

# Statička analiza konstrukcije željezničkog mosta prema EUROCODE normama

---

Ivković, Mia

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

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:190:264084>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-04**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Sveučilišni prijediplomski studij strojarstva

Završni rad

**STATIČKA ANALIZA KONSTRUKCIJE ŽELJEZNIČKOG  
MOSTA PREMA EUROCODE NORMAMA**

Rijeka, srpanj 2023.

Mia Ivković

0069087798

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Sveučilišni prijediplomski studij strojarstva

Završni rad

**STATIČKA ANALIZA KONSTRUKCIJE ŽELJEZNIČKOG  
MOSTA PREMA EUROCODE NORMAMA**

Mentor: Prof. dr. sc. Domagoj Lanc

Rijeka, srpanj 2023.

Mia Ivković

0069087798

Rijeka, 14. ožujka 2023.

Zavod: **Zavod za tehničku mehaniku**  
Predmet: **Računarska analiza konstrukcija**  
Grana: **2.11.01 opće strojarstvo (konstrukcije)**

## ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: **Mia Ivković (0069087798)**  
Studij: Sveučilišni prijediplomski studij strojarstva

Zadatak: **Statička analiza konstrukcije željezničkog mosta prema EUROCODE normama**/Static analysis of railway bridge according to EUROCODE

### Opis zadatka:

U zadatku je potrebno izvršiti analizu statičke nosivosti čelične konstrukcije mosta metodom konačnih elemenata. Konstrukciju modelirati primjenom grednih elemenata te izvršiti provjeru dimenzija prema EUROCODE normama.

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



Zadatak uručen pristupniku: 20. ožujka 2023.

Mentor:



Prof. dr. sc. Domagoj Lanc

Predsjednik povjerenstva za  
završni ispit:



Izv. prof. dr. sc. Samir Žic

SVEUČILIŠTE U RIJECI

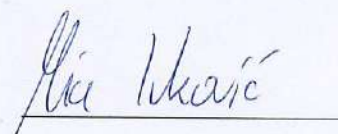
TEHNIČKI FAKULTET

Sveučilišni prijediplomski studij strojarstva

### IZJAVA

Izjavljujem da sam ja, Mia Ivković, samostalno izradila završni rad pod nazivom „Statička analiza konstrukcije željezničkog mosta prema EUROCODE normama“ pod vodstvom mentora prof. dr. sc. Domagoja Lanca, prema članku 8. Pravilniku o Završnom radu, završnom ispitu i završetku preddiplomskih sveučilišnih studija Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci.

Rijeka, srpanj 2023.



Mia Ivković

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva

## ZAHVALA

Ovim putem voljela bi se zahvaliti prof. dr. sc. Domagoju Lancu na strpljenu, usmjeravanju i pomoći prilikom pisanja završnog rada. Zahvaljujem se i obitelji, svim svojim prijateljima i dečku na podršci i motivaciji tijekom studija i pisanja rada. Također zahvaljujem se tvrtki ConSteel Solutions na licenci za program koji je omogućio izradu ovoga rada.

Rijeka, srpanj 2023.

Mia Ivković

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD.....</b>	<b>6</b>
<b>2. ŽELJEZNIČKI MOSTOVI.....</b>	<b>7</b>
<b>3. EUROCODE NORME .....</b>	<b>8</b>
<b>4. METODA KONAČNIH ELEMENATA .....</b>	<b>9</b>
<b>5. TEHNIČKE POJEDINOSTI ŽELJEZNIČKOG MOSTA .....</b>	<b>10</b>
5.1. Oblik željezničkog mosta .....	10
5.2. Materijal grednih elemenata .....	11
<b>6. IZRADA MOSTA U PROGRAMU CONSTEEL .....</b>	<b>12</b>
6.1. Consteel .....	12
6.2. Unos potpornih greda i materijala .....	12
6.3. Oslonci mosta .....	18
<b>7. OPTEREĆENJA.....</b>	<b>20</b>
7.1. Opterećenje uzrokovano vlastitom težinom .....	20
7.2. Opterećenje uzrokovano betonskom podlogom .....	21
7.3. Opterećenje uzrokovano težinom vlaka .....	23
<b>8. ANALIZA I REZULTATI.....</b>	<b>26</b>
8.1. Karakteristike korištenih profila .....	26
8.2. Provjera HEB 500 profila .....	26
8.3. Provjera IPE 500 profila .....	28
8.4. Provjera IPE 200 profila .....	29
8.5. Provjera IPE 160 profila .....	31
8.6. Provjera relativnih vrijednosti .....	32
<b>9. ZAKLJUČAK .....</b>	<b>34</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>35</b>
<b>POPIS SLIKA.....</b>	<b>36</b>
<b>POPIS TABLICA.....</b>	<b>37</b>
<b>SAŽETAK.....</b>	<b>38</b>
<b>SUMMARY.....</b>	<b>38</b>

## 1. UVOD

Ovaj završni rad baviti će se statičkom analizom konstrukcije željezničkoga mosta i provjerom dimenzija njegovih sastavnih elemenata. Rad je iz kolegija Računarska analiza konstrukcija i za njega će se koristiti znanja iz područja mehanike, statike, čvrstoće i materijala stečena na navedenom kolegiju.

Analiza konstrukcije je bitan dio projektiranja bilo koje građevine iz razloga što pomoću nje možemo dobiti točne mjere reakcija strukture u raznim uvjetima s kojima bi se mogla susresti. Statička analiza koja će se izvršiti osnovni je postupak za dizajniranje bilo koje strukture. Konstrukciju će se podvrgnuti različitim vanjskim utjecajima i opterećenjima te će se pratiti i bilježiti njeno ponašanje. Opterećenja koja će se primjenjivati biti će konstantna i neće se mijenjati kroz vrijeme. Metoda korištena za analizu i provjeru dimenzija različitih grednih elemenata jest metoda konačnih elemenata. Potrebno je napraviti model mosta u programu Consteel te provesti statičku analizu u skladu s EN 1993-1-1:2005 (*Eurocode 3: Design of steel structures*) normom. Krajnji cilj rada je ustanoviti ako most i svi njegovi dijelovi zadovoljavaju prethodno navedeni standard.



## 2. ŽELJEZNIČKI MOSTOVI

Most je konstrukcija koja je izgrađena sa svrhom lakšeg i jednostavnijeg prelaska preko fizičke barijere kao što je rijeka, more, cesta, ulica ili željeznica. Postoje različite vrste mostova, svaka vrsta i dizajn služi drugačijoj svrsi i primjenjuje se u različitoj situaciji. Za izradu mostova potrebno je poznavati određene čimbenike kao što su funkcija za koju je most namijenjen, teren na kojem će biti izgrađen, materijali izrade, vrsta tereta koja će preko njega prelaziti. Željeznički mostovi samo su jedan od tipova mostova. Najčešća izvedba je pomoću rešetkastih nosača, a najčešće korišteni materijal je čelik razreda S 275. Neke od prednosti rešetkastog željezničkog mosta su ekonomičnost pri izradi zbog efektivnog korištenja materijala, velika izdržljivost jer su izgrađeni s namjerom da trpe velike terete i ekstremne uvijete. Neki od nedostataka su veliki troškovi održavanja, težina samog mosta i veličina površine koju zauzimaju.



*Slika 2.1 Most Ikitsuki - Hirado*

Zbog specifičnosti strukture željezničkog mosta nije dovoljno poznavanje samo strukturalnog inženjerstva već je potrebno i znanje o sigurnosnim zahtjevima. Iz tog razloga prilikom konstruiranja treba se voditi računa da se sama konstrukcija pojednostavi, materijal uštedi. Treba se imati logičan pristup prilikom uzimanja dimenzija i uzimati u obzir vanjske faktore poput vjetrova, leda, potresa, visokih temperatura.

### 3. EUROCODE NORME

Eurokodovi su serija od 10 europskih tehničkih normi koje daju zajednički pristup strukturnom projektiranju zgrada i drugih građevinskih objekata. Eurokodovi pomažu europskim tvrtkama da budu konkurentnije i povećavaju sigurnost u građevinskoj industriji [1]. Služe kao zamjena za nacionalne standarde te pružaju zajednički jezik za sve sudionike projekta od vlasnika do građevinara. Standardizacijom normi proces projektiranja, konstrukcije i izgradnje postao je brži, lakši i sigurniji. Od kada su uvedeni postali su obavezni za korištenje za sve članice Europske Unije. Budući da su smatrani jednim od najnaprednijih svjetskih pravila u upotrebu su ih uvele države van granica Europske Unije. Norme pokrivaju sve aspekte strukture i gradnje, a definirane su kao:

EN 1990, Eurokod: Osnove projektiranja konstrukcija

EN 1991, Eurokod 1: Djelovanja na konstrukcije

EN 1992, Eurokod 2: Projektiranje betonskih konstrukcija

EN 1993, Eurokod 3: Projektiranje čeličnih konstrukcija

EN 1994, Eurokod 4: Projektiranje spregnutih čelično-betonskih konstrukcija

EN 1995, Eurokod 5: Projektiranje drvenih konstrukcija

EN 1996, Eurokod 6: Projektiranje zidanih konstrukcija

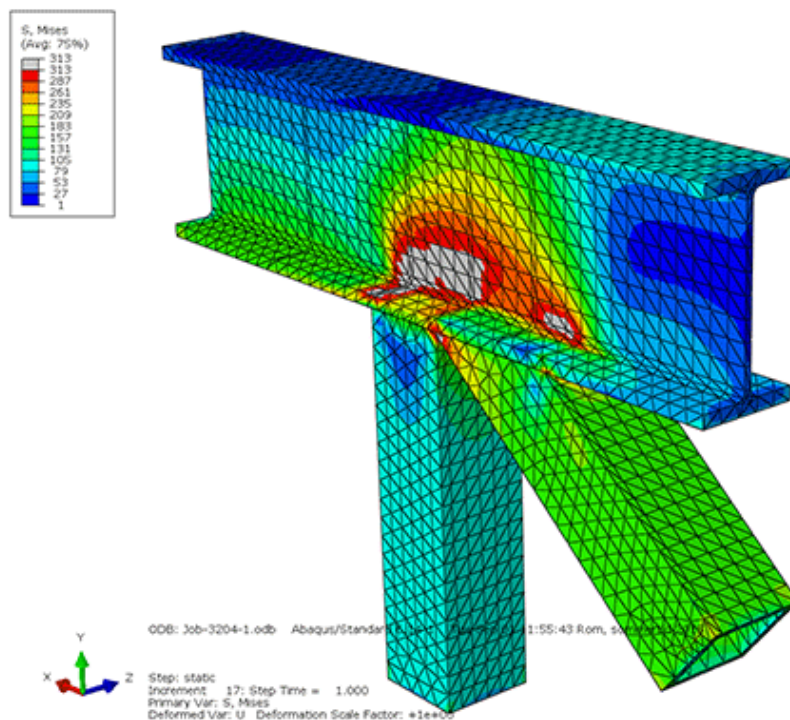
EN 1997, Eurokod 7: Geotehničko projektiranje

EN 1998, Eurokod 8: Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija

EN 1999, Eurokod 9: Projektiranje aluminijskih konstrukcija

## 4. METODA KONAČNIH ELEMENATA

Metoda konačnih elemenata (MKE) je numerička metoda koja se koristi za rješavanje diferencijalnih jednačbi prilikom matematičkog modeliranja te provođenje analize konačnih elemenata bilo kojeg fizičkog objekta. Primjenom MKE metode pokušava se što točnije predvidjeti ponašanje strukture. Budući da se diferencijalne jednačbe ne mogu riješiti analitički, koristimo se aproksimacijom. Rješenja koja dobijemo korištenjem numeričkih metoda će također biti aproksimacija stvarnog rješenja. Metoda konačnih elemenata funkcionira na principu da bilo koju kompleksnu površinu podijelimo na ograničen broj manjih dijelova čija ponašanja možemo opisati sa relativno laganim jednačbama. Metoda je nastala za potrebe inženjerske analize kompleksnih sistema u strojarstvu, građevini i avionskoj industriji. Bazirana je na Newtonovim zakonima pokreta, očuvanja mase i energije te zakonima termodinamike. Originalna metoda pokazala se ne adekvatnom na području modeliranja vezano za mehaniku fluida i širenje valova, stoga su napravljena poboljšanja. Danas imamo više od jedne MKE metode, a neke od njih su proširena metoda konačnih elemenata, generalizirana metoda konačnih elemenata i Galerkinova metoda.



Slika 4.1 Primjer MKE metode

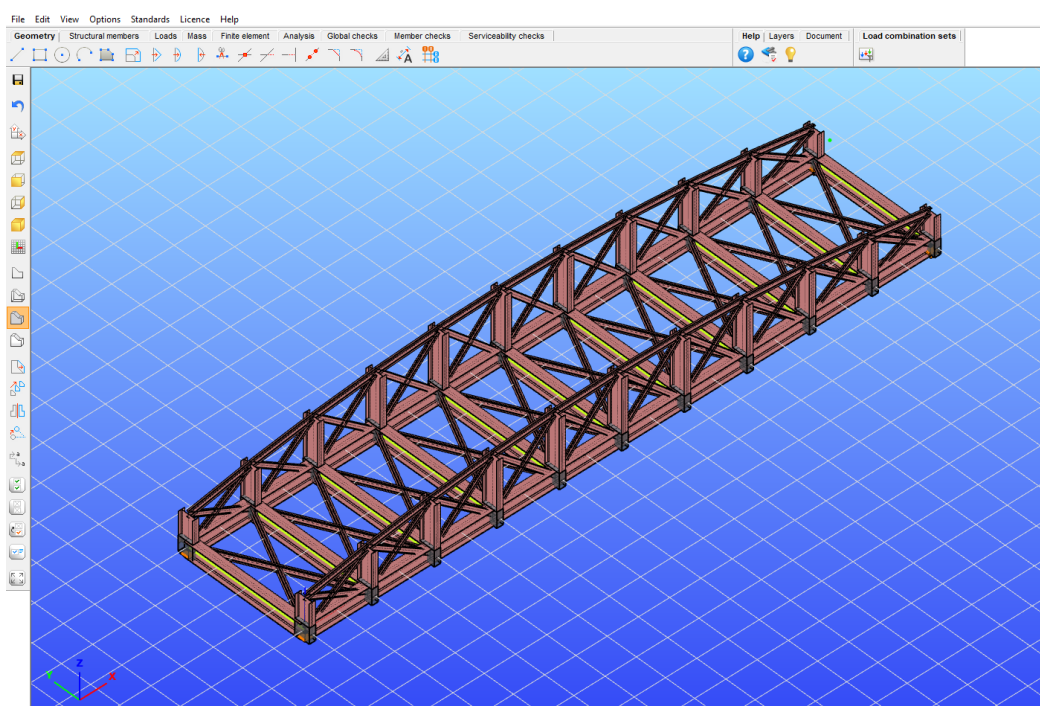
## 5. TEHNIČKE POJEDINOSTI ŽELJEZNIČKOG MOSTA

### 5.1. Oblik željezničkog mosta

Inspiracija za dizajn i dimenzije mosta bio je već postojeći mosta koji se nalazi u luci grada Rijeke. Most je dugačak ukupno 20 metara a širok 4 metra. Sastoji se od ukupno 133 gredna elementa od kojih 31 čine HEB 500 profili, 22 IPE 500 profili, 40 IPE 200 profili i 40 IPE 160 profili. Svi dijagonalni vertikalni nosači postavljeni su pod kutem od  $43^\circ$ , a svi dijagonalni horizontalni nosači su pod kutem od  $26^\circ$ .



Slika 5.1 Most inspiracije



Slika 5.2 Izometrijski prikaz mosta

## 5.2. Materijal grednih elemenata

Čelik je slitina željeza, a konstrukcijski je najvažniji materijal u svim područjima tehnike pa tako i u izgradnji mostova. Razlog tome je taj što čelik ima mnoštvo dobrih svojstava poput velike tvrdoće, čvrstoće, duktilnosti, otpornosti prema koroziji i toplini. Pritom je pristupačan i jeftin materijal. Stoga je za materijal grednih elemenata željezničkog mosta uzet čelik razreda S 275.

Čelik S 275 je konstrukcijski čelik. Oblikujemo ih u grede različitih profila kao što su I i H profili. Zbog ranije navedenih dobrih svojstava, konstrukcijski čelici se koriste za izgradnju golemih konstrukcija velikih masa. Zbog toga što čelik S 275 ima nisku razinu ugljika vrlo ga je lako strojno obraditi, zavariti i oblikovati, stoga je koristan u različitim područjima tehnike s različitim zahtjevima.

Tablica 5.1 Karakteristike čelika

Oznaka	Gustoća $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Vlačna čvrstoća $R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Granica razvlačenja $R_p$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Modul elastičnosti $E$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Poissonov Broj $\nu$
EN 10025-2					
S 275	7850	410	275	210000	0,3

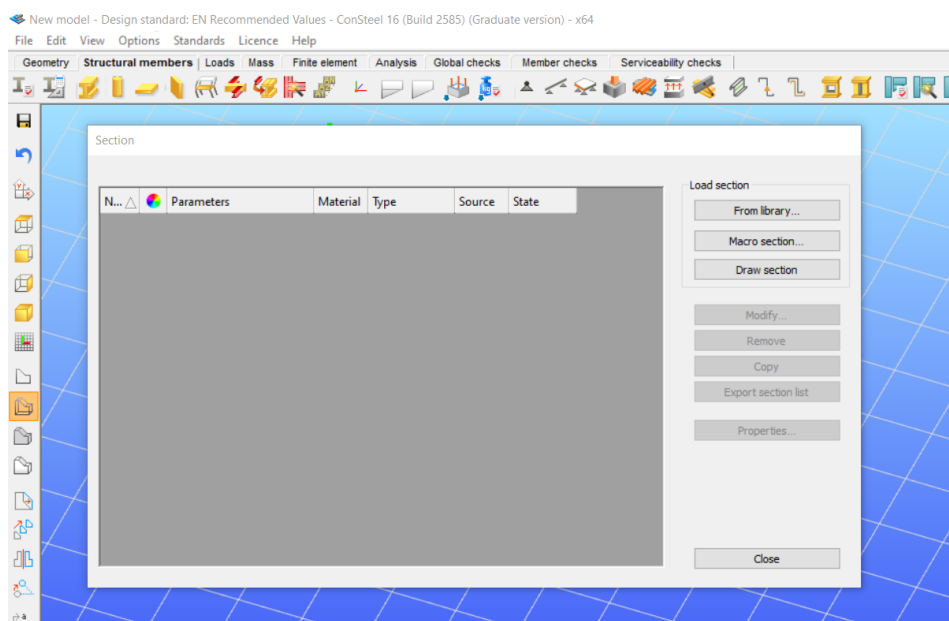
## 6. IZRADA MOSTA U PROGRAMU CONSTEEL

### 6.1. Consteel

Consteel je software za konstrukcijsku analizu i dizajn za čelične, kompozitne i RC strukture. Pomoću njega stvara se detaljni 3D model konstrukcije na kojoj se mogu vršiti analize različitih opterećenja i vanjskih utjecaja. Program radi po Eurocode normama, a analize se vrše po metodi konačnih elemenata.

### 6.2. Unos potpornih greda i materijala

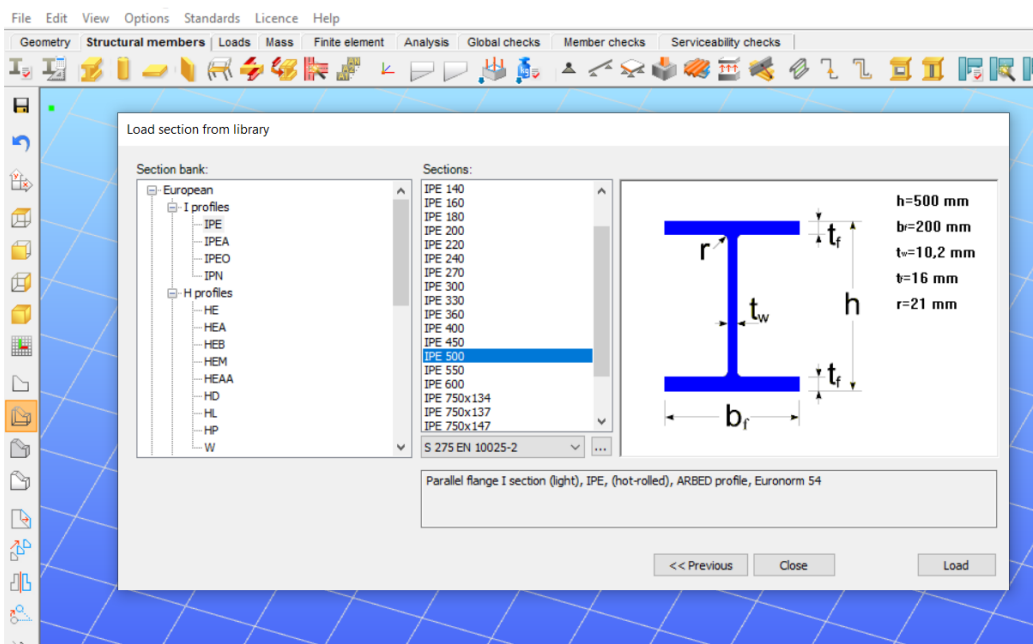
Prvi korak nakon otvaranja programa jest odabir svih profila i odgovarajućeg materijala za sve grede koje se planiraju koristiti. Za sve grede uzeti materijal će biti isti, čelik S 275. Kako bi unijeli odgovarajući materijal i grede na gornjoj programskoj traci pod „Structural members“ nalazimo naredbu „Section administration“. Nakon pokretanja naredbe, otvoriti će nam se novi prozor gdje otvaramo novu naredbu „from library“.



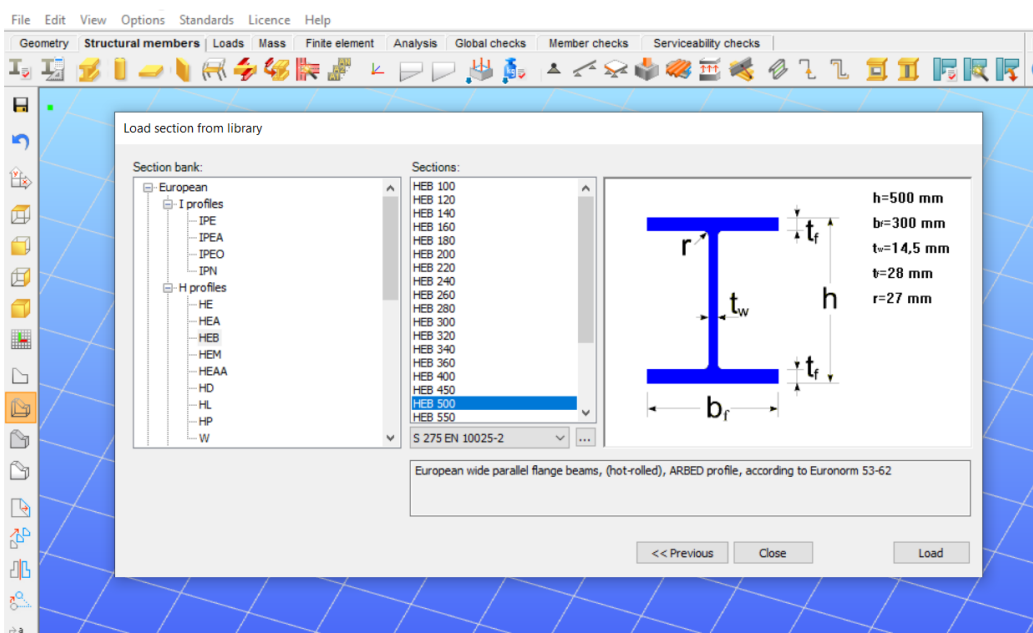
Slika 6.1 "Section administrator"

Ulaskom u knjižnicu odabiru se profili po europskom standardu te željeni materijal. Kako su u program već postavljeni standardni profili nije potrebno unositi vlastite mjere i specifikacije.

Početni tipovi profila za ležeće grede biti će HEB 500 profili, a za uspravne stupove IPE 500 profili. Nakon odabira pritišćemo naredbu „Load“ kako bi učitali elemente u knjižnicu.

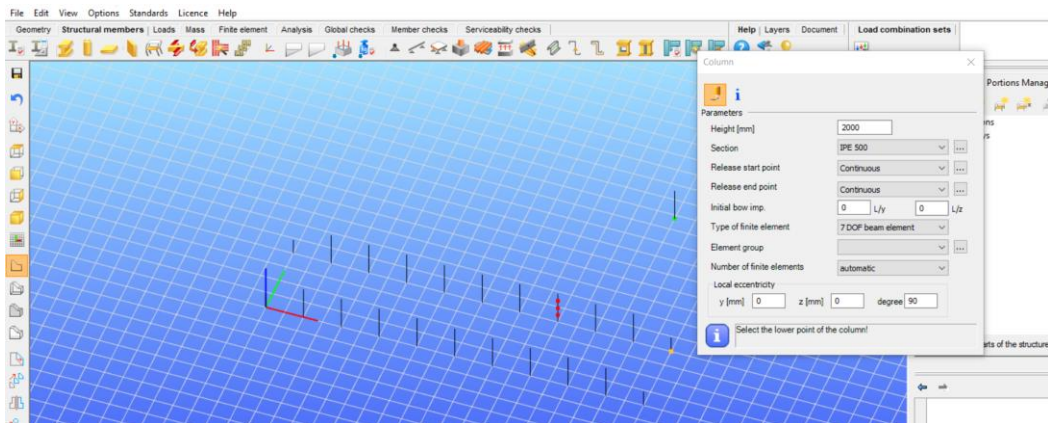


Slika 6.2 IPE 500 profil



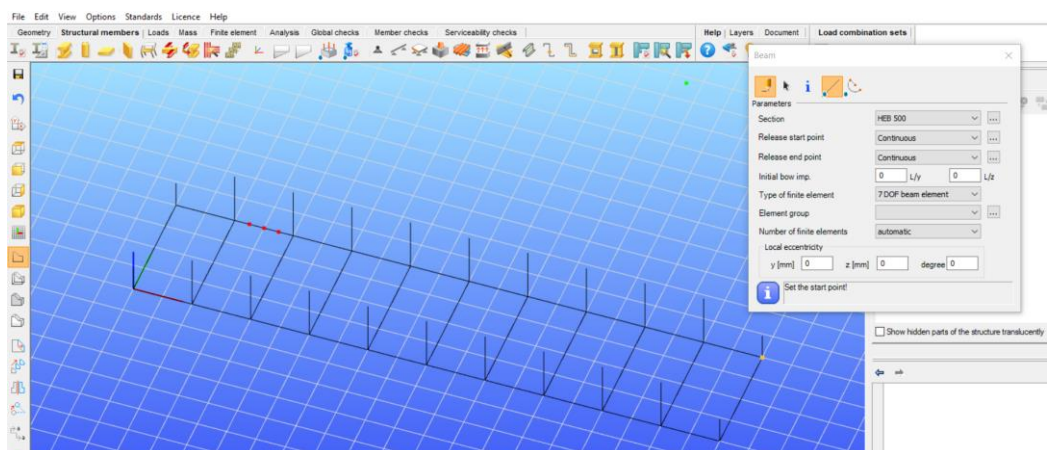
Slika 6.3 HEB 500 profil

Nakon unosa željenih greda počet ćemo ih postavljati. Prvo postavljamo stupove koje čine IPE 500 grede naredbom „Column“. Postavljamo 11 stupova na razmaku od 2000 mm. Prvi i zadnji stup biti će visine od 1000 mm, a najviši stup biti će visok 2000 mm. Ostali stupovi varirat će u visinama tako da će se prilagoditi luku koji će most imati.



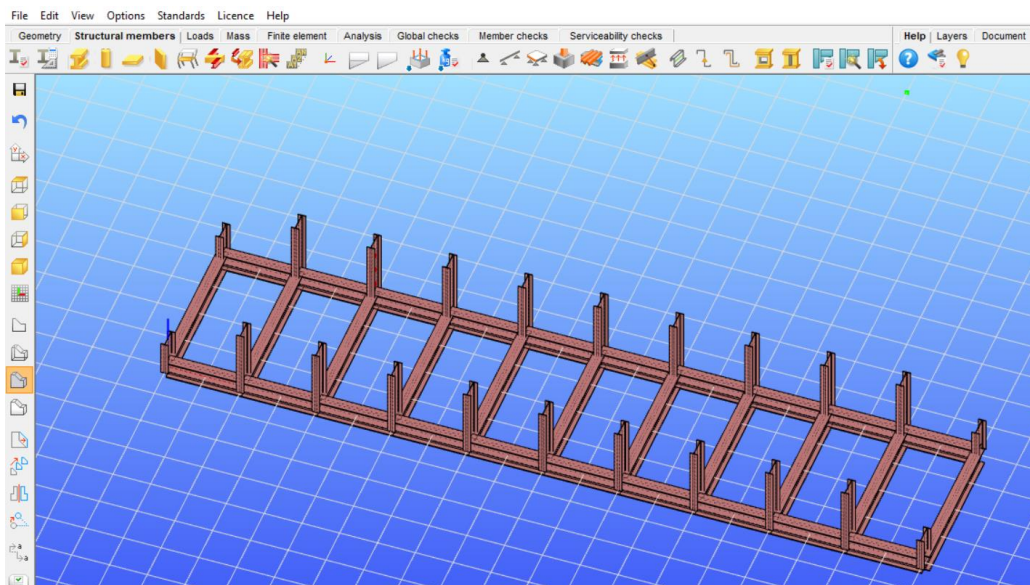
Slika 6.4 Postavljanje stupova

Sljedeće koristimo naredbu „Beam“ i postavljamo grede profila HEB 500 između stupova. Prikaz greda je u linijama radi lakšeg postavljanja.



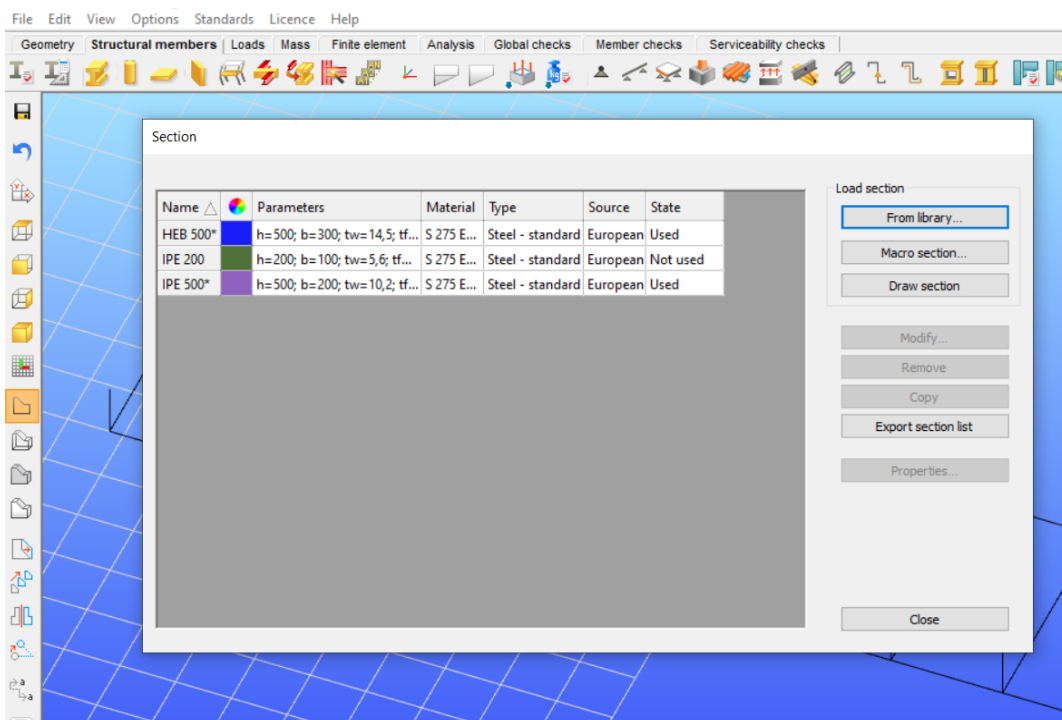
Slika 6.5 Postavljanje greda





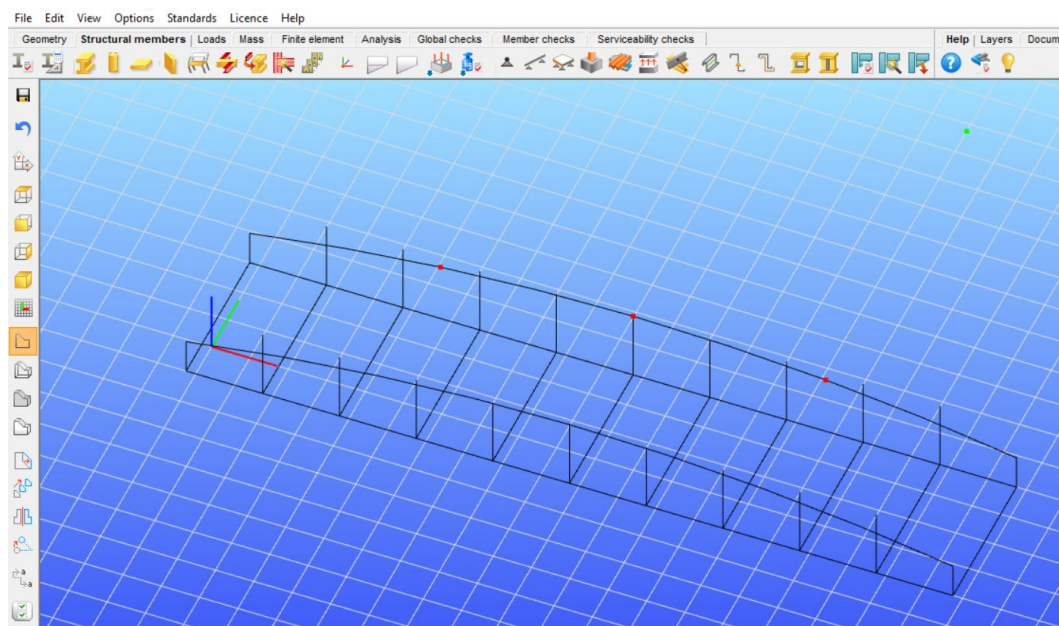
Slika 6.6 3D prikaz osnovnih elemenata

Sljedeći korak je ponovni ulazak u knjižnicu i učitavanje profila IPE 200. Ti profili će biti postavljeni kao ograda na stupovima i kao dijagonalni pojačivači između HEB 500 greda.



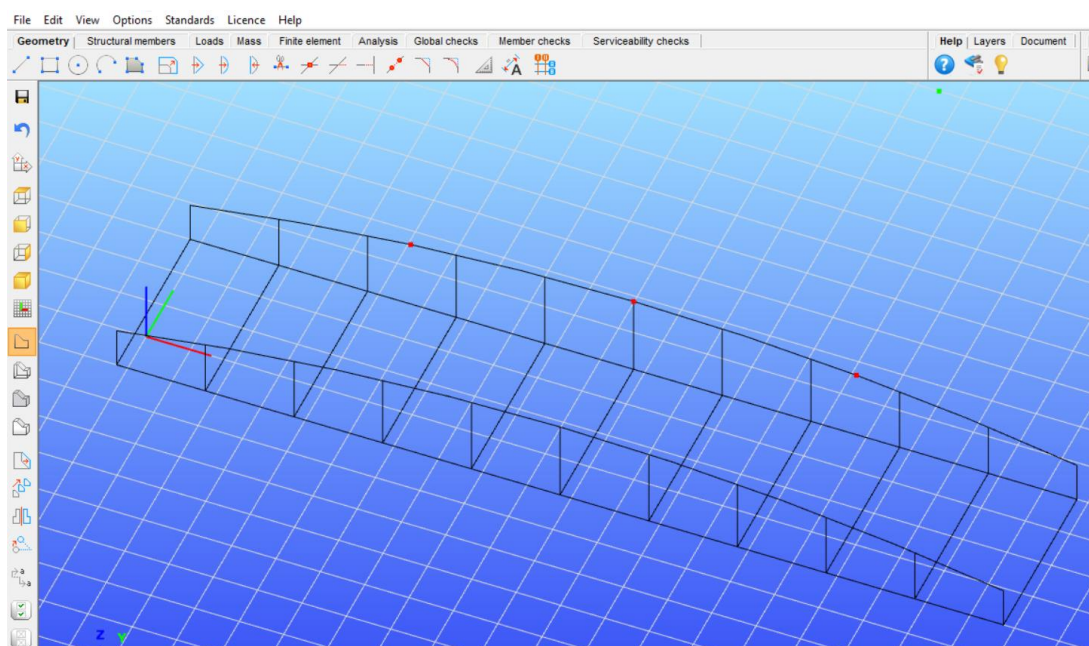
Slika 6.7 "Knjižnica"

Da bi se postigao izgled luka ograde prvo postavljamo jednu zakrivljenu gredu naredbom „Beam“, kojoj označujemo početnu, krajnju i srednju (najvišu) točku.



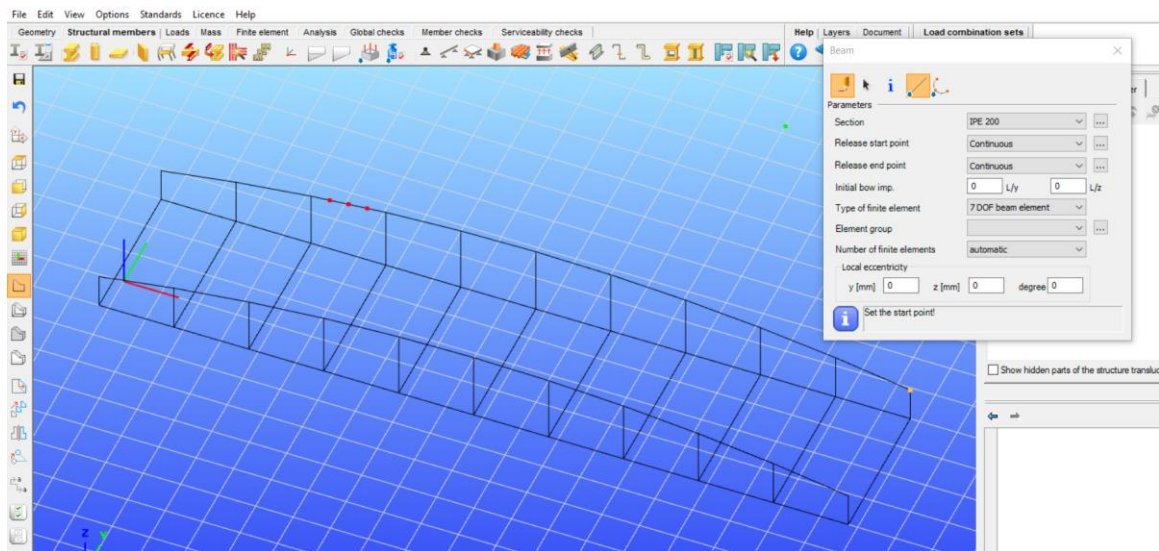
*Slika 6.8 Postavljanje ograde*

Zatim naredbom „Trim“ kratimo grede čija visina prelazi visinu luka.



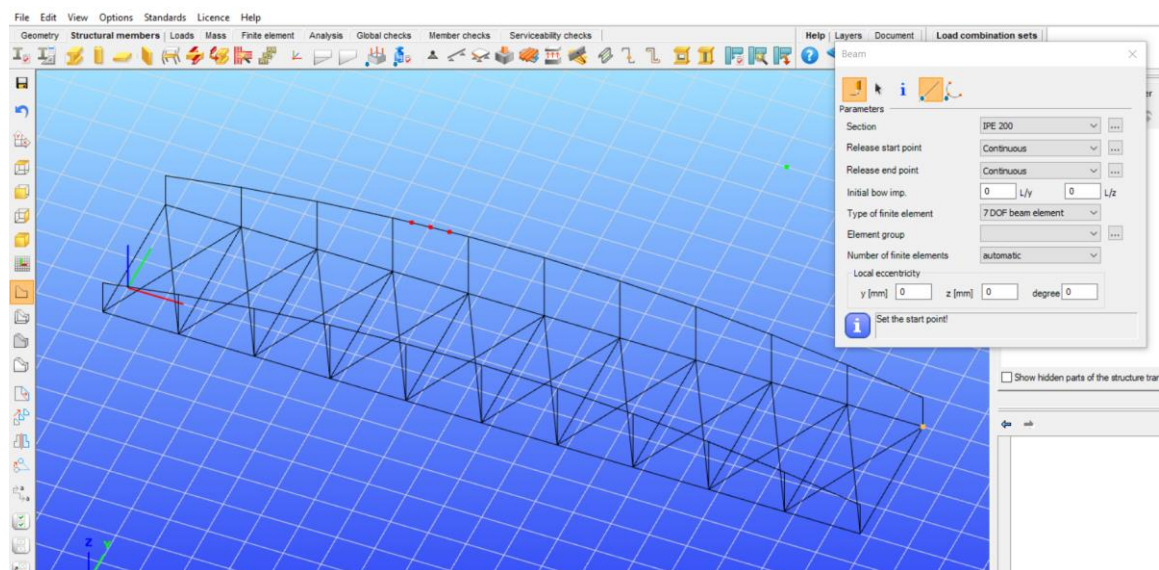
*Slika 6.9 Skraćivanje stupova*

Slijedi brisanje lukova i postavljanje ravnih greda između skraćenih stupova. Razlog tome je lakše i bolje postavljanje konstrukcije prilikom izgradnje.



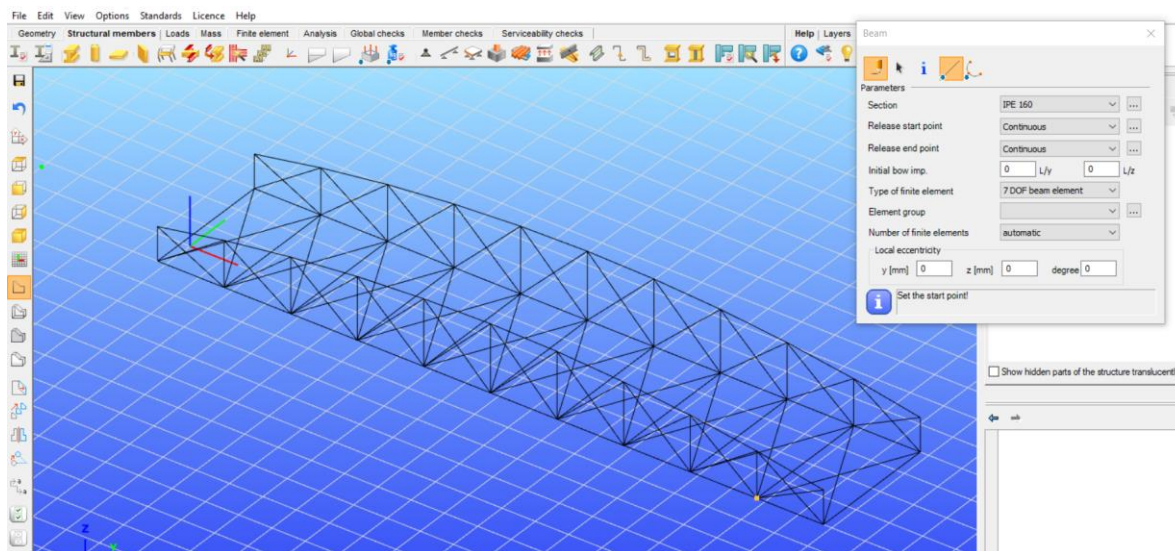
Slika 6.10 Postavljanje ravnih greda ograde

Kako bi se dodatno učvrstila konstrukcija, dodaju joj se IPE 200 grede koje se postavljaju dijagonalno između HEB 500 greda.

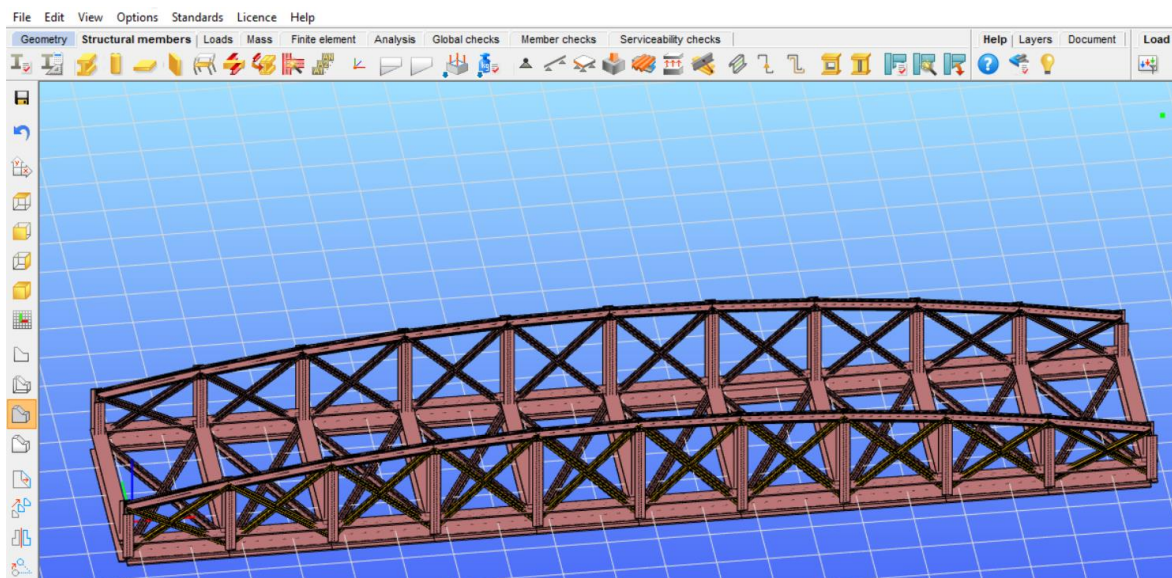


Slika 6.11 Postavljanje ležećih greda za učvršćivanje

Za učvršćivanje ograda, a i time cijela konstrukcija mosta. Učitavaju se i postavljaju IPE 160 grede između IPE 500 stupova.



Slika 6.12 Postavljanje uspravnih greda za učvršćivanje

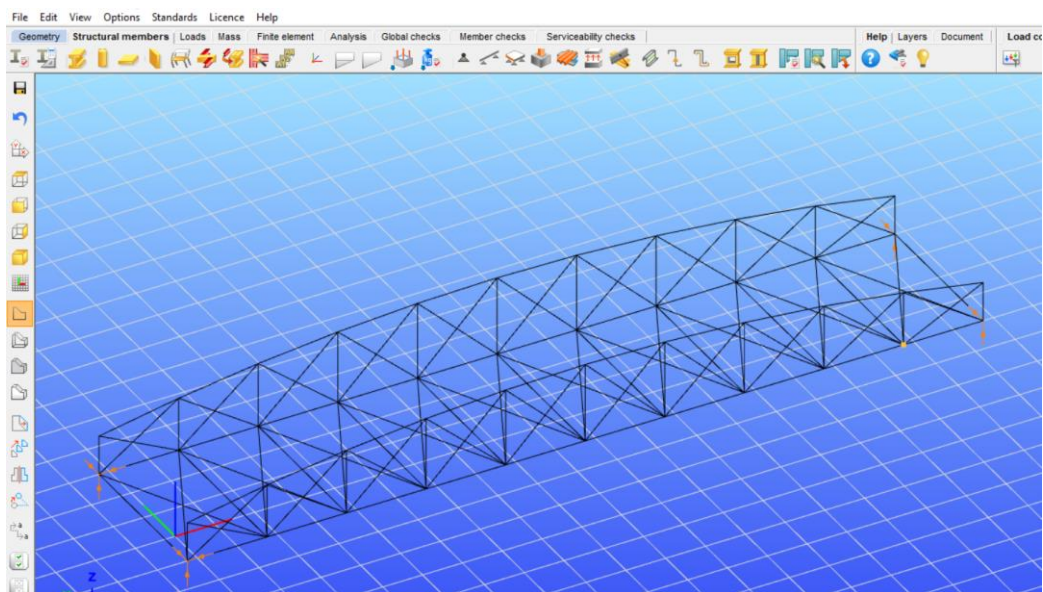


Slika 6.13 Gotovi izgled mosta

### 6.3. Oslonci mosta

Oslonci su mjesta na kojima nosači ili drugi konstrukcijski elementi diraju tlo. Oni su svojevrsna veza nosača sa okolinom i preko njih se prenose sile s konstrukcije na podlogu. Također sprječavaju ili ograničavaju gibanje tijela po jednoj ili više osi. Postoje tri vrste oslonca: Pomični i nepomični oslonac te uklještenje. Kako bi sustav bio u statičkoj ravnoteži, postavljaju su dva oslonca. Na lijevu kraj konstrukcije (slika ispod) postavlja se nepomični oslonac koji sprječava gibanje po tri osi ( $x$ ,  $y$  i  $z$ ) te rotacije oko te tri osi. Na desnom kraju konstrukcije (opet slika ispod)

biti će postavljen pomični oslonac koji onemogućava gibanje po dvije osi (y i z) te sve rotacije oko istih. Oslonci su prikazani narančastim strelicama.



*Slika 6.14 Postavljanje oslonaca mosta*

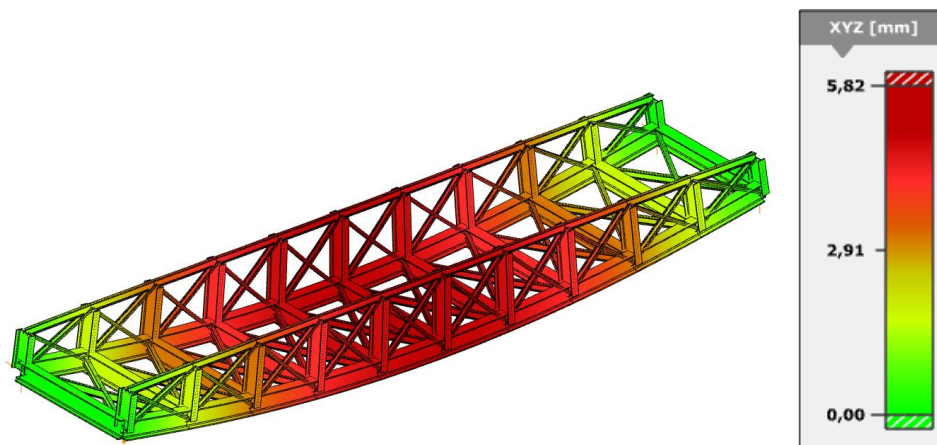
## 7. OPTEREĆENJA

Na konstrukciju kao što je most mogu djelovati različita opterećenja koja će varirati ovisno o izgledu same konstrukcije, okolini u kojoj se nalazi te raznim vremenskim uvjetima. Tijekom analize, model će se ispitivati po maksimalnim opterećenjima kako bi se ustanovilo može li ih podnesti. U slučaju da ne može potrebno je mijenjati profil greda.

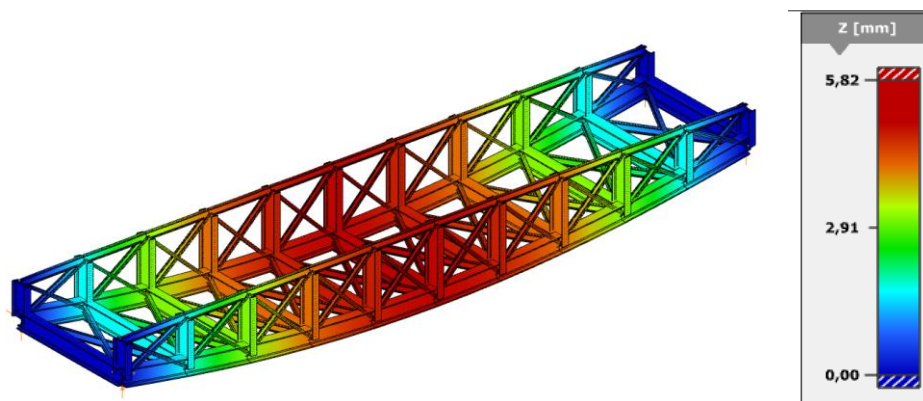
Software Consteel ima mogućnost prikazivanja analize konstrukcije kroz dijagrame. Različite boje prikazuju progibe na pojedinim područjima.

### 7.1. Opterećenje uzrokovano vlastitom težinom

Ukupna težina konstrukcije iznosi 23,48 tona. Najveći dio težine pripada profilima HEB 500 i iznosi 15,736 tona. Ukupna površina koju zauzima most je 407,35 m<sup>2</sup>. Ovom analizom ćemo provjeriti koliko iznosi i na kojem mjestu se stvara maksimalno opterećenje uzrokovano samom težinom mosta bez utjecaja drugih faktora.



Slika 7.1 Dijagram opterećenja vlastite težine po svim osima

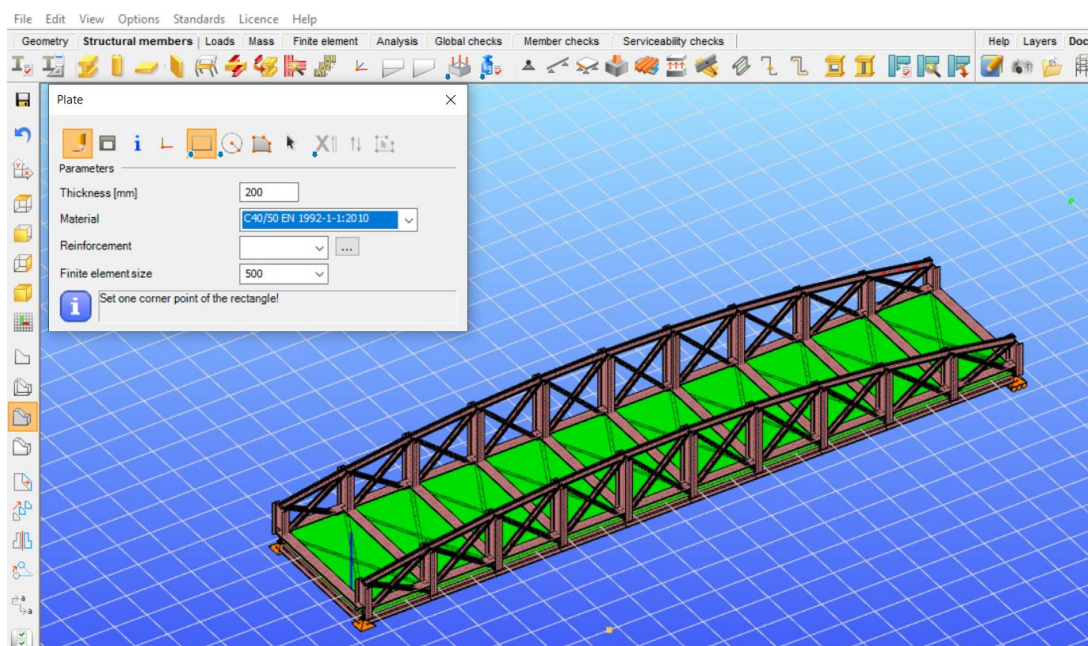


Slika 7.2 Dijagram opterećenja vlastite težine po z osi

Iz dijagrama se može zaključiti da je najveće opterećenje u smjeru osi z na sredini mosta i iznosi 5,82 mm. Najmanje opterećenje će se stvoriti na krajevima konstrukcije iz razloga što su ti dijelovi naslonjeni na podlogu.

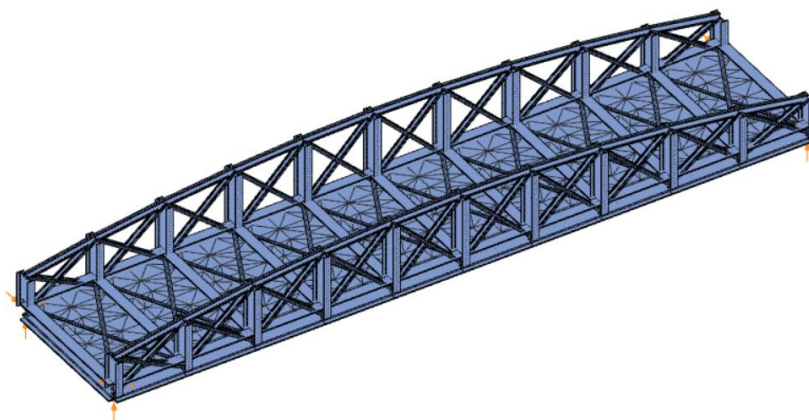
## 7.2. Opterećenje uzrokovano betonskom podlogom

Prije početka provjere opterećenja naredbom „Plate“ postavljamo ploču po dužini i širini cijelog mosta i za materijal uzimamo beton razreda C40/50. Postavljanjem betona smo dobili realističniji izgled konstrukcije.

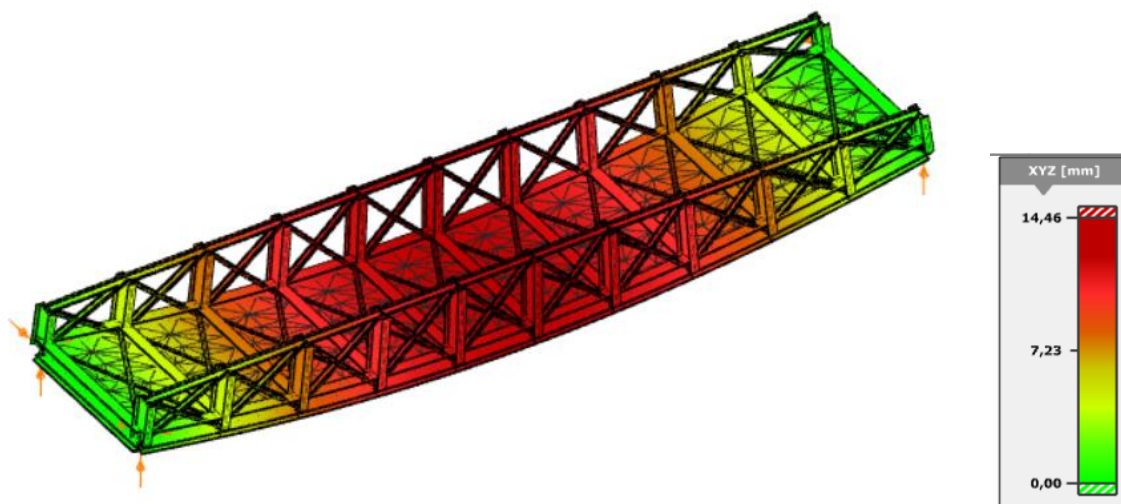


Slika 7.3 Postavljanje betona

Nakon postavljanja podloge, ukupna masa biti će 63,48 tona, a ukupna površina je 487,35 m<sup>2</sup>.

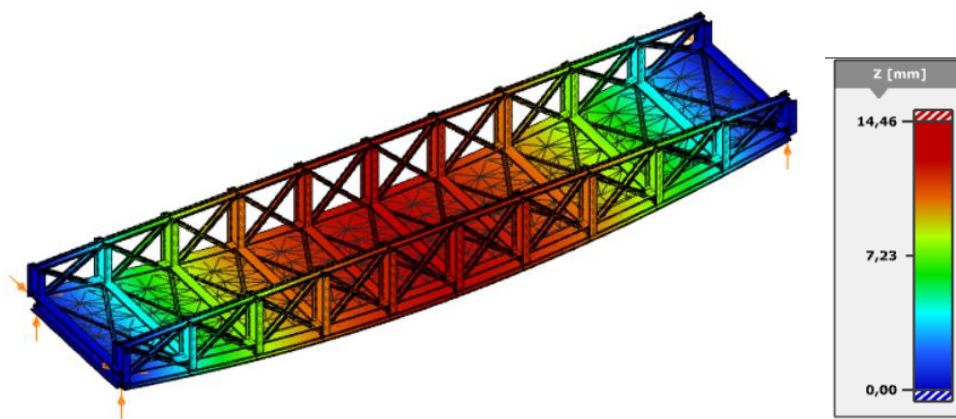


Slika 7.4 MKE mreža



Slika 7.5 Opterećenje uzorkovano težinom betona po svim osima



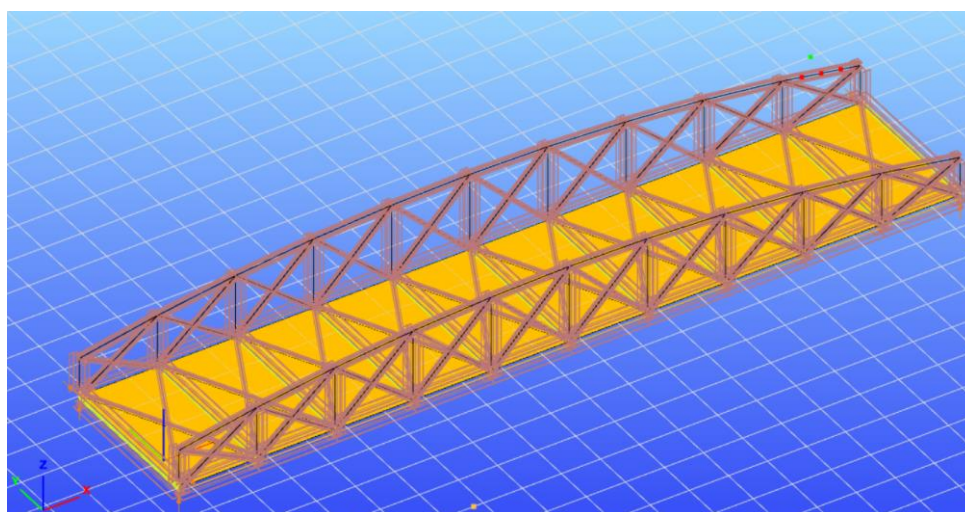


Slika 7.6 Opterećenje uzrokovano težinom betona po z osi

Budući da je most samo krajevima oslonjen na tlo za očekivati je da će se najveći progib nalaziti na samoj sredini mosta. Ukupni progib u svim smjerovima je jednak progibu po z osi (koji je ujedno i najveći) i iznosi 14,46 mm.

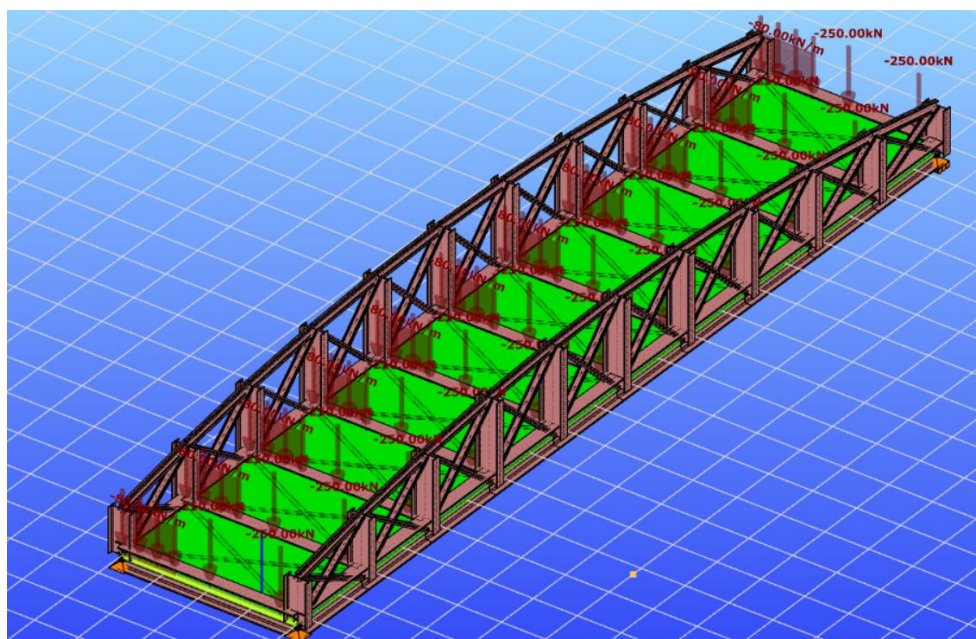
### 7.3. Opterećenje uzrokovano težinom vlaka

Unutar programa moguće je provjeriti kako težina vlaka utječe na konstrukciju. Kako bi to provjerili prvo se moraju postaviti „Influence lines“. Postavljamo ih na grede preko kojih vlak direktno vrši silu (slika ispod koja će biti).



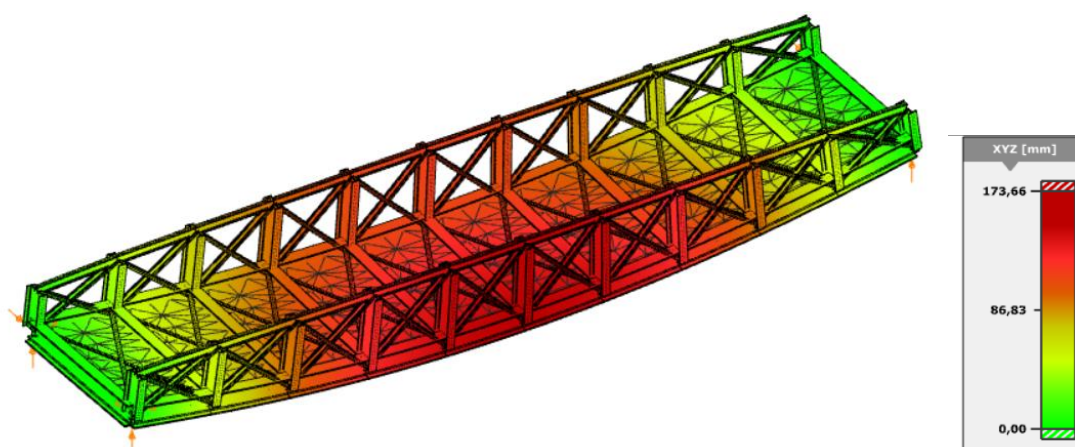
Slika 7.7 Postavljanje "Influence lines"

Nakon toga naredbom „Train load“ označavamo zadane linije i smjerove djelovanja tereta. U programu su već zadane standardne vrijednosti i iste su korištene za potrebe analize.

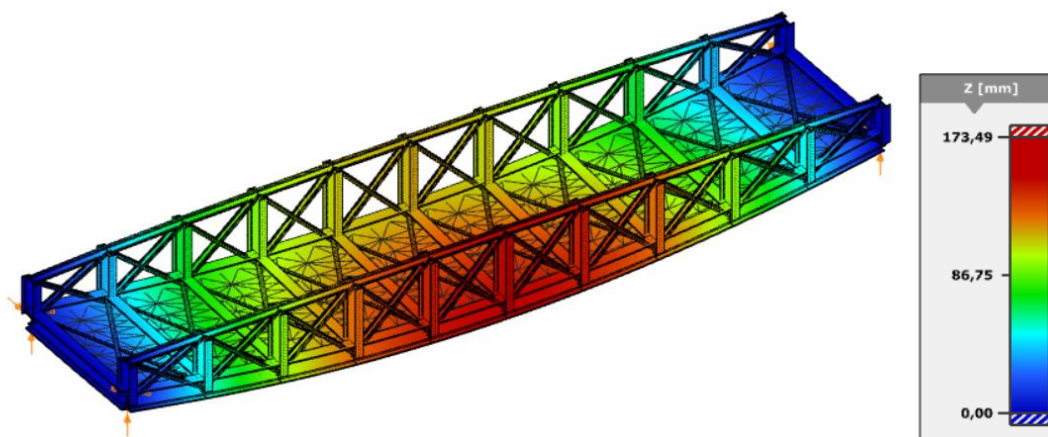


Slika 7.8 Postavljanje opterećenja uzrokovanog težinom vlaka

Poslije postavljanja tereta provodi se ponovna analiza koja će biti prikazana dijagramima.



Slika 7.9 Dijagram opterećenja uzrokovanog težinom vlaka po svim osima



*Slika 7.10 Dijagram opterećenja uzrokovanog težinom vlaka po z osi*

Deformacija koja se dogodi prilikom prelaska vlaka po mostu je znatno veća od deformacije koja nastaje od vlastite težine i iznosi 173,66 mm po svim osima odnosno 173,49 mm po z osi.

## 8. ANALIZA I REZULTATI

Kako bi ustanovili zadovoljavaju li profili Eurocode norme, provesti će se analiza prvoga reda. Pretpostavit će se da je krutost konstrukcije konstantna te da na nju ne utječu promjene geometrije konstrukcije prilikom opterećenja. Provjeravaju se maksimalne aksijalne sile, smične sile i momenti savijanja za svaku vrstu profila. Sve dopuštene vrijednosti uzete su u skladu s EC 3 normom. Kako bi uvjet bio zadovoljen maksimalna dobivena vrijednost koju smo očitali u programu Consteel mora biti manja od maksimalne dopuštene vrijednosti.

### 8.1. Karakteristike korištenih profila

Tablica 8.1 Karakteristike profila

Profil	$A$ $\cdot 10^{-6} \text{ m}^2$	$I_{zz} = I_y$ $\cdot 10^{-6} \text{ m}^4$	$I_{yy} = I_z$ $\cdot 10^{-6} \text{ m}^4$	$J = I_t$ $\cdot 10^{-9} \text{ m}^4$	$C_w = I_w$ $\cdot 10^{-12} \text{ m}^6$
HEB 500	23864	1072	126,2	5499	6920700
IPE 500	11552	482	21,42	886,2	1235400
IPE 200	2848	19,43	1,424	68,46	12746
IPE 160	2009	8,693	0,6831	35,3	3889

### 8.2. Provjera HEB 500 profila

- Provjera aksijalnih sila

Maksimalna dopuštena sila za HEB 500 profil biti će:

$$N_{Rd} = 6562,54 \text{ kN}$$

Maksimalna aksijalna sila koja se pojavljuje na HEB 500 profilima jest:

$$N_{max} = N_{Sd} = 135,06 \text{ kN}$$

Uspoređujemo vrijednosti:

$$N_{Sd} < N_{Rd}$$

$$135,06 \text{ kN} < 6562,54 \text{ kN}$$

Uvjet je zadovoljen.

- Provjera smičnih sila

Provjeravat će se samo smična sila po z osi iz razloga što nema opterećenja po y osi. Odnosno  $V_{y,Sd} = 0$ . Uvjet je automatski zadovoljen.

Maksimalna dopuštena vrijednost smične sile po z osi:

$$V_{z,Rd} = 1426,05 \text{ kN}$$

Maksimalna smična sila koja se pojavljuje po z osi:

$$V_{z,max} = V_{z,Sd} = 14,39 \text{ kN}$$

Uspoređujemo vrijednosti:

$$V_{z,Sd} < V_{z,Rd}$$

$$14,39 \text{ kN} < 2667,36 \text{ kN}$$

Uvjet je zadovoljen.

- Provjera momenta savijanja

Maksimalni dopušteni moment po osi y za profil HEB 500:

$$M_{y,Rd} = 976,40 \text{ kN}$$

Maksimalni očitani moment po osi y za profil HEB 500:

$$M_{y,max} = M_{y,Sd} = 27,68 \text{ kN}$$

Uspoređujemo vrijednosti:

$$M_{y,Sd} < M_{y,Rd}$$

$$27,68 \text{ kN} < 976,40 \text{ kN}$$

Uvjet je zadovoljen.

Provjeravat će se samo moment po y osi iz razloga što nema opterećenja po z osi. Odnosno  $M_{z,Sd} = 0$ . Uvjet je automatski zadovoljen.

### 8.3. Provjera IPE 500 profila

- Provjera aksijalnih sila

Maksimalna dopuštena aksijalna sila za IPE 500 profil:

$$N_{Rd} = 3176,84 \text{ kN}$$

Maksimalna aksijalna sila koju očitavamo na IPE 500 profilima:

$$N_{\max} = N_{Sd} = 19,361 \text{ kN}$$

Uspoređujemo vrijednosti:

$$N_{Sd} < N_{Rd}$$

$$19,361 \text{ kN} < 3176,84 \text{ kN}$$

Uvjet je zadovoljen.

- Provjera smičnih sila

Maksimalna dopuštena smična sila u smjeru osi y za IPE 500 profil:

$$V_{y,Rd} = 1016,14 \text{ kN}$$

Maksimalna očitana smična sila koja se pojavljuje po y osi na IPE 500 profilu:

$$V_{y,\max} = V_{y,Sd} = 4,70 \text{ kN}$$

Uspoređujemo vrijednosti:

$$V_{y,Sd} < V_{y,Rd}$$

$$4,70 \text{ kN} < 1016,14 \text{ kN}$$

Uvjet je zadovoljen.

Provjeravat će se samo smična sila po y osi iz razloga što nema opterećenja po z osi. Odnosno  $V_{z,Sd} = 0$ . Uvjet je automatski zadovoljen.

- Provjera momenta savijanja

Maksimalni dopušteni moment po osi y:

$$M_{y,Rd} = 530,18 \text{ kN}$$

Maksimalni moment po osi y na profile IPE 500:

$$M_{y,\max} = M_{y,Sd} = 2,97 \text{ kN}$$

Uspoređujemo vrijednosti:

$$M_{y,Sd} < M_{y,Rd}$$

$$2,97 \text{ kN} < 530,18 \text{ kN}$$

Uvjet je zadovoljen.

Maksimalni dopušteni moment po osi z:

$$M_{z,Rd} = 58,90 \text{ kN}$$

Maksimalni očitani moment za os z na IPE 200 profil:

$$M_{z,\max} = M_{z,Sd} = 3,09 \text{ kN}$$

Uspoređujemo vrijednosti:

$$M_{z,Sd} < M_{z,Rd}$$

$$3,09 \text{ kN} < 58,90 \text{ kN}$$

Uvjet je zadovoljen.

#### **8.4. Provjera IPE 200 profila**

- Provjera aksijalnih sila

Maksimalna dopuštena sila za IPE 200 profil:

$$N_{Rd} = 783,31 \text{ kN}$$

Maksimalna aksijalna sila koju očitavamo na profilima:

$$N_{\max} = N_{Sd} = 114,69 \text{ kN}$$

Uspoređujemo vrijednosti:

$$N_{Sd} < N_{Rd}$$

$$114,69 \text{ kN} < 783,31 \text{ kN}$$

Uvjet je zadovoljen.

- Provjera smičnih sila

Provjeravat će se samo smična sila po z osi iz razloga što nema opterećenja po y osi. Odnosno  $V_{y,Sd} = 0$ . Uvjet je automatski zadovoljen.

Maksimalna dopuštena vrijednost smične sile u smjeru osi z:

$$V_{z,Rd} = 222,28 \text{ kN}$$

Maksimalna smična sila koja se pojavljuje po z osi na IPE 500 profilima:

$$V_{z,max} = V_{z,Sd} = 0 \text{ kN}$$

Uspoređujemo vrijednosti:

$$V_{z,Sd} < V_{z,Rd}$$

$$0 \text{ kN} < 222,28 \text{ kN}$$

Uvjet je zadovoljen.

- Provjera momenta savijanja

Maksimalni dopušteni moment po osi y za IPE 200 profil:

$$M_{y,Rd} = 53,44 \text{ kN}$$

Maksimalni očitani moment po y osi na profile IPE 200:

$$M_{y,max} = M_{y,Sd} = 2,97 \text{ kN}$$

Uspoređujemo vrijednosti:

$$M_{y,Sd} < M_{y,Rd}$$

$$2,97 \text{ kN} < 53,44 \text{ kN}$$

Uvjet je zadovoljen.

Provjeravat će se samo moment po y osi iz razloga što nema opterećenja po z osi. Odnosno  $M_{z,Sd} = 0$ . Uvjet je automatski zadovoljen.



## 8.5. Provjera IPE 160 profila

- Provjera aksijalnih sila

Maksimalna dopuštena aksijalna sila:

$$N_{Rd} = 552,69 \text{ kN}$$

Maksimalna aksijalna sila koju očitavamo:

$$N_{\max} = N_{Sd} = 34,845 \text{ kN}$$

Uspoređujemo vrijednosti:

$$N_{Sd} < N_{Rd}$$

$$34,845 \text{ kN} < 552,69 \text{ kN}$$

Uvjet je zadovoljen.

- Provjera smičnih sila

Provjeravat će se samo smična sila po z osi iz razloga što nema opterećenja po y osi. Odnosno  $V_{y,Sd} = 0$ . Uvjet je automatski zadovoljen.

Maksimalna dopuštena smična sila po osi z:

$$V_{z,Rd} = 153,33 \text{ kN}$$

Maksimalna smična sila koja se pojavljuje po z osi na IPE 500 profilima:

$$V_{z,\max} = V_{z,Sd} = 0 \text{ kN}$$

Uspoređujemo vrijednosti:

$$V_{z,Sd} < V_{z,Rd}$$

$$0 \text{ kN} < 153,33 \text{ kN}$$

Uvjet je zadovoljen.

- Provjera momenta savijanja

Maksimalni dopušteni moment po osi y za profil IPE 160:

$$M_{y,Rd} = 29,88 \text{ kN}$$

Maksimalni očitani moment po osi y na profile IPE 160:

$$M_{y,\max} = M_{y,Sd} = 2,97 \text{ kN}$$

Uspoređujemo vrijednosti:

$$M_{y,Sd} < M_{y,Rd}$$

$$2,97 \text{ kN} < 29,88 \text{ kN}$$

Uvjet je zadovoljen.

Provjeravat će se samo moment na y osi iz razloga što nema opterećenja po z osi. Odnosno  $M_{z,Sd} = 0$ . Uvjet je automatski zadovoljen.

### 8.6. Provjera relativnih vrijednosti

Nakon provjere dimenzija profila slijedi još jedna završna provjera. Potrebno je provjeriti zadovoljavaju li vrijednosti sila i momenata sljedeću jednadžbu:

$$\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} + \frac{M_{z,Sd}}{M_{z,Rd}} \leq 1$$

- HEB 500

Provjerava se uvjet:

$$\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} + \frac{M_{z,Sd}}{M_{z,Rd}} \leq 1$$

$$\frac{135,06}{6562,54} + \frac{27,68}{976,40} + 0 \leq 1$$

$$0,05 \leq 1$$

Uvjet je zadovoljen.

- IPE 500

Provjerava se uvjet:

$$\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} + \frac{M_{z,Sd}}{M_{z,Rd}} \leq 1$$

$$\frac{19,361}{3176,84} + \frac{2,97}{530,18} + \frac{3,09}{58,90} \leq 1$$

$$0,06 \leq 1$$

Uvjet je zadovoljen.

- IPE 200

Provjerava se uvjet:

$$\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} + \frac{M_{z,Sd}}{M_{z,Rd}} \leq 1$$

$$\frac{114,69}{783,31} + \frac{2,97}{53,44} + 0 \leq 1$$

$$0,20 \leq 1$$

Uvjet je zadovoljen.

- IPE 160

Provjerava se uvjet:

$$\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} + \frac{M_{z,Sd}}{M_{z,Rd}} \leq 1$$

$$\frac{34,845}{552,51} + \frac{2,97}{29,88} + 0 \leq 1$$

$$0,16 \leq 1$$

Uvjet je zadovoljen.

## 9. ZAKLJUČAK

Zadatak ovoga završnog rada bio je izvršiti statičku analizu čelične konstrukcije željezničkoga mosta te provjeriti sve gredne elemente istoga u skladu s *Eurocode 3* normom. Most je oblikovan tako da njegova konstrukcija izdrži teret vlastite težine i prelaska vlaka. Konstrukcija je izrađena od greda različitih dimenzija. Nosive grede moraju biti veće i čvršće tako da su njihovi profili HEB 500 i IPE 500, a za grede koje su činile ogradu i služile kao učvršćivači uzeti profili su IPE 200 i IPE 160. Kako bi model bio potpun dodani su oslonci na krajeve mosta, jedan nepomični i jedan pomični. Širina mosta je 4 m, duljina 20 m i visina je 2 m. Ukupna površina koju most pokriva je 407,35 m<sup>2</sup>, a ukupna težina iznosi 23,48 tona. Cijeli model kao i analiza provedena je u programu Consteel.

Osim samog dizajna potrebno je postaviti opterećenja s kojima bi se konstrukcija mogla susreti kako bi se ispitala njezina postojanost. Opterećenja koja su se ispitivala su: opterećenje uzrokovano vlastitom težinom, opterećenje uzrokovano betonskom podlogom te opterećenje uzrokovano težinom vlaka. Analizom je utvrđeno kako je najveće moguće opterećenje uzrokovano težinom vlaka. Deformacija uzrokovana takvom težinom će iznositi 173,66 mm.

Za provjeru grednih elemenata koristilo se opterećenje uzrokovano vlastitom težinom. Analiza se provela za svaku vrstu profila te su se izvlačile maksimalne vrijednosti za aksijalne sile, smične sile i momente savijanja. Te iste maksimalne dobivene vrijednosti su uspoređene s dozvoljenim vrijednostima koje su preuzete iz Eurocode EN 1993-1-1 standarda. Rezultati analize i usporedbe pokazali su kako su svi profili zadovoljili uvjet i danu normu.

## LITERATURA

- [1] S internetske stranice: Wikipedia, Bridge, [https://en.wikipedia.org/wiki/Bridge#Bridge\\_types\\_by\\_use](https://en.wikipedia.org/wiki/Bridge#Bridge_types_by_use)
- [2] S internetske stranice: Science Direct, Railway – bridge, <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/railway-bridge>
- [3] S Internetske stranice: Highest Bridges, A Brief History of High Railway Bridges, [https://www.highestbridges.com/wiki/index.php?title=A\\_Brief\\_History\\_of\\_High\\_Railway\\_Bridges](https://www.highestbridges.com/wiki/index.php?title=A_Brief_History_of_High_Railway_Bridges)
- [4] S internetske stranice: Steel Constructions, Bridges, <https://www.steelconstruction.info/Bridges>
- [5] S internetske stranice: European Commission, Eurocodes, <https://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/en-eurocodes/about-en-eurocodes>
- [6] S internetske stranice: Wikipedia, Finite Element Method, [https://en.wikipedia.org/wiki/Finite\\_element\\_method](https://en.wikipedia.org/wiki/Finite_element_method)
- [7] S internetske stranice: Apex, The Finite Element Method (FEM) – A Beginner's Guide, <https://www.jousefmurad.com/fem/the-finite-element-method-beginners-guide/>
- [8] S internetske stranice: Simscale, Finite Element Method – What i sit? FEM and FEA Explained, <https://www.simscale.com/blog/what-is-finite-element-method/>
- [9] S internetske stranice: Hrvatska enciklopedija, Čelik, <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=13250>
- [10] S internetske stranice: Wikipedija, Oslonac, <https://hr.wikipedia.org/wiki/Oslonac>

## POPIS SLIKA

Slika 2.1 Most Ikitsuki - Hirado.....	7
Slika 4.1 Primjer MKE metode.....	9
Slika 5.1 Most inspiracije.....	10
Slika 5.2 Izometrijski prikaz mosta.....	10
Slika 6.1 "Section administrator".....	12
Slika 6.2 IPE 500 profil.....	13
Slika 6.3 HEB 500 profil.....	13
Slika 6.4 Postavljanje stupova.....	14
Slika 6.5 Postavljanje greda.....	14
Slika 6.6 3D prikaz osnovnih elemenata.....	15
Slika 6.7 "Knjižnica".....	15
Slika 6.8 Postavljanje ograde.....	16
Slika 6.9 Skraćivanje stupova.....	16
Slika 6.10 Postavljanje ravnih greda ograde.....	17
Slika 6.11 Postavljanje ležećih greda za učvršćivanje.....	17
Slika 6.12 Postavljanje uspravnih greda za učvršćivanje.....	18
Slika 6.13 Gotovi izgled mosta.....	18
Slika 6.14 Postavljanje oslonaca mosta.....	19
Slika 7.1 Dijagram opterećenja vlastite težine po svim osima.....	20
Slika 7.2 Dijagram opterećenja vlastite težine po z osi.....	21
Slika 7.3 Postavljanje betona.....	21
Slika 7.4 MKE mreža.....	22
Slika 7.5 Opterećenje uzorkovano težinom betona po svim osima.....	22
Slika 7.6 Opterećenje uzrokovano težinom betona po z osi.....	23
Slika 7.7 Postavljanje "Influence lines".....	23
Slika 7.8 Postavljanje opterećenja uzrokovano težinom vlaka.....	24
Slika 7.9 Dijagram opterećenja uzrokovano težinom vlaka po svim osima.....	24
Slika 7.10 Dijagram opterećenja uzrokovano težinom vlaka po z osi.....	25

## POPIS TABLICA

Tablica 5.1 Karakteristike čelika.....	11
Tablica 8.1 Karakteristike profila.....	26

## **SAŽETAK**

U ovome završnome radu izvršila se statička analiza čelične konstrukcije željezničkoga mosta metodom konačnih elemenata u programu Consteel. Izrađen je 3D model konstrukcije mosta u programu te je definiran materijal korištenih dijelova, profili elemenata, oslonci i različita opterećenja. Na temelju definiranih podataka provedena je statička analiza aksijalnih sila, smičnih sila i momenata savijanja. Nakon provedene analize uslijedila je provjera dobivenih rezultata s normom Eurocode 3. Zaključak cijele analize je taj da je most modeliran unutar dozvoljenih granica te da su svi uvjeti zadovoljeni.

Ključne riječi: željeznički most, čelična konstrukcija, metoda konačnih elemenata, statička analiza, Eurocode 3 norma, Consteel.

## **SUMMARY**

In this final work, a static analysis of the steel structure of the railway bridge was performed using the finite element method in the Consteel program. A 3D model of the bridge structure was created in the program and the material of the used parts, element profiles supports and different loads were defined. Based on the defined data, a static analysis of axial forces, shear forces, and bending moments was performed. The analysis was followed by a check of the obtained results with the Eurocode 3 standard. The conclusion of the entire analysis is that the bridge was designed within the permitted limits and that all conditions were met.

Key words: railway bridge, steel structure, finite element method, static analysis, Eurocode 3 standard, Consteel.