

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Robert Geljić

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

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

Student:

Robert Geljić

Zagreb, 2022.

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

Zahvaljujem mentoru prof.dr.sc. Jerolimu Andriću na strpljenju, povjerenju, uloženom trudu i vremenu koje mi je posvetio tijekom izrade ovog rada, ali i tijekom studiranja.

Zahvaljujem i svojim roditeljima, braći i djevojci Ivi Klari jer su uvijek stajali iza mene te mi pružali ljubav i povjerenje, kao i svima ostalima koji su mi bili podrška tijekom studiranja.

Također zahvaljujem kolegi Marku Lacmanoviću iz tvrtke MacGregor na pruženoj pomoći oko diplomskog rada

Robert Geljić



Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 22 – 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 22 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Robert Geljić**

JMBAG: 0035212354..

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Projektiranje konstrukcije dvoradne pristupne rampe za RO-RO brodove**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Structural design of tilting ramp for RO-RO ships**

Opis zadatka:

Dvoradna pristupna rampa je dio RoRo opreme broda i služi za komunikaciju vozila između palubama, a specifična je po svojoj duljini i dvoradnoj funkciji - što znači da se mogu koristiti šarniri na pramčanoj ili krmenoj strani rampe, te se vozila mogu iskrcavati bez okretanja ili vožnje unatrag.

U okviru diplomskog zadatka potrebno je:

1. Analizirati dostupnu literaturu za projektiranje dvoradnih rampi te se detaljno upoznati s relevantnim pravilima DNV-a.
2. Definirati tip, prikladnu geometriju rampe uzimajući u obzir njenu funkciju te geometrijska, tehnološka i druga ograničenja, pri čemu ulazne podatke uzeti prema zadanom predlošku.
3. Usporediti dva tipa konstrukcije rampe:
 - konstrukcija s niskim uzdužnim nosačima visine do 1100 mm ispod pokrova
 - konstrukcija s visokim bočnim stranicama visine do 1000 mm iznad pokrova i nosačima proračunate potrebne visine ispod pokrova

Za obje opcije usporediti masu, progibe i potreban broj oslonaca.

4. Projektirati konstrukcijske elemente rampe korištenjem AH36 čelika kao građevnog materijala za zahtijevane slučajeve opterećenja. Opterećenje od vozila uzeti prema zadanom predlošku.
5. Izraditi detaljni 3D MKE model rampe koristeći pločaste konačne elemente sukladno Pravilima za direktne proračune te provesti proračun strukturnog odziva (pomaci, naprezanja).
6. Izvršiti analizu podobnosti konstrukcije prema strukturnim kriterijima (popuštanje, izvijanje) sukladno Pravilima DNV. U slučaju nezadovoljenja kriterija predložiti strukturno rješenje koje zadovoljava sve razmatrane kriterije.
7. Za odabranu konačnu varijantu konstrukcije izraditi 3D CAD model te osnovne klasifikacijske nacрте konstrukcije. Koristiti neke od računalnih programa dostupnih na FSB-u (AUTODESK INVENTOR, MAESTRO, FEMAP, ANSYS, itd.).

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

Zadatak zadan:

Datum predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

5. svibnja 2022.

7. srpnja 2022.

18. – 22. srpnja 2022.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Prof.dr.sc. Jerolim Andrić

Izv. prof. dr. sc. Ivan Čatipović

SADRŽAJ

SADRŽAJ	1
POPIS SLIKA	3
POPIS TABLICA.....	4
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE	5
POPIS OZNAKA	6
SAŽETAK.....	8
SUMMARY	9
1. UVOD.....	10
1.1. Cilj rada.....	12
2. PROJEKTNE ZNAČAJKE RAMPE	14
2.1. Osnovne dimenzije.....	14
2.2. Projektne varijante	15
2.3. Materijal.....	16
2.4. Definicija opterećenja	16
2.4.1. Opterećenje teretom	16
2.4.2. Opterećenje flap rampom.....	17
2.4.3. Opterećenje silom brtvljenja	18
2.4.4. Dodatna masa.....	18
3. DIMENZIONIRANJE KONSTRUKCIJSKIH ELEMENATA PO DNV PRAVILIMA. 19	
3.1. Uvod.....	19
3.2. Korozijski dodatak	19
3.3. Debljina oplate pokrova rampe	19
3.4. Ukrepe	20
3.5. Jaki uzdužni nosači	20
3.6. Poprečni nosači	21
4. DIMENZIONIRANJE KONSTRUKCIJSKIH ELEMENATA METODOM KONAČNIH ELEMENATA	22
4.1. Uvod.....	22
4.2. Strukturni model	22
4.3. Implementacija opterećenja	24
4.3.1. Opterećenje u luci	25
4.3.2. Opterećenje prilikom podizanja rampe	27
4.3.3. Opterećenje tijekom plovidbe	28
4.4. Rubni uvjeti.....	29
4.4.1. Rubni uvjeti u luci.....	30
4.4.2. Rubni uvjeti prilikom podizanja rampe	31
4.4.3. Rubni uvjeti tijekom plovidbe	31
4.5. Kriteriji podobnosti	32
4.6. Rezultati	34
4.6.1. Varijanta 1.....	35

4.6.1.1. Pomaci.....	35
4.6.1.2. Naprezanja	36
4.6.1.3. Podobnost.....	37
4.6.2. Varijanta 2.....	38
4.6.2.1. Pomaci.....	39
4.6.2.2. Naprezanja	40
4.6.2.3. Podobnost.....	41
4.7. Prijedlog podobne konstrukcije	43
4.7.1. Varijanta 1.....	43
4.7.2. Varijanta 2.....	45
4.8. Usporedba dviju varijanti.....	46
5. ZAKLJUČAK.....	49
LITERATURA.....	50
PRILOZI.....	51

POPIS SLIKA

Slika 1.	Primjer RO-RO broda [5].....	10
Slika 2.	USNS Comet [7]	11
Slika 3.	Shema pomične pristupne rampe [8].....	12
Slika 4.	Primjer pomične pristupne rampe [8].....	12
Slika 5.	Dimenzije rampe	14
Slika 6.	Skica obje varijante	15
Slika 7.	Otisci kotača s pripadnim osovinskim opterećenjem	17
Slika 8.	Strukturni model rampe varijante 1 (pogled s donje strane)	23
Slika 9.	Strukturni model rampe varijante 2 (pogled s gornje strane).....	24
Slika 10.	Skica opterećenja rampe za slučaj LC1	25
Slika 11.	Skica opterećenja rampe za slučaj LC2.....	26
Slika 12.	Skica opterećenja rampe za slučaj LC3.....	26
Slika 13.	Skica opterećenja rampe za slučaj LC4.....	26
Slika 14.	Zadano maseno opterećenje od otisaka kotača za LC1	26
Slika 15.	Implementacija opterećenja <i>flap</i> rampe	27
Slika 16.	skica opterećenja rampe za slučaj LC8	28
Slika 17.	Zadano uniformno raspoređeno opterećenje (crvena boja).....	29
Slika 18.	Zadano maseno opterećenje od otisaka kotača za LC8	29
Slika 19.	Zadano opterećenje uslijed brtvljenja.....	29
Slika 20.	Rubni uvjeti u luci	30
Slika 21.	Rubni uvjeti prilikom podizanja rampe.....	31
Slika 22.	Rubni uvjeti tijekom plovidbe	32
Slika 23.	Pogibi prototipa varijante 1 za LC6	36
Slika 24.	Von Mises naprezanja prototipa varijante 1 za LC5	37
Slika 25.	Faktor podobnosti PCMY prototipa varijante 1 za LC5	38
Slika 26.	Progibi prototipa varijante 2 za LC6	40
Slika 27.	Von Mises naprezanja prototipa varijante 2 za LC1	41
Slika 28.	Faktor podobnosti PCMY prototipa varijante 2 za LC5	43
Slika 29.	Debljine limova redimenzionirane varijante 1	44
Slika 30.	Faktor podobnosti PCMY redimenzionirane varijante 2 za LC5.....	44
Slika 31.	Debljine limova redimenzionirane varijante 2	45
Slika 32.	Von Mises naprezanja redimenzionirane varijante 2 za LC5.....	46
Slika 33.	Raspored naprezanja zbog savijanja po visini nosača [11]	47
Slika 34.	3D CAD model konačne konstrukcije.....	48

POPIS TABLICA

Tablica 1. Osnovni podaci o brodu	14
Tablica 2. Minimalna širina rampe.....	15
Tablica 3. Svojstva čelika povišene čvrstoće AH36	16
Tablica 4. Inicijalni profili jakih uzdužnih nosača	20
Tablica 5. Inicijalni profili poprečnih nosača.....	21
Tablica 5. Pregled slučajeva opterećenja	24
Tablica 6. Pripadni γ razmatranih kriterija podobnosti u MAESTRU [2]	33
Tablica 7. Dopušteno σ_{vm} za AH36 u grubom MKE modelu [1]	33
Tablica 8. Dozvoljeni progibi rampe.....	34
Tablica 9. Razmatrani kriteriji podobnosti.....	34
Tablica 10. Progibi prototipa varijante 1	35
Tablica 11. Von Mises naprezanja prototipa varijante 1	36
Tablica 12. Faktori podobnosti prototipa varijante 1	38
Tablica 13. Progibi prototipa varijante 2.....	39
Tablica 14. Von Mises naprezanja prototipa varijante 2.....	41
Tablica 15. Faktori podobnosti prototipa varijante 2	42
Tablica 16. Najnepovoljniji kriteriji podobnosti predloženih rješenja konstrukcije	47
Tablica 17. Usporedba masa predloženih rješenja	48

POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE

- 1 Konstrukcija dvoradne pristupne rampe

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
L_{OA}	m	Duljina broda preko svega
L_{BP}	m	Duljina broda između okomica
B	m	Širina broda
T	m	Gaz broda
D	m	Visina broda
C_B	/	Koeficijent punoće
$V_{SERVICE}$	čv	Brzina broda u službi
ρ	kg/m ³	Gustoća
E	N/mm ²	Modul elastičnosti
G	N/mm ²	Modul smika
ν	/	Poissonov omjer
R_e	N/mm ²	Granica razvlačenja
R_m	N/mm ²	Vlačna čvrstoća
k	/	Koeficijent materijala
q_m	t/m ²	Maseno opterećenje
q	kN/m	Linearno distribuirana sila brtvljenja
m	t	Dodatna masa
l	mm	Razmak poprečnih okvira
b	mm	Razmak uzdužnjaka
t_C	mm	Korozijski dodatak
t	mm	Debljina oplata
a	/	Koeficijent
b	/	Koeficijent
L_2	m	Proračunska duljina
α_p	/	Omjer širine i duljine panela
k_W	/	Koeficijent
c	mm	Širina opterećenja
b	mm	Širina panela
p_{wt-1}	kN/m ²	Tlak od kotača u luci
m	/	Faktor momenta savijanja
C_a	/	Koeficijent dopuštenog naprezanja za oplatu
R_{eH}	N/mm ²	Granica razvlačenja
Q	t	Maksimalno osovinsko opterećenje
n_0	/	Broj opterećenih površina po osovini
a_1	mm	Duljina otiska kotača
b_1	mm	Širina otiska kotača
g	m/s ²	Zemljina sila teže

p_{wl-2}	kN/m^2	Tlak kotača tijekom plovidbe
a_z	m/s^2	Vertikalno ubrzanje
Z	cm^3	Zahtijevani moment otpora profila
p	kN/m^2	Tlak
k_z	/	Koeficijent
d	mm	Duljina opterećenja
l_{bdg}	m	Nepoduprti raspon ukrepa
C_S	/	Koeficijent dopuštenog naprezanja za profile
α_v	/	Dinamički koeficijent
m_k	t	Ukupna masa konstrukcije
m_t	t	Ukupna masa tereta
F_{flap}	kN	Ukupna sila <i>flap</i> rampe
F_b	kN	Ukupna sila brtvljenja
$F_{v,uk}$	kN	Ukupna vertikalna sila
F	kN	Sila brtvljenja
g	/	Faktor podobnosti
C	N/mm^2	Izdržljivost
D	N/mm^2	Zahtjev
γ	/	Faktor sigurnosti
γ_y	/	Faktor sigurnosti pri popuštanju
σ_{vm}	N/mm^2	Von Mises naprezanje
δ_{max}	mm	Dozvoljeni progib
L	mm	Duljina između dva oslonca
δ	mm	Progib
$\sigma_{vm, max}$	N/mm^2	Dopušteno Von Mises naprezanje
$\sigma_{vm,MKE}$	N/mm^2	Von Mises naprezanje MKE modela
m	t	Masa MKE modela
Δm	t	Razlika u masi

SAŽETAK

Cilj ovog rada je projektiranje konstrukcije dvoradne pristupne rampe za RO-RO brodove prema pravilima klasifikacijskog društva Det Norske Veritas (DNV) [1].

Projektiranje je provedeno u dvije faze. U prvoj fazi je prema preskriptivnim pravilima DNV-a dimenzionirana debljina pokrova rampe i profili ukrepa te su određene inicijalne dimenzije i raspored ostalih konstrukcijskih elemenata prema zadanoj geometriji iz predloška. Razmatrane su dvije varijante konstrukcije:

1. konstrukcija s niskim uzdužnim nosačima visine do 1100 mm ispod pokrova
2. konstrukcija s visokim bočnim stranicama visine do 1000 mm iznad pokrova i nosačima proračunate potrebne visine ispod pokrova

U drugoj fazi projektiranja provedena je analiza 3D globalnog modela metodom konačnih elemenata (MKE) u programu MAESTRO [2] za sve slučajeve opterećenja, za obje varijante konstrukcije. Rezultati analize provjereni su po kriterijima podobnosti DNV-a [3] za dozvoljene progibe, naprezanje, popuštanja i izvijanja. Elementi konstrukcije koji nisu zadovoljili neki od kriterija podobnosti su redimenzionirani. Nakon što su obje konstrukcije redimenzionirane i zadovoljile sve kriterije podobnosti, uspoređeni su rezultati odziva.

Na kraju je za odabranu konačnu konstrukciju napravljen 3D CAD model u programu Autodesk Inventor [4] iz kojeg su dobiveni osnovni klasifikacijski nacrti konstrukcije.

Ključne riječi: dvoradna pristupna rampa, projektiranje, DNV, MKE model, kriteriji podobnosti, 3D CAD model

SUMMARY

The objective of this thesis is structural design of tilting ramp for RO-RO ships in accordance with the rules of Det Norske Veritas classification society (DNV) [1].

The design was carried out in two phases. In the first phase, the thickness of ramp cover and the profile of stiffeners were defined in accordance with the prescriptive rules of DNV, while the initial dimensions and layout of other structural elements were defined based on the given geometry from the template. Two variants of structure were considered:

1. structure with low longitudinal girders up to 1100 mm high under the cover
2. structure with high sides up to 1000 mm above the cover and supports of the required height under the cover

In the second design phase, a finite element method (FEM) analysis was performed for all load cases on 3D global model using the computer programme MAESTRO [2], for both options of structure. The results of the analysis were checked by deflection, stress, yield and buckling DNV acceptance criteria [4]. Structural elements that had not met the acceptance criteria were resized. After both options of structures were resized and met all the acceptance criteria, the structural response results were compared.

Finally, the 3D CAD model of the chosen final structure was made using the computer programme Autodesk Inventor [4], from which the basic classification drawings were made.

Key words: tilting ramp, structural design, DNV, FEM model, adequacy criteria, 3D CAD model

1. UVOD

RO-RO (Roll on/Roll off) [Slika 1] brodovi su trgovački brodovi namijenjeni prijevozu tereta koji se ukrcava kotrljanjem, odnosno na kotačima. Pod teretom na kotačima osim automobila i kamiona, smatraju se i prikolice, kontejneri na kotačima, vagoni, industrijska vozila itd.



Slika 1. Primjer RO-RO broda [5]

Prvi RO-RO brodovi prevozili su parne lokomotive preko rijeka još u 19. stoljeću, dok se početak razvoja modernih RO-RO brodova veže uz, kako to često biva s razvojem tehnologije, drugi svjetski rat. Naime, prilikom povijesnog iskrcavanja na Normandiji američku su flotu činila raznovrsna plovila koja su prevozila razne strojeve i vozila. Kako bi prijevoz bio što učinkovitiji, počeo je razvoj tipa broda specijaliziranog za prijevoz vozila, odnosno tereta na kotačima, najprije u vojne svrhe, a s vremenom i u komercijalne. 1950-ih godina razvija se sustav ukrcaja i iskrcaja tereta na kotačima, a prvi moderni prekooceanski RO-RO brod bio je USNS Comet [Slika 2] sagrađen 1958. i to za prijevoz vojnih vozila [6].



Slika 2. USNS Comet [7]

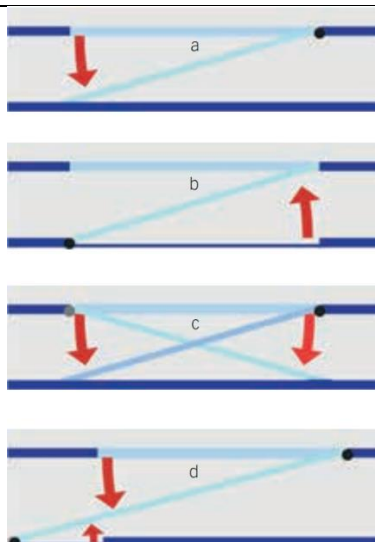
Globalizacijom i trendom rasta trgovine na svjetskoj razini iz desetljeća u desetljeće, raste i potreba za prijevozom svih dobara, pa tako i onih na kotačima. Porastom potrebe za prijevozom robe na kotačima, i to na adekvatan, siguran i učinkovit način, RO-RO brodovi postaju sve zastupljeniji u svjetskoj pomorskoj floti.

RO-RO brodovi najčešće su brodovi s većim brojem teretnih paluba takve konstrukcije da mogu prevesti što više tereta na što brži način, uključujući i vrijeme provedeno u lukama. Veza s lukom ostvaruju vanjskim pristupnim rampama koje mogu biti na krmi, pramcu ili boku, a veza između pojedinih teretnih paluba ostvaruje se unutarnjim pristupnim rampama koje služe za manipulaciju teretom unutar broda. Pravilan odabir i izvedba rampi pružaju veći stupanj autonomije broda.

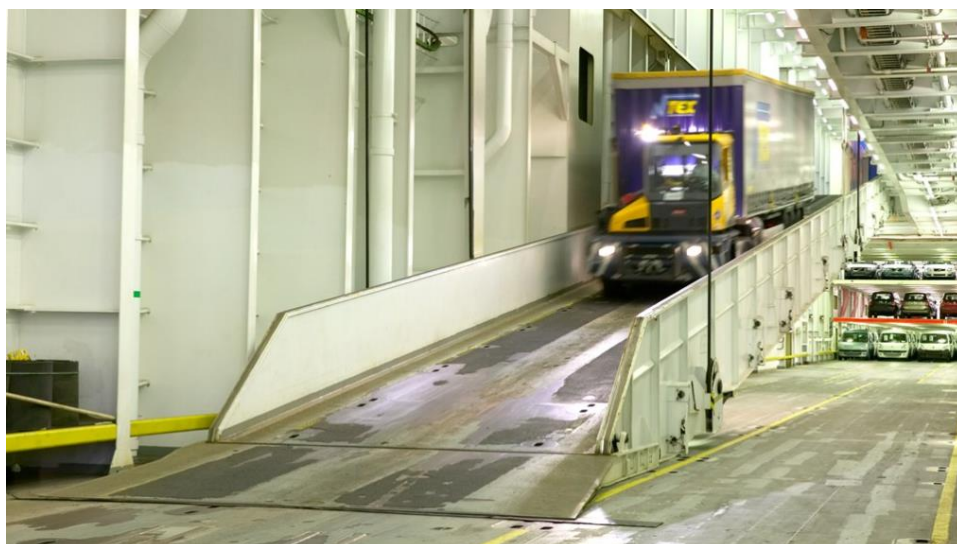
Kako se poseban naglasak stavlja na što brži i jednostavniji način ukrcanja tereta, s vremenom su se razvili različiti tipovi unutarnjih pristupnih rampi: pomične i nepomične. Nepomične pristupne rampe ulaze u proračun globalne čvrstoće broda, dok pomične pristupne rampe osim što spajaju više paluba [Slika 3], također i zatvaraju palubne otvore i time omogućavaju smještanje tereta ispod same rampe te na samu rampu, kada je ona u gornjem položaju.

Pomične pristupne rampe [Slika 4] mogu biti izvedene tako da se može dizati i spuštati samo jedna strana rampe, dok druga strana ostaje uvijek dignuta, ili može biti dvoradna.

Posebnost dvoradnih rampi je to da se mogu koristiti šarniri na pramčanoj i krmenoj strani rampe pa se obje strane rampe mogu dizati i spuštati. Dvoradne rampe time dodatno poboljšavaju komunikaciju vozila između paluba jer pružaju mogućnost iskrcavanja vozila bez okretanja ili vožnje unatrag.



Slika 3. Shema pomične pristupne rampe [8]



Slika 4. Primjer pomične pristupne rampe [8]

Prije projektiranja pristupne rampe, važno je odrediti osnovne dimenzije vozila koja će koristiti rampu, masu vozila po osovini, površine otisaka kotača, broj i ukupnu masu vozila koja se mogu naći na rampi u istom trenutku kako bi se mogli definirati projektni zahtjevi.

1.1. Cilj rada

Cilj ovog rada je kroz dvije projektne faze razmatrajući dvije varijante dimenzionirati konstrukciju rampe koja će zadovoljiti sve DNV-ove [1] kriterije podobnosti za sve slučajeve opterećenja. Prva projektna faza odnosi se na određivanje minimalne debljine oplata pokrova rampe i momenta otpora ukrepa na osnovu DNV-ovih preskriptivnih pravila [1] te određivanje geometrije i preliminarnih dimenzija ostalih konstrukcijskih elemenata prema zadanome predlošku. Druga projektna faza odnosi se na dimenzioniranje konstrukcijskih elemenata

metodom konačnih elemenata te provjeru podobnosti konstrukcije koristeći program MAESTRO [2], prema pravilima DNV-a [1] za direktne proračune.

U radu će se uz poštivanje tehnoloških i projektnih ograničenja razmotriti sljedeće dvije varijante konstrukcije:

1. konstrukcija s niskim uzdužnim nosačima visine do 1100 mm ispod pokrova
2. konstrukcija s visokim bočnim stranicama visine do 1000 mm iznad pokrova i nosačima proračunate potrebne visine ispod pokrova rampe

Za odabranu finalnu varijantu konstrukcije napravljen je 3D model u programu Autodesk Inventor [3] iz kojeg su dobiveni osnovni klasifikacijski nacrti konstrukcije.

2. PROJEKTNE ZNAČAJKE RAMPE

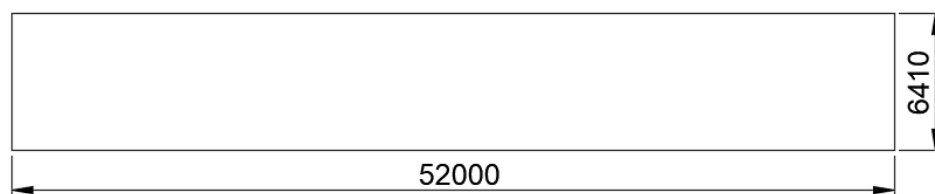
2.1. Osnovne dimenzije

Dvoradna pristupna rampa koja se razmatra u ovom radu namijenjena je za prijevoz kamiona s prikolicama između paluba 3 i 5. Dio je RO-RO opreme broda čiji su osnovni podaci navedeni u tablici [Tablica 1].

Tablica 1. Osnovni podaci o brodu

L_{OA} [m]	229,4
L_{BP} [m]	217,785
B [m]	31,06
T [m]	6,7
D [m]	9,5
C_B	0,6892
$V_{SERVICE}$ [čv]	20,6

Osnovne dimenzije same rampe također su unaprijed definirane u projektnoj dokumentaciji koja je poslužila kao predložak za ovaj rad: rampa je široka 6,41 m i duga 52,0 m [Slika 5].



Slika 5. Dimenzije rampe

Kod definiranja osnovnih dimenzija rampi potrebno je poštivati određena funkcionalna ograničenja. Širine rampi na RO-RO brodovima određene su potrebnim protočnim kapacitetom rampe i tipom vozila za koji je rampa namijenjena tako da vozila imaju dovoljno prostora za kretanje [Tablica 2]. S obzirom na to da je rampa široka 6,41 m, ograničenje od minimalne širine rampe od 6 m predviđene za prijevoz kamiona u dvije trake je ostvareno.

Tablica 2. Minimalna širina rampe

Tip vozila	Broj traka	Minimalna širina rampe [m]
Automobil	1	3
	2	5
Kamion	1	3,5
	2	6

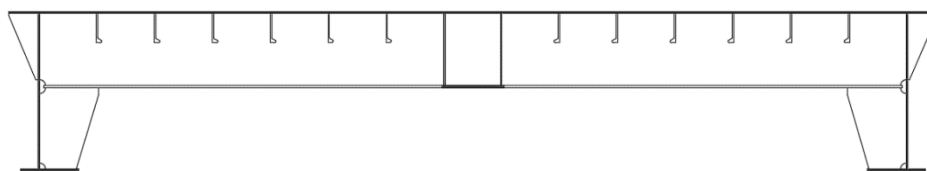
Duljine rampi na RO-RO brodovima određene su dozvoljenim kutem otklona rampe koji ako je prevelik, može doći do zapinjanja donjeg dijela vozila pri prelasku s rampe na palubu ili do zapinjanja kamiona ili prikolice za palubu iznad ako nema dovoljno zračnosti. Duljinom rampe od 52,0 m kut otklona rampe ne premašuje vrijednost od 6° čime rampa zadovoljava uobičajene standarde kuta otklona rampe i ostvaruje se dovoljna zračnost.

2.2. Projektne varijante

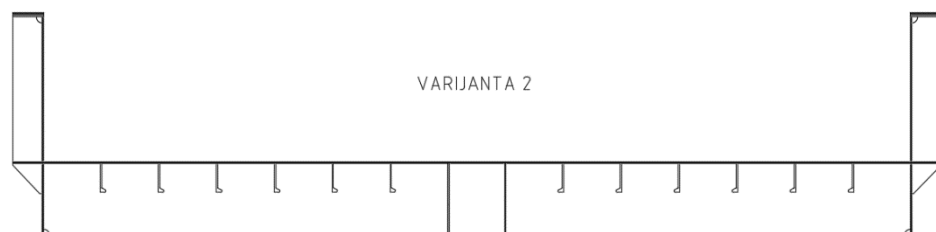
Kroz ovaj rad razmatrane su dvije projektne varijante konstrukcije rampe [Slika 6]:

1. konstrukcija s niskim uzdužnim nosačima visine do 1100 mm ispod pokrova
2. konstrukcija s visokim bočnim stranicama visine do 1000 mm iznad pokrova i nosačima proračunate potrebne visine ispod pokrova

VARIJANTA 1



VARIJANTA 2

**Slika 6. Skica obje varijante**

2.3. Materijal

Odabrani materijal za cijelu konstrukciju je brodograđevni čelik povišene čvrstoće AH36 čija su svojstva prikazana u tablici [Tablica 3].

Tablica 3. Svojstva čelika povišene čvrstoće AH36

ρ [kg/m ³]	7 850
E [N/mm ²]	206 000
G [N/mm ²]	80 000
ν	0,3
R_e [N/mm ²]	355
R_m [N/mm ²]	490
k	0,72

2.4. Definicija opterećenja

2.4.1. Opterećenje teretom

Pristupna rampa za RO-RO brod namijenjena za prijevoz kamiona s prikolicom, sukladno svojoj ulozi, opterećena je kotačima kamiona i prikolica i to je opterećenje glavni kriterij za lokalno dimenzioniranje konstrukcijskih elemenata. U predlošku su za svaki slučaj opterećenja definirani svi otisci kotača s pripadnim osovinskim opterećenjem za koje je potrebno proračunati konstrukciju rampe [Slika 7]. U prvoj fazi projektiranja rampa se dimenzionira na način da se pretpostavi nalijeganje kotača najvećeg opterećenja na neukrepljenu površinu oplata pokrova.

Osovinsko opterećenje	Otisak kotača

Slika 7. Otisci kotača s pripadnim osovinskim opterećenjem

Osim za slučajeve opterećenja pristupne rampe otiscima kotača, rampa se dimensionira i za slučaj uniformno raspoređenog masenog opterećenja koje iznosi $q_m = 1,1 \text{ t/m}^2$.

2.4.2. Opterećenje flap rampom

U drugoj projektnoj fazi prilikom ispitivanja 3D MKE modela pristupne rampe metodom konačnih elemenata, osim opterećenjem vezanim uz teret, potrebno je za slučaj opterećenja prilikom podizanja pristupnu rampu opteretiti i *flap* rampom koja se nalazi na kraju pristupne rampe i opterećuje ju prilikom podizanja. Opterećenje *flap* rampe implementirano je u obliku sila na spojevima *flap* rampe i pristupne rampe.

2.4.3. Opterećenje silom brtvljenja

Također, u drugoj projektnoj fazi prilikom ispitivanja 3D MKE modela pristupne rampe metodom konačnih elemenata za slučaj opterećenja tijekom plovidbe, kada su oba kraja rampe dignuta, rampu opterećuje i linearno distribuirana sila brtvljenja koja iznosi $q = 5 \text{ kN/m}$.

2.4.4. Dodatna masa

U stvarnosti se na pristupnoj rampi osim elemenata konstrukcije koji su kroz ovaj rad dimenzionirani nalaze i zavari, boja, protuklizna zaštita, ograde, rasvjetne lampe, dodatna oprema za hidrauličke cilindre itd., koji znatno povećavaju masu cijele rampe.

Kako bi se dobio realniji odziv modela rampe u drugoj projektnoj fazi, 3D MKE model je opterećen dodatnom masom, u iznosu od $m = 47,74 \text{ t}$ koji je dobiven prema predlošku.

3. DIMENZIONIRANJE KONSTRUKCIJSKIH ELEMENATA PO DNV PRAVILIMA

3.1. Uvod

U prvoj projektnoj fazi provedeno je dimenzioniranje konstrukcijskih elemenata dvoradne pristupne rampe na osnovu DNV-ovih preskriptivnih pravila [1]. Razmaci uzdužnih i poprečnih elemenata konstrukcije uzeti su iz predloška:

- razmak poprečnih okvira: $l = 2400$ mm
- razmak uzdužnjaka: $b = 400$ mm

3.2. Korozijski dodatak

Sukladno pravilima DNV-a [9], pri dimenzioniranju konstrukcijskih elemenata dvoradne pristupne rampe uračunat je korozijski dodatak koji iznosi $t_c = 0,5$ mm.

DNV [3] propisuje da se pri provjeri pomaka i naprezanja MKE modela koriste elementi čije su debljine uvećane za iznos korozijskog dodatka, a da se pri provjeri izvijanja koriste elementi debljine bez korozijskog dodatka [10].

3.3. Debljina oplata pokrova rampe

Pored općih pravila za proračun dimenzija elemenata konstrukcije, primjerice debljine oplata (1), DNV [1] sadrži posebna pravila za svaki tip broda, i to za one elemente konstrukcije koji se za taj tip broda razlikuju od elemenata ostalih tipova. Posebnost RO-RO brodova u dimenzioniranju debljine oplata pokrova je način na koji se teretno opterećenje prenosi na pokrov- kotačima. Zbog takvog načina opterećenja propisani su posebni izrazi za izračun tlaka na elementima konstrukcije opterećenim vozilima kojima su poznata osovinska opterećenja s pripadnim otiscima kotača (3) te izraz za izračun minimalne debljine oplata pokrova na temelju tog tlaka (2).

Opterećenje po osovini, duljina i širina otiska kotača te broj kotača na osovini dani su u predlošku za svaki predviđeni tip tereta i prikazani su u poglavlju 2.3.1. [Slika 7. Otisci kotača s pripadnim osovinskim opterećenjem].

$$t = a + bL_2\sqrt{k} \quad (1)$$

$$t = \frac{77,4\alpha_p\sqrt{k_wcbp_{wl-1}}}{\sqrt{mC_aR_{eH}}} 10^{-3} \quad (2)$$

$$p_{wl-1} = \frac{Q}{n_0 a_1 b_1} \left(g + \frac{3}{\sqrt{Q}} \right) 10^6 \quad (3)$$

$$p_{wl-2} = \frac{Q}{n_0 a_1 b_1} (g + a_z) 10^6 \quad (4)$$

Za debljinu oplata pokrova rampe bez korozijskog dodatka uzeta je vrijednost $t = 9,1$ mm koja je dobivena prema izrazu (2) za slučaj djelovanja tlaka vrijednosti $p_{wl-2} = 1.505,0$ kN/m² dobivene prema izrazu (4) koji nastaje pri nasjedanju nogara prikolice, dok prema izrazu (1) debljina oplata pokrova mora biti $t = 8,2$ mm. Otisak nogara prenosi masu vrijednosti $m = 12,5$ t i dimenzija je $a, b = 240$ mm.

Kada se uzme u obzir korozijski dodatak koji iznosi $t_c = 0,5$ mm, debljina oplata pokrova rampe mora iznositi $t = 9,6$ mm tako da je usvojena vrijednost debljine $t = 10$ mm.

3.4. Ukrepe

Osim za izračun potrebne debljine oplata pokrova, DNV-ov set posebnih pravila za elemente konstrukcije opterećene kotačima od vozila [1] sadrži i pravila za dimenzioniranje ukrepa. Minimalni potrebni moment otpora ukrepa izračunat je izrazom (5) koji se temelji na opterećivanju ukrepa tlakom od kotača dobivenog izrazima (3) i (4) po kojim je dimenzionirana i debljina oplata pokrova.

$$Z = \frac{pk_z c d l_{bdg}}{m C_S R_{eH}} 10^{-3} \quad (5)$$

Prema izrazu (6) minimalni potrebni moment otpora ukrepa iznosi $Z = 128,49$ cm³ tako da je za profil ukrepa izabran bulb profil HP200x10.

3.5. Jaki uzdužni nosači

Inicijalni raspored i profili jakih uzdužnih nosača i visoke bočne stranice uzeti su iz predložka [Tablica 4].

Tablica 4. Inicijalni profili jakih uzdužnih nosača

	Varijanta 1	Varijanta 2
Jaki bočni nosač	T1070x8/400x30	T500x8/250x15
Centralni nosač	T500x8/400x15	T500x8/400x15
Visoka bočna stranica	-	L1000x8/205x30

3.6. Poprečni nosači

Inicijalni profili i razmak poprečnih nosača uzeti su iz predloška [Tablica 5].

Tablica 5. Inicijalni profili poprečnih nosača

	Varijanta 1	Varijanta 2
Jaki bočni nosač	T500x8/250x15	T500x8/250x15

4. DIMENZIONIRANJE KONSTRUKCIJSKIH ELEMENATA METODOM KONAČNIH ELEMENATA

4.1. Uvod

Izrađeni su 3D globalni modeli rampe u programu MAESTRO [2] za obje varijante konstrukcije te je provedena analiza strukture korištenjem metode konačnih elemenata u svrhu dimenzioniranja konstrukcijskih elemenata, provjere podobnosti konstrukcijskih elemenata, prema pravilima DNV-a za direktne proračune [3], te na koncu usporedbe odziva dviju varijanti konstrukcije.

Analiza konstrukcije metodom konačnih elemenata posljednjih godina postaje uobičajena praksa jer današnji standardi, zahvaljujući napretku računalne tehnologije, nalažu uzimanje u obzir međudjelovanje uzdužnih i poprečnih elemenata konstrukcije. Naime, poprečni elementi konstrukcije ne utječu samo na poprečnu čvrstoću, već i na uzdužnu pa uzdužna konstrukcija može preuzeti tlačne sile bez da dođe do izvijanja. Isto tako, na pokrov istovremeno djeluje tlačno opterećenje i u poprečnom i u uzdužnom smjeru pa može doći do bi-aksijalnog izvijanja pokrova.

Inicijalne dimenzije konstrukcijskih elemenata uzete su iz prve faze proračuna.

4.2. Strukturni model

Izrađeni su globalni 3D MKE modeli u programu MAESTRO [2], a modeliranje je provedeno korištenjem pločastih i grednih konačnih elemenata.

Gustoća mreže je takva da je u uzdužnom smjeru šest elemenata između poprečnih nosača, u poprečnom je smjeru jedan element između dva uzdužnjaka te su u vertikalnom smjeru četiri elementa na struku jakih uzdužnih nosača, a dva elementa na struku poprečnih nosača.

Pokrovi rampi, strukovi poprečnih i jakih uzdužnih nosača te prirubnice uzdužnih nosača modelirani su standardnim četverokutnim pločastim konačnim elementima, dok su uzdužnjaci i prirubnice poprečnih nosača modelirani grednim konačnim elementima.

Koordinatni sustav definiran je na sljedeći način:

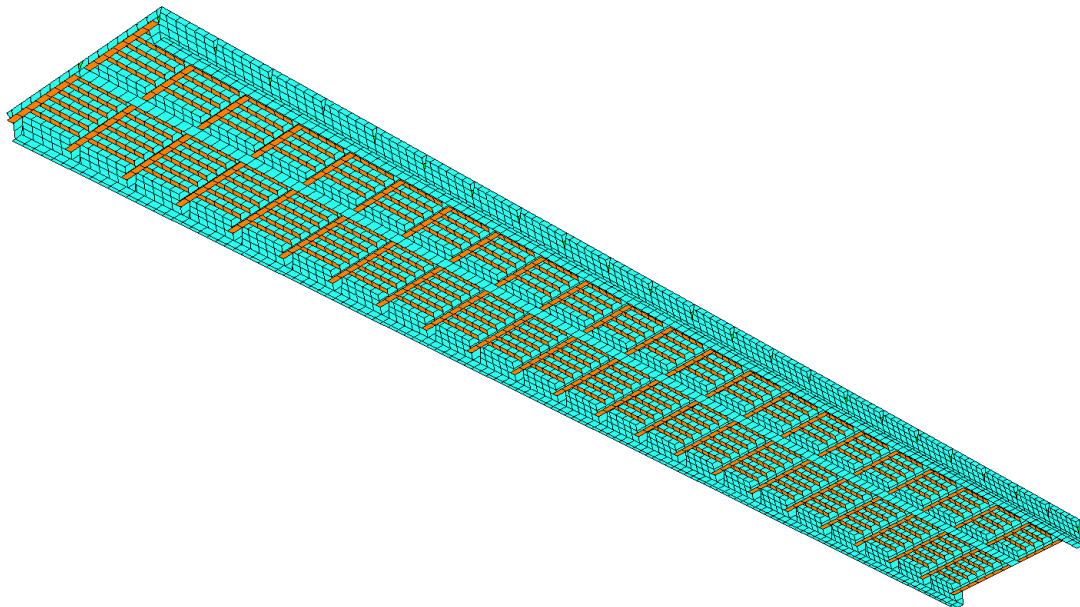
- ishodište koordinatnog sustava nalazi se u sjecištu središnje ravnine i osnovice
- globalna os X definirana je u smjeru uzdužne ravnine broda, pozitivna prema naprijed
- globalna os Z definirana je kao poprečna os, pozitivna prema desnoj strani
- globalna os Y definirana je kao vertikalna os, pozitivna prema gore

Sukladno projektnom zahtjevu, unesene su vrijednosti karakteristike materijala za čelik povišene čvrstoće AH-36 od kojeg je izrađena cijela konstrukcija.

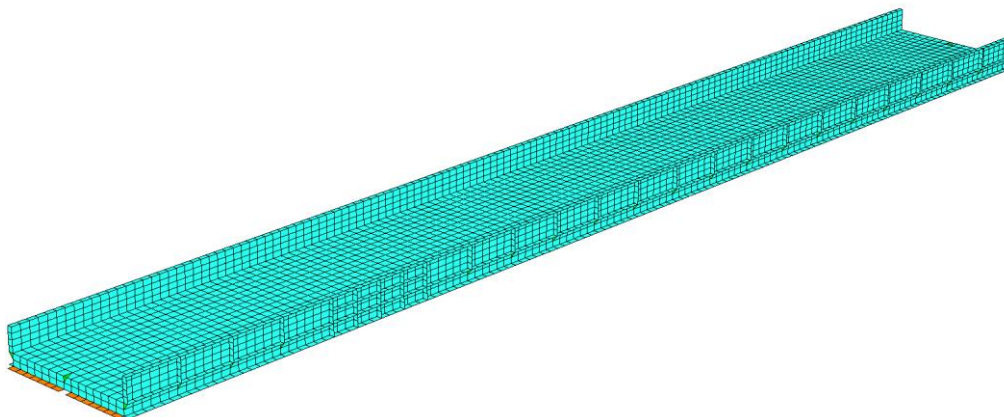
Izrada modela može se opisati sljedećim koracima:

1. određivanje i zadavanje čvorova na pozicijama spojeva uzdužnih nosača s vojevima oplata na način da se upišu njihove koordinate u odnosu na ishodište
2. unošenje debljina svake oplata i poprečnih dimenzija svakog nosača u bazu podataka
3. generiranje pločastih i grednih konačnih elemenata između čvorova s pridruženim karakteristikama iz baze podataka vezanim za materijal i debljinu u slučaju pločastih, odnosno poprečnih dimenzija u slučaju grednih konačnih elemenata.

Na sljedećim slikama prikazani su strukturni modeli obje varijante rampe [Slika 8 i Slika 9]:



Slika 8. Strukturni model rampe varijante 1 (pogled s donje strane)



Slika 9. Strukturni model rampe varijante 2 (pogled s gornje strane)

4.3. Implementacija opterećenja

Tijekom eksploatacije broda rampa je podvrgnuta raznim slučajevima opterećenja. U sklopu ovog rada definirano je 8 slučajeva opterećenja prema projektnim zahtjevima zadanim u predlošku te DNV-ovim pravilima [3]. Te slučajeve opterećenja možemo podijeliti u 3 radna stanja rampe tijekom kojih dolazi do opterećenja:

1. opterećenje u luci (LC1-4),
2. opterećenje prilikom podizanja rampe (LC5-6),
3. opterećenje tijekom plovidbe (LC7-8).

U tablici su prikazani svi slučajevi opterećenja obrađeni u ovom radu uz pripadna radna stanja rampe tijekom kojih dolazi do opterećenja, dinamičke koeficijente, komponente i iznose ukupne vertikalne sile opterećenja rampe [Tablica 6].

Tablica 6. Pregled slučajeva opterećenja

radno stanje	slučaj opterećenja	a_v	komponente opterećenja	$F_{v,uk}$ [kN]
u luci	LC1	1,10	$g \cdot m_k + a_v \cdot g \cdot m_t$	3 685,8
	LC2	1,10	$g \cdot m_k + a_v \cdot g \cdot m_t$	2 240,3
	LC3	1,10	$g \cdot m_k + a_v \cdot g \cdot m_t$	2 617,9
	LC4	1,10	$g \cdot m_k + a_v \cdot g \cdot m_t$	2 526,2
prilikom podizanja	LC5	1,15	$a_v \cdot g \cdot (m_k + m_t) + F_{flap}$	4 031,7
	LC6	1,0	$a_v \cdot g \cdot (m_k + m_t) + F_{flap}$	3 505,9
tijekom plovidbe	LC7	1,42	$a_v \cdot g \cdot (m_k + m_t) + F_b$	7 431,7
	LC8	1,42	$a_v \cdot g \cdot (m_k + m_t) + F_b$	6 893,8

pri čemu je:

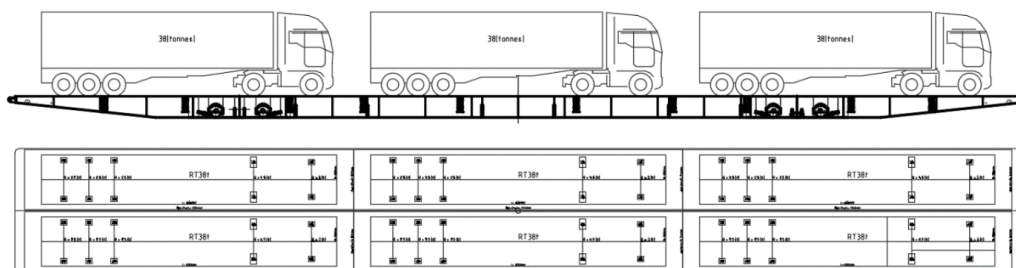
- a_v - dinamički koeficijent
- g - zemljina sila teže
- m_k - ukupna masa konstrukcije
- m_t - ukupna masa tereta
- F_{flap} - ukupna sila *flap* rampe
- F_b - ukupna sila brtvljenja
- $F_{v,uk}$ - ukupna vertikalna sila

S obzirom na to da se u stvarnosti na rampi nalaze zavari, boja, ograda, rasvjetne lampe, protuklizna zaštita, dodatna oprema za hidrauličke cilindre itd., masa 3D MKE modela je prema predlošku uvećana za iznos dodatne mase od $m = 47,7$ t koji je zadan opcijom *module* u MAESTRU [2], za sve slučajeve opterećenja.

4.3.1. Opterećenje u luci

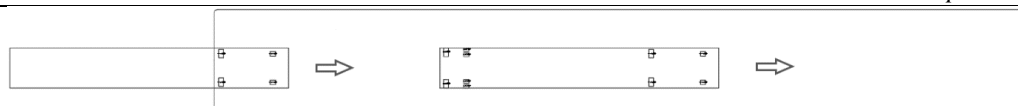
Tijekom boravka broda u luci jedan kraj pristupne rampe je spušten i kamioni se voze po rampi s jedne na drugu palubu, a mogu biti i parkirani na njoj, prije nego se rampa krene podizati. Sukladno tome, definirana su četiri slučaja opterećenja rampe za vrijeme boravka broda u luci:

1. slučaj: na rampi je parkirano šest kamiona s prikolicom pojedinačne mase $m = 38$ t [Slika 10], čiji su otisci kotača ranije prikazani u poglavlju 2.4.1. [Slika 7. Otisci kotača s pripadnim osovinskim opterećenjem]



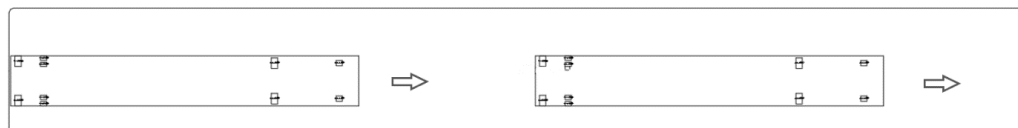
Slika 10. Skica opterećenja rampe za slučaj LC1

2. slučaj: rampom se voze dva kamiona pojedinačne mase $m = 64,5$ t [Slika 11], čiji su otisci kotača ranije prikazani u poglavlju 2.4.1. [Slika 7. Otisci kotača s pripadnim osovinskim opterećenjem], od kojih je prvi kamion otprilike na sredini rampe dok se drugi tek penje na rampu, stoga na nju ne djeluje cijelom masom



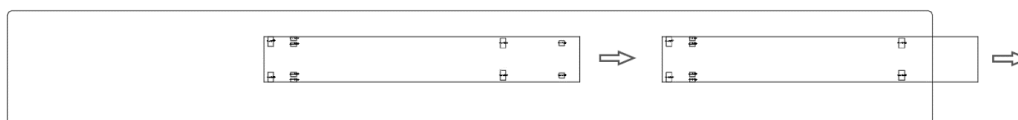
Slika 11. Skica opterećenja rampe za slučaj LC2

3. slučaj: razlikuje se od prethodnog slučaja po tome što su oba kamiona u cijelosti na rampi [Slika 12]



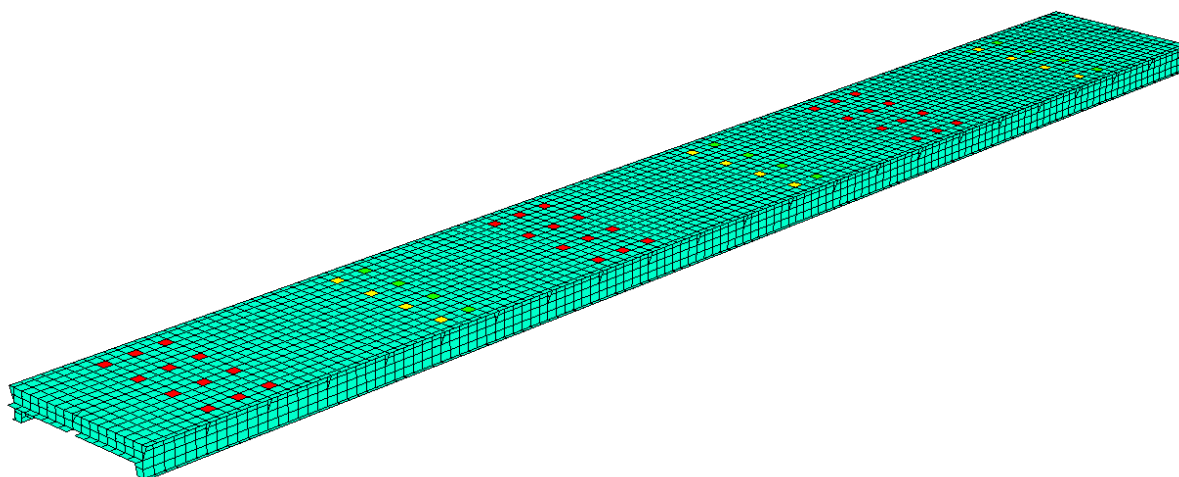
Slika 12. Skica opterećenja rampe za slučaj LC3

4. slučaj: razlikuje se od prethodnog slučaja po tome se prvi kamion prednjom osovinom popeo na palubu pa više ne djeluje cijelom masom na rampu [Slika 13]



Slika 13. Skica opterećenja rampe za slučaj LC4

Opterećenja od vozila u programu MAESTRO [2] zadana su kao pripadna masena opterećenja na onim pločastim konačnim elementima koji se nalaze na pozicijama otisaka kotača od vozila [Slika 14]. S obzirom na to da se tijekom boravka broda u luci dok rampa miruje dinamički koeficijent $a_v = 1,10$ odnosi samo na masu tereta, iznos pripadnog masenog opterećenja na pozicijama otisaka kotača je uvećan množenjem dinamičkim koeficijentom.



Slika 14. Zadano maseno opterećenje od otisaka kotača za LC1

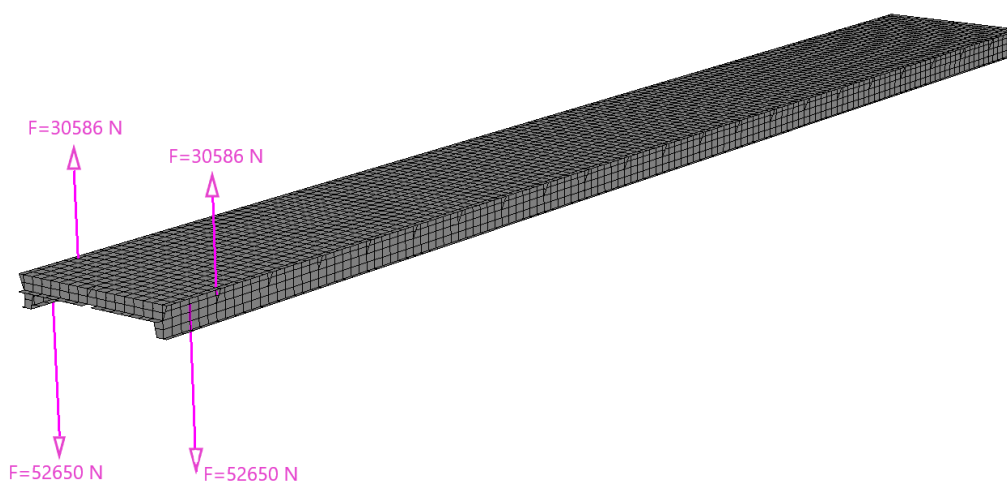
4.3.2. Opterećenje prilikom podizanja rampe

Za vrijeme podizanja jednog kraja rampe, rampa je opterećena kamionima koji su parkirani na njoj i miruju te *flap* rampom koja se nalazi na kraju rampe koji se podiže. Tijekom navedenog radnog stanja rampe predviđena su iduća dva slučaja opterećenja:

5. slučaj: na rampi je parkirano šest kamiona s prikolicom pojedinačne mase $m = 38$ t [Slika 10], čiji su otisci kotača ranije prikazani u poglavlju 2.4.1. [Slika 7. Otisci kotača s pripadnim osovinskim opterećenjem], a na kraju koji se podiže opterećena je i *flap* rampom mase $m = 4,5$ t pri čemu se dinamički koeficijent iznosa $a_v=1,15$ odnosi na konstrukciju, ali i na opterećenje
6. slučaj: razlikuje se od prethodnog slučaja samo po tome što dinamički koeficijent iznosi $a_v=1,00$

Prema predlošku, 6. slučaj opterećenja daje realniju sliku progiba za vrijeme podizanja rampe, dok 5. slučaj služi za provjeru razine napreznja te izvijanja.

Opterećenja od vozila u programu MAESTRO [2] zadana su kao pripadna masena opterećenja na onim pločastim konačnim elementima koji se nalaze na pozicijama otisaka kotača od vozila [Slika 14]. S obzirom na to da se dinamički koeficijent a_v odnosi na opterećenje, ali i na masu konstrukcije, on je implementiran kao dodatno ubrzanje u vertikalnom smjeru opcijom *additional acceleration*. Opterećenje *flap* rampe implementirano je silama naredbom *point force* u čvorovima na pozicijama spojeva pristupne rampe i *flap* rampe [Slika 15].

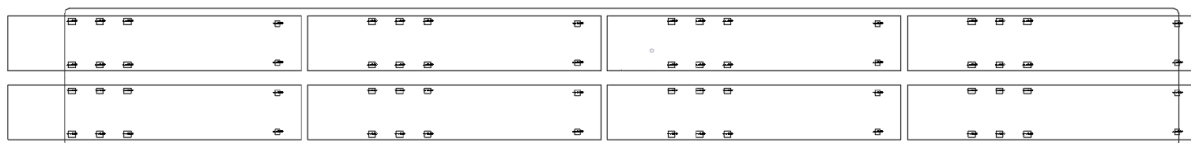


Slika 15. Implementacija opterećenja *flap* rampe

4.3.3. Opterećenje tijekom plovidbe

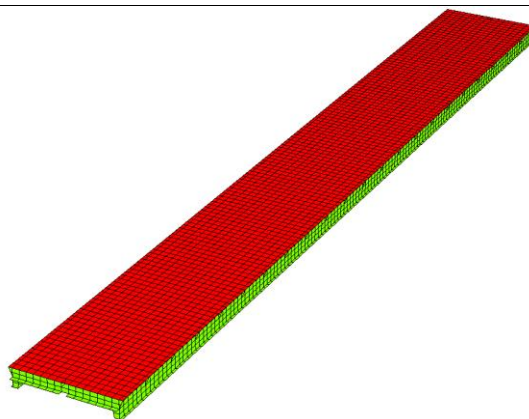
Tijekom plovidbe pristupna se rampa nalazi u gornjem položaju zatvarajući palubni otvor. Sukladno predlošku, na rampu osim opterećenja tereta djeluje i opterećenje uslijed brtvljenja pa su definirana sljedeća dva slučaja opterećenja za navedeno radno stanje rampe:

7. slučaj: rampa je opterećena linearno distribuiranom silom brtvljenja iznosa $q=5\text{ kN/m}$, ukupnog iznosa $F=585\text{ kN}$, i uniformno raspoređenim opterećenjem iznosa $q_m=1,1\text{ t/m}^2$ pri čemu se dinamički koeficijent iznosa $a_v=1,41$ ne odnosi na opterećenje uslijed brtvljenja nego na konstrukciju rampe i uniformno raspoređeno opterećenje
8. slučaj: na rampi je parkirano osam kamiona s prikolicom pojedinačne mase $m=41\text{ t}$ [Slika 16], čiji su otisci kotača ranije prikazani u poglavlju 2.4.1. [Slika 7. Otisci kotača s pripadnim osovinskim opterećenjem], a opterećena je i linearno distribuiranom silom brtvljenja iznosa $q=5\text{ kN/m}$, ukupnog iznosa $F=585\text{ kN}$, pri čemu se dinamički koeficijent iznosa $a_v=1,41$ ne odnosi na opterećenje uslijed brtvljenja nego na konstrukciju rampe i opterećenje uslijed tereta

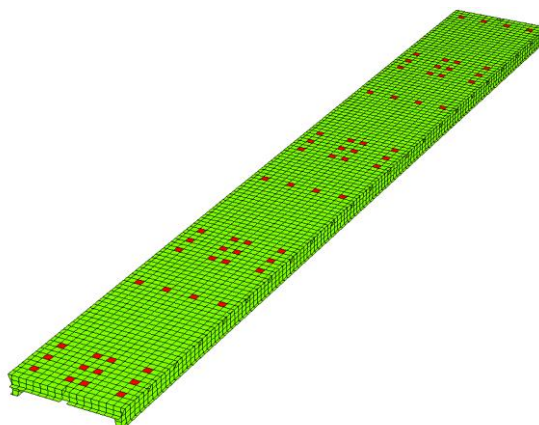


Slika 16. skica opterećenja rampe za slučaj LC8

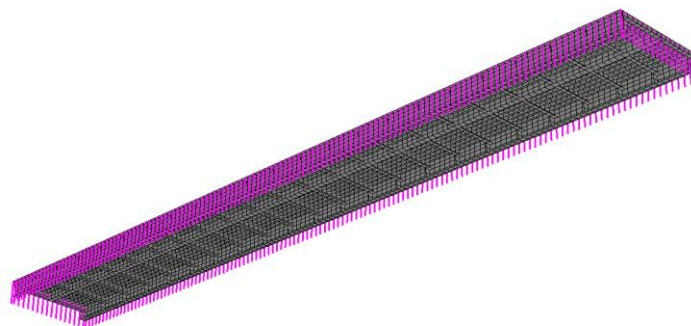
Uniformno raspoređeno opterećenje za slučaj LC7 zadano je u programu MAESTRO [2] kao maseno opterećenje na pločastim konačnim elementima koji čine pokrov rampe [Slika 17] jer uniformno raspoređeno opterećenje i djeluje na pokrovu. Opterećenja od vozila za slučaj LC8 također su zadana kao pripadna masena opterećenja na onim pločastim konačnim elementima koji se nalaze na pozicijama otisaka kotača od vozila [Slika 18]. S obzirom na to da se dinamički koeficijent a_v odnosi na uniformno raspoređeno opterećenje za slučaj slučaj LC7, odnosno na opterećenje tereta za slučaj LC8, ali i na masu konstrukcije, on je implementiran kao dodatno ubrzanje u vertikalnom smjeru opcijom *additional acceleration*. Linearno distribuirana sila brtvljenja implementirana je naredbom *point force* kao vertikalna sila u svim čvorovima na pozicijama vanjskog brida rampe, koji na dvoradnim pristupnim rampama u stvarnosti i biva brtvljen [Slika 19].



Slika 17. Zadano uniformno raspoređeno opterećenje (crvena boja)



Slika 18. Zadano maseno opterećenje od otisaka kotača za LC8



Slika 19. Zadano opterećenje uslijed brtvljenja

4.4. Rubni uvjeti

Rubni uvjeti postavljaju se u čvorovima s ulogom sprječavanja translacijskih i rotacijskih pomaka modela kao krutog tijela. Odabrani su karakteristični čvorovi u kojima se spajaju oplata

struka uzdužnog nosača, struka poprečnog nosača i pokrova, koji djeluju kao fizikalni oslonci koji se postavljaju na jaku strukturu radi preuzimanja mogućih sila reakcija.

Za tri prethodno definirana radna stanja rampe definirane su i tri kombinacije rubnih uvjeta:

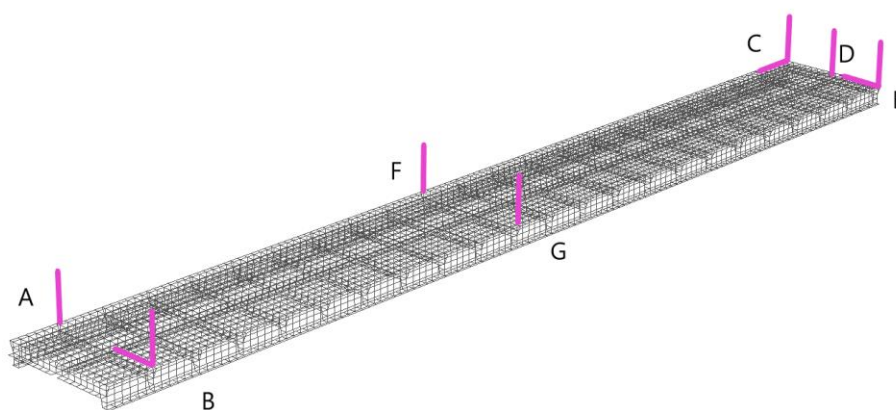
1. rubni uvjeti u luci
2. rubni uvjeti prilikom podizanja rampe
3. rubni uvjeti tijekom plovidbe

4.4.1. Rubni uvjeti u luci

Za vrijeme boravka broda u luci pristupna rampa je spuštена na jednom kraju. Točke u kojima je rampa pričvršćena definiraju rubne uvjete za slučajeve opterećenja LC1-LC4 na MKE modelu:

- na donjem kraju, rampa je u naravi oslonjena na donju palubu pa su spriječeni pomaci u čvorovima koji se nalaze na pozicijama A i B
- na gornjem kraju, rampa je u naravi pričvršćena za palubu trima uškama pa su spriječeni pomaci u čvorovima koji se nalaze na pozicijama C, D i E
- na sredini rampe, rampa je u naravi pričvršćena zahvaljujući potpornju na koji se oslanja pa su spriječeni pomaci na pozicijama F i G

Roza strelica na slici označava u smjeru koje osi je spriječen translacijski pomak [Slika 20].



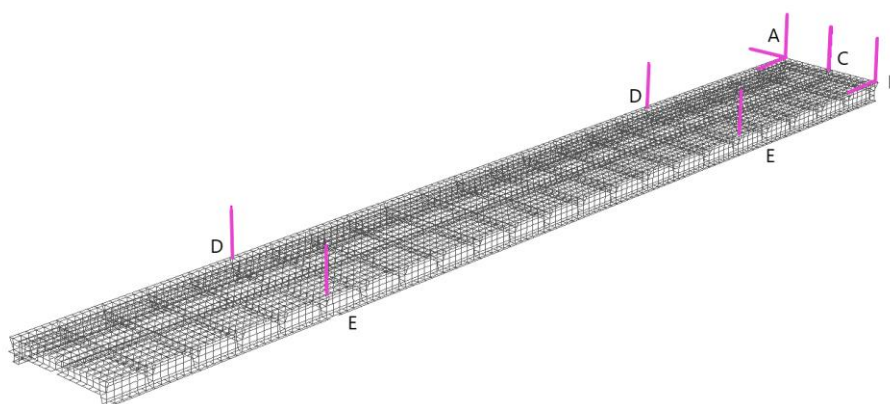
Slika 20. Rubni uvjeti u luci

4.4.2. Rubni uvjeti prilikom podizanja rampe

Prilikom podizanja donjeg kraja rampe, rampa je oslonjena na sajle kojima se podiže te gornju palubu. Točke u kojima je rampa pričvršćena definiraju rubne uvjete za slučajeve opterećenja LC5 i LC6 na MKE modelu:

- na gornjem kraju, rampa je u naravi pričvršćena za palubu trima uškama pa su spriječeni pomaci u čvorovima koji se nalaze na pozicijama A, B i C
- rampa je u naravi pričvršćena na mjestima gdje se oslanja na sajle pa su spriječeni pomaci u čvorovima koji se nalaze na pozicijama D i E

Roza strelica na slici označava u smjeru koje osi je spriječen translacijski pomak [Slika 21].



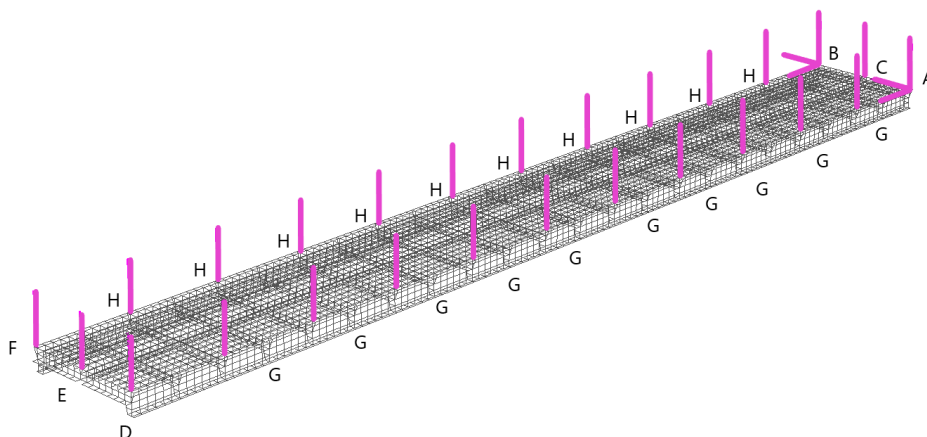
Slika 21. Rubni uvjeti prilikom podizanja rampe

4.4.3. Rubni uvjeti tijekom plovidbe

Tijekom plovidbe pristupna se rampa nalazi u gornjem položaju zatvarajući palubni otvor pri čemu je čvrsto vezana uz palubu sustavom za zaključavanje rampe. Točke u kojima je rampa pričvršćena definiraju rubne uvjete za slučajeve opterećenja LC7 i LC8 na MKE modelu:

- na prednjem i stražnjem kraju, rampa je u naravi pričvršćena za palubu trima šarkama na svakom kraju, stoga su spriječeni pomaci u čvorovima koji se nalaze na pozicijama A, B, C, D, E i F
- na bočnim stranama rampe, rampa je u naravi pričvršćena za palubu na svakom drugom okviru sustavom za zaključavanje pa su spriječeni pomaci u čvorovima na pozicijama G i H

Roza strelica na slici označava u smjeru koje osi je spriječen translacijski pomak [Slika 22].



Slika 22. Rubni uvjeti tijekom plovidbe

4.5. Kriteriji podobnosti

Ako elementi konstrukcije ne mogu izdržati nametnuta opterećenja, smatraju se nepodobnima i moraju se redimenzionirati da bi zadovoljili kriterije podobnosti. Odziv deformacija i naprezanja uslijed opterećenja konstrukcije sam po sebi nije dovoljan za provjeru podobnosti.

Naime, kod kompleksne strukture poput one pristupne rampe, postoji više načina oštećenja. Informacija samo o razini naprezanja u nekom elementu konstrukcije nije dovoljna jer je potrebno znati hoće li doći do izvijanja, popuštanja ili nekog drugog načina oštećenja. Stoga se koriste faktori podobnosti određeni bibliotekom analitički zadanih projektnih kriterija koji pružaju informaciju o prekoračenju dozvoljenog odziva konstrukcije. U najopćenitijem obliku faktor podobnosti izražava se na sljedeći način (6):

$$g = \frac{C - \gamma \cdot D}{C + \gamma \cdot D} \quad (6)$$

pri čemu je:

- g - faktor podobnosti
- C - izdržljivost (*Capability*)
- D - zahtjev (*Demand*)
- γ - faktor sigurnosti

Faktor podobnosti može postići vrijednosti u rasponu od -1 do +1. Granična vrijednost $g = +1$ znači da je zahtjev jednak nuli, a granična vrijednost $g = -1$ znači da je izdržljivost

jednaka nuli. Podobnost elementa konstrukcije osigurana je ukoliko je vrijednost faktora podobnosti veća ili jednaka nuli [2].

Vrijednosti pripadnih faktora sigurnosti razmatranih kriterija pri evaluaciji podobnosti [Tablica 7] usklađene su s pravilima DNV-a [7] za pojedine kriterije u pojedinim slučajevima opterećenja.

Tablica 7. Pripadni γ razmatranih kriterija podobnosti u MAESTRU [2]

Kriterij	Opis kriterija	γ		
		LC1-4	LC5-6	LC7-8
BYF	<i>Beam Yield, Flange</i>	1,37	1,48	1,09
BYP	<i>Beam Yield, Plate</i>	1,37	1,48	1,09
PCCB	<i>Panel Collapse, Combined Buckling</i>	1	1	1
PCMY	<i>Panel Collapse, Membrane Yield</i>	1,37	1,48	1,09

Dopuštena razina Von Mises naprezanja σ_{vm} u MKE modelu prema DNV-u [7] nije jednaka za sve slučajeve opterećenja [Tablica 8]. Stoga ni faktor sigurnosti γ pri popuštanju (*Yield*) izračunat izrazom (7) nije jednak za sve slučajeve opterećenja [Tablica 7].

$$\gamma_y = \frac{R_e}{\sigma_{vm}} \quad (7)$$

pri čemu je:

- R_e - granica razvlačenja
- σ_{vm} - Von Mises naprezanje

Tablica 8. Dopušteno σ_{vm} za AH36 u grubom MKE modelu [1]

Slučaj opterećenja	σ_{vm} [N/mm ²]
LC1-4	260
LC5-6	240
LC7-8	326

Što se tiče deformacija pristupne rampe, analizirajući rubne uvjete koji su objašnjeni u poglavlju 4.4., može se zaključiti kako je posebna pažnja u projektu posvećena progibima. Dozvoljeni progibi δ_{max} određeni su prema pravilima DNV-a [3] izrazom (8):

$$\delta_{max} = \frac{L}{200} \quad (8)$$

pri čemu je:

- L - duljina između dva oslonca

S obzirom na to da se, kako je definirano u poglavlju 4.4., oslonci razlikuju u pojedinim radnim stanjima rampe, izračunati su dozvoljeni progibi za pojedine slučajeve opterećenja [Tablica 9].

Tablica 9. Dozvoljeni progibi rampe

Slučaj opterećenja	δ_{max} [mm]
LC1-4	120,7
LC5-6	260,0
LC7-8	32,1

Konačno, određeni su svi kriteriji podobnosti razmatrani u ovome radu [Tablica 10]:

Tablica 10. Razmatrani kriteriji podobnosti

Slučaj opterećenja	σ_{vm} [N/mm ²]	δ_{max} [mm]	γ			
			BYF	BYP	PCCB	PCMY
LC1-4	260	120,7	1,37	1,37	1,00	1,37
LC5-6	240	260,0	1,48	1,48	1,00	1,48
LC7-8	326	32,1	1,09	1,09	1,00	1,09

4.6. Rezultati

Na temelju dimenzija konstrukcijskih elemenata dobivenih u prvoj projektnoj fazi proračunom po pravilima DNV-a [1] prema kojima su napravljeni prototipi obiju varijanti konstrukcije, potrebno je analizirati:

- pomake
- Von Mises ekvivalentna naprežanja
- faktore podobnosti

4.6.1. Varijanta 1

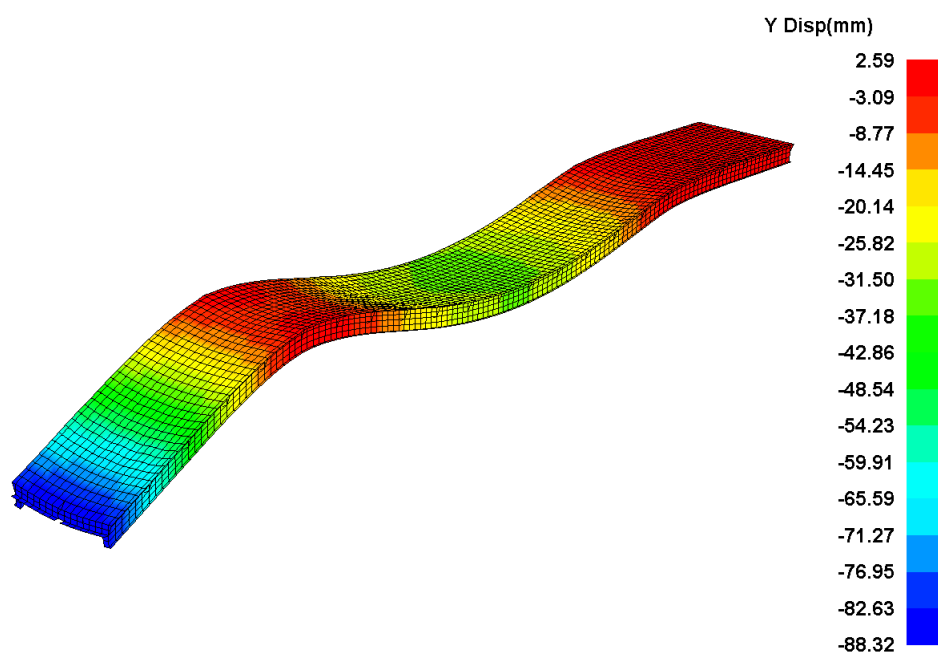
Pod varijantom 1 smatra se konstrukcija s niskim uzdužnim nosačima visine 1100 mm ispod pokrova [Slika 8].

4.6.1.1. Pomaci

Najveći pomaci su u vertikalnom smjeru i pojavljuju se na donjem kraju pri podizanju rampe, za slučajeve opterećenja LC5 i LC6 [Slika 23]. Svi su pomaci unutar dozvoljenih granica [Tablica 11].

Tablica 11. Progibi prototipa varijante 1

Slučaj opterećenja	δ_{\max} [mm]	δ [mm]
LC1	120,7	49,7
LC2	120,7	44,9
LC3	120,7	33,2
LC4	120,7	35,2
LC5	260,0	98,1
LC6	260,0	88,3
LC7	32,1	6,0
LC8	32,1	7,8



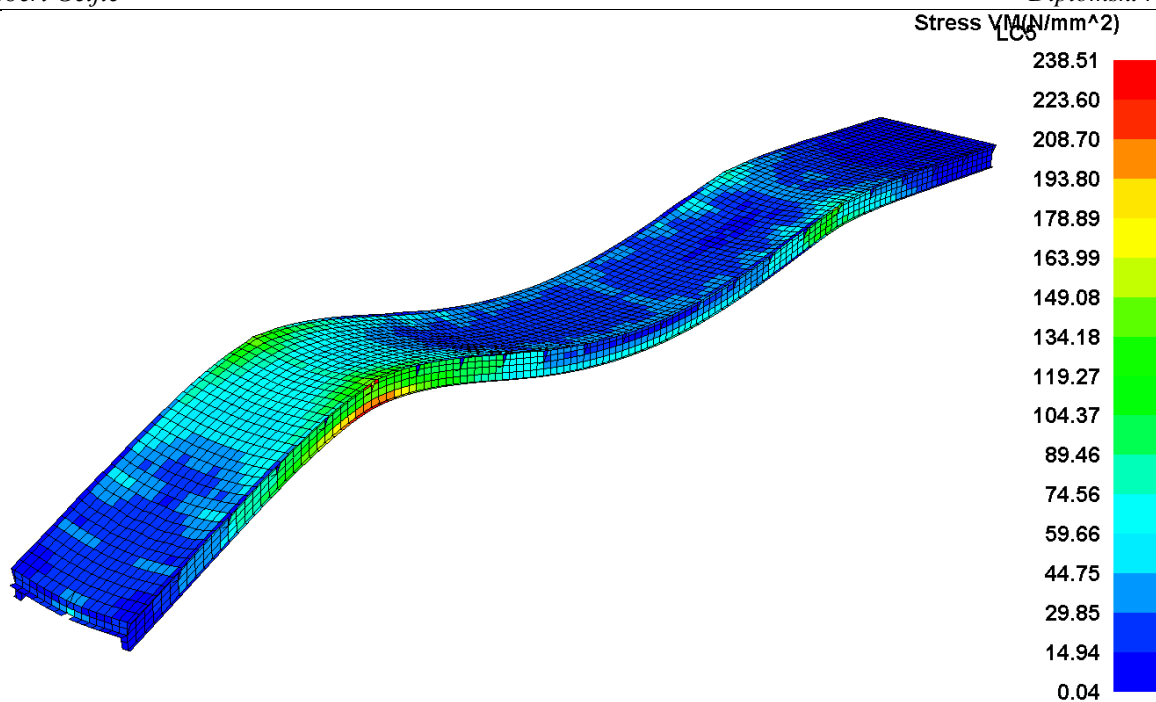
Slika 23. Pogibi prototipa varijante 1 za LC6

4.6.1.2. Naprezanja

Najveća razina naprezanja javlja se za slučaj opterećenja LC5 na struku jakog uzdužnog nosača otprilike na poziciji gdje se rampa oslanja na sajle pa su spriječeni pomaci u vertikalnom smjeru [Slika 24]. Razina naprezanja u svim slučajevima opterećenja je unutar dozvoljenih granica [Tablica 12].

Tablica 12. Von Mises naprezanja prototipa varijante 1

Slučaj opterećenja	$\sigma_{vm, max}$ [N/mm ²]	$\sigma_{vm, MKE}$ [N/mm ²]
LC1	260	209,1
LC2	260	134,5
LC3	260	148,3
LC4	260	157,5
LC5	240	238,5
LC6	240	207,4
LC7	326	83,0
LC8	326	110,2



Slika 24. Von Mises naprezanja prototipa varijante 1 za LC5

4.6.1.3. Podobnost

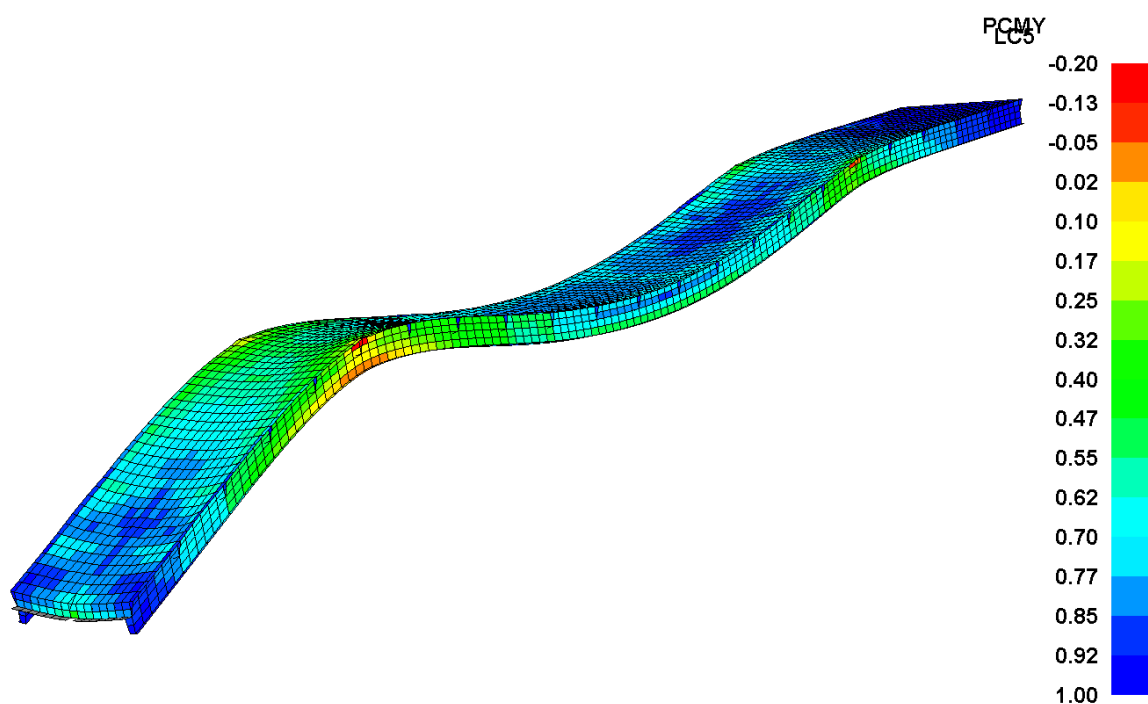
Provedena je evaluacija podobnosti za sve slučajeve opterećenja. Evaluirani kriteriji po kojim su neki elementi nepodobni su PCMY odnosno kombinirano popuštanje panela uslijed uzdužnih, poprečnih i smičnih naprezanja i PCCB odnosno kombinirano izvijanje panela uslijed uzdužnih, poprečnih i smičnih naprezanja [2], dok su po kriterijima BYF odnosno popuštanju pojasa te BYP odnosno popuštanju struka svi elementi podobni [2].

Nepodobni elementi nalaze se na struku jakog uzdužnog nosača na poziciji gdje se rampa oslanja na potporanj za slučajeve opterećenja LC1 te na poziciji gdje se oslanja na sajle za slučajeve opterećenja LC5 [Slika 25] i LC6.

U tablici su prikazane najniže postignute vrijednosti faktora podobnosti g po pojedinim slučajevima opterećenja pri čemu su vrijednosti koje prelaze dopuštenu granicu, dakle one negativne, posebno naznačene [Tablica 13].

Tablica 13. Faktori podobnosti prototipa varijante 1

Slučaj opterećenja	g			
	BYF	BYP	PCCB	PCMY
LC1	0,56	0,31	0,22	<u>-0,12</u>
LC2	0,38	0,31	0,34	0,10
LC3	0,44	0,32	0,34	0,04
LC4	0,45	0,35	0,33	0,01
LC5	0,50	0,16	<u>-0,05</u>	<u>-0,20</u>
LC6	0,55	0,23	0,01	<u>-0,13</u>
LC7	0,62	0,44	0,79	0,22
LC8	0,53	0,34	0,73	0,15



Slika 25. Faktor podobnosti PCMY prototipa varijante 1 za LC5

4.6.2. Varijanta 2

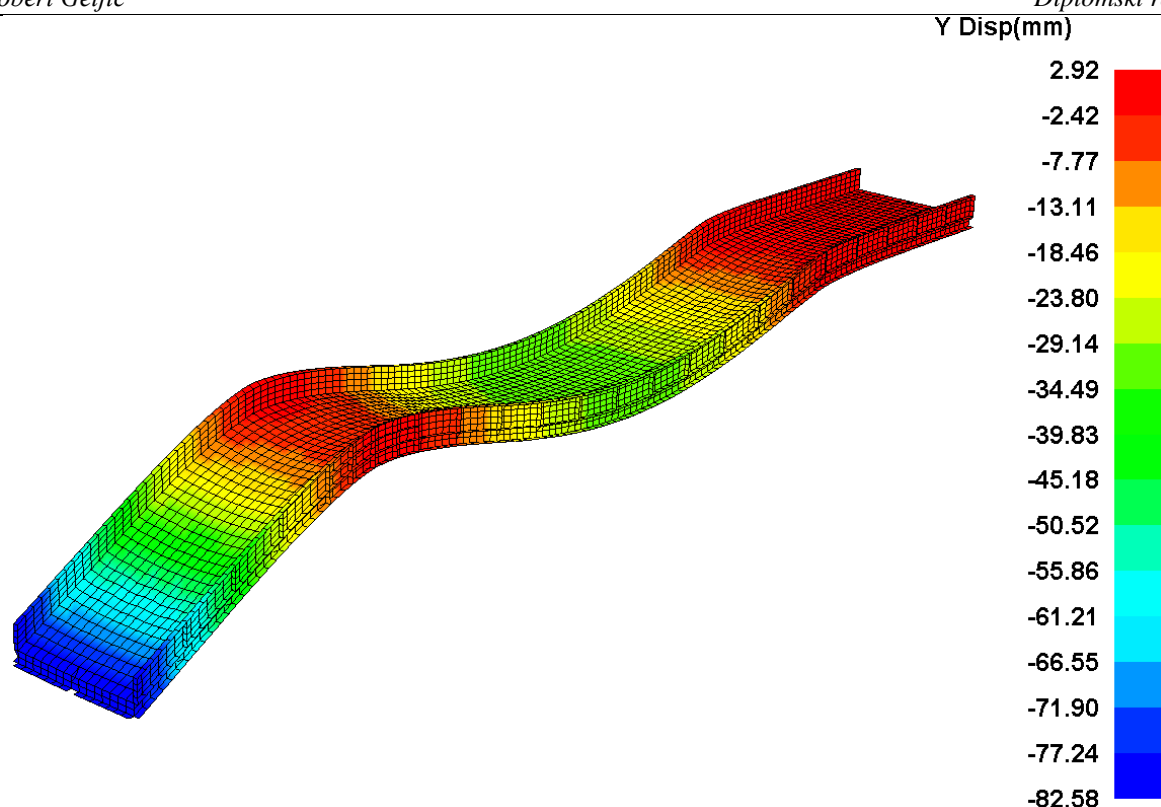
Pod varijantom 2 smatra se konstrukcija s visokim bočnim stranicama visine 1000 mm iznad pokrova i nosačima visine 500mm ispod pokrova [Slika 9].

4.6.2.1. Pomaci

Najveći pomaci su u vertikalnom smjeru i pojavljuju se na donjem kraju pri podizanju rampe, za slučajeve opterećenja LC5 i LC6 [Slika 26]. Svi su pomaci unutar dozvoljenih granica [Tablica 14].

Tablica 14. Progibi prototipa varijante 2

Slučaj opterećenja	δ_{\max} [mm]	δ [mm]
LC1	120,7	50,5
LC2	120,7	46,0
LC3	120,7	34,0
LC4	120,7	34,9
LC5	260,0	95,0
LC6	260,0	82,6
LC7	32,1	5,9
LC8	32,1	7,6



Slika 26. Progibi prototipa varijante 2 za LC6

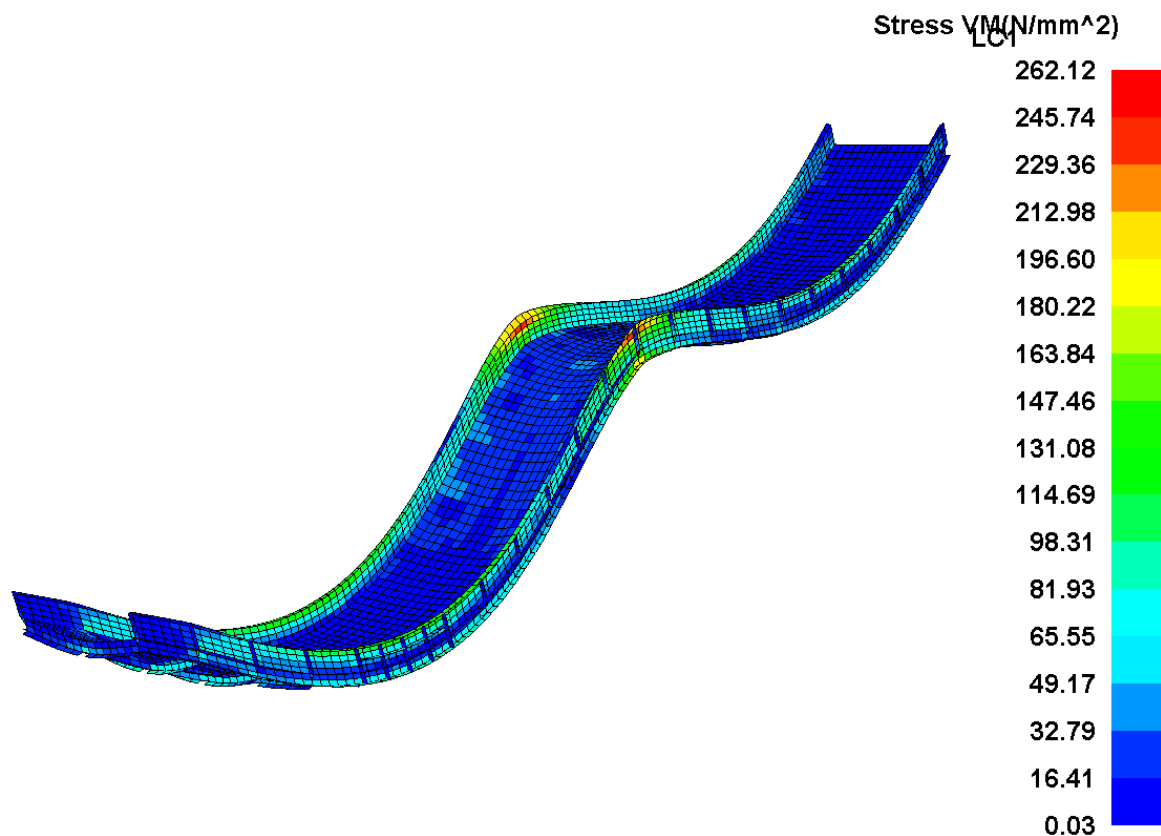
4.6.2.2. Naprezanja

Najveća razina naprezanja javlja se za slučaj opterećenja LC5 na struku visoke bočne stranice odmah uz prirubnicu, otprilike na istoj x koordinati gdje se rampa oslanja na sajle pa su spriječeni pomaci u vertikalnom smjeru [Slika 23]. Razina naprezanja za taj slučaj nije unutar dozvoljene granice, kao ni za slučajeve opterećenja LC1 [Slika 27] i LC6.

U tablici su prikazane najveće postignute razine naprezanja po pojedinim slučajevima opterećenja pri čemu su razine naprezanja koje prelaze dopuštene granice posebno naznačene [Tablica 15].

Tablica 15. Von Mises naprezanja prototipa varijante 2

Slučaj opterećenja	$\sigma_{vm, max}$ [N/mm ²]	$\sigma_{vm, MKE}$ [N/mm ²]
LC1	260	<u>262,1</u>
LC2	260	145,6
LC3	260	168,5
LC4	260	186,3
LC5	240	<u>293,0</u>
LC6	240	<u>254,8</u>
LC7	326	81,4
LC8	326	112,7

**Slika 27. Von Mises naprezanja prototipa varijante 2 za LC1**

4.6.2.3. Podobnost

Provedena je evaluacija podobnosti za sve slučajeve opterećenja. Evaluirani kriteriji po kojem su neki elementi nepodobni su PCMY odnosno kombinirano popuštanje panela uslijed uzdužnih, poprečnih i smičnih naprezanja i PCCB odnosno kombinirano izvijanje panela

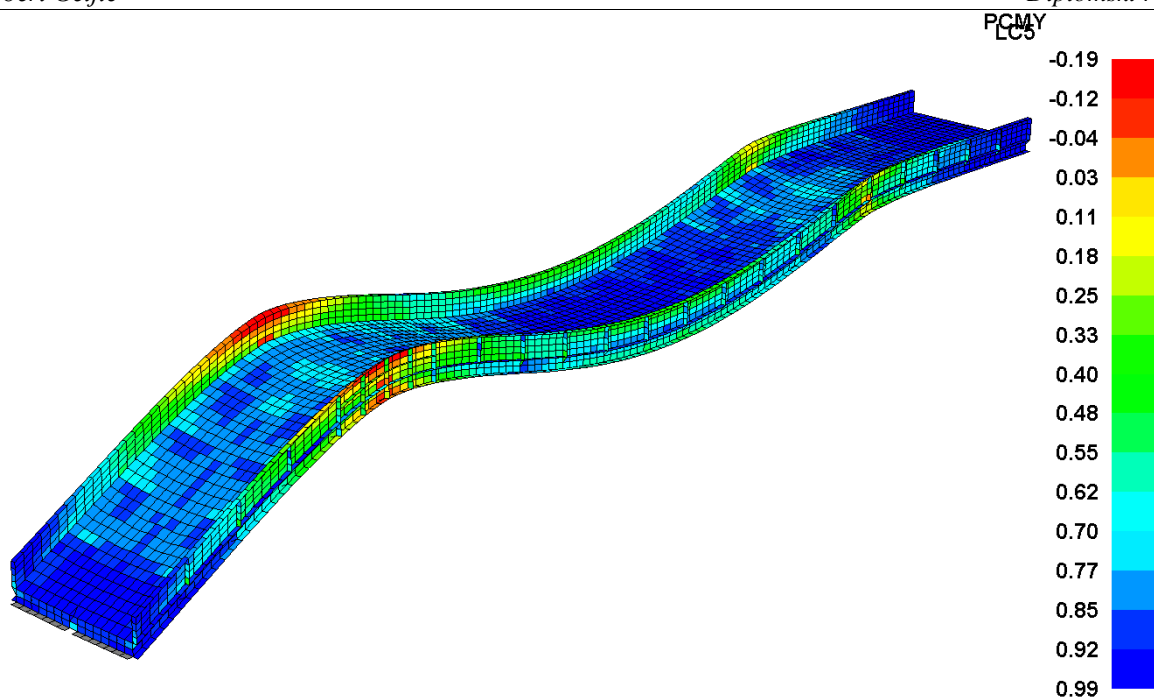
uslijed uzdužnih, poprečnih i smičnih napreznja [2], dok su po kriterijima BYF odnosno popuštanju pojasa te BYP odnosno popuštanju struka svi elementi podobni [2].

Nepodobni elementi nalaze se na struku jakog uzdužnog nosača te struku i prirubnici visoke bočne stranice otprilike na istoj x koordinati gdje se rampa oslanja na potporanj za slučajeve opterećenja LC1, LC2 i LC4 te na poziciji gdje se oslanja na sajle za slučajeve opterećenja LC5 [Slika 28] i LC6.

U tablici su prikazane najniže postignute vrijednosti faktora podobnosti g po pojedinim slučajevima opterećenja pri čemu su vrijednosti koje prelaze dopuštenu granicu, dakle one negativne, posebno naznačene [Tablica 16].

Tablica 16. Faktori podobnosti prototipa varijante 2

Slučaj opterećenja	g			
	BYF	BYP	PCCB	PCMY
LC1	0,33	0,34	<u>-0,14</u>	<u>-0,12</u>
LC2	0,33	0,35	<u>-0,12</u>	0,09
LC3	0,40	0,23	0,03	0,02
LC4	0,35	0,25	<u>-0,06</u>	0,01
LC5	0,21	0,27	<u>-0,01</u>	<u>-0,19</u>
LC6	0,27	0,33	0,07	<u>-0,12</u>
LC7	0,64	0,45	0,61	0,23
LC8	0,53	0,35	0,56	0,15



Slika 28. Faktor podobnosti PCMY prototipa varijante 2 za LC5

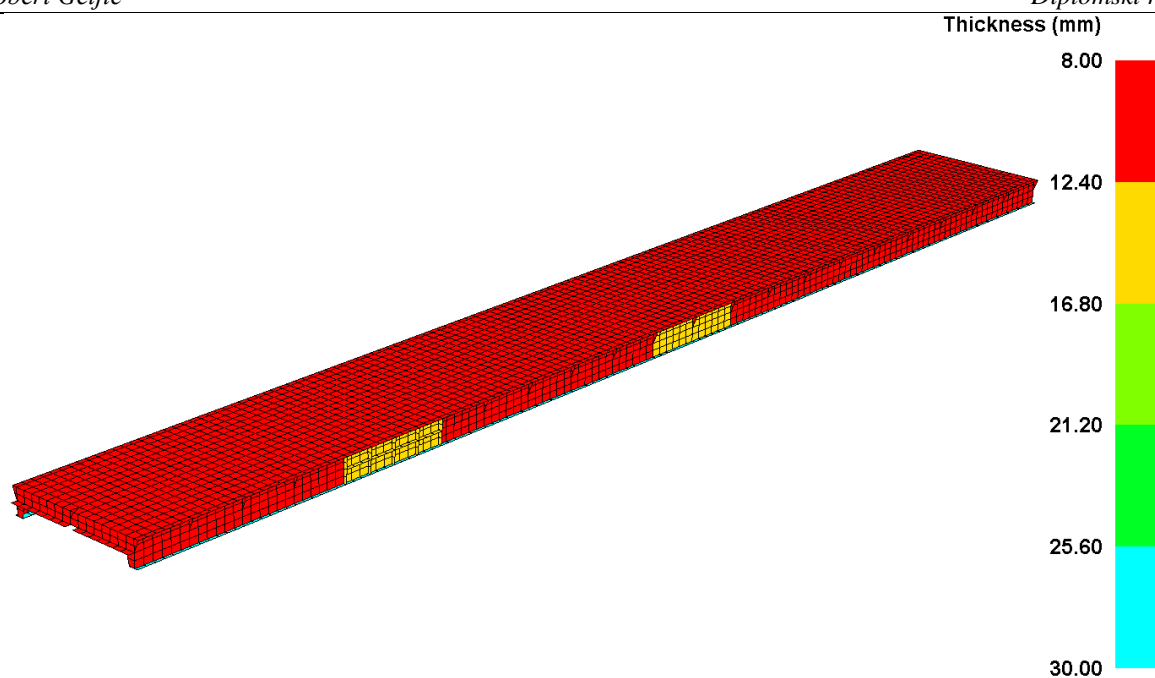
4.7. Prijedlog podobne konstrukcije

Nakon provedbe redimenzioniranja, dan je prijedlog podobnih konstrukcija za obje varijante. Elementima konstrukcije koji su bili nepodobni iterativnim su postupkom povećane dimenzije pazeći da postanu podobni, no ne i predimenzionirani.

4.7.1. Varijanta 1

Od svih razmatranih kriterija podobnosti vezanih za naprezanja, deformacije i faktore podobnosti, prototipna konstrukcija varijante 1 nije bila podobna samo po faktorima podobnosti PCCB i PCMY.

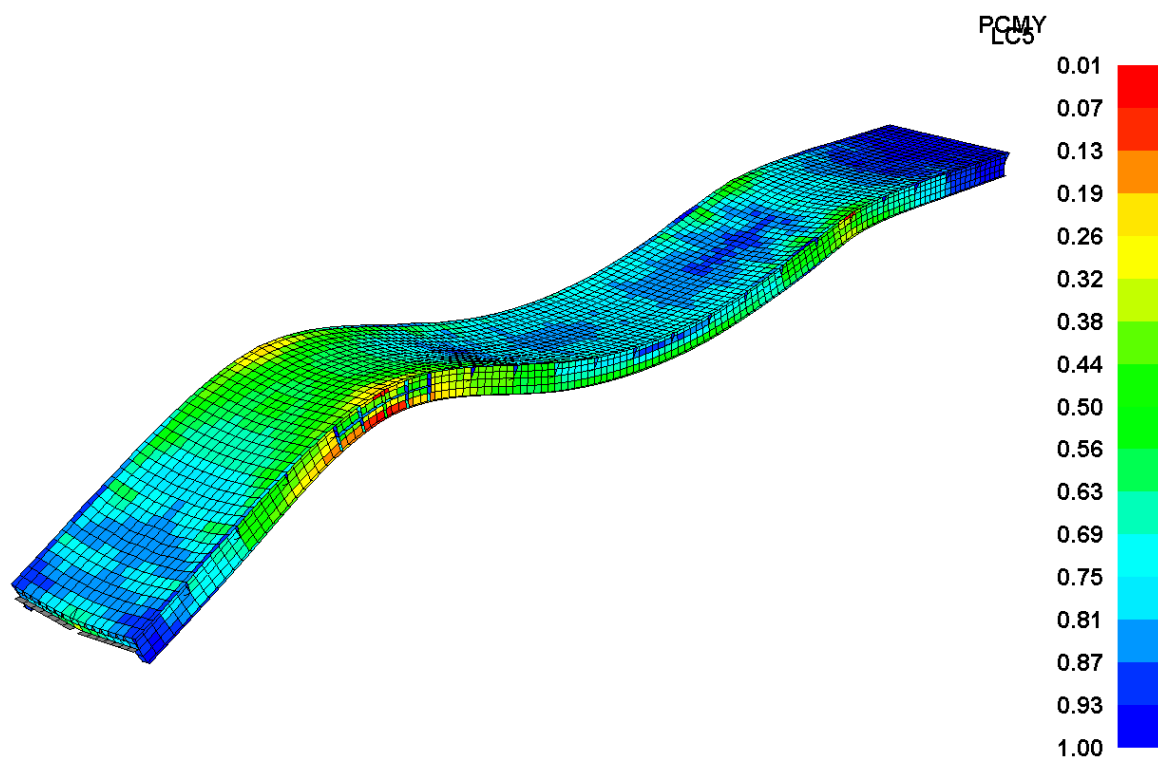
Svi nepodobni elementi po kriteriju PCMY pripadaju struku bočnog jakog uzdužnog nosača na pozicijama oslanjanja na potporanj odnosno sajle, stoga je pri redimenzioniranju lokalno promijenjena debljina struka bočnog jakog uzdužnog nosača s $t = 8$ mm na $t = 15$ mm te su po potrebi promijenjena i koljena [Slika 29], dok je na ostatku struka debljina promijenjena na $t = 9,5$ mm zbog kriterija biaksijalnog izvijanja (PCCB).



Slika 29. Debljine limova redimencionirane varijante 1

Nakon redimencioniranja, iznosi faktora podobnosti PCCB i PCMY [Slika 30] su pozitivni na svim elementima i time su zadovoljeni svi kriteriji podobnosti.

Redimencioniranjem se masa MKE modela varijante 1 povećala s $m = 71,02$ t na $m = 74,07$ t odnosno za 4,3 %.



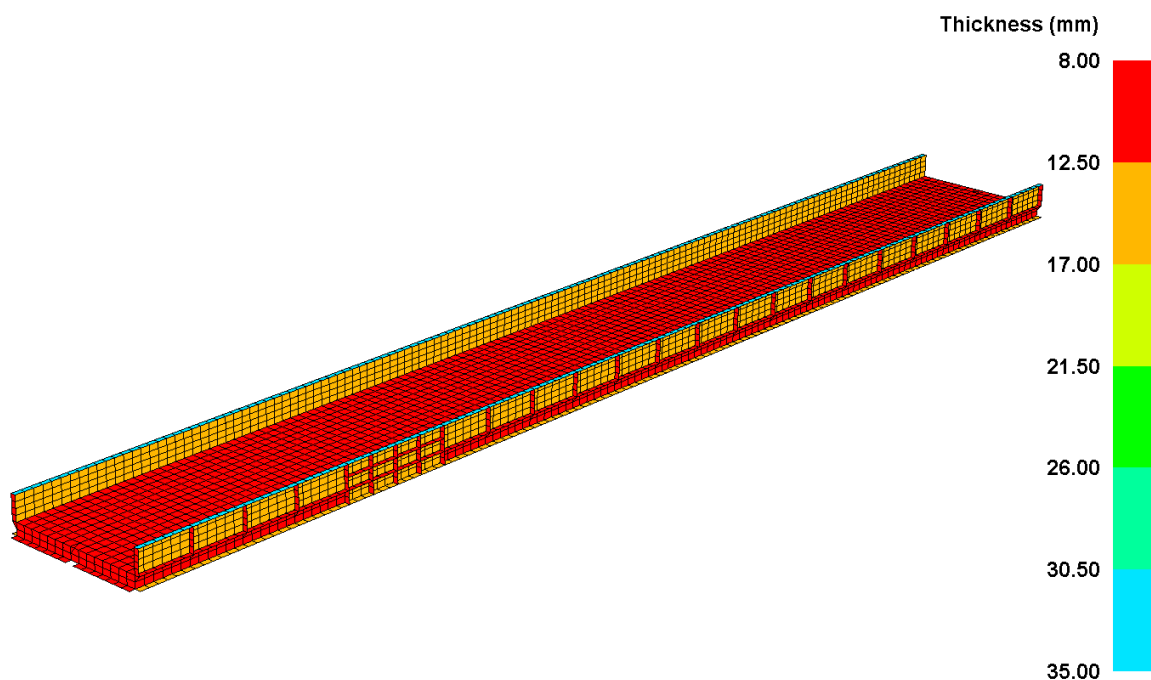
Slika 30. Faktor podobnosti PCMY redimencionirane varijante 2 za LC5

4.7.2. Varijanta 2

Od razmatranih kriterija podobnosti vezanih za naprezanja, deformacije i faktore podobnosti, prototipna konstrukcija varijante 2 nije bila podobna zbog razine naprezanja iznad dopuštene granice te kriterija PCCB i PCMY.

Nepodobni elementi prototipne konstrukcije varijante 2 nalaze se na struku jakog uzdužnog nosača te struku i prirubnici visoke bočne stranice stoga su pri redimenzioniranju učinjene sljedeće promjene [Slika 31]:

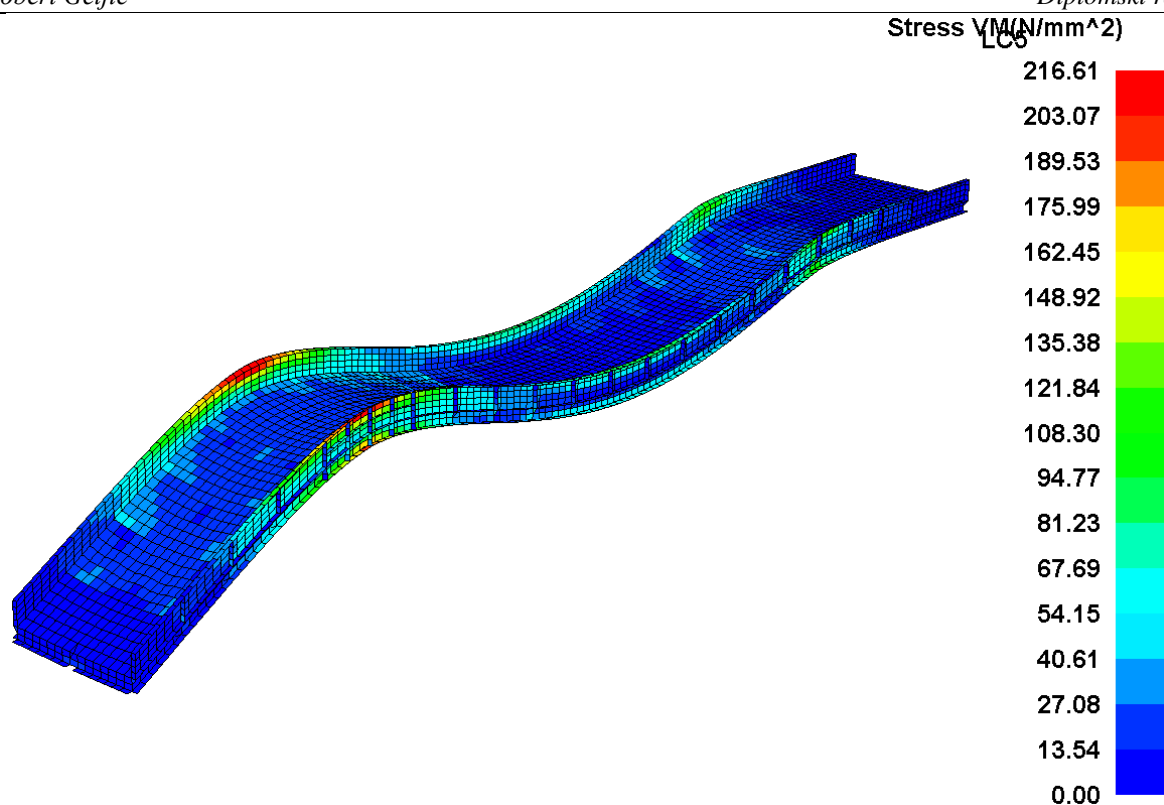
- debljina prirubnice na visokoj bočnoj stranici promijenjena je s $t = 30$ mm na $t = 35$ mm
- debljina struka visoke bočne stranice promijenjena je s $t = 8$ mm na $t = 13$ mm
- lokalno u području gdje se rampa oslanja na sajle promijenjene su debljine struka bočnog jakog uzdužnog nosača i struka visoke bočne stranice s $t = 8$ mm na $t = 15$ mm te su dodana koljena debljine $t = 8$ mm



Slika 31. Debljine limova redimenzionirane varijante 2

Nakon redimenzioniranja, razine naprezanja su unutar dopuštenih granica [Slika 32], a iznosi faktora podobnosti PCCB i PCMY su pozitivni na svim elementima i time su zadovoljeni svi kriteriji podobnosti.

Redimenzioniranjem se masa MKE modela varijante 2 povećala s $m = 72,29$ t na $m = 77,76$ t odnosno za 7,0 %.



Slika 32. Von Mises naprezanja redimencionirane varijante 2 za LC5

4.8. Usporedba dviju varijanti

Nakon provedbe druge faze proračuna konstrukcije metodom konačnih elemenata, dobiveni su prijedlozi rješenja poboljšanih modela varijante 1 i varijante 2. Nepodobni elementi su redimencionirani tako da obje varijante konstrukcije budu podobne.

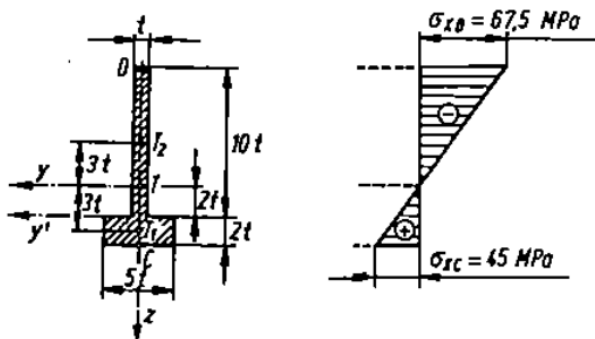
S obzirom na to da su kriteriji podobnosti jednaki za slučajeve opterećenja koji se događaju u istom radnom stanju rampe, primjerice za LC1 i LC4, uspoređeni su odzivi objiju varijanti konstrukcije tako da su za grupe slučajeva opterećenja koja pripadaju istom radnom stanju izdvojene najnepovoljnije vrijednosti pojedinih kriterija podobnosti [Tablica 17].

Tablica 17. Najnepovoljniji kriteriji podobnosti predloženih rješenja konstrukcije

		LC1-4		LC5-6		LC7-8	
		varijanta 1	varijanta 2	varijanta 1	varijanta 2	varijanta 1	varijanta 2
δ [mm]		46,7	42,2	89,0	74,1	7,7	7,5
σ_{vm} [N/mm ²]		162,6	230,4	210,0	214,1	108,2	111,6
g	BYF	0,26	0,34	0,51	0,31	0,53	0,54
	BYP	0,31	0,35	0,22	0,30	0,35	0,36
	PCCB	0,35	0,33	0,06	0,48	0,70	0,71
	PCMY	0,06	0,01	0,01	0,01	0,15	0,16

Usporedbom odziva varijanti predloženih rješenja konstrukcije može se zaključiti kako su odzivi vrlo slični. Ipak, primjetno je kako su na varijanti 1 izraženiji progibi, a na varijanti 2 naprezanja.

No kada bi se razmotrile varijante konstrukcije pristupne rampe teorijom grede i njihovi poprečni presjeci usporedili kao poprečni presjeci dviju greda ili dva nosača, jasno bi bilo da su takvi odnosi progiba i razine naprezanja dviju varijanti za očekivati. Naime, udaljavanjem od neutralne osi prilikom savijanja grede naprezanja rastu [Slika 33], dok se s druge strane povećava i moment tromosti udaljavanjem površine poprečnog presjeka od neutralne osi. Prirubnice jake bočne stranice varijante 2 udaljenija je od neutralne osi od prirubnice jakog uzdužnog nosača varijante 1 čime je izloženi većem naprezanju, ali i više pridonosi krutosti pa su nešto manji progibi na rampi varijante 2.



Slika 9.8. Raspored naprezanja zbog savijanja po visini nesimetričnog presjeka

Slika 33. Raspored naprezanja zbog savijanja po visini nosača [11]

Nadalje, značajnu površinu poprečnog presjeka rampe čini pokrov rampe koja je u varijanti 1 udaljenija od neutralne osi nego u varijanti 2 tako da u varijanti 2 pokrov puno manje doprinosi poprečnom presjeku čime opada efikasnost varijante 2 kao nosača u smislu odnosa momenta otpora i površine poprečnog presjeka nosača.

Dakle, iako bi se na prvi pogled varijanta 2 zbog toga što ima visoke bočne stranice iznad i jake uzdužne nosače ispod pokrova činila povoljnija po kriteriju najmanje mase, uzimanje u obzir navedenih aspekata dovodi do zaključka da to ne treba nužno biti tako.

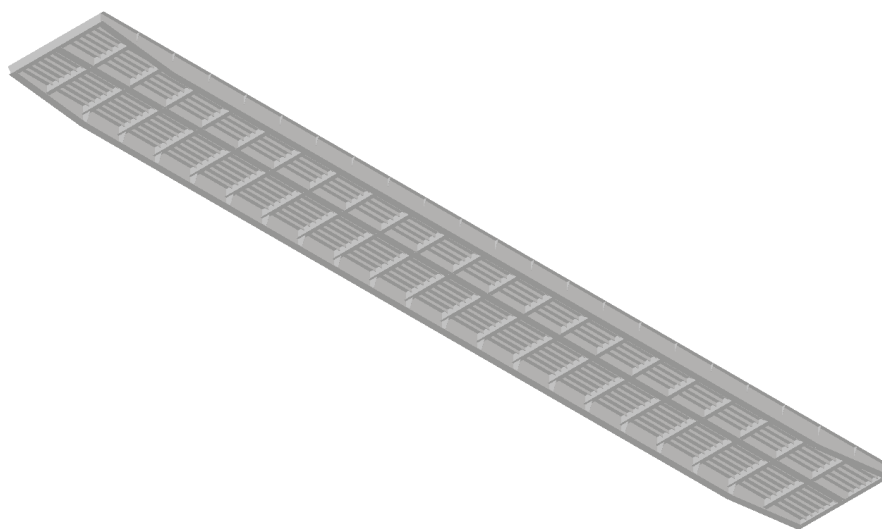
Kako je riječ o pristupnoj rampi za brodove, a u brodogradnji je prvenstveno zbog plovnosti i stabiliteta, a potom otpora broda, nosivosti itd., neizbježno paziti na masu kako cijeloga broda tako i svake pojedine stavke na brodu, napravljena je usporedba varijanti predloženih rješenja konstrukcije [Tablica 18].

Tablica 18. Usporedba masa predloženih rješenja

	varijanta 1	varijanta 2
m [t]	74,07	77,76
Δm [t]	3,69	
Δm , %	5,0	

Redimenzionirana konstrukcija Varijante 1 lakša je od varijante 2 za 3,69 t odnosno 5,0 %.

Kriterijem najmanje mase izabrana je konstrukcija varijante 1 za konačnu te je po njoj izrađen 3D CAD model [Slika 34] iz kojeg su dobiveni osnovni klasifikacijski nacrti priloženi uz ovaj rad.



Slika 34. 3D CAD model konačne konstrukcije

5. ZAKLJUČAK

Dvoradna pristupna rampa dio je RO-RO opreme broda i služi za komunikaciju vozila između paluba, a specifična je po duljini i dvoradnoj funkciji: mogu se koristiti šarniri i na krmenoj i na pramčanoj strani rampe pa se vozila mogu iskrcevati bez okretanja ili vožnje unatrag.

Cilj ovog rada bio je projektiranje konstrukcije dvoradne pristupne rampe za RO-RO brodove prema pravilima klasifikacijskog društva Det Norske Veritas (DNV) [1].

U radu su uz poštivanje tehnoloških i projektnih ograničenja razmotrene dvije varijante konstrukcije:

1. konstrukcija s niskim uzdužnim nosačima visine do 1100 mm ispod pokrova
2. konstrukcija s visokim bočnim stranicama visine do 1000 mm iznad pokrova i nosačima proračunate potrebne visine ispod pokrova rampe

Projektiranje je provedeno u dvije faze. Prva projektna faza odnosi se na određivanje minimalne debljine oplata pokrova rampe i momenta otpora ukrepa na osnovu DNV-ovih preskriptivnih pravila [1] te određivanje geometrije i preliminarnih dimenzija ostalih konstrukcijskih elemenata prema zadanome predlošku.

Druga projektna faza odnosi se na analizu 3D globalnog modela metodom konačnih elemenata (MKE) u programu MAESTRO [2] za sve slučajeve opterećenja, za obje varijante konstrukcije. Rezultati analize provjereni su po kriterijima podobnosti DNV-a [3] za dozvoljene progibe, naprezanje, popuštanja i izvijanja. Elementi konstrukcije koji nisu zadovoljili neki od kriterija podobnosti su redimenzionirani.

Nakon što su obje varijante konstrukcije redimenzionirane i zadovoljile sve kriterije podobnosti, uspoređeni su rezultati odziva i mase konstrukcija na temelju kojih je varijanta 1 odabrana za prikladniju varijantu konstrukcije ovog projekta.

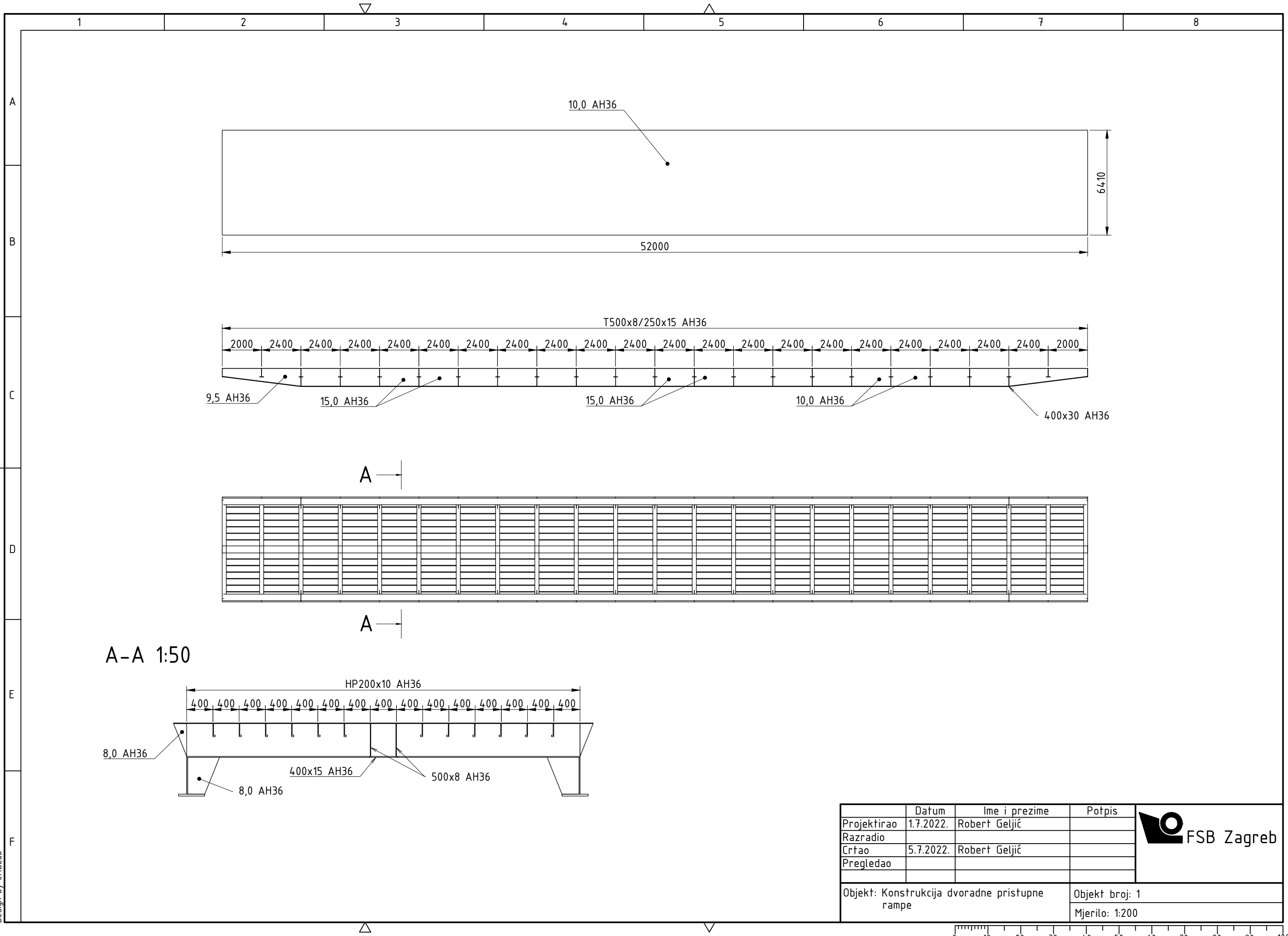
Za odabranu finalnu varijantu konstrukcije, dakle varijantu 1, napravljen je 3D model u programu Autodesk Inventor [4] iz kojeg su dobiveni osnovni klasifikacijski nacrti konstrukcije.

LITERATURA

- [1] Det Norske Veritas: *Special requirements, Part 3 Chapter 10*, 2022.
- [2] MAESTRO Version 11.13.1. <http://www.maestromarine.com>, 2020.
- [3] Det Norske Veritas: *Finite element analysis, Part 3 Chapter 7*, 2021.
- [4] Autodesk Inventor professional 2023, <https://www.autodesk.org/>, 2022.
- [5] The Royal Institution of Naval Architects: *Significant ships of 2017*, 2018.
- [6] WÄRTSILÄ: *Ro-ro*, <https://www.wartsila.com/encyclopedia/term/ro-ro>, 1.7.2022.
- [7] Wikipedia: *USNS Comet (T-AK-269)*, [https://en.wikipedia.org/wiki/USNS_Comet_\(T-AK-269\)](https://en.wikipedia.org/wiki/USNS_Comet_(T-AK-269)), 1.7.2022.
- [8] MacGregor: *Moveable ramps/ tiltable*,
<https://www.macgregor.com/Products/products/ramps/movable-ramps--tiltable/>,
1.7.2022.
- [9] Det Norske Veritas: *Structural design principles, Part 3 Chapter 3*, 2022.
- [10] Det Norske Veritas: *Buckling, Part 3 Chapter 8*, 2022.
- [11] Aliferović, I.: *Nauka o čvrstoći 1*, Tehnička knjiga, Zagreb, 1989.

PRILOZI

- I. CD-R disc
- II. Tehnička dokumentacija



Design by CADLab

Projektirao	Datum	Ime i prezime	Potpis
Razradio	1.7.2022.	Robert Geljić	
Crtao	5.7.2022.	Robert Geljić	
Pregledao			

Objekt: Konstrukcija dvoradne pristupne rampe	Objekt broj: 1
	Mjerilo: 1:200

