utjecaji plastičnosti koncentratora naprezanja i srednje naprezanje nije mjerodavno.

## 2.8 Odbojnik – apsorber udara

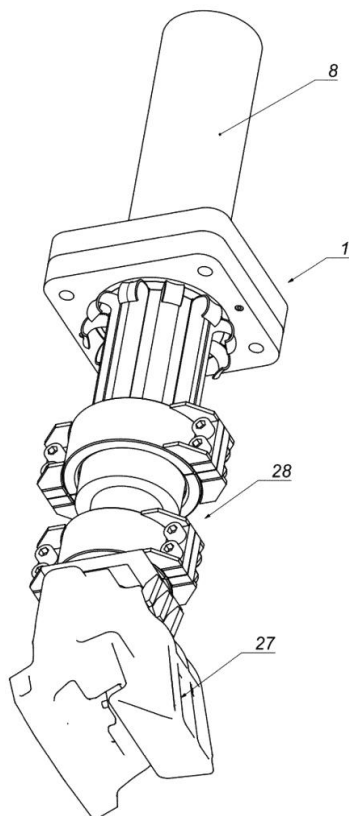
Energija udara apsorbira se kroz trajnu deformaciju trake od čelika izrezane iz tijela amortizera. Tijekom udara (sudara), vanjska površina čelične cijevi reže se s pomoću oštrica za rezanje. Razina apsorbirane energije ovisi o veličini i površini presjeka rezne trake, što omogućuje široko podešavanje parametara udara prema specifičnim primjenama.

Na slici 2.12 prikazan je cijeli netaknuti odbojnik. Pod brojem 3 nalazi se tijelo odbojnika, broj 8 označava čeličnu cijev koju oštrice za rezanje režu kako bi se apsorbirala energija.



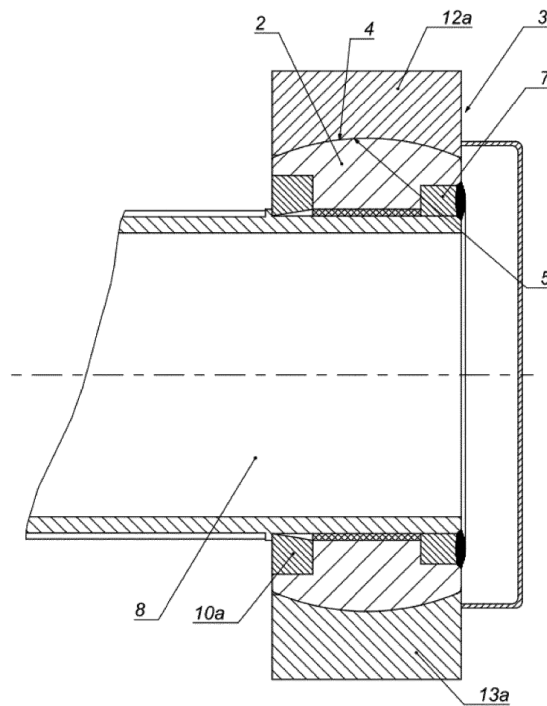


Slika 2.11 Odbojnik [4]



Slika 2.12 Prikaz konstrukcije odbojnika prilikom udara [4]

Na slici 2.13 prikazan je presjek odbojnika udara gdje su oznakom 10a označeni rezni noževi.



Slika 2.13 Presjek odbojnika udara [4]

Prednosti ovakvog sustava apsorpcije energije [5]:

- Stabilnost i ponovljivost sile deformacije
- Pouzdanost tokom aksijalnih udara
- Niska masa odbojnika udara
- Jednostavnost
- Široki raspon apsorbirane energije
- Jednostavna montaža

### 3. ODABRANI MATERIJAL

Kao materijal odabran je AlCu4TiMg, a to je legura čiji je sastav prikazan u tablici 1.

*Tablica 1 Kemijski sastav legure [6]*

	Udio u leguri [%]
Aluminij - Al	Ostatak
Krom - Cr	0,05-0,15
Bakar - Cu	$\leq 0,05$
Željezo - Fe	$\leq 0,3$
Magnezij - Mg	0,8-1,0
Mangan - Mn	$\leq 0,1$
Nikal - Ni	$\leq 0,3$
Silicij - Si	$\leq 0,25$
Talij - Ti	0,03-0,15
Cink - Zn	5,0-5,4
Ostali	$\leq 0,1$

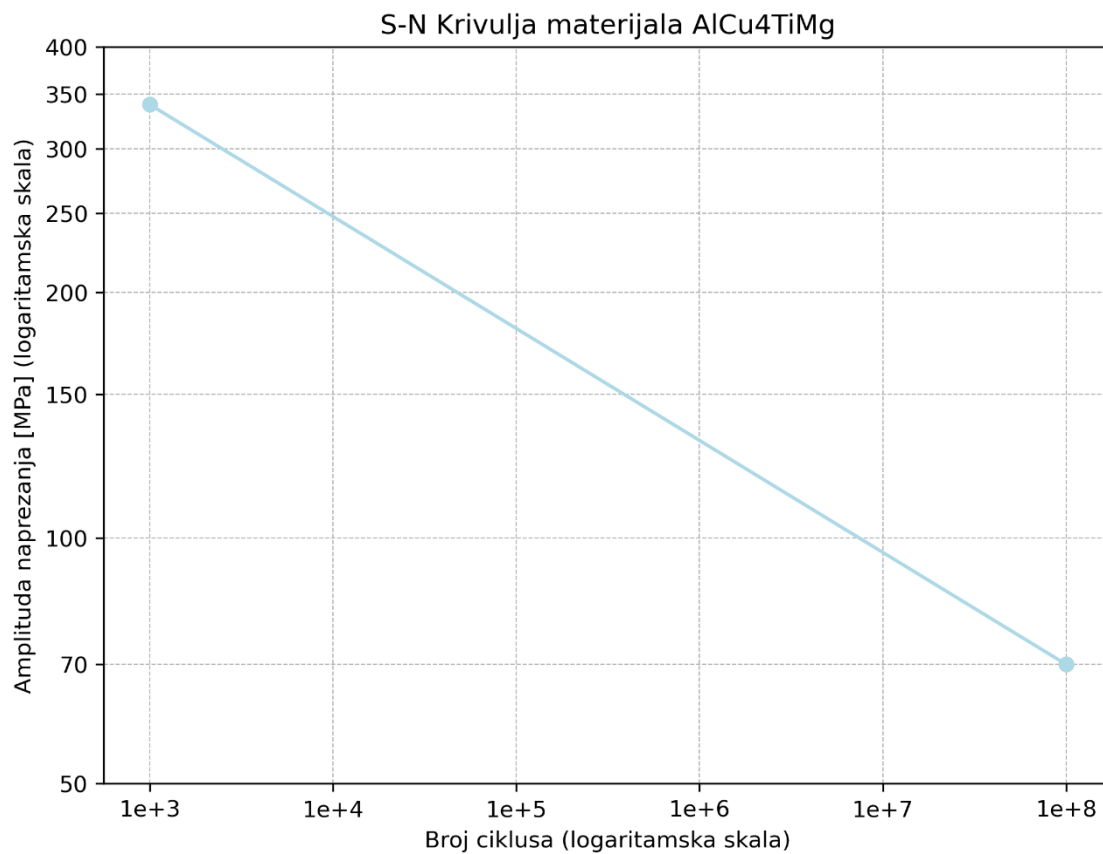
Aluminij je lagani materijal s dobrom otpornošću na koroziju i s dobrom toplinskom vodljivošću. Bakar se dodaje kako bi se povećala čvrstoća i poboljšala obradivost. Titan služi također da bi povećao čvrstoću konstrukcije, ali i da poveća otpornost na visoke i niske temperature. Kao i svi prethodni metali i magnezij povećava čvrstoću, a pomaže i pri smanjivanju mase konstrukciji.

Osnovna svojstva materijala:

*Tablica 2 Osnovna svojstva materijala*

Granica tečenja	200 MPa
Vlačna čvrstoća	320 MPa
Modul elastičnosti	70 GPa
Gustoća	2750 kg/m <sup>3</sup>

Pošto se konstrukcija mora provjeriti na zamor, bitna nam je S-N krivulja samog materijala koja se nalazi na slici 3.1. Kada će se prikazivati rezultati za zamor materijala ovaj graf će se koristiti za pronalaženja broja ciklusa koje će konstrukcija preživjeti.



Slika 3.1 S-N krivulja AlCu4TiMg [6]

## 4. METODA KONAČNIH ELEMENATA (MKE – FEM)

U analizama konstrukcija, precizna analitička rješenja mogu se dobiti samo za idealne slučajeve. Iz razloga što takvi idealni slučajevi u stvarnosti ne daju zadovoljavajuće rezultate, zbog mnogobrojnih aproksimacija, moramo se koristiti približnim metodama za kompliciranije slučajeve. Tako se danas koriste približne metode koje imaju temelj u diskretizaciji kontinuiranog sustava. Kako se diferencijalnim jednadžbama analitičkim putem ne mogu dobiti rješenja, zamjenjuju se sustavima algebarskih jednadžbi. Metoda konačnih elemenata koristi takvu tehniku.

Ovakva analiza dopušta veliku slobodu u geometriji konstrukcije i opterećenja te se zbog razvoja računala sve više provodi metoda konačnih elemenata. Danas je već široko zastupljena analiza kod inženjerskih analiza ali i kod amaterskih analiza. Numeričke analize dobivaju sve više na značaju zbog svoje točnosti ali i jednostavnosti upotrebe, jednostavnih analiza, kod nekih besplatnih alata poput *Fusion-a 360* ili *Inventor-a*. Bez obzira na jednostavnost upotrebe i dalje je potrebno stručno znanje za očitavanje dobivenih rezultata i analizu istih. Analiza konačnih elemenata postaje standard inženjerske analize konstrukcija.

Prve praktične primjene ove metode počinju 50-ih godina prošlog stoljeća imamo u avioindustriji pri razvoju „delta“ krila. Osim strukturalnih analiza primjenjuje se i u ostalim područjima poput mehanike fluida i mehanike čvrstih tijela.

MKE (eng. *Finite Element Method*), numerička je analiza koja se bazira na diskretizaciji konstrukcije (kontinuum). Metoda konačnih elemenata je specijalna varijanta Rayleigh-Ritzove i Galerkinove metode, odnosno rješavanjem algebarskih jednadžbi rješavamo problem mehanike konstrukcija.

Kod MKE konstrukciju diskretiziramo na odgovarajući broj konačnih elemenata (podkontinuum), a ti konačni elementi povezani su pomoću čvorova u mrežu (*Mesh*). Spajanjem svih osnovnih jednadžbi svakog konačnog elementa dobivamo jednadžbu konstrukcije. Rješenja te jednadžbe konstrukcije su sile i pomaci u čvorovima, a zatim i u poljima elemenata. [7]

Prvi korak (osnovni korak) kod MKE je odabir primjerenog tipa konačnog elementa, kojem se mora definirati i gustoća mreže. Neki od tipova konačnih elemenata dani su u nastavku.

## 4.1 Jednodimenzijski konačni elementi

Kada analiziramo linijske konstrukcije koristi se jednodimenzijska strukturalna analiza. Takva strukturalna analiza provodi se s pomoću jednodimenzijskih konačnih elemenata. U tu skupinu spadaju: gredni i štapni konačni elementi te opruge.

Jednadžbom kojom opisujemo jednodimenzijski konačni element glasi:

$$k^e u^e = f^e \tag{4.1}$$

Gdje je:

$k^e$  – Matrica krutosti

$u^e$  – Vektor pomaka

$f^e$  – Vektor opterećenja

Prije navedene konstrukcije mogu preuzeti samo aksijalna opterećenja, a to dovodi do isključivo translacijskog pomaka oko uzdužne osi konačnog elementa. Dostupan je samo jedan stupanj slobode gibanja, a matrica krutosti ima sljedeći oblik:

$$k_w^e = \frac{EA}{l} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{4.2}$$

Gdje je:

E – Youngov modul elastičnosti

A – Površina konačnog elementa

L – Duljina konačnog elementa

Gredni elementi mogu imati svih šest stupnjeva slobode gibanja, jer mogu, uz aksijalno opterećenje, preuzeti i poprečno opterećenje i momente uvijanja i savijanja. Gredni elementi mogu u svim smjerovima koordinatnih osi imati i rotacije uz translaciju u svim smjerovima koordinatnih osi. Matrica krutosti formira se kao zbroj svake matrice krutosti za sve vrste opterećenja:

$$k^e = k_w^e + k_v^e + k_u^e + k_\varphi^e$$

(4.3)

Gdje je:

$k_v^e$  – Matrica krutosti s obzirom na savijanje oko osi x

$k_u^e$  - Matrica krutosti s obzirom na savijanje oko osi y

$k_\varphi^e$  – Matrica torzijske krutosti

Da bi mogli zbrojiti sve matrice moramo ih i proširiti. Matrice proširujemo na način da se dodavaju nul stupci i nul redci. Kada proširimo i zbrojimo, prethodne matrice, dobiva se sljedeći oblik matrice:

$$k^e = \begin{bmatrix} a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_1 & 0 & 0 & 0 & c_1 & 0 & b_1 & 0 & 0 & 0 & c_1 \\ 0 & 0 & b_2 & 0 & -c_2 & 0 & 0 & 0 & -b_2 & 0 & -c_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & t & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -t & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -c_2 & 0 & d_2 & 0 & 0 & 0 & c_2 & 0 & e_2 & 0 \\ 0 & c_1 & 0 & 0 & 0 & d_1 & 0 & -c_1 & 0 & 0 & 0 & e_1 \\ -a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -b_1 & 0 & 0 & 0 & -c_1 & 0 & b_1 & 0 & 0 & 0 & -c_1 \\ 0 & 0 & -b_2 & 0 & c_2 & 0 & 0 & 0 & b_2 & 0 & c_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -t & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & t & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -c_2 & 0 & e_2 & 0 & 0 & 0 & c_2 & 0 & d_2 & 0 \\ 0 & c_1 & 0 & 0 & 0 & e_1 & 0 & -c_1 & 0 & 0 & 0 & d_1 \end{bmatrix}$$

(4.4)

Gdje je:

$$a = \frac{EA}{l}, b_1 = \frac{12EI_y}{l^3}, b_2 = \frac{12EI_x}{l^3}, c_1 = \frac{6EI_y}{l^2}, c_2 = \frac{6EI_x}{l^2}, d_1 = \frac{4EI_y}{l},$$

$$d_2 = \frac{4EI_x}{l}, e_1 = \frac{2EI_y}{l}, e_2 = \frac{2EI_x}{l}, t = \frac{GI_t}{l}$$

(4.5)

Pri čemu je:

$I_x$  – Moment inercije oko osi x

$I_y$  - Moment inercije oko osi y

$I_t$  – Torzijski moment inercije

G – Modul smicanja

## 4.2 Dvodimenzijски konačni elementi

Ako želimo analizirati ravninsko stanje naprezanja i deformacije moramo koristiti dvodimenzijske konačne elemente. U kartezijevom koordinatnom sustavu možemo prikazati funkciju pomaka dvodimenzijskog elementa. Kod dvoosnog stanje naprezanja sve komponente naprezanja se nalaze u međusobno paralelnim ravninama, a kao rezultat dobivamo troosno stanje naprezanja. Isti princip je i kod dvoosnog stanja deformacija, sve njegove komponente se nalaze u međusobno paralelnim ravninama. Ako kao rezultat imamo troosno stanje deformacija. Elementi koji se mogu opisati u dvije dimenzije su ljuske, stijene i ploče, a prema obliku se mogu podijeliti na trokutaste i kvadratne.

U nastavku dana je matrica koja daje vezu između čvornim pomacima konačnog elementa s deformacija u polju konačnog elemenata:



$$B = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial x} & 0 & \dots & \frac{\partial N}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_1}{\partial y} & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \dots & 0 & \frac{\partial N}{\partial y} \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \dots & \frac{\partial N}{\partial y} & \frac{\partial N}{\partial x} \end{bmatrix}$$

(4.6)

Gdje su:

$N_1, N_2, N_3, \dots$  - Aksijalne sile

Ako želimo, uz matricu B, formirati matricu krutosti dvodimenzijskog konačnog elementa moramo definirati i matricu elastičnih konstanti materijala, a koja za ravninsko stanje napreznja izgleda:

$$C = \frac{E}{1 - \nu^2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1 - \nu^2}{2} \end{bmatrix}$$

(4.7)

Matrica koja opisuje ravninsko stanje deformacije:

$$C = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 - \nu & \nu & 0 \\ \nu & 1 - \nu & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1 - 2\nu}{2} \end{bmatrix},$$

(4.8)

a matrica krutosti dvodimenzijskog konačnog elementa dobivamo iz izraza:

$$k^e = \int_{A_e} B^T C B h dA_e$$

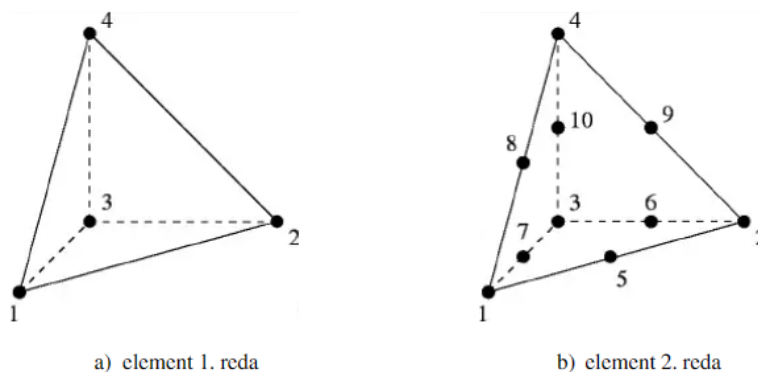
(4.9)

gdje se  $h$  označava debljina konačnog elementa. Kod ravninskog slučaja naprezanja ova vrijednost poprima jediničnu vrijednost,  $h = 1$ . [1]

### 4.3 Trodimenzijski konačni elementi

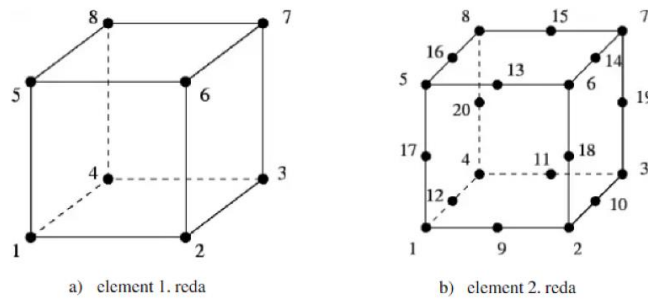
Nakon relativno brzog razvoja 3D CAD programa koji su omogućili izradu kompleksnih konstrukcija, počelo se i s primjenom trodimenzijskih konačnih elemenata u strukturalnoj analizi. Postoji dvije vrste elemenata, a to su: tetraedarski i heksaedarski

Tetraedarski konačni, 1. reda s četiri čvora, elementi su najjednostavniji konačni elementi za trodimenzionalnu analizu. Svaki čvor ima 3 stupnja slobode gibanja. Ovi elementi se izbjegavaju za ozbiljne numeričke analize zbog svoje krutosti. Da bi dobili točniji rezultat potrebno je staviti gušću mrežu. Umjesto 1. reda koji je prikazan na slici 4.1 pod a) primjenjuju se elementi drugog reda, na slici 4.1 pod b). Elementi drugog reda nastali su dodavanjem čvora na sredinu bridova elemenata, a time se dobiva 10 čvorova. Time se dobiva ukupno 30 stupnjeva slobode gibanja.



Slika 4.1 Tetraedarski konačni elementi [8]

Osim tetraedarskih imamo i heksaedarske elemente prvog reda koji imaju 24 stupnjeva slobode gibanja u 8 čvorova. Ako bi, kao i kod tetraedarskih elemenata, dodali jedan čvor na sredinu svakog brida dobili bi 20 čvorova, a koji imaju ukupno 60 stupnjeva slobode gibanja.



Slika 4.2 Heksaedarski konačni elementi [8]

Tetraedarski konačni elementi imaju veću prilagodljivost kompleksnim geometrijama, ali ako gledamo aproksimaciju nepoznate veličine polja heksaedarski konačni elementi su superiorniji.

Prije matrice krutosti moramo definirati matricu B koja će nam dati vezu naprezanja i pomaka te matricu C. Matrica C se sastoji od elastičnih konstanti materijala:

$$B = [B_1, B_2, B_3, \dots, B_n], B_i = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial N_i}{\partial z} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} & \frac{\partial N_i}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial z} & \frac{\partial N_i}{\partial y} \\ \frac{\partial N_i}{\partial z} & 0 & \frac{\partial N_i}{\partial x} \end{bmatrix}$$

(4.10)

$$C = \frac{E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \begin{bmatrix} 1 - \nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1 - \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1 - \nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1 - 2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1 - 2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1 - 2\nu}{2} \end{bmatrix}$$

(4.11)

Matrica krutosti 3D konačnog elementa izgleda kao:

$$k^e = \int_{V_e} B^T C B h dV_e$$

(4.12)

Gdje je:

$V_e$  – Volumen konačnog elementa

#### 4.4 Linearni i parabolični tip elemenata

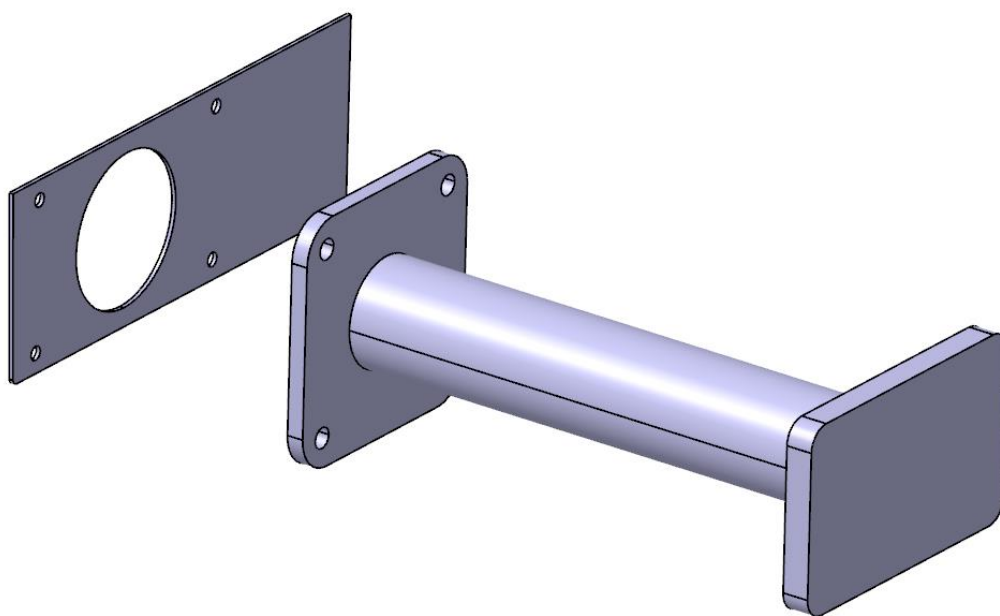
Linearni tip elemenata je osnovni tip elemenata u numeričkim analizama. Oni su definirani čvorovima, a interpolacija između čvorova je linearna. To znači da će raspodjela pomaka unutar elementa biti opisana linearnom funkcijom. Prednost je brza konvergencija i zahtjeva manju računalnu snagu u usporedbi s paraboličnim elementima. Nedostatak je potreba za većim brojem elemenata u zonama gdje se pojavljuju značajniji gradijenti naprezanja i pomaka.

Kod paraboličnih tipova elemenata veze između čvorova su drugačije. Parabolični tipovi elemenata imaju duž jedne stranice elementa dodatnu integracijsku točku, čime se diže red interpolacijske funkciju u odnosu na element prvog reda. To znači da mogu puno preciznije modelirati deformacije i odziv konstrukcije nego linearni tip elemenata. Omogućuju veću preciznost prilikom izračunavanja naprezanja u zonama značajnijih gradijenata naprezanja, za isti broj konačnih elemenata u usporedbi s linearnim elementima. S većom preciznošću dolazi i zahtjev za jačom računalnom snagom i zahtjeva više vremena za konvergenciju.

## 5. OBLIKOVANJE KONSTRUKCIJE I NUMERIČKA ANALIZA

Oblikovanje konstrukcije odvijat će se u programskom paketu *Catia*. Sve započinje osnovnom konstrukcijom od cijevnog oblika u sredini i dvije prirubnice s 4 rupe koje služe za pričvršćenje konstrukcije s vijcima.

Na slici 5.1 prikazan je međusobni položaj oslone ploče nosača odbojnika koji se nalazi na kolnom ormaru vlaka i idealiziranog modela odbojnika. Međusobnu udaljenost čela odbojnika i konstrukcije kolnog ormara definirana je UIC normom koja zahtijeva da je najistureniji element vlaka apsorpcijski element koji u slučaju udara (sudara) prvi dolazi u kontakt. Budući da su odbojnici elementi dostupni na tržištu, i da postoje razne konfiguracije odbojnika, potrebno je izraditi među-element / adapter koji će omogućiti ugradnju odbojnika na odgovarajućoj poziciji u odnosu na kolni ormar. Desni dio je odbojnik udara (*Crash buffer*) koji s pomoću rezanja materijala upija energiju i tako smanjuje ukupni udio energije udara koji se prenosi na konstrukciju kolnog ormara. S lijeve strane nalazi se samo ploča koja simulira ostatak vlaka. Konstrukcija koja pričvršćuje odbojnik udara nalaziti će se u sredini i bit će pričvršćena s pomoću vijaka M38 i za konstrukciju vlaka i za odbojnik udara. Odbojnik udara nije realno nacrtan jer nema potrebe za realnim modelom. Analize konstrukcije odbojnika udara zahtjeva će samo mjeru od početka do kraja odbojnika udara kako bi se opterećenja pravilno prenosila na konstrukciju. Također konstrukcija vlaka napravljena je tako jer se smatra idealno krutim tijelom u ovom slučaju. Stvarni slučaj vidljiv je na slici 5.2.



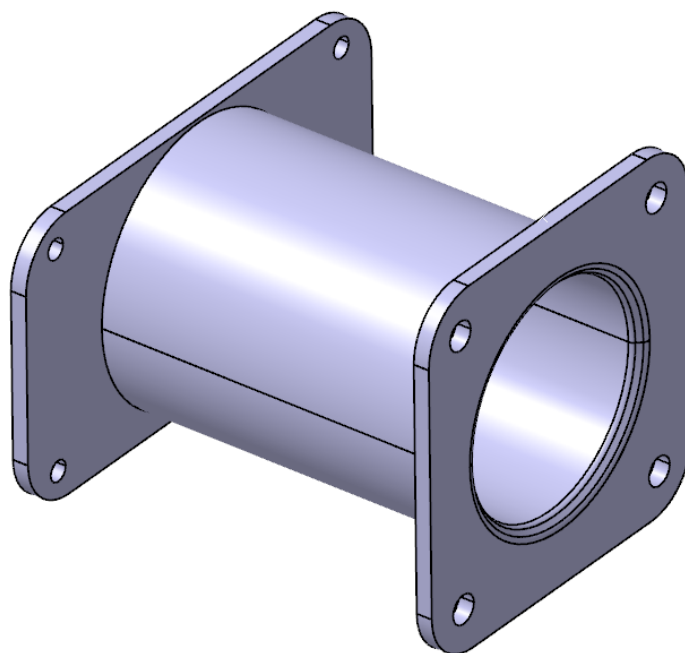
Slika 5.1 Konstrukcija vlaka bez odbojnika udara



Slika 5.2 Prikaz odbojnika udara na željezničkom vagonu [9]

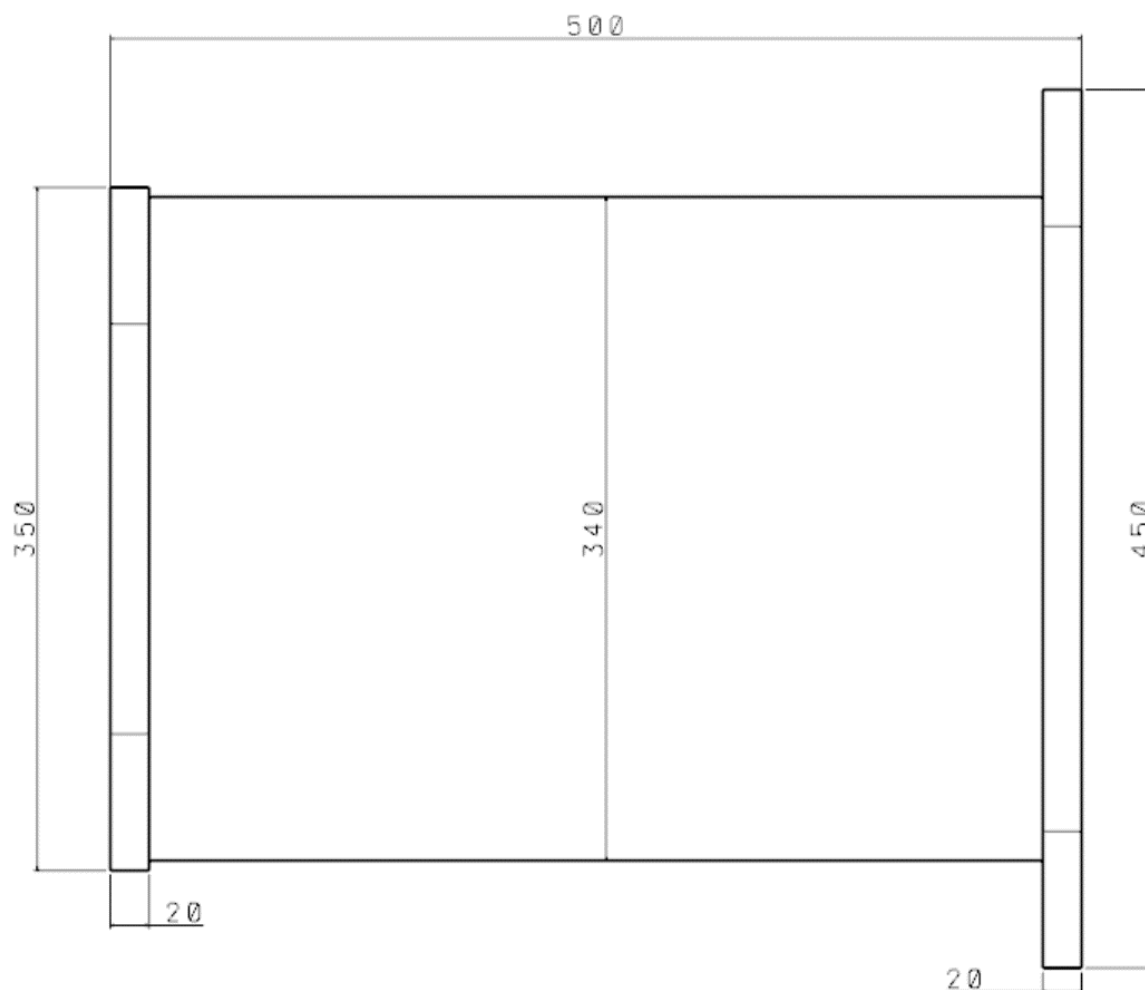
## 5.1 Početna konstrukcija

Konstrukciju započinjemo s jednostavnim elementima, debelostjena cijev i dvije debele prirubnice s montažnim provrtima. Ova početna konstrukcija će nam olakšati postupak konstruiranja jer ćemo vidjeti raspodjelu naprezanja i tada znamo gdje postaviti ojačanja odnosno gdje ukloniti materijal kako bi se olakšala konstrukcija. Početnu konstrukciju odbojnika udara možemo vidjeti na slici 5.3.



Slika 5.3 Početna konstrukcija odbojnika udara

U početnoj konstrukciji procijenjeno je da će 20 mm debljine materijala na ravnim pločama i na cijevnom središnjem obliku biti dovoljno. Osnovne dimenzije ove konstrukcije nalaze se na slici 5.4.



Slika 5.4 Osnovne dimenzije početne konfiguracije

## 5.2 Početna numerička analiza

Sada kada imamo početnu konstrukciju možemo izraditi i pokrenuti prvu numeričku analizu koja će pokazati gdje možemo konstrukciju poboljšati. Ovaj postupak se izrađuje u puno iteracija u cilju smanjenja mase, dok se istovremeno mora paziti na integritet same konstrukcije.

*Catia* nudi puno vrsta numeričkih analiza, a za početak potrebno nam je obični statički slučaj. Ovu analizu pokrećemo odabirom alata „*Generative Structural Analysis*“ koja ima putanju *Start / Analysis & Simulation / Generative Structural Analysis*.

Nakon odabira ovog alata pojavljuje se izbornik gdje se mogu odabrati tri različita slučaja:

**Static Analysis** – Statička numerička analiza

**Frequency Analysis** - Postupak koji se koristi za određivanje prirodnih frekvencija i modova vibracija konstrukcije. Također se koristi za analizu dinamičkog ponašanja objekta pod utjecajem vibracija. Postupak računa mase.

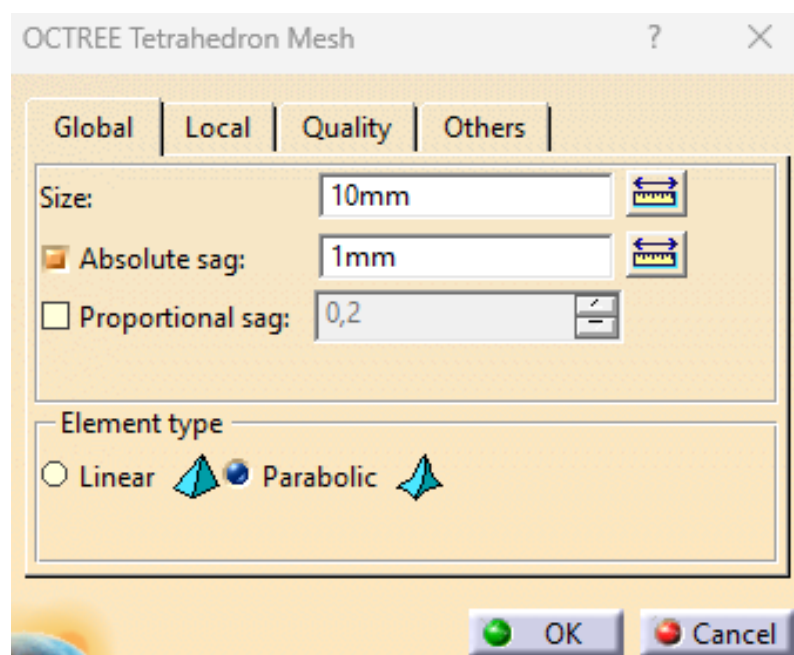
**Free Frequency Analysis** - Koristi se za izračunavanje prirodnih frekvencija objekta bez dodatnih masa.

Ovdje se odabere „*Static Analysis*“ jer nam je potrebna statička analiza.

Kao u svakom programu koji nudi numeričku analizu moramo odabrati materijal svih dijelova konstrukcije. Za potrebe numeričke analize koristit će se gotovi materijali koje nudi *Catia*. Pa se tako za konstrukciju odbojnika udara koristi aluminij, a za konstrukciju vlaka i odbojnik udara čelik.

### 5.2.1 Postavljanje *Mesh-a*

U stablu pod *Finite Element Model* odabiremo red *OCTREE Tetrahedron Mesh.1: Odbojnik udara*. Ovim će se otvoriti izbornik za podešavanje *mesh-a* konstrukcije odbojnika udara. Na slici 5.5 prikazani je prozor preko kojeg se može definirati veličina elemenata (*Size*). Osim veličine elementa možemo podesiti vrijednosti *Absolute sag* i *Proportional sag*.



Slika 5.5 Postavke *mesh-a* za odbojnik udara

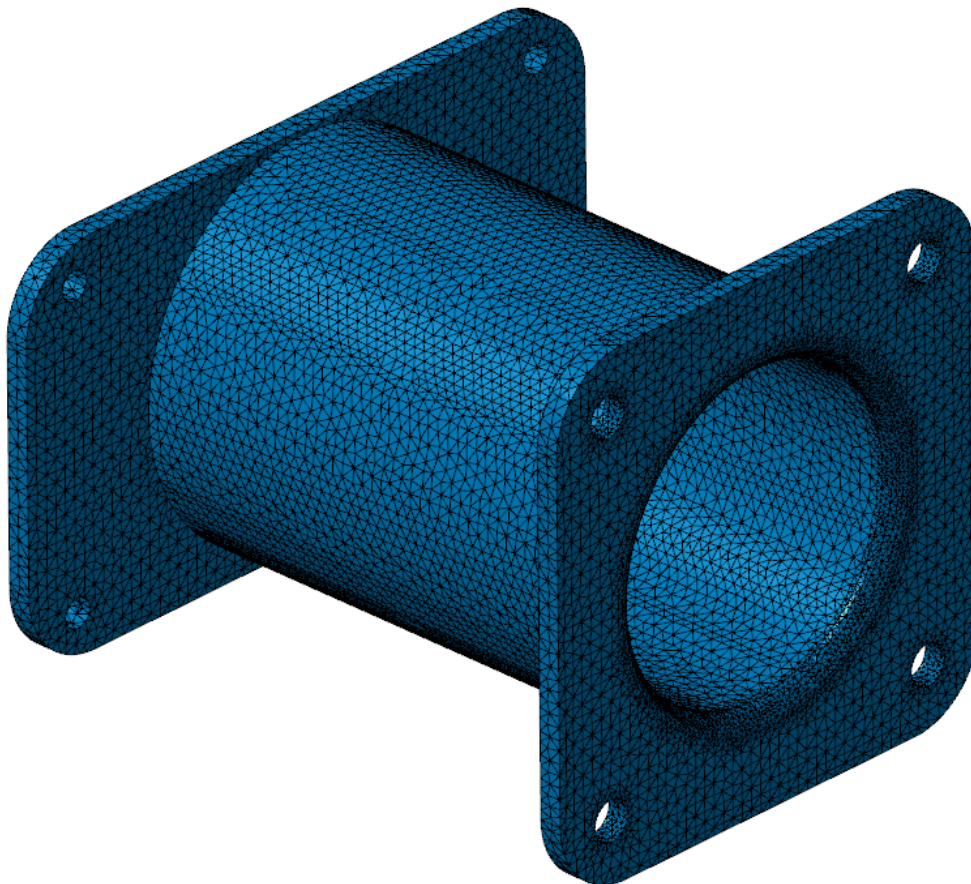


Na slici 5.6 prikazana je mjera za *Local absolute sag*. Ona određuje maksimalnu udaljenost između mreže i geometrije. *Proportional sag* je omjer između *Local absolute sag* i *Local mesh edge length* odnosno duljine mreže na tom dijelu geometrije. [10]



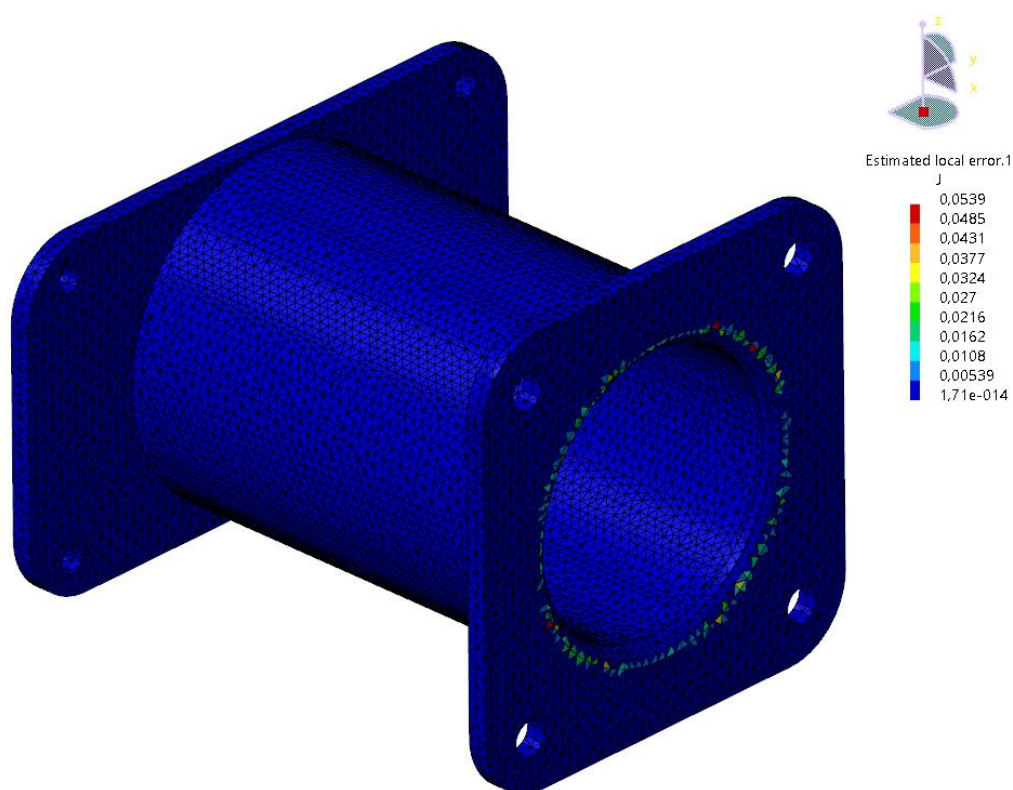
Slika 5.6 Prikaz vrijednosti *Absolute sag* i *Proportional sag* [10]

Pod *Element type* odabiremo vrstu umrežavanja, to jest da li želimo linearni tip elemenata ili parabolični tip elemenata. U slučaju konstrukcije odbojnika željezničkog vagona uzima se parabolični tip elemenata.

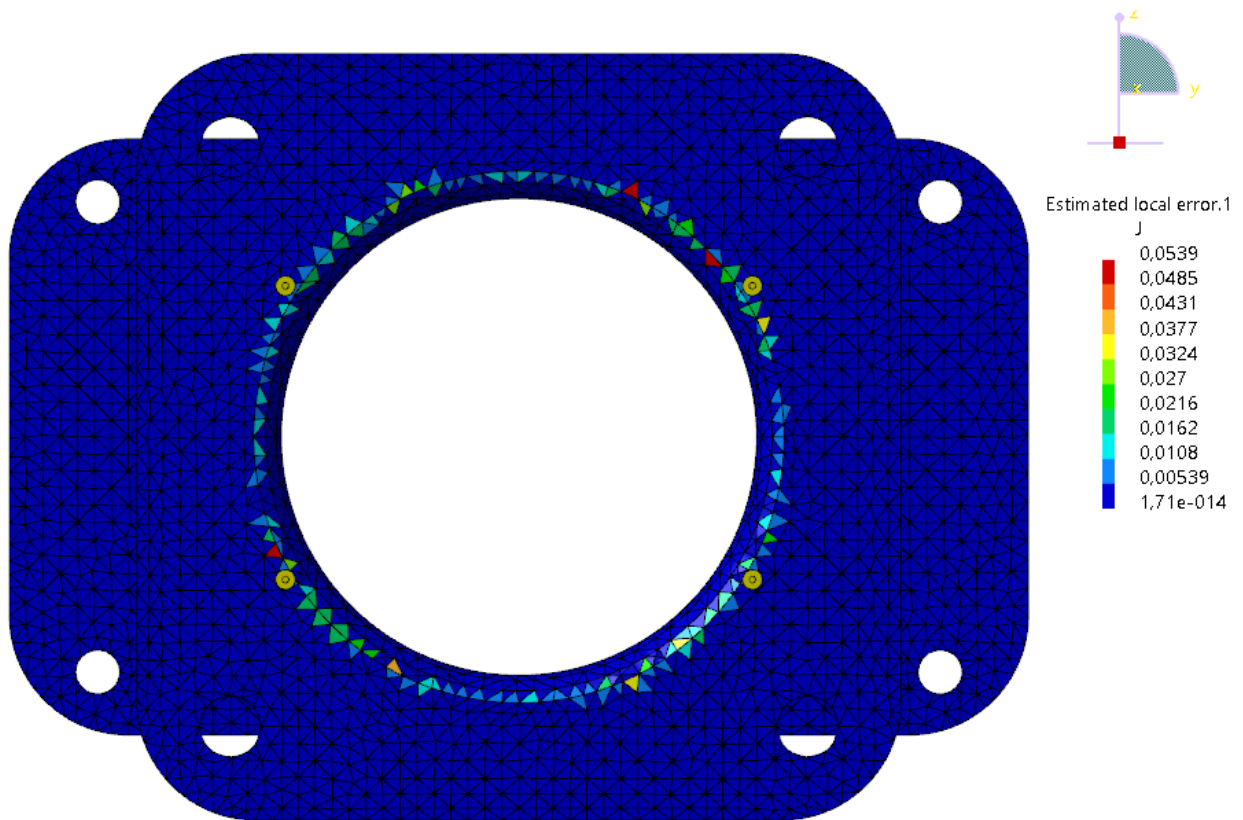


Slika 5.7 Prikaz umrežavanja u prvoj iteraciji

Na slici 5.7 može se vidjeti umrežena konstrukcija. *Catia* nudi prikaz podataka *Precision – Estimated local Error*. Program procjenjuje valjanost izračuna i daje globalni izvještaj o toj valjanosti. Program također prikazuje mapu normi predviđene energetske pogreške koja daje kvalitativni uvid u to raspodjela pogreške na konstrukciji. Kako vidimo na slici 5.8, postoje greške u umrežavanju. Greške možemo eliminirati/smanjiti na način da na mjestima gdje analiza pokazuje da su greške veće smanjimo veličinu elemenata. Na ovoj iteraciji greške se pojavljuju samo na obrubu spoja između središnje cijevi i spoja konstrukcije s odbojnikom.

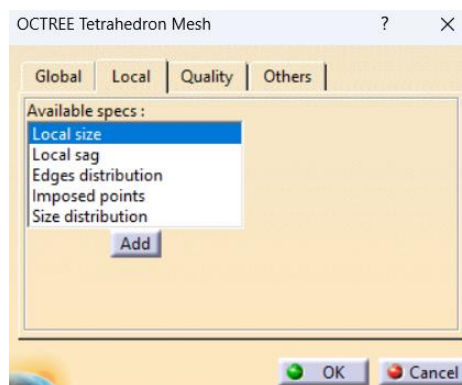


Slika 5.8 Prikaz grešaka u umrežavanju



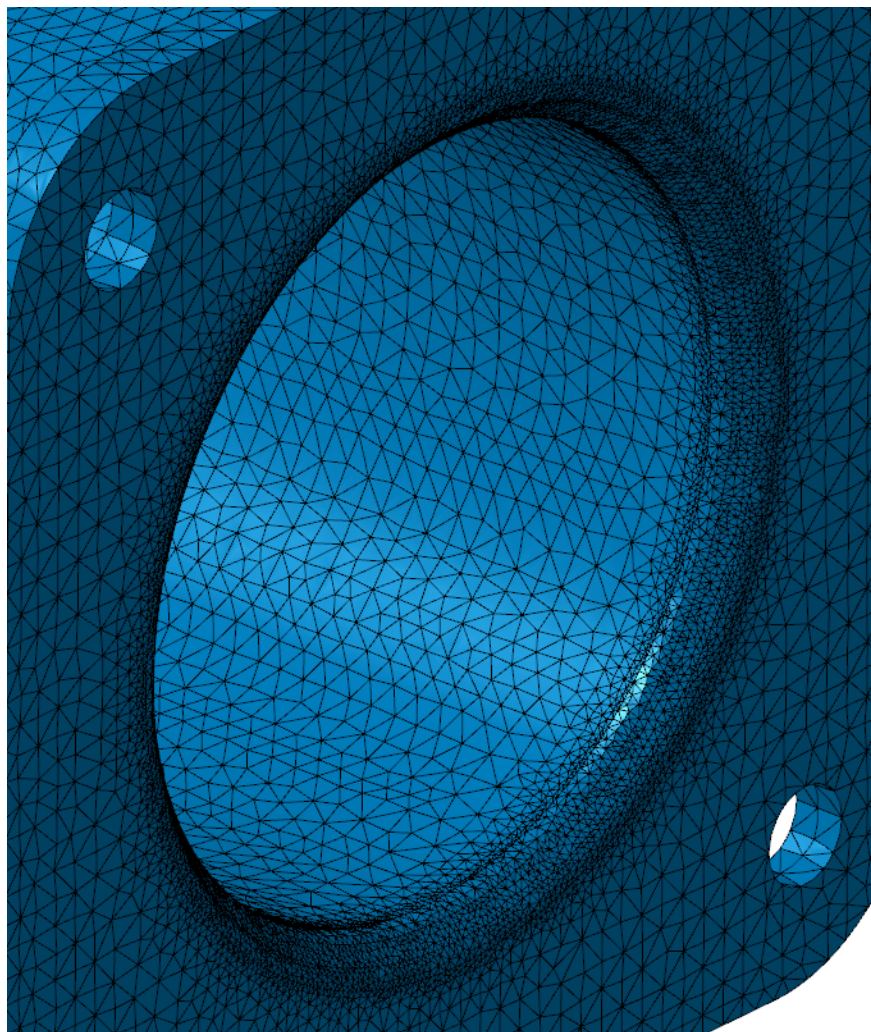
Slika 5.9 Detaljan prikaz grešaka

Na slici 5.10 vidimo prozor preko kojega možemo odabrati *Local size* funkciju. Ona će na odabranom mjestu smanjiti/povećati mesh za zadanu vrijednost. Na dijelu gdje se nalaze greške napraviti ćemo lokalno umrežavanje u iznosu od 3 mm. Kao podsjetnik, cijela konstrukcija je umrežena s veličinom elemenata od 10 mm.

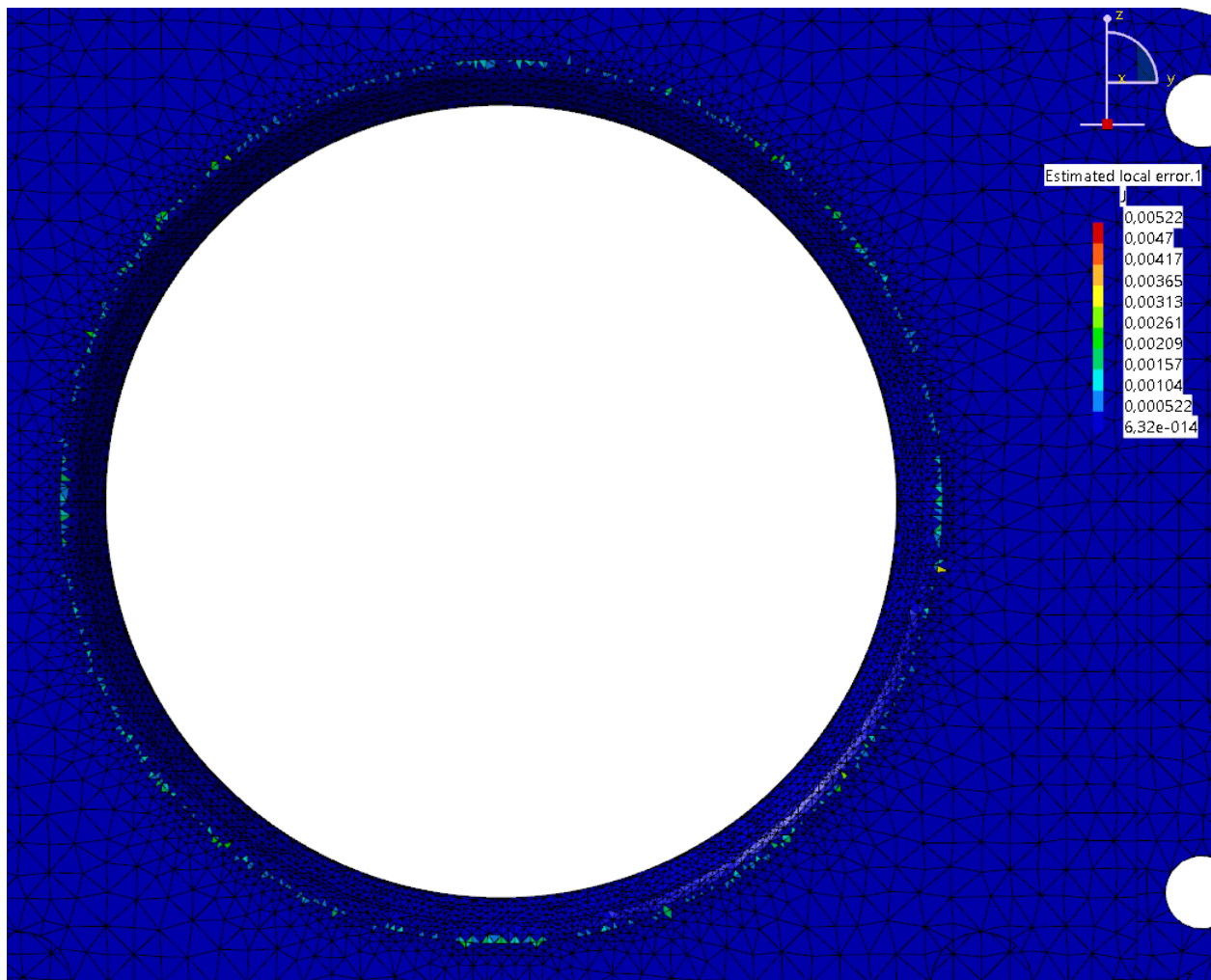


Slika 5.10 Local size

Nakon lokalnog umrežavanja na odabranom mjestu bit će gušća mreža nego na početku. Dio na kojem je upotrijebljeno lokalno umrežavanje prikazano je na slici 5.11.



*Slika 5.11 Umrežavanje nakon podešavanja lokalnog umrežavanja*



Slika 5.12 Greške nakon lokalnog umrežavanja

Na slici 5.12 možemo vidjeti da su se greške znatno smanjile. Ovakvi rezultati grešaka su prihvatljivi. Nakon dodavanja ojačanja i uklanjanjem materijala ovaj postupak će se morati ponavljati i oni će biti naglašeni.

*Catia* nudi izradu *Report* (izvješća) o broju elemenata i čvorova i o njihovoj kvaliteti. Ako bolje pogledamo sliku 5.13 možemo vidjeti da je element umrežen s 207 668 elemenata i 303 786 čvorova. Na trećoj tablici (*ELEMENT QUALITY*) možemo vidjeti raspodjelu rastezanja i omjera na dobre, slabe i loše. Naravno cilj je imati što manje elemenata pod kategorijom *Poor* i *Bad*, a kao što se može očitati u redu *Stretch* oni su samo 0,27% i to u kategoriji slabo. Pod *Aspect Ratio* imamo i elemenata koji se nalaze i u kategoriji loše ali samo 0,33%. Pod *Aspect Ratio* cilj nam je da prosječna vrijednost bude 1, a ovdje je dobiveno 1,798 što je prihvatljivo. Ovi rezultati će se mijenjati i neće se spominjati sve do kraja izrade konstrukcije gdje će se prikazati završni rezultati.

## MESH:

Entity	Size
Nodes	303786
Elements	207668

## ELEMENT TYPE:

Connectivity	Statistics
NSBAR	4 ( 0,00% )
SPIDER	16135 ( 7,77% )
BAR	4 ( 0,00% )
TE10	191525 ( 92,23% )

## ELEMENT QUALITY:

Criterion	Good	Poor	Bad	Worst	Average
Stretch	191015 ( 99,73% )	510 ( 0,27% )	0 ( 0,00% )	0,162	0,655
Aspect Ratio	186328 ( 97,29% )	4563 ( 2,38% )	634 ( 0,33% )	9,521	1,798

Slika 5.13 Izvješće o umrežavanju

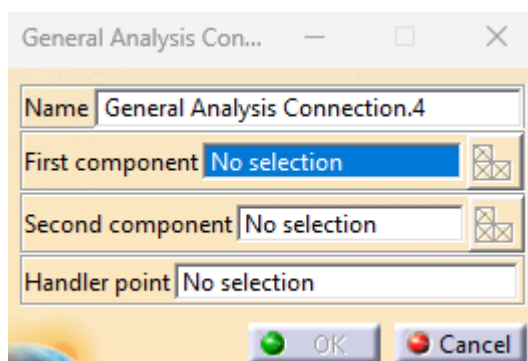
### 5.3 Postavljanje veza

Veze su izrazito bitne u numeričkim analizama jer se preko njih određuje način prenošenja opterećenja. *Catia* nudi mnoštvo veza, a to su:

- *Slider Connection Property*
  - Jedna površina može kliziti preko druge. Na primjer, ako imate dva tijela u kontaktu i primijenite silu na jedan objekt, *Slider Connection Property* omogućuje prvom objektu da klizi preko drugog objekta, umjesto da ga povuče sa sobom.

- *Contact Connection Property*
  - u CATIA-i je to veza između dva tijela koja sprječava prodiranje na njihovoj zajedničkoj granici i ponašat će se kao da im je dopušteno da se proizvoljno kreću jedno u odnosu na drugo sve dok ne dođu u kontakt unutar korisnički određenog normalnog razmaka.
- *Fastened Connection Property*
  - Tijela se ponašaju kao da su jedno tijelo. Ako gledamo iz perspektive konačnih elemenata, ovo je ekvivalentno situaciji gdje se čvorovi dvije mreže spajaju.
- *Fastened Spring Connection Property*
  - Elastična veza između dvije površine. Kod metode konačnih elemenata, ovo je situacija gdje se odgovarajući čvorovi spajaju zajedno ali omogućuje rukovanje nekompatibilnim mrežama. Također uzimaju u obzir elastičnu deformaciju.
- *Pressure Fitting Connection Property*
- *Bolt Tightening connection Property*
  - Ova svojstva se koriste kada se modelira fizički vijak u sklopu. Ova svojstva uzimaju u obzir deformaciju sklopa, ali ne i deformaciju vijka. Na primjer, ako primijenite silu na vijak, ova svojstva omogućuju vijku da prenese tu silu na ostatak sklopa.
- *Rigid Connection Property*
- *Smooth Connection Property*
- *Virtual Bolt Tightening Connection Property*
  - Ova svojstva se koriste kada se ne modelira fizički vijak u sklopu. Umjesto toga, ova svojstva simuliraju ponašanje vijka kroz elastičnu deformaciju. Na primjer, ako primijenite silu na mjesto gdje bi bio vijak, ova svojstva omogućuju toj sili da se prenese na ostatak sklopa kao da postoji vijak.
- *Visual Spring Bolt Tightening Connection Property*
- *Spot Welding Connection Property* i drugi.

Za početak potrebno je definirati površine i posljedično čvorove konačnih elemenata na zasebnim elementima konstrukcije koji će na odabrani način biti povezani. To se radi s naredbom *General Analysis Connection*. Odabirom ove funkcije otvara se slijedeći prozor:



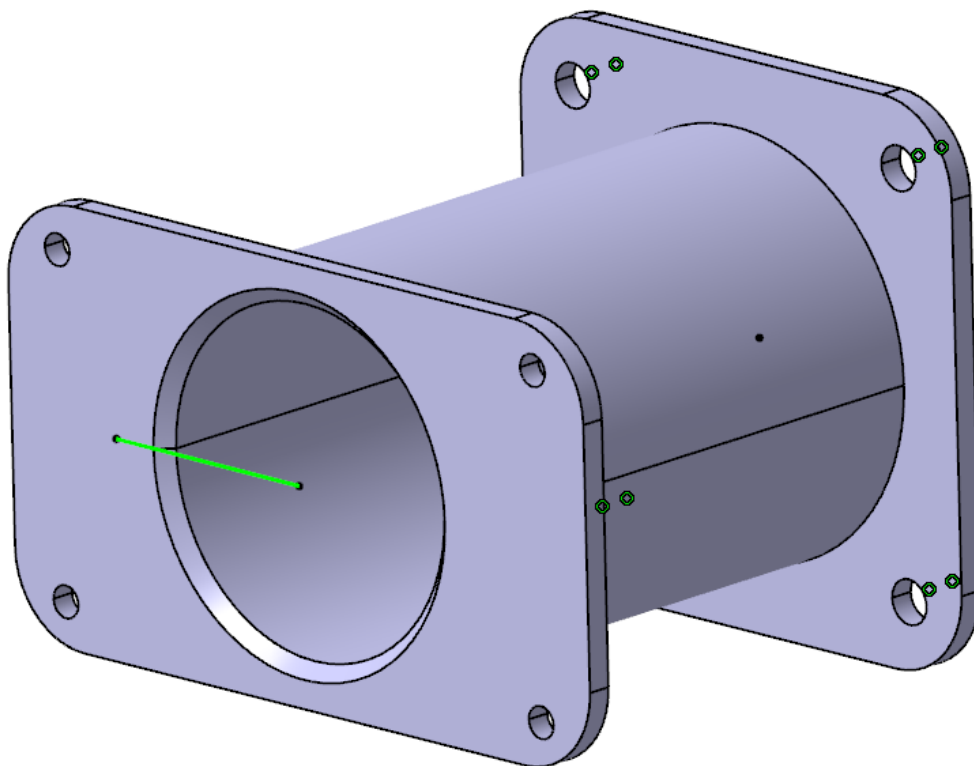
Slika 5.14 *General Analysis Connection*

Kao što vidimo na slici 5.14 moramo odabrati komponente koje su u spoju. Ovo se u našem slučaju mora napraviti dva puta:

- Konstrukcija vlaka – konstrukcija odbojnika
- Konstrukcija odbojnika – odbojnik

Dobiveni rezultat prikazan je na slici 5.15 gdje su vidljive s lijeve strane dvije bijele točke spojene zelenom linijom i s desne strane samo jedna crna točka. Točke naznačuju projekciju težišta na plohu spoja konstrukcija.

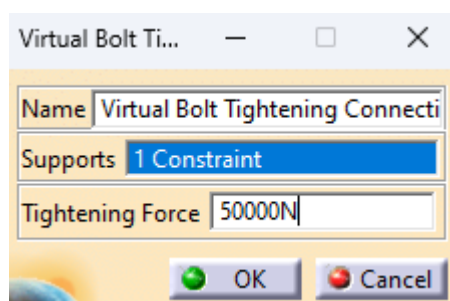




Slika 5.15 Prikaz General Analysis Connection

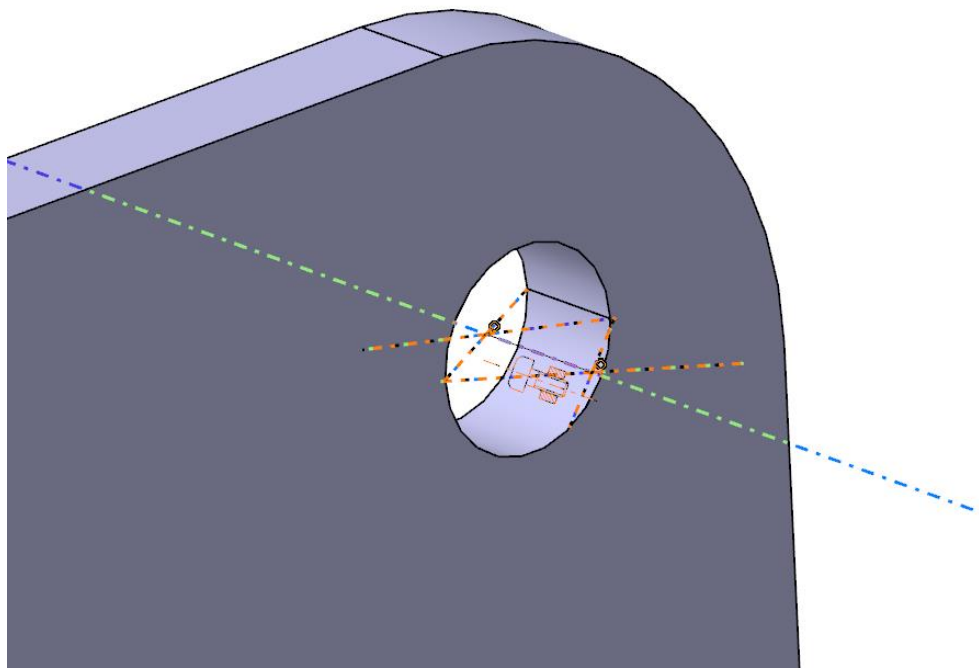
Tek nakon ovog postupka moguće je definirati vrstu spoja. Za naš slučaj potrebno je odabrati *Fastened Connection Property*. Odabirom na ovu funkciju otvara se prozor gdje se odabire zelena linija, a zatim ponovnim odabirom na istu funkciju odabire se bijela točka koja se nalazi s desne strane slike 5.15. Ovime smo definirali spoj prema prije opisanim pravilima.

Osim *Fastened Connection Property* moramo odabrati i spoj vijcima. Ovaj spoj radi se s *Virtual Bolt Tightening Connection Property*. Odabirom na navedenu funkciju otvara se sljedeći prozor:



Slika 5.16 Virtual Bolt Tightening Connection Property

Ovdje se od nas zahtjeva unos *Supports*, odnosno moramo odabrati rupe na kojima će se nalaziti ova veza. Program zahtjeva da se, za dvije rupe u kojima se nalazi takvi virtualni vijak, napravi ograničenje elemenata. Pa tako za ovih 4 rupa potrebno je napraviti *Coincidence* ograničenje na sve četiri rupe kroz koje idu vijci. Nakon ovog koraka, kao što vidimo na slici 5.17, dobivaju se dvije zelene oznake koje označavaju zadano ograničenje. Tek sada možemo *Virtual Bolt tightening Connection Property* funkcijom odabrati rupe te se dobiva narančasta oznaka. Sada je vijčani spoj u potpunosti definiran.

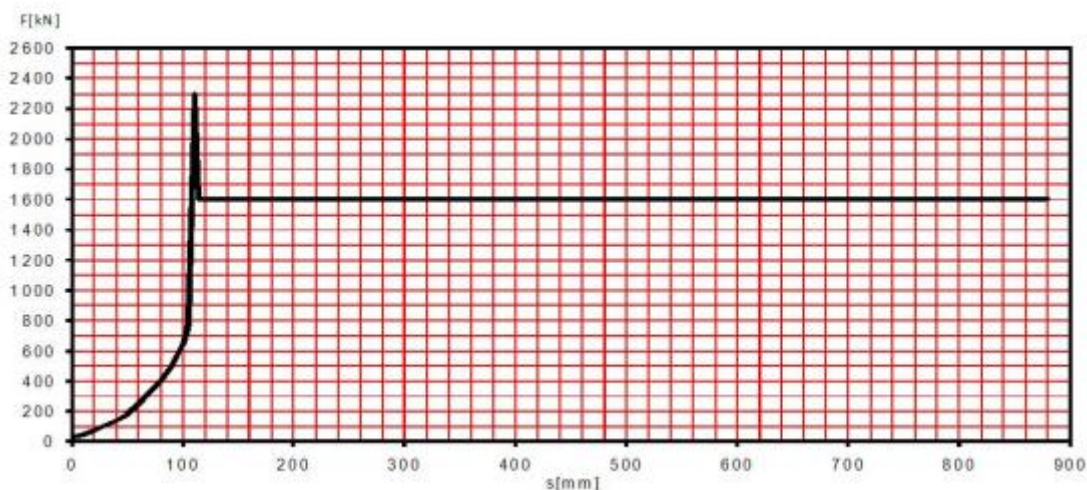


Slika 5.17 *Virtual Bolt Tightening Connection Property* primjer

U otvorenom prozoru s slike 5.15 moramo unijeti i *Tightening Force*, odnosno silu pritezanja. Na slici je prikazano da je unesena sila pritezanja od 50 000 N. Ova sila je manja nego što je propisano standardima iz razloga što je konstrukcija napravljena od aluminija te bi upotrebom takve sile došlo do velikih naprezanja i plastičnih deformacija u području provrta.

## 5.4 Postavljanje rubnih uvjeta opterećenja

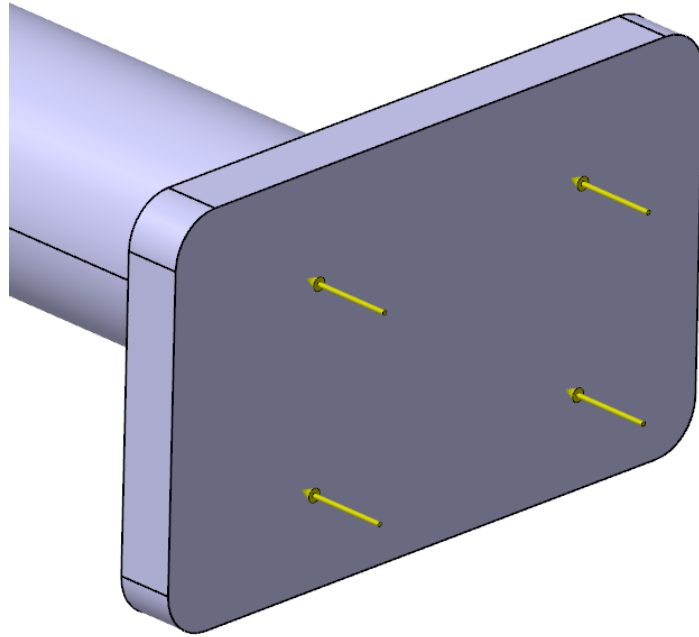
Svaka numerička analiza mora imati i neku vrstu opterećenja, a u našem slučaju to su aksijalna i poprečna sila. Konstrukcija je prilikom udara (sudara) kontinuirano opterećena silom od 1.6 MN, što proizlazi iz dijagrama reakcijske sile i pomaka, dobivenog od proizvođača odbojnika udara.



Slika 5.18 Graf reakcije odbojnika udara [11]

Rezanje traka na odbojniku udara se ne pojavljuje do trenutka kada reakcijska sila naraste do 2,3 MN, i nakon toga se trake odrezuju s konstantnom reakcijskom silom od 1.6 MN. Potrebno je dokazati da se prilikom udara i deformiranja odbojnika, sam nosač ne deformira izvan zone elastičnosti same konstrukcije. Inicijalna sila za aktivaciju odbojnika od 2,3 MN je kratkotrajni impuls, te bi se uzimanjem u obzir ove sile kao stvarnog opterećenja dobila konstrukcija koja je predimenzionirana. Poznato je da se materijali prilikom većih brzina deformacija ponašaju kruće, te se iz tog razloga kao referentno opterećenje za proračun nosača odbojnika uzima 1,6 MN.

*Distributed Force* je funkcija koju ćemo koristiti za postavljanje opterećenja na konstrukciju odbojnika. Sila se postavlja na najistureniju plohu odbojnika udara. Postavljenu distribuiranu silu možemo vidjeti na slici 5.19.



Slika 5.19 Postavljanje opterećenja

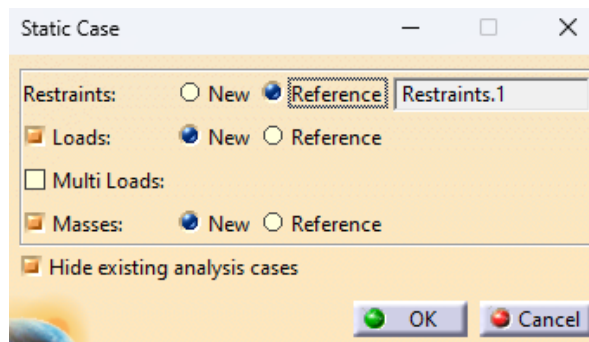
### 5.5 Postavljanje rubnih uvjeta pomaka

Osim prije navedenog ograničenja moramo postaviti ograničenja koja će predstavljati ostatak vlaka. To ćemo napraviti s funkcijom *Clamp*. Ova vrsta učvršćenja koristi se za postavljanje ograničenja da su pomaci u svim smjerovima jednaka nuli. Ovo ograničenje postavljamo na plohu koja predstavlja ostatak vlaka.

### 5.6 Postavljanje drugog slučaja

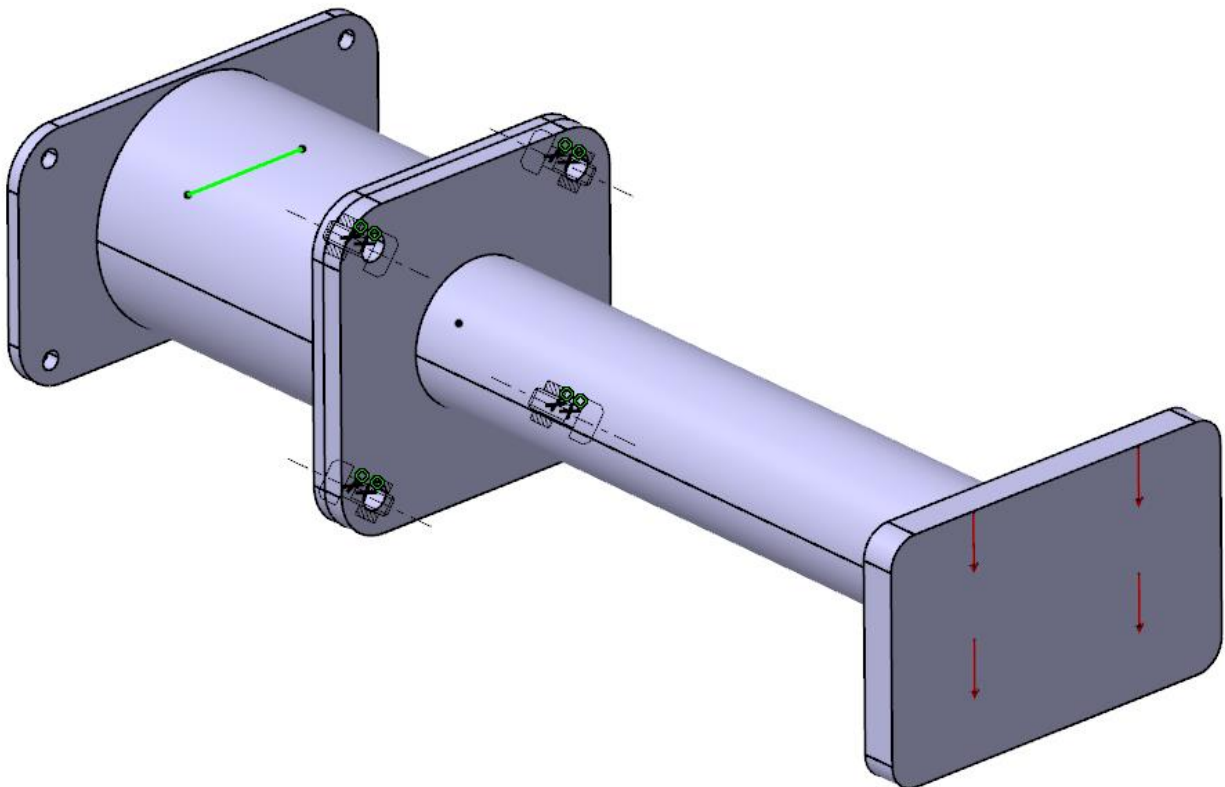
Prilikom stvarnog udara (sudara) za očekivati je da će se pojaviti i komponente reakcijske sile udara na čelu odbojnika koje nisu orijentirane u aksijalnom smjeru, stoga je potrebno provjeriti kako se konstrukcija ponaša u takvim slučajevima. Iznose tih komponenti je nemoguće procijeniti bez eksperimentalnog mjerenja, ali u ovom radu je odabrano da se provjeri konstrukcija prilikom pojavljivanja poprečnih komponenti aksijalne sile u iznosu od 10%

Zbog jednostavnijeg rada u programu i radi olakšavanja kasnijih promjena ovaj slučaj bit će napravljen pod novi *Static Case*. Kada se ubacuje novi *Static Case* u analizu otvara se sljedeći prozor:



Slika 5.20 Kopiranje uvjeta sa prošlog slučaja

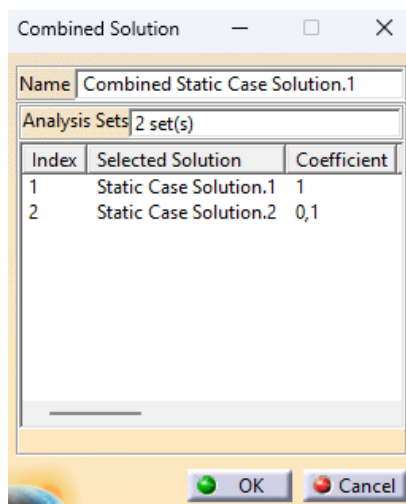
Ovdje možemo povezati uvjete opterećenja i ograničenja s prvobitnog slučaja, u našem slučaju povezujemo samo ograničenja (*Restrains*) s prvog slučaja. Ostale stavke trebaju biti nove (*New*). Opterećenje će biti jednakog intenziteta ali neće biti u istom smjeru. Na sljedećoj slici prikazano je kako je postavljeno opterećenje od svega 10% od prethodne vrijednosti od 1,6 MN.



Slika 5.21 Postavljanje sile u Z smjeru

## 5.7 Analiza rezultata

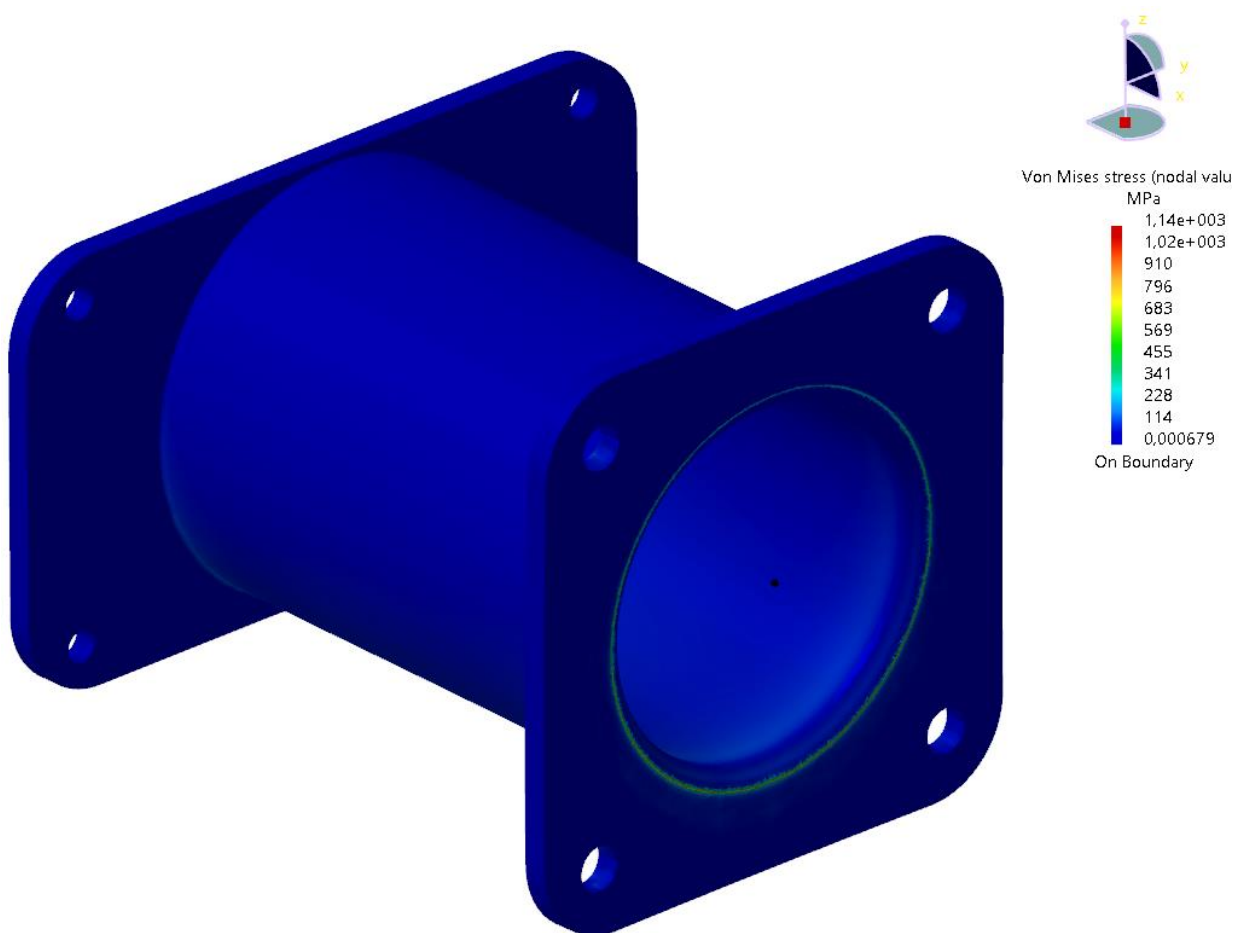
Sada smo napravili dva slučaja koja je potrebno spojiti, a to se radi s funkcijom *Combined Case*. Iz razloga što se očekuje da nosač prilikom eksploatacije ne ulazi u zonu plastične deformacije, možemo primijeniti metodu superpozicije rezultata pojedinih slučajeva opterećenja. Dvostrukim klikom na *Combined Static Case Solution* otvara se prozor u kojem možemo podesiti koeficijent utjecajnosti rezultata pojedinačnih slučajeva na ukupan rezultat što je prikazano na slici 5.22.



Slika 5.22 Combined Solution

Na ovoj slici se vidi da je pod indeksom 2, drugi slučaj gdje je opterećenje u smjeru osi Z, upisan koeficijent utjecajnosti 0,1 odnosno 10%.

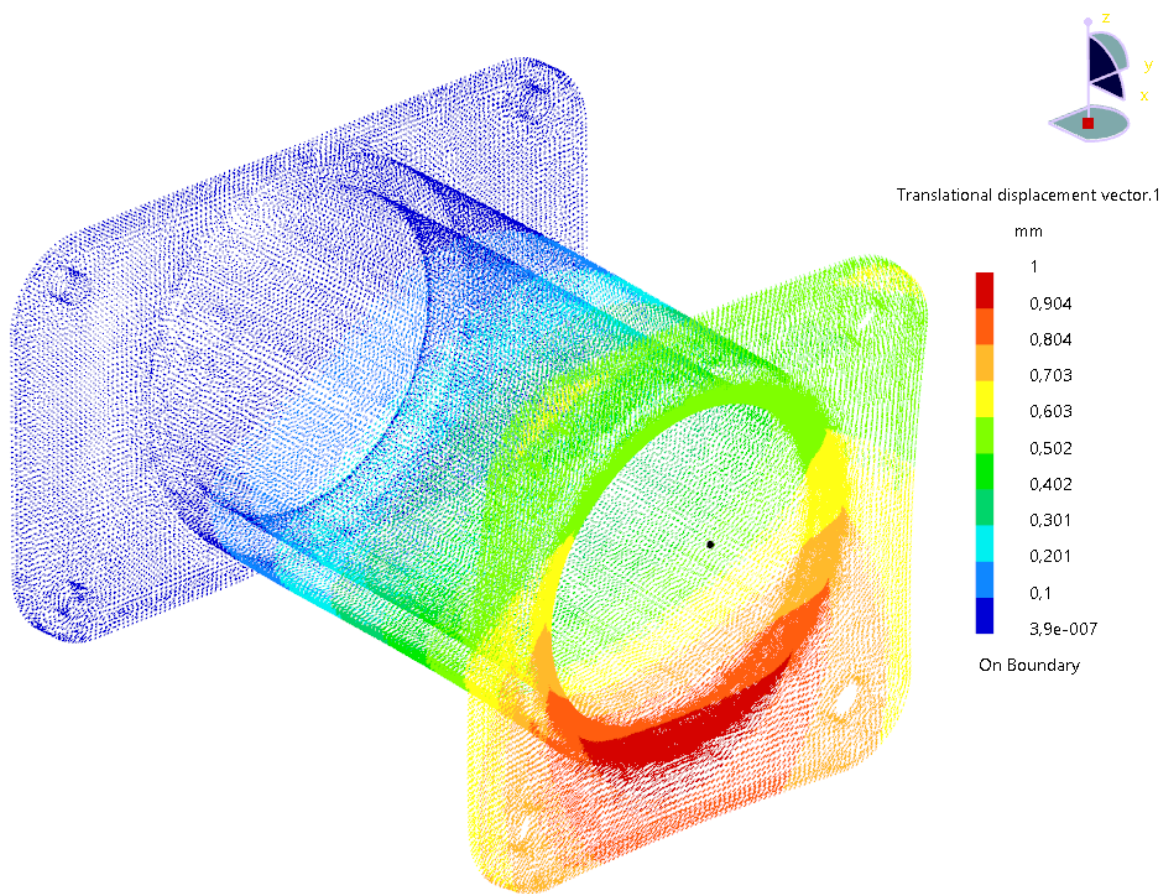
Jedan od bitnijih rezultata u trenutačnom stadiju numeričke analize je *Von Misses Stress* (ekvivalentna naprezanja prema Von Misses-u). Odabirom ove funkcije na ekranu se prikazuju rezultati koji se vide na slici 5.23.



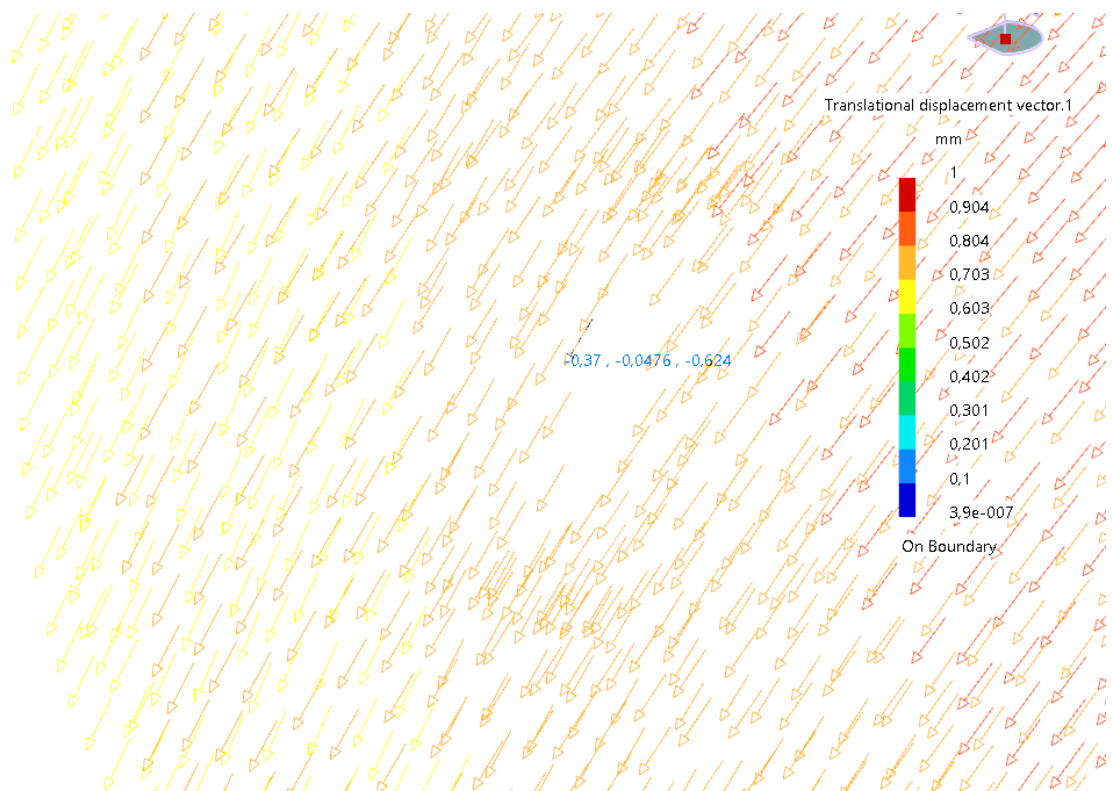
Slika 5.23 Von Misess Stress

Kao što vidimo prema skali s desne strane nalazimo se daleko ispod dopuštenih napreznaja. Zaključujemo da je konstrukciju potrebno detaljnije optimizirati. Ako se prisjetimo poglavlja gdje su prikazane greške u umrežavanju vidimo da se poklapaju s mjestima gdje se trenutno nalaze veća napreznaja nego svugdje drugdje. Može se zaključiti da se umrežavanje na ovom mjestu može postaviti i još detaljnije. Na skali je vidljivo da se napreznaje na pojedinim mjestima jako velike. Zbog greške u numeričkoj analizi i zbog zadanih rubnih uvjeta ove vrijednosti se mogu zanemariti.

Osim *Von Misess* napreznaja bitno nam je kako će se konstrukcija deformirati. Odabirom funkcije *Displacement* dobivamo rezultate koji će vektorski prikazivati deformacije. Vidimo na slici 5.24 da su maksimalne deformacije u konstrukciji 0,904 mm.



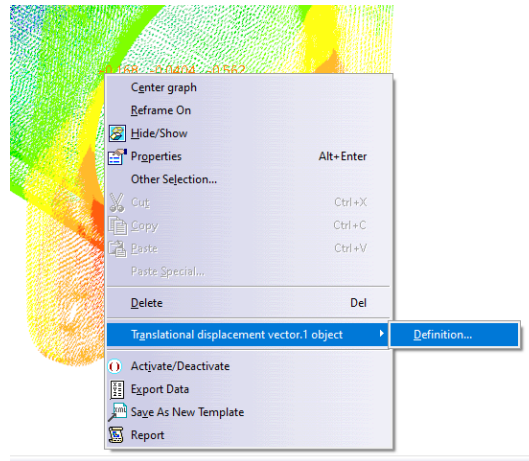
Slika 5.24 Pomaci



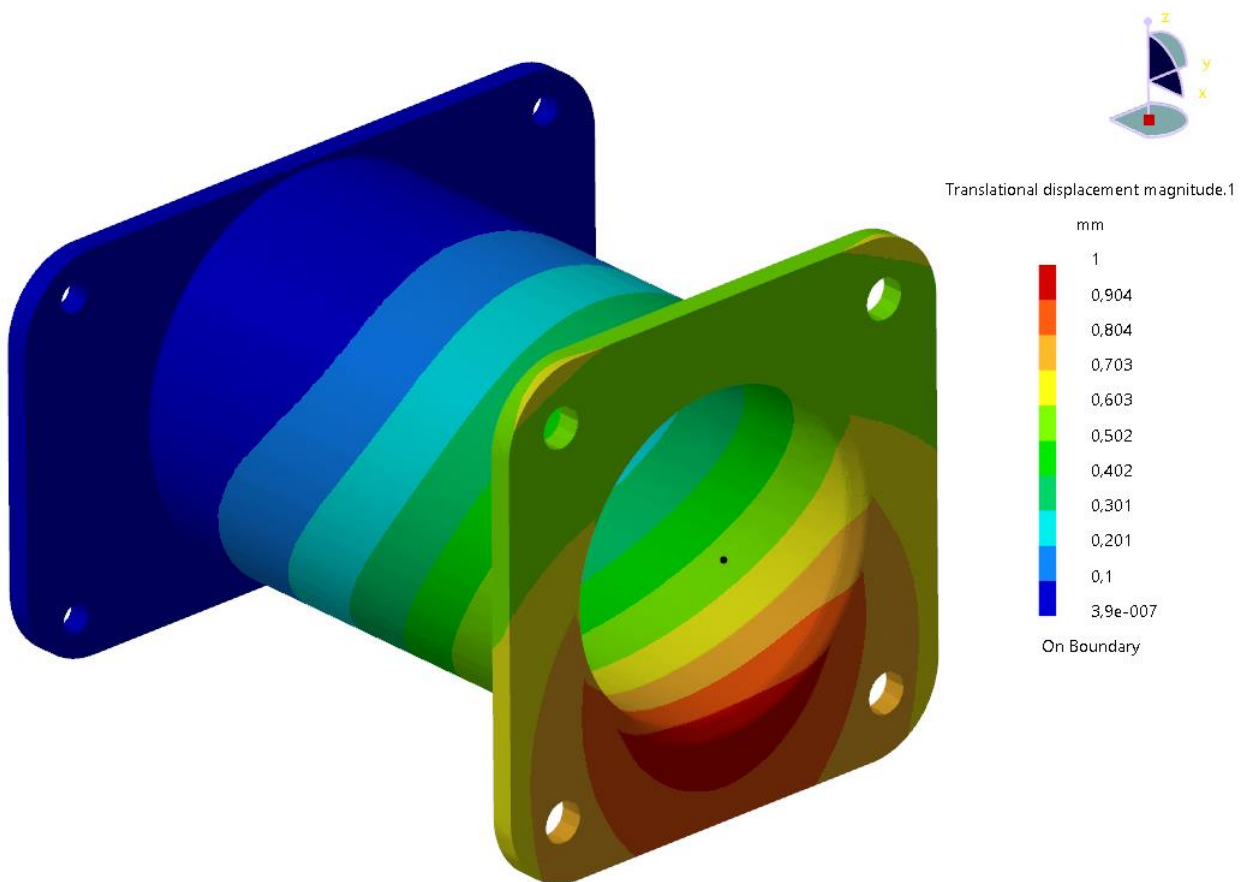
Slika 5.25 Vektorski prikaz pomaka



S obzirom da je na vektorskom prikazu rezultata dosta nepregledno prikazano što se događa, možemo podesiti prikaz desnim klikom na rezultate kao što je na slici 5.26 prikazano odabrati *Definition* opciju. Nakon odabira otvara se prozor na gdje odabiremo *Average iso* koji će ugladiti rezultate koji će biti prikazani na slici 5.27.



Slika 5.26 Prilagodavanje prikaza rezultata

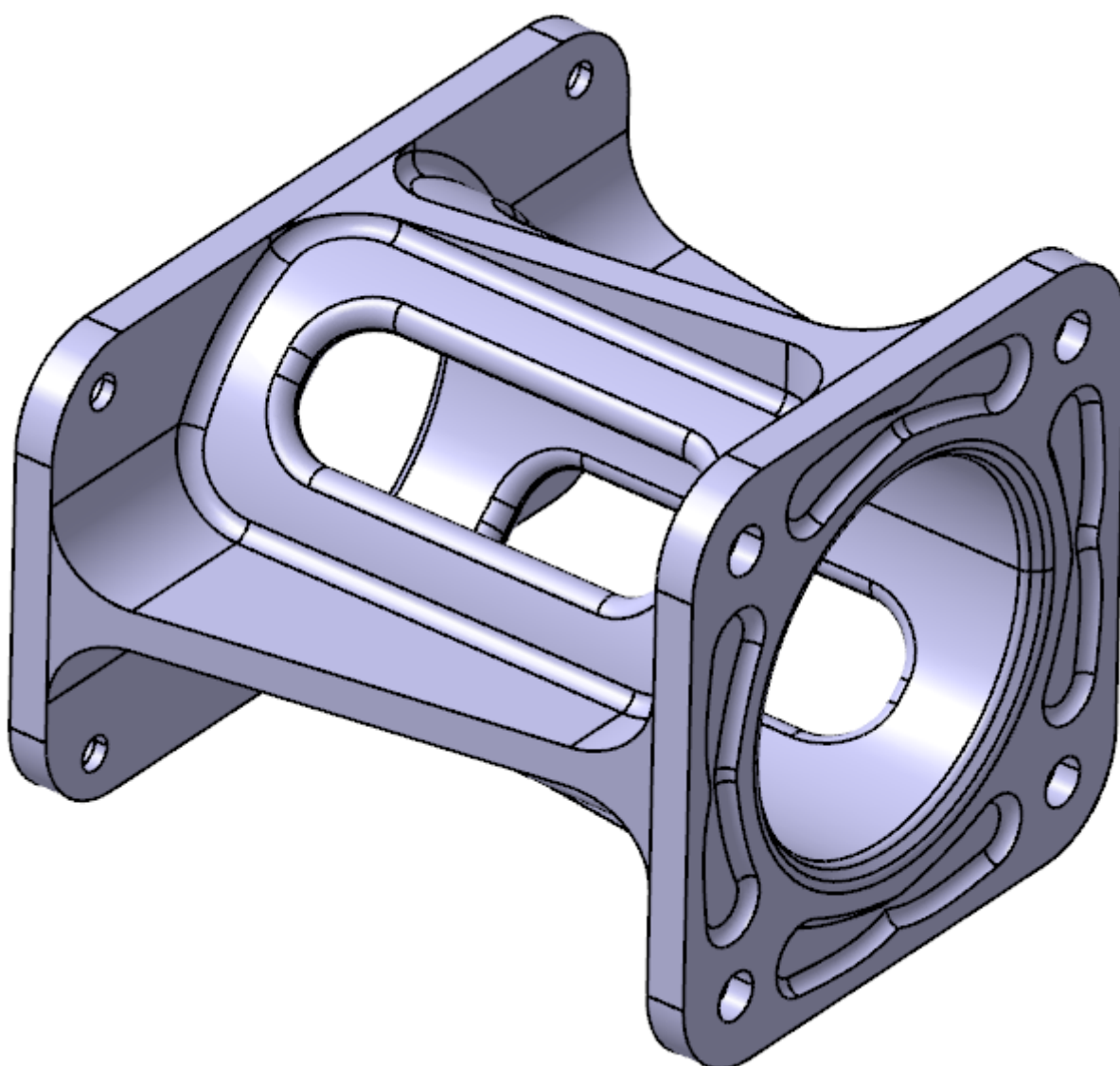


Slika 5.27 Prikaz ugladenih rezultata pomaka

Prema slici 5.27 vidimo da se konstrukcija deformira u negativnom smjeru osi z zbog onih 10% opterećenja koje je nadodano u negativnom smjeru osi z. Pošto se radi o jako malim pomacima ne trebamo obraćati previše pažnje na ove pomake.

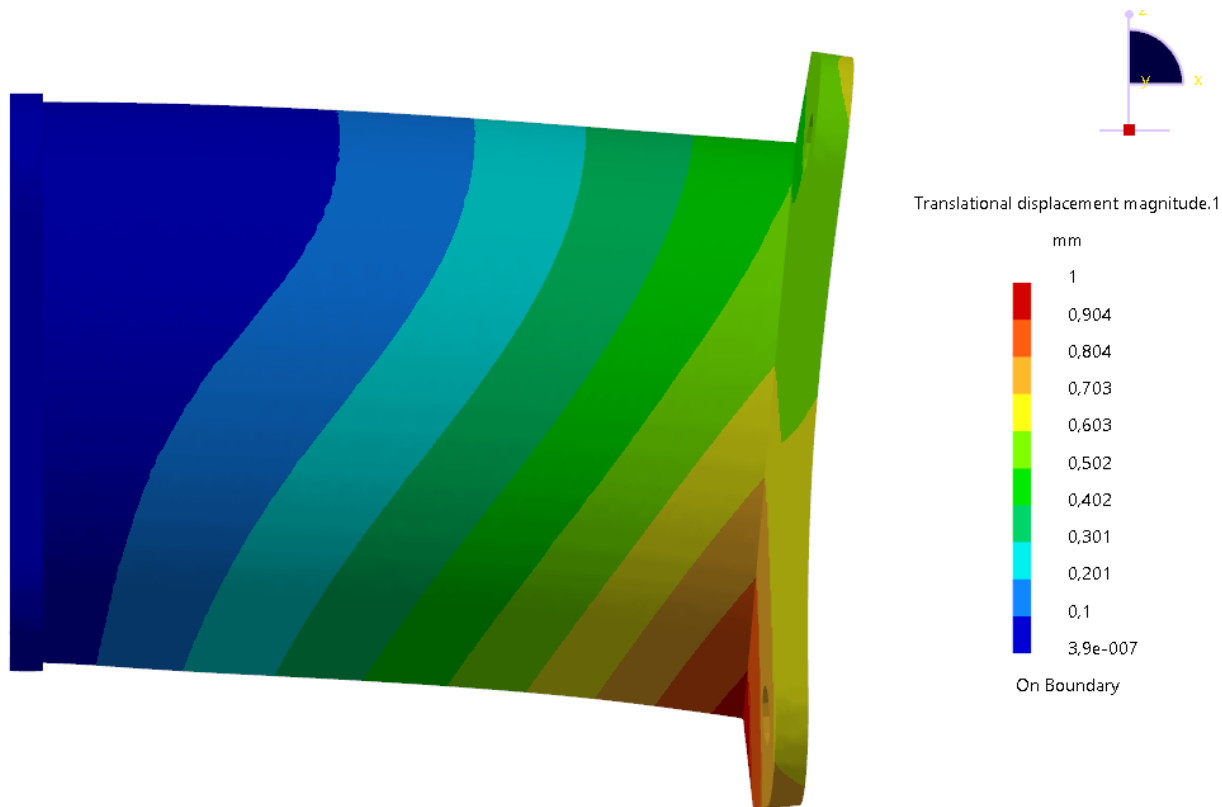
## 5.8 Završna konstrukcija

Nakon puno izvršenih optimizacija dobivena je konačna konstrukcija koja je prikazana na slici 5.28. Na ovoj slici možemo vidjeti puno novih dodataka konstrukciji od kojih neki služe za ojačavanje konstrukcije, sprječavanje savijanja i deformacija, a neki za smanjivanje mase.



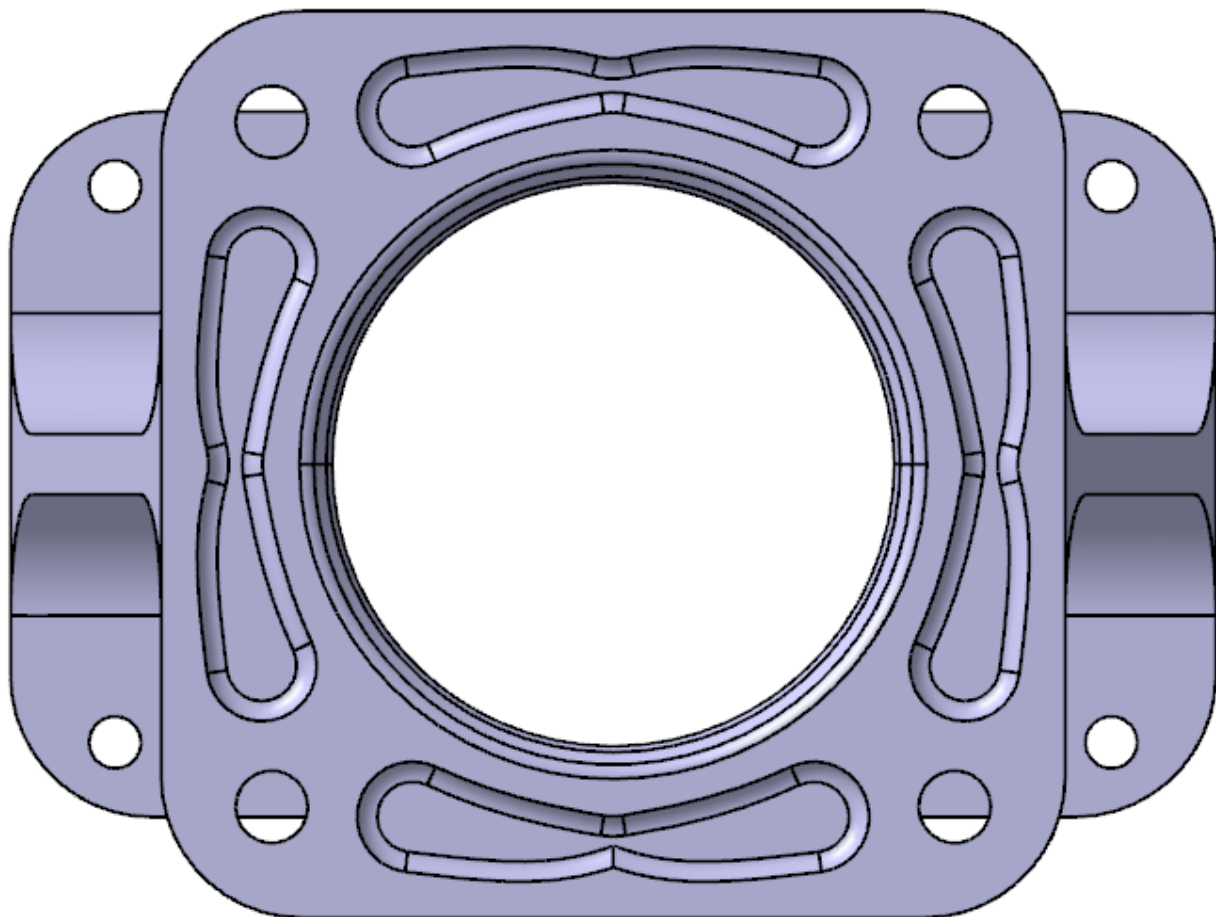
Slika 5.28 Završna konstrukcija

Rebra su dodana iz razloga koji je vidljiv na slici 5.29, a to je savijanje dodirnih ploča konstrukcije odbojnika. Budući da su stvarni pomaci mali, u svrhu bolje vizualizacije gibanja prilikom deformacije, svi pomaci su skalarno pomnoženi s odabranim faktorom u iznosu od 50. Podešavanje ovog faktora vrši se na funkciji *Amplification Magnitude*.



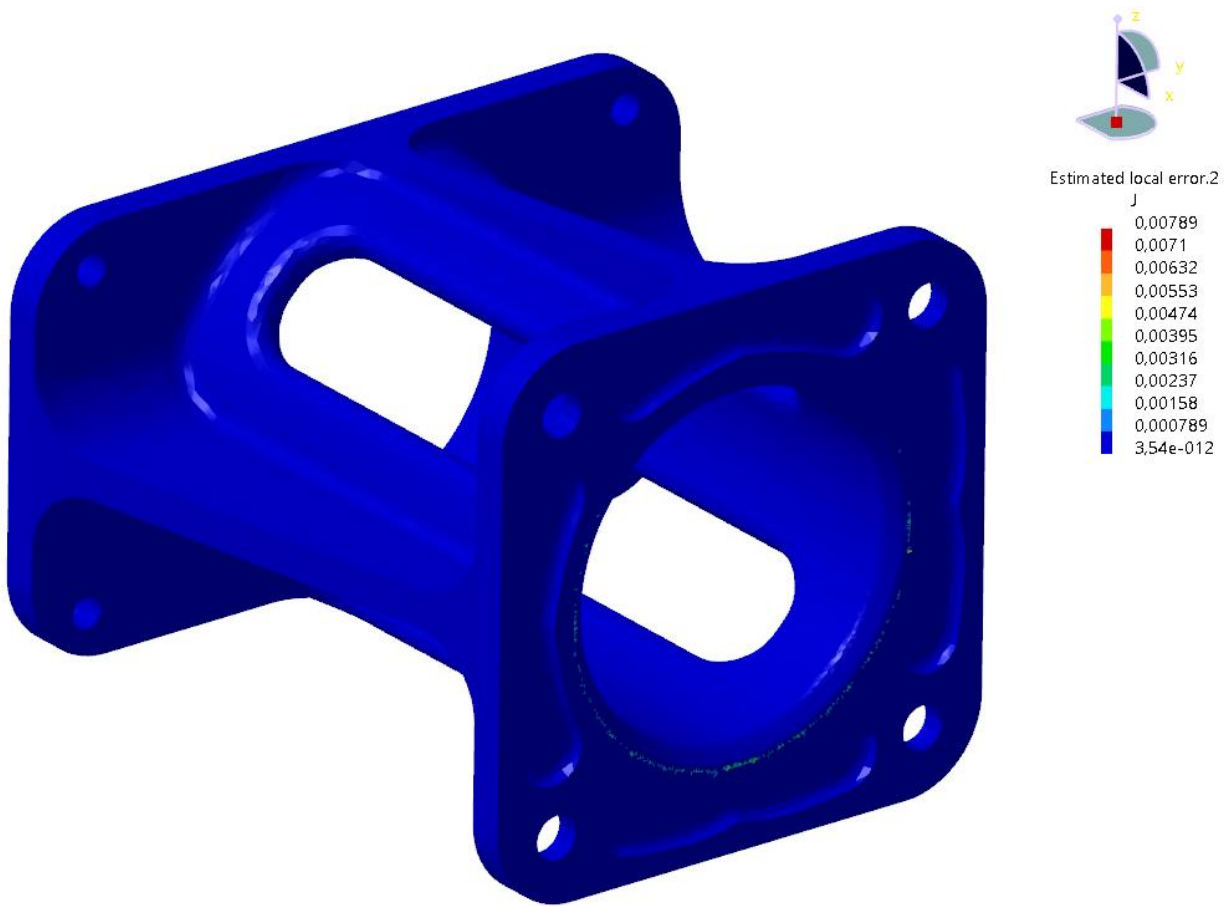
Slika 5.29 Detaljniji prikaz deformacija

Rupe na središnjem cijevnom dijelu konstrukcije napravljene su da olakšaju konstrukciju isto kao i uklonjen materijal koji se vidi na slici 5.30. Na svim mjestima gdje je to bilo potrebno postavljena su zaobljenja. Prilikom izrade ove konstrukcije pažnja je posvećena tehnologiji izrade ove konstrukcije, a to je lijevanje. Pa su tako sve stijenke izrađene iste debljine, što je izrazito bitno u tehnologiji lijevanja. Što se tiče izrade svih stranica pod kutom, radi vađenja odljevka iz kalupa, one nisu izrađene iz razloga što bi se njihovim dodavanjem znatno zakomplicirala konstrukcija i samim time numerička analiza. Izradom stranica pod kutem morao bi se dodati materijal što bi i tako poboljšalo rezultate.



*Slika 5.30 Primjer smanjenja mase na konstrukciji*

Kao i kod prve iteracije, na slici 5.31 su prikazane greške umrežavanja. Vidimo da postoje mjesta na kojima bi bilo poželjno podesiti detaljnije umrežavanje.



Slika 5.31 Greške u umrežavanju

Generirano je 181 742 elemenata i 275 434 čvorova, a njihova kvaliteta prikazana je na slici 5.32. Vidimo da su rezultati slični kao i prije, nije potrebno ništa mijenjati.

AMES

### ELEMENT QUALITY:

SYSTEMES

Criterion	Good	Poor	Bad	Worst	Average
Stretch	214421 ( 99,76% )	519 ( 0,24% )	0 ( 0,00% )	0,162	0,640
Aspect Ratio	205470 ( 95,59% )	8836 ( 4,11% )	634 ( 0,29% )	9,521	1,867

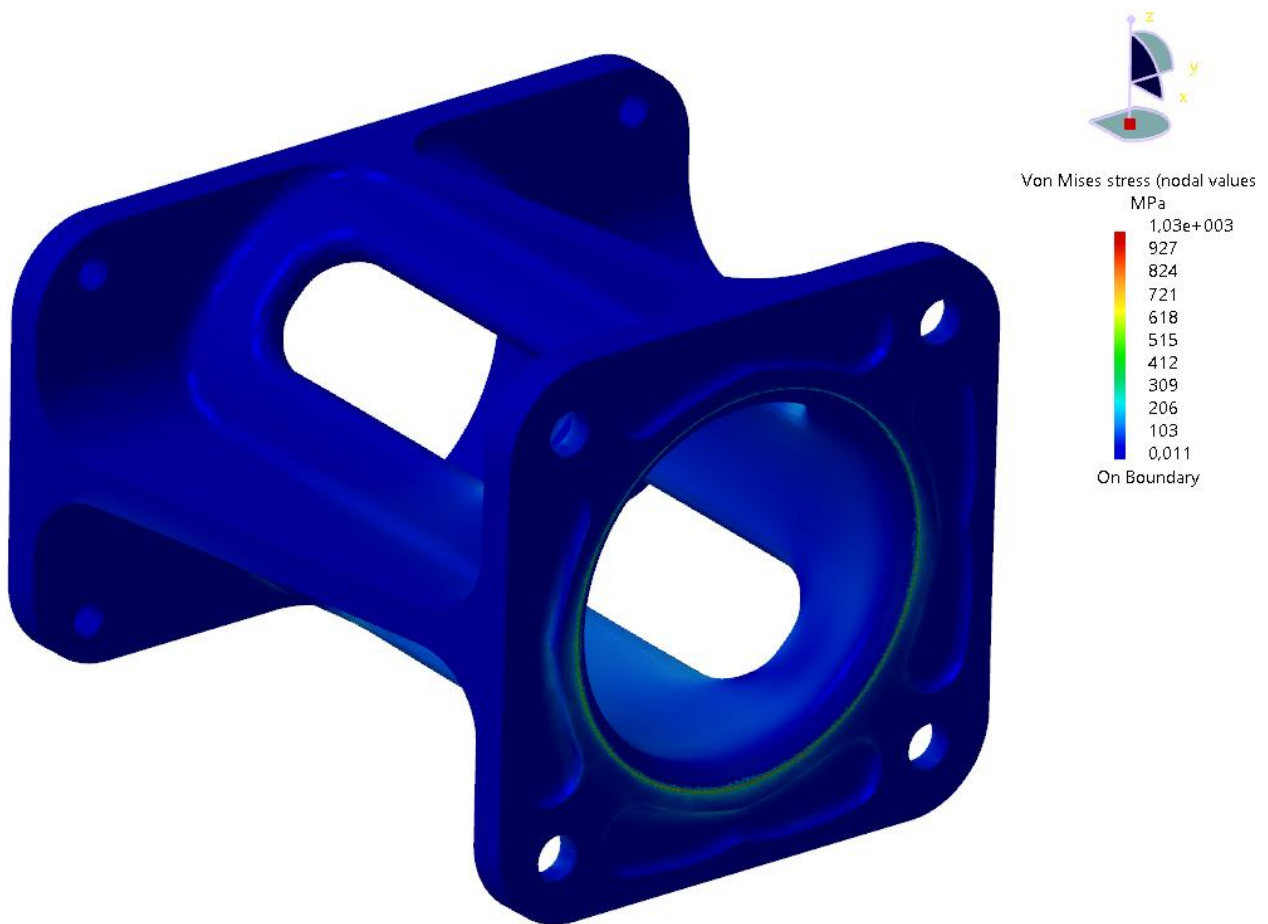
Slika 5.32 Kvaliteta elemenata završne konstrukcije

## 6. REZULTATI NUMERIČKE ANALIZE

Konstrukcija je gotova te će u nastavku biti prikazani svi bitni rezultati.

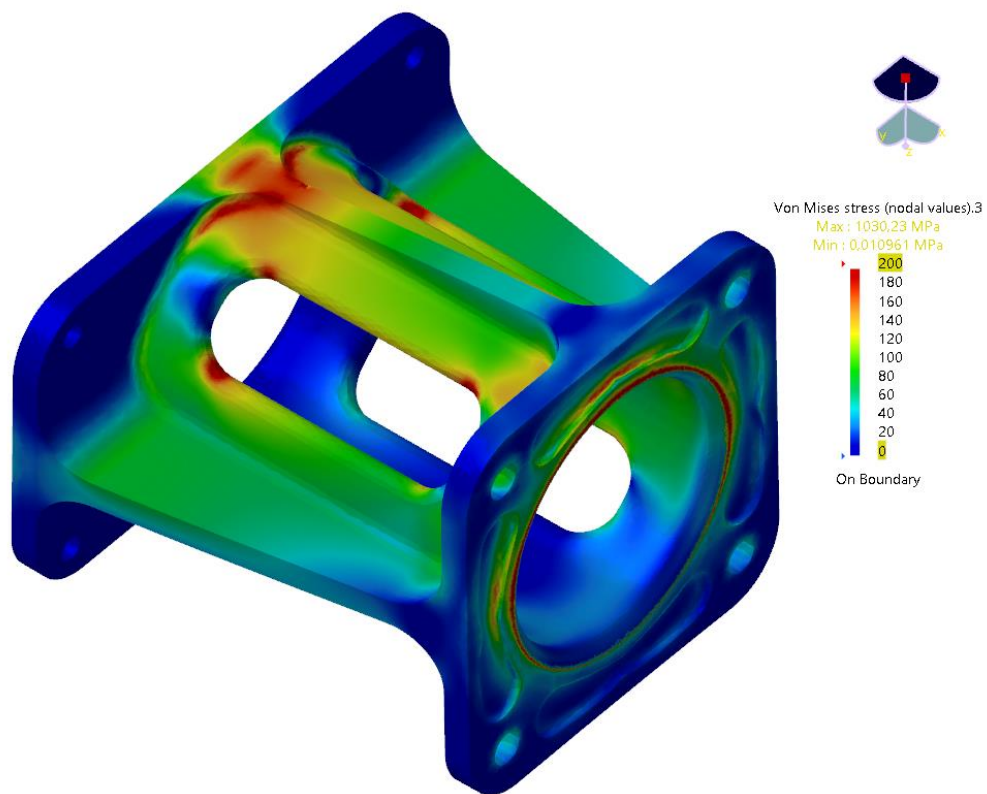
### 6.1 Rezultati *Von Mises* Stress

Na slici 6.1 možemo vidjeti ekvivalentna naprežanja po Von Mises-u. Kako bi bolje mogli vidjeti rezultate u nastavku će se skala prilagoditi veličinama.

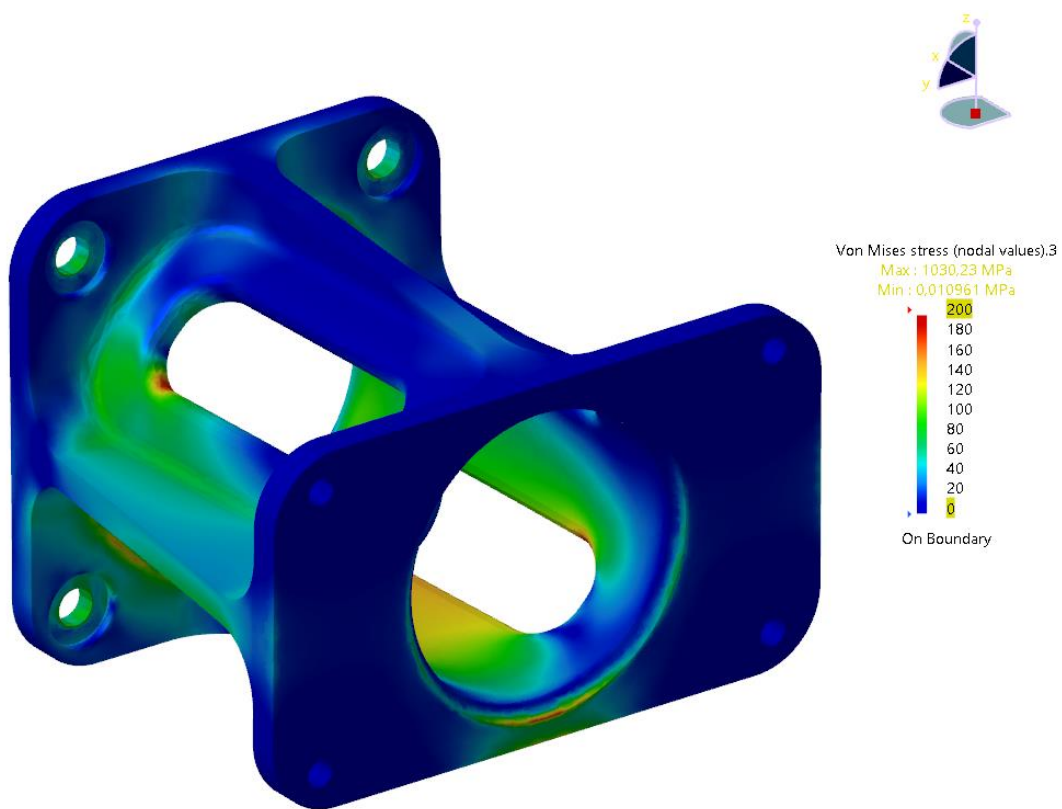


Slika 6.1 Prikaz ekvivalentnih naprežanja po Von Mises-u

Na slici 6.2 i 6.3 možemo vidjeti dobivene rezultate za postavljenu skalu od 0 MPa do 200 MPa, koliko bi zadani materijal trebao izdržati.

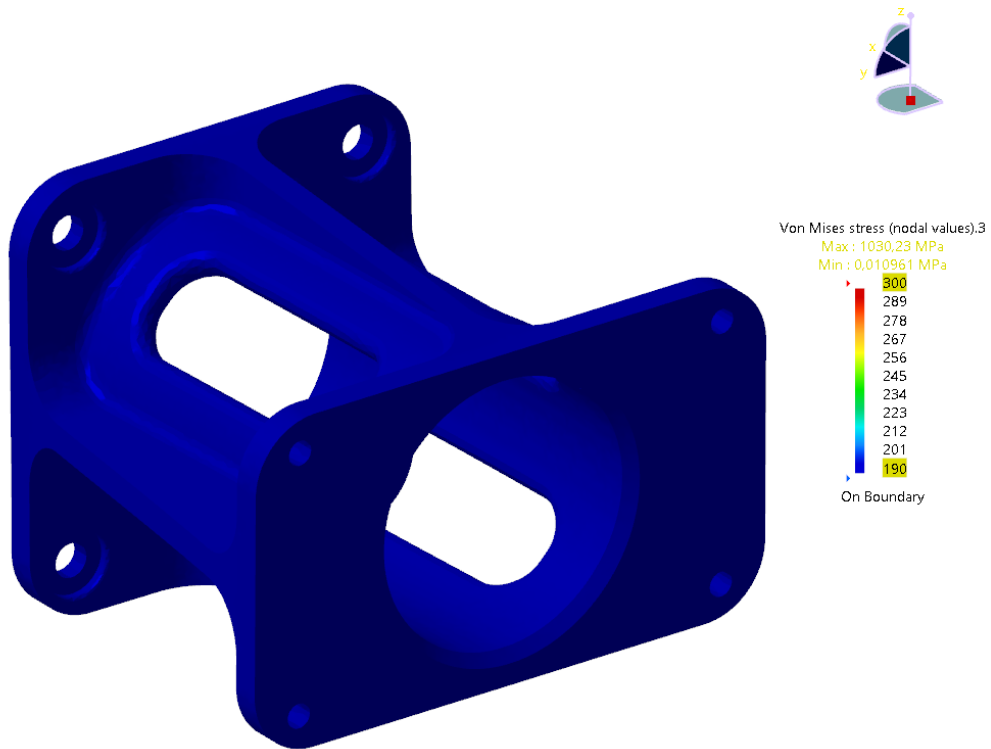


Slika 6.2 Prikaz ekvivalentih napreznja po Von Mises-u

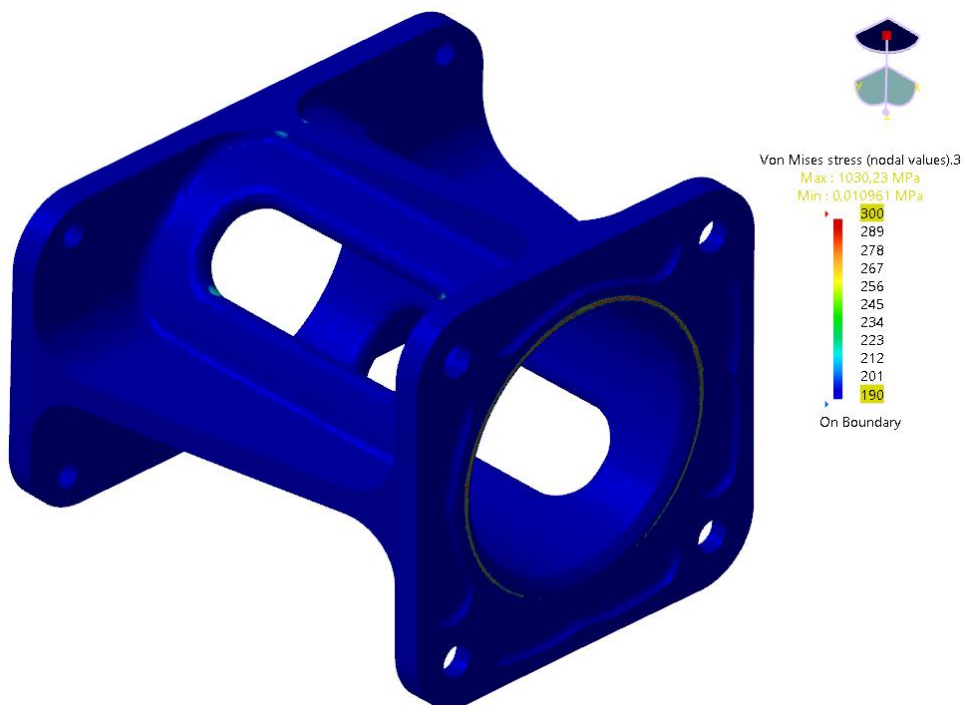


Slika 6.3 Prikaz ekvivalentih napreznja po Von Mises-u

Pošto je granica postavljena na 200 MPa, možemo vidjeti da se neki dijelovi konstrukcije nalaze blizu ili iznad te vrijednosti. Zato ćemo granicu pomaknuti na minimalno 190 MPa, a maksimalnu na 300 MPa. Ovaj korak je napravljen kako bi se lakše vizualizirali podaci, a rezultati se mogu vidjeti na sljedećim slikama:



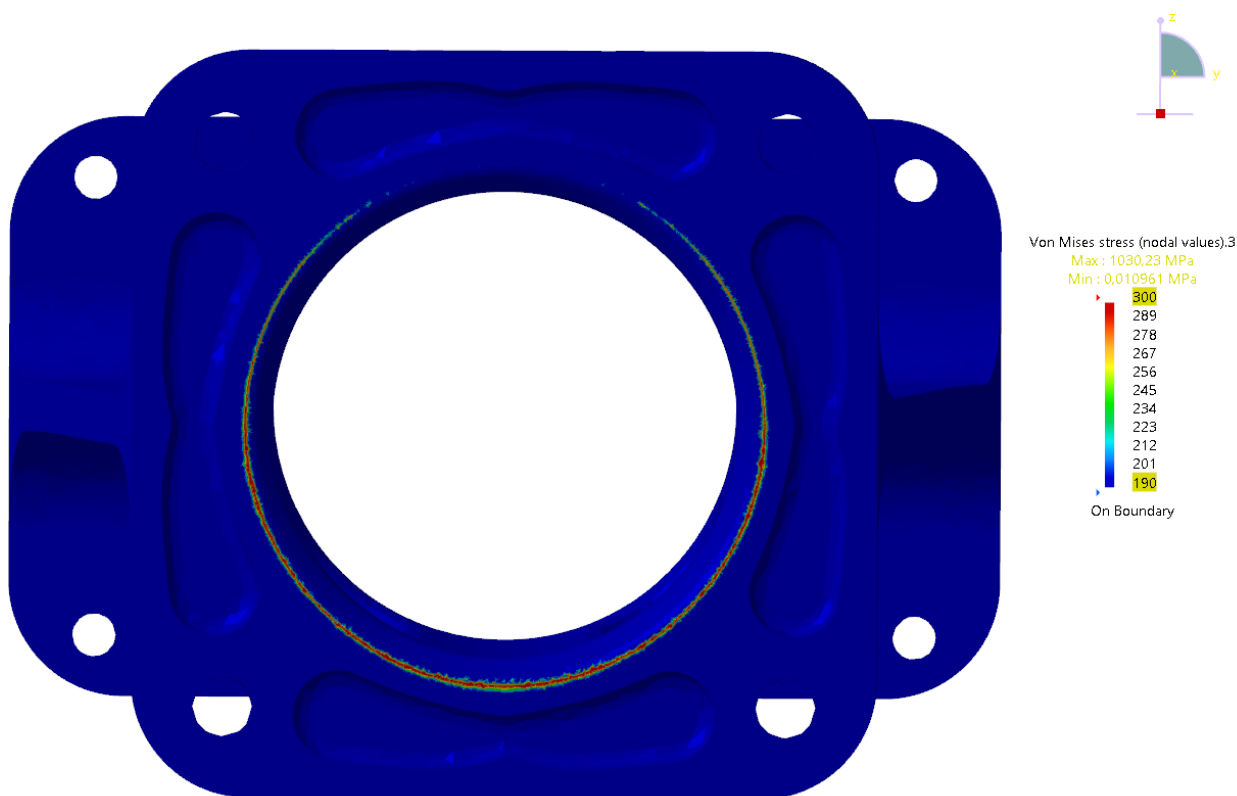
Slika 6.4 Prikaz ekvivalentnih naprezanja po Von Mises-u u drugoj skali



Slika 6.5 Prikaz ekvivalentnih naprezanja po Von Mises-u u drugoj skali



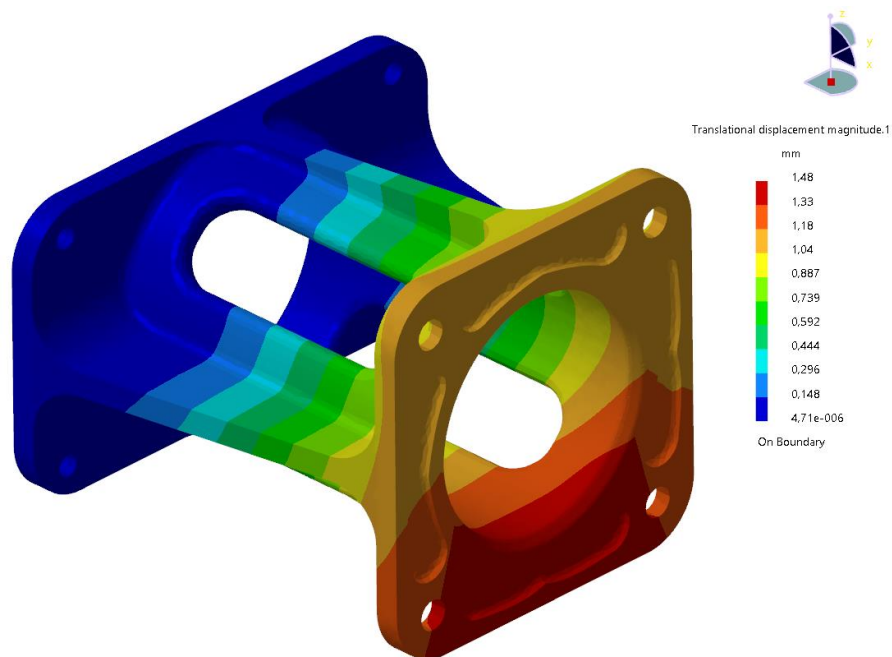
Na slici 6.5 možemo vidjeti da se neka ekvivalentna naprezanja nalaze iznad granice tečenja. Kao što je već prije objašnjeno, ovo se smatra greškom u numeričkoj analizi. Ako se prisjetimo slike 5.32 gdje se moglo vidjeti prosječan *Aspect Ratio* koji je bio 1,867, a najgori 9,521. Elementi na tom djelu su dovoljno mali da im je ovaj *Aspect Ratio* poremećen te sa sobom poremeti i matricu krutosti.



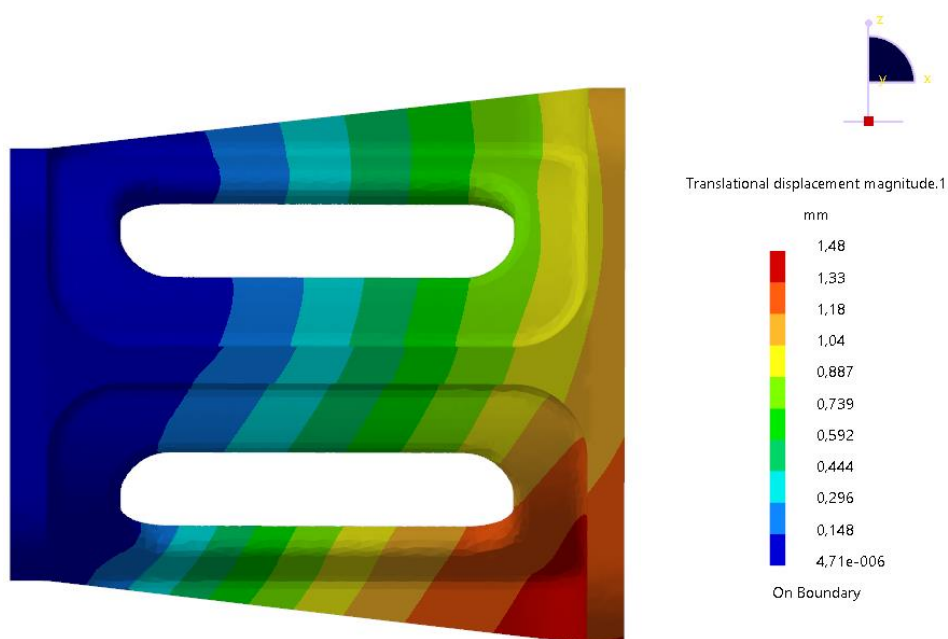
Slika 6.6 Detaljan prikaz greške numeričke analize

## 6.2 Pomaci

Pomaci su vrlo bitni prilikom numeričke analize jer možemo vidjeti smjer gibanja konstrukcije prilikom opterećenja te prema tome dodavati ojačanja. Na slici 6.7 možemo vidjeti prikaz pomaka na cijeloj konstrukciji s faktorom uvećanja 1.

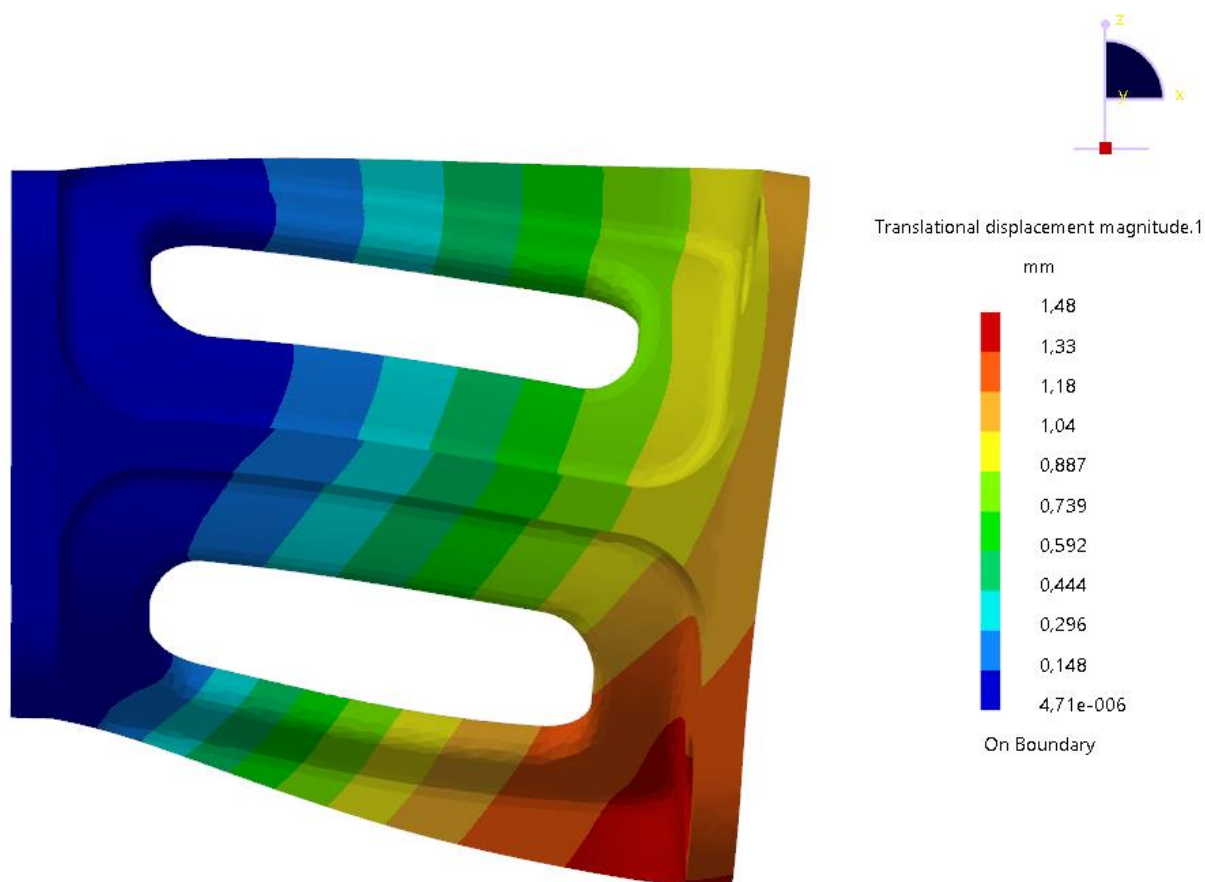


Slika 6.7 Pomaci na konstrukciji u izometriji



Slika 6.8 Pomaci sa boka (zx ravnina)

Na slici 6.8 možemo vidjeti pomake prikazane sa boka u zx ravnini. Pošto su pomaci svega maksimalno 1,48 mm to na ovim slikama ne možemo vidjeti. Na sljedećoj slici biti će prikazani rezultati s boka, ali sa faktorom uvećanja 50:



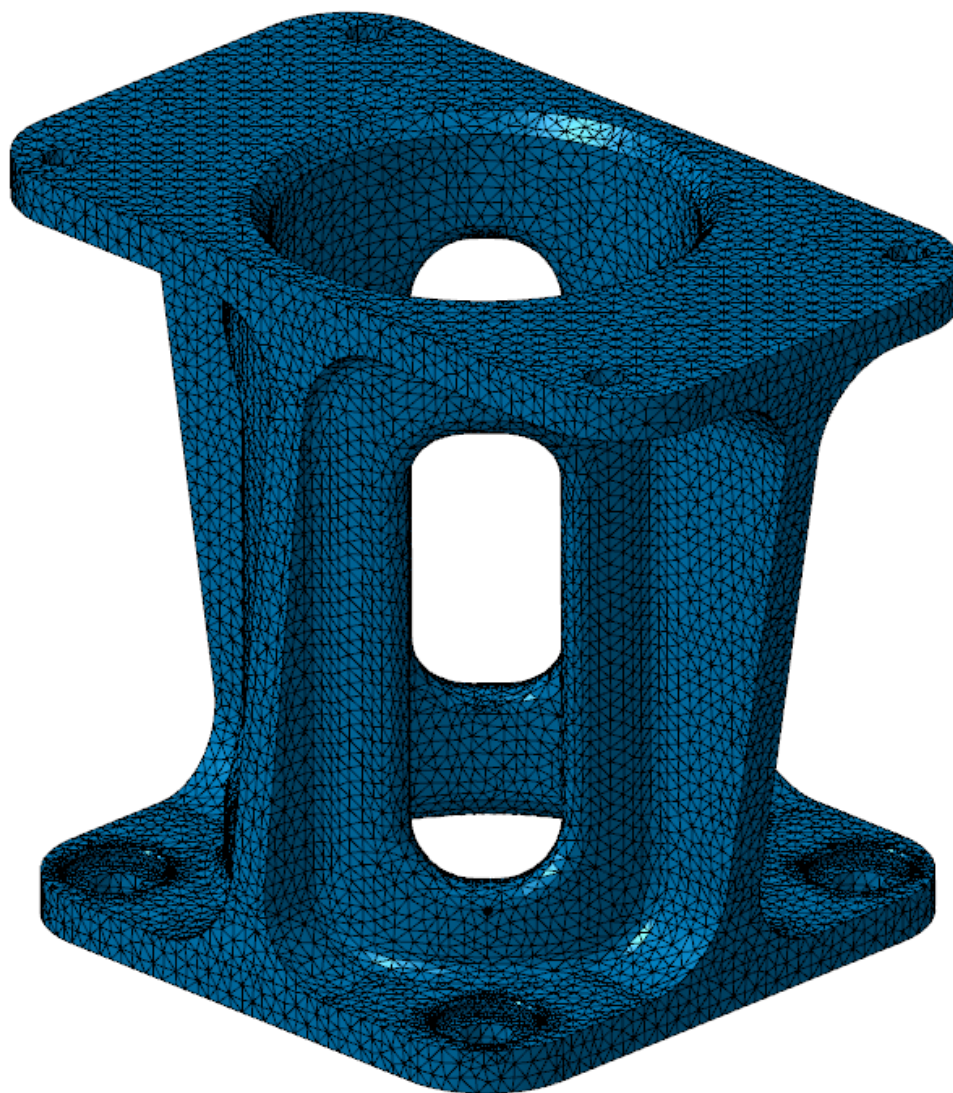
Slika 6.9 Pomaci sa faktora uvećanja 50

Vidimo da se konstrukcija pomiče u negativnom smjeru osi z (koordinatni sustav se nalazi u gornjem desnom kutu).

## 7. IZVIJANJE

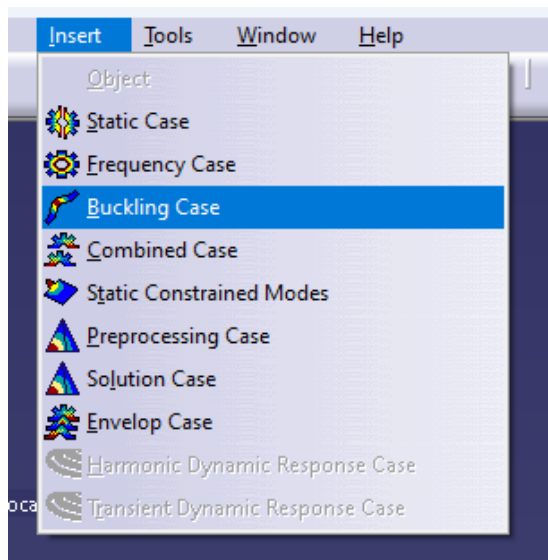
Izvijanje je jedan od slučajeva opterećenja spomenut u poglavlju 2. Kao što je prikazano na slici 2.6 izvijanje se događa i u slučaju ove konstrukcije. Iz tog razloga konstrukciju moramo provjeriti na izvijanje, a *Catia* nudi simulaciju za provjeravanje konstrukcija na izvijanje.

Za početak izrađujemo novu analizu i u njoj novi statički slučaj. Umrežavanje postavljamo jednako kao i prvoj analizi ali ovaj put možemo izbjeći dodatna detaljnija umrežavanja. Na slici 7.1 možemo vidjeti umreženu konstrukciju. Na gornjoj plohi postavljena je opcija *Clamp*, a na donjnu plohu postavljena je sila od 1,6 MN. Dva kontakta koja imamo postavljena su na *Fastened connection Property*.



Slika 7.1 Umrežena konstrukcija za slučaj izvijanja

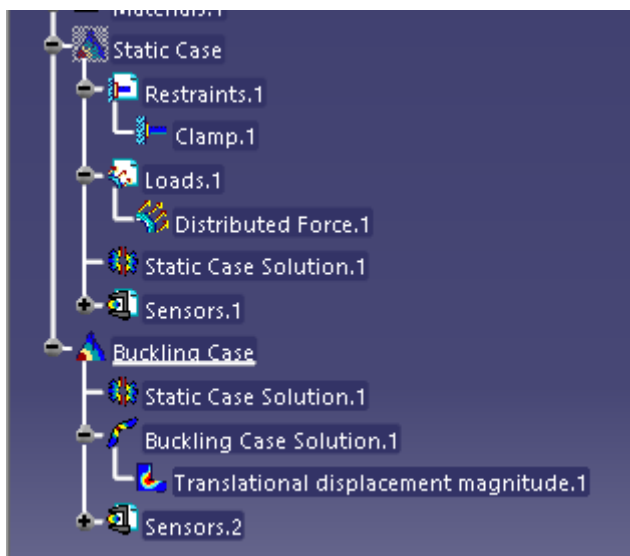
Sada možemo uključiti slučaj izvijanja koji nudi Catia. Putanju za odabir ovog slučaja vidljiv je na slici 7.2:



Slika 7.2 Buckling Case

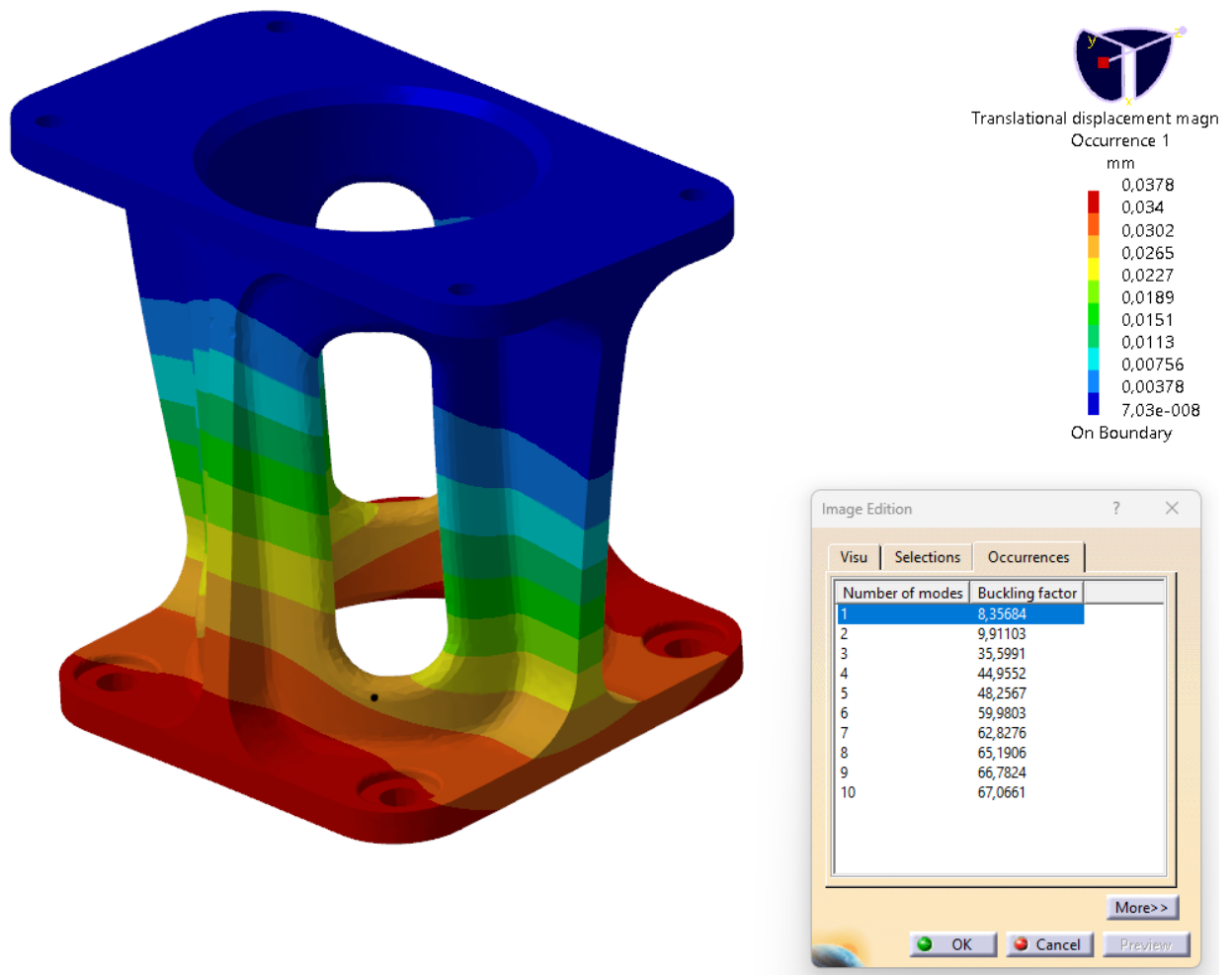
Odabirom ovog slučaja opterećenja u stablu dobivamo dio gdje će se moći vidjeti rezultati. Sada može pokrenuti simulaciju.

Nakon što je Catia potvrdila da je analiza uspješno riješena možemo pogledati rezultate. Odabirom funkcije *Displacement* u stablu dobivamo rješenja *Translational displacement magnitude*.

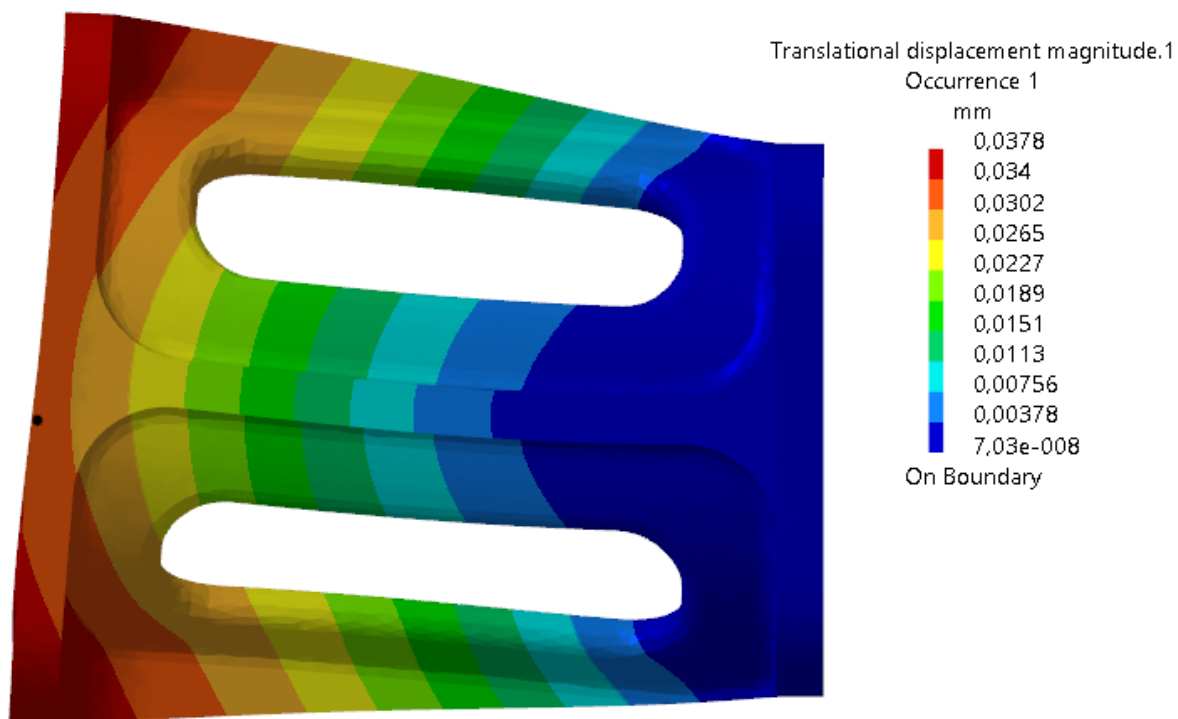


Slika 7.3 Translational displacement magnitude

Dvostrukim klikom na ovu značajku otvara se prozor gdje pod *Visu* odabiremo *Average iso types*, pod *Selections* odabiremo samo konstrukciju odbojnika, a pod *Occurrences* odabiremo modove izvijanja prema faktoru sigurnosti prema izvijanju od najmanjeg prema najvećem. Na slici 7.4 vidimo prvi slučaj izvijanja čiji faktor sigurnosti protiv izvijanja iznosi 8,35684. To znači da je potrebno 8,35684 puta veće opterećenje da bi došlo do prvog slučaja izvijanja.



Slika 7.4 Prvi slučaj izvijanja u izometriji



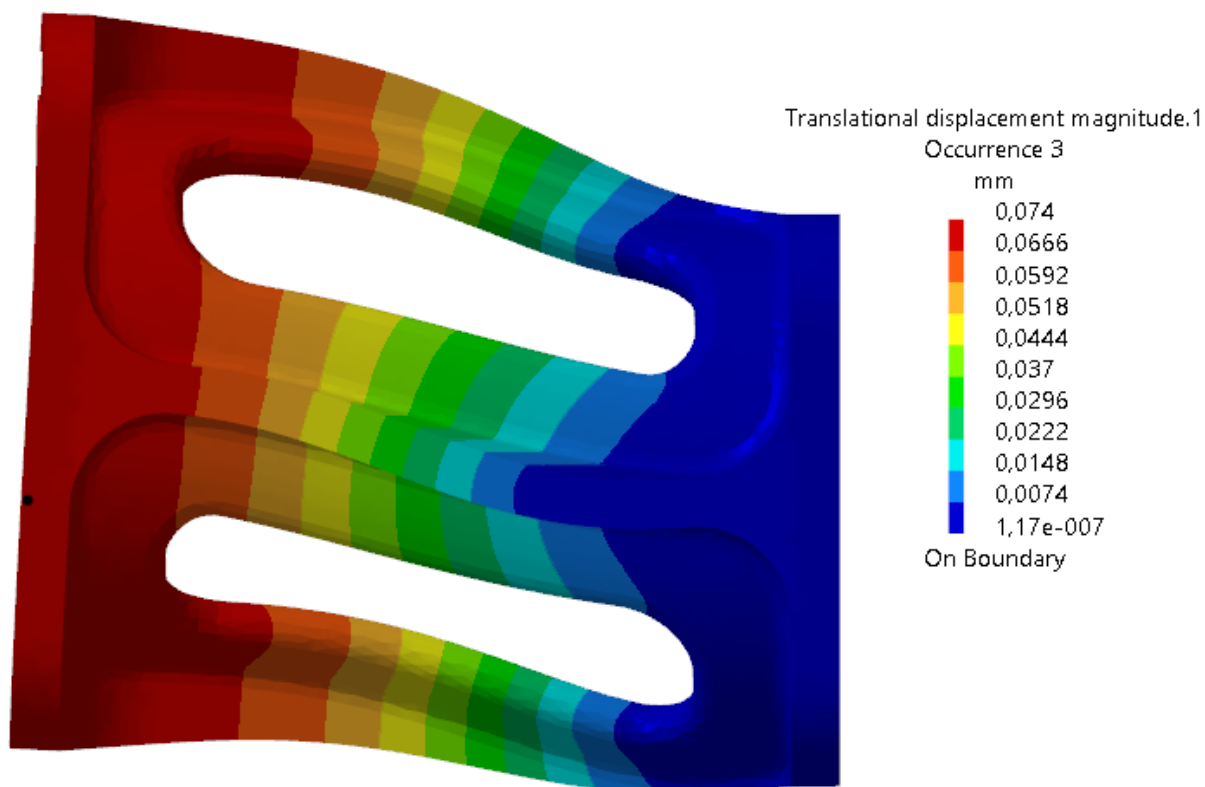
*Slika 7.5 Prvi slučaj izvijanja u boku*

U tablici 3. možemo vidjeti prikaz svih faktora sigurnosti protiv izvijanja za sve slučajeve.

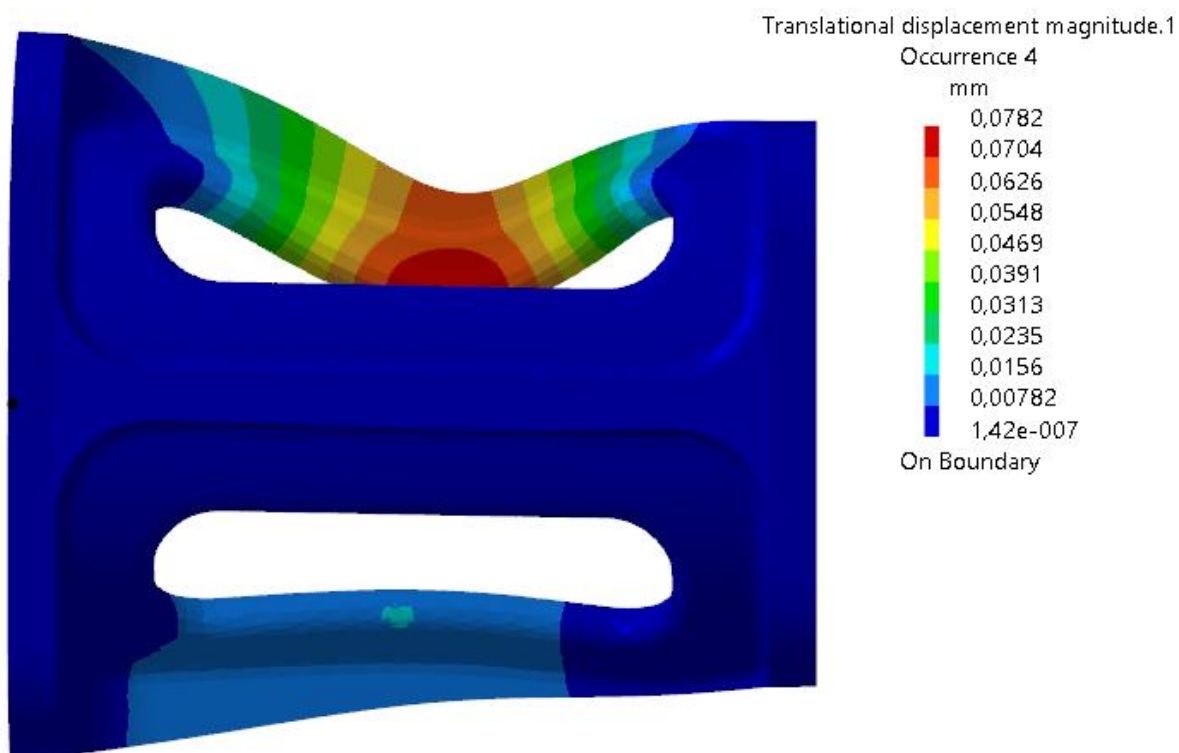
*Tablica 3 Svi slučajevi izvijanja*

Slučaj izvijanja	Faktor sigurnosti
1	8,35684
2	9,91103
3	35,5991
4	44,9552
5	48,2568
6	59,982
7	62,825
8	65,1685
9	66,8021
10	67,0624

U nastavku će biti prikazani neki od slučajeva izvijanja:



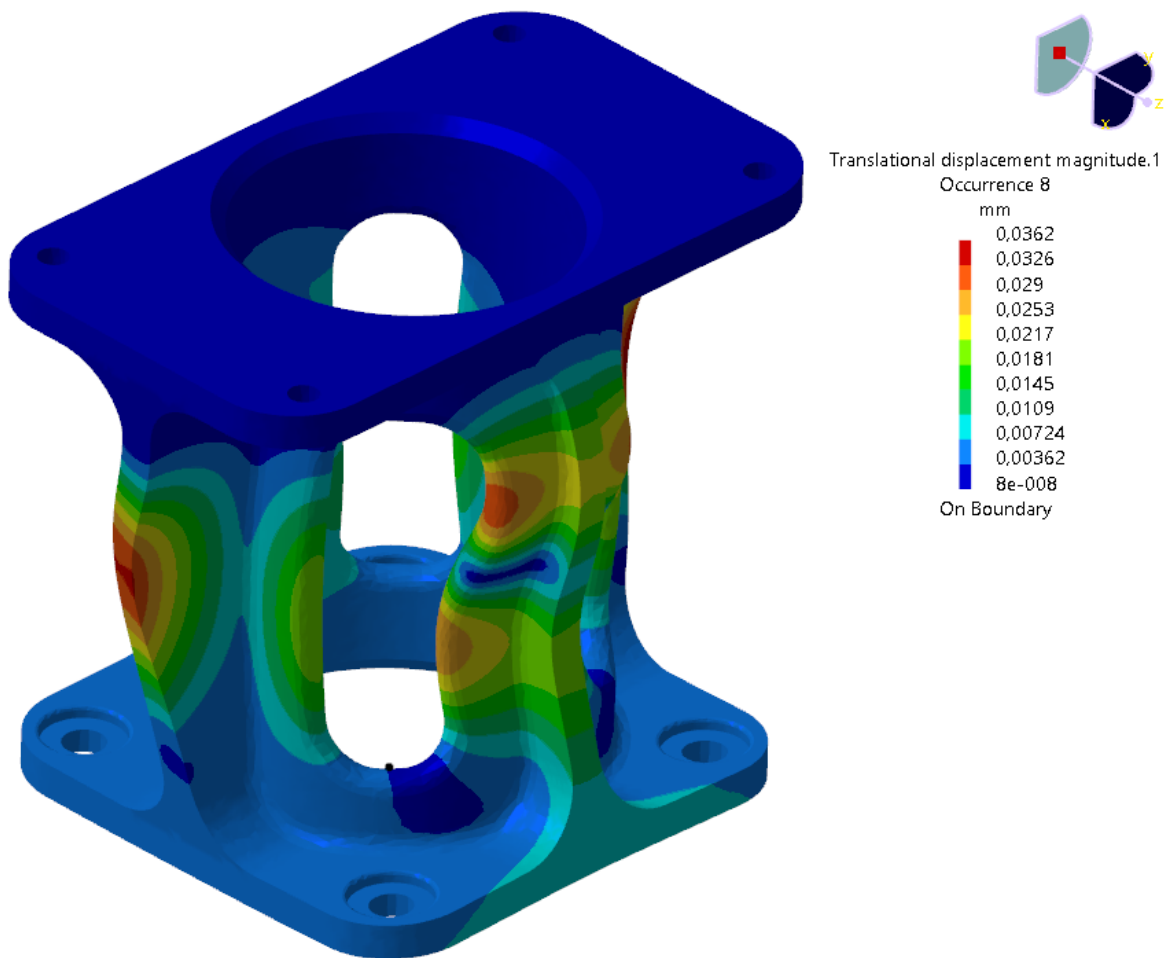
Slika 7.6 Treći slučaj izvijanja



Slika 7.7 Četvrti slučaj izvijanja



Četvrti i peti slučaj su isti samo je na petom slučaju deformirano rebro ispod a ne gornje kao na slici 7.7.



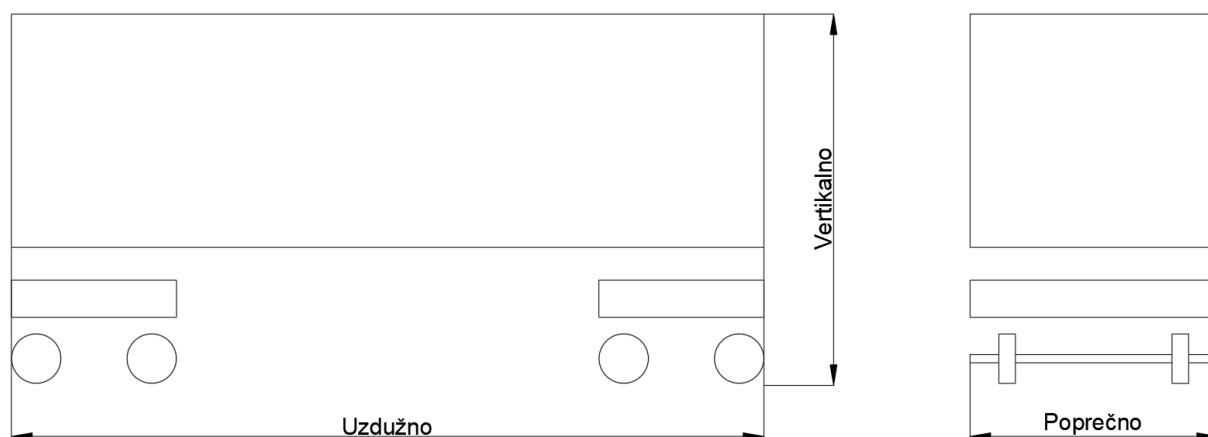
Slika 7.8 Osmi slučaj izvijanja

Iz tablice 3. možemo zaključiti da će se izvijanje pojaviti tek ako bi opterećenje povećali za 8,35684 puta. **Konstrukcija je sigurna na izvijanje.**

## 8. ZAMOR MATERIJALA

### 8.1 Norma - HRN EN 61373 – Oprema za željeznička vozila – Ispitivanje na udare i vibracije

Na slici 8.1 prikazan je željeznički vagon na kojem su označene osi koje će nam trebati za očitavanje podatak iz tablice 4.



Slika 8.1 Osi željezničkog vagona [12]

U tablici 4. prikazane su prosječne akceleracije u pojedinim osima. U ovim vrijednostima nije uključena zemljina gravitacija već samo vrijednosti koje su uključene. Ove podatke ćemo kasnije unijeti u *Catui*, kao akceleracije, kako bi pokazali ponašanje konstrukcije odbojnika udara pri cikličkim opterećenjima i sami životni vijek konstrukcije. Ove vrijednosti dobivene su ispitivanjem na željezničkom vagonu tokom vožnje, a predstavljaju dinamičke sile koje su rezultat interakcije između kotača i tračnica. HRN EN 61373 razlikuje tri skupa dinamičkih opterećenja, ovisno o smještaju proizvoda kojem se proračunava životni vijek. Najveća dinamička opterećenja javljaju se na opremi koja je direktno vezana uz kolski slog, osovinu s uprešanim kotačima (eng. axle mounted equipment). Niži razred dinamičkih opterećenja javlja se na opremi koja se nalazi na okviru okretnog postolja (eng. bogie mounted equipment). Najniži razred dinamičkih opterećenja javlja se na opremi koja je ugrađena na čeličnu konstrukciju vlaka (eng. body mounted equipment). Kolski slogovi su neogibljene mase, stoga su i najviše dinamički opterećene. Okviri okretnih postolja su mehanički odvojeni od kolskih slogova primarnim ogibljenjem s pripadajućim prigušnicima vibracija, stoga je i njihovo dinamičko opterećenje nižeg iznosa. Čelična konstrukcija je mehanički odvojena od okvira okretnog postolja sekundarnim ogibljenjem s pripadajućim prigušnicima vibracija, stoga je i sva oprema koja je ugrađena na istu podvrgnuta

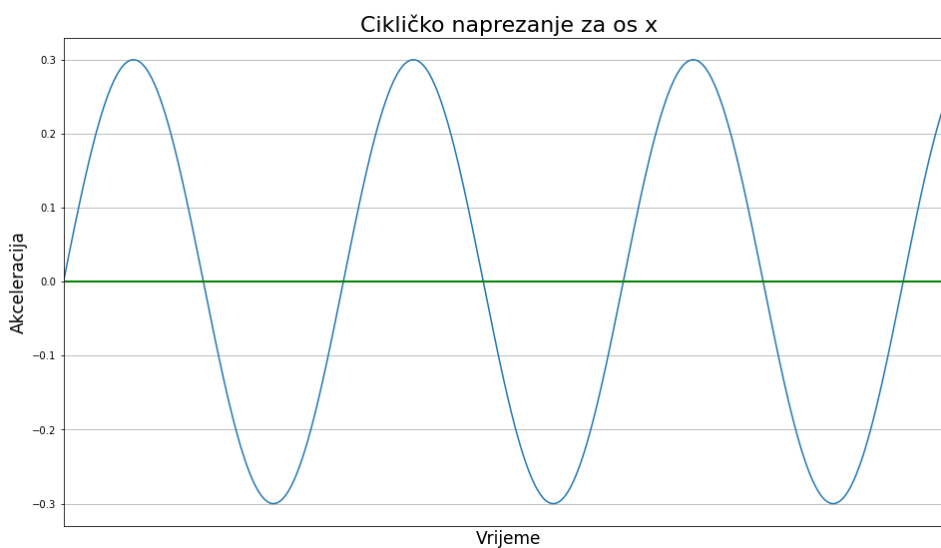
najnižim iznosima dinamičkog opterećenja. Odbojnik udara je ugrađen na čeličnu konstrukciju, stoga u nastavku slijede iznosi komponenti ciklički izmjenjivih akceleracija kojima je odbojnik podvrgnut tokom eksploatacije.

Tablica 4 Prikaz prosječnih akceleracija u pojedinim smjerovima [12]

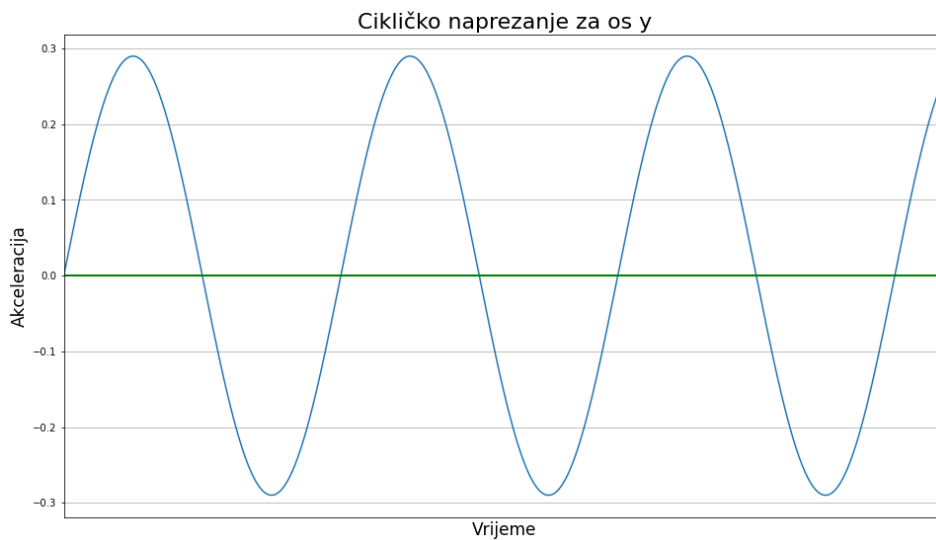
Smjer opterećenja	Prosječan iznos [ $m/s^2$ ]
Vertikalna komponenta (z)	0,49
Poprečna komponenta(y)	0,29
Aksijalna komponenta (x)	0,30

## 8.2 Grafički prikaz cikličkih opterećenja

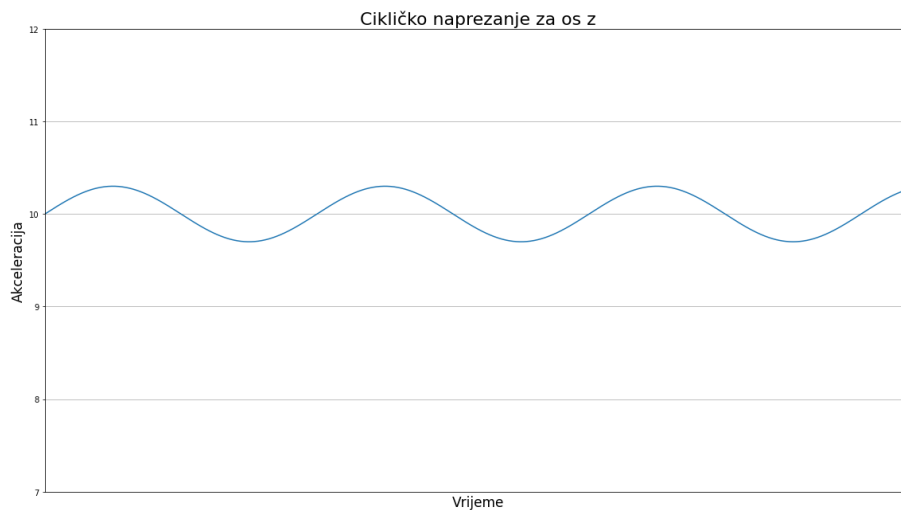
Na slikama 8.2, 8.3 i 8.4 prikazane su cikličke promjene akceleracija po x,y i z osima u vremenu. Na slici 8.4 prikazana je akceleracija za os z, na njoj je nadodano i utjecaj zemljine gravitacije od  $10 m/s^2$ .



Slika 8.2 Ciklička promjena akceleracije po x smjeru



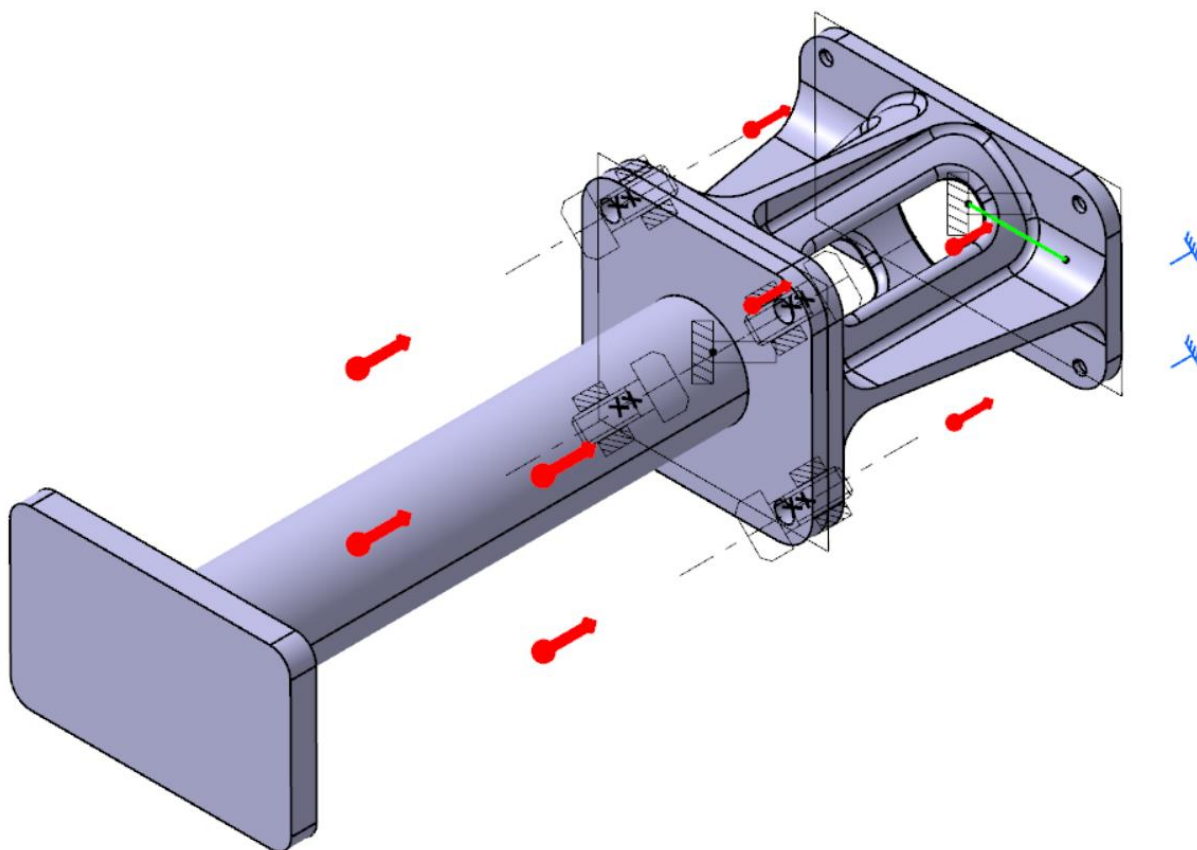
Slika 8.3 Ciklička promjena akceleracije po y smjeru



Slika 8.4 Ciklička promjena akceleracije po z smjeru

### 8.3 Postavljanje cikličkih opterećenja

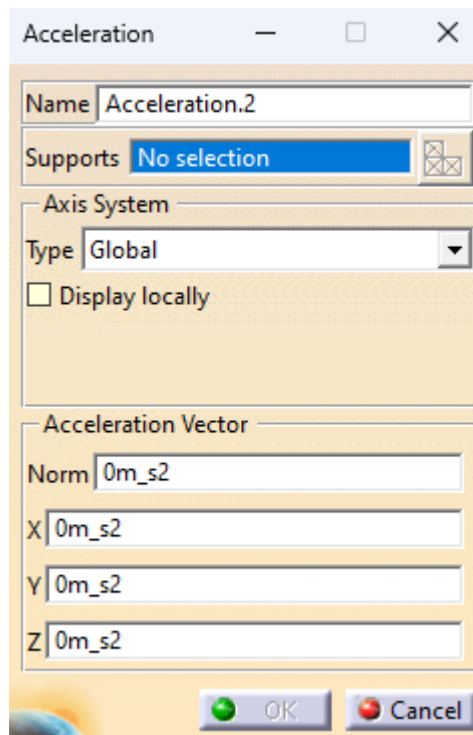
Za potrebe kontrole konstrukcije na zamor moramo napraviti novu analizu. Koristit će se isti način rubnih uvjeta ograničenja i definiranja kontaktnih površina, a stavit će se nova opterećenja (akceleracije). Na slici 8.5 prikazana je konstrukcija sa postavljenim rubnim uvjetima i definiranim kontaktnim površinama gdje crvene strelice simboliziraju akceleracije.



Slika 8.5 Rubni uvjeti za analizu na zamor materijala

Sada je potrebno napraviti po dva *Static Case-a* za os z, a jedan za sve ostale smjerove. Za os z potrebno je napraviti *Combine Case* kako bi dobili ukupan rezultat dva statička slučaja. Za os z je poseban slučaj jer se cikličke vrijednosti ne kreću od neke vrijednosti iz pozitivnih vrijednosti u negativne vrijednosti kao kod osi x i y.

Kao opterećenja postavlja se funkcija *Acceleration* kako bi definirali akceleracije na konstrukciji. Odabirom *Acceleration* funkcije otvara se prozor prikazan na slici 8.6. Pod *Supports* moramo odabrati konstrukciju odbojnika i sami odbojnik udara, a pod *Acceleration Vector* zadajemo vrijednosti posebno za svaku os. Za os x zadaje se vrijednost  $0,3 \text{ m/s}^2$ , os y  $0,29 \text{ m/s}^2$  a za os z zadaju se dvije vrijednosti u dva posebna slučaja  $9,49 \text{ m/s}^2$  i  $10,49 \text{ m/s}^2$ .



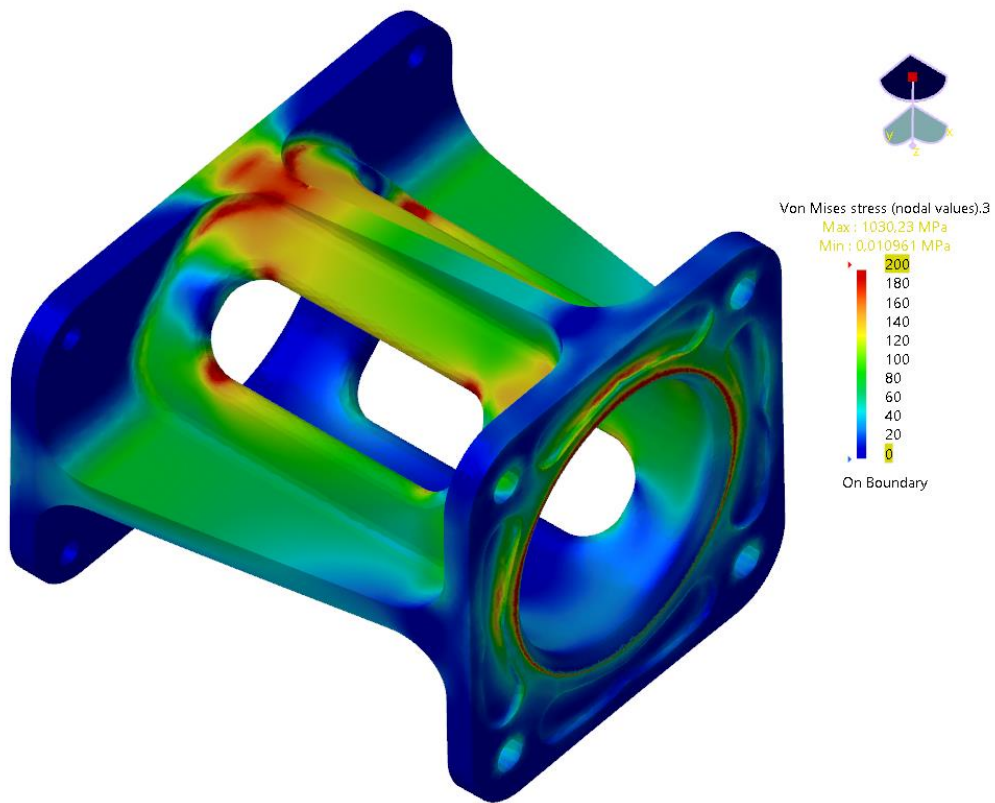
Slika 8.6 Prozor Acceleration

## 8.4 Rezultati

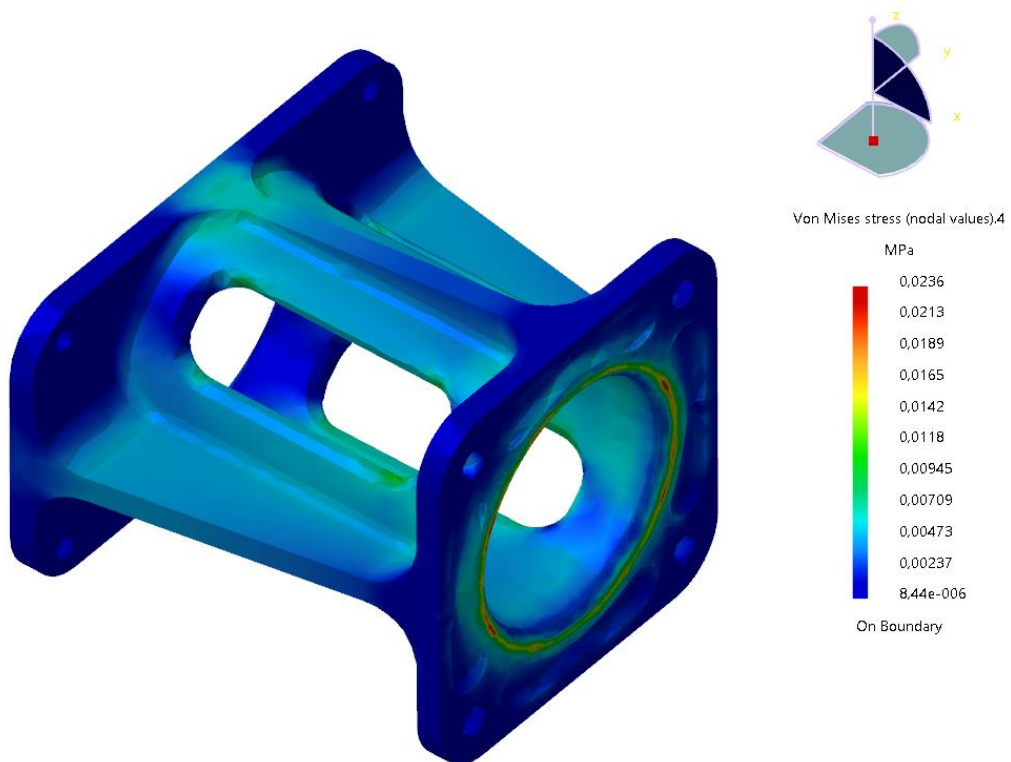
U nastavku su prikazani rezultati napreznja prema kojima možemo zaključiti da li će dolaziti do zamora materijala za zadane rubne uvjete.

### 8.4.1 Akceleracije po osi x

Budući da je nosač odbojnika udara projektiran za kvazistatičko aksijalno opterećenje od 1,6 MN, a inercijske sile koje se javljaju u eksploataciji nisu značajnog iznosa, može se pretpostaviti da će konstrukcija izdržati postavljene uvjete inercijskih opterećenja. No, u svrhu kvantificiranja odnosa raspodjele napreznja u slučajevima kvazistatičkog aksijalnog opterećenja od 1,6 MN i opterećenja uslijed inercijskih sila, prikazane su raspodjele napreznja nastale uslijed inercijskih sila u eksploataciji.

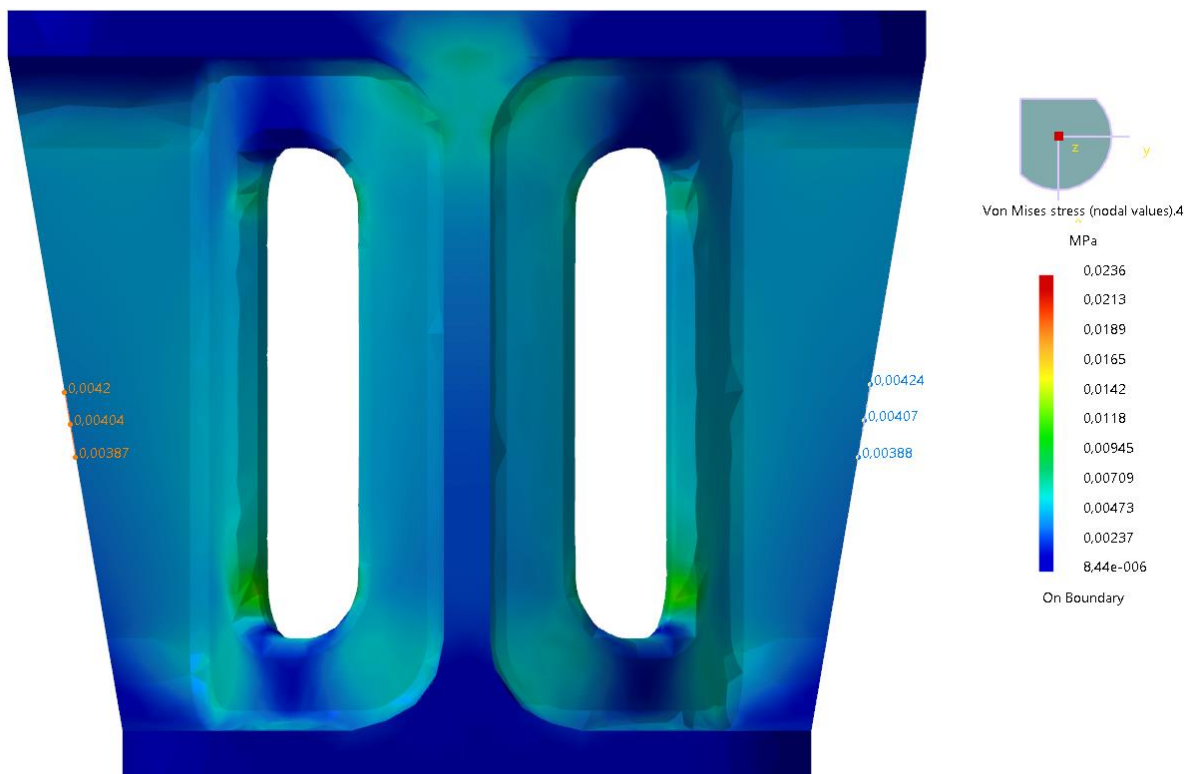


Slika 8.7 Naprezanja po Von Mises-u kod kvazistatičkih opterećenja



Slika 8.8 Naprezanja po Von Mises-u za os x s inercijskim silama u eksploataciji

Uspoređujući sliku 8.7 i 8.8 možemo vidjeti da su naprezanja koja su dobivena s inercijskim silama u eksploataciji zanemariva naspram naprezanjima koja su dobivena s kvazistatičkim opterećenjem od 1,6 MN.



Slika 8.9 Usporedba vrijednosti za os x

Na slici 8.9, a detaljnije na slici 8.10, prikazano je kako su raspoređena naprezanja prema Von Mises-u. S lijeve i desne strane konstrukcije su prikazane vrijednosti koje možemo promatrati tako da su sa jedne strane vrijednosti za tlak, a na suprotnoj strani na vlak. Ovo možemo tako promatrati iz razloga što je konstrukcija simetrična.



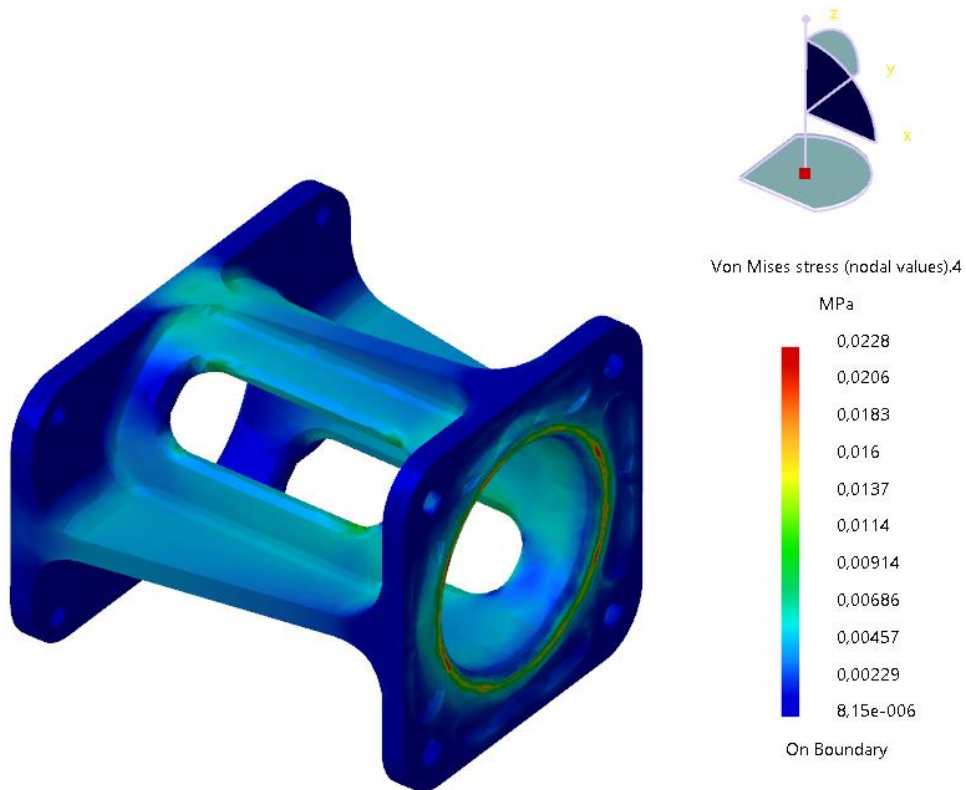
Slika 8.10 Detaljan prikaz vrijednosti za os x



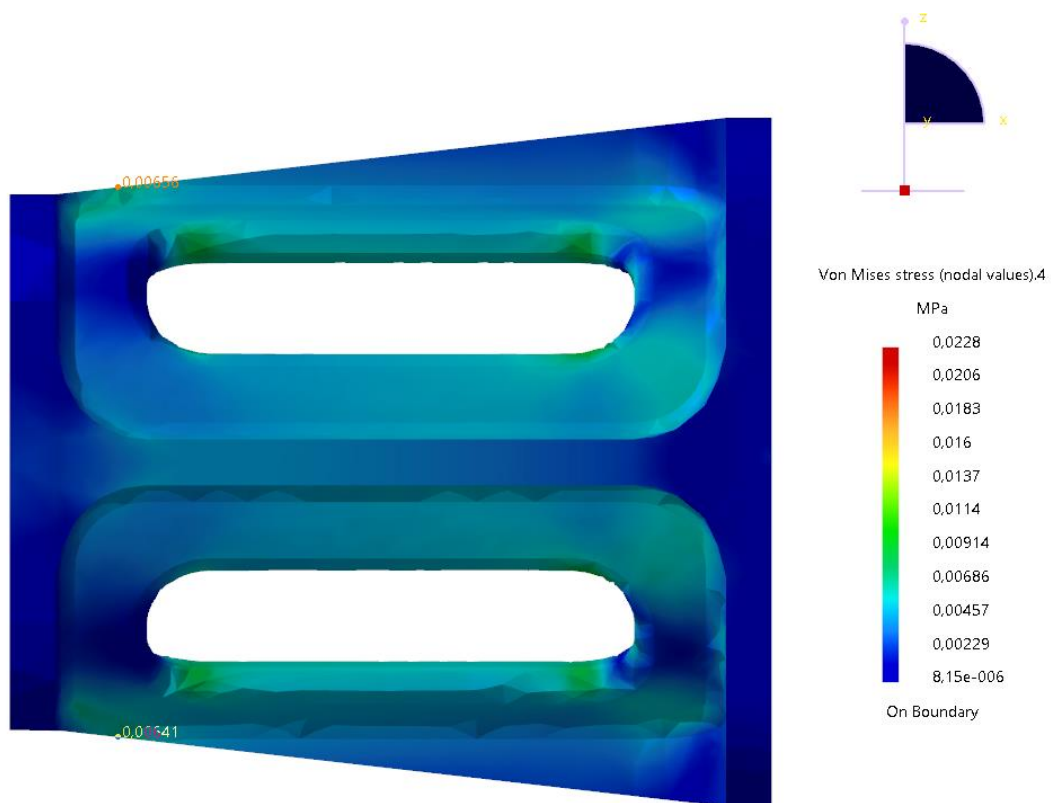
Ako gledamo S-N krivulju materijala, možemo vidjeti da je raspon napreznja za ovaj slučaj zanemariv. **Konstrukcija je sigurna** na zamor materijala te ima beskonačan životan vijek s gledišta opterećenja na zamor.

#### 8.4.2 Akceleracije po osi y

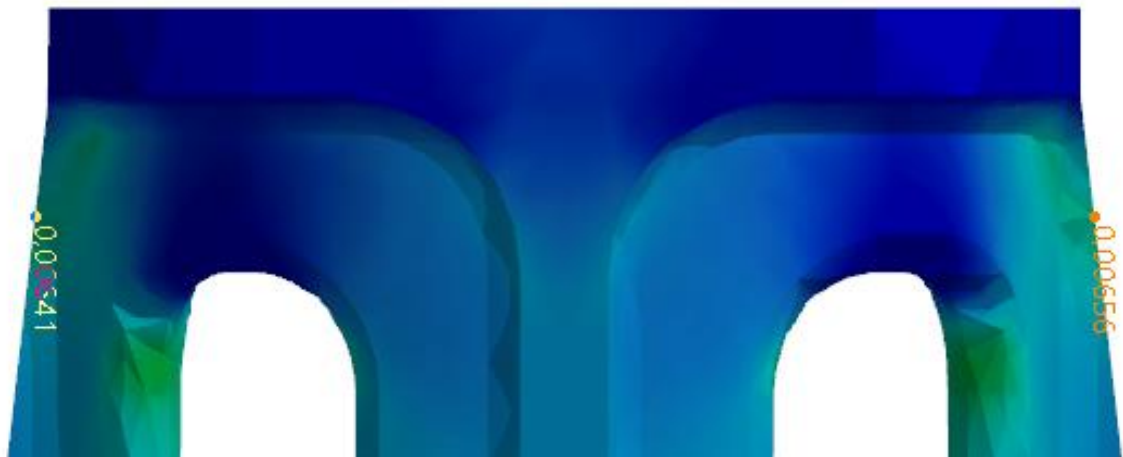
Postupak se ponavlja i za os y. U nastavku su prikazani rezultati:



Slika 8.11 Napreznja po Von Mises-u za os y



Slika 8.12 Usporedba vrijednosti za os y

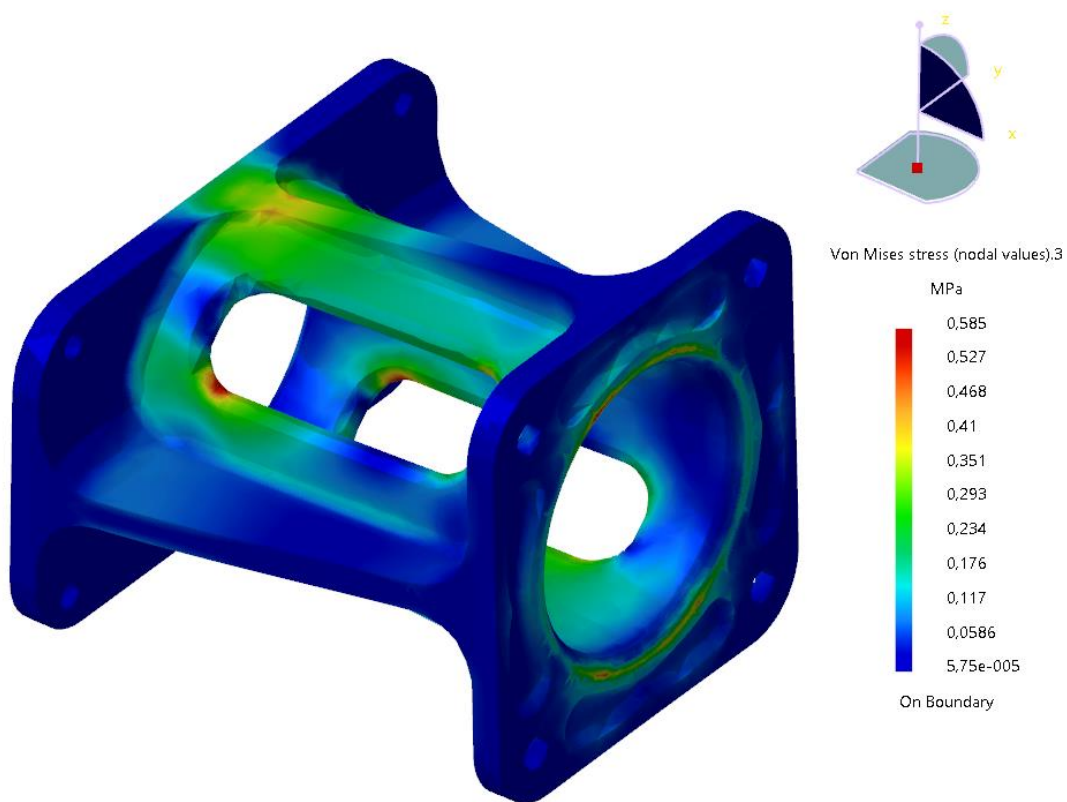


Slika 8.13 Detaljan prikaz vrijednosti za os y

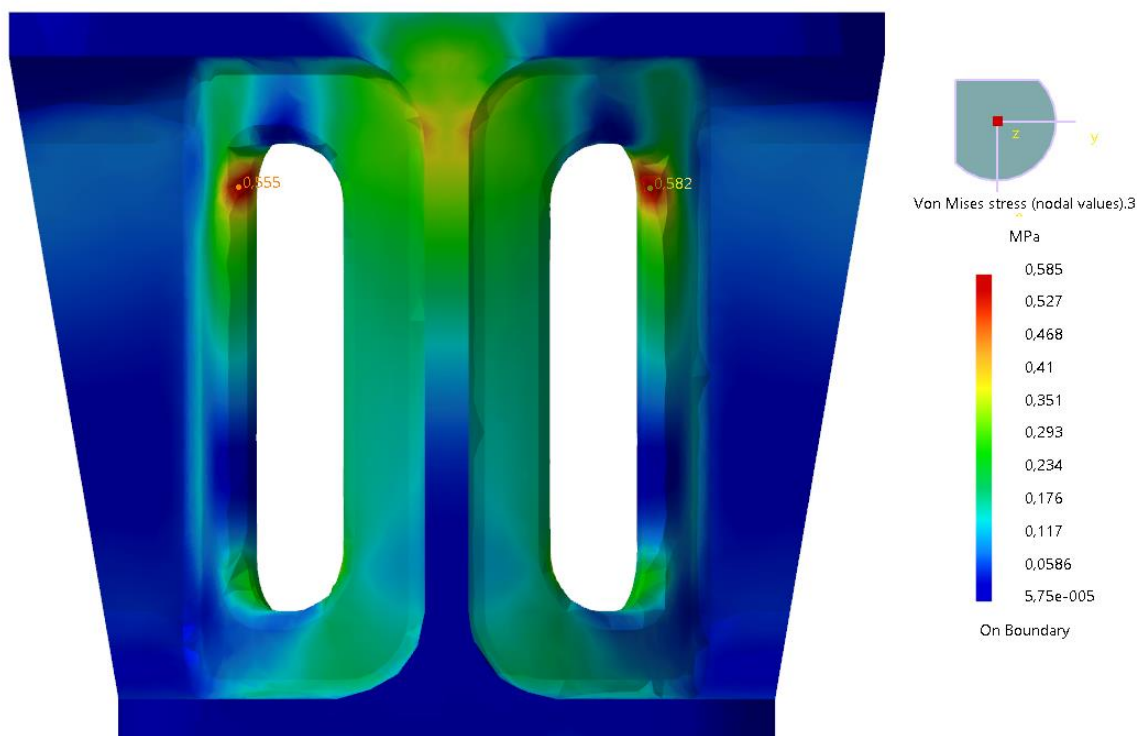
Ako gledamo S-N krivulju materijala, možemo vidjeti da je raspon naprezanja za ovaj slučaj zanemariv. **Konstrukcija je sigurna** na zamor materijala te ima beskonačan životan vijek s gledišta opterećenja na zamor.

### 8.4.3 Akceleracije po osi z

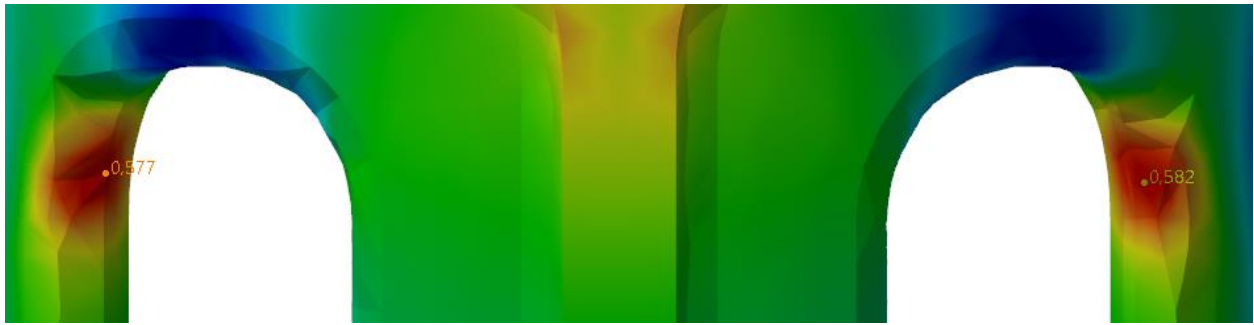
Postupak se ponavlja i za os z. U nastavku su prikazani rezultati:



Slika 8.14 Naprezanja po Von Mises-u za os z



Slika 8.15 Usporedba vrijednosti za os z



Slika 8.16 Detaljan prikaz vrijednosti za os z

Ako gledamo S-N krivulju materijala, možemo vidjeti da je raspon naprezanja za ovaj slučaj zanemariv. **Konstrukcija je sigurna** na zamor materijala te ima beskonačan životan vijek s gledišta opterećenja na zamor.

Na osnovi sva tri slučaja možemo zaključiti da konstrukcija ima **beskonačan životni vijek** s gledišta opterećenja na zamor.

## 9. ZAKLJUČAK

U ovom diplomskom radu istražena je tema numeričke analize i optimizacije konstrukcije odbojnika udara na željezničkom vagonu s ciljem postizanja krajnje konstrukcije koja će zadovoljiti uvjet preživljavanja udara od 1,6 MN opterećenja. Geometrija i numeričke analize izrađene su u programu Catia V5. Početna konstrukcija je konstruirana kao polazna točka, a koja se zatim kroz iteracijski postupak s pomoću numeričkih analiza optimizirala kako bi joj se smanjila masa.

U prvoj iteraciji se pojavljuje veliko savijanje ploča koje su u kontaktu s odbojnikom udara i ostatkom željezničkog vagona, a to je rezultiralo dodavanjem simetričnih rebara. Pazeći na tehnologiju izrade, podebljanje su ploče koje su u kontaktu s okolnim konstrukcijama kako bi bile jednake debljine kao i rebra. Ovaj dio optimizacije sastojao se od puno iteracija sve dok se nije došlo do optimalnog rješenja za savijanje ploča koje su u kontaktu s odbojnikom udara i ostatkom željezničkog vagona. Kada se riješio problem savijanja, i kada su sva naprezanja bila ispod dopuštenih naprezanja, moglo se krenuti s uklanjanjem mase. Prvo logično mjesto je bilo između rebara na debelostjenoj cijevi. Iterativnim postupkom uklonjen je dio konstrukcije u cilju smanjenja mase, a da je integritet konstrukcije ostao sačuvan i da su sva naprezanja ispod dozvoljenih naprezanja. Također iterativnim postupkom uklonjen je dio konstrukcije na pločama, s ploha koje su u kontaktu s odbojnikom udara i ostatkom konstrukcije željezničkog vagona. Kada je procijenjeno da je konstrukcija optimizirana, izvršene su numeričke analize u cilju potvrđivanja da konstrukcija zadovoljava uvjete koji su zadani raznim normama. Normama je uvjetovano i kako se konstrukcije moraju provjeriti na zamor materijala pa je na kraju rada potvrđeno da konstrukcija zadovoljava i taj uvjet. Ovaj rezultat analize za zamora materijala mogao se pretpostaviti na početku jer ako konstrukcija može izdržati udar tolike jačine može se pretpostaviti da će imati i beskonačan vijek trajanja.

U ovome radu fokus je bio samo na numeričkoj analizi, optimizaciji i provjeri životnog vijeka konstrukcije odbojnika udara željezničkog vagona te iz toga zaključujemo da je cilj ovog diplomskog rada ispunjen. Izrađena je konstrukcija koja zadovoljava zadane uvjete i ima beskonačan vijek trajanja.

## 10. POPIS SLIKA

Slika 2.1 Aksijalno opterećenje na vlak [1] .....	4
Slika 2.2 Smicanje [1] .....	5
Slika 2.3 Ravno savijanje silama [1] .....	5
Slika 2.4 Uvijanje [1] .....	5
Slika 2.5 Čisto ravno savijanje [1] .....	6
Slika 2.6 Izvijanje [1] .....	6
Slika 2.7 Troosno stanje naprezanja infintezimalnog elementa [1] .....	7
Slika 2.8 Primjer uzorka za ispitivanje.....	13
Slika 2.9 Dijagram naprezanje-deformacija za čelik [3].....	13
Slika 2.10 S-N krivulja čelika i aluminija [3] .....	17
Slika 2.11 Odbojnik [4].....	18
Slika 2.12 Prikaz konstrukcije odbojnika prilikom udara [4] .....	18
Slika 2.13 Presjek odbojnika udara [4] .....	19
Slika 3.1 S-N krivulja AlCu4TiMg [6] .....	21
Slika 4.1 Tetraedarski konačni elementi [8].....	27
Slika 4.2 Heksaedarski konačni elementi [8] .....	28
Slika 5.1 Konstrukcija vlaka bez odbojnika udara .....	30
Slika 5.2 Prikaz odbojnika udara na željezničkom vagonu [9] .....	31
Slika 5.3 Početna konstrukcija odbojnika udara .....	31
Slika 5.4 Osnovne dimenzije početne konfiguracije .....	32
Slika 5.5 Postavke mesh-a za odbojnik udara .....	33
Slika 5.6 Prikaz vrijednosti Absolute sag i Proportional sag [10] .....	34
Slika 5.7 Prikaz umrežavanja u prvoj iteraciji .....	34
Slika 5.8 Prikaz grešaka u umrežavanju.....	35
Slika 5.9 Detaljan prikaz grešaka .....	36
Slika 5.10 Local size .....	36
Slika 5.11 Umrežavanje nakon podešavanja lokalnog umrežavanja .....	37
Slika 5.12 Greške nakon lokalnog umrežavanja .....	38
Slika 5.13 Izvješće o umrežavanju .....	39
Slika 5.14 General Analysis Connection.....	41
Slika 5.15 Prikaz General Analysis Connection .....	42
Slika 5.16 Virtual Bolt Tightening Connection Property.....	42
Slika 5.17 Virutal Bolt Tightening Connection Property primjer .....	43
Slika 5.18 Graf reakcije odbojnika udara [11] .....	44

Slika 5.19 Postavljanje opterećenja.....	45
Slika 5.20 Kopiranje uvjeta sa prošlog slučaja .....	46
Slika 5.21 Postavljanje sile u Z smjeru .....	46
Slika 5.22 Combined Solution .....	47
Slika 5.23 Von Mises Stress .....	48
Slika 5.24 Pomaci.....	49
Slika 5.25 Vektorski prikaz pomaka .....	49
Slika 5.26 Prilagođavanje prikaza rezultata .....	50
Slika 5.27 Prikaz ugrađenih rezultata pomaka .....	50
Slika 5.28 Završna konstrukcija .....	51
Slika 5.29 Detaljniji prikaz deformacija .....	52
Slika 5.30 Primjer smanjenja mase na konstrukciji .....	53
Slika 5.31 Greške u umrežavanju.....	54
Slika 5.32 Kvaliteta elemenata završne konstrukcije.....	54
Slika 6.1 Prikaz ekvivalentnih naprezanja po Von Mises-u.....	55
Slika 6.2 Prikaz ekvivalentnih naprezanja po Von Mises-u.....	56
Slika 6.3 Prikaz ekvivalentnih naprezanja po Von Mises-u.....	56
Slika 6.4 Prikaz ekvivalentnih naprezanja po Von Mises-u u drugoj skali.....	57
Slika 6.5 Prikaz ekvivalentnih naprezanja po Von Mises-u u drugoj skali.....	57
Slika 6.6 Detaljan prikaz greške numeričke analize .....	58
Slika 6.7 Pomaci na konstrukciji u izometriji .....	59
Slika 6.8 Pomaci sa boka (zx ravnina) .....	59
Slika 6.9 Pomaci sa faktora uvećanja 50.....	60
Slika 7.1 Umrežena konstrukcija za slučaj izvijanja.....	61
Slika 7.2 Buckling Case .....	62
Slika 7.3 Translational displacement magnitude.....	62
Slika 7.4 Prvi slučaj izvijanja u izometriji .....	63
Slika 7.5 Prvi slučaj izvijanja u boku .....	64
Slika 7.6 Treći slučaj izvijanja .....	65
Slika 7.7 Četvrti slučaj izvijanja .....	65
Slika 7.8 Osmi slučaj izvijanja.....	66
Slika 8.1 Osi željezničkog vagona [12].....	67
Slika 8.2 Ciklička promjena akceleracije po x smjeru .....	68
Slika 8.3 Ciklička promjena akceleracije po y smjeru .....	69
Slika 8.4 Ciklička promjena akceleracije po z smjeru .....	69

Slika 8.5 Rubni uvjeti za analizu na zamor materijala .....	70
Slika 8.6 Prozor Acceleration.....	71
Slika 8.7 Naprezanja po Von Mises-u kod kvazistatičkih opterećenja .....	72
Slika 8.8 Naprezanja po Von Mises-u za os x s inercijskim silama u eksploataciji .....	72
Slika 8.9 Usporedba vrijednosti za os x .....	73
Slika 8.10 Detaljan prikaz vrijednosti za os x .....	73
Slika 8.11 Naprezanja po Von Mises-u za os y.....	74
Slika 8.12 Usporedba vrijednosti za os y .....	75
Slika 8.13 Detaljan prikaz vrijednosti za os y .....	75
Slika 8.14 Naprezanja po Von Mises-u za os z.....	76
Slika 8.15 Usporedba vrijednosti za os z .....	76
Slika 8.16 Detaljan prikaz vrijednosti za os z .....	77



## 11. POPIS TABLICA

Tablica 1 Kemijski sastav legure [6].....	20
Tablica 2 Osnovna svojstva materijala.....	20
Tablica 3 Svi slučajevi izvijanja.....	64
Tablica 4 Prikaz prosječnih akceleracija u pojedinim smjerovima [12] .....	68

## 12. IZVORI

[1] - Brnić J., Turkalj G.: „Nauka o čvrstoći I“, Tehnički fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka, 2004.

[2] - D. Vrtovšnik, "Numerička analiza i optimizacija modela koronarnog stenta", Diplomski rad, Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet, Rijeka, 2021. Dostupno na: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:190:762060>

[3] - Sanjin Krščanski: Materijali uz predavanja iz kolegija Trajnost strojeva i konstrukcija, 2022/2023

[4] - AXSTONE Spólka Akcyjna, A DEVICE DISSIPATING ENERGY OF RAIL CAR COLLISIONS, Patentni broj: EP3630576B1

[5] - <https://www.axtoneglobal.com/know-how>

[6] - [www.totalmateria.com](http://www.totalmateria.com)

[7] - Brnić J., Čanađija M., Analiza deformabilnih tijela metodom konačnih elemenata, Tehnički fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka, 2009.

[8] - ABAQUS, Abaqus Documentation: Version 6.14. 2014, Dassault Systemes: 3DS Paris Campus, 10 rue Marcel Dassault, 78140 Vélizy - Villacoublay, FRANCE

[9] - <http://www.crashbuffer.com/p56e.htm>

[10] - [https://www.maruf.ca/files/catiahelp/CATIAfr\\_C2/estugCATIAfrs.htm](https://www.maruf.ca/files/catiahelp/CATIAfr_C2/estugCATIAfrs.htm)

[11] - <https://www.axtoneglobal.com/getmedia/1b292b2d-1e00-4931-9c6d-4e205ac0520b/AX-KL-6-Crash-b.pdf>

[12] - HRN EN 61373\_2011\_38

[13] - HRN EN 12663-1\_2015

## **13. PRILOG**

Nacrt