

Projektiranje konstrukcije pristupne rampe za plovni pristan

Dolšak, Tin

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:130536>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-31**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Tin Dolšak

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Jerolim Andrić, dipl. ing.

Student:

Tin Dolšak

Zagreb, 2023.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru Prof. dr. sc. Jerolimu Andriću te asistentici Mateji Tomičić na razumijevanju, strpljenju i uloženom vremenu i trudu tijekom izrade ovog rada, ali i studiranja.

Želim se posebno zahvaliti svojoj obitelji, djevojci Josipi i prijateljima te kolegama na studiju koji su mi pružali podršku tijekom cijelog studiranja.

Također se zahvaljujem tvrtki iCat koja je proširila moje znanje o struci.

Tin Dolšak



Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 23 – 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 23 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Tin Dolšak** JMBAG: **0035229080**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Projektiranje konstrukcije pristupne rampe za plovni pristan**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Structural design of access ramp of floating dock**

Opis zadatka:

Zbog velikih oscilacija visine vodostaja na rijekama iskrcaj putnika iz riječnih brodova obavlja se preko plovnih pristana koji su zatim pristupnim rampama povezani s obalom.

U zadatku potrebno je projektirati pristupnu rampu ($L=23,95\text{m}$, $B=1,76\text{m}$) koja povezuje plovni pristan i obalu prema Pravilima Hrvatskog registra brodova (HRB) za unutarnju plovidbu i priloženom predlošku generalnog plana plovnog pristana. Aksijalnu silu kojom plovni pristan djeluje na rampu i inicijalnu geometriju rampe uzeti iz predloška.

Zadatak obuhvaća:

- 1) Analizu dostupne literature i upoznavanje s relevantnim Pravilima HRB-a *Rules for the Classification of Inland Navigation Vessels Part 2 – HULL AND HULL EQUIPMENT, July 2021* za dimenzioniranje elemenata broskog trupa.
- 2) Dimenzioniranje konstrukcijskih elemenata pristupne rampe s obzirom na zahtjeve za lokalnom i globalnom čvrstoćom koristeći projektne formule i izraze prema Pravilima HRB-a.
- 3) Direktni proračun konstrukcijskih elemenata pristupne rampe i kontrolu globalnog strukturnog odziva provesti koristeći metodu konačnih elemenata (MKE). Izgraditi kompletni MKE model pristupne rampe koristeći pločaste i gredne konačne elemente. Prilikom dimenzioniranja koristiti kriterije dozvoljenih naprezanja i izvijanja. Kontrolu izvijanja provesti na lokalnoj razini (oplata između ukrepa) i rampe kao globalne grede. Faktore sigurnosti uzeti prema pravilima HRB-a. Za direktni proračun metodom konačnih elemenata koristiti računalni sustav FEMAP dostupan na FSB-u.
- 4) Napravite nacрте pristupne rampe na razini klasifikacijske dokumentacije.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

Datum predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

30. 11. 2022.

1. rok: 20. 2. 2023.
2. rok (izvanredni): 10. 7. 2023.
3. rok: 18. 9. 2023.

1. rok: 27. 2. – 3. 3. 2023.
2. rok (izvanredni): 14. 7. 2023.
3. rok: 25. 9. – 29. 9. 2023.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Jerolim Andrić

Izv. prof. dr. sc. Ivan Čatipović

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY	IX
1. UVOD.....	1
1.1. Cilj rada.....	2
2. PROJEKTNE ZNAČAJKE PRISTUPNE RAMPE	3
2.1. Osnovne dimenzije.....	3
2.2. Projektne varijante	4
2.3. Materijal konstrukcije	4
2.4. Definiranje opterećenja	5
2.4.1 Opterećenje od putnika	5
2.4.2. Opterećenje od tlačne sile	5
2.4.3. Opterećenje od krovne konstrukcije	5
2.4.4. Vlastita težina.....	5
2.4.5. Dodatna masa.....	5
3. DIMENZIONIRANJE KONSTRUKCIJSKIH ELEMENATA PREMA PRAVILIMA HRB-A I PROJEKTNIM FORMULAMA.....	6
3.1. Uvod.....	6
3.2. Korozijski dodatak	6
3.3. Dimenzioniranje konstrukcijskih elemenata	6
3.3.1. Debljina lima palube	6
3.3.2. Debljina lima prirubnice	7
3.3.3. Debljina lima struka	7
3.3.4. Debljina rebrenica	7
3.3.5. Jaki uzdužni profil.....	8
3.3.6. Ukrepe.....	8
3.3.6.1. Varijanta 1	8
3.3.6.2. Varijanta 2	8
3.3.7. Dimenzioniranje nosača za privez	8
3.4. Proračun čvrstoće na savijanje	9
3.5. Proračun čvrstoće na tlak	12
3.6. Složeno naprezanje	13
3.7. Proračun čvrstoće na izvijanje	14
4. IZRADA GEOMETRIJE PRISTUPNE RAMPE U PROGRAMU RHINOCEROS	15
4.1. Uvod.....	15
4.2. Izrada geometrije pristupne rampe.....	15

5. DIREKTNI PRORAČUN U KONCEPTNOJ FAZI PROJEKTIRANJA.....	17
5.1. Uvod.....	17
5.2. Izrada modela.....	17
5.3. Zadavanje opterećenja.....	18
5.4. Rubni uvjeti.....	19
5.5. Analiza rezultata	19
5.5.1. Varijanta 1.....	20
5.5.1.1. Pomaci.....	20
5.5.1.2. Naprezanja.....	20
5.5.2. Varijanta 2.....	21
5.5.2.1. Pomaci.....	21
5.5.2.2. Naprezanja.....	22
5.5.3. Usporedba projektnih varijanti	23
6. DIREKTNI PRORAČUN U FINALNOJ FAZI PROJEKTIRANJA	24
6.1. Uvod.....	24
6.2. Promjena geometrije struka	24
6.3. Promjena konačnih elemenata oko nosača za privez	25
6.3.1. Promjena mreže konačnih elemenata.....	25
6.3.2. Promjena debljine struka.....	25
6.4. Analiza rezultata	26
6.4.1. Pomaci.....	26
6.4.2. Naprezanja	27
6.5. Kontrola izvijanja.....	30
6.5.1. Lokalno izvijanje lima palube.....	30
6.5.2. Izvijanje prirubnice	30
6.5.3. Izvijanje struka.....	31
6.5.4. Izvijanje T profila.....	31
6.5.5. Izvijanje ukrepa.....	32
6.5.6. Proračun čvrstoće na izvijanje rampe kao globalne grede.....	32
6.6. Kontrola smičnog naprezanja nosača za privez	33
7. ZAKLJUČAK.....	34
LITERATURA.....	35
PRILOZI.....	36

POPIS SLIKA

Slika 1.	Riječni kruzer Viking [4]	1
Slika 2.	Plovni pristan „Vukovar“ [5]	2
Slika 3.	Tlocrt pristupne rampe	3
Slika 4.	Poprečni presjek pristupne rampe	3
Slika 5.	Varijanta 1	4
Slika 6.	Varijanta 2	4
Slika 7.	Oznake polovičnog poprečnog presjeka.....	10
Slika 8.	Korisničko sučelje programa Rhinoceros 7.....	15
Slika 9.	Geometrija varijante 1	16
Slika 10.	Geometrija varijante 2	16
Slika 11.	Prikaz mreže i čvorova varijante 1	17
Slika 12.	Prikaz opterećenja od ljudi i tlačne sile.....	18
Slika 13.	Prikaz rubnih uvjeta.....	19
Slika 14.	Progib varijante 1 za LC1	20
Slika 15.	Najveća naprezanja varijante 1 za LC2 (pogled s donje strane)	20
Slika 16.	Detalj najvećeg naprezanja za varijantu 1 (LC2)	21
Slika 17.	Progib varijante 2 za LC1	21
Slika 18.	Najveća naprezanja varijante 2 za LC2 (pogled s donje strane)	22
Slika 19.	Detalj najvećeg naprezanja za varijantu 2 (LC2)	22
Slika 20.	Promjena geometrije struka.....	24
Slika 21.	Prvobitna mreža (lijevo), nova mreža (desno)	25
Slika 22.	Područje povećanja debljine struka	25
Slika 23.	Prikaz progiba za LC1	26
Slika 24.	Prikaz progiba za LC2	26
Slika 25.	Prikaz progiba za LC3	27
Slika 26.	Von Mises naprezanja za LC1 (pogled s donje strane).....	27
Slika 27.	Von Mises naprezanja za LC2 (pogled s donje strane)	28
Slika 28.	Von Mises naprezanja za LC3 (pogled s donje strane)	28
Slika 29.	Kritični detalj za LC2 na inicijalna geometrija pristupne rampe	29
Slika 30.	Rješenje kritičnog detalja za LC2 na reprojektiranoj geometriji pristupne rampe	29

POPIS TABLICA

Tablica 1. Svojstva brodograđevnog čelika klase A	4
Tablica 2. Dimenzije elemenata polovično poprečnog presjeka	10
Tablica 3. Usporedba zahtijevanog i stvarnog momenta otpora poprečnog presjeka	11
Tablica 4. Savojsna naprezanja	12
Tablica 5. Tlačno naprezanje	13
Tablica 6. Složena naprezanja	13
Tablica 7. Vrijednosti kritične sile izvijanja	14
Tablica 8. Usporedba projektnih varijanti	23
Tablica 9. Izvijanje lima palube	30
Tablica 10. Izvijanje prirubnice	30
Tablica 11. Izvijanje struka	31
Tablica 12. Izvijanje T profila	32
Tablica 13. Izvijanje ukrepa	32

POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE

- 1 Konstrukcija pristupne rampe
- 2 Prikaz presjeka

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
L	m	Duljina pristupne rampe
B	m	Širina pristupne rampe
ρ	kg/m ³	Gustoća
E	N/mm ²	Modul elastičnosti
ν	-	Poissonov omjer
R _{eH}	N/mm ²	Granica razvlačenja
k	-	Koeficijent materijala
q _p	kN/m ²	Uniformno maseno opterećenje od putnika
F _t	kN	Tlačna sila
m _{kk}	kg	Masa krovne konstrukcije
t _c	mm	Ukupni korozijski dodatak na debljinu
t ₁ , t ₂ , t ₃	mm	Minimalna zahtijevana debljina palube
s	m	Razmak ukrepa
f _s	-	Faktor sigurnosti
p	kN/m ²	Opterećenje tlakom
c _{FR}	-	Koeficijent sustava orebrenja
σ_x	N/mm ²	Normalno naprezanje
t _{pa}	mm	Minimalna debljina palube
σ_E	N/mm ²	Naprezanje idealnog elastičnog savijanja uslijed aksijalnog naprezanja
f _B	-	Faktor izvijanja
t	mm	Neto debljina lima
b	mm	Kraća stranica panela opločenja
σ_C	N/mm ²	Kritično naprezanje izvijanja
σ_a	N/mm ²	Stvarno osno tlačno naprezanje
t _{pa,1}	mm	Debljina palube za varijantu 1
t _{pa,2}	mm	Debljina palube za varijantu 2
t _p	mm	Debljina prirubnice
t _s	mm	Debljina struka
t _r	mm	Debljina rebrenice
w	cm ³	Neto moment otpora profila
l	m	Nepoduprti raspon
c _{BC}	-	Koeficijent uklještenja
F _R	kN	Rezultantna sila
d	mm	Promjer nosača za privez
τ_{dop}	N/mm ²	Dopušteno smično naprezanje
τ_s	N/mm ²	Stvarno smično naprezanje
A	mm ²	Površina poprečnog presjeka

σ_{dop}	N/mm^2	Dopušteno savojno naprezanje
W_{min}	mm^3	Minimalni moment otpora
M_{max}	$N\cdot mm$	Maksimalni moment savijanja
$h_{s,kraj}$	mm	Visina struka na sredini
$h_{s,sredina}$	mm	Visina struka na krajevima
b_{pa}	mm	Širina polovine lima palube
h_s	mm	Visina struka
b_p	mm	Širina prirubnice
t_p	mm	Debljina prirubnice
$h_{t,s}$	mm	Visina struka T profila
$t_{t,s}$	mm	Debljina struka T profila
$h_{t,p}$	mm	Visina prirubnice T profila
$t_{t,p}$	mm	Debljina prirubnice T profila
$W_{pop.pr.}$	cm^3	Moment otpora poprečnog presjeka
I_z, I_a	mm^4	Moment inercije poprečnog presjeka
z	mm	Udaljenost od neutralne linije
$\sigma_{s,paluba}$	N/mm^2	Savojno naprezanje na palube
$\sigma_{s,dno}$	N/mm^2	Savojno naprezanje na dnu
σ_t	N/mm^2	Tlačno naprezanje
σ_{uk}	N/mm^2	Složeno naprezanje
$\sigma_{uk,paluba}$	N/mm^2	Složeno naprezanje na palube
$\sigma_{uk,dno}$	N/mm^2	Složeno naprezanje na dnu
F_{kr}	N	Kritična sila izvijanja
$\delta_{max,v1}$	mm	Maksimalni pomak varijante 1
$\sigma_{max,v1}$	N/mm^2	Maksimalno naprezanje varijante 1
$\delta_{max,v2}$	mm	Maksimalni pomak varijante 2
$\sigma_{max,v2}$	N/mm^2	Maksimalno naprezanje varijante 1
δ_{max}	mm	Maksimalni pomak izabrane varijante
τ_E	N/mm^2	Naprezanje idealnog elastičnog savijanja uslijed smičnih naprezanja
τ_C	N/mm^2	Kritično smično naprezanje
τ_a	N/mm^2	Stvarno osno smično naprezanje
t_w	mm	Debljina struka profila
h_w	mm	Visina struka profila

SAŽETAK

Tema ovog rada je projektiranje konstrukcije pristupne rampe za plovni pristan.

Projektiranje je provedeno kroz tri faze. U prvoj su fazi dimenzionirani konstrukcijski elementi prema projektnim formulama i pravilima Hrvatskog registra broda (HRB) za klasifikaciju brodova unutarnje plovidbe [1]. Razmatrane su dvije projektne varijante za inicijalnu geometriju zadanu predloškom.

U drugoj fazi projektiranja, na osnovu geometrije iz predloška, su napravljeni geometrijski modeli u programu Rhinoceros [2]. Zatim su geometrijski modeli uneseni u program FEMAP [3], gdje su modelirani globalni modeli za obje projektne varijante te je provedena kontrola globalnih odziva metodom konačnih elemenata (MKE). Temeljem tih rezultata zaključeno je da je paluba s uzdužnim ukrepama povoljnija od one s poprečnim te se ona uzima u daljnje razmatranje.

Projektiranje završava fazom u kojoj su napravljene preinake modela na odabranoj varijanti tako da konstrukcija zadovoljava kriterije dozvoljenih naprezanja i izvijanja.

U konačnici, prema konačnoj konstrukciji napravljeni su nacrti pristupne rampe na razini klasifikacijske dokumentacije.

Ključne riječi: pristupna rampa, plovni pristan, HRB pravila, metoda konačnih elemenata, kriterij dozvoljenih naprezanja, kriterij izvijanja

SUMMARY

The topic of this paper is structural design of access ramp of floating dock.

The design is carried out in three phases. In the first phase, structural elements are defined according to design formulas and rules of the Croatian Register of Shipping (CRS) of Inland Navigation Vessels [1]. Two project variants are considered for the initial geometry given by the template.

In the second phase of designing, according to geometry from template, geometry models are created in the program Rhinoceros [2]. Then geometry model is imported in program FEMAP [3]. Global models are modeled for both project variants and control of global responses is carried out using finite element method (FEM). Based on these results, it is concluded that the deck with longitudinal members is more favorable than the one with transverse members. This variant is selected in the following consideration.

Designing ends with the phase in which model modifications are made on the selected variant so that the structure satisfies the criteria of permissible stresses and deflection.

In the end, according to the final structure, drawings of the access ramp are made at the level of the classification documentation.

Key words: access ramp, floating dock, CRS rules, finite element method, criteria of permissible stresses, criteria for buckling stress

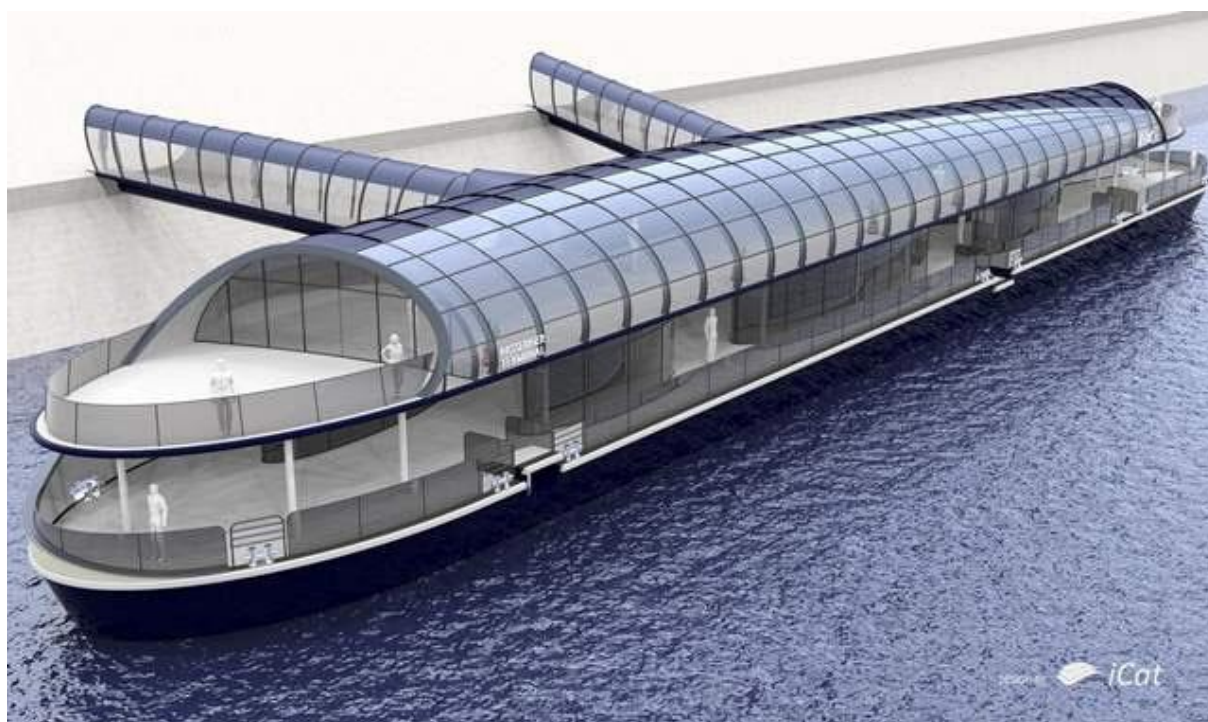
1. UVOD

Plovni pristan je plutajući objekt čija je namjena omogućiti iskrcaj putnika iz riječnih brodova koji je otežan zbog oscilacija visine vodostaja rijeka tijekom godine. Povezanost plovnog pristana s obalom je omogućena preko pristupnih rampi. U odnosu na kruzere koji plove morima, riječni kruzeri [Slika 1] su značajno manjih dimenzija. Tipični riječni kruzer je duljine 130 m, širine 11 m i smještajnog kapaciteta do 200 putnika. Karakteristični su po malom gazu i malim visinama nadgrađa zbog ograničenosti plovnih puteva koji ovise o vodostaju rijeka. Riječni kruzeri su jedna od značajnijih vrsta brodova koji zahtijevaju plovni pristan, time izgradnja plovnih pristana značajno utječe na razvoj turizma tog dijela regije. Riječno krstarenje omogućava vrlo jednostavno putovanje rijekama između država, istraživanje novih područja te upoznavanje novih kultura i ljudi.



Slika 1. Riječni kruzer Viking [4]

Plovni pristan [Slika 2] koji se razmatra u ovom radu će biti smješten u Vukovaru. Pristan je jednotrupac, duljine 70 m, širine 11 m i gaza 0,9 m. Maksimalan broj riječnih kruzera koji se mogu privezati na razmatrani plovni pristan je četiri. Pristan kapaciteta od 500 osoba koje se mogu smjestiti na dvije palube. Opremljen je s dvije pristupne rampe, krmenom koja spaja gornju palubu s obalom i predviđena je za ukrcaj prilikom nižih vodostaja, te pramčanom koja spaja glavnu palubu s obalu i predviđena je za ukrcaj pri višim vodostajima [5].



Slika 2. Plovni pristan „Vukovar“ [5]

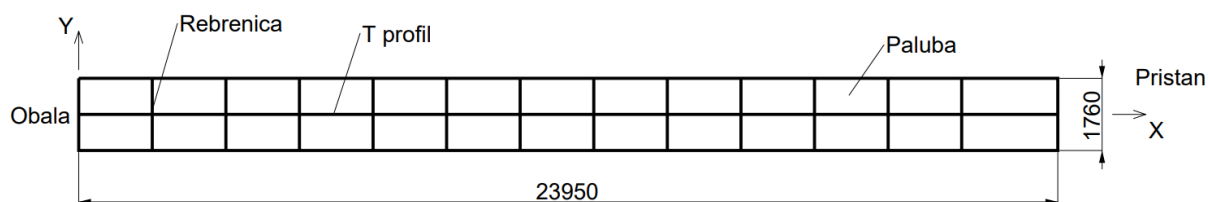
1.1. Cilj rada

Cilj ovog rada je projektiranje konstrukcije pristupne rampe za plovni pristan kroz tri faze. U radu se razmatraju dvije projektne varijante. Prva faza se sastoji od dimenzioniranja konstrukcijskih elemenata prema projektnim formulama i pravilima Hrvatskog registra broda za klasifikaciju brodova unutarnje plovidbe [1]. U drugoj fazi koristeći program FEMAP je potrebno provesti kontrolu globalnih strukturnih odziva koristeći metodu konačnih elemenata (MKE) za obje projektne varijante. Temeljem tih rezultata potrebno je odrediti povoljniju. Projektiranje završava fazom u kojoj je potrebno napraviti preinake na odabranoj varijanti tako da konstrukcija zadovoljava kriterije za dozvoljena naprezanja i kriterije za izvijanje koji su definirani prema pravilima HRB-a.

2. PROJEKTNE ZNAČAJKE PRISTUPNE RAMPE

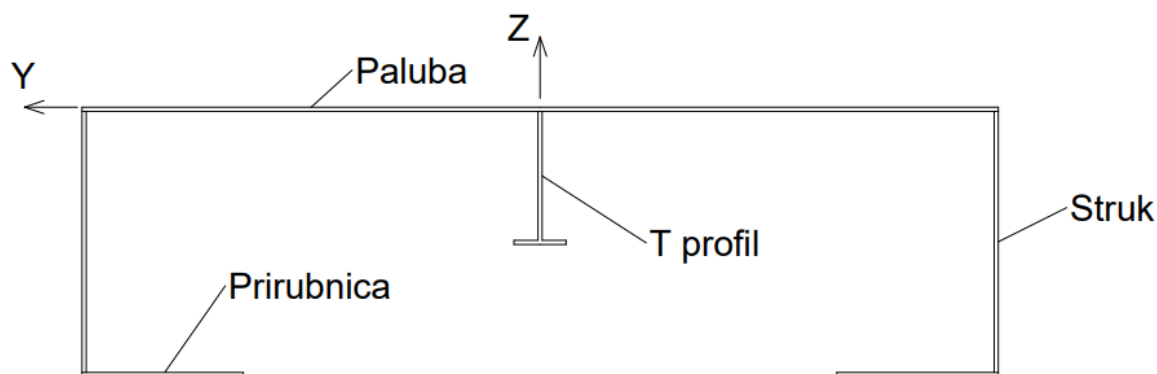
2.1. Osnovne dimenzije

Kao osnova za dimenzioniranje krmene i pramčane pristupne rampe se uzima pramčana koja je veće duljine i kritičnija za dimenzioniranje. Dimenzije pristupne rampe su unaprijed definirane u projektnoj dokumentaciji koja je dobivena kao predložak za ovaj rad. Pristupna rampa je duljine (L) od 23,95 m i širine (B) 1,76 m [Slika 3]. Rampa je uzdužno ojačana s T profilom, a poprečno s rebrenicama između kojih je razmak 1800 mm, osim zadnjeg razmaka sa strane pristana koji iznosi 2350 mm te se ta vrijednost uzima kao proračunska.



Slika 3. Tlocrt pristupne rampe

Konstrukcija je promjenjivog poprečnog presjeka po dužini s karakterističnim poprečnim presjecima kao što je prikazano na [Slika 4].

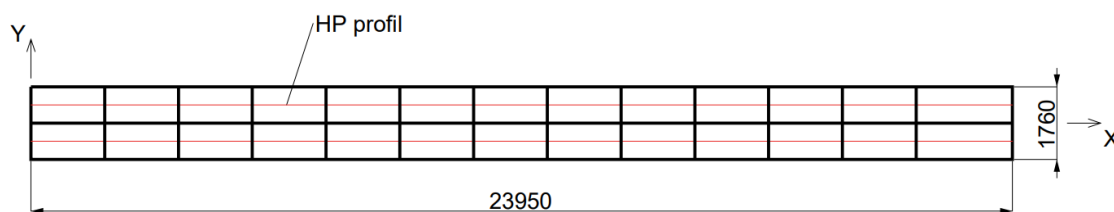


Slika 4. Poprečni presjek pristupne rampe

2.2. Projektne varijante

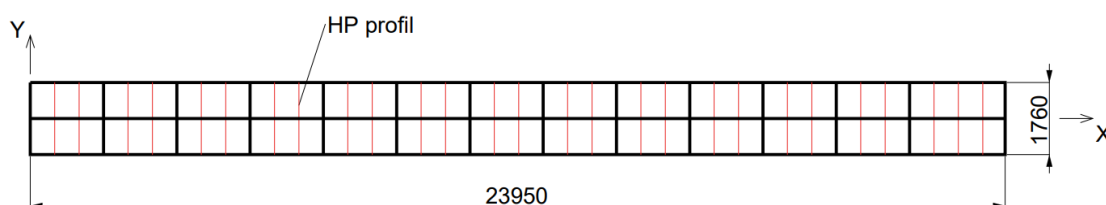
U okviru ovog rada razmatrane su dvije projektne varijante konstrukcije pristupne rampe:

1. Uzdužno orebrena paluba s HP profilima kako je prikazano na [Slika 5].



Slika 5. Varijanta 1

2. Poprečno orebrena paluba s HP profilima kako je prikazano na [Slika 6].



Slika 6. Varijanta 2

2.3. Materijal konstrukcije

Odabrani materijal za cijelu konstrukciju, prema pravilima HRB-a [1], je brodograđevni čelik klase A, sa svojstvima prikazanim u [Tablica 1]:

Tablica 1. Svojstva brodograđevnog čelika klase A

ρ [kg/m ³]	7850
E [N/mm ²]	206 000
ν	0,3
R_{eH} [N/mm ²]	235
k	1

2.4. Definiranje opterećenja

2.4.1 Opterećenje od putnika

Glavna namjena pristupne rampe je iskrcaj putnika s pristana na obalu i to je opterećenje potrebno uzeti u obzir. Opterećenje od putnika je temeljeno na maksimalnom broju putnika koji se može smjestiti na pristupnu rampu. Za ulaznu pretpostavku je uzeto u obzir da jedna osoba zauzima površinu od $0,5 \text{ m}^2$. Time je definirano da se na mostu može maksimalno nalaziti 85 osoba prosječne mase od 80 kg. Opterećenje od putnika je zadano kao uniformno maseno opterećenje na palubu koje iznosi $q_p = 1,582 \text{ kN/m}^2$.

2.4.2. Opterećenje od tlačne sile

Tlačna sila se javlja zbog utjecaja brodova privezanih na pristan te zbog smjera strujanja vjetra i vode. Maksimalni iznos te sile je zadan u predlošku i iznosi $F_t = 1\,000 \text{ kN}$.

2.4.3. Opterećenje od krovne konstrukcije

Pristupna rampa će umjesto klasične ograde imati staklene stijene. Za opterećenje od krovne konstrukcije se uzima u obzir masa pražnice, profila na koje se staklo oslanja i samog stakla. Ukupna masa je zadana u predlošku i iznosi $m_{kk} = 4193 \text{ kg}$.

2.4.4. Vlastita težina

Prilikom proračuna momenta savijanja koje je opisano u sljedećem poglavlju, potrebno je u obzir uzeti masu cijele konstrukcije. Konačna masa konstrukcije je određena iterativnim postupkom pošto masa ovisi o dimenzijama konstrukcijskih elemenata, one ovise o opterećenju, te u konačnici opterećenje ovisi o masi.

2.4.5. Dodatna masa

Na pristupnoj rampi se osim konstrukcijskih elemenata nalaze zavari, antikorozivna zaštita, vodovodne cijevi i ostalo. Iz tog razloga uzima se dodatak na masu konstrukcije pristupne rampe koji iznosi 10 % ukupne mase cijele konstrukcije.

3. DIMENZIONIRANJE KONSTRUKCIJSKIH ELEMENATA PREMA PRAVILIMA HRB-A I PROJEKTNIM FORMULAMA

3.1. Uvod

U projektnoj fazi provedeno je dimenzioniranje konstrukcijskih elemenata pristupne rampe prema pravilima Hrvatskog registra brodova (HRB) [1], proračunu čvrstoće na savijanje i tlak, odnosno složenog opterećenja od savijanja i tlačne sile te na kraju provjera na izvijanje pristupne rampe kao globalne grede.

3.2. Korozijski dodatak

Sukladno pravilima HRB-a [1], pri dimenzioniranju konstrukcijskih elemenata potrebno je uračunati korozijski dodatak koji iznosi 0,5 mm sa svake strane konstrukcijskih elemenata, te ukupan korozijski dodatak iznos $t_c = 1$ mm. U svim sljedećim proračunima kod dimenzioniranja konstrukcijski dodatak u obzir je uračunat korozijski dodatak.

3.3. Dimenzioniranje konstrukcijskih elemenata

3.3.1. Debljina lima palube

Primjenom pravila HRB-a [1] za definiranje debljine limova u pogledu čvrstoće na popuštanje, minimalna debljina lima palube pristupne rampe definirana je izrazima (1), (2) i (3):

$$t_1 = 1,15 \cdot s \cdot \sqrt{f_s \cdot p \cdot k} \quad (1)$$

$$t_2 = 18,3 \cdot c_{FR} \cdot s \cdot \sqrt{\frac{p}{\frac{k_{eH} - 0,89 \cdot \sigma_X}{f_s}}} \quad (2)$$

$$t_3 = 1,46 \cdot c_{FR} \cdot s \cdot \sqrt{f_s \cdot p \cdot k} \quad (3)$$

Minimalna debljina palube određena ovim kriterijima je $t_{pa} = 4$ mm. Vrijednost je jednaka za obje varijante koje se razmatraju u ovom radu.

Proračun čvrstoće na izvijanje je proveden iterativnim postupkom pošto nije definira konačna debljina lima palube. U okviru čvrstoće na izvijanje potrebno je odrediti minimalne debljine limova pri kojima neće doći do izvijanja. Naprezanje idealnog elastičnog savijanja uslijed aksijalnog naprezanja, računa se prema pravilima HRB-a [1] i definirano je izrazom (4):

$$\sigma_E = 0,9 \cdot f_B \cdot E \cdot \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad (4)$$

Kritično naprezanje na izvijanje je određeno sljedećim izrazima (5) i (6):

$$\sigma_C = \sigma_E \quad \text{ako je} \quad \sigma_E \leq \frac{R_{eH}}{2} \quad (5)$$

$$\sigma_C = R_{eH} \cdot \left(1 - \frac{R_{eH}}{4 \cdot \sigma_E}\right) \quad \text{ako je} \quad \sigma_E > \frac{R_{eH}}{2} \quad (6)$$

Dobiveno kritično naprezanje mora biti veće od stvarnog naprezanja pomnoženog s faktorom sigurnosti koji je zadan u pravilima HRB-a [1]:

$$\sigma_C \geq f_s \cdot \sigma_a \quad (7)$$

Zadovoljavanjem navedenog uvjeta određena je konačna minimalna debljina palube pristupne rampe koja iznosi $t_{pa,1} = 8$ mm za varijantu 1, te $t_{pa,2} = 11$ mm za varijantu 2.

3.3.2. Debljina lima prirubnice

Debljina lima prirubnice određena je na temelj proračuna čvrstoće na izvijanje analognim postupkom kao i kod određivanja debljine lima palube. Zadovoljavanjem uvjeta iz jednadžbe (7) slijed da je konačna debljina prirubnice jednaka $t_p = 14$ mm. Jednaka je za obje projektne varijante.

3.3.3. Debljina lima struka

Vrijednost debljine struka uvjetovana je preko minimalnog momenta otpora poprečnog presjeka koji je definiran u proračunu čvrstoće na savijanje. Konačna debljina struka iznosi $t_s = 9$ mm. Jednaka je za obje projektne varijante.

3.3.4. Debljina rebrenica

Debljina rebrenica uzeta je prema predlošku i iznosi $t_r = 6$ mm, te je jednaka za obje projektne varijante. Rebrenice su na slobodnom kraju s donje strane ukrepljenje FB100x10, čije su dimenzije zadane predloškom.

3.3.5. Jaki uzdužni profil

Dimenzije jakog uzdužnog profila, odnosno T profila definirane su preko izraza iz HRB-a [1] koji se temelji na opterećenju tlakom:

$$w = \frac{1000 \cdot f_s \cdot p \cdot s \cdot l^2}{c_{BC} \cdot R_{eH}} \quad (8)$$

Iz jednadžbe (8) slijedi minimalni moment otpora profila, $w = 162 \text{ cm}^3$. Konačni T profil je T250x8/100x8.

3.3.6. Ukrepe

3.3.6.1. Varijanta 1

Projektna varijanta 1 [Slika 5], odnosno uzdužna varijanta sastoji se od ukupno dva HP profila koji se nalaze između struka i jakog uzdužnog nosača, sa svake strane po jedan. Dimenzije profila su određene prema izrazu iz HRB-a [1]:

$$w = \frac{1000 \cdot p \cdot s \cdot l^2}{c_{BC} \cdot \left(\frac{R_{eH}}{f_s} - \sigma_X \right)} \quad (9)$$

Temeljem izraza (9) odabrani profil za varijantu 1 je HP120x6.

3.3.6.2. Varijanta 2

Projektna varijanta 2 [Slika 6], odnosno poprečna varijanta sastoji se od dva poprečna HP profila između rebrenica, osim između prve dvije rebrenice koje se nalaze sa strane pristana, gdje ih je tri. Na temelju izraza (9) je odabran profil HP120x6 za varijantu 2.

3.3.7. Dimenzioniranje nosača za privez

Pristupna rampa se preko nosač za privez privezuje pomoću užadi na pristan i obalu. Sila koja djeluje u pojedinom ležaju definirana je kao rezultanta vrijednost horizontalne tlačne sile i vertikalne sile, odnosno vlastite težine. Rezultantna sila iznosi $F_R = 508 \text{ kN}$. Promjer nosača za privez je dan u predlošku i iznosi $d = 150 \text{ mm}$. Dopušteno smično naprezanje definirano je prema pravilima HRB-a [1], te iznosi $\tau_{dop} = 110 \text{ N/mm}^2$ za brodograđevni čelik klase A. Prema Krautovom strojarском priručniku [6] smično naprezanje kružnog presjeka je definirano izrazom:

$$\tau_s = \frac{4}{3} \cdot \frac{F_R}{A} \quad (10)$$

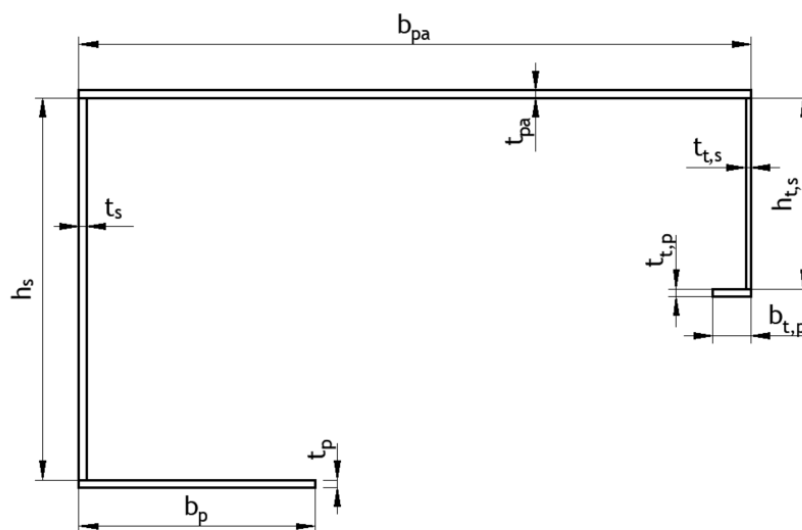
Prema izrazu (10) smično naprezanje nosača za privez iznosi $\tau_s = 38,38 \text{ N/mm}^2$ te ne prelazi vrijednost dopuštenog smičnog naprezanja,

3.4. Proračun čvrstoće na savijanje

U svrhu proračuna čvrstoće na savijanje, konstrukcija pristupne rampe se promatra kao greda oslonjena na zglobnim osloncima, opterećena kontinuiranim opterećenjem po cijeloj dužini. Kontinuirano opterećenje se sastoji od opterećenja putnika, opterećenja krovne konstrukcije, vlastite težine konstrukcije i dodatne mase. Ukupna vlastita masa se sastoji od elemenata prikazanih na [Slika 7], mase rebrenica, ukrepa te dvaju nosača za privez. Zbog simetričnosti pristupne rampe s obzirom na uzdužnu os, promatrat će se polovina konstrukcije. Iz proračuna slijede vrijednosti za momente savijanja u ovisnosti o duljini pristupne rampe. Vrijednost dopuštenog savojnog naprezanja se uzima prema pravilima HRB-a [1] i iznosi $\sigma_{dop} = 190 \text{ N/mm}^2$ za brodograđevni čelik klase A. Minimalni zahtijevani moment otpora poprečnog presjeka definiran je prema izrazu iz Krautovog strojarskog priručnika [6]:

$$W_{min} = \frac{M_{max}}{\sigma_{dop}} \quad (11)$$

Visina struka ovisi o lokaciji na kojoj se nalazi po duljini rampe. Na krajevima ta vrijednost iznosi $h_{s,kraj} = 300 \text{ mm}$ te postepeno raste od krajeva do lokacije udaljene 6 m od kraja i tada postiže konstantnu vrijednost od $h_{s,sredina} = 500 \text{ mm}$. Konačne dimenzije elemenata su uvjetovane momentom otpora na pojedinim poprečnim presjecima, njihove oznake su prikazane na skici [Slika 7].



Slika 7. Oznake polovičnog poprečnog presjeka

Dimenzije su prikazane u tablici u ovisnosti o lokaciji po duljini pristupne rampe [Tablica 2], za obje projektne varijante. U obzir je uzet korozijski dodatak.

Tablica 2. Dimenzije elemenata polovično poprečnog presjeka

Udaljenosti od obalnog kraja	0 m	3 m	6 m	11,975 m	17,95 m	20,95 m	23,95 m
b_{pa}	880 mm						
t_{pa}	8 mm – Varijanta 1 11 mm -Varijanta 2						
h_s	300 mm	400 mm	500 mm			400 mm	300 m
t_s	9 mm						
b_p	310 mm						
t_p	14 mm						
$h_{t,s}$	250 mm						
$t_{t,s}$	4 mm						
$b_{t,p}$	50 mm						
$t_{t,p}$	8 mm						

Na prethodno odabranim lokacijama određen je moment otpora poprečnog presjeka koji mora biti veći od minimalnog zahtijevanog momenta na tim pozicijama. Izračunati podaci su prikazani tablično [Tablica 3]:

Tablica 3. Usporedba zahtijevanog i stvarnog momenta otpora poprečnog presjeka

Udaljenosti od obalnog kraja		0 m	3 m	6 m	11,975 m	17,95 m	20,95 m	23,95 m
Varijanta 1	W_{\min} [cm ³]	0	643	1103	1468	1103	643	0
	$W_{\text{pop.pr.}}$ [cm ³]	1560	2070	2641			2070	1560
Varijanta 2	W_{\min} [cm ³]	0	681	1167	1554	1167	681	0
	$W_{\text{pop.pr.}}$ [cm ³]	1610	2138	2728			2138	1610

U konačnici savojna naprezanja se računaju prema formuli (12) iz [6] :

$$\sigma_s = \frac{M_{\max}}{I_z} \cdot z \quad (12)$$

Konačna savojna naprezanja su izračunata na poziciji palube i prirubnice. Iznosi tih vijednosti su prikazane u sljedećoj [Tablica 4]:

Tablica 4. Savojna naprezanja

Udaljenosti od obalnog kraja		0 m	3 m	6 m	11,975 m	17,95 m	20,95 m	23,95 m
Varijanta 1	$\sigma_{s,paluba}$ [N/mm ²]	0	-40,6	-54,22	-72,19	-54,22	-40,6	0
	$\sigma_{s,dno}$ [N/mm ²]	0	59,06	79,33	105,63	79,33	59,06	0
Varijanta 2	$\sigma_{s,paluba}$ [cm ³]	0	-33,3	-44,82	-59,68	-46,32	-33,3	0
	$\sigma_{s,dno}$ [cm ³]	0	60,52	81,26	108,19	105,83	60,52	0

Proračunata naprezanja su manja od dopuštenog naprezanja koje iznosi $\sigma_{dop} = 190 \text{ N/mm}^2$ te konstrukcija zadovoljava kriterij proračuna čvrstoće na savijanje za obje varijante.

3.5. Proračun čvrstoće na tlak

Proračun čvrstoće na tlak dan je kao najveća vrijednost sile tlaka koja je definirana u predlošku. Maksimalni iznos te sile iznos $F_t = 1\,000 \text{ kN}$. Zbog simetričnosti pristupne rampe s obzirom na uzdužnu os, kao najveću vrijednost sile tlaka uzima se vrijednost upola manja od tlačne sile zadane predloškom. Pristupna rampa se promatra kao greda promjenjive visine. Naprezanje grede opterećenje tlačnom silom definirano je prema izrazu (13) iz Krautovog strojarškog priručnika [6]:

$$\sigma_t = \frac{F_t}{A} \quad (13)$$

Vrijednosti naprezanja tlačnom silom su određene u ovisnosti na karakterističnim duljinama pristupne rampe i zadane su u [Tablica 5]:

Tablica 5. Tlačno naprezanje

Udaljenosti od obalnog kraja		0 m	3 m	6 m	11,975 m	17,95 m	20,95 m	23,95 m
Var. 1	σ_t [N/mm ²]	-32,3	-30,53	-28,94			-30,53	-32,3
Var. 2	σ_t [N/mm ²]	-27,59	-26,29	-25,1			-26,29	-27,59

3.6. Složeno naprezanje

Složeno (ukupno) naprezanje definirano je kao suma savojnog naprezanja i tlačnog naprezanja te je određeno na karakterističnim lokacijama po duljini pristupne rampe.

$$\sigma_{uk} = \sigma_s + \sigma_t \quad (14)$$

Vrijednosti složenog naprezanja prikazana su u [Tablica 6]:

Tablica 6. Složena naprezanja

Udaljenosti od obalnog kraja		0 m	3 m	6 m	11,975 m	17,95 m	20,95 m	23,95 m
Varijanta 1	$\sigma_{uk,paluba}$ [N/mm ²]	-32,3	-71,12	-83,16	-101,13	-83,16	-71,12	-32,3
	$\sigma_{uk,dno}$ [N/mm ²]	-32,3	28,53	50,4	76,69	50,4	28,53	-32,3
Varijanta 2	$\sigma_{uk,paluba}$ [N/mm ²]	-27,59	-59,59	-69,92	-87,78	-69,92	-59,59	-27,59
	$\sigma_{uk,dno}$ [N/mm ²]	-27,59	34,23	56,16	83,09	56,16	34,23	-27,59

U konačnici ukupna naprezanja su manja od dopuštenog koja iznosi $\sigma_{dop} = 190 \text{ N/mm}^2$ te konstrukcija zadovoljava za obje varijante proračun po ovom kriteriju.

3.7. Proračun čvrstoće na izvijanje

Promatranjem pristupne rampe kao zglobno oslonjene globalne grede konstantnog poprečnog presjeka može se izračunati kritična sila pri kojoj dolazi do izvijanja. Izraz (15) prikazuje idealno elastično naprezanje izvijanjem prema pravilima HRB-a [1]:

$$\sigma_E = 0,001 \cdot E \cdot \frac{I_a}{A \cdot L^2} \quad (15)$$

Uzimajući u obzir uvjete (5) i (6) slijedi izraz za kritično naprezanje (σ_c). Dijeljenjem kritičnog naprezanja s površinom poprečnog presjeka pristupne rampe slijedi izraz za iznos kritične sile izvijanja. Iznos kritičnih sila za obje varijante su prikazane u tablici [Tablica 7]:

Tablica 7. Vrijednosti kritične sile izvijanja

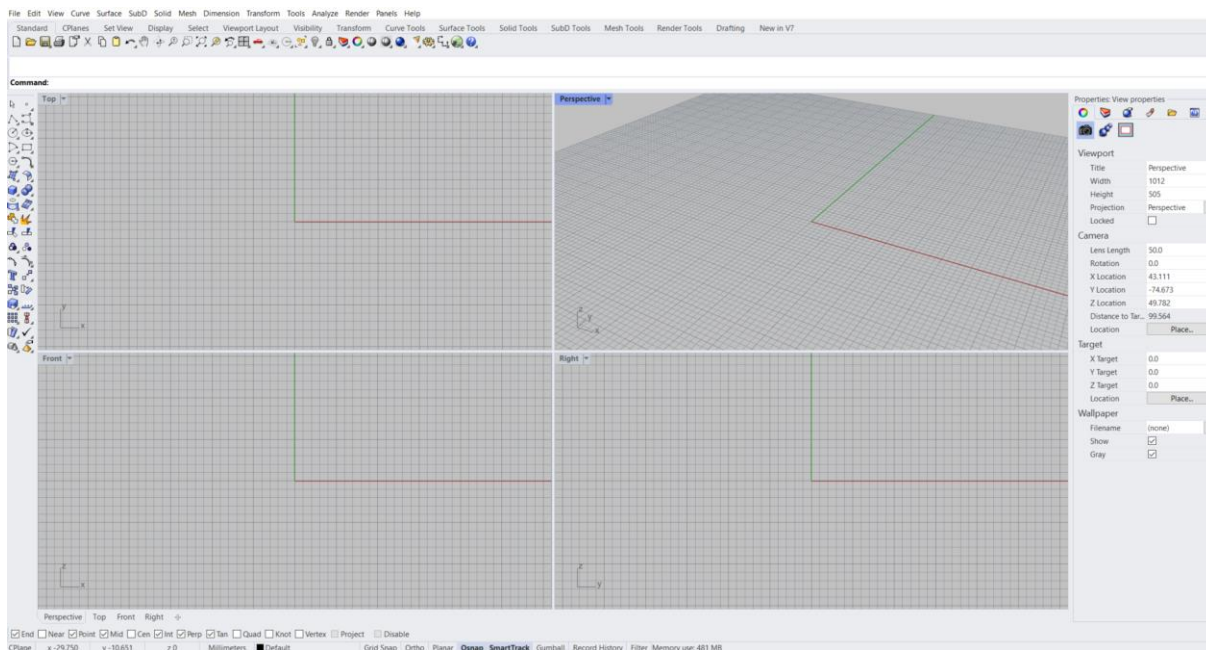
	Varijanta 1	Varijanta 2
F_{kr}	5 318 kN	6 058 kN

Vrijednost kritičnih sila obje varijante su veće od tlačne sile kojom je opterećena konstrukcija (koja iznosi 1 000 kN) i prema ovom kriteriju neće doći do izvijanja pristupne rampe kao globale grede.

4. IZRADA GEOMETRIJE PRISTUPNE RAMPE U PROGRAMU RHINOCEROS

4.1. Uvod

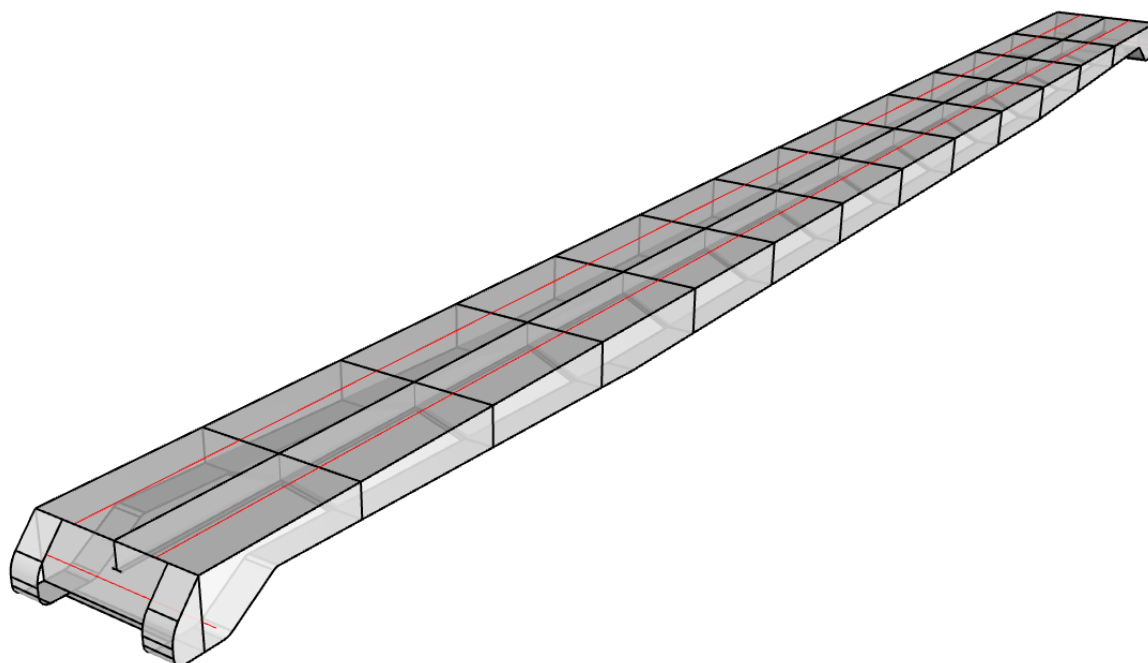
Rhinoceros [2] ili skraćeno Rhino je 3D softver koji se koristi u raznim granama industrije, od modeliranja nakita sve do brodova. Jedna od glavnih vrlina ove aplikacije je vrlo lagano i jednostavno 3D modeliranje. Korisničko sučelje [Slika 8] je vrlo prikladno i intuitivno za korištenje te se ne razlikuje puno od sučelja ostalih 3D softvera.



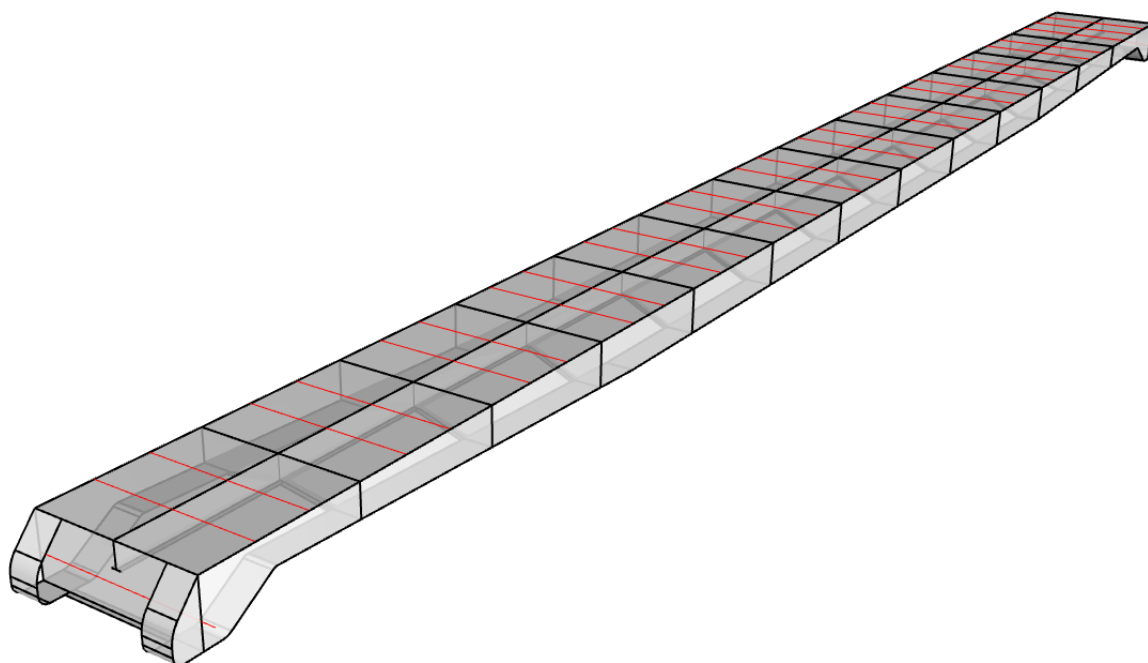
Slika 8. Korisničko sučelje programa Rhinoceros 7

4.2. Izrada geometrije pristupne rampe

Globalni koordinatni sustav je postavljen tako da se ishodište nalazi na uzdužnoj simetralnoj ravnini pristupne rampe, na sjecištu palube i prve rebrenice sa strane obale. Os X prolazi kroz uzdužnu simetralnu ravninu, s pozitivnim smjerom od obale prema pristanu. Pozitivan smjer osi Y se nalazi na lijevoj strani pristupne rampe, gledajući s obale. Os Z se nalazi u horizontalnoj ravnini, s pozitivnim smjerom prema gore. Pomoću površina su prikazani elementi poput palube, struka, prirubnice, rebrenica i T profila, dok su ukrepe i nosač za privez prikazani pomoću linija. Razlog tome bit će objašnjen naknadno u sljedećem poglavlju. Geometrija je napravljena prema nacrtima iz predloška i dimenzijama izračunatim u prošlom poglavlju. U nastavku je prikazana geometrija pristupne rampe s projektnim varijantama, s varijantom 1 [Slika 9] i varijantom 2 [Slika 10].



Slika 9. Geometrija varijante 1



Slika 10. Geometrija varijante 2

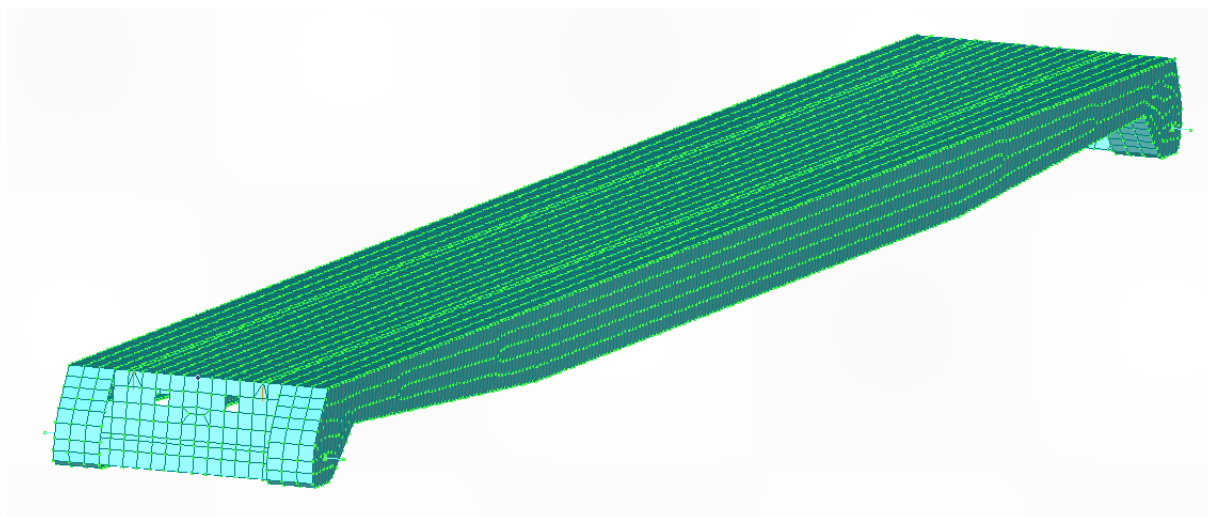
5. DIREKTNI PRORAČUN U KONCEPTNOJ FAZI PROJEKTIRANJA

5.1. Uvod

Izradom globalnog modela pristupne rampe u programu FEMAP [3] za obje projektne varijante te provedbom analize konstrukcije korištenjem metode konačnih elemenata, dobivaju se globalni strukturni odzivi. Usporedbom globalnih odziva dobije se osnova za izbor povoljnije varijante.

5.2. Izrada modela

Koordinatni sustav koji se koristi kod izrade modela odgovara onome opisanom u prošlom poglavlju. Izrada modela započinje unošenje geometrije iz programu Rhinoceros u FEMAP te unosom podataka vezanih za materijal prema [Tablica 1] i kreiranjem karakteristika za pojedini konstrukcijski element. Implementirane plohe služe za kreiranje pločastih konačnih elemenata, dok se pomoću linija kreiraju gredni konačni elementi. Geometrija je napravljena tako da svaka ploha završava na spoju sa susjednim plohama, što daje neuniformne veličine konačnih elemenata, ali omogućava lakšu izradu. Za pločaste elemente su korišteni četverokutni pločasti elementi (eng. *Quad*), dok se trokutni pločasti elementi (eng. *Triangle*) koriste za struk gdje je geometrija složenija. Napravljena je fina mreža konačnih elemenata za obje projektne varijante.



Slika 11. Prikaz mreže i čvorova varijante 1

5.3. Zadavanje opterećenja

Promatrana su tri stanja opterećenja kojima je opterećena pristupna rampa, svaki od navedenih slučajeva opterećenja sadrži opterećenje vlastitom težinom, opterećenje od krovne konstrukcije te opterećenje dodatne mase. Uz navedeno pojedini dodatno sadrži:

- LC1 - opterećenje od putnika
- LC2 – opterećenje tlačnom silom
- LC3 – opterećenje od putnika i opterećenje tlačnom silom

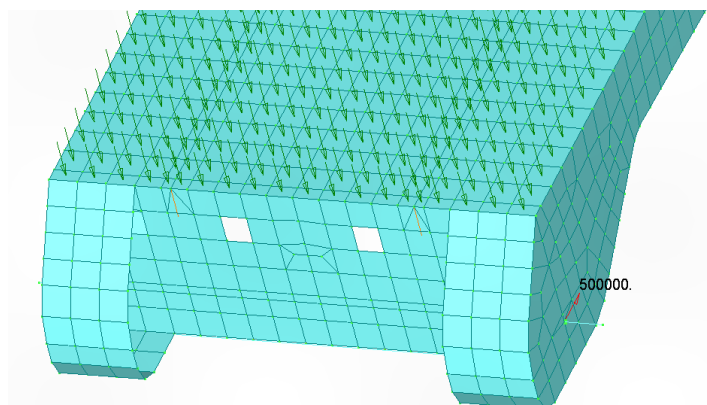
Za definiranje opterećenja od vlastite težine, FEMAP sadrži značajku koja uzima u obzir utjecaj gravitacijske akceleracije te je time određeno ovo opterećenje.

Opterećenje od krovne konstrukcije je zadano preko sila u čvorovima na mjestima gdje će ona biti povezana s konstrukcijom pristupne rampe. U obzir su uzeti svi čvorovi na spoju palube i struka, iznos sile u svakom čvoru je jednak omjeru ukupne težine konstrukcije i broja promatranih čvorova. Smjer sila je u smjeru negativne osi Z.

Opterećenje od dodatne mase iznosi 10 % ukupne mase konstrukcije te je to opterećenje uzeto u obzir kao povećanje gustoće čelika za 10 %.

Opterećenje od putnika je zadano kao tlak na površinu svih konačnih elemenata palube, iznos tog tlaka je jednak omjeru ukupne težine putnika i površine palube.

U konačnici opterećenje tlačnom silom je definirano kao dvije sile, u zajedničkom čvoru nosača za privez i struka na strani pristana, jedna s lijeve, jedna s desne strane. Sile su usmjerene prema negativnom smjeru osi X. Iznos pojedine sile jednak je polovini ukupne tlačne sile zadane predloškom.

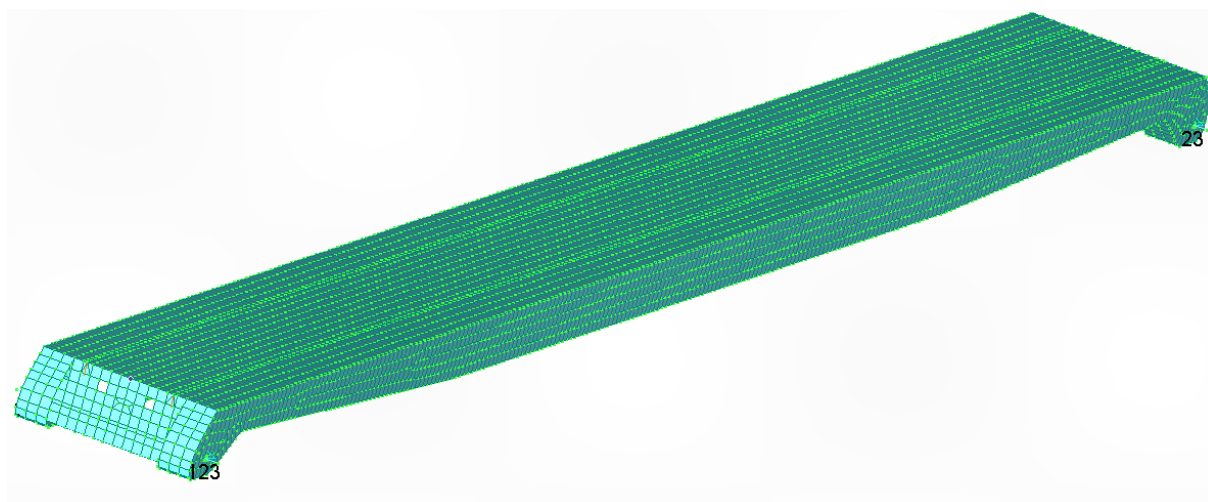


Slika 12. Prikaz opterećenja od ljudi i tlačne sile

5.4. Rubni uvjeti

Na modelu su ukupno zadana četiri rubna uvjeta. Dva se nalaze sa strane obale u zajedničkom čvoru nosača za privez i struka, jedan s lijeve, jedan s desne strane rampe. Oni sprječavaju pomak u svim smjerovima te je rotacija omogućena. Druga dva ruba uvjeta se nalaze sa strane pristana u zajedničkom čvoru nosača za privez i struka, jedan s lijeve, jedan s desne strane rampe. Dakle, u istim čvorovima gdje se nalaze tlačne sile. Ovaj set rubnih uvjeta sprječava pomake u smjeru osi Y i Z te je pomak u smjeru osi X moguć kao i rotacije.

Navedena [Slika 13] prikazuje rubne uvjete sa strane obale koji su označeni s 123 što predstavlja onemogućene pomake u svim smjerovima, dok rubni uvjeti sa strane pristana su označeni s 23 što predstavlja onemogućene pomake u smjerovima osi Y i Z. Na prikazu nisu prikazani rubni uvjeti s druge strane koji su simetrični s obzirom na uzdužnu simetralnu ravninu.



Slika 13. Prikaz rubnih uvjeta

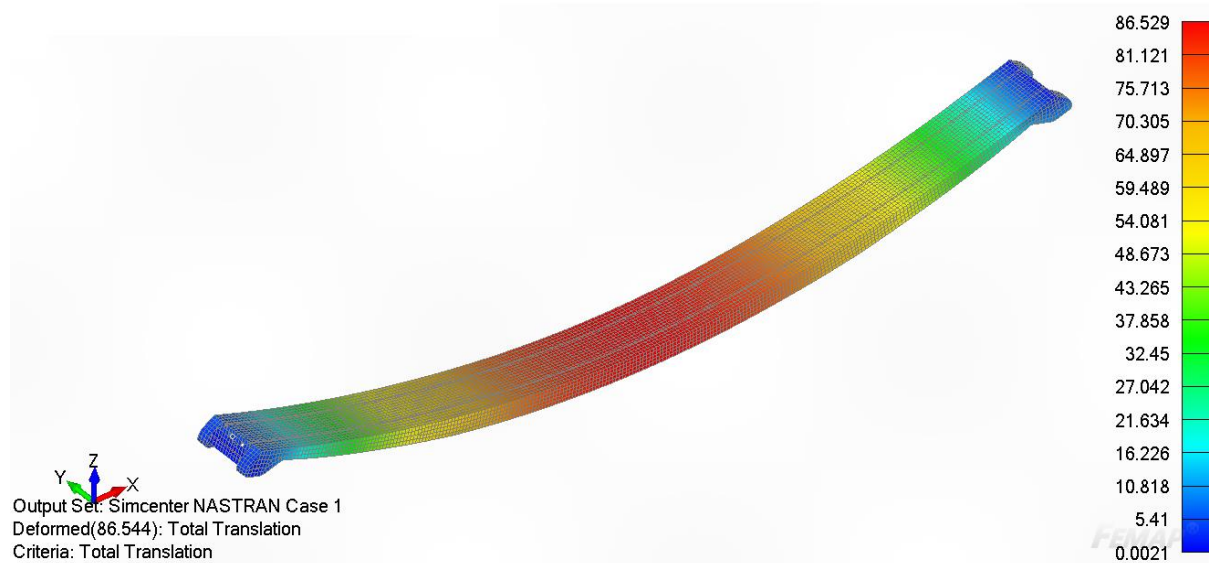
5.5. Analiza rezultata

Usporedba dvije projektne varijante će se temeljiti na analizi podataka globalnih strukturnih odziva dobivenih metodom konačnih elemenata. Usporedba varijanti je na osnovi pomaka, naprezanja te mase konstrukcije.

5.5.1. Varijanta 1

5.5.1.1. Pomaci

Najveći pomak se ostvaruju pri stanju opterećenja (LC1) te iznosi: $\delta_{max,v1} = 85,5$ mm.

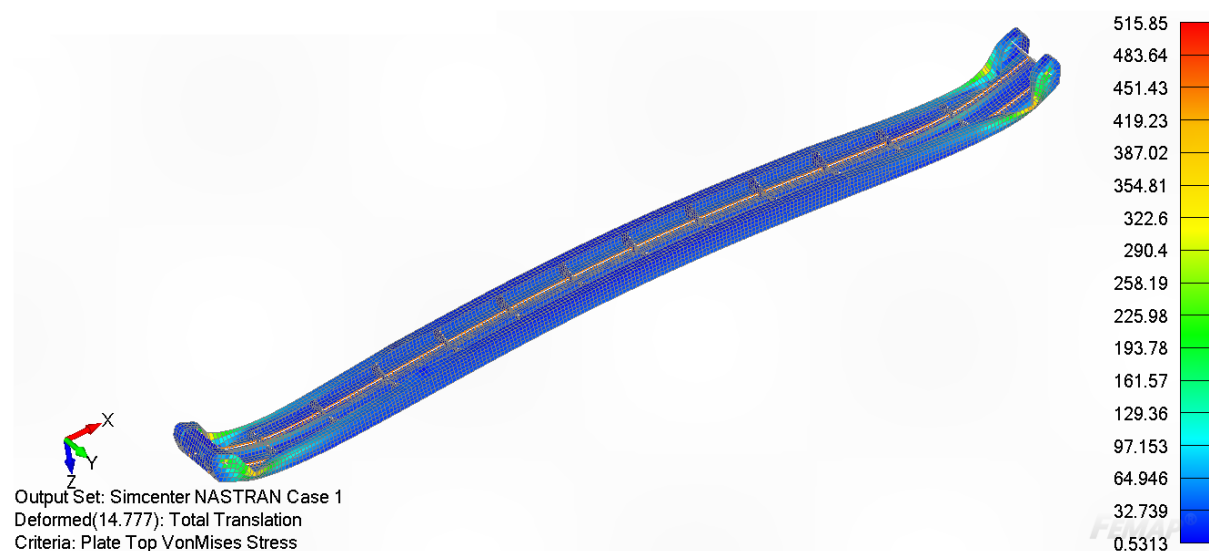


Slika 14. Progib varijante 1 za LC1

5.5.1.2. Naprezanja

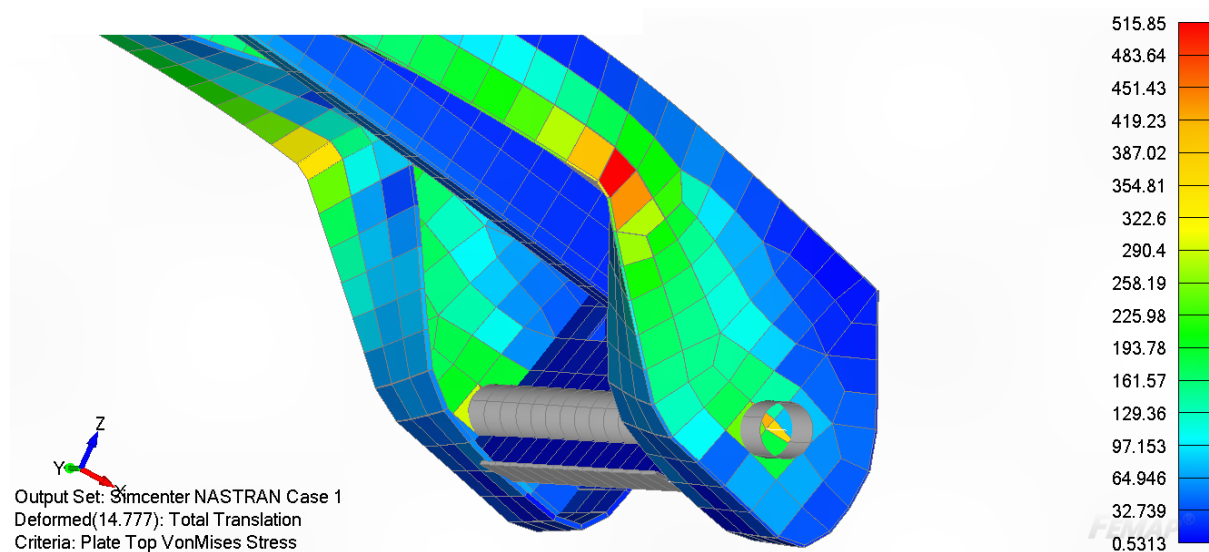
Do najvećeg naprezanja dolazi za stanje opterećenja LC2, iznos tog naprezanja je:

$$\sigma_{max,v1} = 515,85 \text{ N/mm}^2.$$



Slika 15. Najveća naprezanja varijante 1 za LC2 (pogled s donje strane)

Lokacija maksimalnog napreznja je pobliže prikazana ispod [Slika 16]:

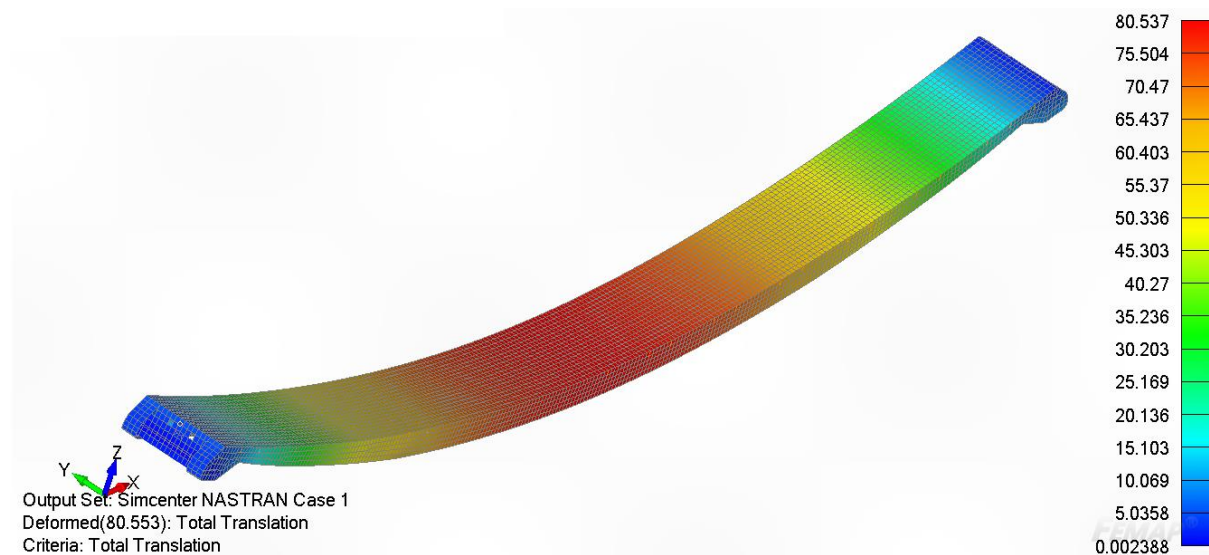


Slika 16. Detalj najvećeg napreznja za varijantu 1 (LC2)

5.5.2. Varijanta 2

5.5.2.1. Pomaci

Najveći pomak se ostvaruju pri stanju opterećenja (LC1) te iznosi: $\delta_{max,v2} = 80,5$ mm.

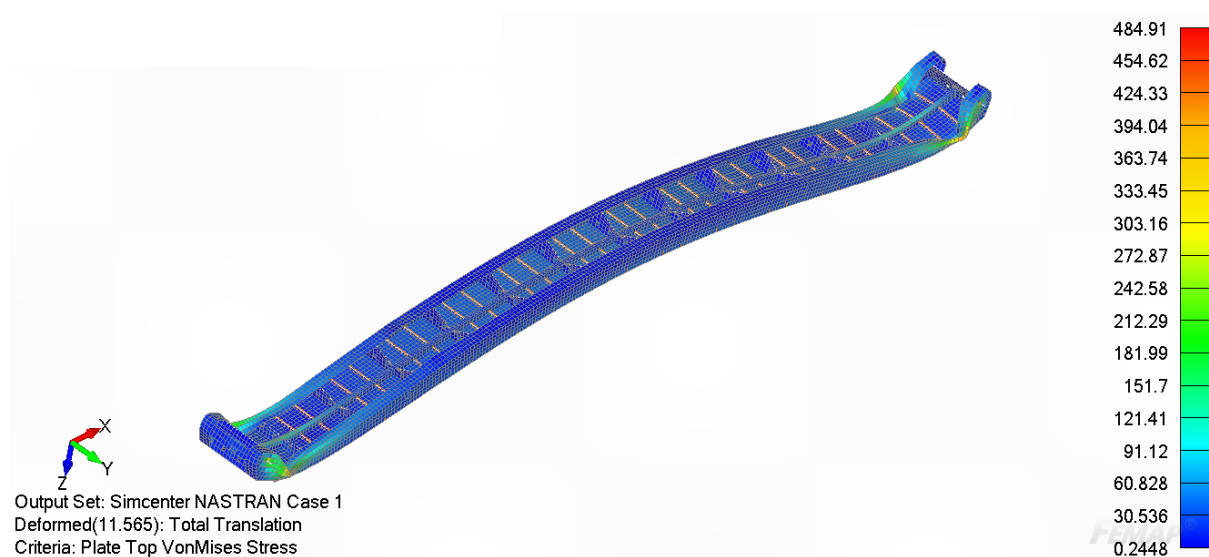


Slika 17. Progib varijante 2 za LC1

5.5.2.2. Naprezanja

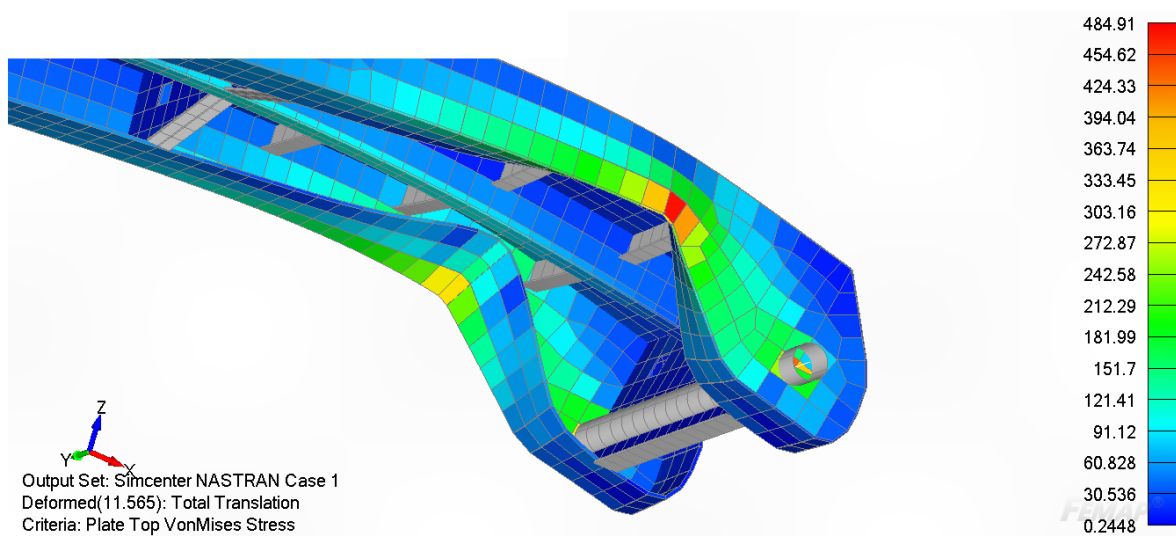
Najveće naprezanje nastupa pri stanju opterećenja LC2 te to naprezanje iznosi:

$$\sigma_{\max, v2} = 484,91 \text{ N/mm}^2.$$



Slika 18. Najveća naprezanja varijante 2 za LC2 (pogled s donje strane)

Na slici ispod je prikazana lokacija najvećeg naprezanja [Slika 19]:



Slika 19. Detalj najvećeg naprezanja za varijantu 2 (LC2)

5.5.3. Usporedba projektnih varijanti

Radi lakše usporedbe, vrijednosti pomaka i naprezanja kao i masa su prikazane u [Tablica 8]. FEMAP je opremljen opcijom pod nazivom „*Mass properties*“ koja za zadani model daje ukupnu masu modela te su prema tome dobivene vrijednosti masa. Prilikom očitavanja vrijednosti korišten je iznos gustoće čelika prema [Tablica 1].

Tablica 8. Usporedba projektnih varijanti

	Varijanta 1	Varijanta 2
Maksimalni pomak	85,5 mm	80,5 mm
Maksimalno naprezanje	515,85 N/mm ²	484,91 N/mm ²
Masa	8 263 kg	9 206 kg

Konstruktivna razlika u projektnim varijantama je u debljini lima palube i orijentaciji ukrepa. Debljina lima palube za varijantu 1 iznosi 8 mm, dok je za varijantu 2 ta vrijednost 11 mm. Varijanta 1 sadrži uzdužne ukrepe dok varijanta 2 poprečne. Iznosi maksimalnih naprezanja nisu u granicama dopuštenih te je potrebno promijeniti kritični dio konstrukcije. Razlika u pomacima iznosi 5 mm, što je s obzirom na duljinu pristupne rampe od 23,95 m gotovo zanemarivo mala vrijednost. Masa konstrukcije varijante 2 je veća od mase varijante 1 za 943 kg što iznosi preko 10 %. Prema tome se varijanta 1 uz za finalnu fazu projektiranja.

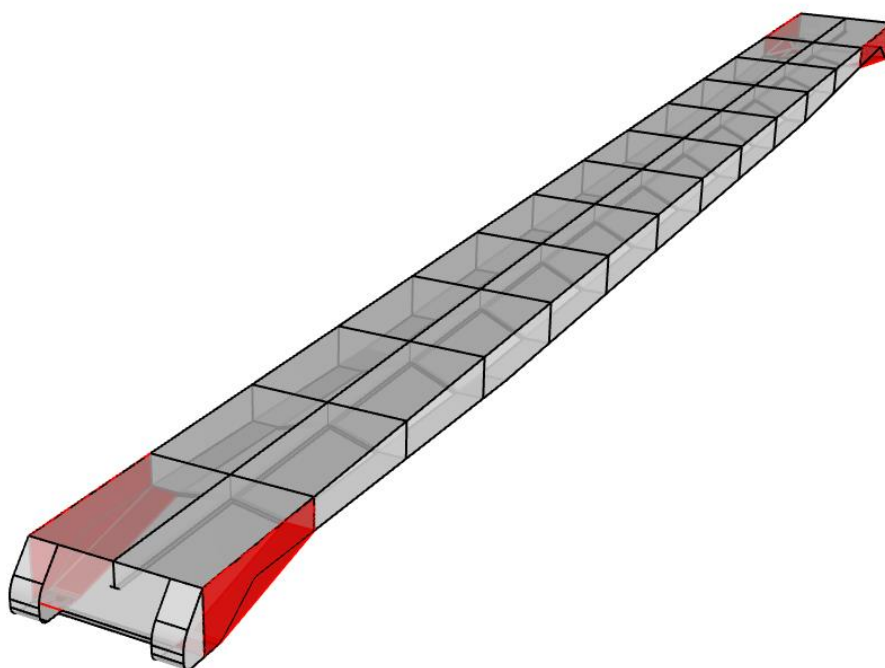
6. DIREKTNI PRORAČUN U FINALNOJ FAZI PROJEKTIRANJA

6.1. Uvod

Varijanta s uzdužnim ukrepama se pokazala povoljnijom za ovu pristupnu rampu. Potrebno je napraviti određene preinake na konstrukciji kako bi se izbjegla velika koncentracija naprezanja na mjestu nagle promjene geometrije struka. Uz to u području oko nosača za privez potrebno je promijeniti debljinu struka nosača kako bi se i tamo dovela naprezanja u razinu dopuštenih. U konačnici potrebno je provesti kontrolu na izvijanje konačnog modela.

6.2. Promjena geometrije struka

Prema prošlom poglavlju [Slika 16], u području nagle promjene geometrije struka dolazi do velike koncentracije naprezanja, a time i velike deformacije. Taj detalj će se izvesti blagom promjenom geometrije koja će sezati do rebrenice te je prikazano na [Slika 20].



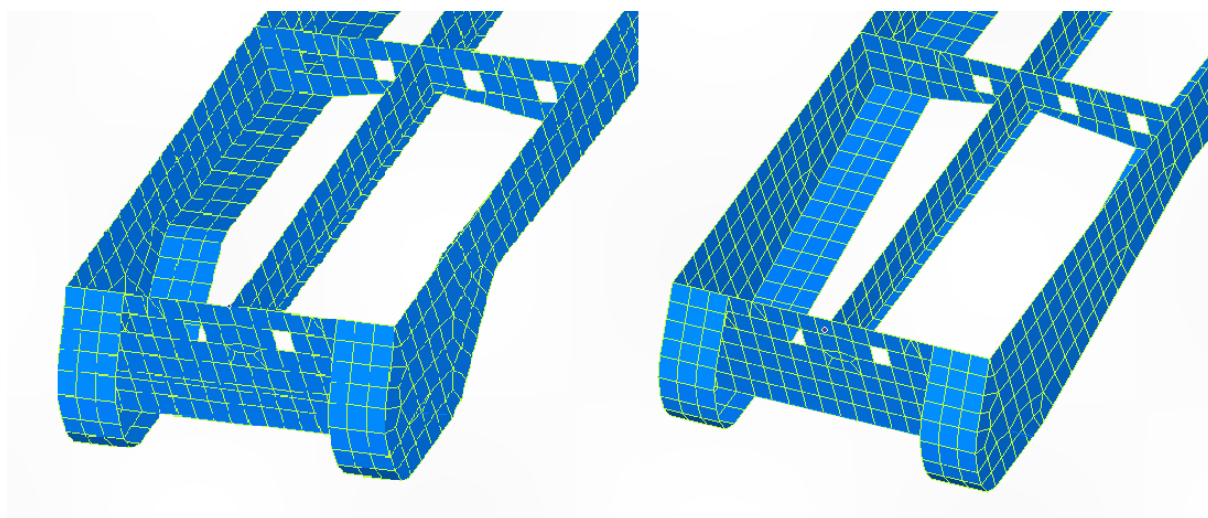
Slika 20. Promjena geometrije struka

6.3. Promjena konačnih elemenata oko nosača za privez

Promjena konačnih elemenata oko nosača za privez bazira se na promjeni mreže konačnih elemenata, kao i na promjeni debljine struka.

6.3.1. Promjena mreže konačnih elemenata

Uz promjenu geometrije potrebno je napraviti novu mrežu konačnih elemenata. Uređivanje mreže pomicanjem čvorova u području nosača za privez gubi se potreba za elementima malih dimenzija. Nova mreža konačnih elemenata je prikazana na slici ispod u usporedbi s prvobitnom.



Slika 21. Prvobitna mreža (lijevo), nova mreža (desno)

6.3.2. Promjena debljine struka

S ciljem smanjenja naprezanja u struku na području nosača za privez, potrebno je povećati debljinu struka. Povećanje debljine struka je u području od rubova palube prema sredini za 1 m. Debljina struka u tom području iznosi $t_s = 13$ mm. Naznačeno područje je prikazano na [Slika 22].



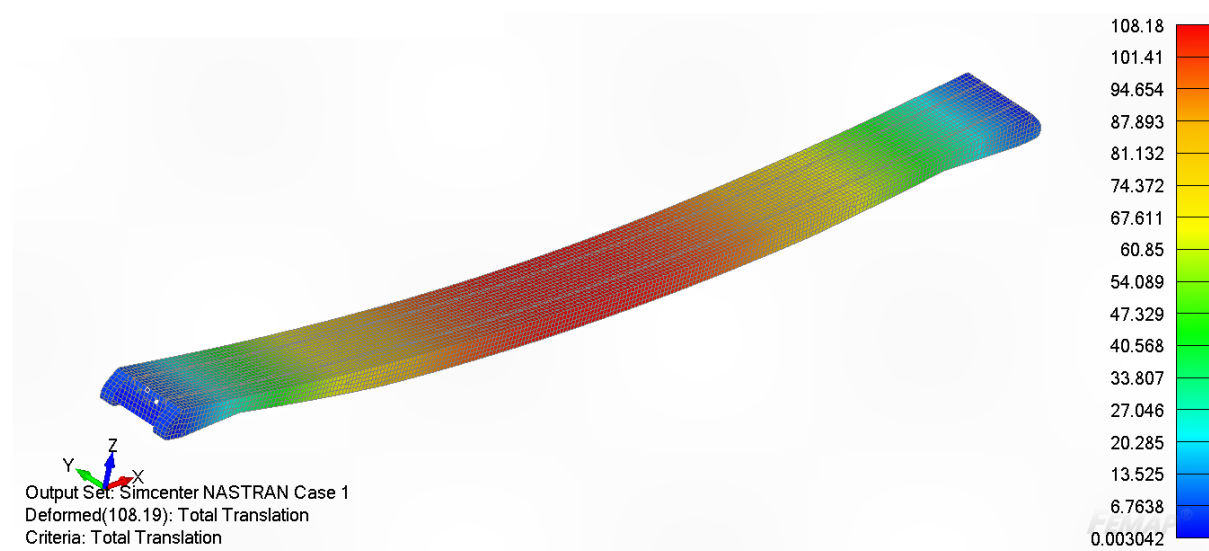
Slika 22. Područje povećanja debljine struka

6.4. Analiza rezultata

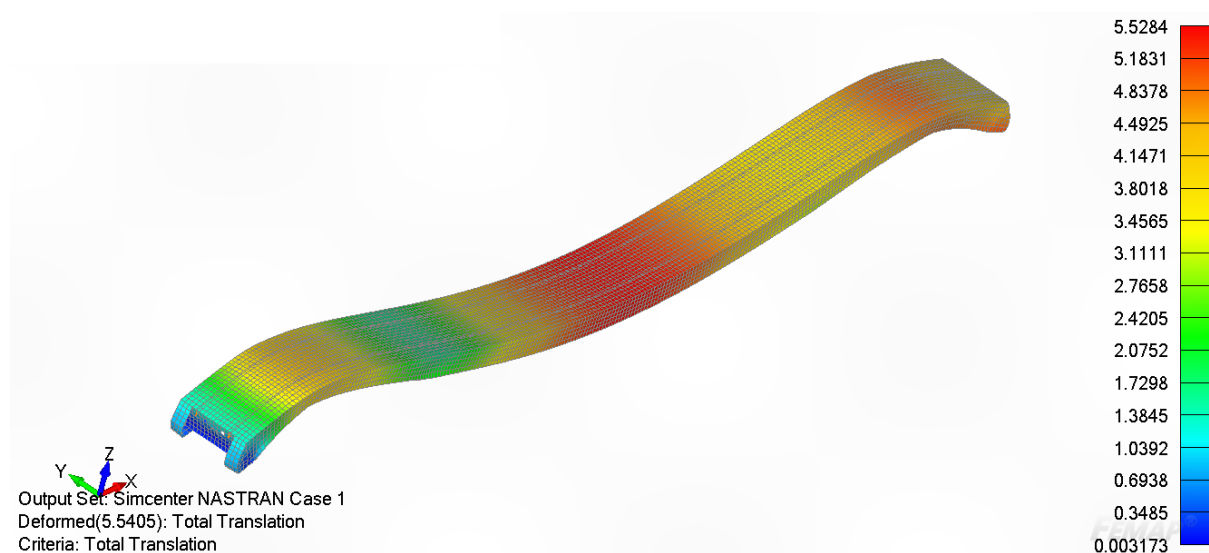
Nakon promjene karakteristika konstrukcije, tako da se naprezanja nalaze u granicama dopuštenih, potrebno je analizirati rezultate. Analiza je provedena pri istim slučajevima opterećenja te rubnim uvjetima opisanim u konceptnoj fazi projektiranja.

6.4.1. Pomaci

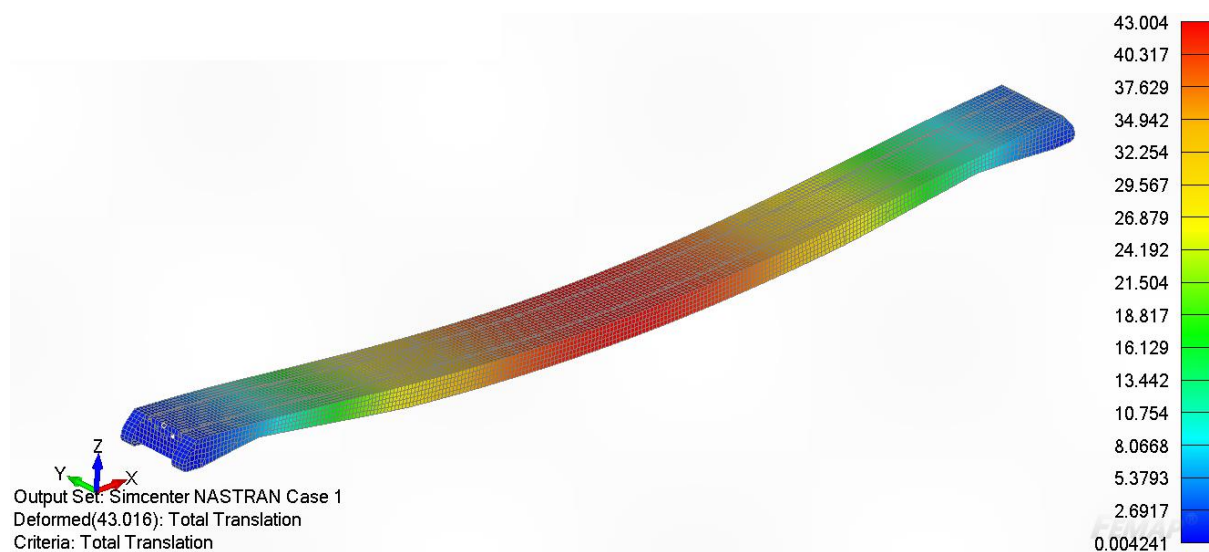
Deformacije na sljedećim slikama su prikazane u duplo većoj mjeri.



Slika 23. Prikaz progiba za LC1



Slika 24. Prikaz progiba za LC2



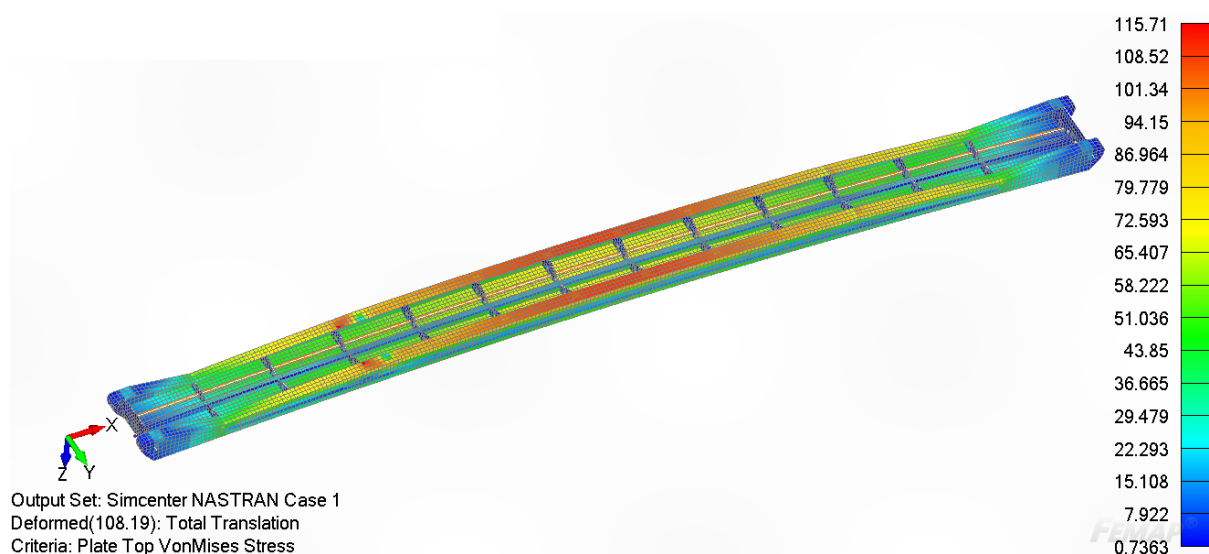
Slika 25. Prikaz progiba za LC3

Do najvećeg pomaka konstrukcije dolazi pri LC1 i taj pomak iznosi: $\delta_{max} = 108,2$ mm. Prema kriterijima savojne krutosti kojima su prihvatljivi pomaci do $\frac{L}{200}$, pomaci ove konstrukcije su u granici prihvatljivih.

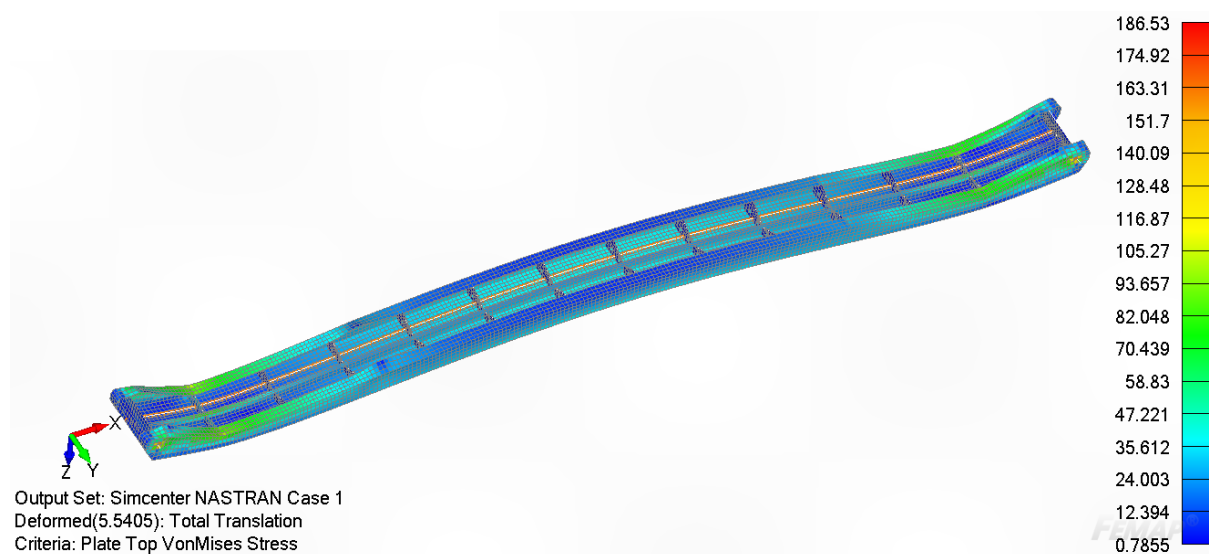
6.4.2. Naprezanja

Kako je navedeno prema pravilima HRB-a [1] dopušteno naprezanje iznosi: $\sigma_{dop} = 190$ N/mm².

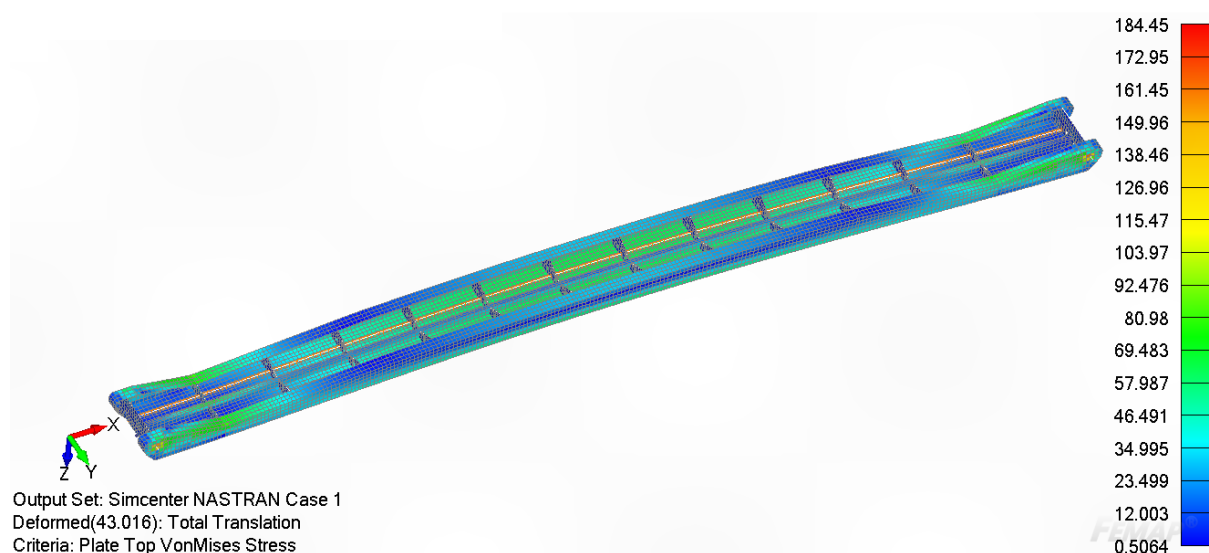
Prikaz naprezanja na sljedećim slikama bit će prikaza preko Von Mises naprezanja.



Slika 26. Von Mises naprezanja za LC1 (pogled s donje stranje)

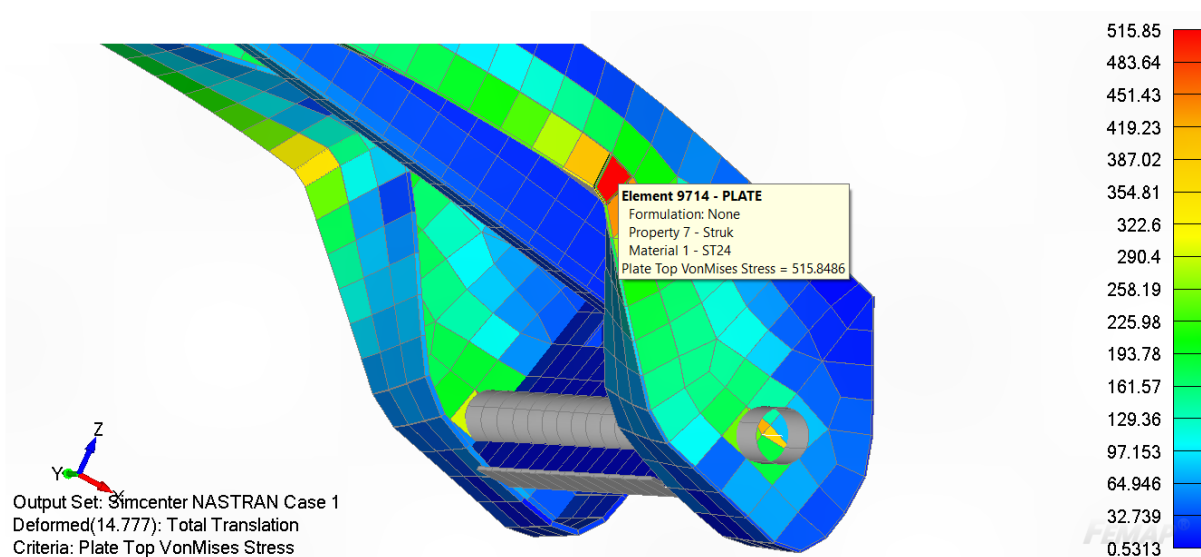


Slika 27. Von Mises naprezanja za LC2 (pogled s donje strane)

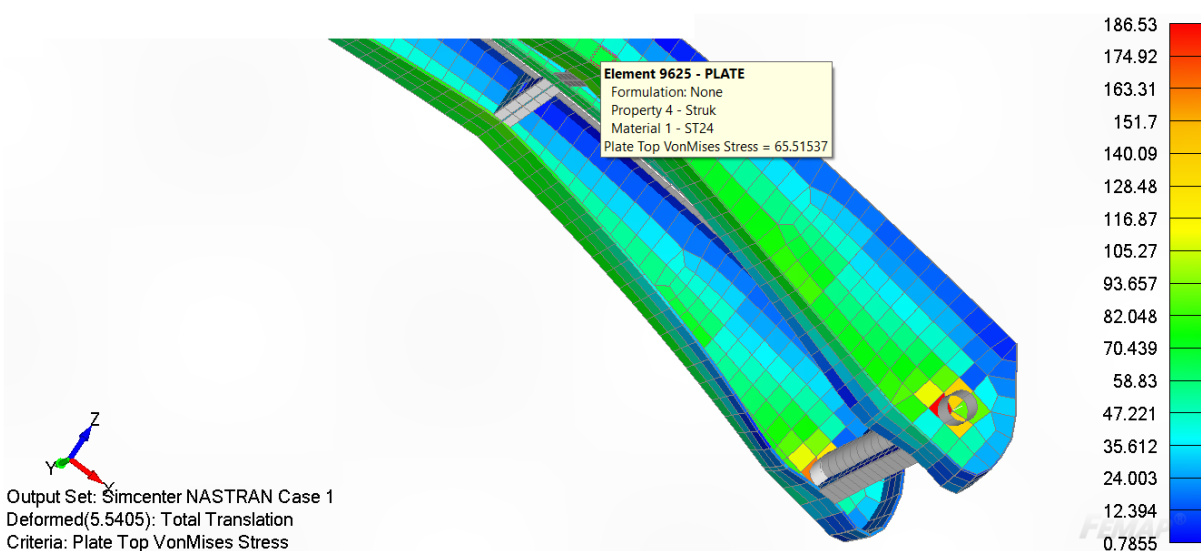


Slika 28. Von Mises naprezanja za LC3 (pogled s donje strane)

Na [Slika 29] je prikazan kritični detalj na projektnoj varijanti 1. Reprojektiranjem pristupne rampe postepenim smanjenjem visine struka uočava se da je pomaknut kritični detalj te da je naprezanje u njemu u granicama dopuštenih, kao što je prikazano na [Slika 30].



Slika 29. Kritični detalj za LC2 na inicijalna geometrija pristupne rampe



Slika 30. Rješenje kritičnog detalja za LC2 na reprojektiranoj geometriji pristupne rampe

Naprezanja za sva stanja opterećenja su manja od dopuštene vrijednosti. Najveće stanje naprezanja i dalje prevladava u području kod nosača za privez, no može se uočiti da se modifikacijom konstrukcije značajno smanjilo naprezanje.

6.5. Kontrola izvijanja

Pomoću stvarnih naprezanja koja se javljaju na konstrukciji potrebno je provesti kontrolu na izvijanje prema pravilima iz HRB-a[1]. Za proračun izvijanja potrebno je uzeti srednje naprezanje u određenom polju. Pošto FEMAP nema tu mogućnost, za vrijednost stvarnih naprezanja uzeta je vrijednost naprezanja najvećeg elementa, što predstavlja dodatnu sigurnost na izvijanje. Također su naprezanja uzeta iz najkritičnije stanja opterećenja za pojedini element.

6.5.1. Lokalno izvijanje lima palube

Izvijanje palube će se provjeriti u smjeru osi X i Y. Idealno elastično savojno naprezanje uslijed aksijalnog naprezanja definirano je izrazom (4), te preko uvjeta (5) i (6) slijedi izraz za kritično naprezanje. Prema jednadžbi (7) slijede vrijednosti prikazani u Tablica 9:

Tablica 9. Izvijanje lima palube

	σ_c	$f_s \cdot \sigma_a$
Smjer X	161,44 N/mm ²	77 N/mm ²
Smjer Y	57,97 N/mm ²	5,5 N/mm ²

Stvarno tlačno naprezanje uzeto je prema LC1. Prema ovom kriteriju neće doći do izvijanja lima palube.

6.5.2. Izvijanje prirubnice

Izvijanje prirubnice se provodi na analogan način kao i izvijanje palube. Prema jednadžbi (7) slijede vrijednosti prikazane u Tablica 10:

Tablica 10. Izvijanje prirubnice

	σ_c	$f_s \cdot \sigma_a$
Smjer X	126,3 N/mm ²	126 N/mm ²

Stvarno tlačno naprezanje uzeto je prema LC2. Prema ovom kriteriju neće doći do izvijanja prirubnice.

6.5.3. Izvijanje struka

Izvijanje horizontalnih elemenata se provodi uslijed smičnih napreznja. Napreznje idealnog elastičnog savijanja uslijed smičnog napreznja, računa se prema pravilima HRB-a [1]:

$$\tau_E = 0,9 \cdot f_B \cdot E \cdot \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad (16)$$

Kritično smično napreznje za izvijanje je određeno izrazima:

$$\tau_C = \tau_E \quad \text{ako je} \quad \tau_E \leq \frac{R_{eH}}{2 \cdot \sqrt{3}} \quad (17)$$

$$\tau_C = \frac{R_{eH}}{\sqrt{3}} \cdot \left(1 - \frac{R_{eH}}{4 \cdot \sqrt{3} \cdot \tau_E}\right) \quad \text{ako je} \quad \tau_E > \frac{R_{eH}}{2 \cdot \sqrt{3}} \quad (18)$$

Dobiveno kritično smično napreznje mora biti veće od stvarnog napreznja pomnoženog s faktorom sigurnosti koji je zadan u pravilima [1]:

$$\tau_C \geq f_s \cdot \tau_a \quad (19)$$

Iz jednadžbe (19) slijede vrijednosti zapisane u Tablica 11:

Tablica 11. Izvijanje struka

	τ_C	$f_s \cdot \tau_a$
Smjer X	118,51 N/mm ²	25,3 N/mm ²

Stvarno smično napreznje uzeto je prema LC1. Prema ovom kriteriju neće doći do izvijanja struka.

6.5.4. Izvijanje T profila

Izvijanje struka T profila definirano je izrazom prema pravilima HRB-a [1]. Napreznje idealnog elastičnog savijanja uslijed aksijalnog napreznja, računa se prema izrazu:

$$\sigma_E = 3,6 \cdot E \cdot \left(\frac{t_w}{h_w}\right)^2 \quad (20)$$

Ostatak proračuna je prema izrazima (5), (6) i (7). Prema jednadžbi (7) slijede vrijednosti prikazane u Tablica 12 za T profil:

Tablica 12. Izvijanje T profila

	σ_c	$f_s \cdot \sigma_a$
Smjer X	216,82 N/mm ²	63,6 N/mm ²

Stvarno tlačno naprezanje uzeto je prema LC3. Prema ovom kriteriju neće doći do izvijanja struka T profila.

6.5.5. Izvijanje ukrepa

Proračun izvijanja ukrepama se provodi prema izrazu (15) uzimajući u obzir sunosivu širinu ukrepa. Uzimajući u obzir uvjete prema izrazima (5) i (6) slijedi jednadžba (7) pomoću kojeg su dobivene vrijednosti prikazane u [Tablica 13]:

Tablica 13. Izvijanje ukrepa

	σ_c	$f_s \cdot \sigma_a$
Smjer X	206,11 N/mm ²	74,8 N/mm ²

Stvarno tlačno naprezanje uzeto je prema LC1. Prema ovom kriteriju neće doći do izvijanja ukrepa.

6.5.6. Proračun čvrstoće na izvijanje rampe kao globalne grede

Promatranjem pristupne rampe kao zglobno oslonjene globalne grede konstantnog poprečnog presjeka može se izračunati kritična sila pri kojoj dolazi do izvijanja. Proračun je proveden prema izrazima (15). Uzimajući u obzir uvjete (5) i (6) slijedi izraz za kritično naprezanje (σ_c). Dijeljenjem kritičnog naprezanja s površinom poprečnog presjeka pristupne rampe slijedi izraz za iznos kritične sile izvijanja. Prema tome kritična sila iznosi: $F_{kr} = 5\,318$ kN. Vrijednost kritičnih sila je veća od tlačne sile (koja iznosi 1 000 kN) kojom je opterećena konstrukcija te prema ovom kriteriju neće doći do izvijanja pristupne rampe kao globalne grede.

6.6. Kontrola smičnog naprezanja nosača za privez

Smično naprezanje nosača za privez definirano je izrazom (10). Ukupna sila koja djeluje na nosač je izračunata u FEMAP-u preko reakcijskih sila. Sastoji se od X i Z komponente njihova te rezultanta sila daje ukupnu silu. Dopušteno smično naprezanje definirano je prema pravilima HRB-a [1] te iznosi $\tau_{\text{dop}} = 110 \text{ N/mm}^2$ za brodograđevni čelik klase A. Prema izrazu (10) slijedi: $\tau_s = 76,92 \text{ N/mm}^2$ i ne prelazi vrijednost dopuštenog smičnog naprezanja.

7. ZAKLJUČAK

Pristupne rampe su neophodan dio plovnih pristana. One osiguravaju nesmetan ukrcaj i iskrcaj putnika pri različitim visinama vodostaja rijeka. Cilj ovog rada je projektiranje jedne takve pristupne rampe prema inicijalnoj geometriji zadane predloškom.

U prvoj fazi projektiranja, za zadanu inicijalnu geometriju, dimenzionirani su konstrukcijski elementi prema projektnim formulama i pravilima HRB-a za klasifikaciju brodova unutarnje plovidbe. Razmatrane su dvije projektne varijante koje se razlikuju po duljini i orijentaciji ukrepa palube.

Kroz drugu fazu projektiranja proveden je direktni proračun konstrukcijskih elemenata pristupne rampe te je provedena kontrola globalnih strukturnih odziva metodom konačnih elemenata. Izrađene geometrije u programu Rhinoceros bilo je potrebno ubaciti u program FEMAP u kojem su modelirani globalni modeli. Dobivenim rezultatima su utvrđeni dijelovi konstrukcije koje je potrebno modificirati. Također je na temelju mase, određeno da je varijanta s uzdužnim ukrepama palube povoljnija od varijante s poprečnim ukrepama palube. Razlika u masi spomenutih varijanta iznosi 943 kg.

U završnoj fazi projektiranja promijenjena je geometrija struka zbog velike koncentracije naprezanja na mjestu nagle promjene geometrije. Navedenom promjenom postignuta su manja naprezanja koja zadovoljavaju kriterij dopuštenih naprezanja. U području spoja nosača za privez i struka također dolazi do velikih naprezanja. Posljedično tome promijenjena je debljina lima u tom području s početnih 9 mm na konačnih 13 mm. Nakon reprojektiranja konstrukcije provedena je konačna analiza kojom je utvrđeno da konstrukcija zadovoljava kriterije dozvoljenih naprezanja i izvijanja. U konačnici ove faze provedena je kontrola pristupne rampe na izvijanje kao globalne grede. Time pristupna rampa zadovoljava sve promatrane kontrole.

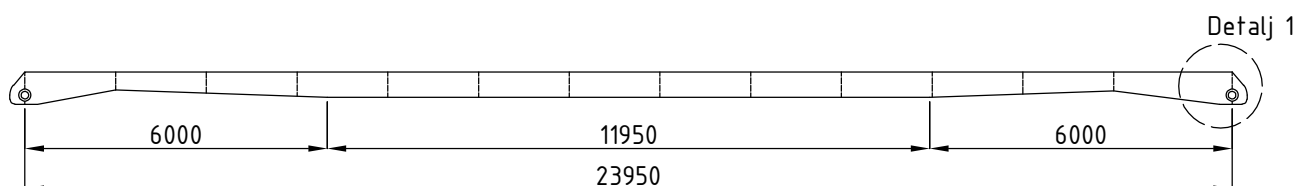
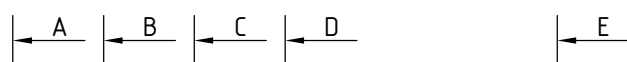
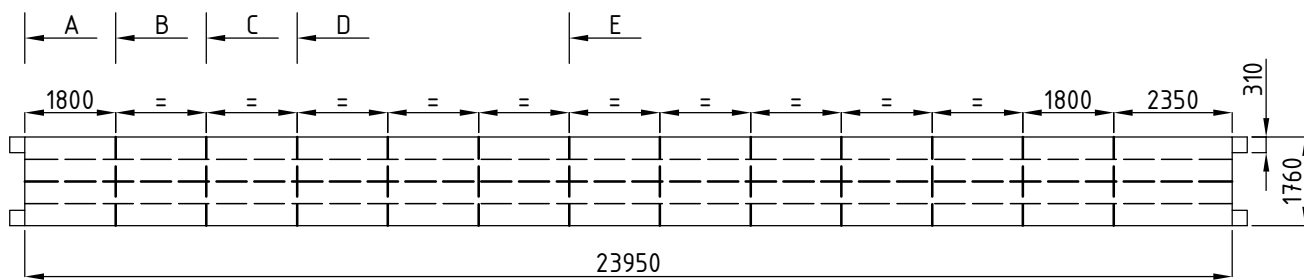
Naposljetku, nakon provedenih modifikacija na pristupnoj rampi, prema konačnoj konstrukciji su napravljeni nacrti pristupne rampe u razini klasifikacijske dokumentacije koji su priloženi uz rad.

LITERATURA

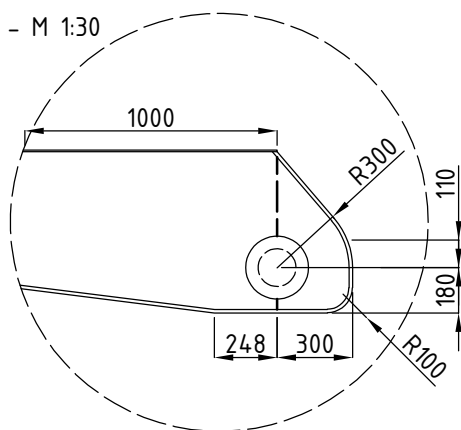
- [1] Croatian Register of Shipping: Rules for the Classification of Inland Navigation Vessels, Part 2 - Hull and Hull Equipment, July 2021
- [2] <https://www.rhino3d.com/>, 18.02.2023.
- [3] <https://www.plm.automation.siemens.com/store/en-nl/femap/index.html>, 18.02.2023.
- [4] <https://www.vikingrivercruises.com/ships/longships/viking-egil.html>, 18.02.2023.
- [5] <https://icat.hr/hr/component/content/article/8-icat/47-idejni-projekt-putnickog-pristana?Itemid=176>, 18.02.2023.
- [6] Kraut, B., Krautov strojarski priručnik, Sajema, 2009.

PRILOZI

I. Tehnička dokumentacija


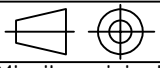


Detalj 1 - M 1:30

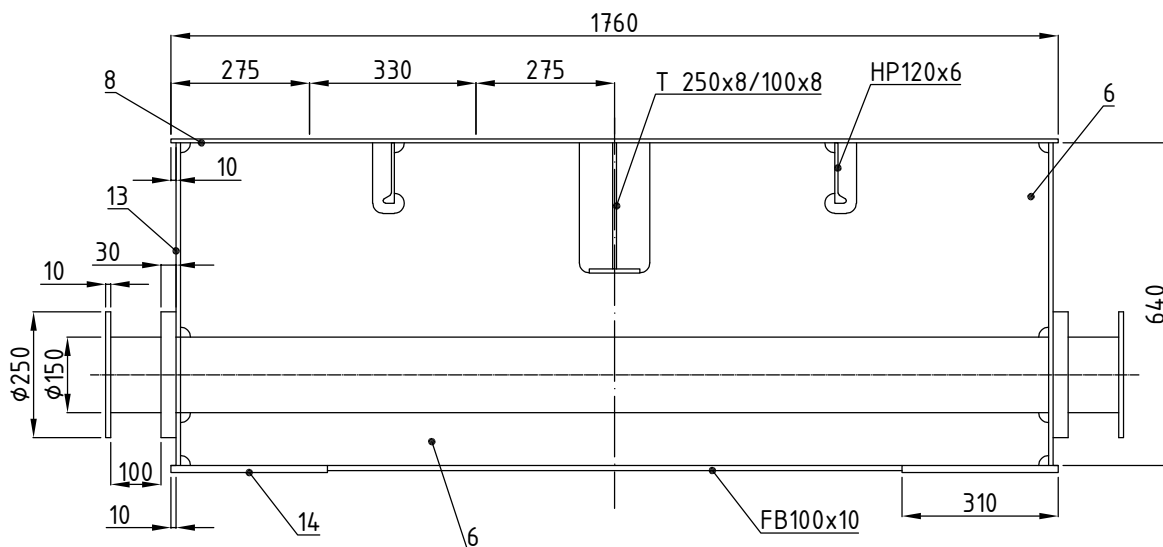


NAPOMENA:

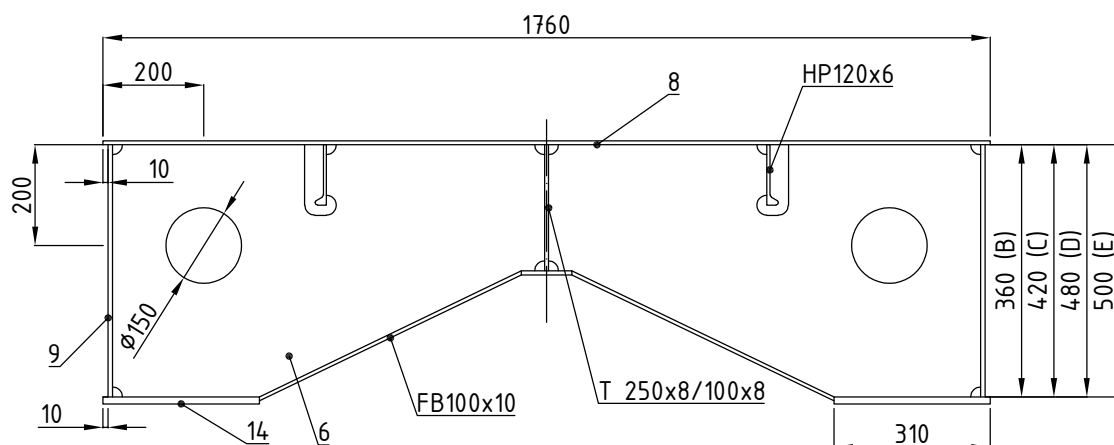
- do 1000 mm mjereno od ruba palube, debljina struka iznosi 13 mm (vrijedi za oba kraja pristupne rampe), za ostalo područje debljina struka iznosi 9 mm

Projektirao	Datum	Ime i prezime	Potpis		
Razradio	21.2.2023	Tin Dolšak			
Crtao	21.2.2023	Tin Dolšak			
Pregledao		Jerolim Andrić			
Objekt: Pristupna rampa			Objekt broj:		
			R. N. broj:		
Napomena:			Kopija		
Materijal: Brodograđevni čelik klase A		Masa:			
 Naziv:		Pozicija:			
Mjerilo originala		Format: A4			
M 1:150		Konstrukcija pristupne rampe		Listova: 2	
Crtež broj: 1			List: 1		

Presjek A-A



Presjeci B-B, C-C, D-D, E-E



Projektirao	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb
Razradio	21.2.2023	Tin Dolšak		
Crtao	21.2.2023	Tin Dolšak		
Pregledao		Jerolim Andrić		
Objekt:			Objekt broj:	
Pristupna rampa			R. N. broj:	
Napomena:				Kopija
Materijal: Brodograđevni čelik klase A		Masa:		
	Naziv:		Pozicija:	Format: A4
Mjerilo originala	Prikaz presjeka			Listova: 2
M 1:15	Crtež broj: 2			List: 2