

# Projektiranje podizne prekretno rampe broda za prijevoz automobila

---

Grden, Nikola

Master's thesis / Diplomski rad

2020

*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:235:024774>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-14**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Nikola Grden

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Jerolim Andrić

Student:

Nikola Grden

Zagreb, 2020.

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

Zahvaljujem se svom mentoru izv. prof. dr. sc. Jerolimu Andriću za svu pruženu pomoć, na susretljivosti, te na svim savjetima i stručnoj podršci tijekom pisanja ovog rada i studiranja.

Zahvaljujem se svim profesorima i asistentima na trudu i prenesenom znanju.

Zahvaljujem se svim prijateljima i kolegama na pomoći i savjetima.

Posebno se zahvaljujem svojim roditeljima, obitelji i zaručnici Matei koji su mi bili neizmjerne podrška tijekom mog studiranja.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**  
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija brodogradnje



Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **NIKOLA GRDEN**

Mat. br.: 0035186757

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **PROJEKTIRANJE PODIZNE PREKRETNE RAMPE BRODA ZA PRIJEVOZ AUTOMOBILA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **DESIGN OF HOISTABLE TILTING RAMP FOR CAR CARRIER SHIP**

Opis zadatka:

Na osnovu dostupnog generalnog plana broda za prijevoz automobila tipa PCTC-*pure car truck carrier* slijedećih glavnih izmjera:  $Loa=150$  m,  $B=26$  m,  $D=8,8$  m,  $T=6,0$  m, potrebno je projektirati konstrukciju unutarnje podizne prekretno rampe po Pravilima klasifikacijskog društva DNV-GL.

U okviru diplomskog zadatka potrebno je:

1. Analizirati dostupnu literaturu za projektiranje rampi te se detaljno upoznati s Pravilima DNV-GL koja definiraju to područje.
2. Ovisno o položajima oslonaca i topološkim karakteristikama okolne brodske konstrukcije definirati prikladnu geometriju i topologiju prekretno rampe uzimajući u obzir njenu funkciju te geometrijska, tehnološka i druga ograničenja.
3. Projektirati strukturne dimenzije prekretno podizne rampe po preskriptivnim Pravilima DNV-GL korištenjem čelika kao građevnog materijala za zahtijevane slučajeve opterećenja. Opterećenje od vozila uzeti prema zadanom predlošku.
4. Izraditi detaljni 3D MKE model podizne prekretno rampe koristeći pločaste konačne elemente sukladno Pravilima za direktne proračune te provesti proračun strukturnog odziva (pomaci, naprezanja).
5. Izvršiti analizu podobnosti konstrukcije prema strukturnim kriterijima (popuštanje, izvijanje) sukladno Pravilima DNV-GL. U slučaju nezadovoljenja kriterija predložiti strukturno rješenje koje zadovoljava sve razmatrane kriterije.
6. Dimenzionirati osnovnu opremu za rukovanje rampom (sajle, šarnire, hidrauličke cilindre, itd.).
7. Za odabranu konačnu varijantu konstrukcije izraditi 3D CAD model te osnovne klasifikacijske nacрте konstrukcije.

U radu koristiti neke od računalnih programa dostupnih na FSB-u (AUTODESK INVENTOR, MAESTRO, FEMAP, itd.).

Zadatak zadan:

Datum predaje rada:

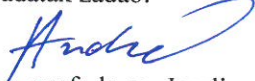
Predviđeni datumi obrane:

14. studenoga 2019.

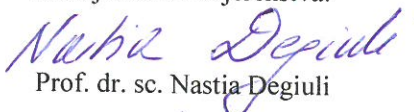
16. siječnja 2020.

20. – 24. siječnja 2020.

Zadatak zadao:

  
Izv. prof. dr. sc. Jerolim Andrić

Predsjednica Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Nastia Degiuli

**SADRŽAJ:**

POPIS OZNAKA.....	III
SAŽETAK .....	V
SUMMARY .....	VI
POPIS SLIKA.....	VII
POPIS TABLICA .....	IX
1. Uvod.....	1
2. Značajke rampe.....	4
3. Projektne značajke podizne prekretno rampe .....	7
3.1.Dimenzije rampe.....	7
3.2.Smještaj rampe na brodu.....	8
3.3.Oslonci .....	8
4. Projektna opterećenja rampe i kriteriji evaluacije .....	9
4.1.Kamioni [6].....	9
4.2.Automobili [6] .....	12
4.3.Propisana projektna ograničenja.....	12
5. Dimenzioniranje konstrukcije rampe po preskriptivnim pravilima DNV-GL.....	15
5.1.Ubrzanja.....	15
5.2.Korozijski dodatak .....	17
5.3. Određivanje konstrukcijskih dimenzija roštilja rampe .....	17
5.4.Određivanje debljine oplata rampe .....	19
6. MKE model.....	21
6.1.Izrada MKE modela .....	21
6.2 Slučajevi opterećenja .....	22
6.2.1.Opterećenje u lukama – LCH .....	23
6.2.1.1.Slučaj opterećenja LCH-1 .....	24
6.2.1.2. Slučaj opterećenja LCH-2.....	25
6.2.1.3. Slučaj opterećenja LCH-3.....	25
6.2.2.Opterećenje prilikom podizanja rampe – LCM .....	26
6.2.3.Opterećenje rampe prilikom plovidbe – LCS .....	28

---

6.2.3.1. Slučaj opterećenja LCS-1 .....	29
6.2.3.2. Slučaj opterećenja LCS-2 .....	29
7. Rezultati MKE modela .....	30
7.1 Opterećenje u lukama – LCH .....	31
7.1.1.LCH-1 .....	31
7.1.2.LCH-2 .....	34
7.1.3.LCH-3 .....	37
7.2. Opterećenje prilikom podizanja rampe - LCM.....	40
7.3.Opterećenje prilikom plovidbe - LCS.....	43
7.3.1.LCS-1 .....	43
7.3.2.LCS-2.....	46
8. CAD i proračun sajli/cilindra.....	49
8.1. Modeliranje rampe u Autodesk INVENTOR-u.....	49
8.2. Proračun sajli i cilindra za pokretanje rampe.....	50
8.2.1.Proračun cilindra.....	51
8.2.2.Proračun sajli .....	53
8.2.3. Mehanički zastoj .....	54
8.2.4.Puknuće jedne sajle.....	54
9. Zaključak.....	56
Literatura.....	57

## POPIS OZNAKA

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
$g$	$m/s^2$	Ubrzanje sile teže
$p$	$N/m^2$	Projektno opterećenje
$a_v$	$m/s^2$	Vertikalno ubrzanje
$C_B$		Blok koeficijent
$Z$	$cm^3$	Moment otpora nosača
$I$	$cm^4$	Moment tromosti nosača
$b_e$	$mm$	Sunosiva širina nosača
$Q$	$t$	Osovinsko opterećenje vozila
$t_p$	$mm$	Debljina oplata
$l$	$mm$	Razmatrana duljina ukrepe
$t_c$	$mm$	Debljina korozijskog dodatka
$E$	$N/mm^2$	Young-ov modul elastičnosti
$l$	$mm$	Razmatrana duljina ukrepe
$\nu$		Poissonov koeficijent
$R_{eH}$	$N/mm^2$	Minimalna nominalna granica razvlačenja
$R_m$	$N/mm^2$	Vlačna čvrstoća
$\rho$	$kg/m^3$	Specifična gustoća materijala
$f$	$mm$	progib panela
$\sigma_{max}$	$N/mm^2$	Maksimalno naprezanje strukture panela
$\sigma_{dop}$	$N/mm^2$	Maksimalno dopušteno naprezanje
$\sigma_{dop,vm}$	$N/mm^2$	Dozvoljena ekvivalentna von Mises naprezanja
$\tau_{max}$	$N/mm^2$	Maksimalno smično naprezanje strukture panela
$\gamma$		Faktor sigurnosti
$\tau_{dop}$	$N/mm^2$	Maksimalno dopušteno smično naprezanje
$F_v$	$N$	Vertikalna sila
$L_{BP}$	$m$	Duljina između perpendikulara
$L_{OA}$	$m$	Duljina preko svega



---

B	<i>m</i>	Širina broda
D	<i>m</i>	Visina broda
T	<i>m</i>	Gaz
a1	<i>mm</i>	Duljina otiska kotača
b1	<i>mm</i>	Širina otiska kotača
SW	<i>tona</i>	Masa rampe
SWL	<i>tona</i>	Masa tereta
Ds	<i>mm</i>	Promjer sajle
MBL	<i>kN</i>	Minimalna sila pucanja sajle

## SAŽETAK

Cilj ovog rada bio je projektiranje konstrukcije podizne prekretno rampe za RO-RO brod za prijevoz automobila i kamiona ( $L_{OA} = 150$  m,  $B = 26$  m,  $D = 8,8$  m,  $T = 6,0$  m) po pravilima klasifikacijskog društva DNV-GL. Na početku rada prikazane su opće značajke rada kako bi se pokazale određene specifičnosti rampe. Po projektnim značajkama opisani su načini opterećenja kojima je rampa izložena uz skice vozila te njihovih rasporeda otisaka kotača koja će biti korištena u projektiranju rampe. S obzirom na okolnu brodsku strukturu određena je geometrija rampe.

Po pravilima DNV-GL izračunate su strukturne dimenzije za zahtijevane slučajeve opterećenja. U programskom alatu MAESTRO napravljen je 3D model rampe po izračunatim dimenzijama te je provedena analiza metodom konačnih elemenata. Svi rezultati provjereni su po kriterijima strukturne podobnosti (popuštanje, progibi, izvijanje) izračunatih po pravilima DNV-GL.

Za proračunatu konstrukciju izrađen je 3D model u programu *Autodesk Inventor* iz kojeg su se izvukli osnovni nacrti. Za dobivenu konstrukciju rampe dizajnirane su sajle i cilindar koji služe za dizanje i spuštanje rampe.

## SUMMARY

The aim of the thesis was a structural design of hoistable tilting ramp of RO-RO ship ( $L_{OA}=150$  m,  $B= 26$  m,  $D= 8,8$  m,  $T= 6,0$  m), type pure car truck carrier based on DNV-GL rules for classification of ships. At the beginning general features of hoistable tilting ramps have been presented to show some specialities of this type of ramp. Through project technical specification all load cases have been described and geometrical and mass features of vehicles that will be used in load cases are given. Depends on ship geometrical constraints, geometrical features of the hoistable tilting ramp have been chosen.

Using DNV-GL rules for ship classification initial structural elements have been calculated. The computer programme MAESTRO has been used for development of 3D FEM model of the ramp using the structural dimensions previously defined. Finite element method calculations in MAESTRO have been made and results have been checked by DNV-GL strength criteria (yield, deflection, buckling).

For the designed structure of Hoistable Tilting Ramp, 3D CAD model have been made using the computer programme *Autodesk Inventor*. Basic drawings of the ramp have been made out from 3D CAD model. For the designed structure of hoistable tilting ramp, steel wires and cylinder used for manoeuvring have been calculated.

## POPIS SLIKA

Slika 1 Brod Comet [3].....	1
Slika 2 MV Tønsberg [4].....	2
Slika 3. Mogućnosti rukovanja rampe[5].....	4
Slika 4 Rampa s statičnim osloncem[5].....	5
Slika 5 Rampa oslonjena putem sajle u sredini[5].....	5
Slika 6 Primjer prekretno rampe[5].....	6
Slika 7 Dimenzije pokrova rampe.....	7
Slika 8 Dimenzije kamiona.....	10
Slika 9 Dimenzije i pozicije otisaka kotača kamiona .....	10
Slika 10 Prikolica oslonjena na stalak .....	11
Slika 11 Raspored i dimenzije dodirne površine stalka.....	11
Slika 12. Model rampe u programskom alatu MAESTRO.....	21
Slika 13. Zadano opterećenje od otiska kotača.....	22
Slika 14 Oslonci za slučaj LCH.....	23
Slika 15 LCH-1 raspored kamiona .....	24
Slika 16 Raspored kamiona za slučaj LCH-2 .....	25
Slika 17. Raspored kamiona za slučaj LCH-3 .....	25
Slika 18. Oslonci za slučaj LCM .....	26
Slika 19. Raspored kamiona za LCM .....	27
Slika 20. Oslonci za LCS .....	28
Slika 21 Raspored opterećenja za LCS-2.....	29
Slika 22. Deformacije za slučaj opterećenja LCH-1.....	31
Slika 23. Naprezanja von Mises LCH-1 .....	31
Slika 24. Najveća von Mises naprezanja .....	32
Slika 25. PCCB - LCH-1 .....	32
Slika 26. PCSF - LCH-1 .....	33
Slika 27. Deformacije za slučaj opterećenja LCH-2.....	34
Slika 28. Naprezanja von Mises LCH-2 .....	34
Slika 29. Najveća von Mises naprezanja LCH-2.....	35
Slika 30. PCSF LCH-2.....	35
Slika 31. PCCB LCH-2.....	36
Slika 32. Deformacije za slučaj opterećenja LCH-3.....	37
Slika 33. Naprezanja von Mises LCH-3 .....	37
Slika 34. Najveća von Mises naprezanja LCH-3 .....	38
Slika 35. PCSF LCH-3.....	38
Slika 36 PCCB LCH-3.....	39
Slika 37. Deformacije za slučaj opterećenja LCM .....	40

---

Slika 38. Naprezanja von Mises LCM.....	40
Slika 39. Naprezanja u X-osi LCM.....	41
Slika 40. PCCB LCM .....	41
Slika 41. PCSF LCM .....	42
Slika 42. Deformacije za slučaj opterećenja LCS-1 .....	43
Slika 43. Naprezanja von Mises LCS-1 .....	43
Slika 44. PCCB LCS-1 .....	44
Slika 45. PCSF LCS-1 .....	44
Slika 46. Derormacije za slučaj opterećenja LCS-2 .....	46
Slika 47. Naprezanja von Mises LCS-2.....	46
Slika 48. PCSF LCS-2 .....	47
Slika 49. PCCB LCS-2 .....	47
Slika 50. Izometrijski 3D CAD model projektne rampe u INVENTOR-u.....	49
Slika 51 3D CAD model rampe.....	49
Slika 52. 3D CAD model rampe - pogled s boka .....	50

## POPIS TABLICA

Tablica 1 Potrebne širine rampe .....	6
Tablica 2. Vrste kamiona .....	9
Tablica 3 Kriteriji za izvijanje .....	14
Tablica 4. Podaci o brodu i smještaju rampe .....	15
Tablica 5 Ubrzanja i dinamički koeficijenti.....	16
Tablica 6. Minimalne debljine oplata ovisno o opterećenju kotača.....	20
Tablica 7 Rubni uvjeti LCH.....	23
Tablica 8 Opterećenja rampe za slučaj LCH-1 .....	24
Tablica 9. Opterećenja za slučaj LCH-3 .....	26
Tablica 10. Rubni uvjeti u osloncima za LCM.....	26
Tablica 11. Opterećenja za LCM.....	27
Tablica 12. Rubni uvjeti za LCS.....	28
Tablica 13. Opterećenja za LCS-1 .....	29
Tablica 14. Opterećenje za LCS-2.....	29
Tablica 15. Rezultati MKE LCH-1 .....	33
Tablica 16. Rezultati MKE LCH-2.....	36
Tablica 17. Rezultati MKE LCH-3.....	39
Tablica 18. Rezultati MKE LCM.....	42
Tablica 19. Rezultati MKE LCS-1.....	45
Tablica 20. Rezultati MKE LCS-2.....	48

## 1. Uvod

RO-RO ili Roll On/Roll Off brodovi su takav tip brodova koji su namijenjeni za prijevoz tereta koji se preko brodskih rampi ukrcavaju kotrljanjem, odnosno na kotačima. Taj teret mogu biti automobili, kamioni, prikolice ili bilo koji drugi teret postavljen na određena kolica poput kontejnera na Rolux kasete te se pomoću tegljača krcaju na brod.

Sam početak korištenja RO-RO brodova datira dosta daleko kada su se s određenim plovilima prevozile kočije na kraćim relacijama. Prvi RoRo-ovi prenosili su parne lokomotive preko rijeka. Jedan od prvih brodova bio je "Firth of Forth" u Škotskoj 1851. godine i trajao je skoro četrdeset godina.[1] Pravi razvitak ovakvih plovila se događa tijekom drugog svjetskog rata kada su Amerikanci s puno raznovrsnih plovila došli u Europu te izvršili iskrcavanje u čuvenoj bitci na Normandiji. Tom prilikom na plovilima su se provozili razni strojevi i vozila.

Prvi modernim RO-RO brodom smatra se dvovijčani preookeanski brod Comet prikazan na slici 1., a sagrađen je 1958 godine za potrebe prijevoza vojnih vozila [2]. Brod Comet raspolagao je s 16 800 m<sup>3</sup> parkirnog prostora, a prekrcaj tereta se vršio putem bočne rampe, što je u to doba bilo jako impresivno. Prvu krmenu rampu postavila je iste te godine tvrtka MacGregor.



Slika 1. Brod Comet [3]

Prvi moderni RO-RO brodovi koristili su male prekrajne rampe i uglavnom su služili za vožnju na kratkim relacijama. Spoj vještina, znanja utemeljenih na znanosti i teoriji, te iskustva inženjera brodogradnje potkovani snažnim razvitkom tehnologije, rezultirali su izgradnjom sve većih RO-RO brodova te njihovo opremanje sve većim i većim prekrajnim rampama s ciljem što bržeg prekrcanja tereta. Prekrajne rampe su skupe te uvelike utječu na cijenu broda.

U današnje vrijeme RO-RO brodovi su konstruirani na način da budu neovisni o lukama u koje pristaju, odnosno da brodovi vrše prekrcaj samo putem opreme kojom su opremljeni što ima daje veliki stupanj autonomije i neovisnost o lukama. Razvitkom tijekom vremena današnji RO-RO brodovi imaju izgled velike kutije koja plovi na vodi, što sa sobom nosi manu da su jako osjetljivi na udare vjetra zbog velike površine nadvođa. Zbog osjetljivosti na vjetar često ti brodovi imaju problema prilikom sidrenja i ulaska u luke zbog loših manevarskih karakteristika. Najveći RO-RO brod dugačak je 265m preko svega te ima nosivost od 76 500 gt., a nosi naziv MV Tønsberg te je prikazan na slici 2. s koje se može vidjeti te shvatiti problem velike površine nadvođa današnjih RO-RO brodova. [4]



Slika 2. MV Tønsberg [4]



Unutar segmenta RO-RO brodova razvili su se specijalizirani brodovi za prijevoz isključivo automobila te nose naziv PCC – *pure car carrier*, te brodovi koji prevoze isključivo automobile i kamione PCTC – *pure car truck carrier*. Specifičnost ovih brodova je ta da se prekrcaj tereta izvršava iznimno brzo u luci preko velikih rampi kojima su opremljeni. Ovi brodovi su konstruirani s namjerom povećanja kapaciteta koji brod može prevoziti te minimiziranja šteta do kojih dolazi prilikom prijevoza automobila i kamiona posebnim sigurnosnim mjerama te da se što kraće zadržavaju u lukama, sve u svrhu što manjeg gubitka novca, odnosno što veće zarade.

Rampe na brodu mogu se podijeliti na više načina a jedan od načina je na vanjske i unutarnje. Vanjske rampe služe za ukrcaj i iskrcaj tereta a razlikuju se po svojem položaju na brodu i usmjerenju. S obzirom na položaj mogu biti krmene, pramčane i bočne, a s obzirom na usmjerenje mogu biti ravne i zakrivljenje u odnosu na uzdužnu simetralu broda. Rampe mogu biti i zakretne a najčešće su smještene na krmu broda.

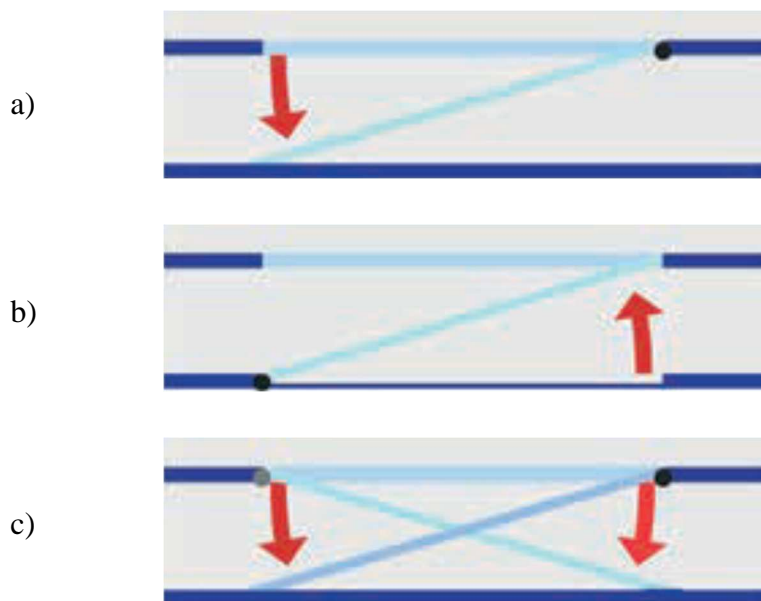
Unutarnje rampe smještene su u brodu i služe za manipulaciju teretom unutar broda. Pod pojmom unutarnjih rampi na brodu razlikuju se pomične i nepomične rampe. Pomične rampe mogu spajati više paluba, zatvarati palubne otvore te također sudjelovati kao prostor za polaganje tereta. Za razliku od pomičnih paluba, nepomične palube ulaze u proračun čvrstoće.

U ovom radu razmatra se unutarnja pomična rampa na jednom brodu kategorije PCTC, za koju će se po pravilima klasifikacijskog društva DNV-GL odrediti potrebna konstrukcija sukladno njenoj funkciji te projektnim i tehnološkim ograničenjima. U daljnjem dijelu rada prikazan je rezultat ispitivanja 3D MKE modela u programu Maestro ovisno o raznim stanjima krcanja kojima se simuliraju opterećenja kojima je rampa izložena u eksploataciji. Sukladno značajkama rampe dimenzionirane su sajle i cilindar koji služe za pokretanje rampe. Na kraju cijela rampa je prikazana kao 3D model u programu Inventor proizvođača Autodesk.

## 2. Značajke rampe

Sam naziv ove rampe bilo je teško definirati. Na engleskom naziv za ovu rampu je Hoistable Tilttable Ramp što u suštini predstavlja pomičnu rampu koja ima mogućnost spajanja dviju paluba na načine da se vozila mogu prekravati na različite palube iz smjera krme ili ako se rampa prekrene onda iz smjera pramca. Tako da je sam prijevod nastao kao prekretna rampa.

Ovakve rampe izrađuju se i na način da se mogu otvarati i dizati samo jedna strana, tako da ovaj mehanizam je odabir brodovlasnika. Krajevi rampe mogu biti učvršćeni na gornju palubu kao na slici 3.a) ili na donju palubu kao na slici 3.b) ovisno o par značajki i inženjerskom pristupu, te o samoj potrebi i želji brodovlasnika. Slika pod 3.c) objašnjava pojam prekretna rampe, odnosno da rampa može spuštati oba kraja tako da je čvrsto vezana za palubu na suprotnom kraju.



Slika 3. Mogućnosti rukovanja rampe[5]

Naime ukoliko se za brod izrađuje rampa duljine do 30 metara, proizvođač preporuča da se rampa diže preko hidrauličkih cilindara koji su spojen jednim dijelom na trup broda , odnosno palubu, a drugim dijelom na rampu. Za rampe preko 30 metara preporuča se mehanizam rukovanja rampom putem cilindra koji je jednim vrhom vezan za rampu a drugim za sajle. Sajle i cilindar su

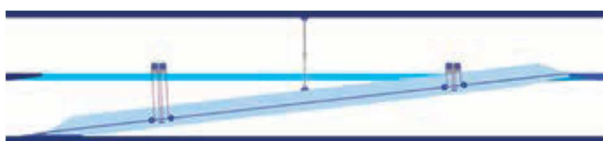
međusobno spojene tako da se pomicanjem cilindra natežu, ili otpuštaju, sajle što rezultira dizanje ili spuštanje rampe ovisno da li se cilindar izvlači, ili uvlači.

Proizvođač propisuje da dizanje, ili spuštanje, rampe traje između 2 do 5 minuta. Vrijeme potrebno za taj manevar vezan je uz cijenu hidrauličke instalacije, odnosno što se više vrijeme operacije približi dvije minute skuplje su hidrauličke instalacije. Također prilikom projektiranja hidrauličkih instalacija važno je da se unaprijed znaju temperature pri kojima se obavljaju operacije rukovanja rampom.

Prilikom povezivanja paluba različitih razina rampe imaju konstruiran još jedan oslonac u sredini rampe kako bi se smanjila naprezanja u sredini rampe. Taj oslonac može biti fiksiran na donjoj palubi na koji se rampa osloni kada se spusti, ili putem sajli tako da je vezana za gornju palubu čime se ostvaruje oslonac.



Slika 4. Rampa s statičnim osloncem[5]



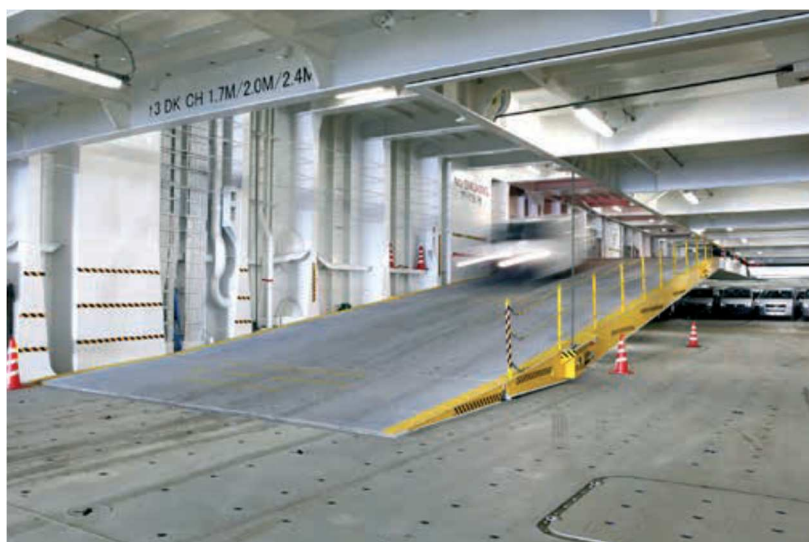
Slika 5. Rampa oslonjena putem sajle u sredini[5]

Širina rampe određena je zadaćom i potrebnim protočnim kapacitetom za koji je ta rampa namijenjena. Površina rampe po kojoj se voze automobili i kamioni obrađene su tako da imaju svojstvo protukliznosti. Tipične širine rampi za prijevoz automobila ili kamiona prikazane su u tablici 1.

Tablica 1 Potrebne širine rampe

Prijevozno sredstvo	Broj traka	Potrebna širina rampe, <i>m</i>
Automobili	1	3
	2	5
Kamioni	1	3,5
	2	6

Primjer kako u stvarnosti izgleda jedna prekretna rampa prikazana je na slici 6. Po svim značajkama vidimo da je ovo omanja rampa s dvije trake pogonjena s sajlama.



Slika 6. Primjer prekretna rampe[5]

### 3. Projektne značajke podizne prekretne rampe

#### 3.1. Dimenzije rampe

Podizna prekretna rampa koja se razmatra u ovom radu dio je broda tipa PCTC za prijevoz automobila i kamiona duljine 130 metara. S obzirom da je paluba pomična ona ne sudjeluje u uzdužnoj čvrstoći. Osim za manipulaciju teretom ova rampa služi i za prijevoz automobila i kamiona, a zbog značajke da je pomična moguće je krcanje tereta i ispod palube. Po projektnoj dokumentaciji dobivenoj za rampu koja je tema ovog rada unaprijed je definirana veličina rampe, odnosno njena duljina i širina, a sam pokrov rampe po kojem se kreću vozila opisan je na slici 7.



Slika 7. Dimenzije pokrova rampe

Dimenzije rampe definirane su tako da su se poštivala određena ograničenja poput dovoljne zračnosti između kamiona i palube iznad rampe. Naime prilikom prekrcavanja kamiona putem rampe s jedne na drugu palubu potrebno je tako definirati duljinu rampe da kut otklona rampe ne bude preveliki. Ukoliko bi kut bio preveliki prilikom prolaska kamion bi mogao s prikolicom udariti u palubu iznad sebe, tako da je potrebno ostvariti takav kut da se osigura dovoljno zračnosti između konstrukcije gornje palube i kamiona. Širina rampe određena je na način da bi se mogao vršiti prolazak kamiona u dvije trake te njihovo sigurno vezanje za rampu i prijevoz. Kako je i naznačeno u tablici 1. potrebna širina za prijevoz kamiona u dvije trake trebala bi biti veća od 6 metara, što je s širinom od 6,3 metra ostvareno.

### 3.2. Smještaj rampe na brodu

Ova rampa je smještena tako da kada se gleda uzdužno sredina rampe sjeda na 77. rebro broda i to na fiksni oslonac koji se nalazi na donjoj palubi na koju se rampa spušta. Po dostupnim podacima o brodu, izračunao sam da se 77. rebro broda nalazi na 61,6 metru broda, po čemu se može reći da rampa počinje na 39. metru i proteže se skroz do 84. metra uzdužno. Kada se gleda po visini rampa se nalazi 14,6 metara gledano od dna broda na palubi broj 5. Bočno je paluba pomaknuta za 8,8 metara od sredine broda.

### 3.3. Oslonci

Ova rampa tijekom eksploatacije može biti u 3 različita stanja odnosno u 3 različite pozicije. Naime rampa može biti zatvorena prilikom čega zatvara gornju palubu na koju je vezana, može biti spuštena prilikom čega povezuje dvije palube, te sam proces pomicanja rampe iz jednog u drugo stanje može se smatrati kao zasebno stanje. Svako stanje ima svoje posebnosti i ima različite oslonce. Samo pojašnjenje svakoga stanja te oslonaca specifičnih za to stanje biti će opisani u daljnjem dijelu rada kada će se detaljno obrađivati svako stanje zasebno. Sama čvrstoća oslonaca neće se obrađivati u ovom radu.

## 4. Projektna opterećenja rampe i kriteriji evaluacije

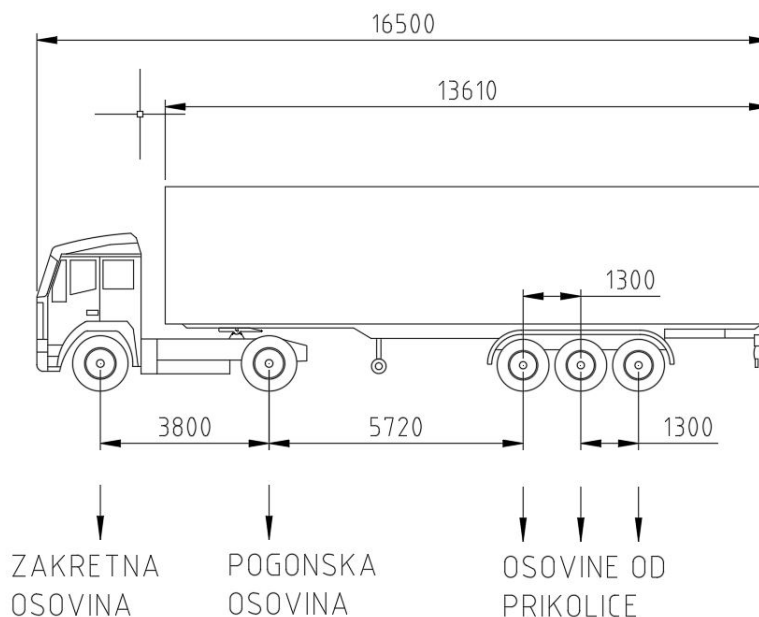
Rampa je predviđena da se po njoj kreću i parkiraju različiti kamioni s prikolicama i automobili. Kamioni se razlikuju po opterećenjima kojima osovine od kamiona i prikolice preko kotača djeluju na rampu. Dimenzije prikolica i kamiona se međusobno ne razlikuju kao i otisci kotača na oplatu rampe. Osim zajedno s tegljačem za prikolice je predviđeno da mogu stajati parkirane na rampu tako da se dijelom na kojem bi inače bile vezne za tegljač oslanjaju na poseban oslonac koji se postavi na oplatu rampe.

### 4.1. Kamioni [6]

U ovom djelu biti će prikazane sve informacije o kamionima za koje je po projektu predviđeno da će opterećivati rampu. Na slici 8. prikazana je shema kamiona s dimenzijama te nazive osovina. Po nazivima osovina s slike 8 definirana je tablica 2 u kojoj su opisani svi kamioni s naznačenim opterećenjem po svakoj osovini. Kratica VL u tablici predstavlja Vehicle Load što bi značilo opterećenje od vozila.

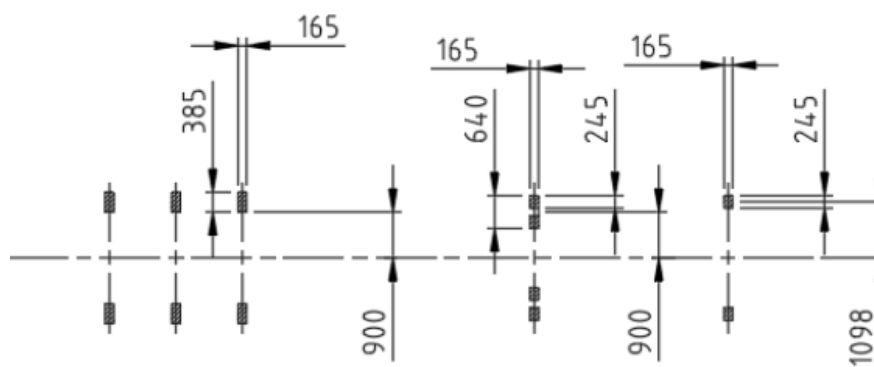
Tablica 2. Vrste kamiona

Kamioni	Ukupna masa, tona	Zakretna osovina, tona	Pogonska osovina, tona	Osovine od prikolice, tona
VL1	50	7	13	10
VL2	55	6	13	12
VL3	60	8	16	12



Slika 8. Dimenzije kamiona

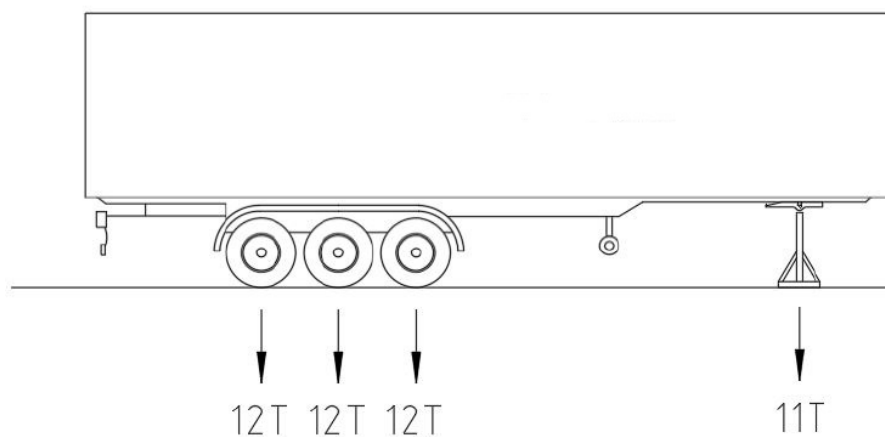
Da bi podaci koji su izneseni u tablici 2 bilo upotrebljivi, potrebno je znati dimenzije i raspored kotača na svakoj osovinu jer se opterećenje prenosi na oplatu rampe preko kotača. Referentne veličine u ovom slučaju su širina i dužina otisaka kotača te njihove međusobne udaljenosti, što ulazi u proračune za dimenzioniranje oplata rampe, te je bitno da bi se znalo pozicionirati opterećenje u 3D FEM modelu. Na slici 9 prikazan je potreban raspored kotača, počevši s osovinama od prikolica pa u desno do pogonske i zakretne osovine.



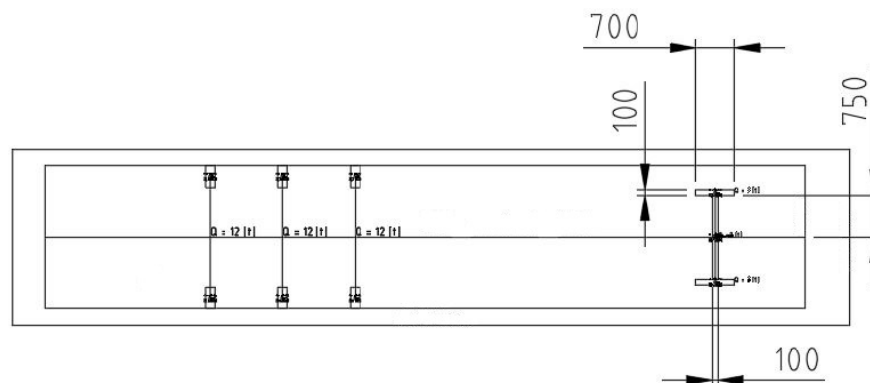
Slika 9. Dimenzije i pozicije otisaka kotača kamiona



Poseban slučaj opterećenja čini parkirana prikolica s stalkom na vrhu što joj daje stabilnost s obzirom da nije spojena na tegljač. Za razmatranje će se gledati slučaj s većim opterećenjem tako da je za parkirane prikolicu izabrana ona koja ima opterećenje od 12 tona po osovini. Raspored opterećenja po osovinama i stalku prikazan je na slici 10. Stalak opterećenje prenosi na rampu analogno kao i kotači putem dodirne površine. Dimenzije i položaj dodirnih površina stalka prikazane su na slici 11. Opterećenje od 12 tona po svakoj osovini te 11 tona putem oslonca čini ukupno 47 tona opterećenja. Ovaj slučaj opterećenja označit će se s oznakom VL4.



Slika 10. Prikolica oslonjena na stalak



Slika 11. Raspored i dimenzije dodirne površine stalka

## 4.2. Automobili [6]

Po projektu na rampi je moguće parkirati 18 automobila. Kao projektno opterećenje, automobil je uzet s dimenzijom duljine 4,8 metra i mase 2.5 tone. Kada bi se rampa ispunila automobila, ukupno opterećenje rampe iznosilo bi 48 tone što je puno manje od opterećenja kamiona. Zato se opterećenje rampe automobilima ne smatra kritičnim te se neće posebno provjeravati.

## 4.3. Propisana projektna ograničenja

Po DNV-GL pravilima i propisima izračunata su dozvoljena naprezanja za projekt. Dozvoljena naprezanja vezana su uz materijal koji je predviđen za izradu rampe. Konstrukcija rampe biti će izrađena od AH-36 pojačanog čelika.

### Svojstva AH-36:

Minimalna granica razvlačenja,  $R_{eH} = 355 \text{ N/mm}^2$

Vlačna čvrstoća,  $R_m = 490 \text{ N/mm}^2$

Smična čvrstoća,  $\tau_{eH} = 205 \text{ N/mm}^2$

### Dozvoljena maksimalna naprezanja po DNV-GL pravilima [7]

Dozvoljena normalna komponentna naprezanja:

- Uvjeti u lukama, AC-I  $\sigma_{dop} = R_{eH} \cdot C_S = 248 \text{ N/mm}^2$
- Uvjeti na moru, AC-II  $\sigma_{dop} = R_{eH} \cdot C_S = 301 \text{ N/mm}^2$

$C_S = 0,7$  za AC-I

$C_S = 0,85$  za AC-II

**Dozvoljena smična naprezanja:**

- Uvjeti u lukama, AC-I  $\tau_{dop} = \tau_{eH} \cdot C_t = 143 \text{ N/mm}^2$
- Uvjeti na moru, AC-II  $\tau_{dop} = \tau_{eH} \cdot C_t = 174 \text{ N/mm}^2$

$C_t=0,7$  za AC-I

$C_t=0,85$  za AC-II

**Dozvoljena ekvivalentna von Mises naprezanja:**

- Uvjeti na moru, AC-II  $\sigma_{dop,vm} = R_{eH} \cdot 0,9 = 284 \text{ N/mm}^2$

**Dozvoljeni progibi**

Dozvoljen progib rampama i palubama za prijevoz vozila ne bi trebao biti veći od:

$$f < \frac{b_s}{200}$$

f – progib

$b_s$  – razmak između oslonaca

**Izvijanje oplata**

Kod kompleksne konstrukcije poput one od broda postoji više načina oštećenja. Informacija samo o naprezanju u nekom elementu konstrukcije nije dostatna, potrebno je znati hoće li doći do popuštanja, izvijanja ili nekog drugog načina oštećenja. Model podobnosti pruža informaciju o prekoračenju dozvoljenog odziva konstrukcije, a predstavljen je bibliotekom analitički zadanih projektnih kriterija. U najopćenitijem, normaliziranom obliku, to se može izraziti na sljedeći način:

$$g = \frac{C - \gamma D}{C + \gamma D}$$

Gdje je:

$g$  – faktor podobnosti

$C$  – izdržljivost (*Capability*)

$D$  – zahtjev (*Demand*)

$\gamma$  – faktor sigurnosti

Faktor podobnosti kreće se u rasponu vrijednosti od -1 do +1. Granična vrijednost  $g = -1$  postiže se za slučaj kada je izdržljivost jednaka nuli, a granična vrijednost  $g = +1$  postiže se kada je zahtjev jednak nuli. Podobnost elementa konstrukcije je osigurana ako faktor podobnosti poprima vrijednost veću ili jednaku od nule [8] [9]. U tablici 12. dan je popis razmatranih kriterija pri evaluaciji podobnosti uz korištene faktore sigurnosti ( $\gamma$ ) usklađene sa pravilima DNV-GL-a za pojedini kriterij.

Tablica 3. Kriteriji za izvijanje

Kriterij	Opis kriterija	$\gamma$
PCSF	<i>Panel Collapse, Stiffener Flexure</i>	1.11
PCCB	<i>Panel Collapse, Combined Buckling</i>	1.11

Kriteriji PCSF i PCCB evaluiraju različite modove izvijanja oplata između ukrepa, što je važno razmatrati kod Ro-Ro brodova zbog paluba koje udovoljavaju zahtjevima opterećenja od vozila pri relativno tankim debljinama limova. Detaljan opis svih kriterija dan je u [8] i [9].

## 5. Dimenzioniranje konstrukcije rampe po preskriptivnim pravilima DNV-GL

Sukladno dobivenom projektnom dokumentacijom dimenzionirala se konstrukcija rampe bez jakih uzdužnih nosača. Za razmake između poprečnih nosača uzeta je veličina koja odgovara razmaku okvirnih rebara broda za koji se ova rampa projektira dok je za razmak uzdužnih nosača uzet standardni razmak od 800mm koji je korišten kod okolne brodske konstrukcije.

- Razmak poprečnih elemenata:  $l=2400$  mm
- Razmak uzdužnih elemenata:  $b=800$  mm

### 5.1.Ubrzanja

U tablici 3 dani su opći podaci o brodu, te podaci o smještaju rampe na brodu. Koristeći opće podatke o brodu i podatke o smještaju rampe na brodu, izračunati su maksimalni iznosi ubrzanja po pojedinim osima.

Tablica 4. Podaci o brodu i smještaju rampe

LOA	150,00 <i>m</i>
LBP	137,50 <i>m</i>
B	26,00 <i>m</i>
D	8,80 <i>m</i>
C <sub>B</sub>	0,65
T	6,00 <i>m</i>
Brzina	17W/20S <i>čv</i>
Paluba broj 3, visina iznad osnovice	8,90 <i>m</i>
Paluba broj 5, visina iznad osnovice	14,60 <i>m</i>
Ukupna zračnost, paluba 3	4,90 <i>m</i>
Ukupna zračnost, paluba 35	4,90 <i>m</i>
X- kordinata do težišta rampe	61,60 <i>m</i>
Y-kordinata od CL do težišta rampe	8,790 <i>m</i>
Z-kordinata do težišta rampe	14,60 <i>m</i>

Iznosi maksimalna ubrzanja po osima izračunati po pravilima klasifikacijskog društva DNV-GL dani su u tablici 5.

Tablica 5. Ubrzanja i dinamički koeficijenti

Ubrzanja	Vrijednosti
Max $a_{z\_env}, m/s^2$	5,055
Max $a_{y\_env}, m/s^2$	5,637
Max $a_{x\_env}, m/s^2$	2,282
$a_v$	1,52
$a_t$	0,58
$a_l$	0,24

Dinamički koeficijenti  $a_v$ ,  $a_t$ ,  $a_l$  koriste se za uvećavanje statičkih opterećenja. Statička opterećenja množe se s dinamičkim koeficijentima da se pretvore u dinamička opterećenja.

$$a_v = \frac{(Max a_{z\_env} + g)}{g}$$

$$a_t = Max a_{y\_env} / g$$

$$a_l = Max a_{x\_env} / g$$

## 5.2. Korozijski dodatak

Sukladno pravilima DNV-GL za dimenzioniranje rampe definirani su sljedeći korozijski dodaci:

- za pokrov korozijski dodatak iznosi  $t_c = 1,0$  mm
- za poprečne i uzdužne elemente korozijski dodatak iznosi  $t_c = 0,5$  mm

Po pravilima u FE modelu debljine elemenata uvećanih sa korozijskim dodatkom koristiti će se prilikom provjera pomaka i naprezanja, dok će se za provjeru izvijanja koristiti debljine elemenata bez korozijskog dodatka.

## 5.3. Određivanje konstrukcijskih dimenzija roštilja rampe

Uzdužnjaci

Konstrukcijsko opterećenje prilikom plovidbe

$$P_{wl-2} = \frac{Q}{n_0 a_1 b_1} (g + a_v) \cdot 10^6 = 1404 \frac{kN}{m^2} = P$$

$Q = 12 t$  – maksimalno osovinsko opterećenje

$n_0 = 2$  – broj površina po osovini koje opterećuju površinu (broj kotača)

$a_1 = 165$  mm – duljina otiska kotača

$b_1 = 385$  mm – širina otiska kotača

$a_v = 5.055$  m/s<sup>2</sup> – vertikalna akceleracija

**Zahtjevni moment otpora uzdužnog nosača**

$$Z = \frac{P \cdot k_z \cdot c \cdot d \cdot l_{bdg}}{m \cdot C_S \cdot R_{eH}} \cdot 10^{-3}$$

Koeficijent  $k_z$  za  $0,6 < b_1/b < 1,0$

$$k_z = \left( 1,15 - 0,25 \frac{b_1}{b} \right) = 0,94$$

koeficijent  $c = b_1$  za  $b_1 < b$

koeficijent  $d=a_1$  za  $a_1 < l$

$l_{bdg}=l$

Koeficijent momenta savijanja

$$m = \frac{r}{\left(\frac{a_1}{1000 \cdot l}\right)^2 - 4,7 \frac{a_1}{1000 \cdot l} + 6,5} = 4,69$$

$r = 29$  za zglobno oslonjenu gredu

$C_S = 0,95$  koeficijent za AC-II

Minimalni moment otpora uzdužnog nosača

$$Z = 139,31 \text{ cm}^3$$

Za uzdužni nosač odabran je U profil:

U 200x8/400x8

Poprečni nosač

Moment otpora računa se po:

$$Z = \frac{6,25 \cdot S^2 \cdot b \cdot p}{m \cdot f_1} = 1499 \text{ cm}^3$$

S - raspon poprečnog jakog nosača

b - širina pojasa opterećenja koja ulazi u proračunski dio

$f_1$  – koeficijent ovisan o materijalu

Odabran je T- profil:

T 700x8/200x25



## 5.4. Određivanje debljine oplata rampe

Za određivanje debljine oplata rampe relevantno je osovinsko opterećenje koje se preko otiska kotača prenosi na oplatu rampe.

Kao najgore lokalno opterećenje za proračun izabrano je opterećenje otiska kotača od osovine prikolice kamiona VL3. Debljina opločena proračunava se za stanje opterećenja u kojem brod plovi.

Konstruktivsko opterećenje prilikom plovidbe

$$P_{wl-2} = \frac{Q}{n_0 a_1 b_1} (g + a_v) \cdot 10^6 = 1404 \frac{kN}{m^2} = P$$

$Q = 12 \text{ t}$  – maksimalno osovinsko opterećenje

$n_0 = 2$  – broj površina po osovini koje opterećuju površinu (broj kotača)

$a_1 = 165 \text{ mm}$  – duljina otiska kotača

$b_1 = 385 \text{ mm}$  – širina otiska kotača

$a_v = 5.055 \text{ m/s}^2$  – vertikalna akceleracija

Minimalna debljina opločenja bez korozivskog dodatka

$$t = \frac{77,4 \cdot \alpha_p \cdot \sqrt{k_w \cdot c \cdot b \cdot P}}{\sqrt{m \cdot C_\alpha \cdot R_{eH}}} \cdot 10^{-3}$$

$\alpha_p = 1$  korekcijski koeficijent ovisan o omjeru  $b/a$

$k_w$  – koeficijent ovisan i omjeru  $a_1/b$

$$k_w = 1,3 - \frac{4,2}{\left(\frac{b_1}{a} + 1,8\right)^2} = 0,399$$

$c$  -koeficijent za  $b_1 < b$   $c = b_1$

$b = 400$  – širina opterećenog panela

$m$  – faktor vezan uz odnos  $b_1$  i  $b$

$$m = \frac{38}{\left(\frac{b_1}{b}\right)^2 - 4,7 \cdot \frac{b_1}{b} + 6,5} \quad \text{za } b_1 < b$$

$$m = 11,63$$

$C_\alpha=2,0$  – koeficijent ovisan o stanju opterećenja

Opločenje ne smije biti manje od:

$$t_{gross} = t + tc = 8,5 + 1 = 9,5 \text{ mm}$$

Odabrana debljina opločenja

$$t_p = 10 \text{ mm}$$

Prikazani proračun je za najgori slučaj opterećenja, no proveden je proračun za sve slučajeve opterećenja od kotača. Dobivene vrijednosti minimalnih debljina prikazane u tablici 6.

Tablica 6. Minimalne debljine oplata ovisno o opterećenju kotača

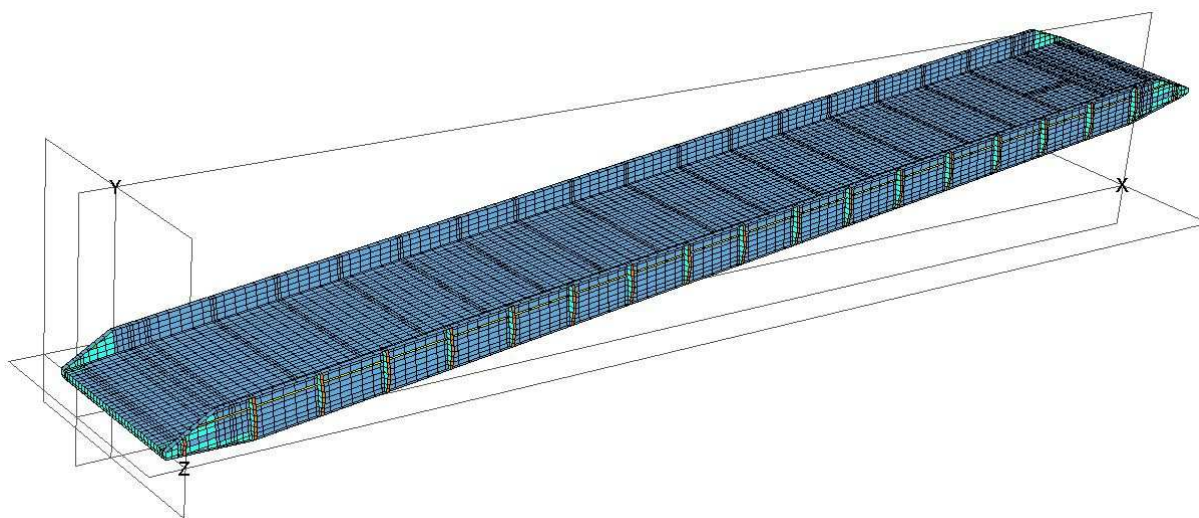
	Osovina od prikolice	Pogonska osovina		Zakretna osovina		
	VL1	VL1,VL2	VL3	VL1	VL2	VL3
$a_1, \text{mm}$	165	165		165		
$b_1, \text{mm}$	385	640		245		
$Q, t$	10	13	16	7	6	8
<b><math>t_{gross}, \text{mm}</math></b>	<b>8,7</b>	<b>7,9</b>	<b>8,7</b>	<b>8,4</b>	<b>7,9</b>	<b>8,9</b>

## 6. MKE model

### 6.1. Izrada MKE modela

Proračunata konstrukcija prema pravilima DNV-GL u kombinaciji s projektnom dokumentacijom poslužila je kao osnova za izradu modela u programu MAESTRO. Samo modeliranje u Maestru započinje s definiranjem svojstva materijala od kojeg je izrađen model. Sukladno s projektnim zahtjevom unesene su vrijednosti karakteristike materijala za čelik povišene čvrstoće AH-36 od kojeg je izrađena cijela konstrukcija.

Model se izrađuje na način da se u prvotno definiranim položajima točaka dodaju elementi opisani geometrijskim karakteristikama. Za model rampe prikazan na slici korišteni su većinom „strake“ elementi kao posebna vrsta Q4 pločastih elemenata za uzdužne elemente, dok su poprečni elementi opisani sa standardnim Q4 pločastim konačnim elementima. Iznimka za uzdužne elemente su T-profil koji su modelirani kao grede. Za vrh i kraj rampe zbog složenosti konstrukcije koristila se kombinacija Q4 pločastih i trokutnih elemenata. Važno je napomenuti da je u programu MAESTRO koordinatni sustav tako okrenuti da vertikalna os ima oznaku Y, uzdužna os je X, a bočna os Z.



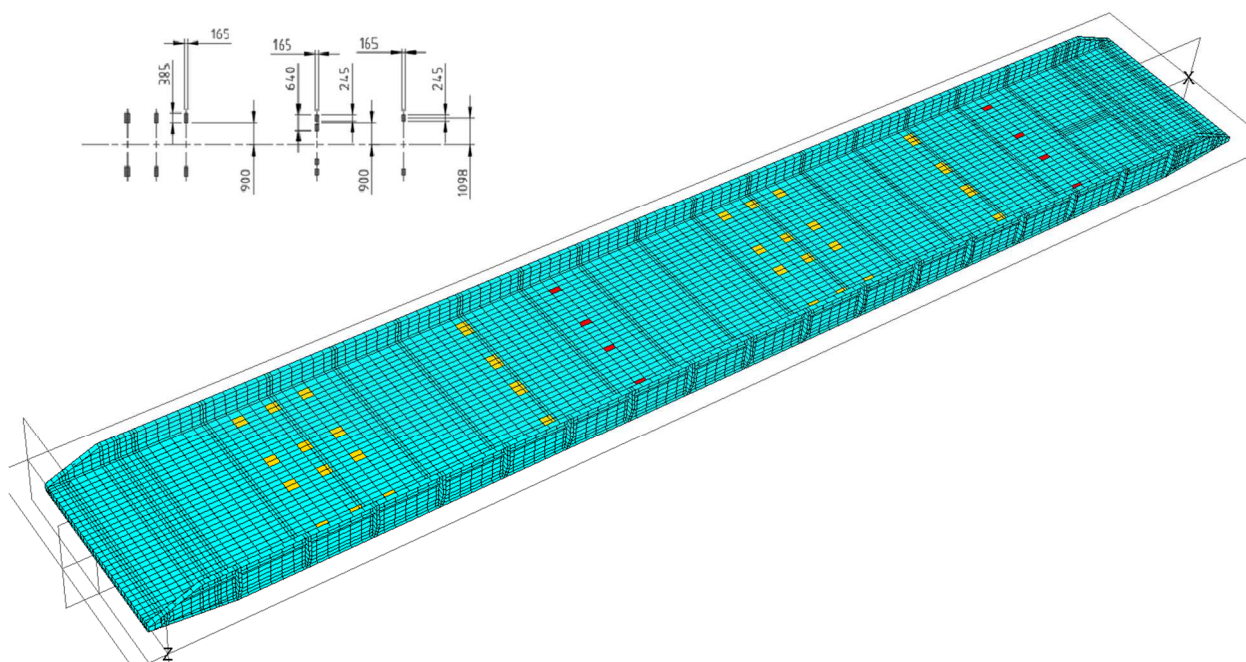
Slika 12. Model rampe u programskom alatu MAESTRO

## 6.2 Slučajevi opterećenja

Tijekom eksploatacije broda, kako je prije već navedeno, rampa je podvrgnuta više vrsta opterećenja. Ta opterećenja možemo podijeliti u 3 stanja:

- opterećenje u luci (LCH- Load Case Harbour),
- opterećenje prilikom podizanja rampe (LCM – Load Case Manouvering),
- opterećenje tijekom plovidbe (LCS – Load Case Seagoing).

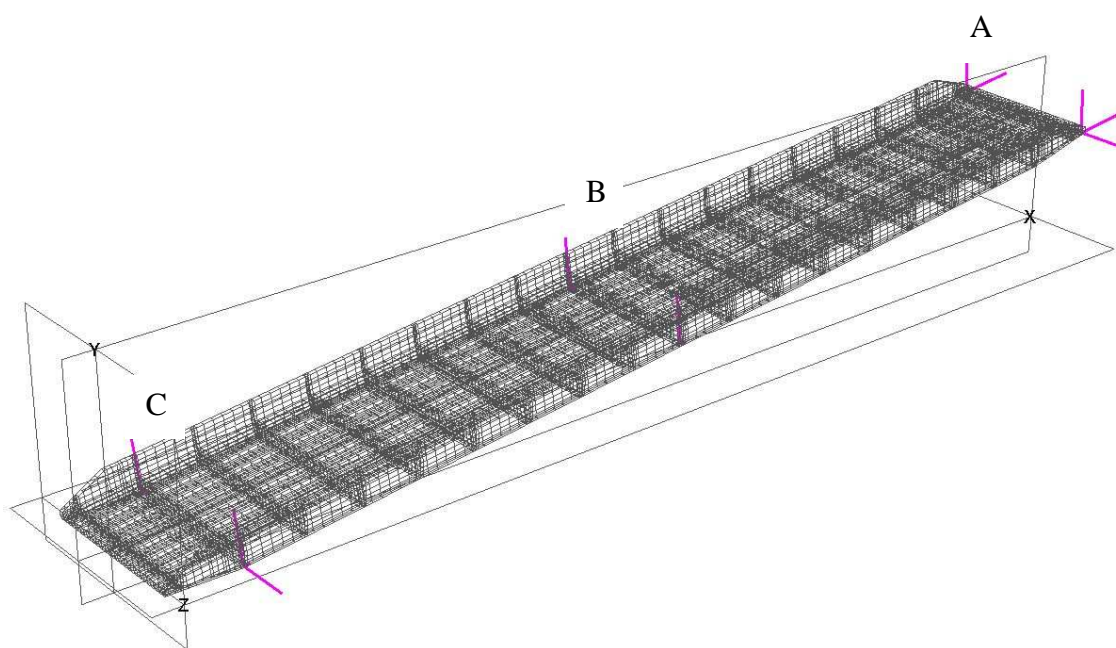
Opterećenja od vozila u programu MAESTRO zadana su tako da su se na rampi pozicionirali otisci kotača od vozila te je narinuto maseno opterećenje ovisno o vrsti kamiona i osovinskom opterećenju. Na ta masena opterećenja i na rampu, ovisno o kojem se stanju radi, dodala se vrijednost izračunatih vrijednosti ubrzanja. Opterećenje od otiska kotača zadano kao maseno opterećenje, za jedan od korištenih slučajeva opterećenja prikazano je na slici 13.



Slika 13. Zadano opterećenje od otiska kotača

### 6.2.1. Opterećenje u lukama – LCH

Prilikom boravka broda u luci kamioni se parkiraju i premještaju s donje palube na gornju te obrnuto. Tada se rampa nalazi pričvršćena u nekoliko točaka što nam definira rubne uvjete za model. Rubni uvjeti u MAESTRU prikazani su na slici 14, a pojašnjeni u tablici oznake koje rabi program simboliziraju spriječene pomake u kojoj su osi nacrtane.



Slika 14. Oslonci za slučaj LCH

Na vrhu rampe nalazi se pričvršćenje za gornju palubu te je u tablici označeno pod čvorom A, B čvorom je označen potporanj u sredini na koji se rampa oslanja, a čvor C predstavlja točku u kojoj je rampa oslonjena na donju palubu. Rubni uvjeti u čvorovima prikazani su u tablici 7.

Tablica 7. Rubni uvjeti LCH

Čvor	Tx	Ty	Tz	Rx	Ry	Rz
A	1	1	1	1	1	0
B	0	1	0	0	0	0
C	0	1	1	0	0	0

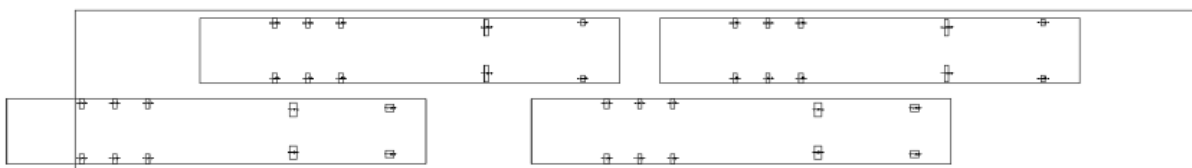
0 - dozvoljeni pomaci/rotacije

1 - spriječeni pomaci/rotacije

Kroz 3 različita slučaja opterećenja koja su napravljena za ovo stanje rampe, simulira se prolazak dva kamiona preko rampe u jednoj traci dok su dva kamiona parkirana u dugoj traci.

### 6.2.1.1.Slučaj opterećenja LCH-1

U prvom slučaju opterećenja simulira se trenutak kada su se oba dva kamiona vrste VL3 prilikom prolaska preko rampe tek popeli na rampu, dok dva kamiona vrste VL1 stoje parkirana na rampi u drugoj traci. Na slici 16 prikazan je položaj obrisa kamiona te položaj kotača.



Slika 15. LCH-1 raspored kamiona

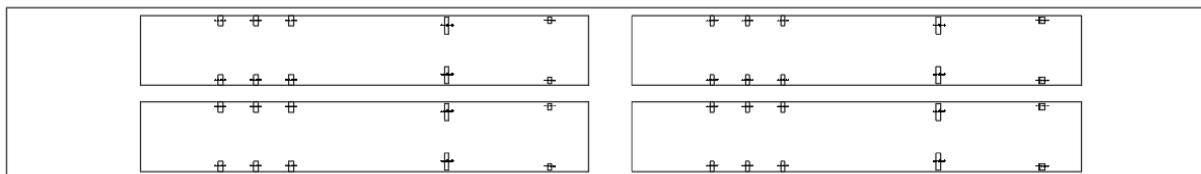
Ukupno opterećenje konstrukcije rampe čine masa rampe te masa kamiona uvećana za vrijednost umnožak dinamičkog koeficijenta u vertikalnom smjeru i gravitacijskog ubrzanja. Opterećenje za slučaj LCH-1 prikazano je u tablici 7.

Tablica 8 Opterećenja rampe za slučaj LCH-1

Opterećenja	Masa, tona	$a_v \cdot g, m/s^2$	$F_v, N$
Vlastita masa rampe	115	9,807	1 127 764
2*VL1+2*VL3	220	10,787	2 373 209
		<b>Ukupno:</b>	<b>3 500 974</b>

### 6.2.1.2. Slučaj opterećenja LCH-2

Ovaj slučaj opterećenja nastavlja se na LCH-1 te simulira trenutak u kojem su kamioni u prolasku paralelni s položajem kamiona koji stoje parkirani. Prikaz stanja vidi se na slici 16.

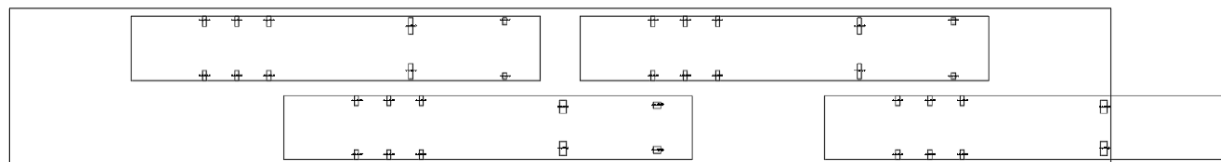


Slika 16. Raspored kamiona za slučaj LCH-2

Tablica opterećenja za slučaj LCH-2 je ista kao i tablica 7 opterećenja slučaja LCH-1 jer se mase ni ubrzanja nisu mijenjala samo se promijenio položaj masa.

### 6.2.1.3. Slučaj opterećenja LCH-3

Nastavno na slučaj opterećenja LCH-2 simulira se trenutak u kada su kamioni prošli još dalje tako da je prvi kamion s zakretnom osovinom već prošao rampu. Položaj kamiona za LCH-3 prikazan je slikom 17.



Slika 17. Raspored kamiona za slučaj LCH-3

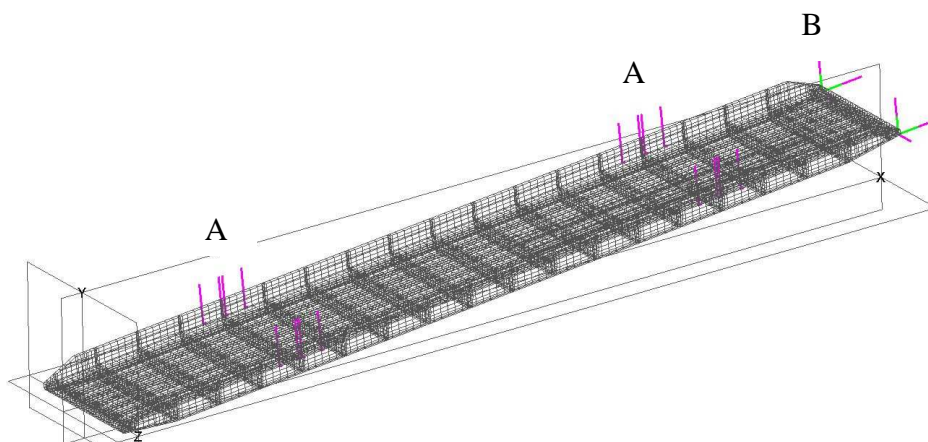
Tablica opterećenja (tablica 8) za slučaj LCH-3 razlikuje se od prethodna dva slučaja opterećenja jer je prednji kamion koji prolazi rampom s zakretnom osovinom već prošao rampu.

Tablica 9. Opterećenja za slučaj LCH-3

Opterećenja	Masa, tona	$a_v \cdot g, m/s^2$	$F_v, N$
Vlastita masa rampe	115	9,807	1 127 764
2*VL1+2*VL3	212	10,787	2 286 910
		Ukupno:	3 414 675

### 6.2.2. Opterećenje prilikom podizanja rampe – LCM

Ovaj slučaj simulira trenutak u kojem se rampa podiže iz položaja u kojem spaja dvije palube prema položaju u kojem zatvara gornju palubu. U tom trenutku rampa je oslonjena na sajle(A) u 16 točaka te pričvršćena u dvije točke(B) za gornju palubu. Za takve oslonce (slika 18) definirani su rubni uvjeti pojašnjeni u tablici 9.



Slika 18. Oslonci za slučaj LCM

Tablica 10. Rubni uvjeti u osloncima za LCM

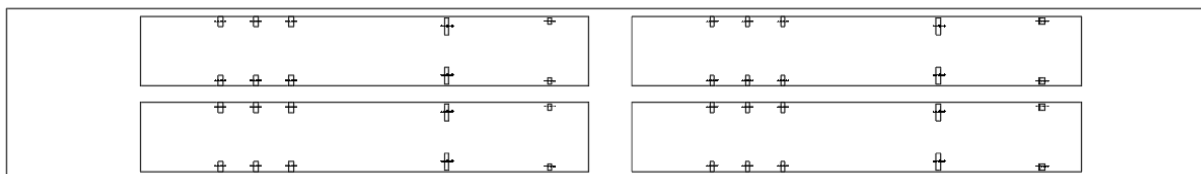
Čvor	Tx	Ty	Tz	Rx	Ry	Rz
A	0	1	0	0	0	0
B	1	1	1	1	1	0



0 - dozvoljeni pomaci/rotacije

1 - spriječeni pomaci/rotacije

Prilikom podizanja na rampi su parkirana 4 kamiona vrste VL1 na način prikazan na slici 19.



Slika 19. Raspored kamiona za LCM

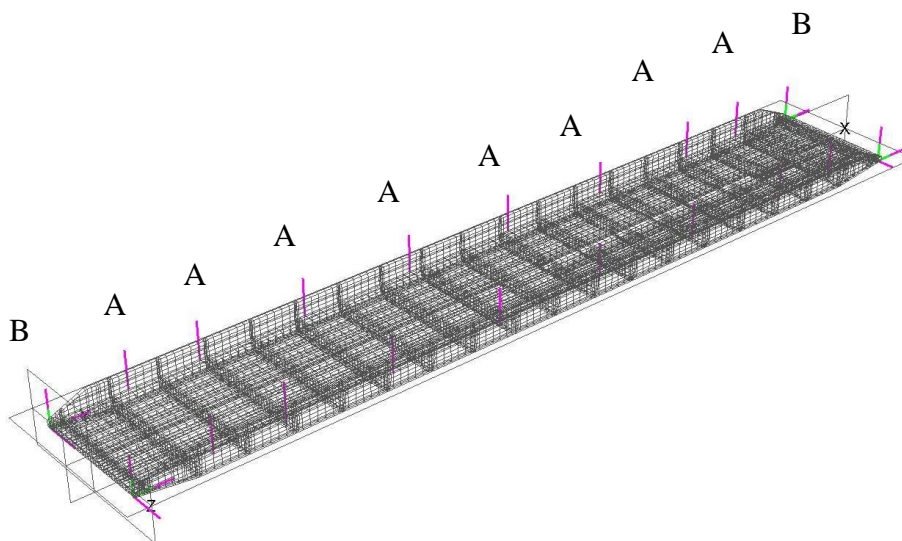
Ukupno opterećenje konstrukcije rampe čine vlastita masa rampe i masa tereta pomnoženi s iznosima ubrzanja koja djeluju na rampu i teret. U ovom slučaju ubrzanjem se simulira početni trzaj dok se rampa počinje podizati. Ukupno opterećenje sistematizirano je u tablici 10.

Tablica 11. Opterećenja za LCM

Opterećenja	Masa, tona	$a_v \cdot g, m/s^2$	$F_v, N$
Vlastita masa rampe	115	11,278	1 296 929
4*VL1	200	11,278	2 255 529
		Ukupno:	3 552 458

### 6.2.3. Opterećenje rampe prilikom plovidbe – LCS

Prilikom plovidbe rampa zatvara palubu te su na njoj parkirana vozila. Rampa je spojena s palubom preko 16 točaka sustava za zaključavanje rampe(A), te u svakom vrhu u jednoj točki(B). Tako definirani oslonci na modelu prikazani su slikom 20, a rubni uvjeti opisani tablicom 11.



Slika 20. Oslonci za LCS

Tablica 12. Rubni uvjeti za LCS

Čvor	Tx	Ty	Tz	Rx	Ry	Rz
A	0	1	0	0	0	0
B	1	1	1	1	1	0

0 - dozvoljeni pomaci/rotacije

1 - spriječeni pomaci/rotacije

Za ovo stanje rampe ispitana su dva slučaja opterećenja prikazani u stanju LCS-1 i LCS-2.

### 6.2.3.1. Slučaj opterećenja LCS-1

Ovaj slučaj opterećenja definiran je na načina da se projektno opterećenje od 200 tona za koje je predviđeno da se maksimalno može nalaziti na rampi prilikom rukovanja s rampom, bude raspodijeljeno po cijeloj površini rampe, točnije pokrovu.

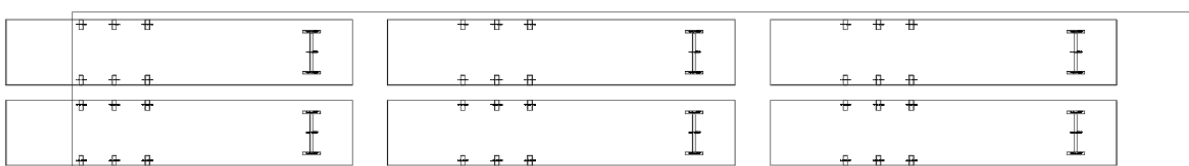
Sistematizacija opterećenja prikazana je u tablici 12.

Tablica 13. Opterećenja za LCS-1

Opterećenja	Masa, tona	$a_v \cdot g, m/s^2$	$F_v, N$
Vlastita masa rampe	115	14,906	1 714 202
UDL-200 tona	200	14,906	2 981 221
		Ukupno:	4 695 424

### 6.2.3.2. Slučaj opterećenja LCS-2

Ovaj slučaj opterećenja definira najgori slučaj opterećenja na strukturu rampe prilikom čega je na rampu parkirano 6 prikolica oslonjenih na stalcima. Položaj prikolica na rampi prikazan je na slici 21. Ukupno opterećenje izračunato je u tablici 13.



Slika 21. Raspored opterećenja za LCS-2.

Tablica 14. Opterećenje za LCS-2

Opterećenja	Masa, tona	$a_v \cdot g, m/s^2$	$F_v, N$
Vlastita masa rampe	115	14,906	1 714 202
UDL-200 tona	282	14,906	4 203 522
		Ukupno:	5 917 724

## 7. Rezultati MKE modela

Na temelju dobivenih odziva deformacija i naprezanja uslijed opterećenja konstrukcije oni elementi koji ne mogu izdržati njima nametnuta opterećenja smatraju se nepodobnima, u suprotnom smatraju se podobnima. Ako su nepodobni potrebno ih je redimenzionirati da zadovolje kriterije podobnosti.

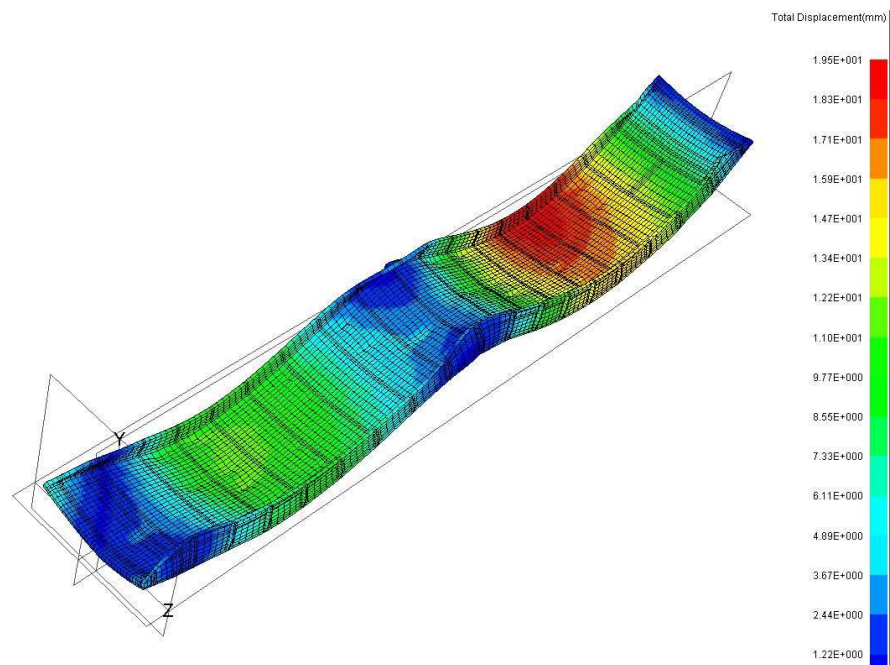
Rezultati dobiveni u programu MAESTRO prikazani su slikama vezano uz svaki slučaj opterećenja. Na kraju slika u svakom slučaju u tablicama su sistematizirani rezultati te provedena provjera po prethodno izračunatim kriterijima evaluacije u poglavlju 4.3.

Rezultati su dani po slijedećem formatu:

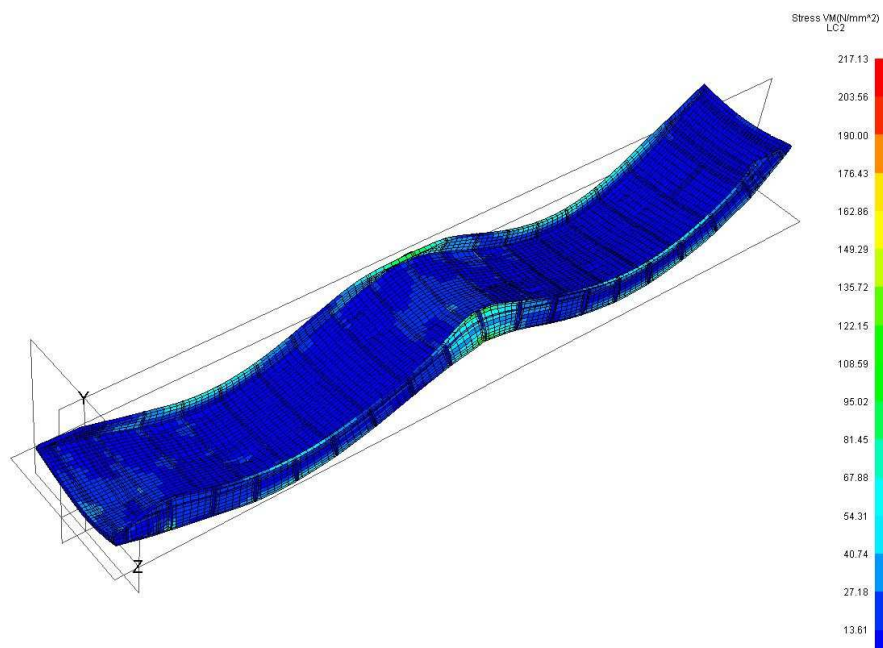
- prikaz deformacija
- prikaz von Mises ekvivalentnih naprezanja
- prikaz kriterija izvijanja

## 7.1 Opterećenje u lukama – LCH

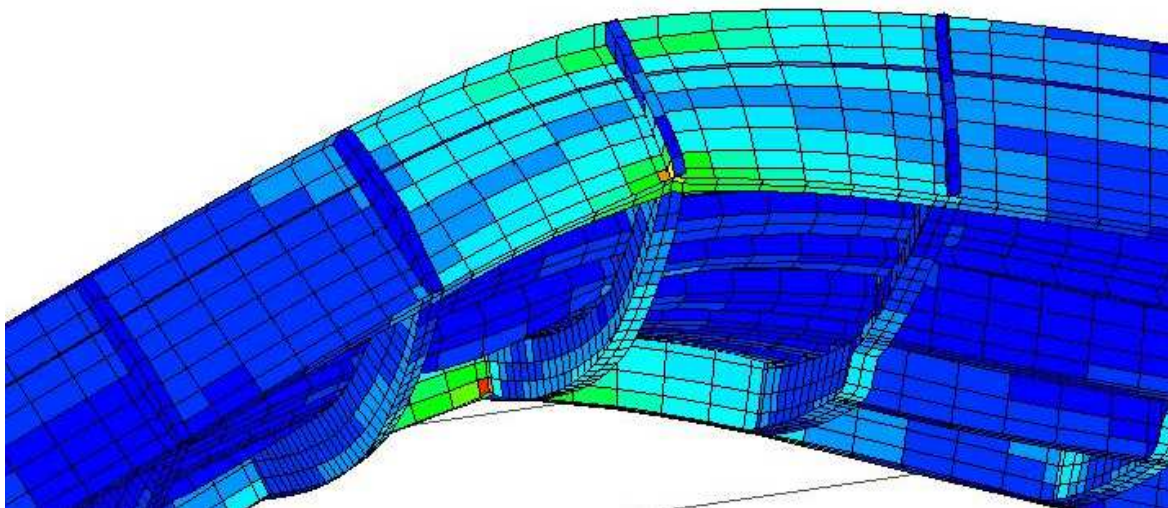
### 7.1.1. Slučaj opterećenja LCH-1



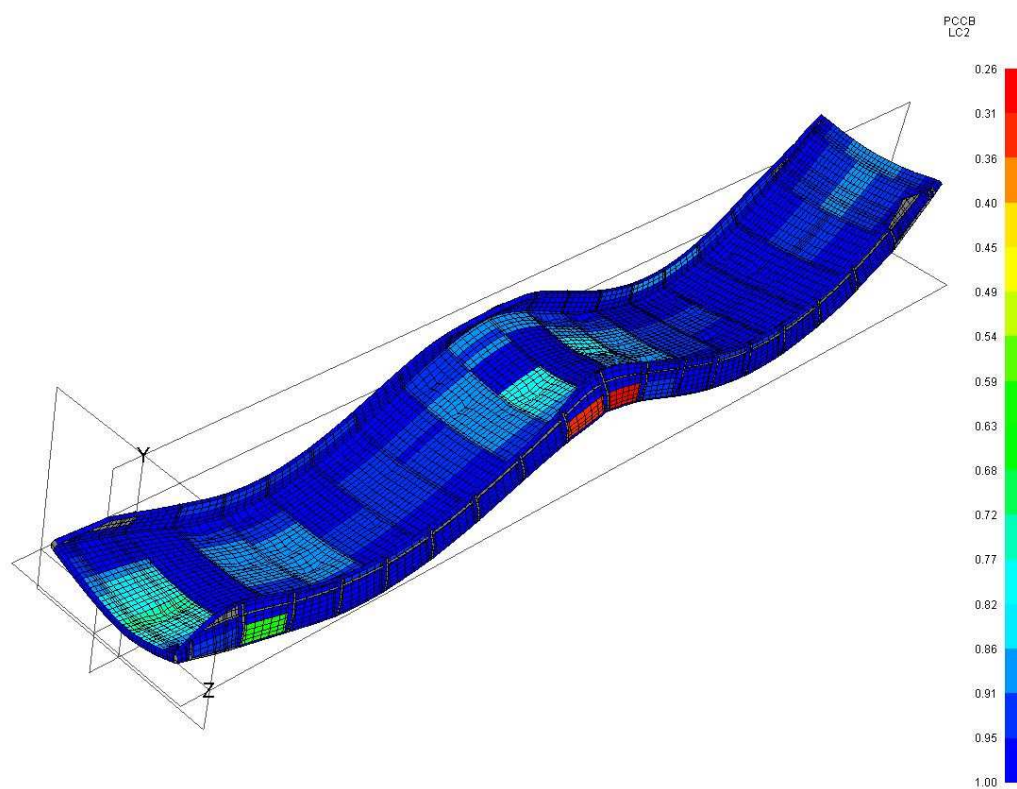
Slika 22. Deformacije za slučaj opterećenja LCH-1



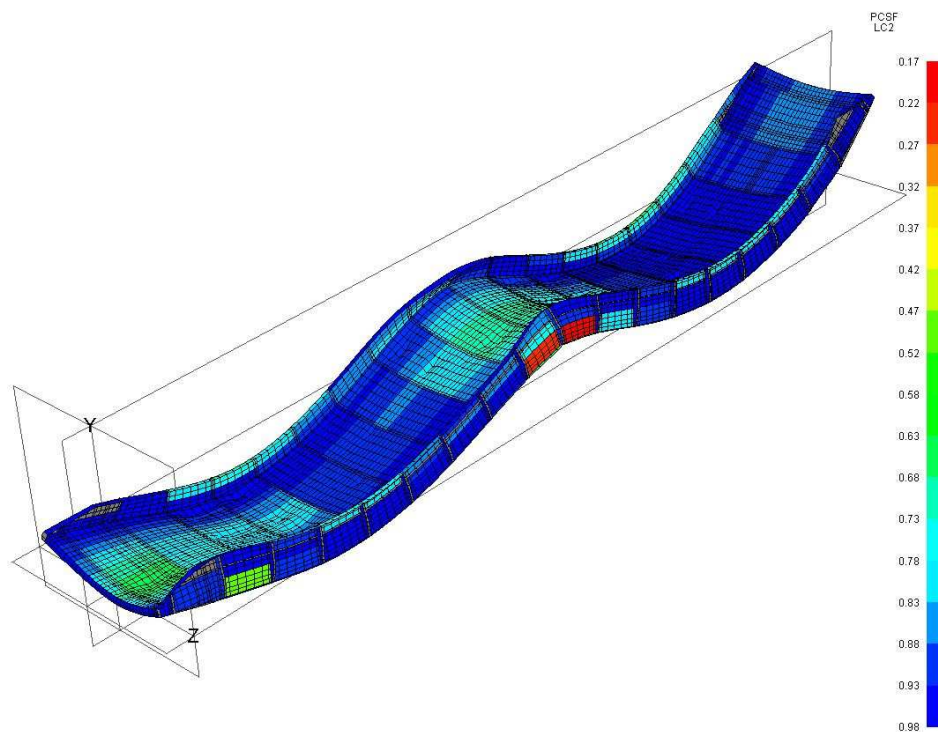
Slika 23. Naprezanja von Mises LCH-1



Slika 24. Najveća von Mises napreznja



Slika 25. PCCB - LCH-1



Slika 26. PCSF - LCH-1

U tablici povezani su rezultati dobiveni MKE metodom s slikama koje ih opisuju te napravljena analiza podobnosti. Kriterij za evaluaciju deformacija izračunat je tako da je za referentnu duljinu  $b_e$  uzeta udaljenost između oslonca na sredini rampe te vrha rampe spojen za gornju palubu

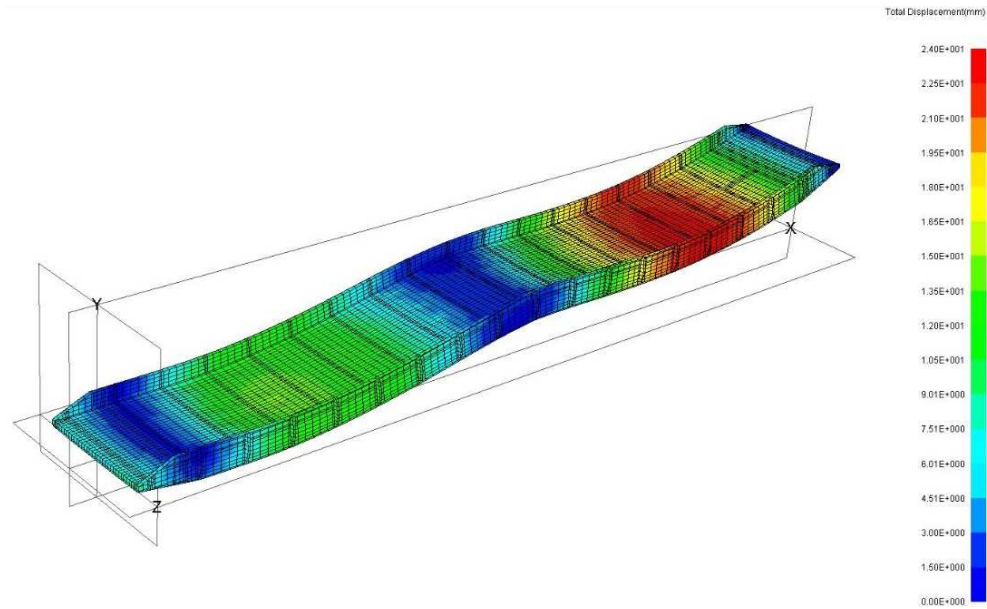
- $b_e = 22060 \text{ mm}$

Tablica 15. Rezultati MKE LCH-1

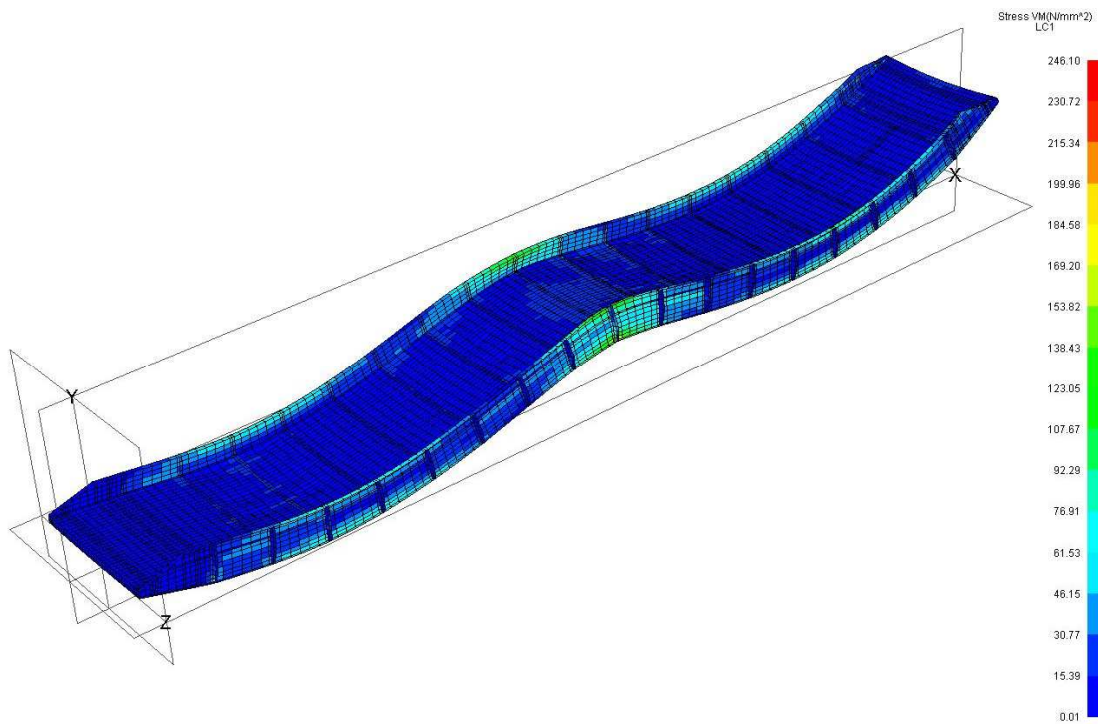
	Vrijednost	Kriterij
Deformacije	19,5 mm	<110,3 mm
Naprezanja Mid von Mises	217,13 N/mm <sup>2</sup>	<260 N/mm <sup>2</sup>
PCCB	0,26	>0
PCSF	0,17	>0

Suma vertikalnih reakcijskih sila u osloncima iznosi  $3.501 \cdot 10^6 \text{ N}$  što se u potpunosti poklapa s zadanim opterećenjem na strukturu rampe.

## 7.1.2. Slučaj opterećenja LCH-2

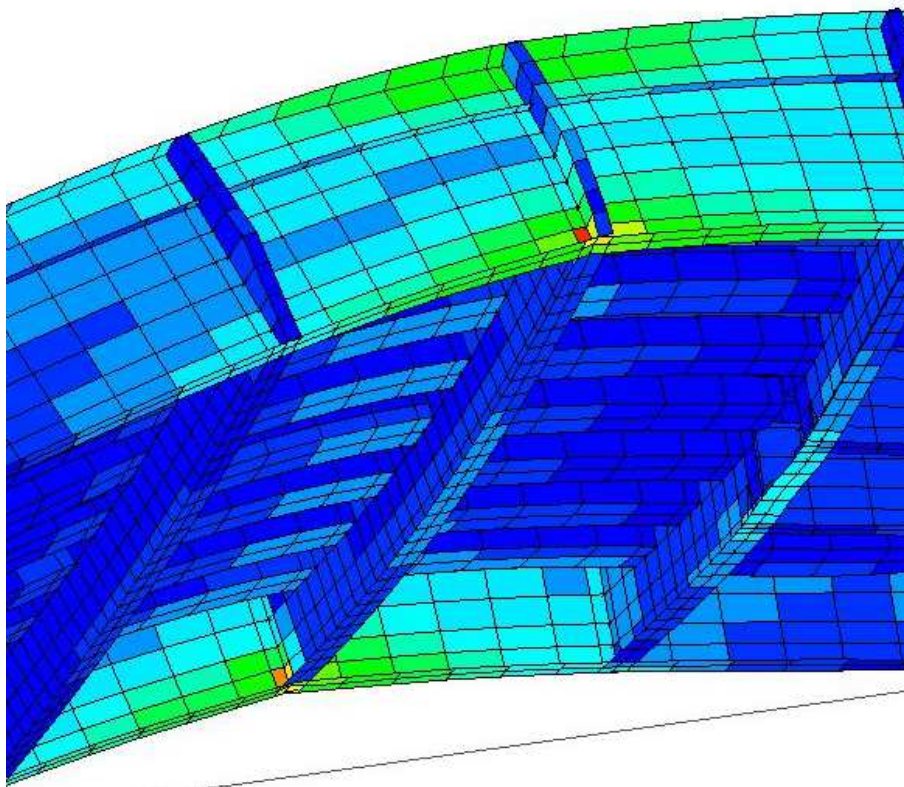


Slika 27. Deformacije za slučaj opterećenja LCH-2

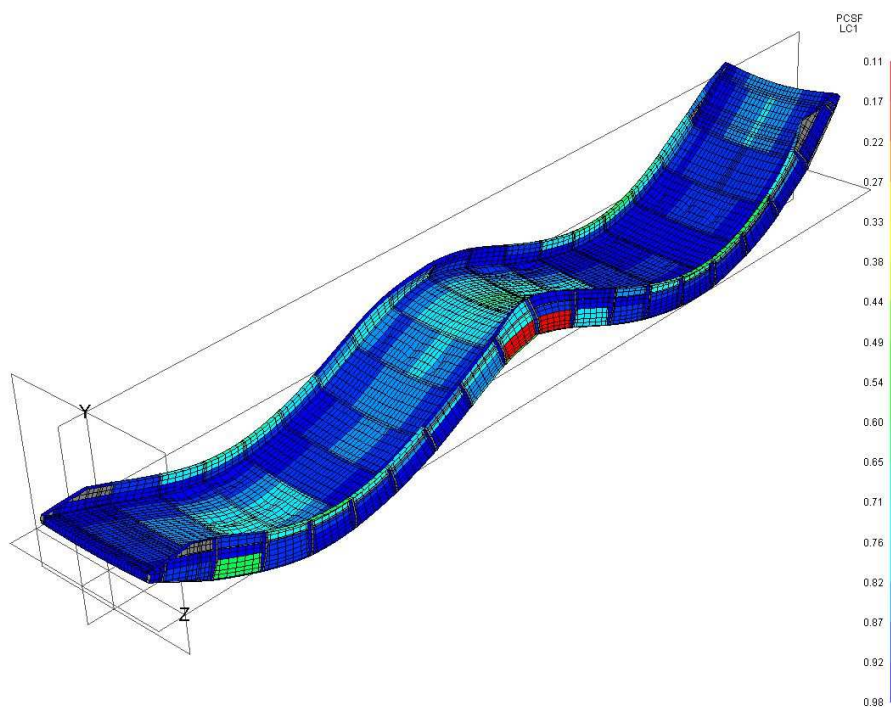


Slika 28. Naprezanja von Mises LCH-2

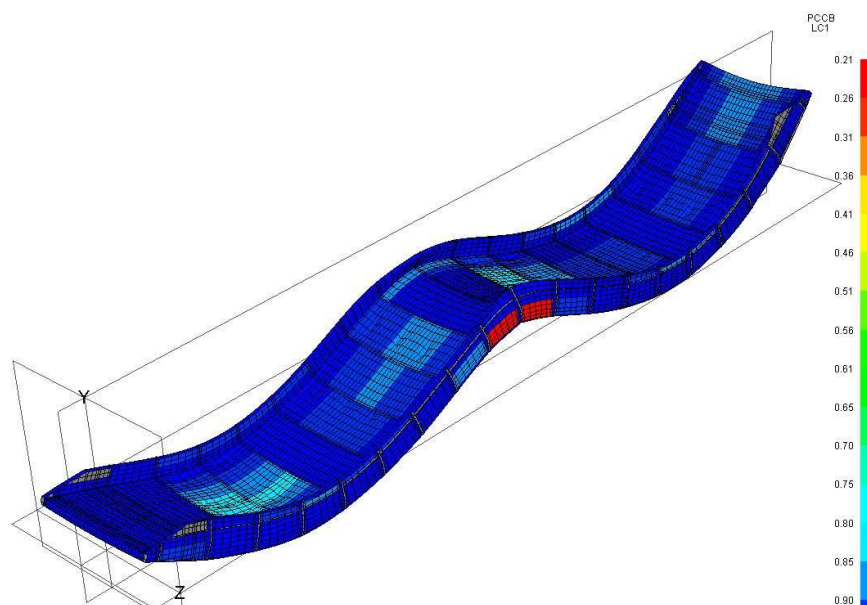




Slika 29. Najveća von Mises naprežanja LCH-2



Slika 30. PCSF LCH-2



Slika 31. PCCB LCH-2

U tablici povezani su rezultati dobiveni MKE metodom s slikama koje ih opisuju te napravljena analiza podobnosti. Kriterij za evaluaciju deformacija izračunat je tako da je za referentnu duljinu  $b_e$  uzeta udaljenost između oslonca na sredini rampe te vrha rampe spojen za gornju palubu

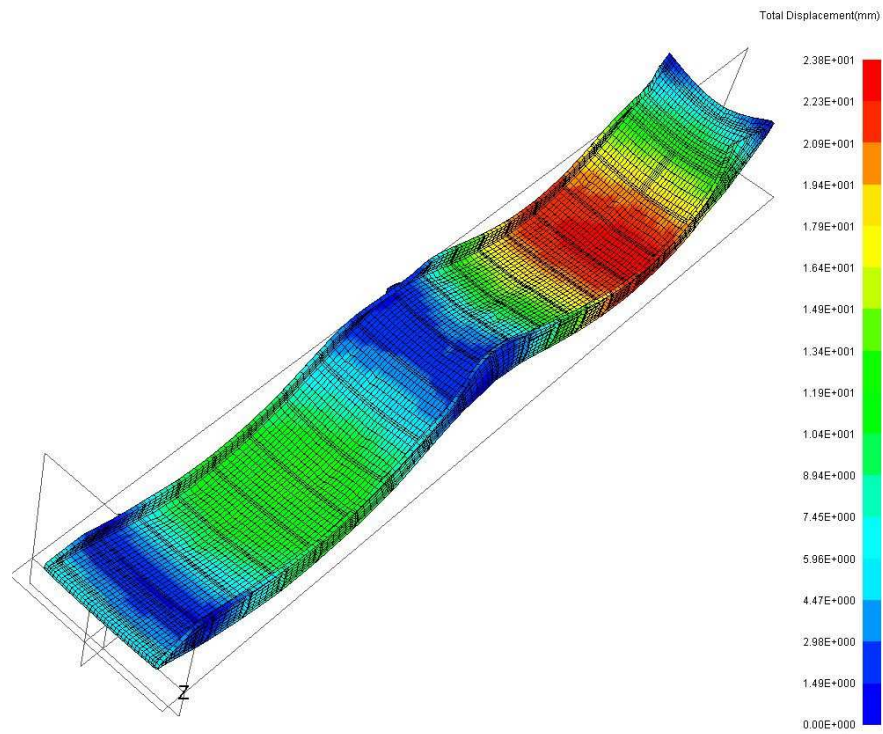
- $b_e = 22060 \text{ mm}$

Tablica 16. Rezultati MKE LCH-2

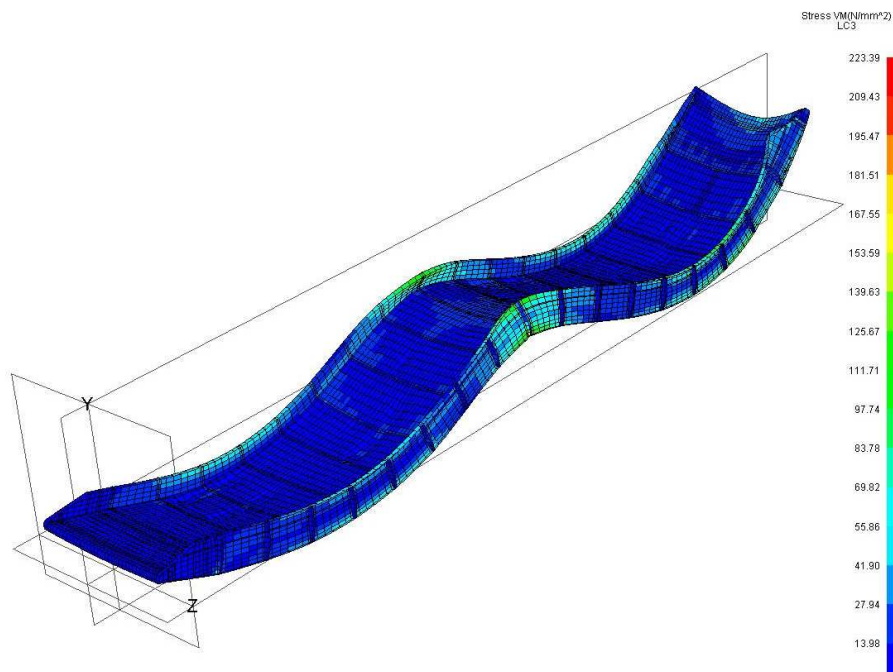
	Vrijednost	Kriterij
Deformacije	24 mm	<110,3
Naprezanja Mid von Mises	246.10 N/mm <sup>2</sup>	<260 N/mm <sup>2</sup>
PCCB	0,21	>0
PCSF	0,11	>0

Suma vertikalnih reakcijskih sila u osloncima iznosi  $3.501 \cdot 10^6 \text{ N}$  što se u potpunosti poklapa s zadanim opterećenjem na strukturu rampe.

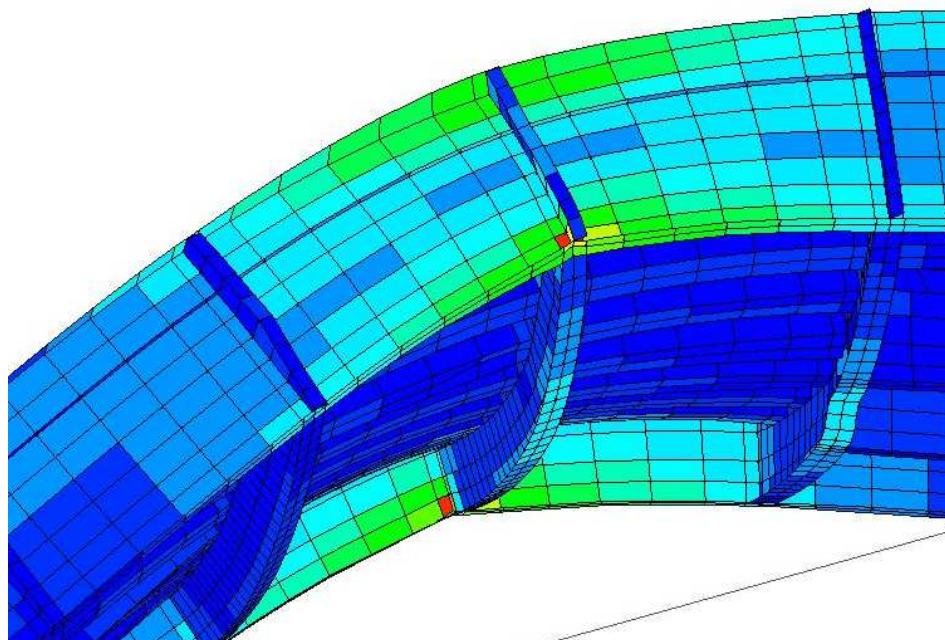
## 7.1.3. Slučaj opterećenja LCH-3



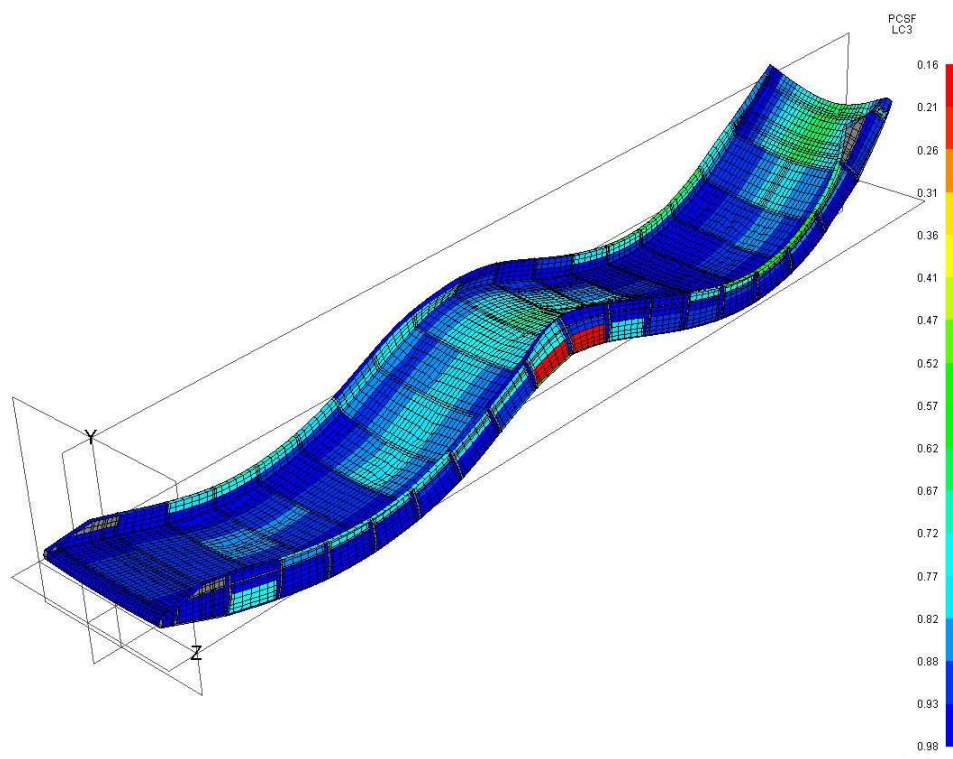
Slika 32. Deformacije za slučaj opterećenja LCH-3



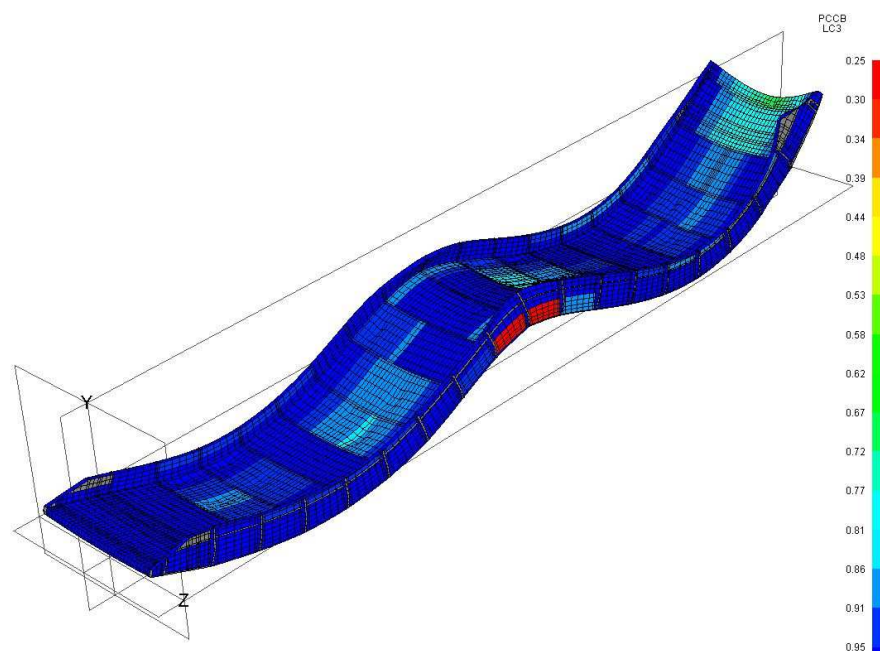
Slika 33. Naprezanja von Mises LCH-3



Slika 34. Najveća von Mises naprezanja LCH-3



Slika 35. PCSF LCH-3



Slika 36. PCCB LCH-3

U tablici povezani su rezultati dobiveni MKE metodom s slikama koje ih opisuju te napravljena analiza podobnosti. Kriterij za evaluaciju deformacija izračunat je tako da je za referentnu duljinu  $b_e$  uzeta udaljenost između oslonca na sredini rampe te vrha rampe spojen za gornju palubu.

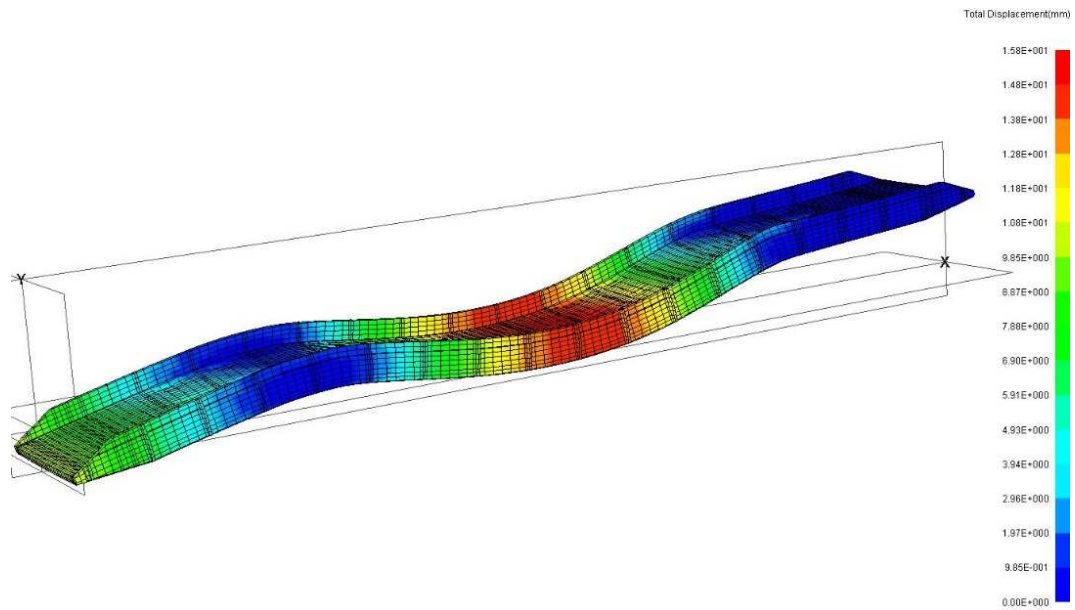
- $b_e = 22060 \text{ mm}$

Tablica 17. Rezultati MKE LCH-3

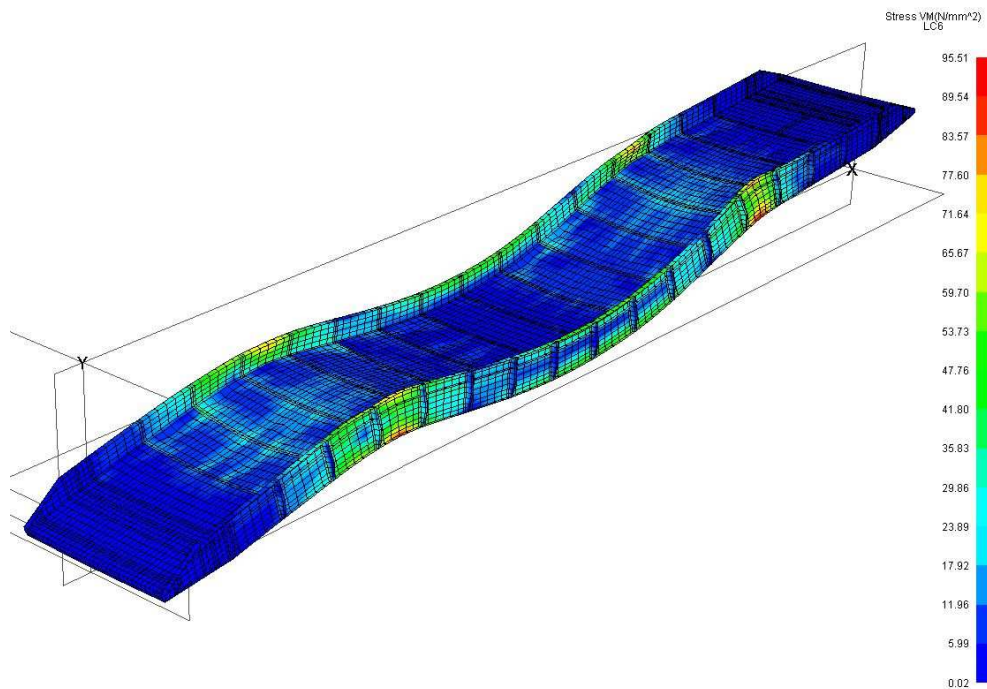
	Vrijednost	Kriterij
Deformacije	23,8 mm	<110,3 mm
Naprezanja Mid von Mises	223,39 N/mm <sup>2</sup>	<260 N/mm <sup>2</sup>
PCCB	0,25	>0
PCSF	0,16	>0

Suma vertikalnih reakcijskih sila u osloncima iznosi  $3.41471 \cdot 10^6 \text{ N}$  što se u potpunosti poklapa s zadanim opterećenjem na konstrukciju rampe.

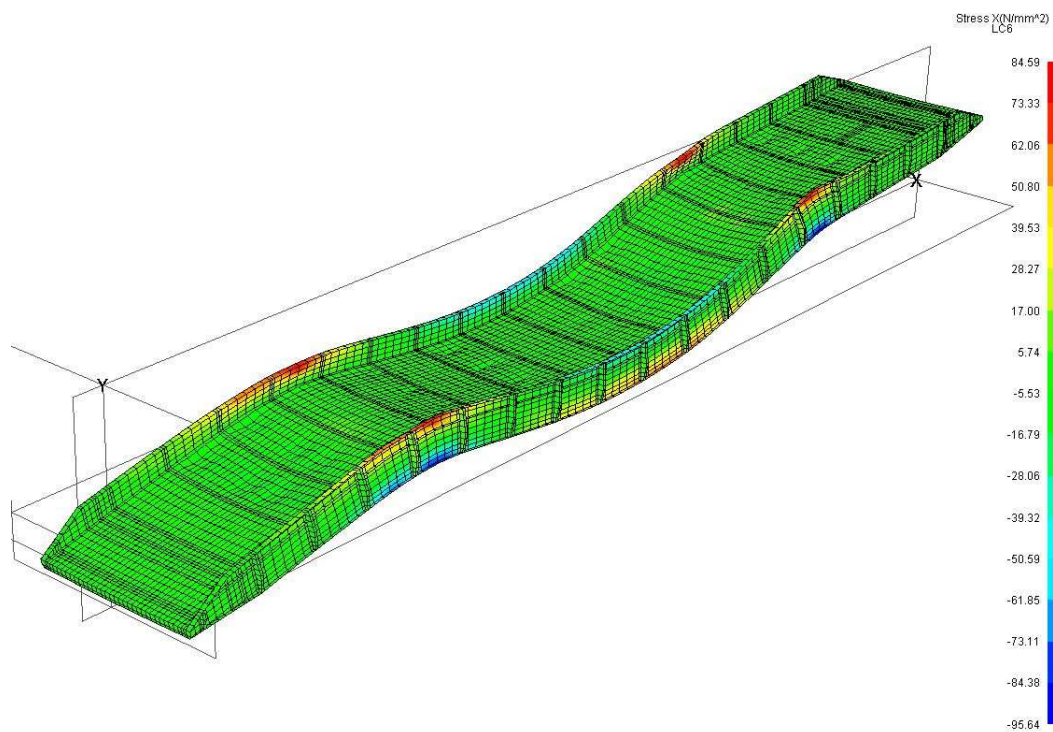
## 7.2. Opterećenje prilikom podizanja rampe - LCM



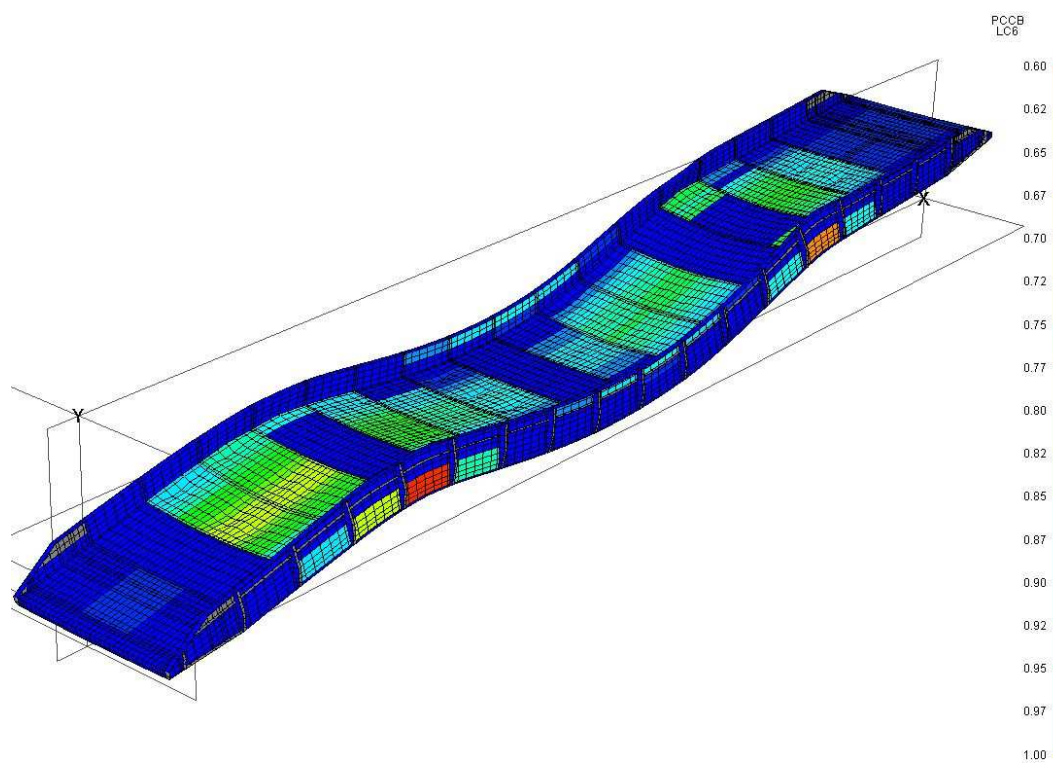
Slika 37. Deformacije za slučaj opterećenja LCM



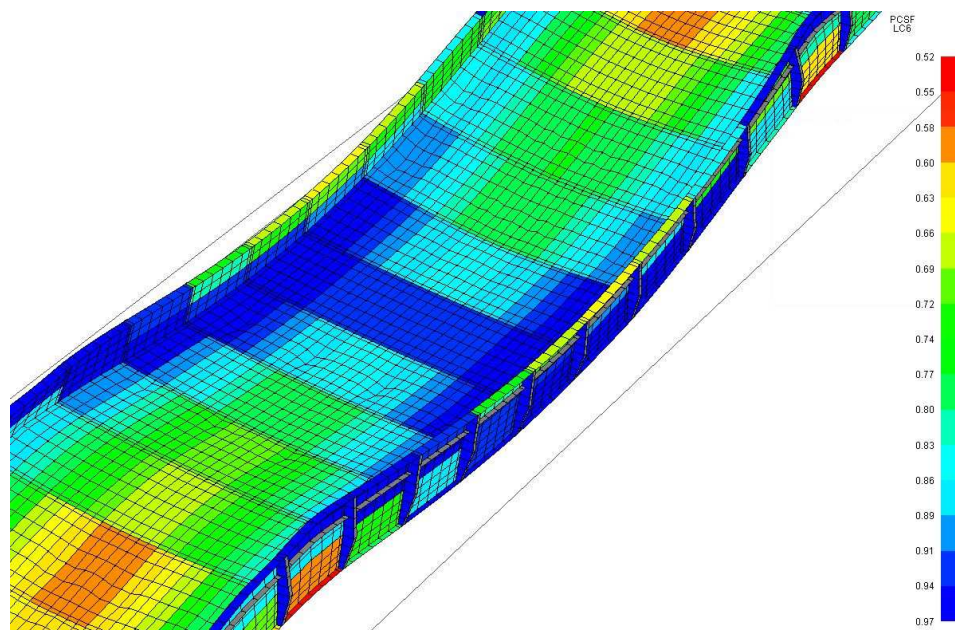
Slika 38. Naprezanja von Mises LCM



Slika 39. Naprezanja u X-osi LCM



Slika 40. PCCB LCM



Slika 41. PCSF LCM

U tablici povezani su rezultati dobiveni MKE metodom s slikama koje ih opisuju te napravljena analiza podobnosti. Kriterij za evaluaciju deformacija izračunat je tako da je za referentnu duljinu  $b_e$  uzeta udaljenost između oslonca postavljenim u točkama u kojima je rampa oslonjena na sajele.

- $b_e = 24000 \text{ mm}$

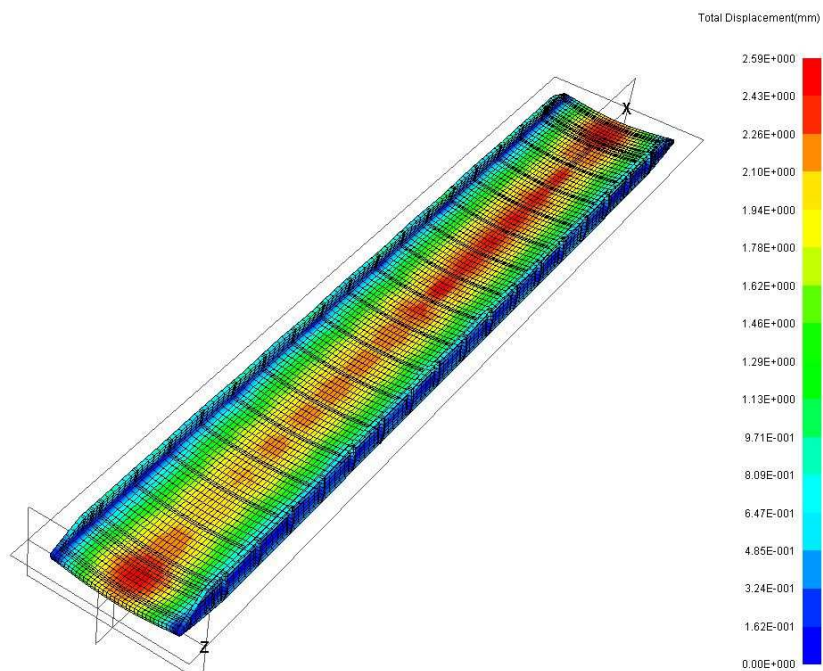
Tablica 18. Rezultati MKE LCM.

	Vrijednost	Kriterij
Deformacije	15,8 mm	<120 mm
Naprezanja Mid von Mises	95,51 N/mm <sup>2</sup>	<260 N/mm <sup>2</sup>
PCCB	0,6	>0
PCSF	0,52	>0

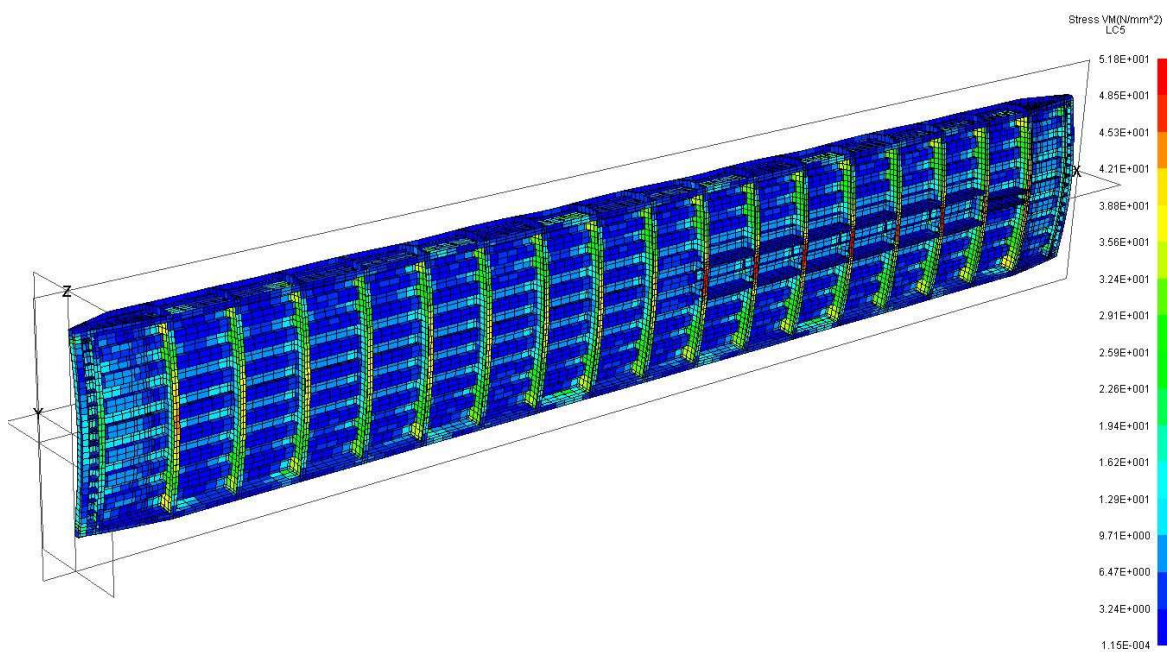


### 7.3. Opterećenje prilikom plovidbe - LCS

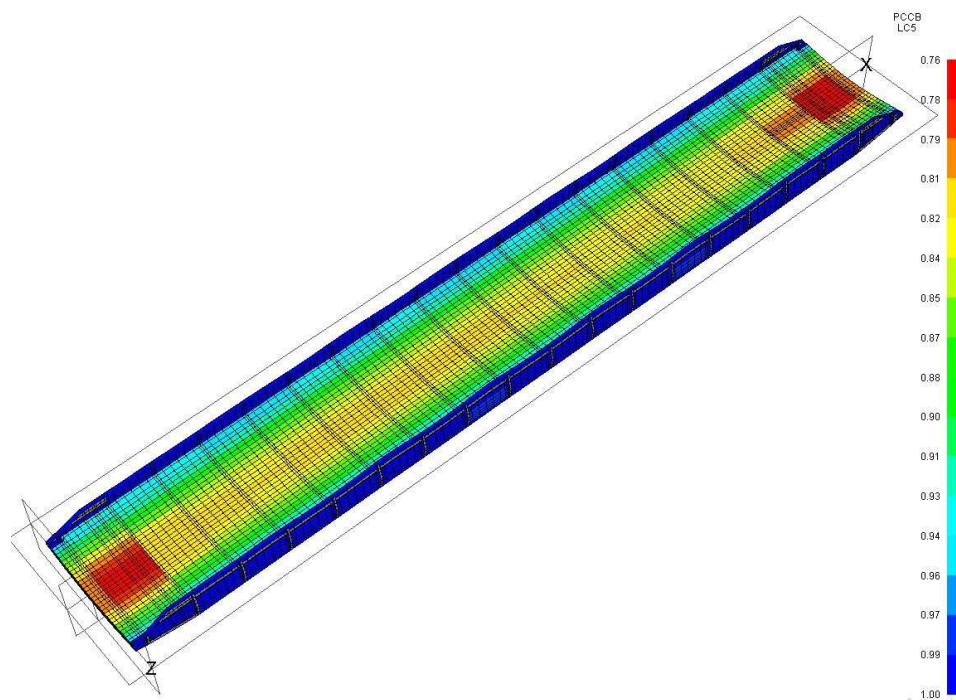
#### 7.3.1. Slučaj opterećenja LCS-1



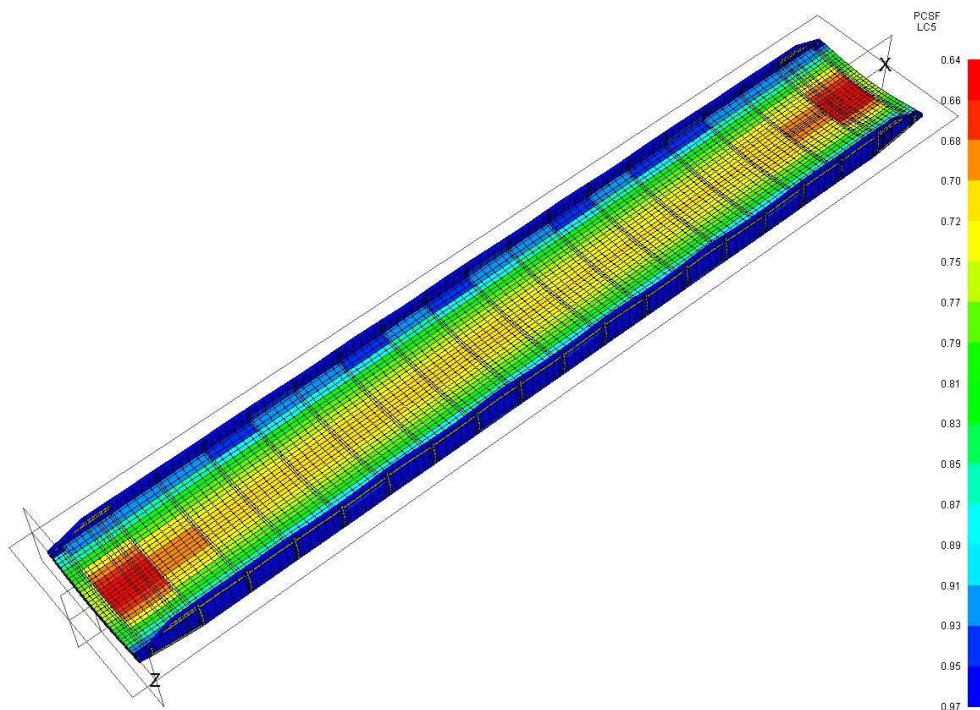
Slika 42. Deformacije za slučaj opterećenja LCS-1



Slika 43. Naprezanja von Mises LCS-1



Slika 44. PCCB LCS-1



Slika 45. PCSF LCS-1

U tablici 18 povezani su rezultati dobiveni MKE metodom s slikama koje ih opisuju te napravljena analiza podobnosti. Kriterij za evaluaciju deformacija izračunat je tako da je za referentnu duljinu  $b_e$  uzeta širina rampe.

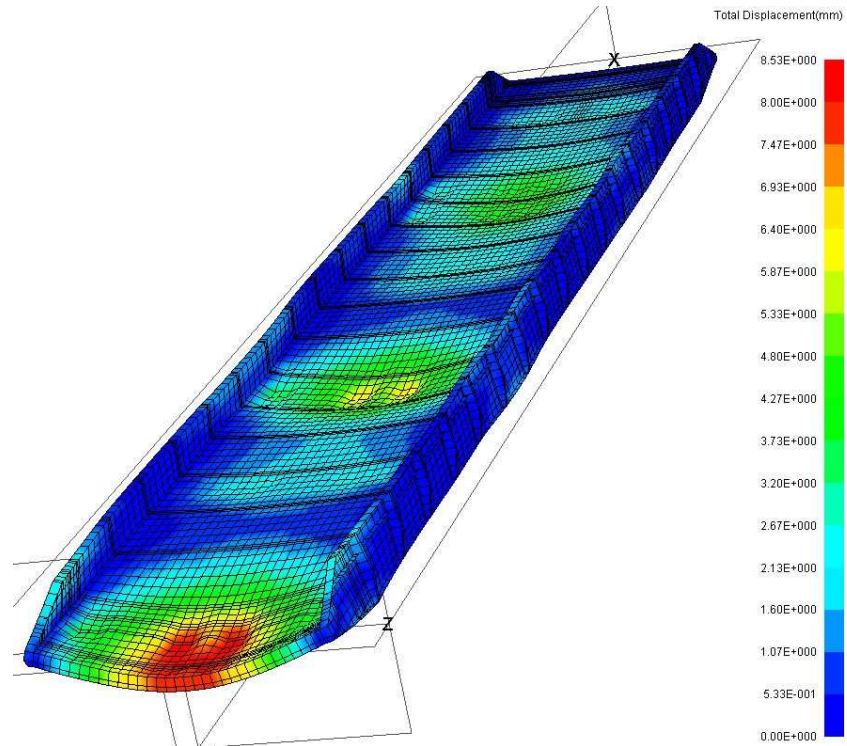
- $b_e = 6300 \text{ mm}$

Tablica 19. Rezultati MKE LCS-1

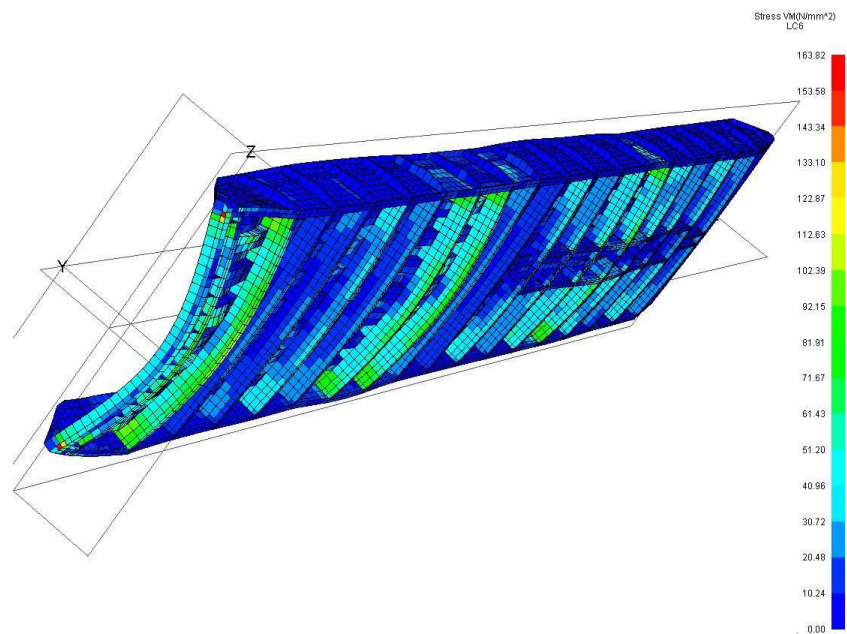
	Vrijednost	Kriterij
Deformacije	$2.59 \text{ mm}$	$<31,5 \text{ mm}$
Naprezanja Mid von Mises	$51,8 \text{ N/mm}^2$	$<260 \text{ N/mm}^2$
PCCB	0,76	$>0$
PCSF	0,64	$>0$

Suma vertikalnih reakcijskih sila u osloncima iznosi  $4,67107 \cdot 10^6 \text{ N}$  što je za 0,5% različito od zadanog opterećenja na konstrukciju rampe.

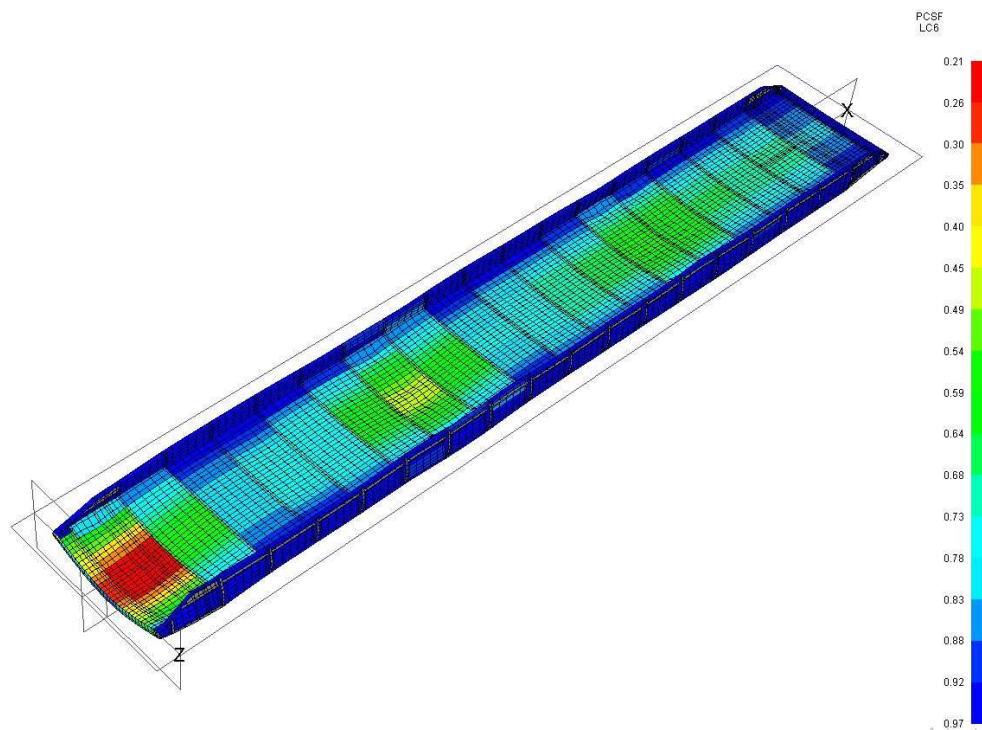
## 7.3.2. Slučaj opterećenja LCS-2



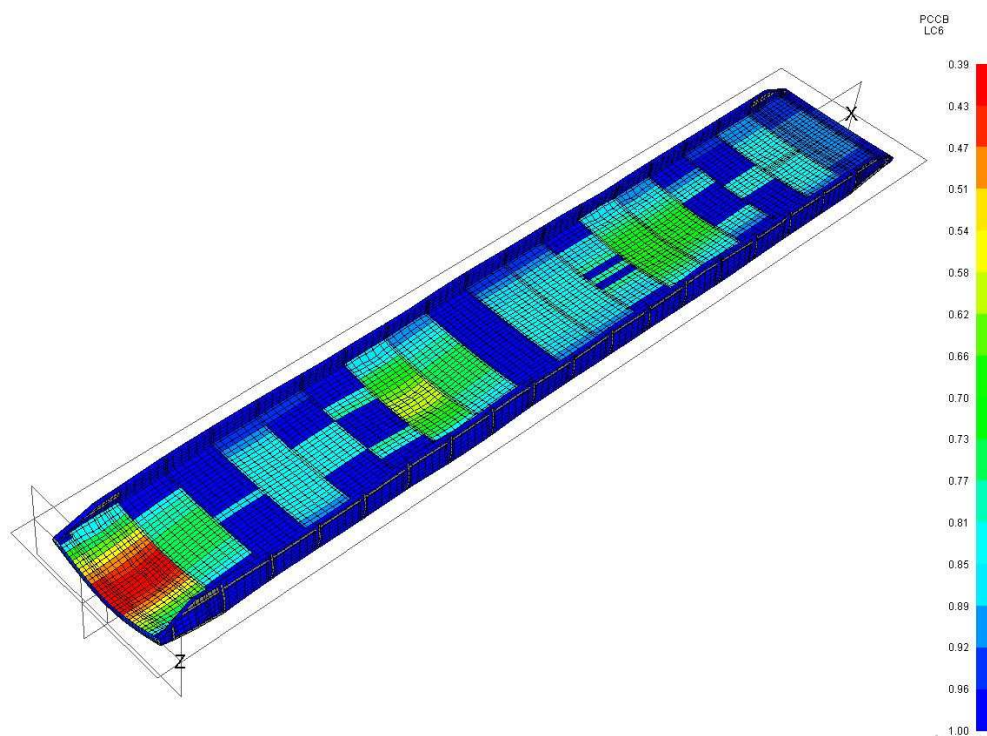
Slika 46. Derormacije za slučaj opterećenja LCS-2



Slika 47. Naprezanja von Mises LCS-2



Slika 48. PCSF LCS-2



Slika 49. PCCB LCS-2

U tablici 19 povezani su rezultati dobiveni MKE metodom s slikama koje ih opisuju te napravljena analiza podobnosti. Kriterij za evaluaciju deformacija izračunat je tako da je za referentnu duljinu  $b_e$  uzeta širina rampe.

- $b_e = 6\,300\text{ mm}$

Tablica 20. Rezultati MKE LCS-2

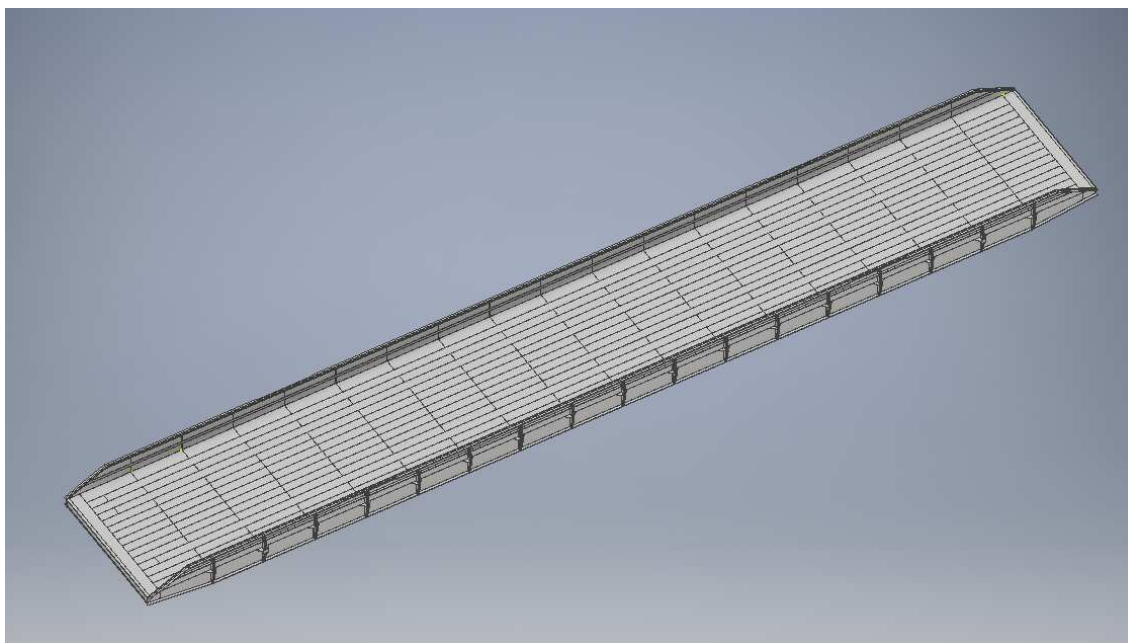
	Vrijednost	Kriterij
Deformacije	8.53	$<31,5\text{ mm}$
Naprezanja Mid von Mises	$163,82\text{ N/mm}^2$	$<260\text{ N/mm}^2$
PCCB	0,39	$>0$
PCSF	0,21	$>0$

Suma reakcijskih sila u osloncima iznosi  $5,88702 \cdot 10^6\text{ N}$  što je za 0,5% različito od zadanog opterećenja na strukturu rampe.

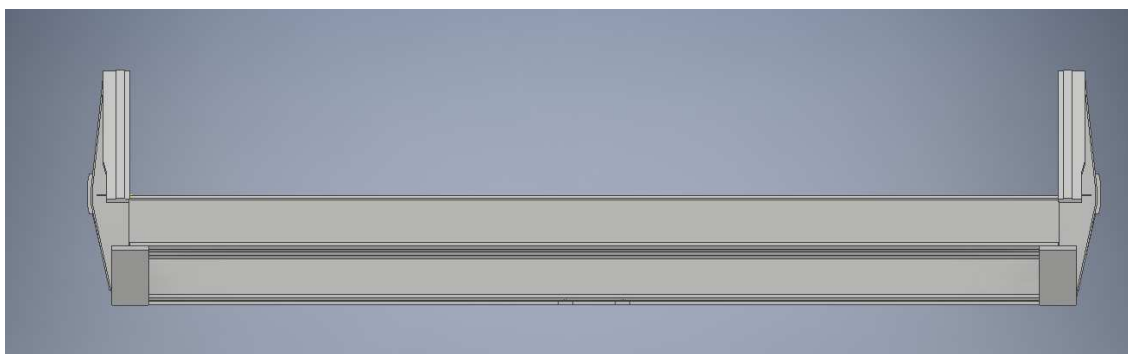
## 8. CAD i proračun sajli/cilindra

### 8.1. Modeliranje rampe u Autodesk INVENTOR-u

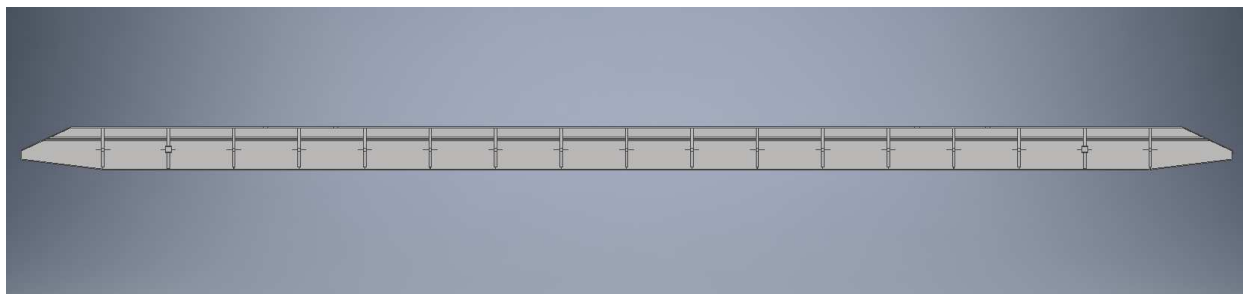
Nakon što je proveden proračun dimenzija konstrukcije po pravilima DNV-GL-a te metodom MKE koristeći potvrđena čvrstoća te su zadovoljeni svi kriteriji podobnosti može se krenuti izrađivati 3D model. Koristeći programski alat Autodesk Inventor izrađen je 3D model rampe (slika 50,slika 51, slika52).



Slika 50. Izometrijski 3D CAD model projektne rampe u Inventor-u



Slika 51. 3D CAD model rampe – prednji pogled



Slika 52. 3D CAD model rampe - pogled s boka

Model je izrađen tako da je sastavljen od niza zasebnih elemenata a ne kao jedinstven model. Važnost ovog modeliranja je u tome da se iz modela u svakom trenutku može izdvojiti neki element na zasebni prostor te se vrlo lako može izraditi zasebni nacrti za svaki element. Zbog mogućnosti izdvajanjem dva elementa posebno može se izraditi montažni i radionički nacrt spoja dva ili više elementa. Iako u ovom radu to nije rađeno, cijeli model se može otvoriti u nekim programskim alatima za proračun MKE metode (Ansys, Femap,..) te provesti MKE proračun nekog specifičnog detalja (uške, temelja cilindra, itd.).

Koristeći model rampe generiran je osnovni nacrt projektirane konstrukcije prekretna rampe te nacrt dan u privitku.

## 8.2. Proračun sajli i cilindra za pokretanje rampe.

SW= 125 tona – masa rampe s flapovima

SWL= 200 tona – masa tereta

LR= 44,2 m - dužina rampe

BR=6,3 m - širina rampe

$a_v=1,0 \text{ m/s}^2$  – vertikalno ubrzanje



### 8.2.1. Proračun cilindra

Za proračun koeficijent simetrije opterećenja  $C_{A1}=0,5$

$F_1$  = sila na jednoj strani rampe

$$F_1 = a_v \cdot g \cdot (0,5 \cdot SW + C_{A1} \cdot SWL) = 1594 \text{ kN}$$

$n_{HS}=4$  – broj prihvata sajli na jednoj strani rampe

$$F_{HS1} = \frac{F_1}{n_{HS}} = 398 \text{ kN}$$

$F_{HS1}$  – sila u svakom prihvatu sajle na rampu

$$F_{WF1} = \frac{F_{HS1}}{2} = 199 \text{ kN}$$

$F_{WF1}$  – sila u svakoj sajli u prihvatu

Svaka sajla je povezana s oba kraja na rampu. S svake strane sajla da dođe do cilindra koji ih povlači prolazi kroz određeni broj kolotura.

$n_{S1}=5$  – broj kolotura s jedne strane cilindra do prihvata

$n_{S2}= 6$  – broj kolotura s druge strane od prihvata do cilindra

Za svaku koloturu uzimaju se gubici u iznosu od 2% .

Sile s svake strane cilindra:

$$F_{W1} = F_{WF1} \cdot \mu^{n_{S1}} = 220 \text{ kN}$$

$$F_{W2} = F_{WF2} \cdot \mu^{n_{S2}} = 224 \text{ kN}$$

Potrebna sila potezanja za jednu sajlu

$$F_{cil1} = F_{WF2} + F_{WF1} = 444 \text{ kN}$$

Ukupna sila potezanja za sve 4 sajle

$$F_{cil} = F_{cil1} \cdot 4 = 1777 \text{ kN}$$

Po projektnoj dokumentaciji odabran je cilindar sljedećih značajki:

$D = 360 \text{ mm}$  – vanjski promjer cilindra

$d = 140 \text{ mm}$  – unutarnji promjer cilindra

$$A = (D^2 - d^2) \cdot \pi / 4 = 86\,394 \text{ mm}^2$$

### 8.2.2. Proračun sajli

Proračun sajli odvija se na isti način kao i proračun cilindra, osim što za proračun sajli koeficijent asimetrije poprima vrijednost

$$C_{A2}=0,6$$

Sila na jednoj strani rampe

$$F_2 = a_v \cdot g \cdot (0,5 \cdot SW + C_{A2} \cdot SWL) = 1\,790 \text{ kN}$$

Sila u svakom prihvatu sajle na rampu

$$F_{HS2} = \frac{F_2}{n_{HS}} = 447 \text{ kN}$$

Sila u svakoj sajli u prihvatu

$$F_{WF2} = \frac{F_{HS2}}{2} = 224 \text{ kN}$$

Sile s svake strane cilindra

$$F_{W1} = F_{WF2} \cdot \mu^{n_{S1}} = 247 \text{ kN}$$

$$F_{W2} = F_{WF2} \cdot \mu^{n_{S2}} = 252 \text{ kN}$$

$n_{S1}=5$  – broj kolotura s jedne strane cilindra do prihvata

$n_{S2}=6$  – broj kolotura s druge strane od prihvata do cilindra

Po DNV-GL pravilima vrijednost faktora sigurnosti za rampe nosivosti više od 160 tona mora biti veća od 3.

$$\mathbf{MBL/F_w > 3}$$

Potrebna sajla izabrana je po [10].

$D_s = 32 \text{ mm}$  - promjer sajle

$$MBL = 957 \text{ kN}$$

$$SF = MBL / F_{W2} = 3,798 > 3 - \text{zadovoljen je uvjet}$$

### 8.2.3. Mehanički zastoј

Rampa stoji a cilindar povlači žice na maksimalnom tlaku

$$P_{\max} = 250 \text{ bar}$$

$$F_{CYL\max} = P_{\max} \cdot A = 2160 \text{ kN}$$

Sila u svakoj sajli na koloturi vezanoј za cilindar

$$F_{WCYL} = F_{CYL\max} / 8 = 270 \text{ kN}$$

$$S_{FCYL\max} = MBL / F_{WCYL} = 3.544 > 3 - \text{zadovoljen je uvjet}$$

### 8.2.4. Puknuće jedne sajle

Ukoliko dođe do puknuća jedne sajle, tada se jedna strana rampe više ne oslanja na dvije nego na jednu rampu.

$$CA2 = 0,6$$

$$n_{HS3} = 2$$

Tada je sila u prihvataima

$$F_{HS3} = \frac{F_2}{n_{HS3}} = 895 \text{ kN}$$

Sila u sajli na prihvatu

$$F_{WF3} = \frac{F_{HS3}}{2} = 447 \text{ kN}$$

Sila u sajlama na cilindru

$$F_{W13} = F_{WF2} \cdot \mu^{n_{S1}} = 494 \text{ kN}$$

$$F_{W23} = F_{WF2} \cdot \mu^{n_{S2}} = 504 \text{ kN}$$

Sigurnosni faktor ukoliko pukne jedna sajla

$$SF = \frac{MBL}{F_{W23}} = 1,899 < 3$$

Čak i prilikom puknuća jedne sajle, rampa se može pokretati samo s jednom sajlom na jednoj strani, međutim sigurnosti faktor je puno ispod dozvoljene vrijednosti.

## 9. Zaključak

Potaknuti razvojem automobilske industrije i potrebom za prijevoz velikog broja automobila i kamiona s jednog dijela svijeta na drugi razvili su se specijalizirani RO-RO brodovi za prijevoz automobila i kamiona. Osnovni cilj ovih brodova je što sigurniji i brži prijevoz velikog broja vozila od tvornica do ciljanog tržišta, uz što kraće vrijeme zadržavanja u lukama prilikom ukrcaja ili iskrcaja. Iz spomenutih razloga kao dio palubne opreme na takve brodove se ugrađuju i podizne prekretno rampe.

Cilj ovog rada bio je upoznati se s ovom vrstom rampi, te projektirati konstrukciju unutarnje podizne prekretno rampe po pravilima klasifikacijskih društava DNV-GL. U početku su pomoću informacija od proizvođača dane opće značajke podiznih prekretnih rampi, a zatim su istaknute projektne značajke rampe za koju je trebalo definirati topologiju i dimenzionirati konstrukcijske elemente same rampe.

Po projektnoj dokumentaciji opisana su projektna opterećenja od različitih vrsta vozila predviđenih za prijevoz preko razmatrane rampe. Koristeći pravila DNV-GL izračunati su kriteriji evaluacije za konstrukciju (dozvoljena naprezanja i progibi), te je korištenjem projektnih opterećenja dimenzionirana inicijalna konstrukcija rampe (pokrov, uzdužnjaci i poprečni elementi). Direktni proračun konstrukcijskih elemenata proveden je korištenjem metode konačnih elemenata u programskom alatu MAESTRO za različita eksploatacijska stanja s različitim stanjem opterećenja.

Za sva stanja opterećenja, ispitane metodom konačnih elemenata, finalno predložene dimenzije projektirane konstrukcije u potpunosti zadovoljavaju sve kriterije podobnosti (popuštanje, izvijanje).

Na osnovu finalnih dimenzija izrađen je 3D CAD model predložene konstrukcije u programu *Autodesk Inventor* kao osnova za definiciju svih potrebnih konstrukcijskih detalja, te je iz takvog CAD modela generiran osnovni konstrukcijski nacrt koji su priložen u radu.

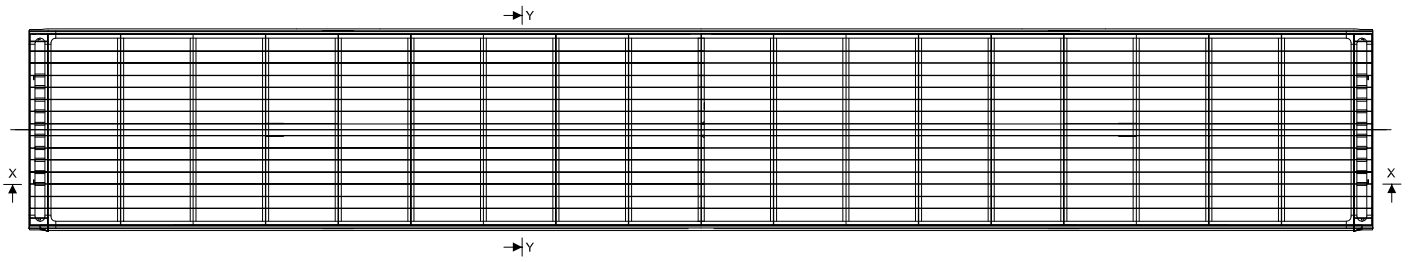
## Literatura

- [1] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Ro-Ro\\_brod](https://hr.wikipedia.org/wiki/Ro-Ro_brod) (pristupljeno 02.01.2020.)
- [2] <https://www.wartsila.com/encyclopedia/term/ro-ro> (pristupljeno 30.12.2019.)
- [3] [https://workboatdc-static.s3.amazonaws.com/uploads/2014/04/04.08.14\\_comet.jpg](https://workboatdc-static.s3.amazonaws.com/uploads/2014/04/04.08.14_comet.jpg)  
(pristupljeno 02.01.2020.)
- [4] [http://www.largestshipintheworld.com/largest\\_ships\\_in\\_the\\_world/worlds-largest-ro-ro-vessel-launched.php](http://www.largestshipintheworld.com/largest_ships_in_the_world/worlds-largest-ro-ro-vessel-launched.php) (pristupljeno 02.01.2020.)
- [5] MacGregor: „Technical information, hoistable ramps“; January 2014
- [6] MacGregor: Technical Specification-4191027, 2019.
- [7] DNV-GL rules for classification: Ships (RU-ship) – edition 2019-07
- [8] Hughes, O.F. and Paik J.K., Ship Structural Design and Analysis, Wiley, SNAME, 2010.
- [9] MAESTRO Version 11.2, Software Documentation. DRS-C3 Advanced Technology Center, Stevensville, USA, 2015.
- [10] <https://www.teufelberger.com/en/products-services/steel-industry/slab-transport-crane/hoist-ropes.html> (pristupljeno 05.01.2020.)

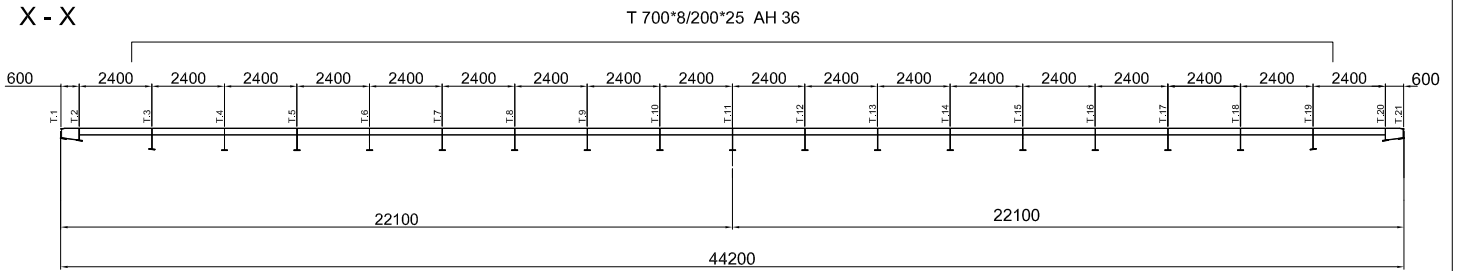
## PRILOZI

- I. Nacrt konstrukcije podizne preketne rampe
- II. Nacrt oplate podizne preketne rampe
- III. CD-R



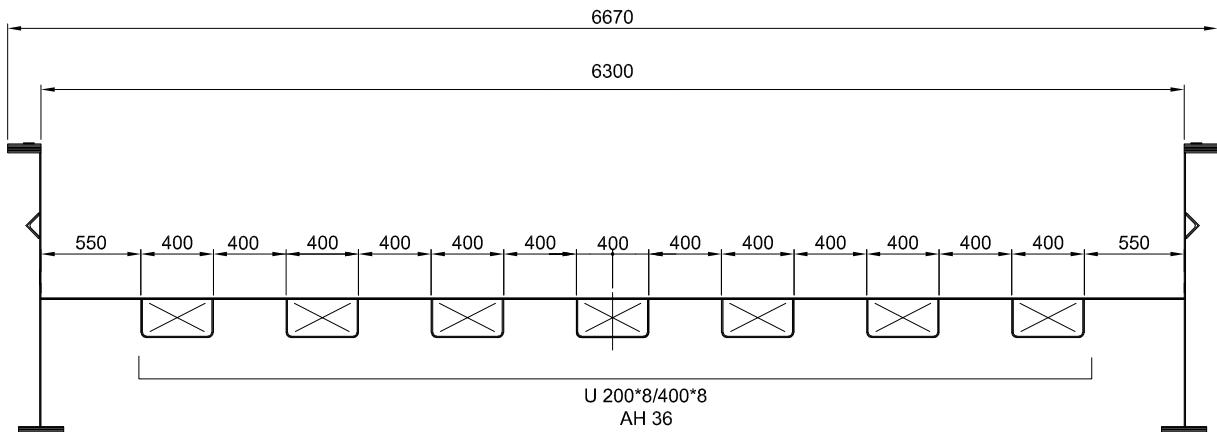



X - X

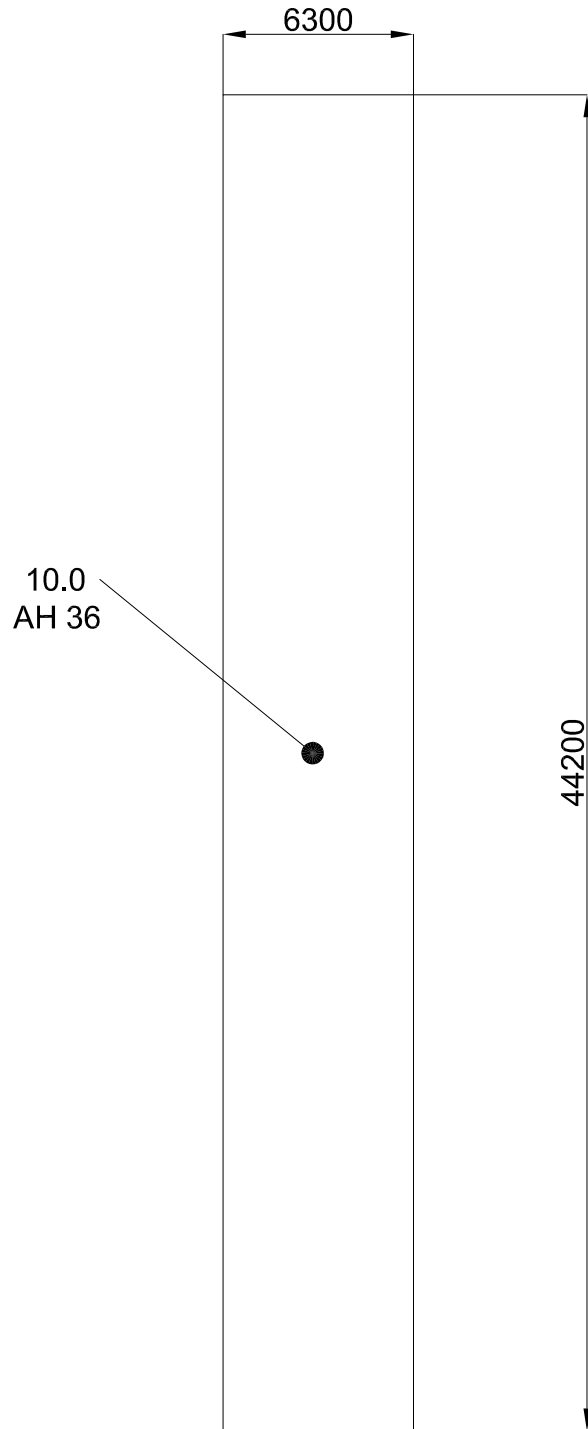



Y - Y

MJERILO 1:1200



Projektirao	Nikola Grden	 <b>FSB Zagreb</b>
Mjerilo	1:250	
Objekt: Konstrukcija podizne prekretno rampe		
		Prilog: 1



Projektirao	Nikola Grden	 <b>FSB Zagreb</b>
Mjerilo	1:250	
Objekt:	Oplata podizne prekretno rampe	
		Prilog: 2