

# Strukturalna analiza broda za prijevoz ukapljenog prirodnog plina membranskog tipa

---

Jozić, Luka

Master's thesis / Diplomski rad

2023

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:384711>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-19**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

**Luka Jozić**

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Jerolim Andrić

Student:

Luka Jozić

Zagreb, 2023

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

Zahvaljujem se mentoru rada prof. dr. sc. Jerolimu Andriću na pruženoj pomoći, savjetima te stalnoj dostupnosti tijekom izrade diplomskog rada.

Također se zahvaljujem svim svojim prijateljima i kolegama koji su bili uz mene i na bilo koji način mi pomogli tijekom studiranja, a posebno kolegi Stanku Kitaroviću nesebičnoj pomoći koju mi je pružao cijelo vrijeme tijekom pisanja ovog rada.

Special thanks to my friend Marcin Szumaczuk for his continuous support, patience, motivation, and valuable comments throughout this thesis.

Posebno se zahvaljujem svojoj obitelji pogotovo svojim roditeljima na tome što su mi svojim radom i vjerom u mene omogućili studiranje i bili neizmjerena podrška tokom cijelog studija.

I na kraju hvala dragom Bogu.

Luka Jozić



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: 602 – 04 / 22 – 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 23 -	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Luka Jozić** JMBAG: 0035214978

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Strukturalna analiza broda za prijevoz ukapljenog prirodnog plina membranskog tipa**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Structural analysis of liquefied natural gas ship with membrane tanks**

Opis zadatka:

Ukapljeni prirodni plin (UPP) jest pročišćeni zemni plin rashlađivanjem pretvoren u tekuće stanje radi lakšeg prijevoza. Kratica je LNG, prema engleskom nazivu *liquefied natural gas* (ukapljeni prirodni plin). Ukapljeni prirodni plin zauzima oko 1/600 volumena prirodnog plina u plinovitom stanju. Prirodni plin se komprimira u tekućinu pri približno atmosferskom tlaku (maksimalni tlak pri prijevozu je oko 25 kPa) tako da je hladen na oko -162 °C. Smanjenje volumena čini ga ekonomičnijim za prijevoz na duge relacije brodovima gdje cjevovodi ne postoje ili gdje prijenos prirodnog plina cjevovodima nije moguć ili ekonomičan. Brodovi za prijevoz ukapljenog plina su specijalno projektirana plovila koja imaju dvostruko dno, oplatu i palubu te su posebno dizajnirani kako bi podnijeli niske temperature LNG-a. Postoji nekoliko konstrukcijskih koncepta od kojih je danas koncept s membranskim tankovima najviše u uporabi.

U zadatku je potrebno na osnovu zadanog predloška provesti strukturalnu analizu konstrukcije LNG broda prema pravilima klasifikacijskog društva DNV korištenjem metode konačnih elemenata (MKE) kroz nekoliko koraka.

- Proučiti relevantna pravila DNV za strukturalnu analizu LNG brodova.
- Izgraditi MKE modela tri tanka na razini *grube* MKE mreže elemenata na osnovu dostavljene dokumentacije (klasifikacijskih nacrti).
- Implementirati komponente opterećenja i formirati relevantne slučajeve opterećenja.
- Provesti analizu podobnosti poprečnih i uzdužnih konstrukcijskih elemenata za razmatrane slučajeve opterećenja.

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

Zadatak zadan:

4. svibnja 2023.

Datum predaje rada:

6. srpnja 2023.

Predviđeni datumi obrane:

17. – 21. srpnja 2023.

Zadatak zadao:

Prof.dr.sc. Jerolim Andrić

Predsjednik Povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Ivan Čatipović

---

**SADRŽAJ**

POPIS SLIKA .....	IV
POPIS TABLICA .....	VI
POPIS DIJAGRAMA .....	VI
POPIS SLIKA U PRILOZIMA .....	VII
POPIS OZNAKA .....	IX
SAŽETAK .....	X
SUMMARY .....	XI
1 UVOD .....	1
2 LNG tankeri .....	2
2.1 Membranski LNG tankeri .....	4
3 TEHNIČKA DOKUMENTACIJA .....	6
4 STRUKTURNA ANALIZA TRI SKLADIŠTA .....	7
5 STRUKTURNI MODEL .....	9
5.1 Korišteni računalni programi .....	9
5.2 Model .....	9
5.3 Dimenzije .....	11
5.3.1 Duljina tanka .....	11
5.3.2 Debljine limova .....	11
5.3.3 Materijal limova i profila .....	12
5.4 Mreža konačnih elemenata .....	14
5.4.1 Veličina mreže .....	14
5.4.2 Mreža modela .....	14
5.5 Rubni uvjeti .....	16
5.6 Opterećenja .....	18
5.6.1 Tlakovi .....	18
5.7 Balansiranje modela i postizanje ciljanih vrijednosti globalnih komponenti opterećenja .....	22
5.7.1 Kritična globalna smična sila .....	24
5.7.2 Kritični globalni vertikalni moment savijanja .....	25
6 Strukturna analiza konstrukcije .....	26
6.1 Prikaz pomaka .....	26
6.2 Analiza popuštanja .....	29

---

6.2.1	Kriteriji prihvatljivosti za popuštanje.....	29
6.2.2	VonMises naprezanja .....	29
6.2.3	Aksijalna naprezanja u grednim konačnim elementima .....	34
6.2.4	Provjera faktora iskoristivosti konstrukcije za popuštanje korištenjem programskog alata GeniE .....	38
6.3	Analiza izvijanja.....	40
6.3.1	Kriterij prihvatljivosti za izvijanje .....	40
6.3.2	Provjera faktora iskoristivosti konstrukcije za popuštanje.....	40
6.4	Lociranje kritičnih dijelova konstrukcije .....	42
6.5	Analiza kritičnih dijelova konstrukcije .....	43
7	ZAKLJUČAK.....	47
	REFERENCE .....	48
	PRILOG A.....	50
	PRILOG B.....	53
	PRILOG C.....	55
	PRILOG D.....	64

---

**POPIS SLIKA**

Slika 2-1 Različite izvedbe skladišnih prostora tankera za prijevoz plina .....	3
Slika 2-2 Prikaz LNG tankera sa sfernim oblikom skladišnog prostora [8].....	3
Slika 2-3 Iskoristivost prostora s obzirom na vrstu skladišta [7] .....	3
Slika 2-4 Nomenklatura tipičnog glavnog rebra tankera membranskog oblika [9] .....	4
Slika 2-5 Raspodjela skladišnih prostora membranskog oblika na brodovima [10] .....	5
Slika 3-1 Poprečni presjek broda.....	6
Slika 4-1 Prikaz općeg plana broda s istaknutim dijelom koji je uključen u analizu tri skladišta. .....	7
Slika 5-1 Geometrija limova modela.....	9
Slika 5-2 Poprečne i uzdužne ukrepe modela.....	10
Slika 5-3 Tipično glavno rebro modela .....	10
Slika 5-4 Debljine opločenja na modelu u ravnini $y=0$ u metrima.....	12
Slika 5-5 Raspored različitih materijala po poprečnom presjeku rebra .....	13
Slika 5-6 Polovinski prikaz mreže konačnih elemenata modela .....	14
Slika 5-7 Mreža konačnih elemenata na tipičnom rebro promatranog modela.....	15
Slika 5-8 Prikaz rubnih uvjeta na modelu .....	17
Slika 5-9 Statički tlak na vanjskoj oplati .....	19
Slika 5-10 Prikaz skladišnih prostora s nakrcana dva skladišta .....	20
Slika 5-11 Isječak konstrukcije iz skladišta broj dva. ....	21
Slika 5-12 Pojednostavljeni prikaz sila koji inicijalno djeluju na brodsku konstrukciju .....	22
Slika 5-13 Prikaz smjera djelovanja rezultante smične sile zbog raspodjele masa po brodu [17] .....	23
Slika 5-14 Graf rasporeda smičnih sila i momenata savijanja krcanja sa praznim skladištem u sredini [18].....	23
Slika 6-1 Prikaz pomaka cijelog modela zajedno sa konturama nedeformiranog modela u metrima.....	27
Slika 6-2 Prikaz pomaka srednjeg skladišta zajedno sa konturama nedeformiranog modela u metrima.....	27
Slika 6-3 Prikaz pomaka srednjeg skladišta u metrima.....	28
Slika 6-4 Prikaz pomaka srednjeg skladišta na poprečnom presjeku $y=0$ u metrima .....	28
Slika 6-5 VonMises naprezanja na presjeku $y = 0$ ( <i>centerline</i> ) [Pa].....	30
Slika 6-6 VonMises naprezanja na oplati modela na presjeku $y = 0$ . [Pa] .....	30



Slika 6-7 Prikaz VonMises naprezanja za okvirna rebra (rebro 89-102) [Pa] .....	31
Slika 6-8 VonMises naprezanja na vodonepropusnim pregrada [Pa] .....	31
Slika 6-9 VonMises naprezanja na koferdamskim pregradama [Pa] .....	32
Slika 6-10 VonMises naprezanja na jakim uzdužnim nosačima dna i palube kao i konstrukcije u koferdamu [Pa] .....	32
Slika 6-11 VonMises naprezanja u roštilju dvodna [Pa] .....	33
Slika 6-12 VonMises naprezanja u području uzvojnog tanka [Pa] .....	33
Slika 6-13 Aksijalna naprezanja u grednim konačnim elementima središnjeg skladišta .....	34
Slika 6-14 Aksijalna naprezanja u grednim konačnim elementima na poprečnom presjeku $y = 0$ [Pa].....	34
Slika 6-15 Aksijalna naprezanja u grednim konačnim elementima na jakim uzdužnim nosačima u dvodnu, palubi i pregradama [Pa].....	35
Slika 6-16 Aksijalna naprezanja u grednim konačnim elementima na jakim uzdužnim nosačima u dvoboku i pregradama [Pa].....	35
Slika 6-17 Aksijalna naprezanja u grednim konačnim elementima na vodonepropusnim poprečnim pregradama [Pa].....	36
Slika 6-18 Aksijalna naprezanja u grednim konačnim elementima na vodonepropusnim poprečnim pregradama [Pa].....	36
Slika 6-19 Aksijalna naprezanja u grednim konačnim elementima na okvirnim rebrima [Pa]	37
Slika 6-20 Model za provjeru kapaciteta definiran u GeniE-u. ....	38
Slika 6-21 Prikaz faktora iskoristivosti pojedinih limova konstrukcije za popuštanje za slučaj L4.....	39
Slika 6-22 Moguća raspodjela naprezanja na ukrepljenom panelu [22] .....	40
Slika 6-23 Prikaz faktora iskoristivosti pojedinih dijelova konstrukcije za slučaj izvijanja za slučaj opterećenja L4 .....	41
Slika 6-24 Prikaz faktora iskoristivosti pojedinih dijelova konstrukcije za slučaj izvijanja za slučaj opterećenja L4-tlocrt .....	41
Slika 6-25 Istaknut prikaz pojedinih dijelova konstrukcije koji imaju nepodobni.....	42
Slika 6-26 Prikaz grupacije elemenata kojima je faktor iskoristivosti konstrukcije veći od jedan .....	42
Slika 6-27 Sučelje alata za provjeru izvijanja oplata i ukrepa prema pravilima DNV-a, integriranog u GeniE [24].....	43
Slika 6-28 Istaknut prikaz pojedinih dijelova konstrukcije koji imaju nepodobni.....	44

Slika 6-29 Istaknut prikaz pojedinih dijelova konstrukcije koji imaju nepodobni.....	44
Slika 6-30 Faktor iskoristivosti konstrukcije za slučaj izvijanja – paneli uzvoja.....	45
Slika 6-31 Paneli i njihovi faktori iskoristivosti na donjem dijelu oplata .....	46
Slika 6-32 Paneli i njihovi faktori iskoristivosti na donjem dijelu oplata nakon umetanja interkostalnih ukrepa .....	46

## POPIS TABLICA

Tablica 3-1 Glavne izmjere broda .....	6
Tablica 5-1 Softveri i pripadajuće verzije .....	9
Tablica 5-2 Duljina tanka 3 zajedno sa lokacijama poprečnih pregrada.....	11
Tablica 5-3 Svojstva materijala korištenih za izradu modela.....	12
Tablica 5-4 Prikaz rubnih uvjeta koji su postavljeni u rubove modela [15] .....	16
Tablica 5-5 Kombinacije opterećenja [13] .....	18
Tablica 6-1 Tablica dopuštenih naprezanja .....	29
Tablica 6-2 Dopušteni faktor iskoristivosti za izvijanje.....	40

## POPIS DIJAGRAMA

Dijagram 4-1 Dijagram toka za analizu 3 skladišta prema DNV-u. Crvenom bojom je označeno provedeno u ovom radu [13] .....	8
Dijagram 5-1 Raspored smične sile po uzdužnom presjeku broda prije i nakon balansiranja modela .....	24
Dijagram 5-2 Vertikalni momenti savijanja tijekom procesa balansiranja modela .....	25

---

**POPIS SLIKA U PRILOZIMA**

Slika- A-I Opći raspored prostora na brodu .....	50
Slika- A-II Tipično glavno rebro tankera s membranskim oblikom spremnika.....	51
Slika- A-III Tipična vodonepropusna pregrada.....	52
Slika- B-I Debljine na nepropusnoj pregradi (rebro 104) [m].....	53
Slika- B-II Debljine na koferdamu (rebro 103) [m] .....	53
Slika- B-III Debljine na tipičnom rebro [m].....	54
Slika- B-IV Debljine unutar srednjeg skladišta [m] .....	54
Slika- C-I Pomaci cijelog modela za slučaj opterećenja L3 ( <i>sagg</i> ) [m].....	55
Slika- C-II Pomaci srednjeg skladišta za slučaj opterećenja L3 ( <i>sagg</i> ) [m].....	55
Slika- C-III Pomaci srednjeg skladišta za slučaj opterećenja L3, presjek u $y=0$ [m].....	56
Slika- C-IV VonMises naprezanja na presjeku $y = 0$ ( <i>centerline</i> ) [MPa] .....	56
Slika- C-V VonMises naprezanja na oplati modela na presjeku $y = 0$ . [MPa] .....	57
Slika- C-VI VonMises naprezanja na koferdamskim pregradama [MPa].....	57
Slika- C-VII VonMises naprezanja na vodonepropusnim pregrada [MPa] .....	58
Slika- C-VIII Prikaz VonMises naprezanja za okvirna rebra (rebro 89-102) [MPa] .....	58
Slika- C-IX VonMises naprezanja na jakim uzdužnim nosačima dna i palube kao i konstrukcije u koferdamu [MPa].....	59
Slika- C-X VonMises naprezanja u roštilju dvodna [MPa].....	59
Slika- C-XI VonMises naprezanja u području uzvojnog tanka i bočne stijenke tanka [MPa].	60
Slika- C-XII Aksijalna naprezanja u grednim konačnim elementima srednjeg skladišta .....	60
Slika- C-XIII Aksijalna naprezanja u grednim konačnim elementima na poprečnom presjeku $y$ $= 0$ [MPa].....	61
Slika- C-XIV Aksijalna naprezanja u grednim konačnim elementima na vodonepropusnim poprečnim pregradama (rebro br. 88 i 104) [MPa] .....	61
Slika- C-XV Aksijalna naprezanja u grednim konačnim elementima na vodonepropusnim poprečnim pregradama (rebro br. 87 i 103) [MPa] .....	62
Slika- C-XVI Aksijalna naprezanja u grednim konačnim elementima na okvirnim rebrima(rebra br. 89-102) [MPa] .....	62
Slika- C-XVII Aksijalna naprezanja u grednim konačnim elementima na jakim uzdužnim nosačima u dvoboku i pregradama [MPa].....	63
Slika- C-XVIII Aksijalna naprezanja u grednim konačnim elementima na jakim uzdužnim nosačima u dvodnu, palubi i pregradama [MPa].....	63

---

Slika- D-I Ukupni faktor iskoristivosti (popuštanje + izvijanje) za slučaj opterećenja L3 .....	64
Slika- D-II Ukupni faktor iskoristivosti (popuštanje + izvijanje) – polovinski model za slučaj opterećenja L3 .....	64

---

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
F	N	smična sila
M	Nm	moment savijanja
$R_Y$	$N/mm^2$	nominalno naprezanje
$T_a$	m	gaz broda za slučaj opterećenja L3
$T_{sc}$	m	gaz ( <i>scantling</i> ) broda
x	m	duljina
$\delta_x$		pomak u smjeru osi x
$\delta_y$		pomak u smjeru osi y
$\delta_z$		pomak u smjeru osi z
$\theta_z$		rotacija oko osi x
$\theta_y$		rotacija oko osi x
$\theta_x$		rotacija oko osi x
$\lambda_y$		faktor iskoristivosti
$\lambda_{yperm}$		dopušteni faktor iskoristivosti za <i>grubu</i> mrežu konačnih elemenata
$\sigma_{vm}$	$N/mm^2$	von Mises naprezanje u plate elementima
$\sigma_{axial}$	$N/mm^2$	aksijalna naprezanja u grednim konačnim elementima

## SAŽETAK

Brodovi za prijevoz ukapljenog prirodnog plina (LNG) igraju ključnu ulogu u globalnoj trgovini energijom, olakšavajući transport LNG-a od proizvodnih mjesta do potrošačkih tržišta diljem svijeta. Ova specijalizirana plovila projektirana su za siguran transport LNG-a, koji je prirodni plin ohlađen do tekućeg stanja za učinkovito skladištenje i otpremu. Uz sve veću potražnju za čistim izvorima energije, LNG nosači postali su nezamjenjivi u zadovoljavanju rastućih svjetskih energetske potreba uz minimiziranje utjecaja na okoliš. Skladišta tereta služe kao namjenski prostori unutar broda gdje se teret skladišti i osigurava za prijevoz. Ta su skladišta podložna raznim silama i uvjetima tijekom putovanja, uključujući gibanja izazvana valovima, pomicanje tereta i vanjska opterećenja. Analiza teretnih skladišta uključuje procjenu čvrstoće konstrukcije, stabilnosti i kapaciteta nosivosti ovih prostora kako bi se osiguralo da mogu izdržati dinamičke sile koje se javljaju na moru. Prema pravilu norveškog klasifikacijskog društva DNV, izrađena je *gruba* mreža konačnih elemenata na osnovi dostupne dokumentacije za model tri tanka te su implementirane komponente opterećenja i provedena je analiza podobnosti za uzdužne i poprečne elemente koristeći programski paket SESAM od DNV-a.

Ključne riječi: Analiza tri skladišta, LNG, strukturna analiza, analiza konačnih elemenata

**SUMMARY**

Liquefied natural gas (LNG) carriers play a key role in global energy trade, facilitating the transportation of LNG from production sites to consumer markets around the world. These specialized vessels are designed to safely transport LNG, which is natural gas cooled to a liquid state for efficient storage and shipping. With the increasing demand for cleaner energy sources, LNG carriers have become indispensable in meeting the growing world energy needs while minimizing the impact on the environment. Cargo holds serve as dedicated spaces inside the ship where cargo is stored and secured for transport. These warehouses are subject to a variety of forces and conditions during the voyage, including wave-induced motions, shifting cargo, and external loads. The analysis of cargo holds involves assessing the structural strength, stability, and load-bearing capacity of these spaces to ensure that they can withstand the dynamic forces that occur at sea. According to the rules of the Norwegian classification society DNV, a coarse finite element mesh was created based on the available documentation for the cargo hold model, load components were implemented, and a structural analysis was performed for longitudinal and transverse elements using the SESAM software package from DNV.

Keywords: Cargo hold analysis, LNG, structural analysis, finite element analysis

---

# 1 UVOD

Ukapljeni prirodni plin (eng. *LNG*) pojavljuje se kao ključni izvor energije koji nudi značajne prednosti u pogledu smanjenih emisija i učinkovitog transporta. Efektivan način za prijevoz ukapljenog plina je brod stoga se u središtu trgovine ukapljenim prirodnim plinom nalaze se specijalizirani tankeri za prijevoz istog (eng. *LNG Carrier*) čija je zadaća transportirati plin na velike udaljenosti. Sa sve većim fokusom na održivost i ugradnju novih tehnologija, LNG nosači se razvijaju kako bi zadovoljili zahtjeve svijeta koji se mijenja i sve veću potražnju za ovim brodovima. Razumijevanje konstrukcije i njihova analiza od iznimne su važnosti kako bi se osiguralo sigurno i pouzdano funkcioniranje tankera i kako ne bi došlo do prirodnih katastrofa [1] [2].

Strukturalna analiza igra ključnu ulogu u procjeni čvrstoće, stabilnosti i ukupnih performansi LNG nosača. Upotrebom sofisticiranih inženjerskih tehnika i naprednih alata za simulaciju, inženjeri mogu procijeniti sposobnost plovila da izdrži različite radne uvjete, uključujući ekstremne vremenske uvjete, zapljuskivanje tereta i dinamička opterećenja. Jedno od ključnih područja strukturalne analize je procjena čvrstoće trupa. LNG brodovi podvrgnuti su znatnim opterećenjima uslijed kretanja izazvanih valovima, sila vjetra i težine samog tereta. Strukturalna analiza ima za cilj osigurati da trup može izdržati te sile uz osiguranje odgovarajućih granica sigurnosti. Analizirajući odziv konstrukcije na različite scenarije opterećenja, inženjeri mogu optimizirati konstrukcijske elemente i izbor materijala kako bi poboljšali integritet trupa. Još jedan kritičan aspekt je procjena vijeka trajanja od zamora, uzimajući u obzir cikličko opterećenje LNG nosača tijekom njihovog radnog vijeka. Strukturalna analiza pomaže identificirati potencijalna područja sklona zamoru, kao što su zavareni spojevi i područja visokog naprezanja, i omogućuje inženjerima da provedu modifikacije konstrukcije ili uvedu strategije održavanja kako bi se ublažila oštećenja uzrokovana zamorom i produžio životni vijek nosača.

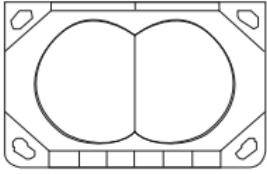
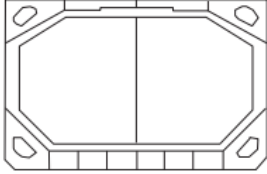
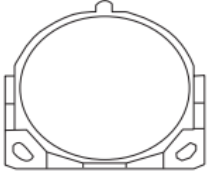
Područje strukturalne analize za LNG brodove nastavlja se razvijati s napretkom tehnologije, materijala i računalnih metoda. Poboljšane tehnike modeliranja, uključujući analizu konačnih elemenata i računalnu dinamiku fluida, omogućuju točnija predviđanja strukturalnog ponašanja i odziva pod različitim scenarijima opterećenja. Jedinostveni dizajn LNG nosača membranskog tipa, s njihovim fleksibilnim sustavima za zadržavanje tereta, predstavlja specifične izazove koji zahtijevaju detaljnu analizu.



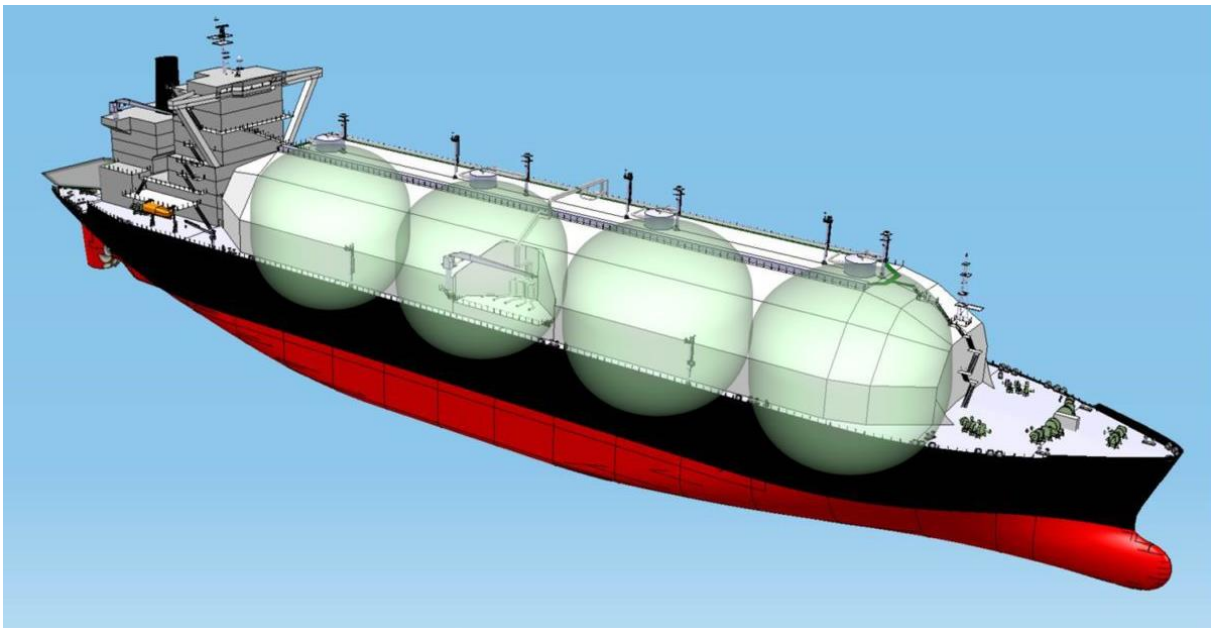
## 2 LNG tankeri

Tanker je brod koji složi za prijevoz tekućeg tereta kojemu je prostor u trupu podijeljen u više nepropusnih odjeljaka koji se zovu skladišta ili spremnici (*tank*) i najčešće imaju od četiri do šest tankova. Brodovi za prijevoz ukapljenog naftnog plina (eng. *LNG – Liquefied Natural Gas*) svoj teret hlade do otprilike  $-160^{\circ}\text{C}$ , pri čemu plin prelazi, u tekuće stanje. Ukapljena forma prirodnog plina uvelike je kompaktnija i lakša za prijevoz u usporedbi s plinovitim stanjem. Upravno zbog održavanja niske temperature spremnici su dobro izolirani. Gradnja broda za prijevoz ukapljenog plina složen je i skup proces pa takvi brodovi mogu biti i tri do četiri puta skuplji od običnih tankera unatoč sličnostima u konstrukciji s njima, a sama gradnja može potrajati i do 30 mjeseci. Zbog rizika od izlivanja odnosno od curenja svi tankeri moraju imati dvostruke oplate dna, boka i palube u području skladišta. Danas se dosta LNG tankera koristi za skladištenje plina, a takva plutajuća skladišta se nazivaju FSRU (od engl. *Floating Storage and Regasification Unit*) što je uzrokovalo i dodatnu potražnju za takvom vrstom brodova [3] [4].

LNG tankeri za skladištenje i prijevoz tereta uz membranski oblik spremnika upotrebljavaju i sferne oblike. Sferni oblik skladišta omogućava veću stabilnost broda prilikom plovidbe budući da je tlak u ovom slučaju jednako raspoređen na stijenke spremnika. Unatoč prednostima sfernog oblika skladišta, istraživanjem je utvrđeno da se čak 8% više tereta može ukrcati u tanker sličnih dimenzija sa membranskim skladištem što prikazuje i Slika 2-3. Slika 2-2 prikazuje raspored skladišnih prostora tankera koji koristi tankove tipa B (Type B). Osim tipa B koriste se još i tankovi tipa C (Type C) koji su također sfernog oblika, a pregled najčešće korištenih tankova prikazuje Slika 2-1 gdje možemo vidjeti i kad se koristi pojedini tank u odnosu na veličinu broda [5] [6] [7].

Tank type	Independent cylindrical	Independent prismatic	MOSS type (independent spherical)
IMO tank type	Type C	Type A	Type B
Schematic structure			
Secondary barrier	No requirements	Complete	Partial
Characteristic	Pressurized at ambient or lower temperature	Fully refrigerated at atmospheric pressure	Fully refrigerated at atmospheric pressure
Notes	For small vessels less than approx. 20,000 m <sup>3</sup> capacity	For large vessels	For LNG carriers

**Slika 2-1** Različite izvedbe skladišnih prostora tankera za prijevoz plina



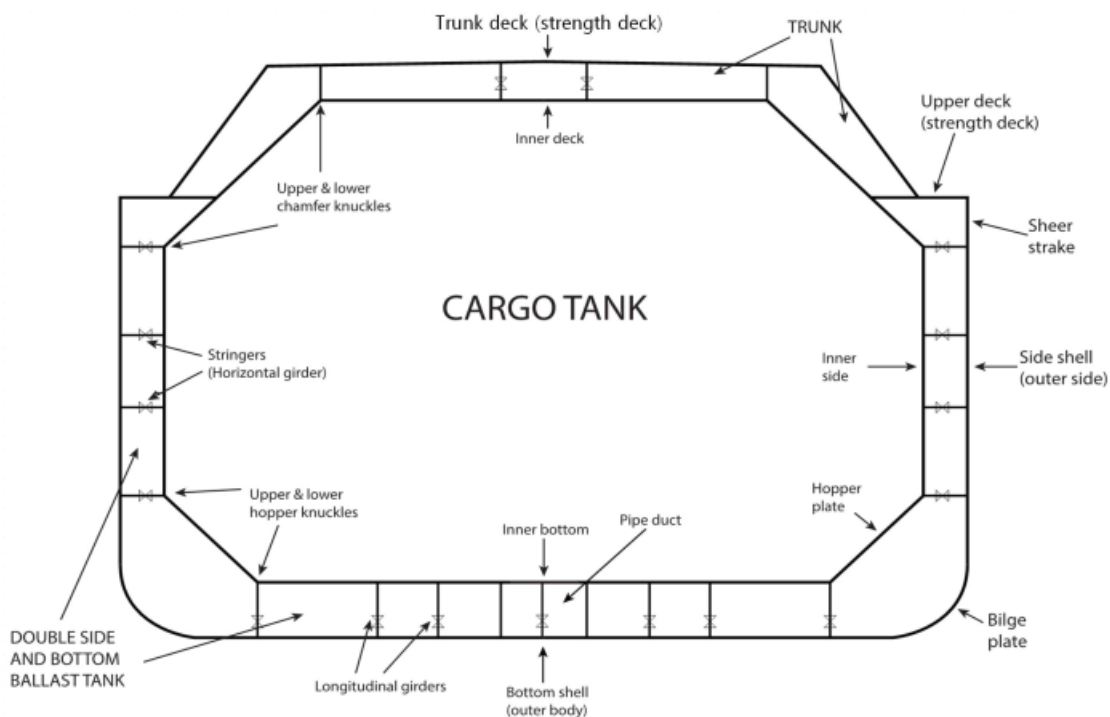
**Slika 2-2** Prikaz LNG tankera sa sfernim oblikom skladišnog prostora [8]



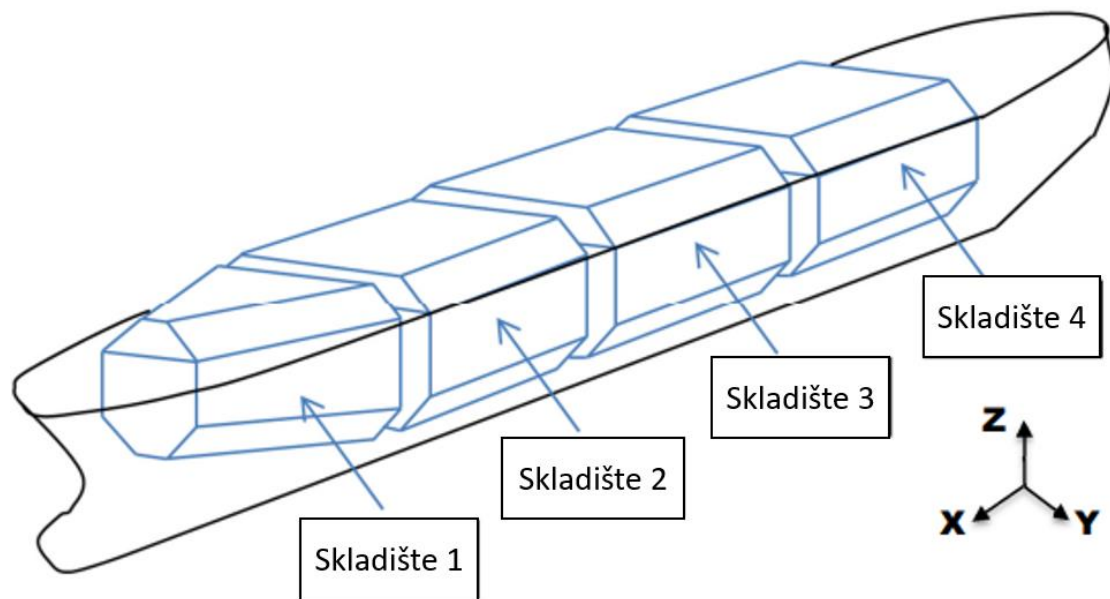
**Slika 2-3** Iskoristivost prostora s obzirom na vrstu skladišta [7]

## 2.1 Membranski LNG tankeri

Uz sferne oblike skladišta, najkorišteniji oblik skladišta, koji je odlika velikih LNG tankera, je membranski oblik koji je prikazan na Slika 2-4 uz uobičajeno korištenu nomenklaturu na engleskom jeziku. LNG brodovi [9] sastoje se uglavnom od četiri do šest teretnih skladišta, a oko njih se nalaze balastni tankovi i koferdami što brodu daje takozvani *double-hull* oblik konstrukcije (dvostruki limovi dna, boka i paluba). Tankovi se uglavnom protežu od jednog do drugog ruba broda (izuzevši *double side*, tj. širinu dvoboka), a njihova visina je otprilike 30-ak metara dok im je duljina od 40 do 50 metar. Skladište do pramca broda je numerirano brojem jedan i u odnosu na druga skladišta njegove dimenzije su nešto manje zbog "šiljastog" oblika konstrukcije (forme) broda što prikazu i Slika 2-5.



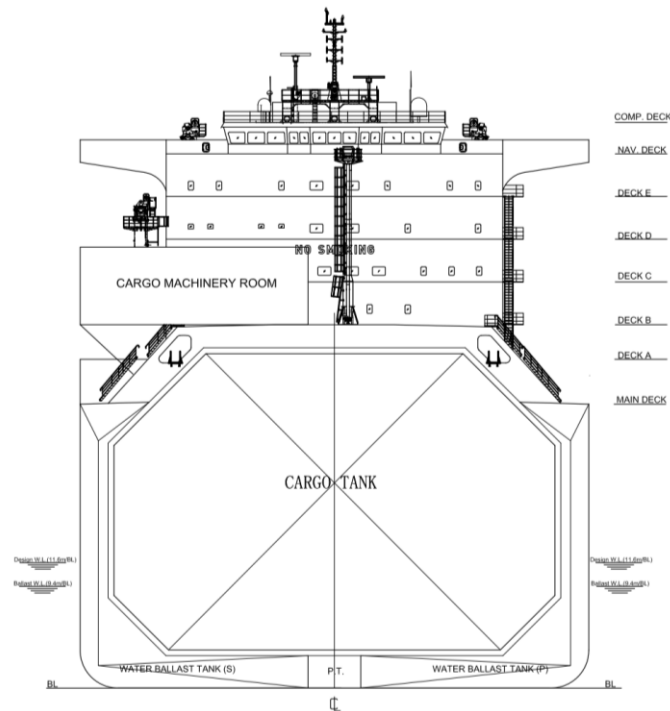
**Slika 2-4 Nomenklatura tipičnog glavnog rebra tankera membranskog oblika [9]**



Slika 2-5 Raspodjela skladišnih prostora membranskog oblika na brodovima [10]

### 3 TEHNIČKA DOKUMENTACIJA

Slika 3-1 prikazuje poprečni presjek broda na kojemu je vidljiva unutarnja struktura teretnog i balastnog tanka. Opći plan broda na kojem su prikazana i modelirana skladišta prikazan je u poglavlju 4.



**Slika 3-1 Poprečni presjek broda**

Glavne dimenzije broda promatranog broda dane su u Tablica 3-1.

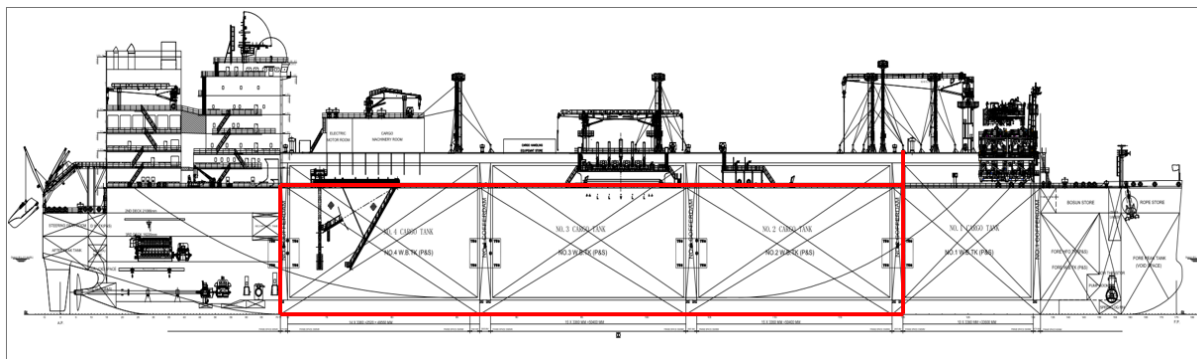
**Tablica 3-1 Glavne izmjere broda**

$L_{oa} =$	294	m
$L_{pp} =$	288	m
$B =$	46.95	m
$D(\text{do glavne palube}) =$	26.25	m
$D(\text{do gornje palube}) =$	33.4	m
$T_{design}$	11.6	m
$T_{scantling}$	12.5	m
Kapacitet tanka =	174 000	$m^3$

## 4 STRUKTURNA ANALIZA TRI SKLADIŠTA

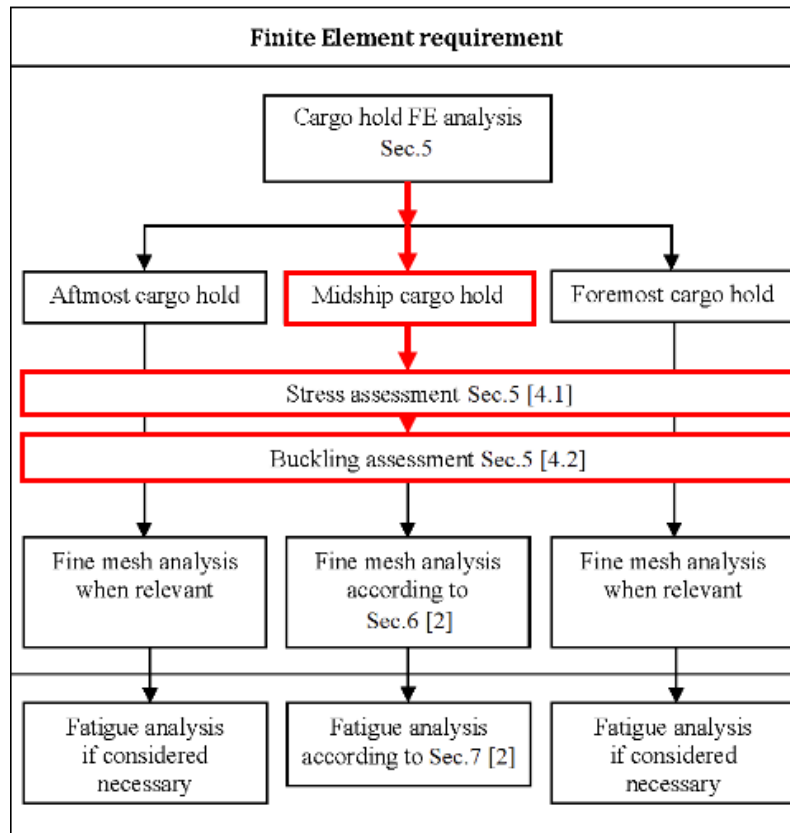
Strukturna analiza tri skladišta (tanka) provodi se da bi se izračunao strukturni odziv (deformacija i naprezanja) za elemente koji sudjeluju u uzdužnoj i poprečnoj čvrstoći trupa kao i za određivanje dimenzija nepropusnih pregrada. Pomoću analize tri skladišta moguće je provjeriti globalni odziv konstrukcije, korištenjem metode konačnih elemenata (MKE), zajedno s lokalnim ponašanjem primanih strukturnih elemenata. Model obuhvaća tri skladišta od kojih je relevantno za rezultate srednje skladište dok ostala dva služe kako bismo pomaknuli rubne uvjete dalje od promatrane konstrukcije. Nerijetko se modelira i model  $\frac{1}{2} + 1 + \frac{1}{2}$  u kojem se slučaju dobije manji model što može olakšati rukovanje, [11] [12].

Slika 4-1 daje na uvid opći plan broda i prikazuje položaj skladišta koja su modelirana u okviru ovoga rada.



**Slika 4-1 Prikaz općeg plana broda s istaknutim dijelom koji je uključen u analizu tri skladišta.**

**Dijagram 4-1** Dijagram toka za analizu 3 skladišta prema DNV-u. Crvenom bojom je označeno provedeno u ovom radu [13]



## 5 STRUKTURNI MODEL

### 5.1 Korišteni računalni programi

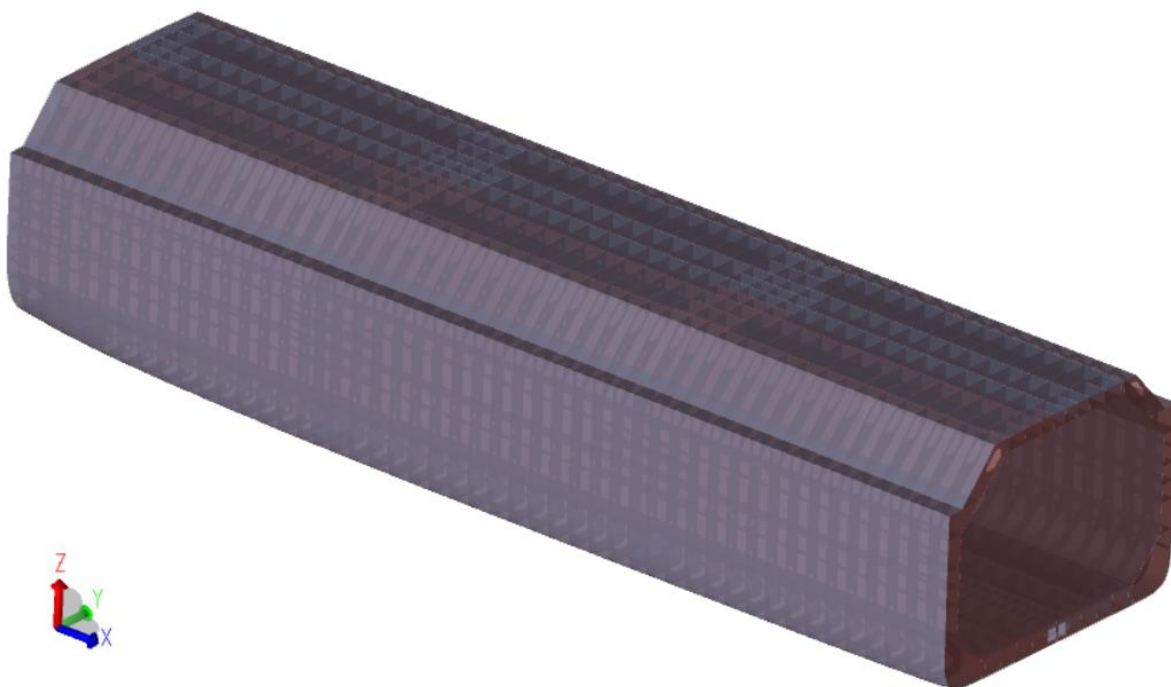
Zbog čestih unapređenja softvera u Tablica 5-1 navedene su verzije koje su korištene u ovom radu. Za modeliranje je korišten *GeniE*, dok je *Sestra* služila kao rješavač a za pregled rezultata i analiziranje je korišten *Xtract*.

**Tablica 5-1 Softveri i pripadajuće verzije**

Softver	Verzija
GeniE	8.5-04
Sestra	10.3.1
Xtract	6.0-02

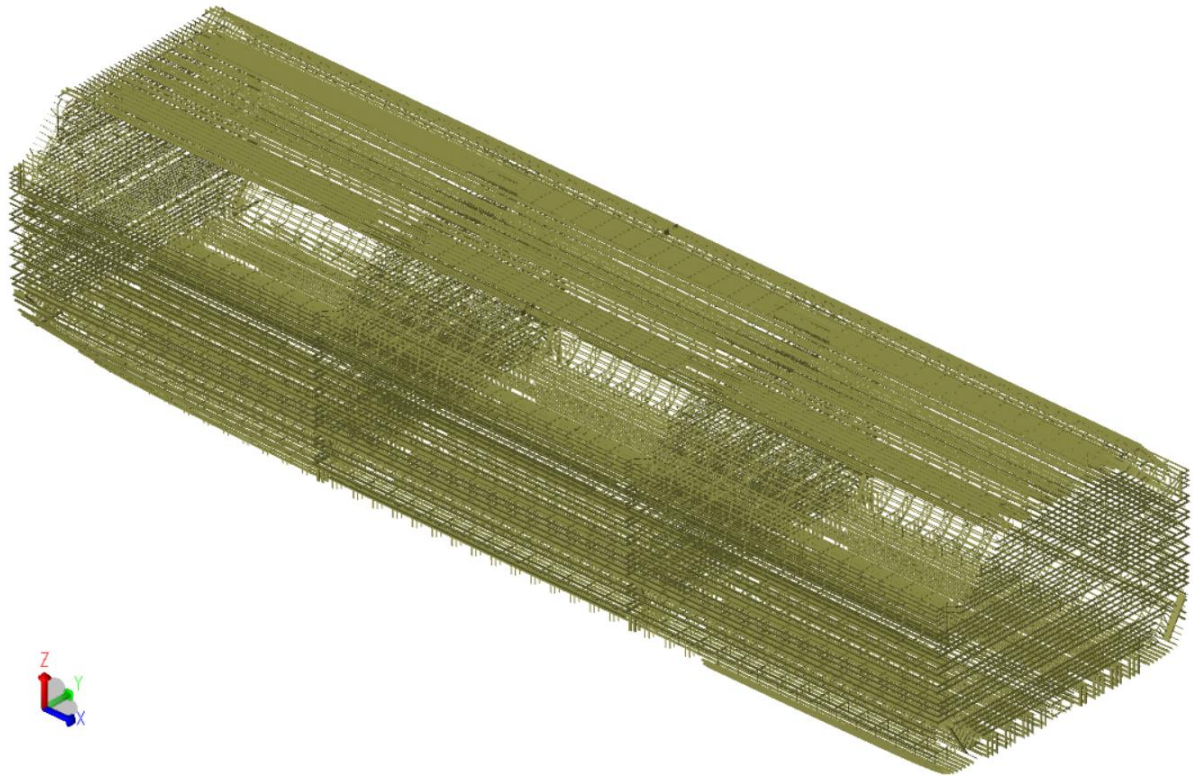
### 5.2 Model

Za potrebe analize tri skladišta izrađen je strukturni model u programskom paketu SESAM u programsku alatu GeniE. Model je izrađen na temelju dostupnih nacрта, a na Slika 5-1 možemo vidjeti geometriju limova, dok Slika 5-2 prikazuje raspored okrepa konstrukcije. Slika 5-3 prikazuje poprečnu geometrija broda i može se uočiti da je ona identična geometriji prikazanoj na Slika 2-4.

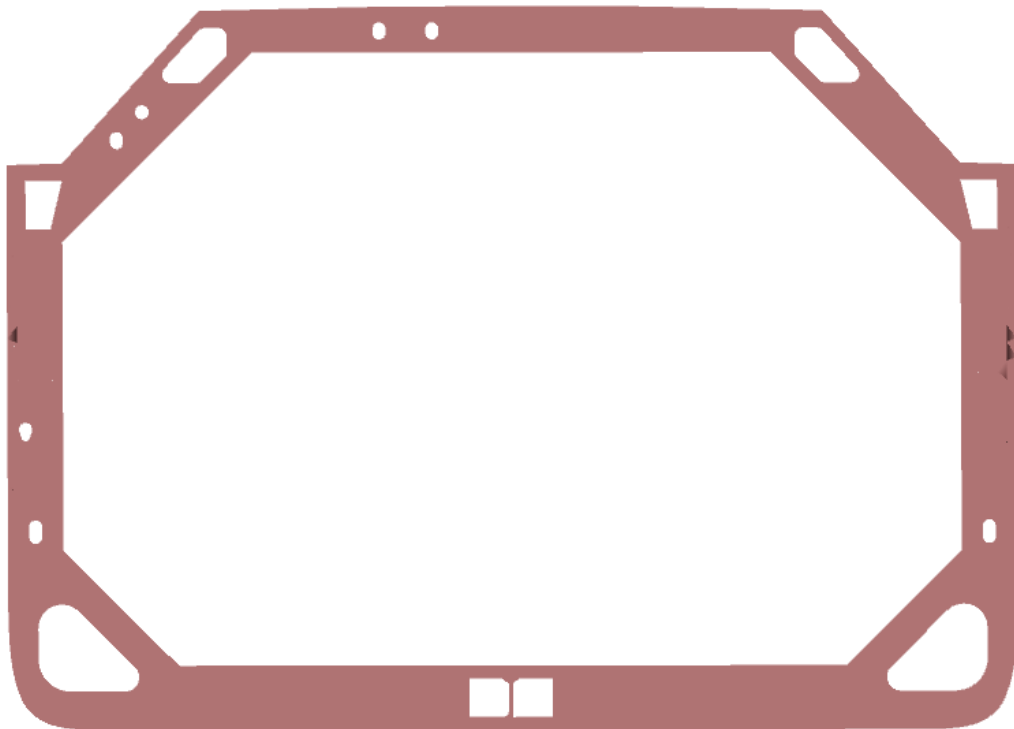


**Slika 5-1 Geometrija limova modela**





**Slika 5-2** Poprečne i uzdužne ukrepe modela



**Slika 5-3** Tipično glavno rebro modela

## 5.3 Dimenzije

### 5.3.1 Duljina tanka

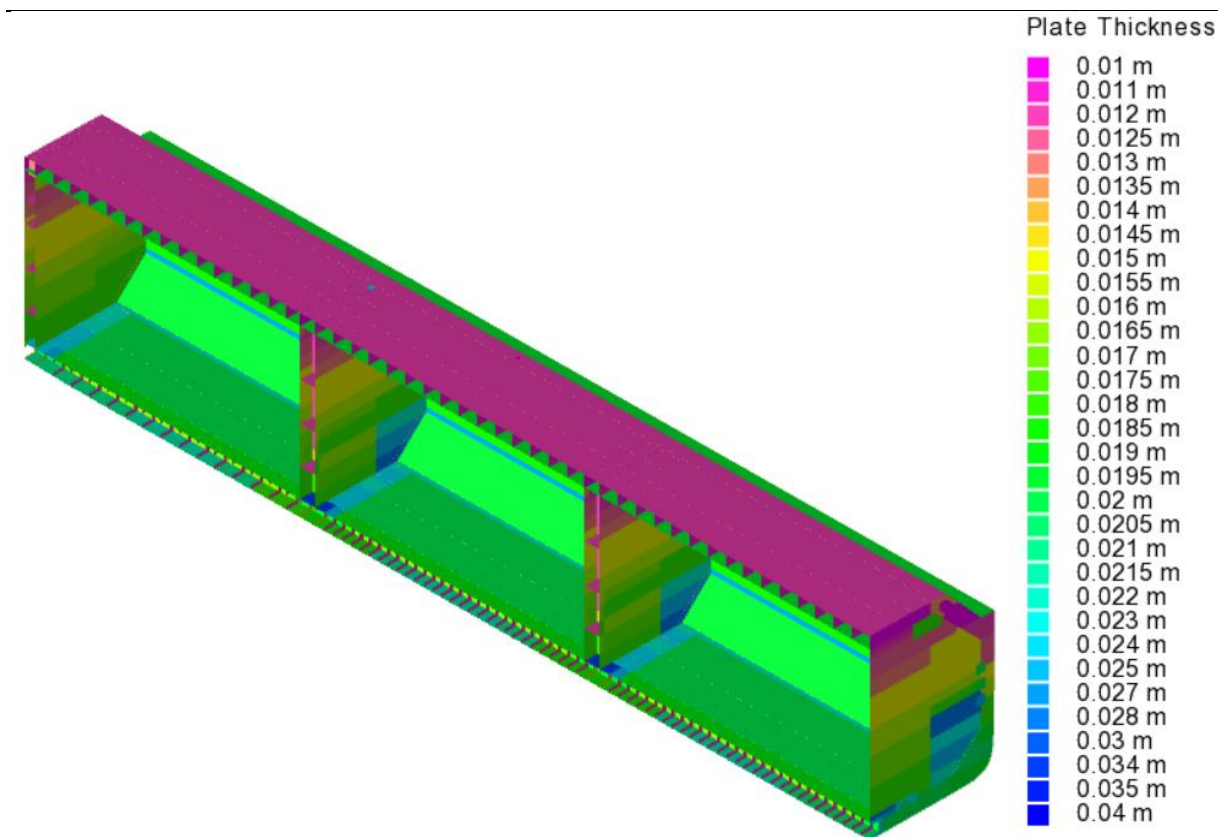
U Tablica 5-2 prikazana je duljina tanka zajedno sa lokacijama na kojima se nalaze poprečne pregrade koje odjeljuju teretni prostor srednjeg tanka od ostalih. Zajedno s tim dimenzijama u tablici se nalazi još i odnos  $x/L$  iz kojeg se može vidjeti da je prethodno navedeni tank na sredini broda.

**Tablica 5-2 Duljina tanka 3 zajedno sa lokacijama poprečnih pregrada**

Tank 3	Rebro broj	Lokacija - x [m]	$x/L$
Vodonepropusna pregrada ( <i>aft</i> )	87	108.23	0.38
Koferdam pregrada ( <i>aft</i> )	88	111.035	0.39
Vodonepropusna pregrada ( <i>fwd</i> )	103	161.435	0.57
Koferdam pregrada ( <i>fwd</i> )	104	164.24	0.58
Duljina tanka	56.01 m		

### 5.3.2 Debljine limova

Na sljedećim fotografijama prikazane su ukupne debljine limova sa korozijskim dodatkom. Na Slika 5-4 vidljive su debljine unutar tanka, debljine na poprečnim pregradama i debljine na palubi.. Detaljniji prikaz debljina dan je u prilogu B.



Slika 5-4 Debljine oploćenja na modelu u ravnini  $y=0$  u metrima

### 5.3.3 Materijal limova i profila

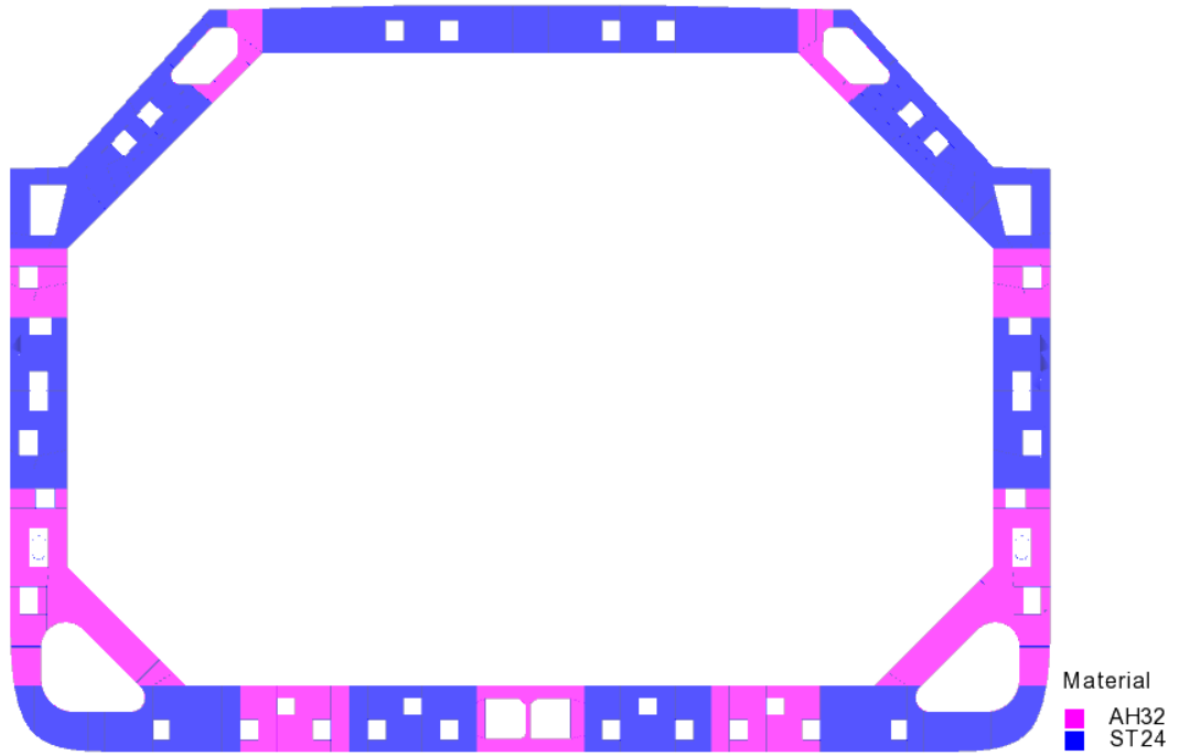
Svojstva materijala od kojih je izrađen model dani su u Tablica 5-3 uz napomenu da su svi materijali izotropni tj. imaju ista svojstva u svim smjerovima.

Tablica 5-3 Svojstva materijala korištenih za izradu modela

Materijali	Granica razvlačenja [MPa]	Modul elastičnosti [MPa]	Poissonov koeficijent	Gustoća $\text{kg/m}^3$
ST24	235	210 000	0.3	7850
AH32	315	210 000	0.3	7850

Slika 5-5 pokazuje raspored materijala po karakterističnom poprečnom presjeku na kojem su vidljiva područja na kojima je korišten čelik s višom i ona na kojima je čelik s nižom granicom razvlačenja.

.4



Slika 5-5 Raspored različitih materijala po poprečnom presjeku rebra

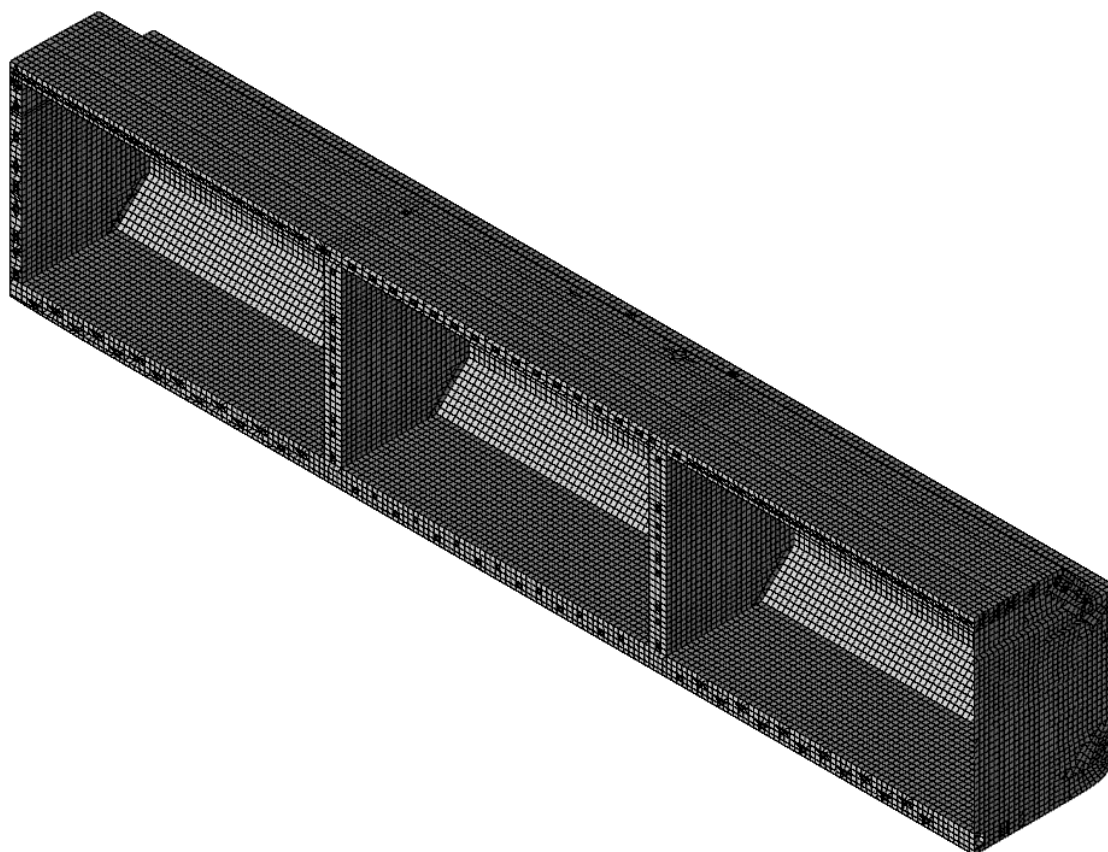
## 5.4 Mreža konačnih elemenata

### 5.4.1 Veličina mreže

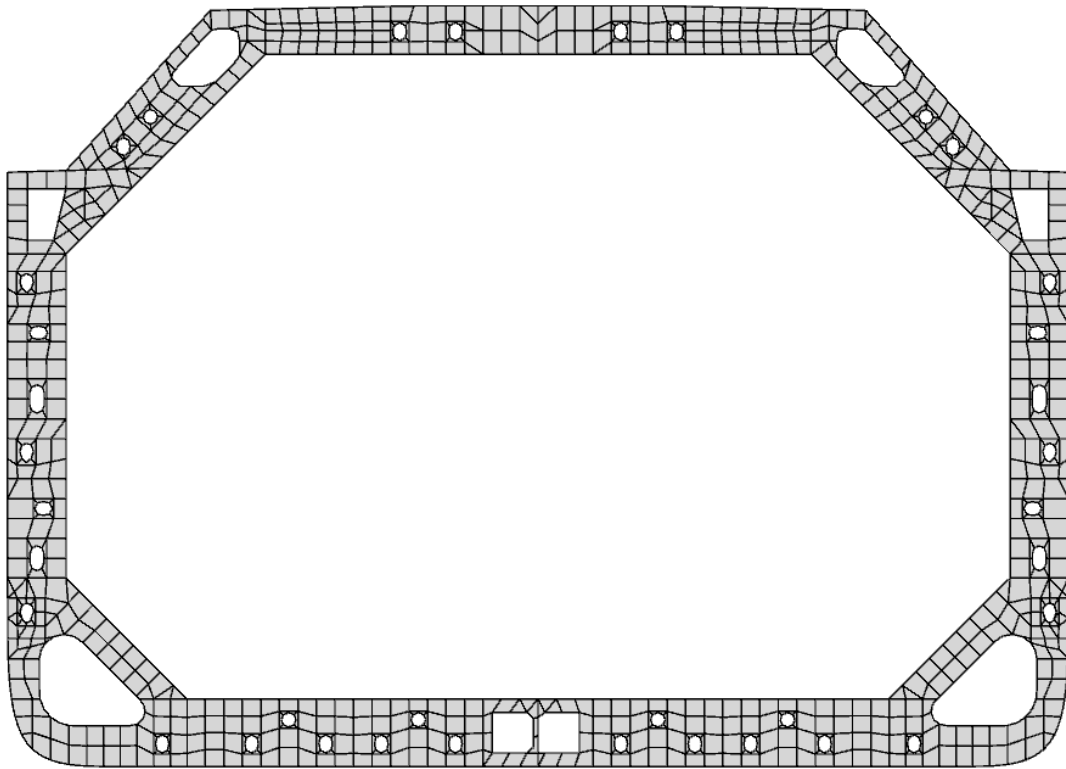
Za mrežu konačnih elemenata definirana je veličina mreže je od 800 mm x 800 mm s tim da GeniE ima mogućnost da poveća ili smanji konačni element da bi se stvorili pravilni konačni elementi na zahtijevanoj geometriji. Korišteni su *second order elements* odnosno elementi drugog reda gdje se konačni elementi sastoje od osam čvorova. Mreža konačnih elemenata izrađena je u skladu s [14].

### 5.4.2 Mreža modela

Na Slika 5-6 prikazana je mreža konačnih elemenata polovinskog modela dok Slika 5-7 prikazuje mrežu konačnih elemenata tipičnog rebra. Model se sastoji od 276619 elemenata.



**Slika 5-6 Polovinski prikaz mreže konačnih elemenata modela**



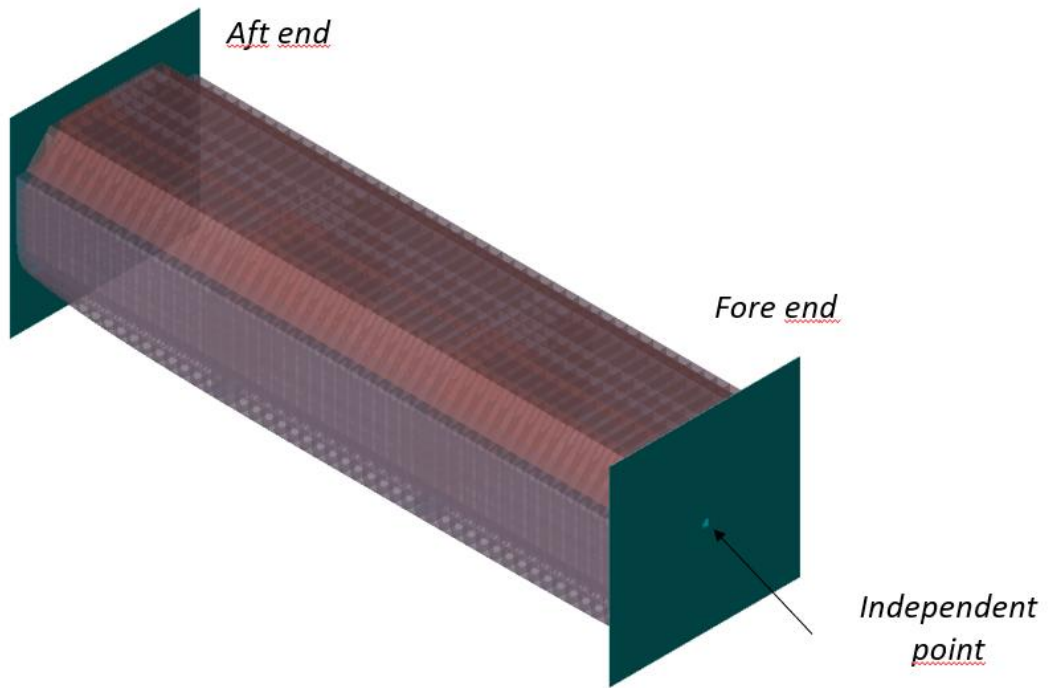
**Slika 5-7 Mreža konačnih elemenata na tipičnom rebru promatranog modela**

## 5.5 Rubni uvjeti

Rubni uvjeti su stavljeni na početak i na kraj modela da bi se spriječio pomak konstrukcije, a ograničenje translacija i rotacija u pojedinim osima su umetnute prema [14]. Rubni uvjeti koji se primjenjuju na model ne smiju negativno djelovati na konstrukciju unoseći dodatna naprezanja. U rubni uvjet stavljeni su svi čvorovi na poprečnom presjeku na kraju i na početku modela, a njih prikazuje Slika 5-8. Rubne uvjete koji su postavljeni u rubove modela zorno prikazuje i Tablica 5-4. [15]

**Tablica 5-4 Prikaz rubnih uvjeta koji su postavljeni u rubove modela [15]**

Location	Translation			Rotation		
	$\delta_x$	$\delta_y$	$\delta_z$	$\theta_x$	$\theta_y$	$\theta_z$
	Aft end					
Independent point	-	Fix	Fix	-	-	-
Cross section	-	Rigid link	Rigid link	Rigid link	-	-
	Fore end					
Independent point	-	Fix	Fix	Fix	-	-
Intersection of centerline and inner bottom	Fix	-	-	-	-	-
Cross section	-	Rigid link	Rigid link	Rigid link	-	-



**Slika 5-8 Prikaz rubnih uvjeta na modelu**



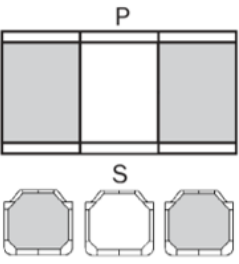
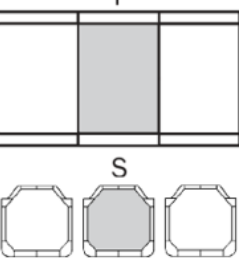
## 5.6 Opterećenja

Opterećenja s kojima je potrebno opteretiti model proizlaze iz [16] za pojedino stanje krcanja koje je definirano u [13] i [9]. U ovom slučaju u obzir su uzeta samo vertikalna opterećenja i momenti oko osi y (prema globalnom koordinatnom sustavu prikazanom na slikama modela).

Tablica 5-5 prikazuje kombinacije opterećenja s kojima je potrebno opteretiti model za provjeru statičkog stanja odnosno kada se brod nalazi na mirnoj vodi bez utjecaja dinamičkih komponenata bilo valnih bilo od utjecaja vjetra.

Što se tiče dinamičkih kombinacija opterećenja, ona u ovom radu nisu uzeta u obzir budući da je njihova implementacija složena i sam proces bi uzeo puno više vremena.

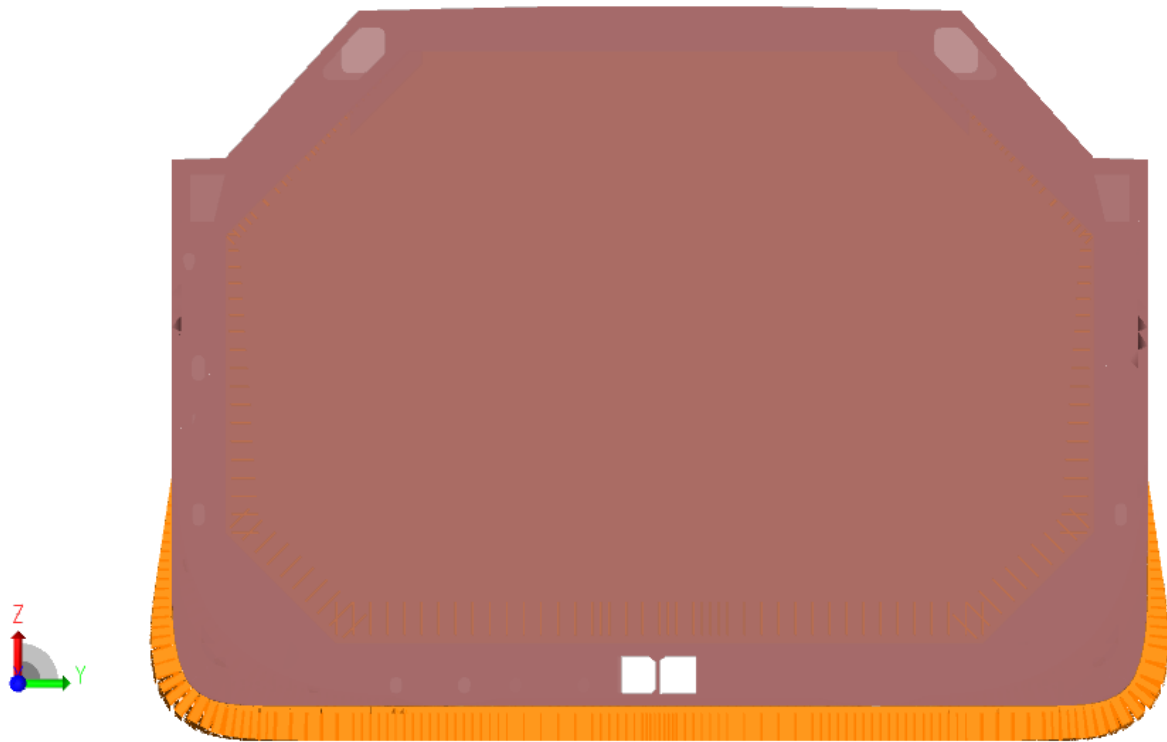
**Tablica 5-5 Statičke kombinacije opterećenja [13]**

No.	Loading pattern Aft Mid Fore	Draught	% of perm. SWBM	% of perm. SWSF	Dynamic load case
L4		$T_{sc}^{1)}$	100% (hog.)	100% Max SFLC <sup>6)</sup>	N/A
				100% Max SFLC <sup>7)</sup>	N/A
L3		$T_A^{2)}$	100% (sag.)	100% Max SFLC <sup>6)</sup>	N/A
				100% Max SFLC <sup>7)</sup>	N/A

### 5.6.1 Tlakovi

#### 5.6.1.1 Vanjski tlakovi

Model je opterećen statičkim tlakom prema [16] a aplikacija tlaka prikazana je na Slika 5-9 gdje se vidi poprečni presjek modela na srednjem tanku i smjer djelovanja tlaka je izvana prema konstrukciji.

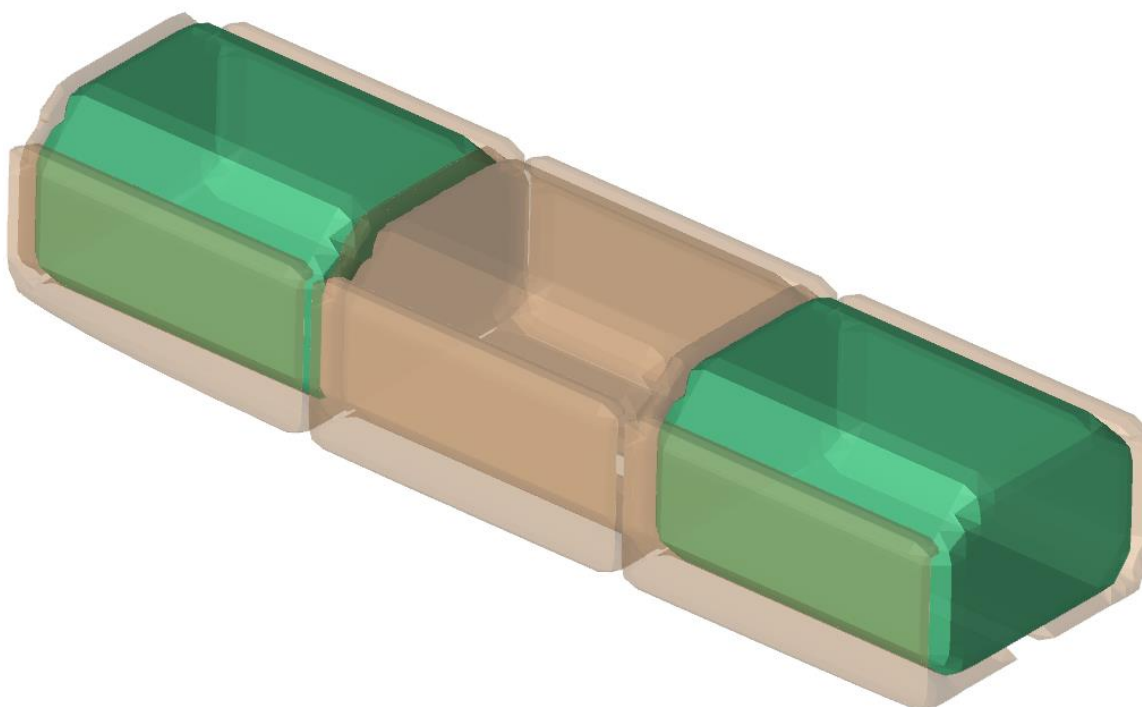


**Slika 5-9 Statički tlak na vanjskoj oplati**

### 5.6.1.2 Unutarnji tlak

#### 5.6.1.2.1 Teretni prostor

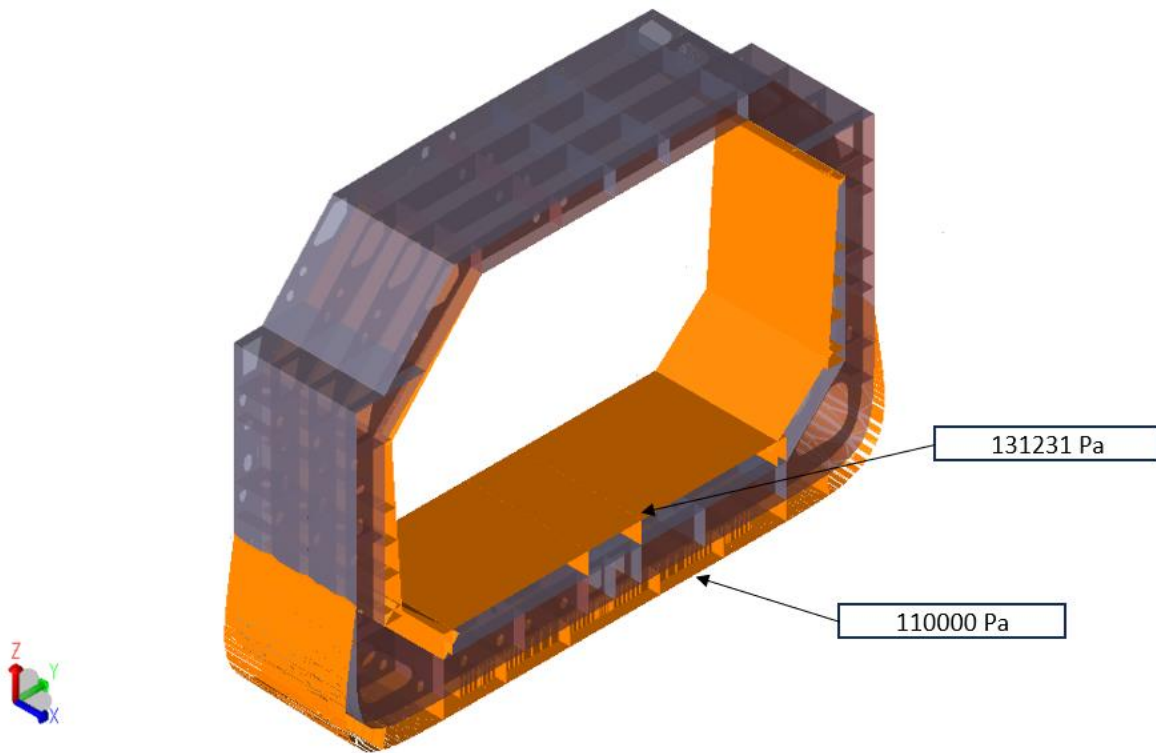
Korištenjem opcije *Compartment*, GeniE automatski prepoznaje zatvorene prostore i kreira skladišne prostore odnosno odjeljke. Slika 5-10 prikazuje skladišne prostore koja služe za ukrcaj tereta i šest balansnih tankova u koje se može krcati balast. Gustoća nakrcanog tereta određena je iz knjige trima i stabiliteta (*Loading manual*) i iznosi  $470 \text{ kg/m}^3$ . Slikom je prikazano zadano stanje krcanja L4 u kojem je središnji tank prazan dok su prednji i stražnji tank nakrcani teretom.



**Slika 5-10 Prikaz skladišnih prostora s nakrcana dva skladišta**

#### 5.6.1.2.2 Tlakovi u teretnom prostoru

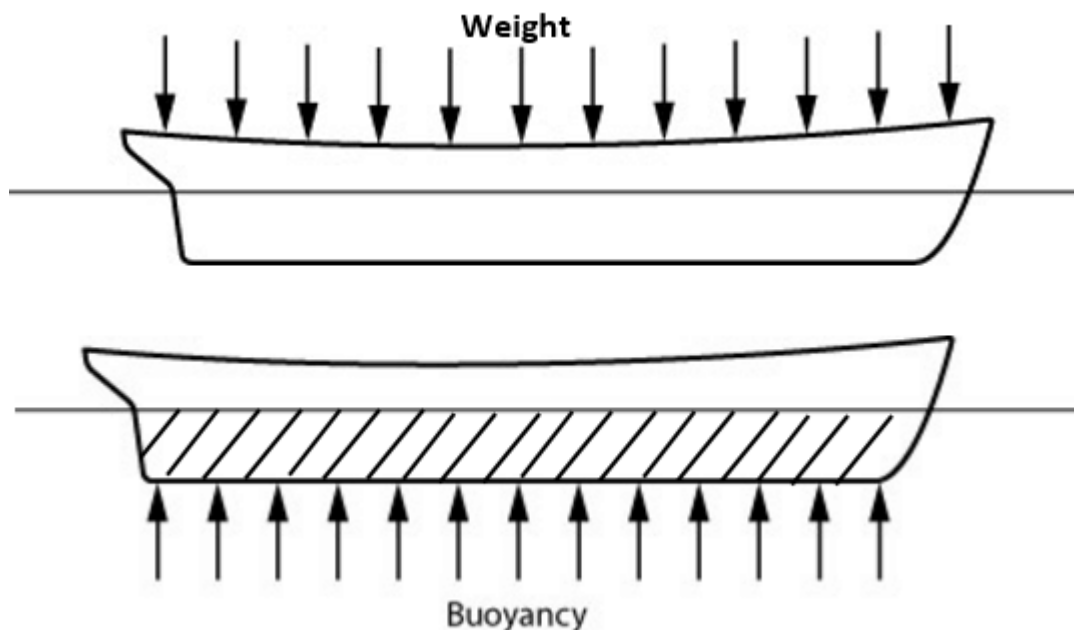
Zbog zadanog stanja krcanja, u teretnim se prostorima pod djelovanjem tereta koji se prevozi i akceleracija koje se narinute pojavljuju unutarnji tlakovi. Prikaz tlaka koji se pojavljuje u skladištu nakon krcanja tereta može se vidjeti na Slika 5-11 na kojoj je također vidljiv i vanjski tlak na oplatu broda.



**Slika 5-11 Isječak konstrukcije iz skladišta broj dva.**

## 5.7 Balansiranje modela i postizanje ciljanih vrijednosti globalnih komponenti opterećenja

Smična sila koja se javlja jest razlika sile uzgona koja djeluje na uronjeni dio modela (koja je u ovom slučaju skoro pa jednolika po presjeku budući da je forma promatranog modela uniformna) i težine zbog rasporeda masa. Na Slika 5-12 može se vidjeti smjer djelovanja sile tereta i sile uzgona.



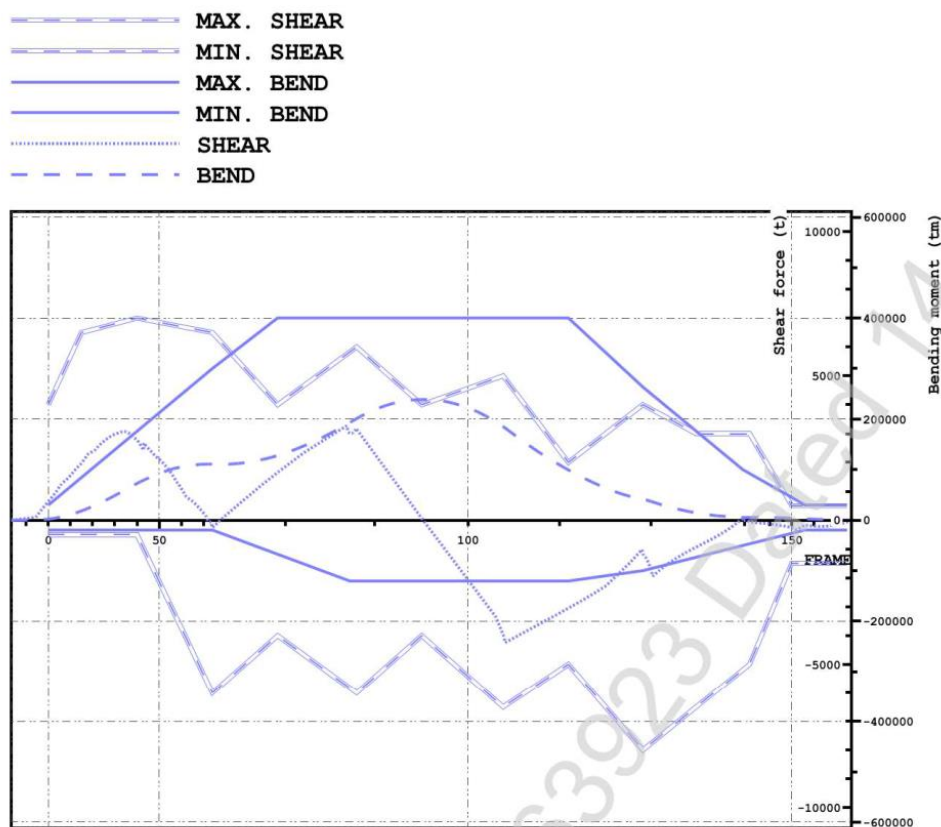
**Slika 5-12** Pojednostavljeni prikaz sila koji inicijalno djeluju na brodsku konstrukciju

Slika 5-13 pokazuje moguće defleksiju koja se može pojaviti na nekoj brodskoj konstrukciji a uzrokovana je raspodjelom masa. Gornja slika prikazuje nastanak manjka uzgona u srednjem dijelu broda (što bi bilo ekvivalentno punjenu srednjih tankova dok su ostali prazni) dok donja slika prikazuje suprotni slučaj odnosno kada se u srednjem dijelu broda javlja višak uzgona.

Budući da se u ovom radu razmatra samo dio brodske konstrukcije a ne cijeli brod potrebno je modificirati sile i momente u rubovima modela odnosno balansirati model kako bi se postigli ekvivalentne vrijednosti. Balansiranje modela i postizanje kritičnih vrijednosti napravljeno je prema [16]. Slika 5-14 prikazuje željeni raspored smičnih sila i momenata savijanja. Potrebno je zadovoljiti vrijednost kritične smične sile na pozicijama vodonepropusnih pregrada dok je najveću vrijednost moment bilo potrebno postići bilo gdje na području srednjeg skladišta.



Slika 5-13 Prikaz smjera djelovanja rezultante smične sile zbog raspodjele masa po brodu [17]



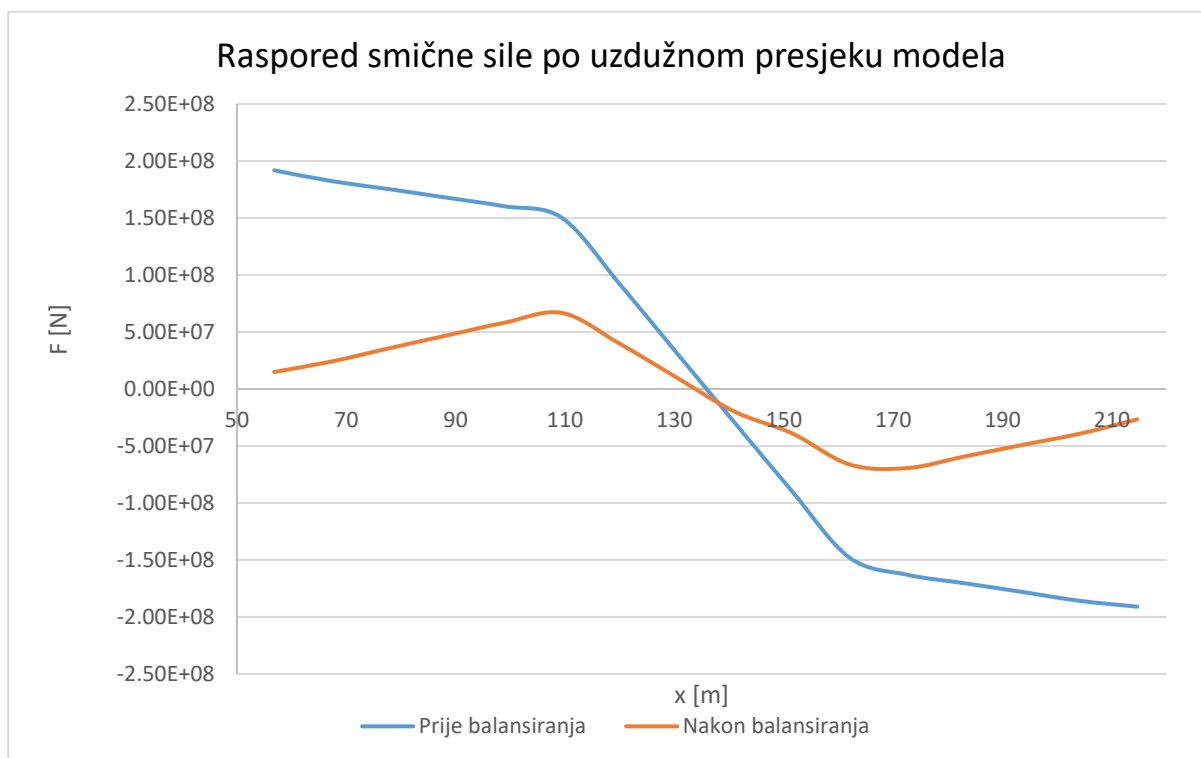
Slika

Slika 5-14 Graf rasporeda smičnih sila i momenata savijanja krcanja sa praznim skladištem u sredini [18]

### 5.7.1 Kritična globalna smična sila

Prvo se modificira smična globalna sila budući da dodavanjem dodanih sila po poprečnom presjeku utječemo na globalni moment savijanja stoga će se moment modificirati u drugome koraku.

Dijagram 5-1 prikazuje smičnu silu u trenutku kada su na model narinuta sva opterećenja propisana u pravilima ([16]), a prije nego što je model podvrgnut balansiranju(plava krivulja). Balansirani model prikazan je narančastom linijom nakon što su na njega umetnute dodatne sile da kao što je to propisano u [14]. Horizontalna os prikazuje duljinu modela u metrima dok je na vertikalnoj osi označena vrijednost smične sile na određenom presjeku.



**Dijagram 5-1 Raspored smične sile po uzdužnom presjeku broda prije i nakon balansiranja modela**

#### 5.7.1.1 Postupak balansiranja smičnih sila

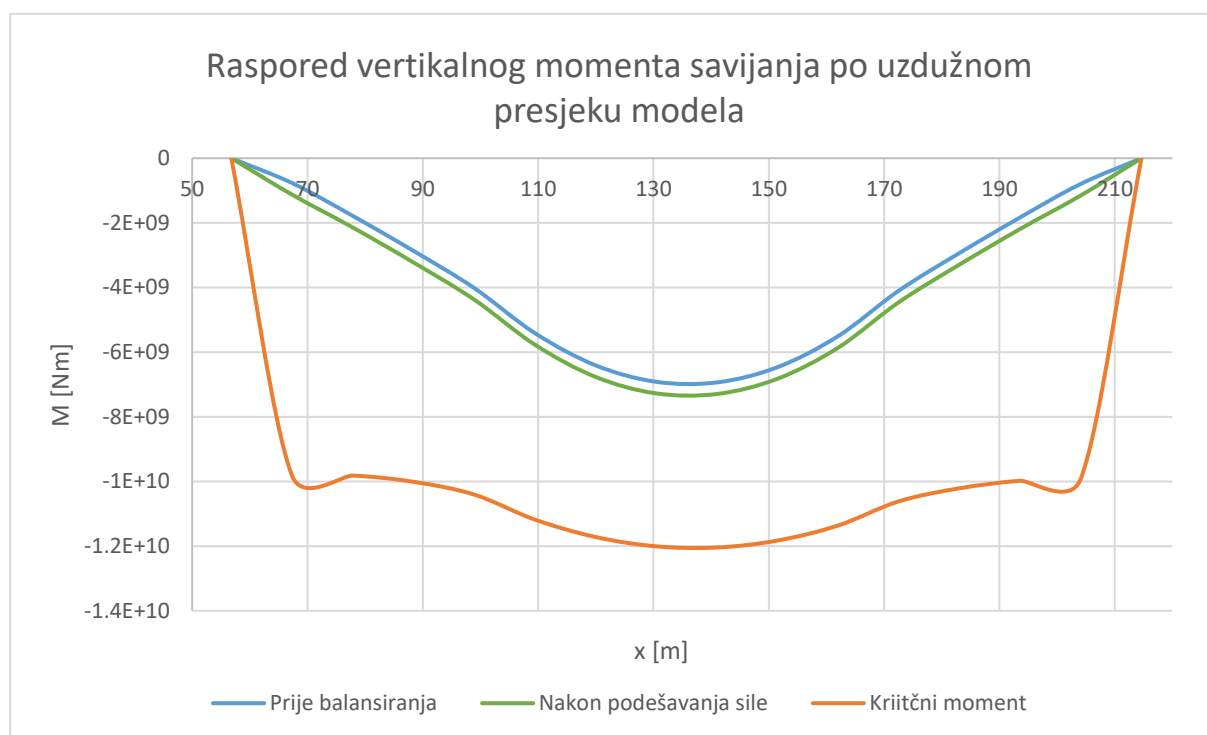
Postupak balansiranja proveden je prema, a ovdje su ukratko navedeni koraci provedeni u metodi

- Postavljanje zadanih opterećenja na model
- Očitavanje vrijednosti smične sile na nepropusnoj pregradi na početku i kraju srednjeg skladišta

- Umetanje dodatnog momenta na rubove konstrukcije zbog modificiranja smične sile
- Očitavanje vrijednosti smične sile na istim detaljima
- Modificiranje sila na tankovima da bi se smanjio iznos smične sile na poprečnim pregradama

### 5.7.2 Kritični globalni vertikalni moment savijanja

Nakon što su postignute željene vrijednosti smične sile na vodonepropusnim pregradama, sada se umetanjem dodatnog momenta na rubove modela postiže i željeni vertikalni moment savijanja. Dijagram 5-2 prikazuje promjenu momente uslijed dodavanja sila za postizanje željene smične sile u odnosu na inicijalni moment i konačni moment (žuta linija) koji je postignut nakon procesa balansiranja modela u kojem su se na rubove modela umetnuli momenti savijanja oko osi y tj. poprečne osi. Kao što možemo zaključiti najveći moment je postignut na onom mjestu na kojem je vrijednost smične sile jednaka nuli.



**Dijagram 5-2 Vertikalni momenti savijanja tijekom procesa balansiranja modela**



---

## 6 Strukturna analiza konstrukcije

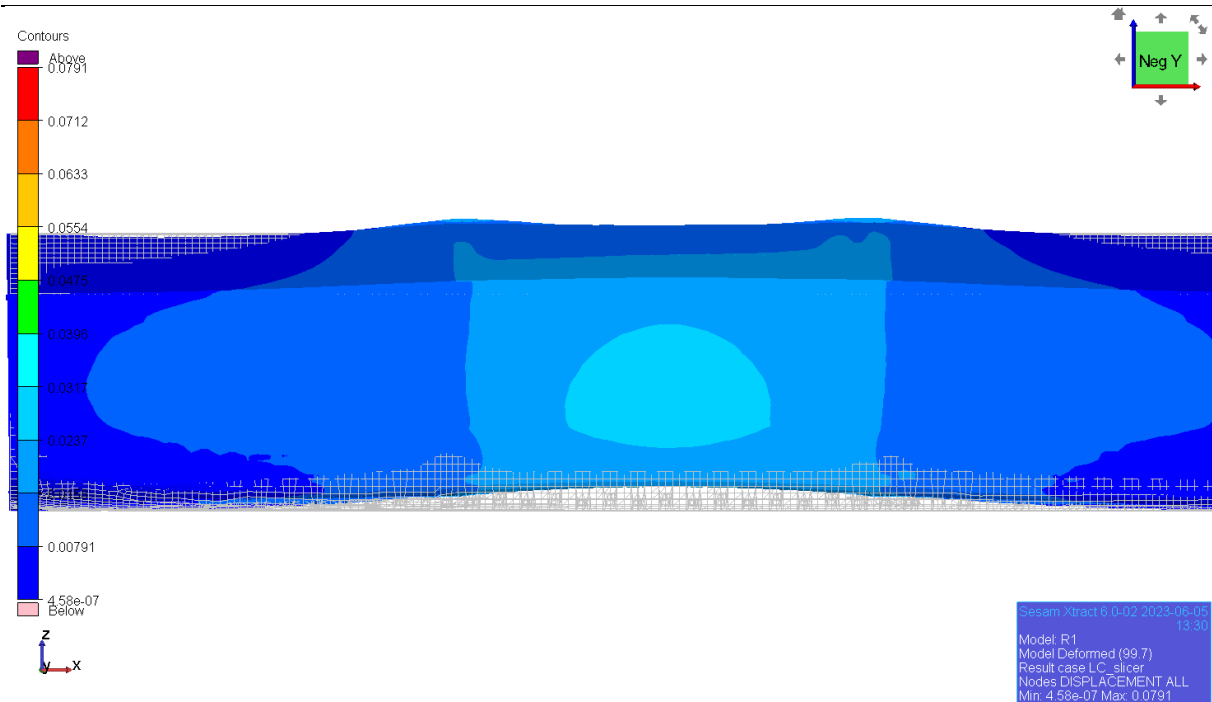
Projektiranje brodova u zadnjim je desetljećima u kontinuiranom unapređenju zbog trenutnih zahtjeva tržišta za povećanjem kapaciteta za prijevoz tereta kao i zbog potrebe brodova za izvođenjem različitih specijalnih pomorskih operacija. Fokus je uvijek na optimiziranje mase konstrukcije da bi se uštedilo na čeliku i da bi plovilo bilo ekološki prihvatljivija. Konstrukcija mora biti projektirana na taj način da se može odupirati najvećem pretpostavljenom opterećenju koje se može pojaviti u životnom ciklusu broda. Ako dođe do oštećenja konstrukcije to znači da je opterećenje koje djeluje na konstrukciju premašilo kritičnu vrijednost ili da je došlo do nepredviđenog opterećenja koje nije prethodno ispitano. Konstrukcija trupa broda će u netaknutom stanju pretrpjeti narinuta globalna opterećenja na trup koja se odnose na globalnu čvrstoću broda, a koja su manja od projektnih opterećenja konstrukcije. Kako se globalna opterećenja povećavaju iznad vrijednosti projektnih opterećenja pojavljuje se mogućnost da se neki dijelovi konstrukcije izviju uslijed tlačnih naprezanja odnosno mogućnost popuštanja nekih elemenata uslijed vlačnog naprezanja. To može biti posljedica starenja konstrukcije gdje se debljina limova postupno smanjuje djelovanjem korozije. [19] [20] [21]

### 6.1 Prikaz pomaka

Na sljedeći, slikama prikazani su pomaci modela u čvorovima nakon statičke analize zajedno sa konturom nedeformiranog oblika modela za slučaj opterećenja L4 dok su rezultati za slučaj opterećenja L3 prikazani u prilogu. Slika 6-1 prikazuje deformaciju cijelog modela nakon analize dok je na Slika 6-2 prikazan skladišni prostor broj 3 sa pripadajućim odzivima.

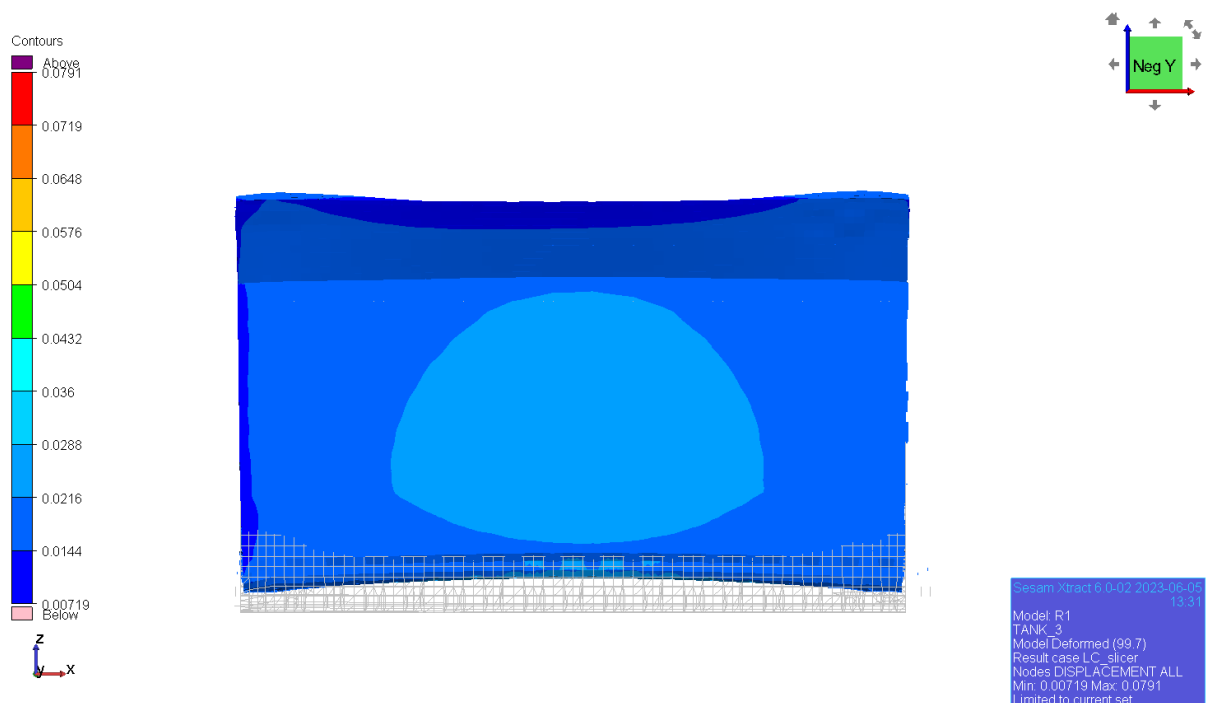
Po odzivu konstrukcije jasno se može i vizualno uočiti da je konstrukcija u progibu, a takav odziv konstrukcije je bio i očekivan s obzirom na zadano opterećenje.

Maksimalni progib koji se pojavljuje na konstrukciji iznosi 79,1 mm a njegova lokacija je na dvodnu srednjeg skladišta.

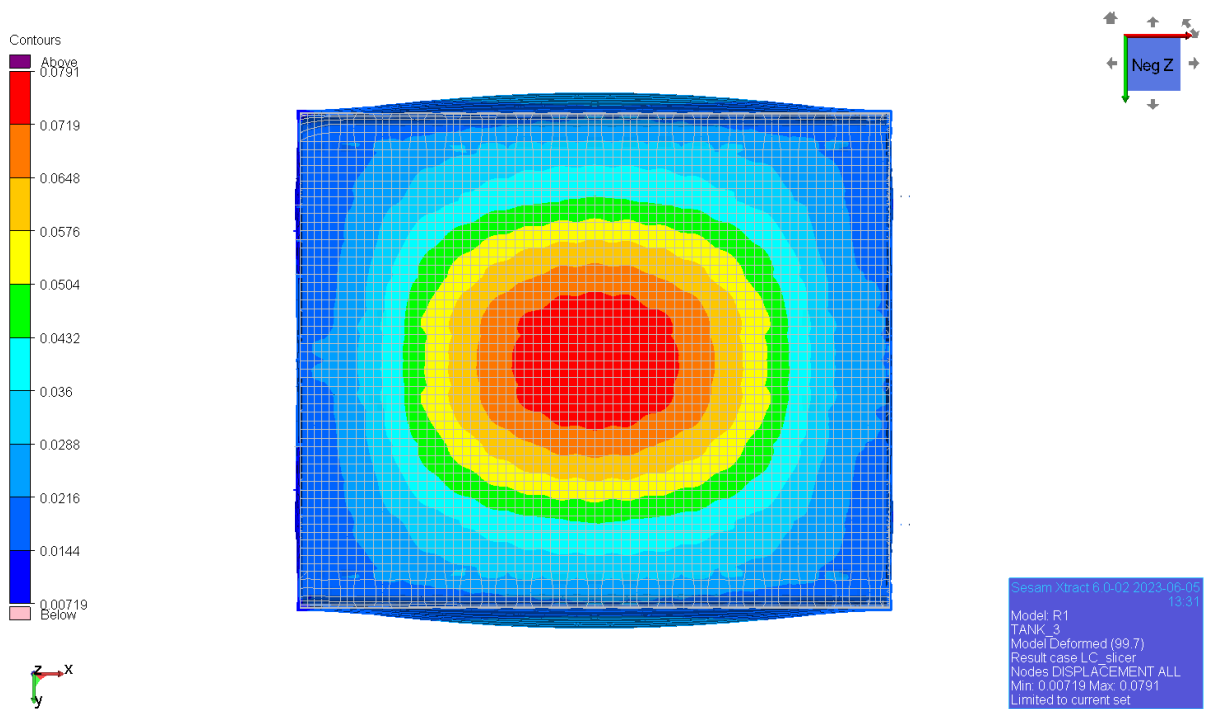


**Slika 6-1 Prikaz pomaka cijelog modela zajedno sa konturama nedeformiranog modela u metrima**

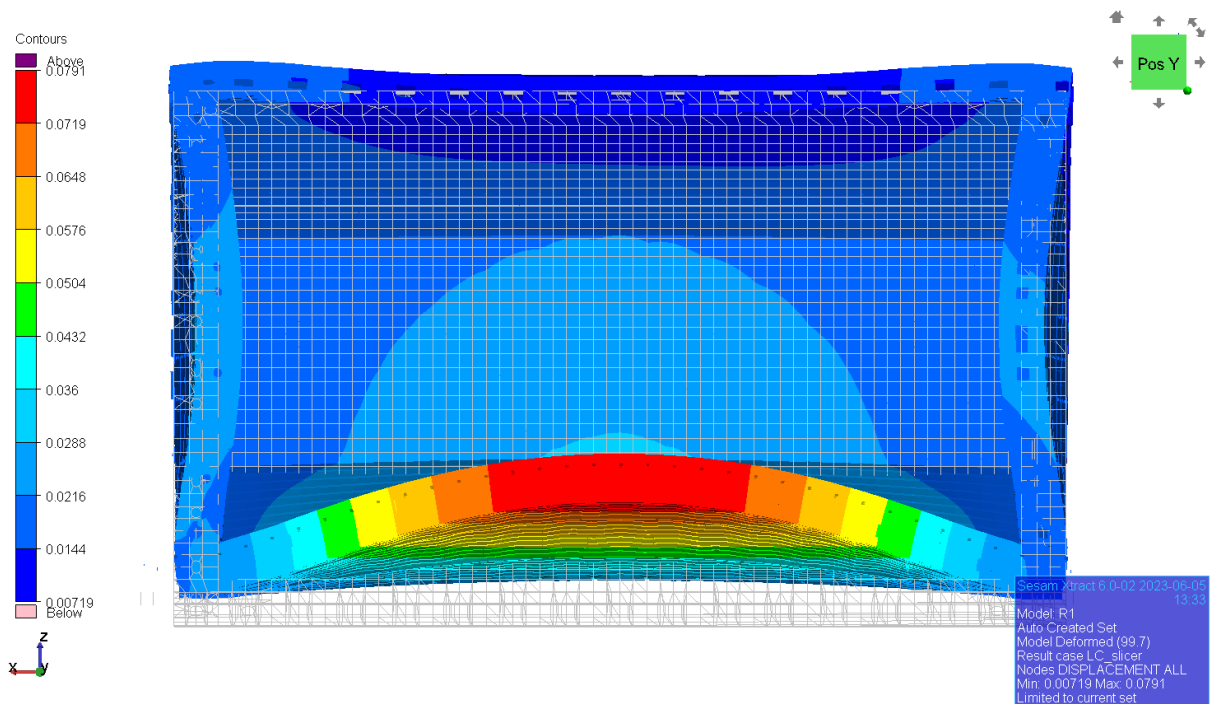
Deformaciju modela koju je uzrokovala sila od hidrostatskog i hidrodinamičkog tlaka poblizje prikazuje Slika 6-2 na kojoj se vidi također i mjesto maksimalne vrijednosti progiba.



**Slika 6-2 Prikaz pomaka srednjeg skladišta zajedno sa konturama nedeformiranog modela u metrima**



Slika 6-3 Prikaz pomaka srednjeg skladišta u metrima



Slika 6-4 Prikaz pomaka srednjeg skladišta na poprečnom presjeku  $y=0$  u metrima

## 6.2 Analiza popuštanja

Kada se konstrukcija postupno opterećuje vlačnim opterećenjem dolazi do postupnog istežanja odnosno produljenja konstrukcije do trenutka kada opterećenje ne premaši kritičnu vrijednost, tada se istežanje konstrukcije značajno povećava. Takav način istežanja konstrukcije naziva se popuštanje (eng. *Yield*) [19].

### 6.2.1 Kriteriji prihvatljivosti za popuštanje

Za slučaj statičkog opterećenja, kriterij za popuštanje konstrukcije dan je u [14] a tablično je prikazan u Tablica 6-1

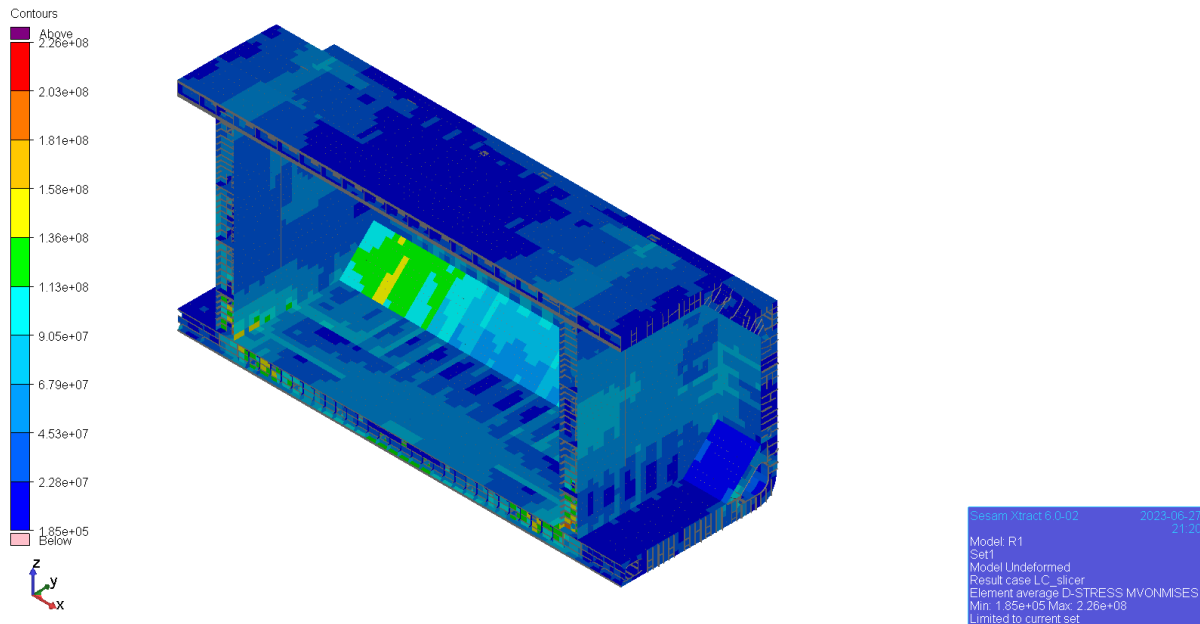
**Tablica 6-1 Tablica dopuštenih naprezanja**

Materijal		VonMises membranska naprezanja	Aksijalna gredna naprezanja
Oznaka	Granica razvlačenja	faktor iskoristivosti	Gruba mreža
	[MPa]		
ST24	235	0.8	188
AH32	315	0.8	252

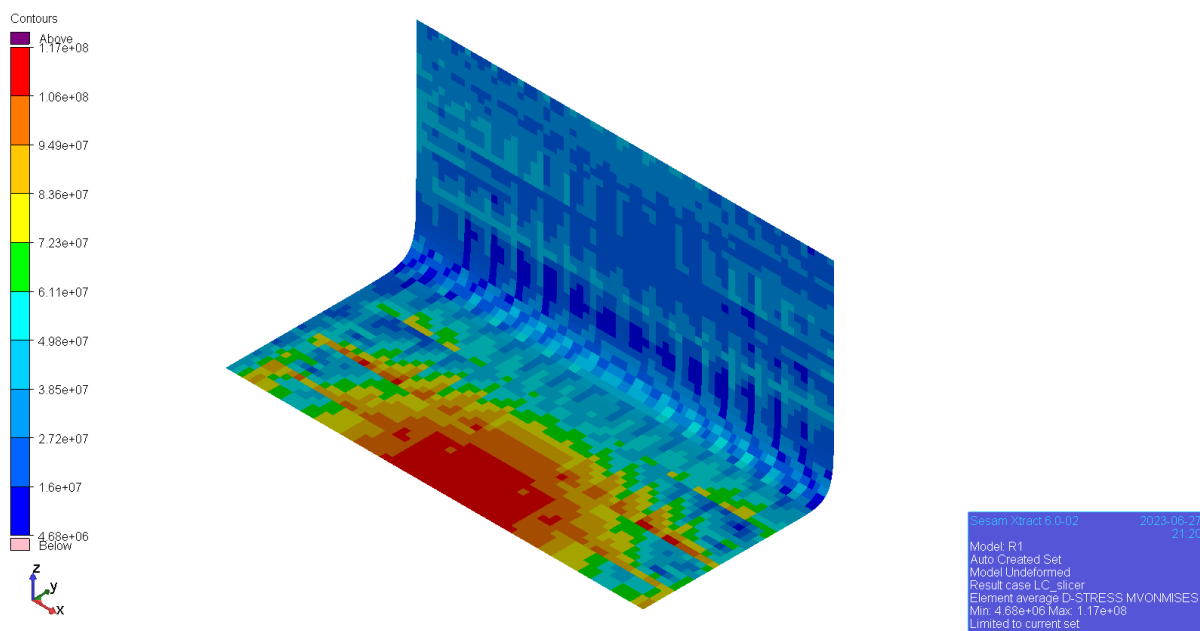
### 6.2.2 VonMises naprezanja

Slika 6-5 do Slika 6-11 prikazuje srednja ekvivalentna VonMises naprezanja za slučaj opterećenja L4 i za svaki element i moguće je uočiti da svi elementi zadovoljavaju provjeru na popuštanje i naprezanja koja se pojavljuju na elementima ne prelaze razinu dozvoljenih naprezanja.

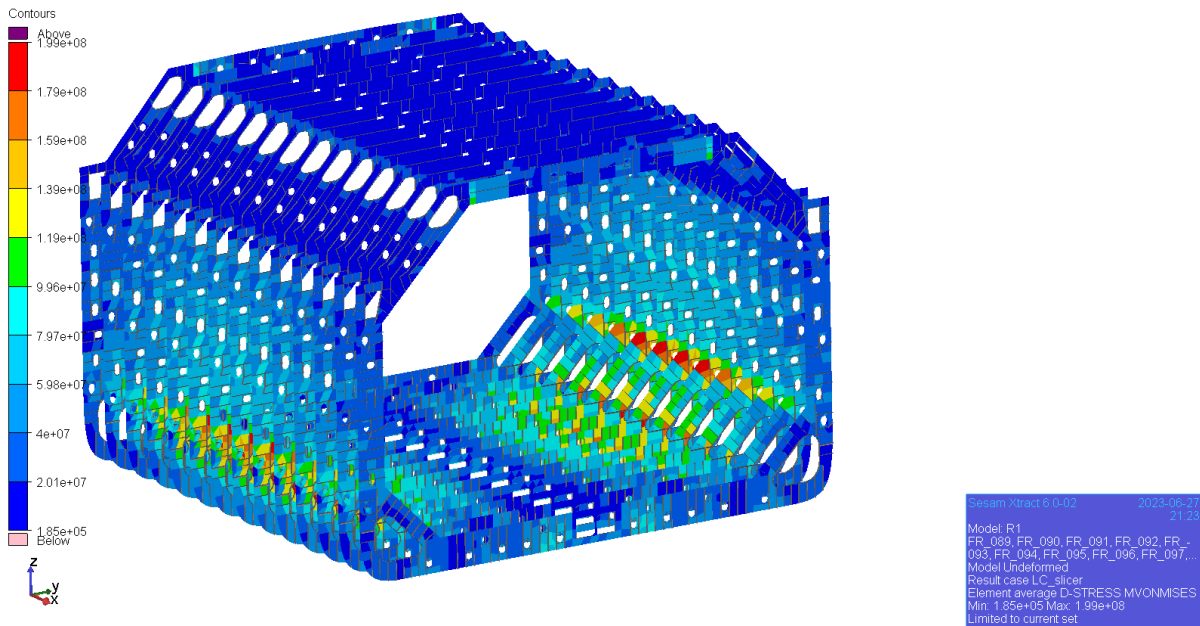
VonMises naprezanja za slučaj opterećenja L3 dan je u prilogu.



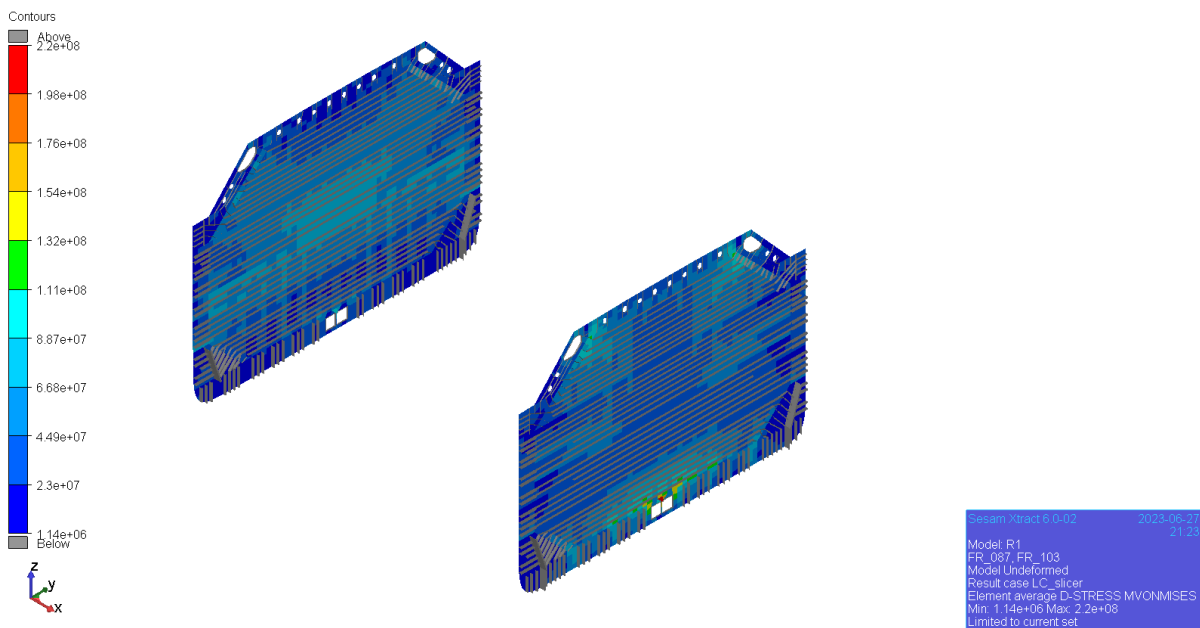
Slika 6-5 VonMises naprezanja na presjeku  $y = 0$  (centerline) [Pa]



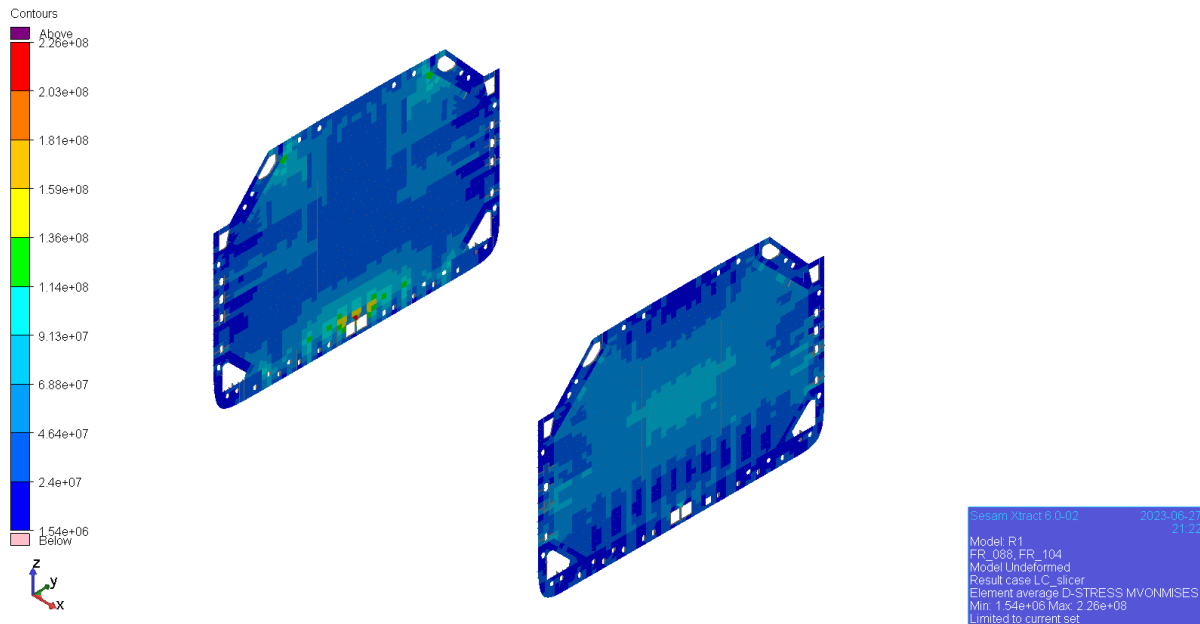
Slika 6-6 VonMises naprezanja na oplati modela na presjeku  $y = 0$ . [Pa]



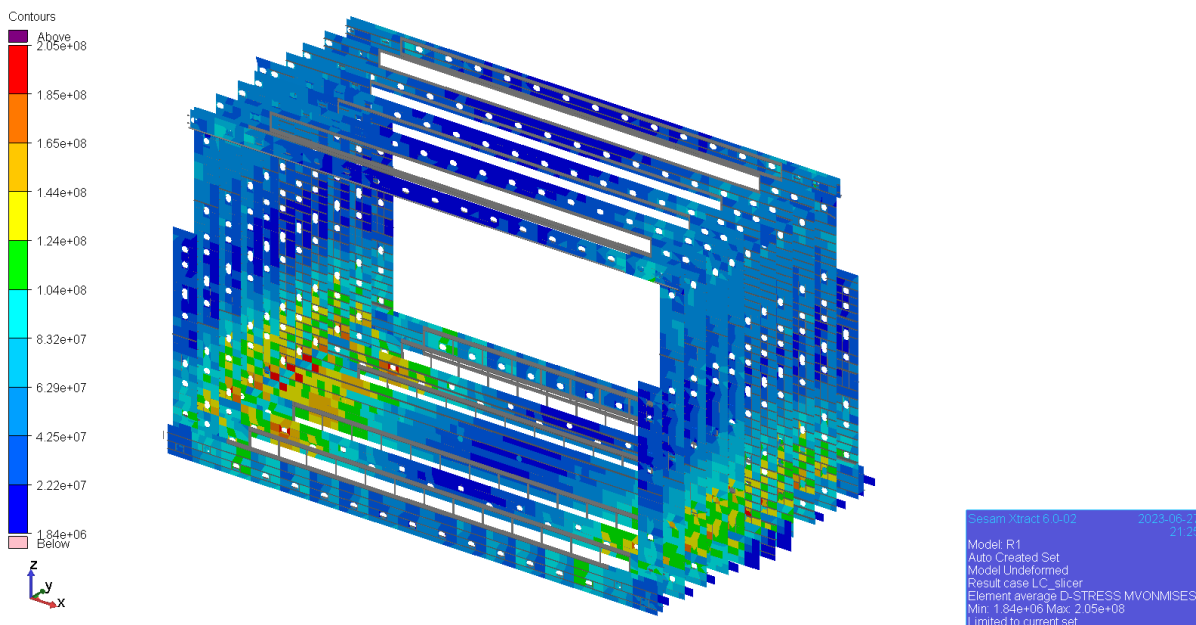
Slika 6-7 Prikaz VonMises napreznanja za okvirna rebra (rebro 89-102) [Pa]



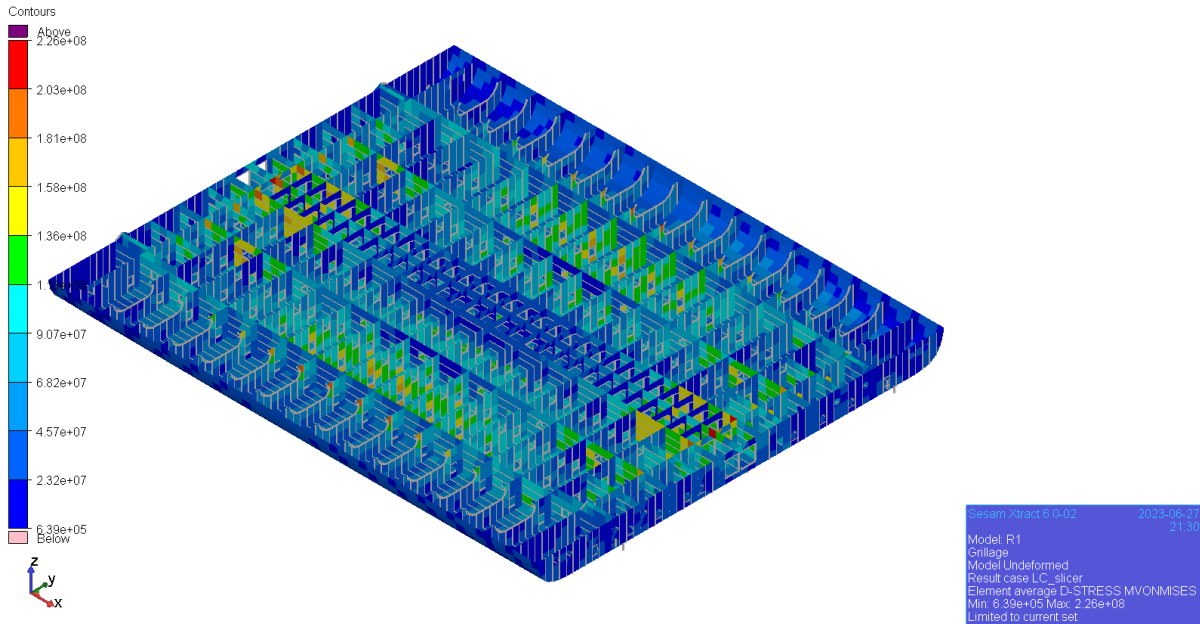
Slika 6-8 VonMises napreznanja na vodonepropusnim pregrada [Pa]



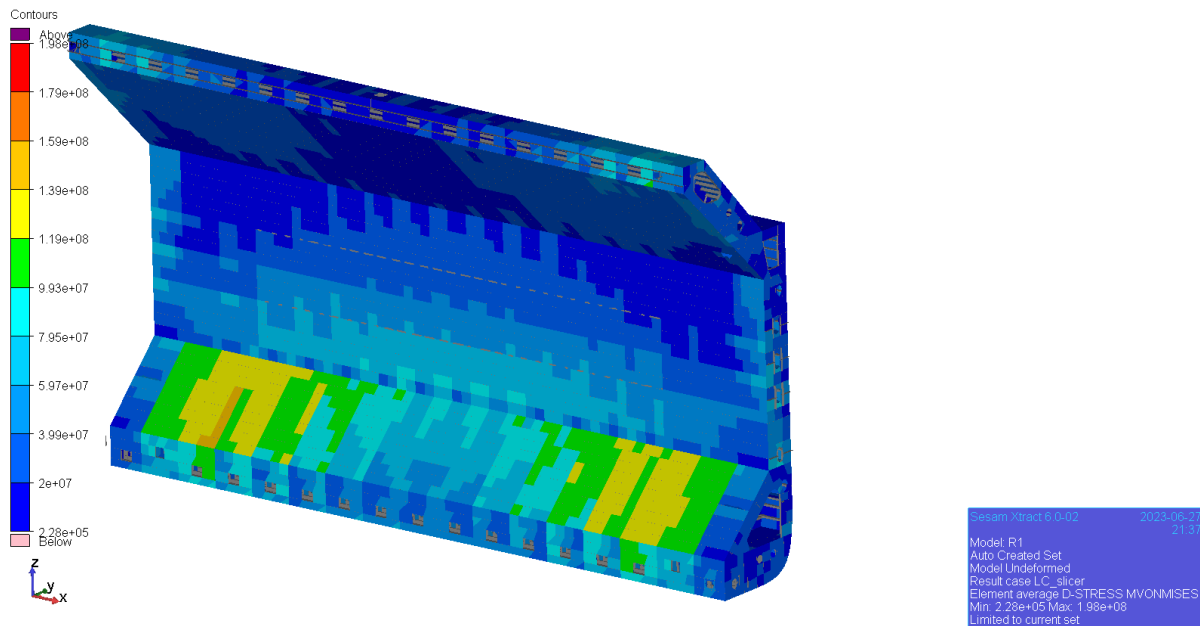
Slika 6-9 VonMises naprezanja na koferdamskim pregradama [Pa]



Slika 6-10 VonMises naprezanja na jakim uzdužnim nosačima dna i palube kao i konstrukcije u koferdamu [Pa]



Slika 6-11 VonMises naprezanja u roštilju dvodna [Pa]

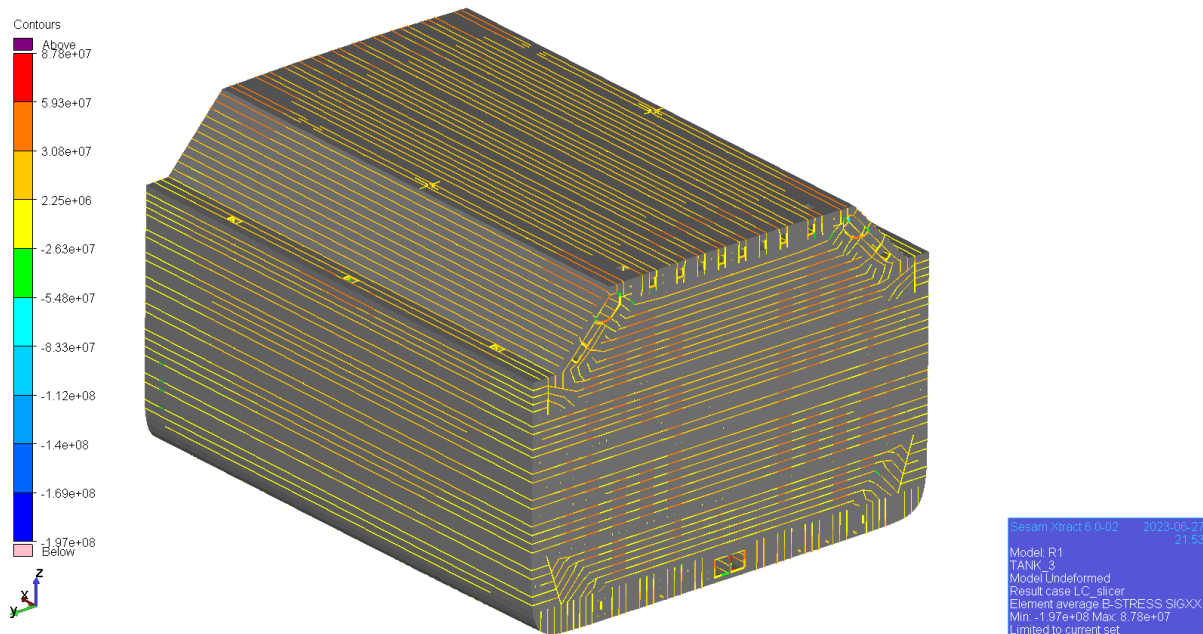


Slika 6-12 VonMises naprezanja u području uzvojnog tanka [Pa]

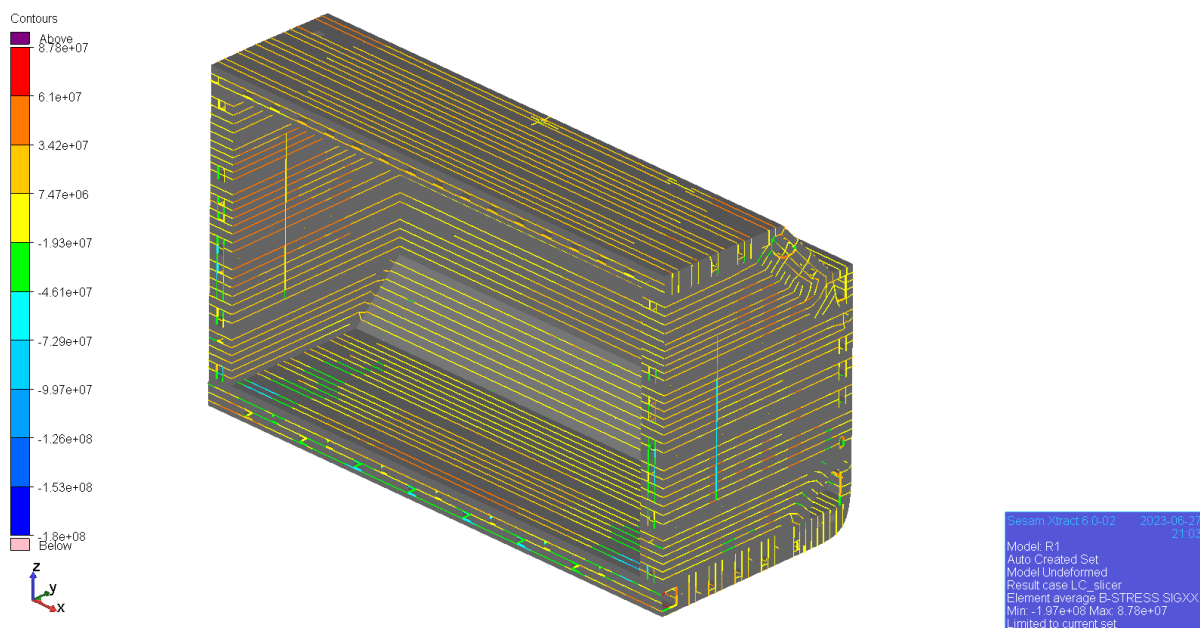


### 6.2.3 Aksijalna naprezanja u grednim konačnim elementima

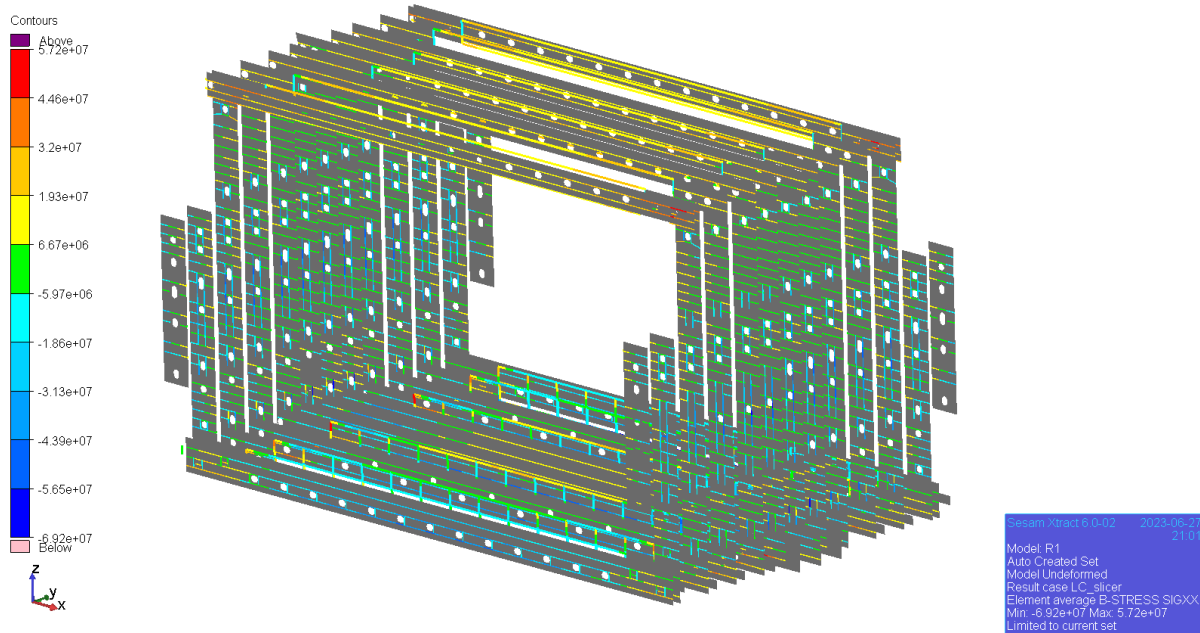
Slika 6-14 do Slika 6-19 prikazuje aksijalna naprezanja koja se javljaju u grednim konačnim elementima za slučaj opterećenja L4. Sa slika je vidljivo da svi gredni konačni elementi zadovoljavaju provjeru za popuštanje i da su naprezanja koja se javljaju u granicama dopuštenih naprezanja. Aksijalna naprezanja grednih konačnih elemenata za slučaj opterećenja L3 prikazana su u prilogu.



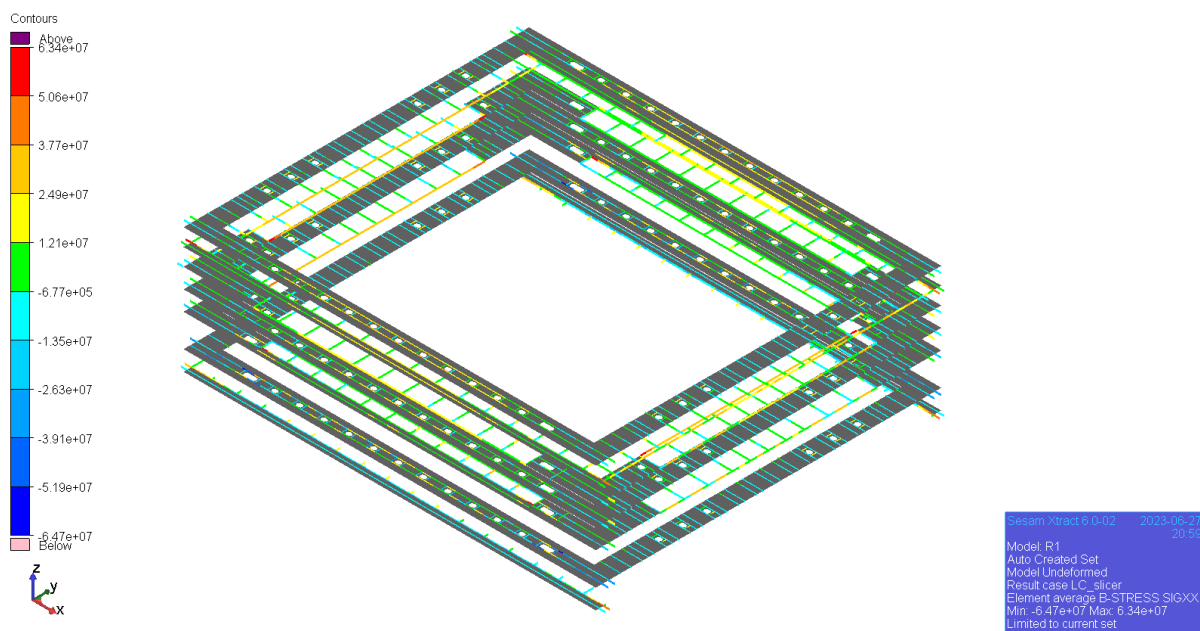
**Slika 6-13 Aksijalna naprezanja u grednim konačnim elementima središnjeg skladišta**



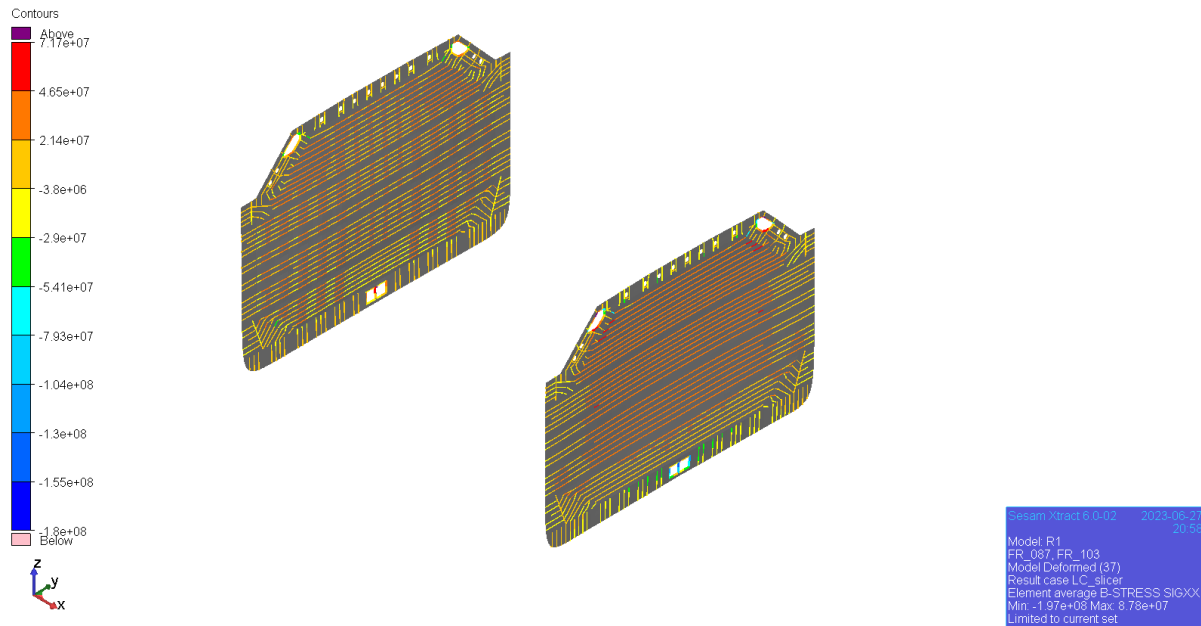
**Slika 6-14 Aksijalna naprezanja u grednim konačnim elementima na poprečnom presjeku  $y = 0$  [Pa]**



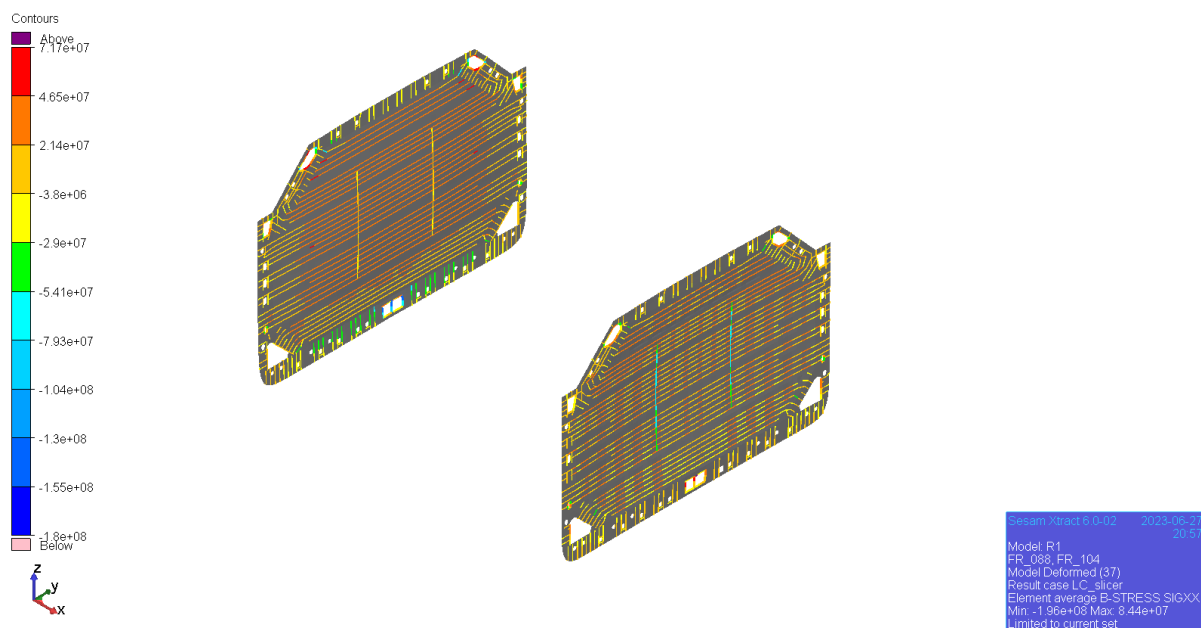
**Slika 6-15** Aksijalna naprezanja u grednim konačnim elementima na jakim uzdužnim nosačima u dvodnu, palubi i pregradama [Pa]



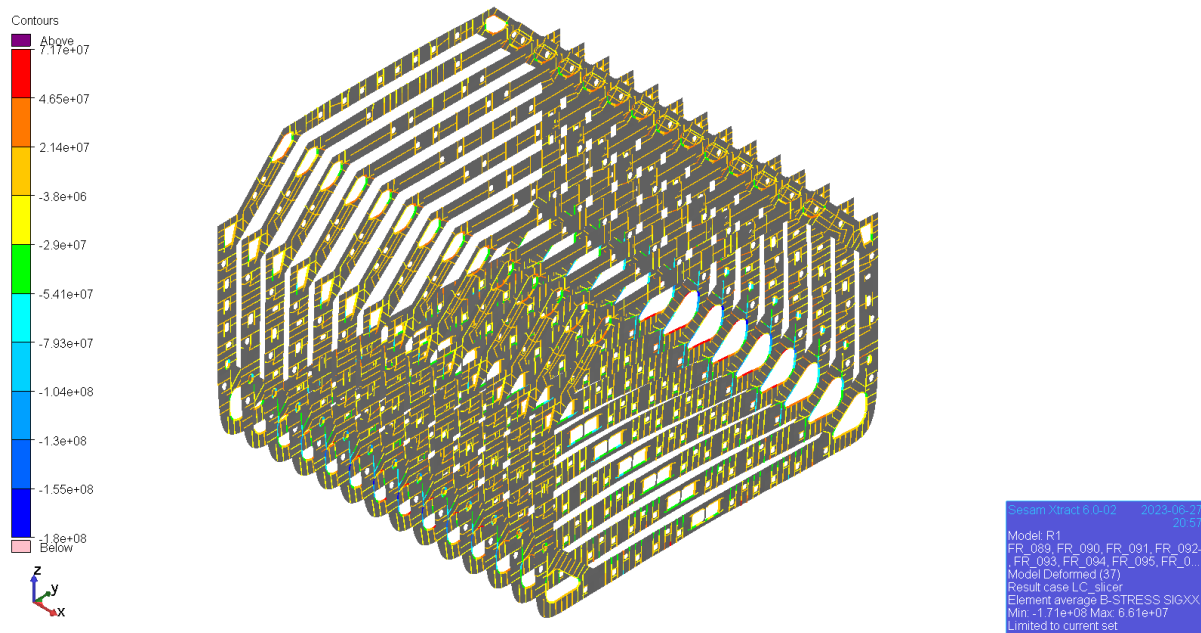
**Slika 6-16** Aksijalna naprezanja u grednim konačnim elementima na jakim uzdužnim nosačima u dvoboku i pregradama [Pa]



**Slika 6-17** Aksijalna naprezanja u grednim konačnim elementima na vodonepropusnim poprečnim pregradama [Pa]



**Slika 6-18** Aksijalna naprezanja u grednim konačnim elementima na vodonepropusnim poprečnim pregradama [Pa]



**Slika 6-19** Aksijalna naprezanja u grednim konačnim elementima na okvirnim rebrima [Pa]

#### 6.2.4 Provjera faktora iskoristivosti konstrukcije za popuštanje korištenjem programskog alata GeniE

U ovom koraku definiran je model preko kojega ćemo odrediti iskoristivost kapaciteta pojedinih limova strukture a sam model prikazan je na Slika 6-20 (*eng. Capacity model*). . Na slici je prikazan polovinski model zbog simetričnosti strukture ali je u provjeru uzet u obzir cijeli srednje skladište.

Faktor iskoristivosti dan je formulacijom [14]:

$$\lambda_y \leq \lambda_{yperm} \quad (1)$$

Gdje je za pločaste elemente

$$\lambda_y = \frac{\sigma_{vm}}{R_y} \quad (2)$$

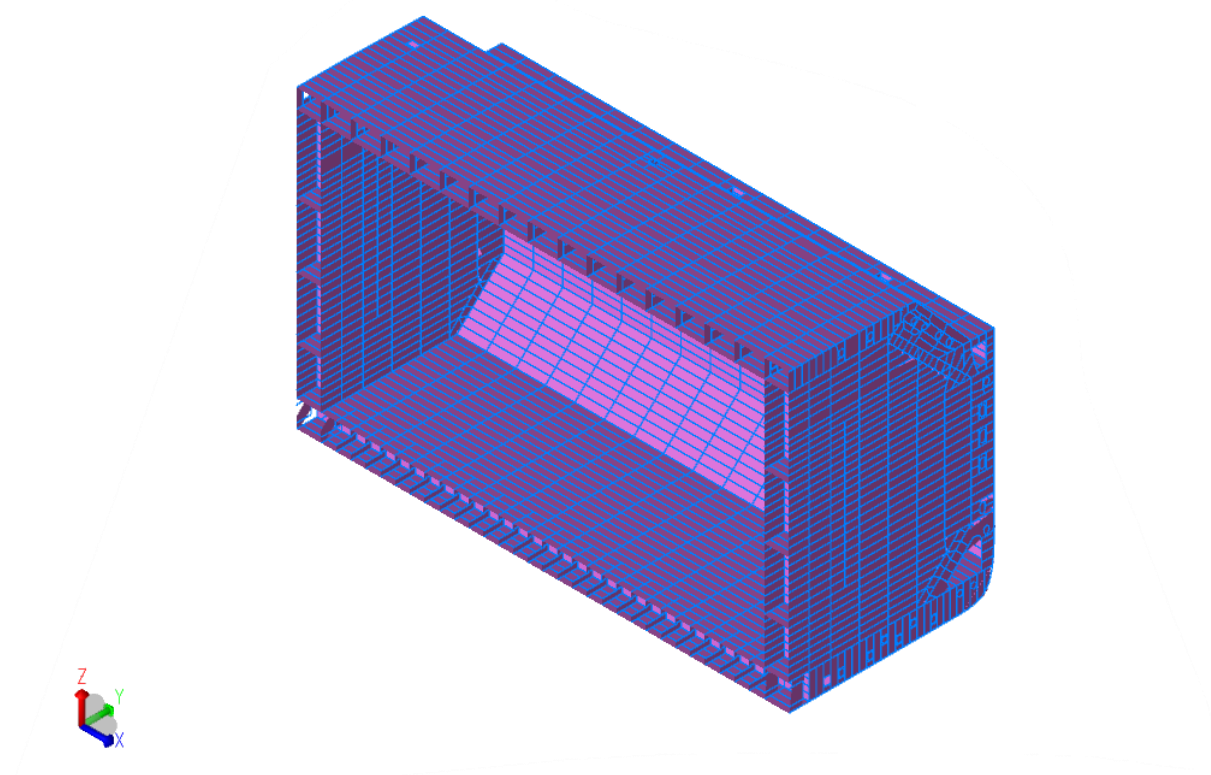
A za gredne konačne elemente:

$$\lambda_y = \frac{|\sigma_{axial}|}{R_y} \quad (2)$$

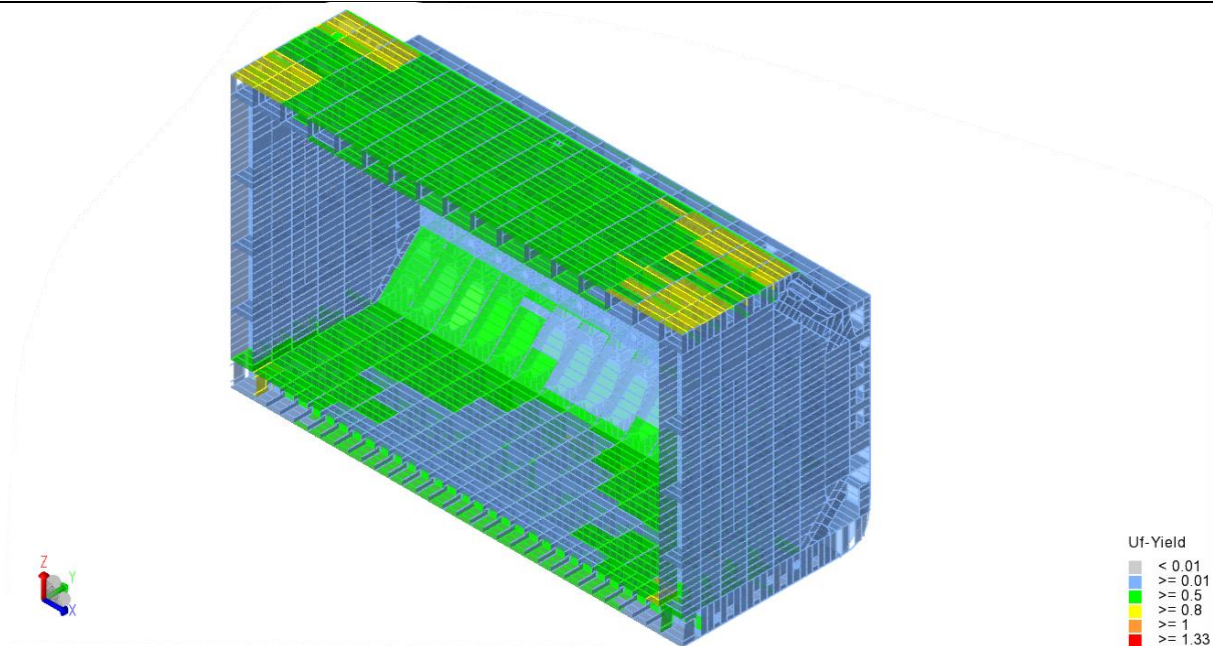
Gdje je faktor iskoristivosti konstrukcije za slučajeve statičkog opterećenja jednak:

$$\lambda_{yperm} = 0.8 \quad (3)$$

Detaljniji rezultati dani su u prilogu.



**Slika 6-20 Model za provjeru kapaciteta definiran u GeniE-u.**

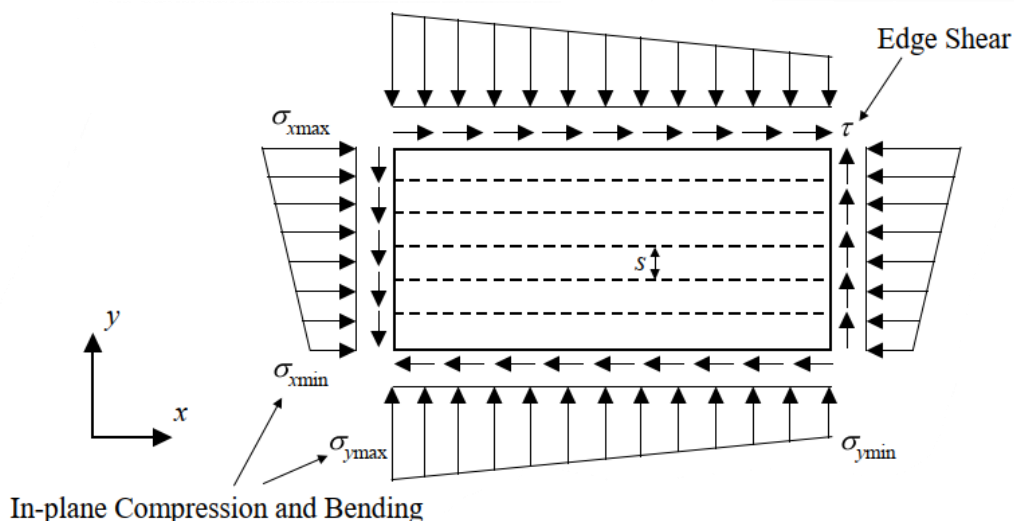


**Slika 6-21 Prikaz faktora iskoristivosti pojedinih limova konstrukcije za popuštanje za slučaj L4.**

### 6.3 Analiza izvijanja

U slučaju kada je konstrukcija opterećenja tlačnim opterećenjem može doći do pretjeranog otklona kada opterećenje dosegne kritičnu vrijednost. Takav način otklona naziva se izvijanje. Jednom kada dođe do velikog otklona, struktura možda neće povratiti svoj izvorni oblik čak i kada opterećenje prestane djelovati. [19]

Slika 6-22 daje prikaz opterećenja koja mogu djelovati na ukrepljeni panel.



Slika 6-22 Moguća raspodjela naprezanja na ukrepljenom panelu [22]

#### 6.3.1 Kriterij prihvatljivosti za izvijanje

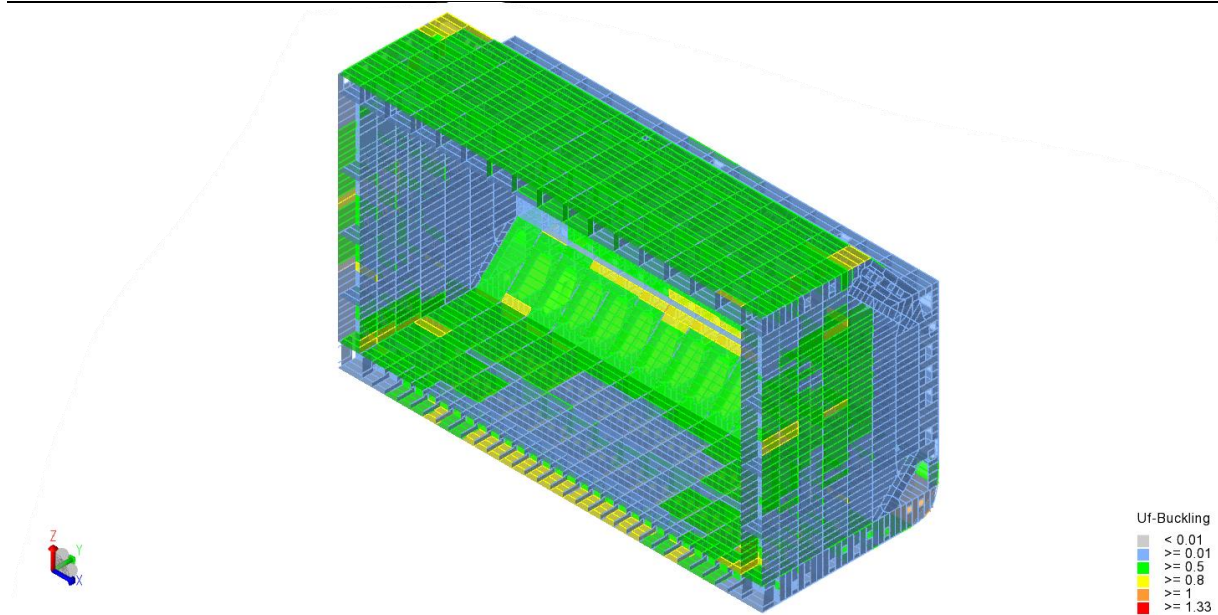
Kriterij za provjeru konstrukcija na izvijanje računat je prema [23] a naveden je u

Tablica 6-2 Dopušteni faktor iskoristivosti za izvijanje

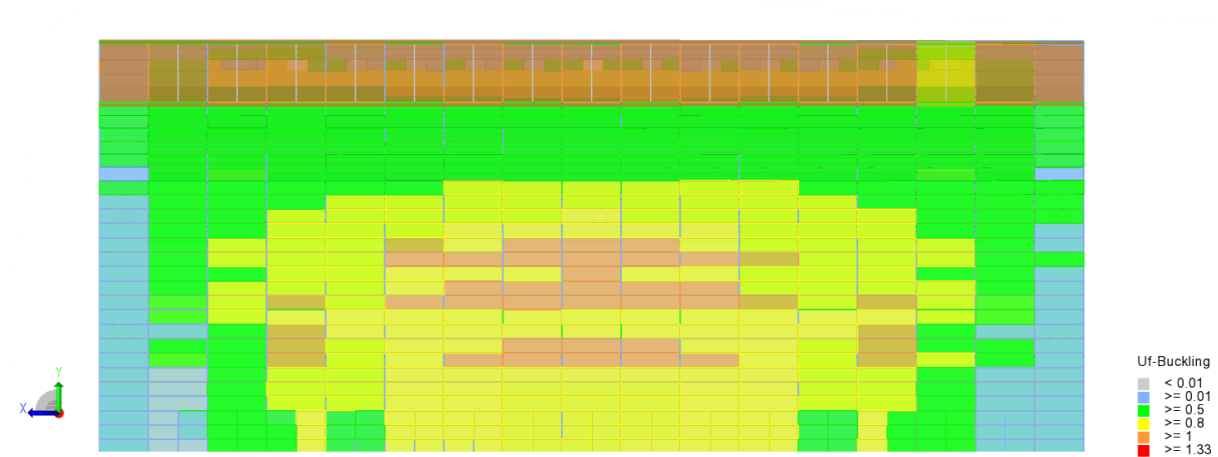
Slučaj opterećenja	Faktor iskoristivosti
L3; L4	<0,8

#### 6.3.2 Provjera faktora iskoristivosti konstrukcije za popuštanje

Faktor iskoristivosti za slučaj opterećenja L4 prikazan je na Slika 6-23 i Slika 6-24, dok je prikaz faktora iskoristivosti za slučaj opterećenja L3 dan u prilogu.



**Slika 6-23** Prikaz faktora iskoristivosti pojedinih dijelova konstrukcije za slučaj izvijanja za slučaj opterećenja L4

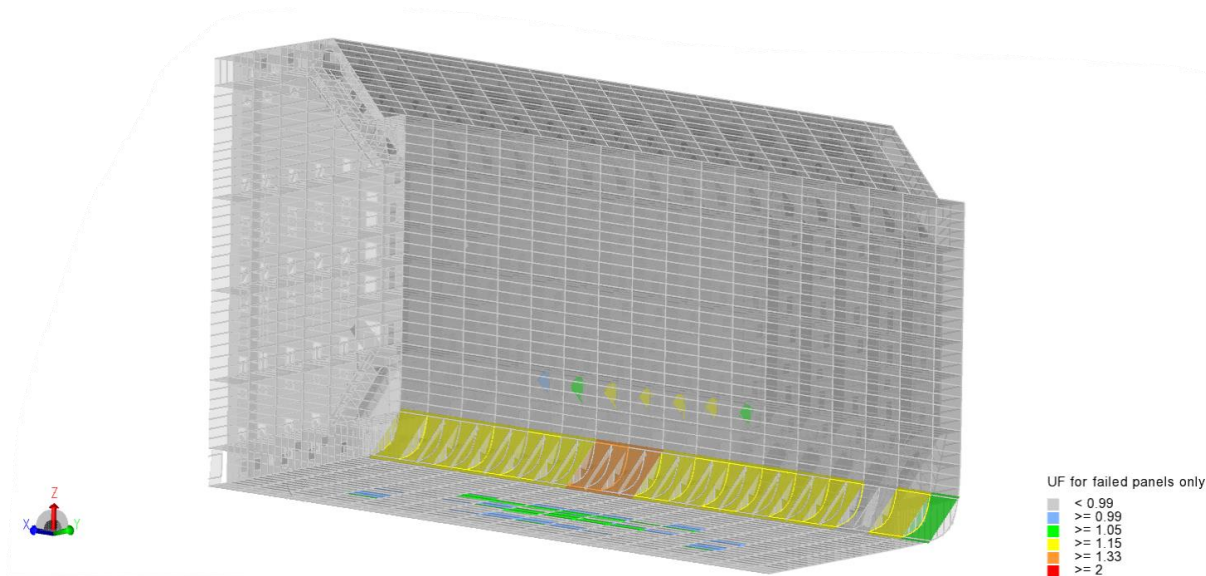


**Slika 6-24** Prikaz faktora iskoristivosti pojedinih dijelova konstrukcije za slučaj izvijanja za slučaj opterećenja L4-tloct

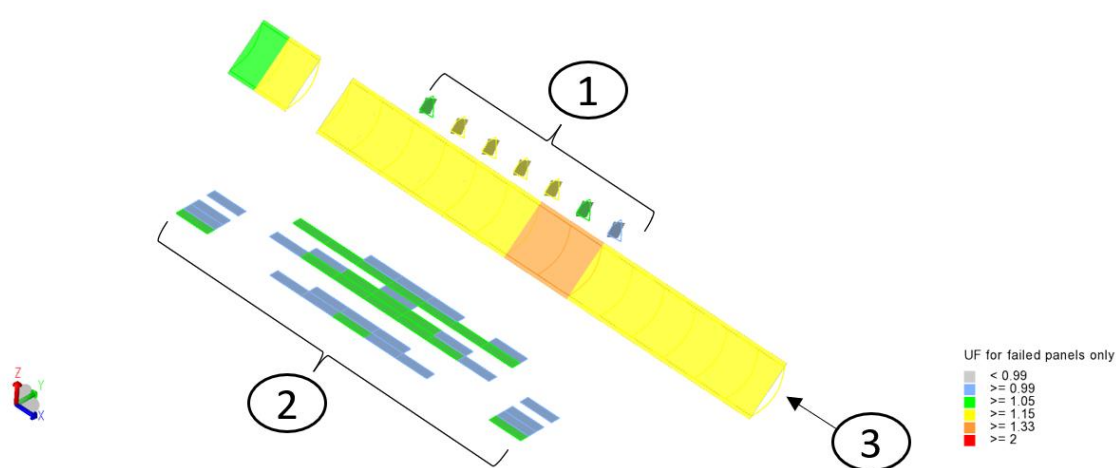


## 6.4 Lociranje kritičnih dijelova konstrukcije

Na sljedećim fotografijama Slika 6-25 i Slika 6-26 prikazani su dijelovi konstrukcije kojima je faktor iskoristivosti konstrukcije jedan ili veći od jedan. Na slikama je vidljivo da se elementi koji su nepodobni nalaze na oplati dna konstrukcije kao i u uzvojnomo području skladišta.



Slika 6-25 Istaknut prikaz pojedinih dijelova konstrukcije koji imaju nepodobni



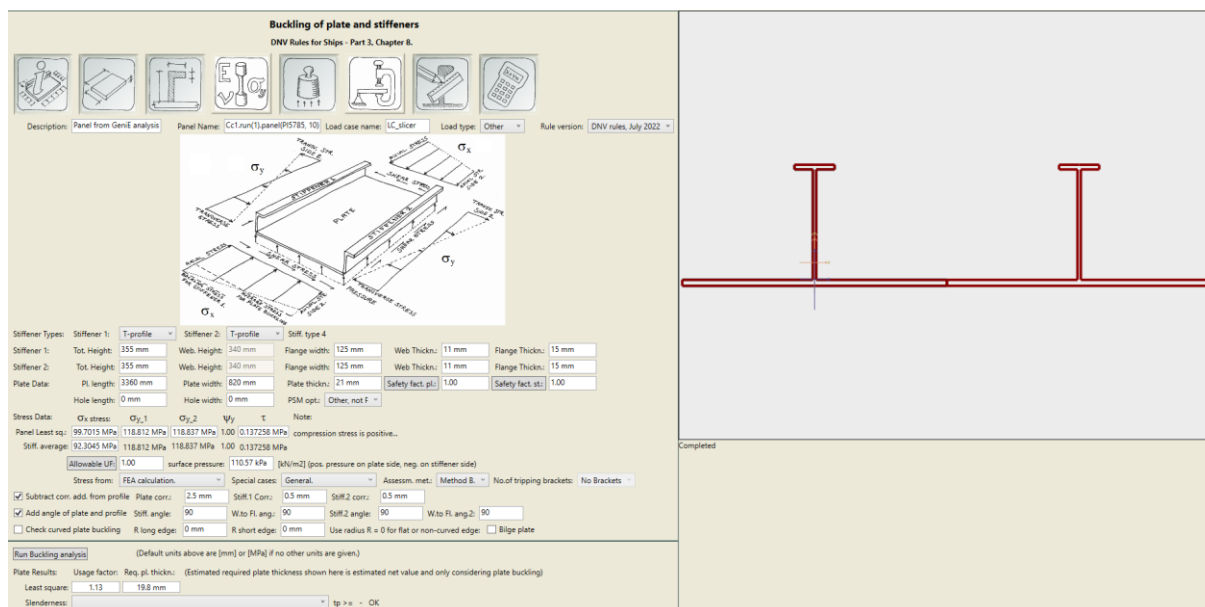
Slika 6-26 Prikaz grupacije elemenata kojima je faktor iskoristivosti konstrukcije veći od jedan

## 6.5 Analiza kritičnih dijelova konstrukcije

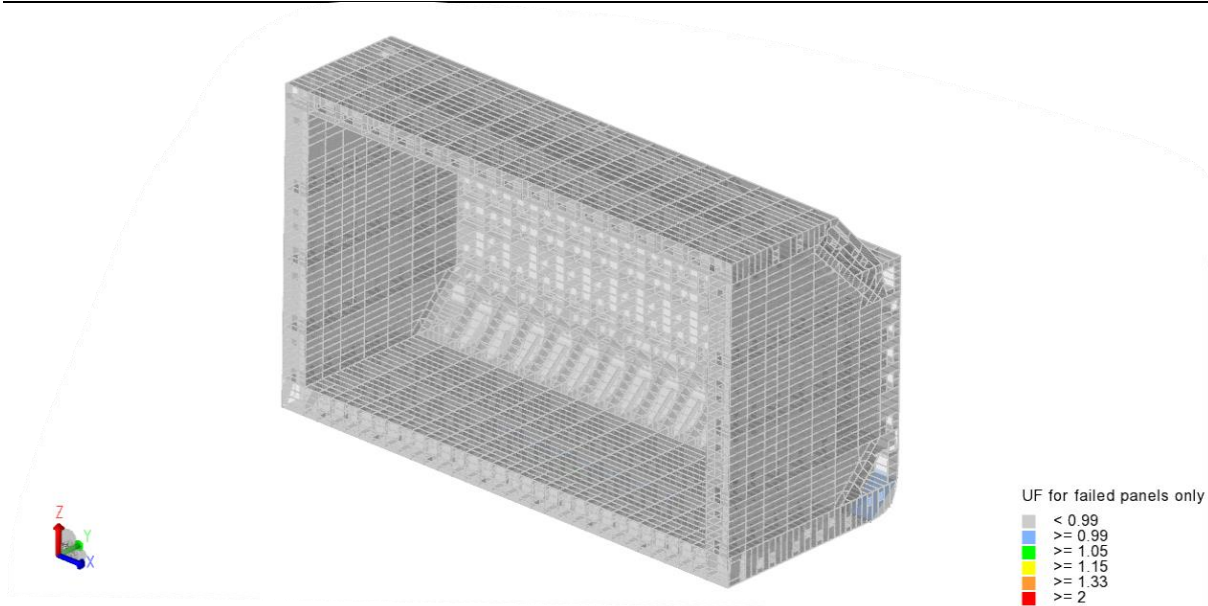
Na temelju provedenih proračuna, nekolicina limova ne zadovoljava kriterij faktora iskoristivosti konstrukcije odnosno neki dijelovi konstrukcije su preopterećeni. Kritični elementi ne zadovoljavaju faktor iskoristivosti kod izvijanja dok im je faktor iskoristivosti za popuštanje zadovoljen.

Elementi skupine 1 koje prikazuje Slika 6-26 na svojoj oplati imaju dodatne ukrepe protiv izvijanja koje u prvom koraku nisu bile modelirane zbog očuvanja pravilnosti konačnih elemenata a ne utječu bitno na globalni odziv konstrukcije. Ukrepe su naknadno modelirane i pokrenuta je ponovno analiza faktora iskoristivosti za izvijanje i rezultate prikazuje Slika 6-28. Elementi skupine 3 koji se nalaze na uzvoju oplata imaju između okvirnih rebara odnosno na polovici razmaka između svakog rebara dodatno ukrepljenje koje onda pridonosi podobnosti smanjujući pritom dimenziju lima koji se izvija na pola. Nakon što su ukrepe modelirane pokrenuta je ponovo analiza faktora iskoristivosti za izvijanje i rezultate prikazuje Slika 6-28 i Slika 6-29.

Za dodatnu provjeru panela može se koristiti i alata koji je integriran u GeniE a njegovo ime na engleskom je *Single Panel Buckling Tool* i u sebi sadrži integrirana pravila DNV. Sučelje ovog alata prilagođeno je korisniku i daje uvid u naprezanja koja djeluju na element koja su dobivena iz analize konačnih elemenata, kao i faktor sigurnosti, faktor iskoristivosti i potrebnu minimalnu debljinu lima da bi konstrukcija bila podobna na izvijanje kao što prikazuje i Slika 6-27.



Slika 6-27 Sučelje alata za provjeru izvijanja oplata i ukrepa prema pravilima DNV-a, integriranog u GeniE [24]




**Slika 6-28** Istaknut prikaz pojedinih dijelova konstrukcije koji imaju nepodobni



**Slika 6-29** Istaknut prikaz pojedinih dijelova konstrukcije koji imaju nepodobni

Sada možemo vidjeti da jedino jedan element na uzvoju ne zadovoljava faktor iskoristivosti za izvijanje. Za taj panel pokrenuta je provjera faktora iskoristivosti preko prethodno spomenutog alata za provjeru, a to prikazuje i Slika 6-30. Možemo vidjeti da je softver prethodno lim uzvoja idealizirao kao ravan umjesto kao zakrivljenu površinu. Nakon što se za nezadovoljavajući lim definirao određeni radijus i označio da je lim na uzvoju, može se vidjeti na Slika 6-30 da je sada faktor iskoristivosti 0,93 odnosno da sada lim zadovoljava.

**Buckling of plate and stiffeners**  
DNV Rules for Ships - Part 3, Chapter 8.



Description: Panel from GeniE analysis    Panel Name: SP\_A.run(1).panel(T2\_PI8513, 2)    Load case name: LC\_slicer    Load type: Other    Rule version: DNV rules, July 2022

Stiffener Types: Stiffener 1: Unstiffened    Stiff. type 0

Plate Data: Pl. length: 5097.2 mm    Plate width: 2805 mm    Plate thickn.: 17 mm    Safety fact. pl.: 1.00    Safety fact. st.: 1.00  
Hole length: 0 mm    Hole width: 0 mm    PSM opt.: Other, not F

Material Data: Yield stress: 315 MPa    Poisson ratio: 0.3    E-Module: 210000 MPa

Stress Data:  $\sigma_x$  stress:  $\sigma_{y_1}$      $\sigma_{y_2}$      $\psi_y$      $\tau$     Note:  
Panel Least sq.: 41.1906 MPa    140.695 MPa    140.695 MPa    1.00    -5.57457 MPa    compression stress is positive...  
Allowable UF: 0.80    surface pressure: 100.29 kPa    [kN/m<sup>2</sup>] (pos. pressure on plate side, neg. on stiffener side)

Stress from: FEA calculation.    Special cases: General.    Assessm. met.: Method A.    No. of tripping brackets: No Brackets

Boundary Data: Long side 1: Simply supported    Long side 2: Simply supported  
Short side 1: Simply supported    Short side 2: Simply supported

Length between brackets: 5097.2 mm

Subtract corr. add. from profile    Plate corr.: 0.5 mm    Stiff.1 Corr.: 0 mm    Stiff.2 corr.: 0 mm  
 Add angle of plate and profile    Stiff. angle: 90    W.to Fl. ang.: 90    Stiff.2 angle: 90    W.to Fl. ang.2: 90  
 Check curved plate buckling    R long edge: 2893.06 mm    R short edge: 0 mm    Use radius R = 0 for flat or non-curved edge:  Bilge plate

Run Buckling analysis    (Default units above are [mm] or [MPa] if no other units are given.)

Plate Results: Usage factor: Req. pl. thickn.: (Estimated required plate thickness shown here is estimated net value and only considering plate buckling)  
Least square: 0.93    15.3 mm  
Slenderness:    tp >= - OK

(Please Note: After changing to estimated values or after iteration on scantlings based on local considerations, it is necessary to re-check the whole Cross Section.)

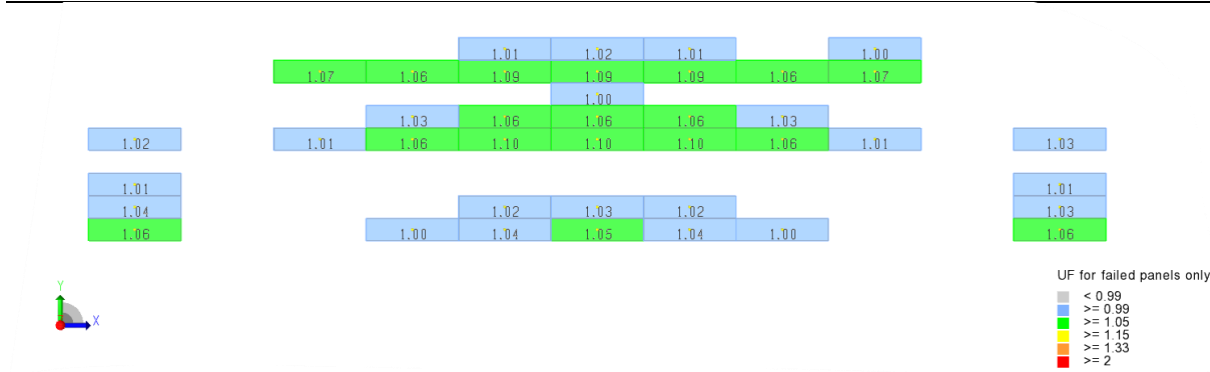
View intermediate plate buckling and stiffener buckling results in a spreadsheet.    Save    Save As...    Open...    Print...    Exit / Close

Calculated Date: 21 June 2023, Program version Build: 20.24.2302.701

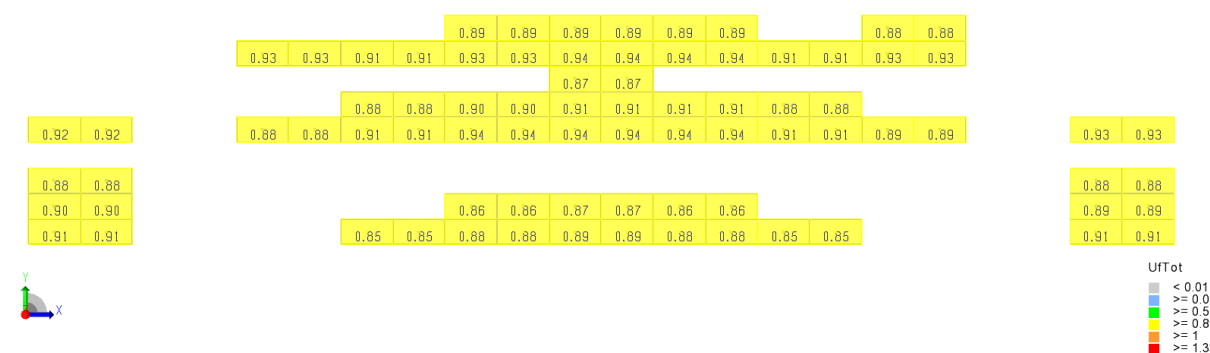
**Slika 6-30 Faktor iskoristivosti konstrukcije za slučaj izvijanja – paneli uzvoja**

Što se tiče limova kojima je faktor iskoristivosti veći od 1 a nalaze se na oplati na dnu konstrukcije, razlog zašto je njihov faktor veći od dopuštenog može ležati u tome da je inicijalna konstrukcija definirana po drugom registru (ABS) koji može imati drugačije zahtjeve za debljine od DNV-a.

Da bi se riješio problem elemenata u dnu potrebno je na elemente umetnuti interkostalne ukrepe i ponovo pokrenuti provjeru. Slika 6-32 daje prikaz faktora iskoristivosti nakon umetanja interkostalnih ukrepa. Može se primijetiti da su sada polja limova upola manja od početnih što je i bit kod umetanja interkostala.



Slika 6-31 Paneli i njihovi faktori iskoristivosti na donjem dijelu oplata



Slika 6-32 Paneli i njihovi faktori iskoristivosti na donjem dijelu oplata nakon umetanja interkostalnih ukrepa

---

## 7 ZAKLJUČAK

U ovom smo se diplomskom radu, analizirajući skladišni prostor, dotakli nekoliko različitih aspekata strukturne analize tankera za prijevoz ukapljenog plina uključujući čvrstoću na popuštanje i izvijanje pojedinih dijelova konstrukcije. Za efikasno i optimalno projektiranje i modeliranje konstrukcije broda upotrijebljena je teorija konačnih elemenata koja zahtjeva detaljno razumijevanje. DNV-ov programski paket SESAM igra ključnu ulogu u proširivanju mogućnosti analize korištenjem konačnih elemenata.

Hidrostatski tlak narinut je na vanjsku oplatu i u kombinaciji s težinama broda tvori spreg sila i momenata koji se javljaju na konstrukciji. Uz to na konstrukciju su još dodatno umetnuti i momenti savijanja u rubove pomoću kojih smo postigli maksimalni zahtijevani kritični moment savijanja, te sile duž modela koje su služile za balansiranje smičnih sila.

Procjena podobnosti konstrukcije uključila je provjeru čvrstoće na izvijanje i čvrstoće popuštanja i provela se u okviru pravila klasifikacijskog društva uzimajući u obzir sve strukturne elemente srednjeg skladišta. Rezultati analize su pokazali da su svi elementi što se tiče čvrstoće popuštanja unutar dozvoljenih granica a to je i potkrepljeno slikama na kojima se mogu vidjeti referentna VonMises napreznja za sve strukturne elemente. Nakon nekoliko modifikacija utvrđeno je da su svi strukturni elementi u zadovoljavajućem stanju i što se tiče čvrstoće konstrukcije na izvijanje. U ovom radu nisu analizirane svi potrebne kombinacije opterećenja koji se trebaju provesti u standardnom postupku a propisani u pravilima zbog nedostatka vremena. Kada bi se implementirale i ostale kombinacije opterećenja postojala bi mogućnost da bi određeni konstrukcijski elementi doživjeli pojačanja ovisno o napreznjima koja bi se javila.

Rezultati naglašavaju važnost strukturnih analiza u jamčenju pouzdanosti konstrukcija i olakšavaju identificiranje lokacija na kojima se može pojaviti kritično napreznje ili koncentracija napreznja.

---

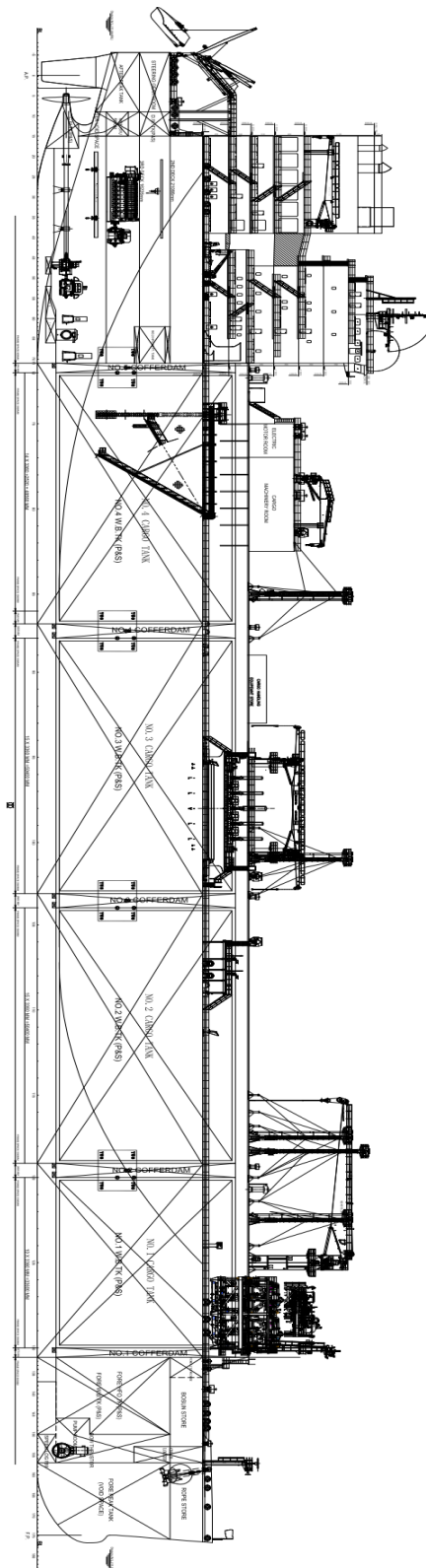
**REFERENCE**

- [1] V.Žanić, J. Andrić i N. Hadžić, »"Optimization Procedure for LNG Carrier Structural Design", Proc.IMEchE, part M,« *Journal of Engineering for the Maritime Environment*, Vol. 229, No.1, pp.14-35, 2015.
- [2] Indian Register of Shipping, Strength Assessment of Membrane Type Containment System of LNG Carrier, Mumbai, 2016.
- [3] P. Galović, M. Kovačević i M. Podobnik, »Pomorsko tržište tankera – brodovi za prijevoz sirove nafte i naftnih derivata, ukapljenog plina i kemikalija,« 2008.
- [4] V.Slapničar, »Hrvatska tehnička enciklopedija, <https://tehnika.lzmk.hr/tanker/>,« 2018. [Mrežno]. Available: <https://tehnika.lzmk.hr/tanker/>. [Pokušaj pristupa Svibanj 2023].
- [5] Wikipedia, »[https://en.wikipedia.org/wiki/LNG\\_carrier](https://en.wikipedia.org/wiki/LNG_carrier),« [Mrežno]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/LNG\\_carrier](https://en.wikipedia.org/wiki/LNG_carrier). [Pokušaj pristupa Svibanj 2023].
- [6] K. Moon, »Comparison of Spherical and Membrane Large LNG Carriers in Terms of Cargo Handling,« 2005.
- [7] Tutturen i J. Petter, »LNG containment systems: Finding the way for Type A,« DNV, 2019.
- [8] M. Schuler, »gCaptain,« 2014. [Mrežno]. Available: <https://gcaptain.com/mhi-completes-next-generation-lng-carrier-design-apple-shaped-tanks/>. [Pokušaj pristupa Svibanj 2023].
- [9] DNV, »DNV-RU-Ship Pt.5 Ch.7-Liquefied gas tankers,« July 2022. [Mrežno]. Available: <https://standards.dnv.com>.
- [10] A. LILJEGREN i O. LINDAHL, »Sloshing Impact Response in LNG Membrane Carriers,« 2015.
- [11] P. Rigo i E. Rizzuto, »Analysis and Design of Ship Structure, Chapter 18,« u *Ship Design & Construction, Volume 1*, 2013.
- [12] Lee. K. i Roh. M. , Computational Ship Design, Singapore: Springer Nature Singapore, 2017.
- [13] DNV, »DNV-CG-0136-LNG With Membrane Tanks,« August 2021. [Mrežno]. Available: <https://standards.dnv.com>.
- [14] DNV, »DNV-RU-SHIP Pt.3 Ch7-Finite Element Analysis,« August 2021. [Mrežno]. Available: <https://standards.dnv.com>.

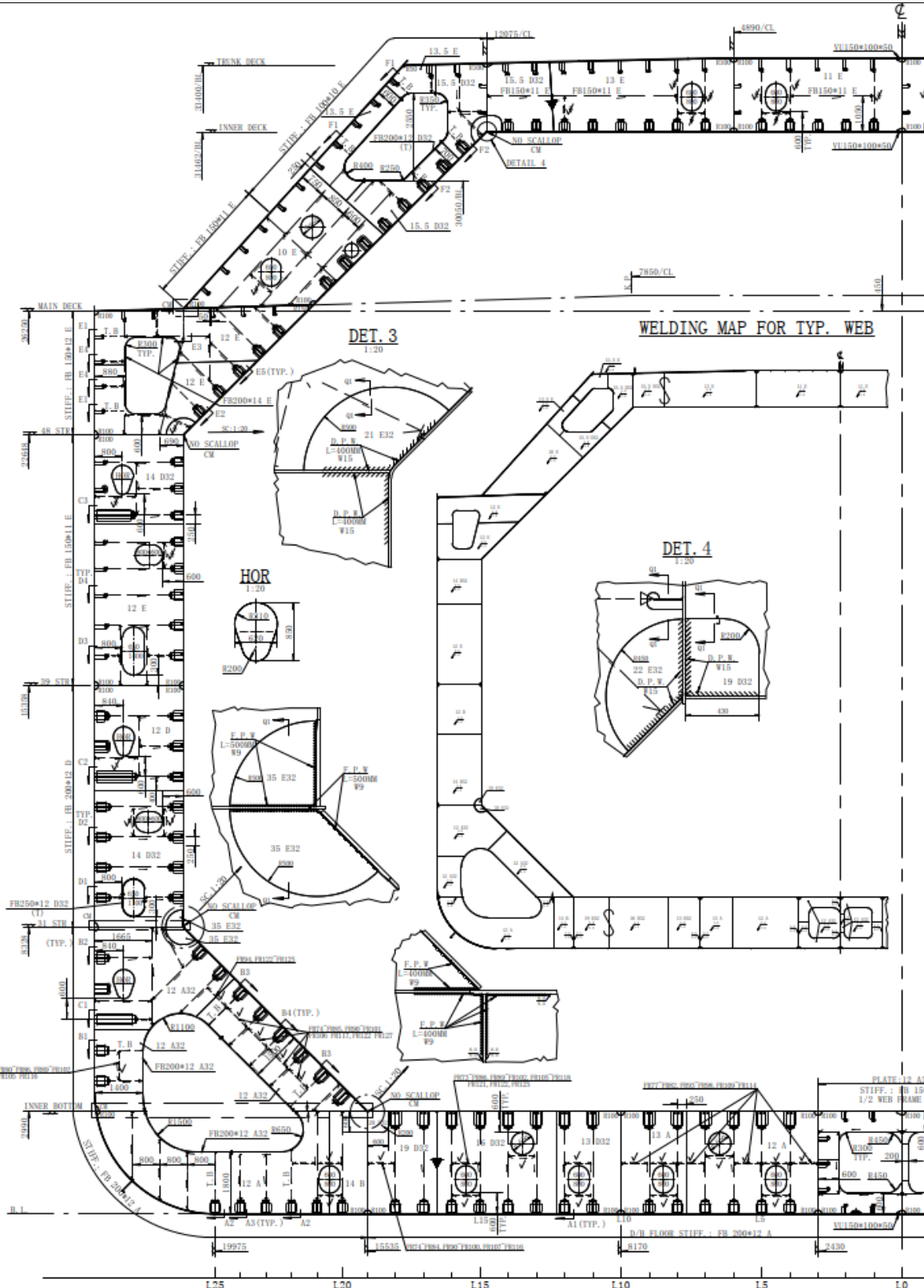
- 
- [15] C. GKOUKODIS, »Finite Element Analysis of a Bulk Carrier Vessel's Cargo Hold for Yield and Buckling Strength Assessment According to IACS Common Structural Rules,« 2021.
- [16] DNV, »DNV-RU-SHIP Pt.3 Ch.4 - Loads,« July 2022. [Mrežno]. Available: <https://standards.dnv.com>.
- [17] T. TheNavalArch, »Longitudinal Strength of Ships – an Introduction,« 2017.
- [18] ABS - American Bureau of Shipping, »Loading Manual,« 2021.
- [19] Y. Okumoto, Y. Takeda, M. Mano i T. Okada, Design of Ship Hull Structures, 2009.
- [20] J. Paik i A. Kumar, Ultimate Limit-State Design of Steel-Plated Structures, 2003.
- [21] 21st International Ship and Offshore Structures Congress, »Ultimate Strength,« 2022.
- [22] ABS- American Bureau of Shipping, »BUCKLING AND ULTIMATE STRENGTH ASSESSMENT FOR OFFSHORE STRUCTURES,« 2004.
- [23] DNV, »DNV-CG-0128-Buckling,« September 2021. [Mrežno]. Available: <https://standards.dnv.com>.
- [24] DNV, »GeniE\_UM\_Vol5-Plate Code Check,« u *Sesam User Manual*, 2016.
- [25] DNV, »GeniE\_UM\_Vol4-Beam Code Check,« u *Sesam User Manual*, 2015.
- [26] K. Hoque, »Analysis of structural discontinuities in ship hull using finite element method,« 2016.



**PRILOG A**

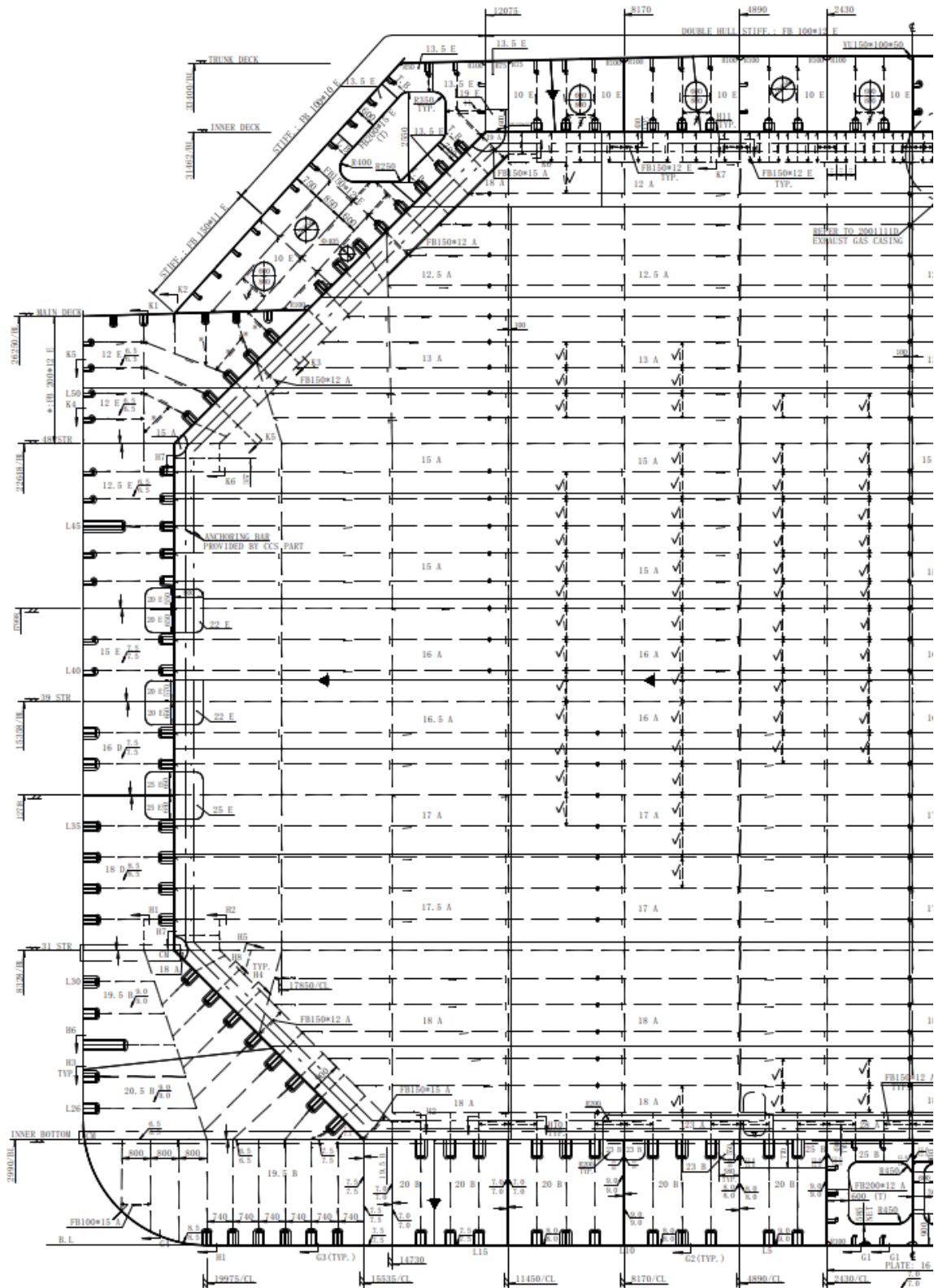


**Slika- A-I Opći raspored prostora na brodu**



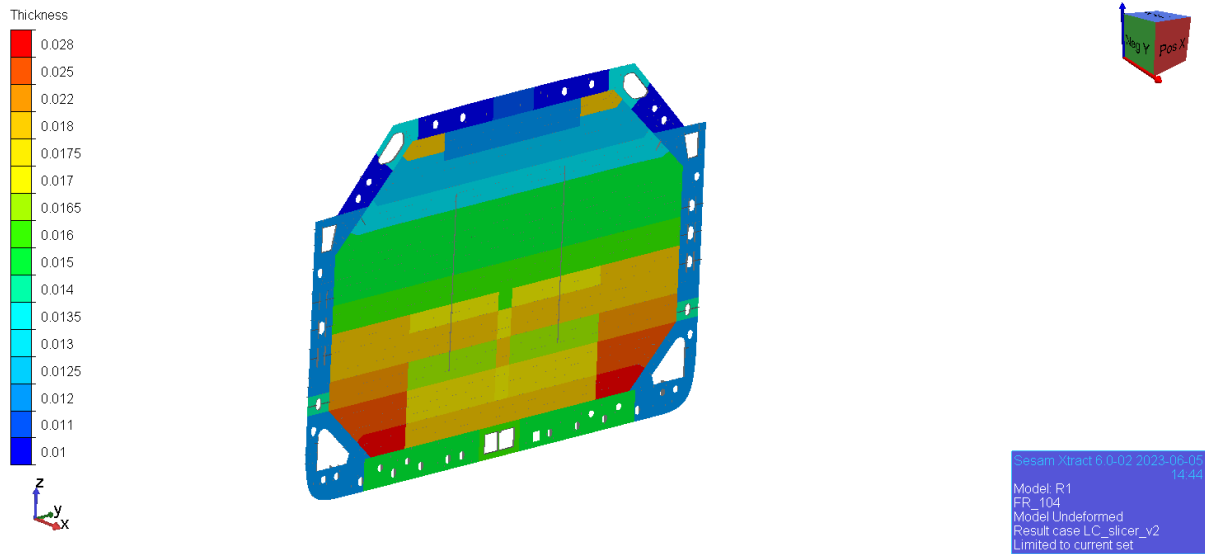
Slika- A-II Tipično glavno rebro tankera s membranskim oblikom spremnika

TYPICAL W.T. BHD

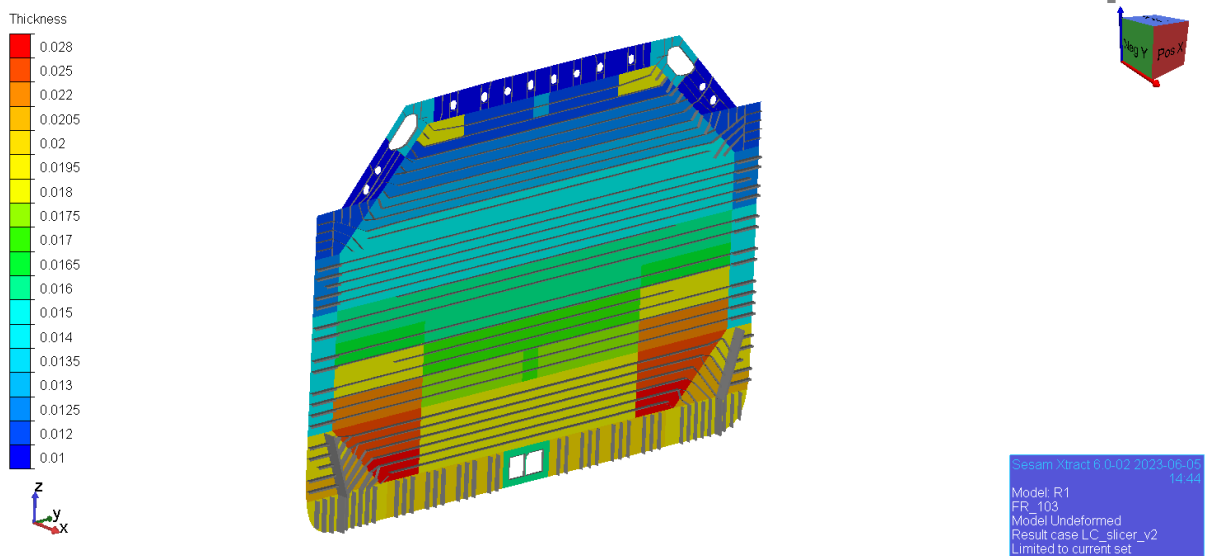


Slika- A-III Tipična vodonepropusna pregrada

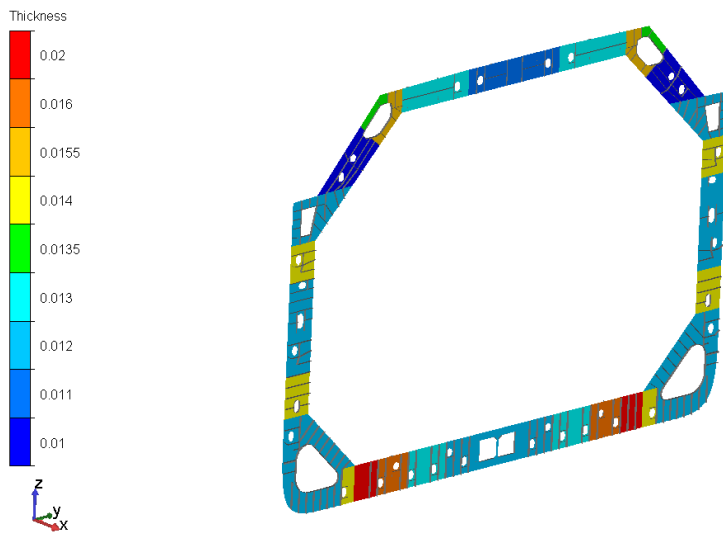
## PRILOG B



Slika- B-I Debljine na nepropusnoj pregradi (rebro 104) [m]

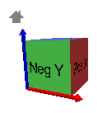
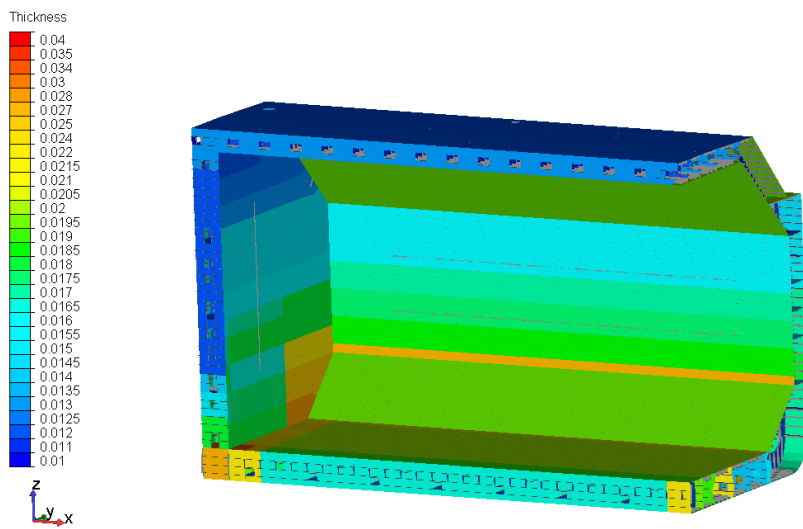


Slika- B-II Debljine na koferdamu (rebro 103) [m]



Sesam Xtract 6 0-02 2023-06-05 14:45  
 Model: R1  
 PR\_102  
 Model Undeformed  
 Result case LC\_slicer\_v2  
 Limited to current set

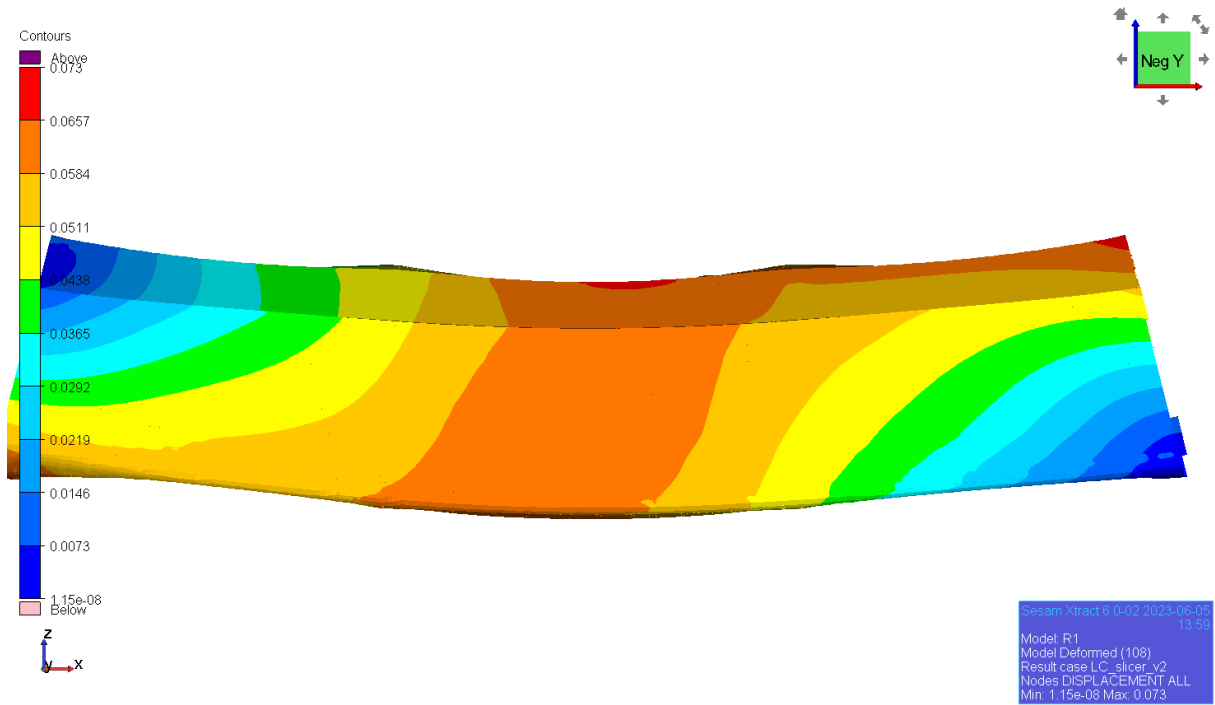
**Slika- B-III Debljine na tipičnom rebru [m]**



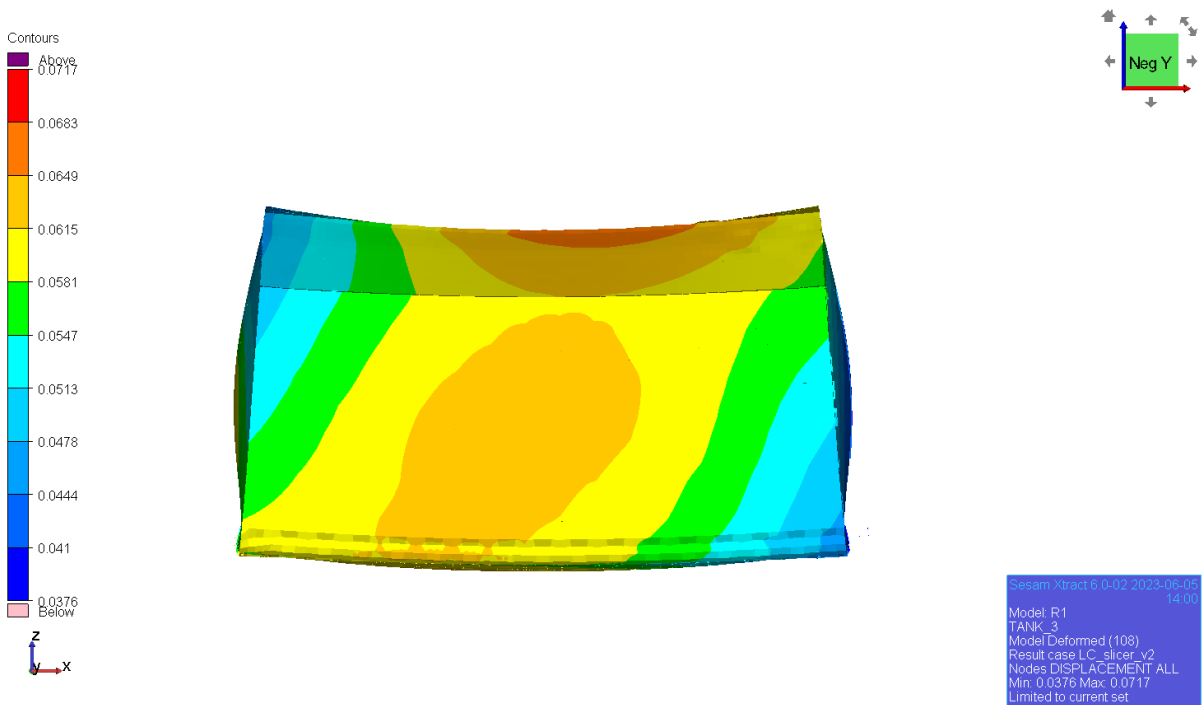
Sesam Xtract 6 0-02 2023-06-05 14:45  
 Model: R1  
 Pola Tankaa3  
 Model Undeformed  
 Result case LC\_slicer\_v2  
 Limited to current set

**Slika- B-IV Debljine unutar srednjeg skladišta [m]**

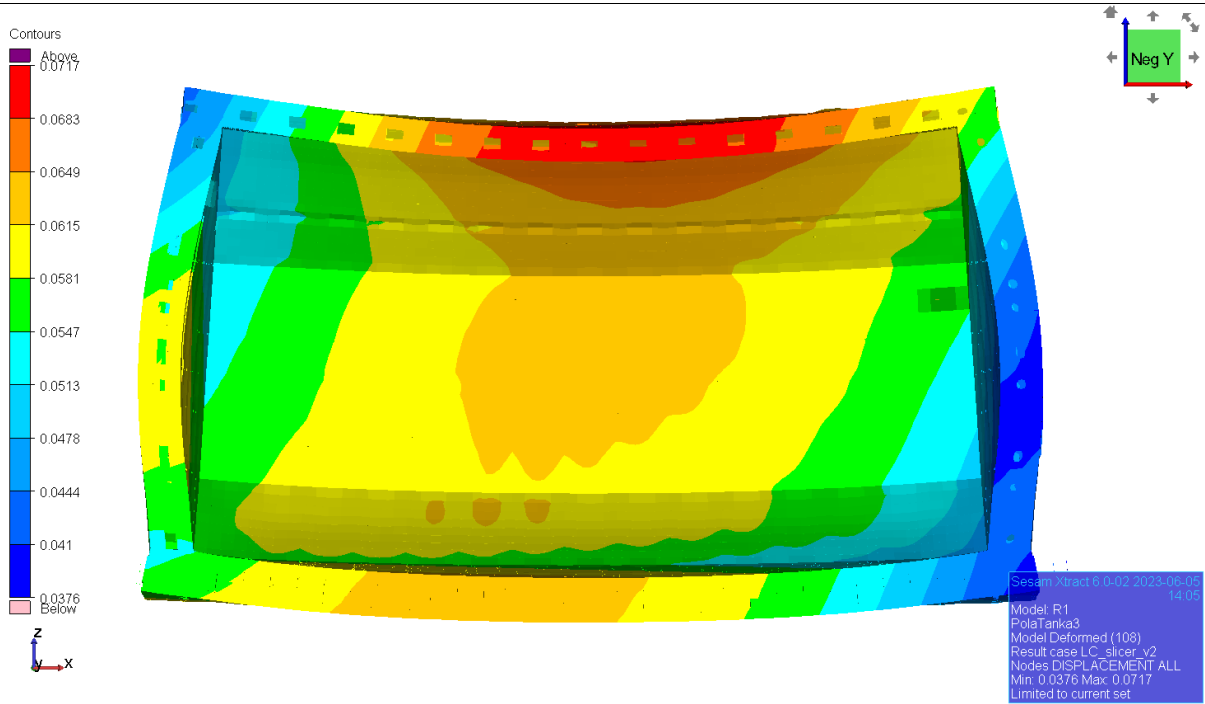
**PRILOG C**



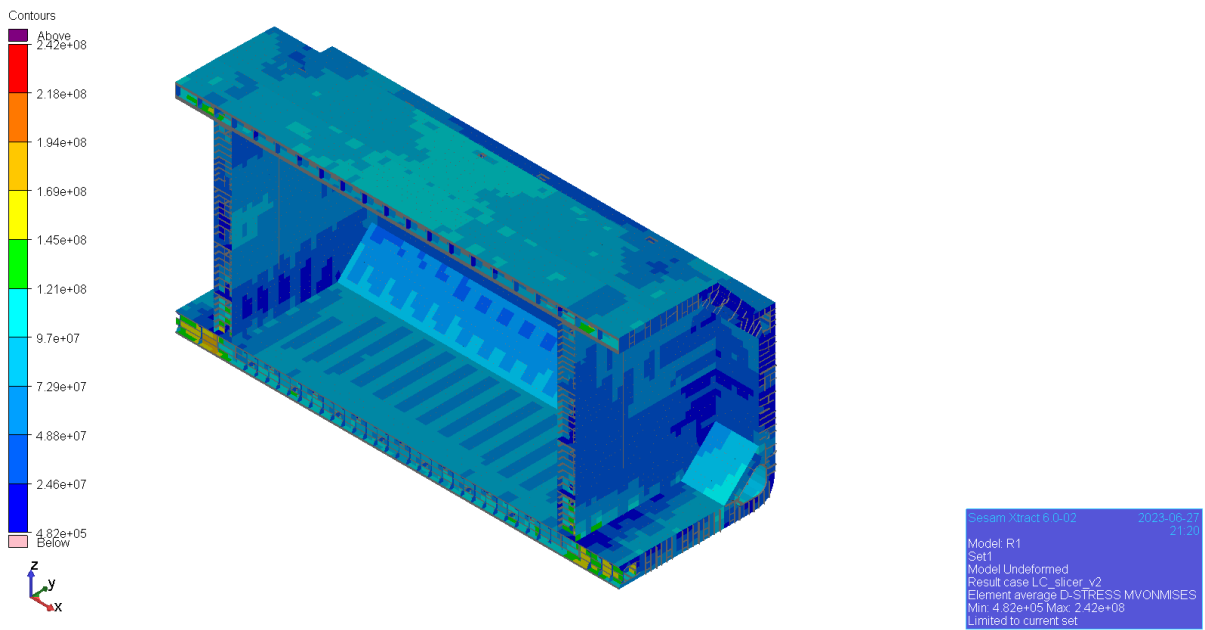
**Slika- C-I Pomaci cijelog modela za slučaj opterećenja L3 (*sagg*) [m]**



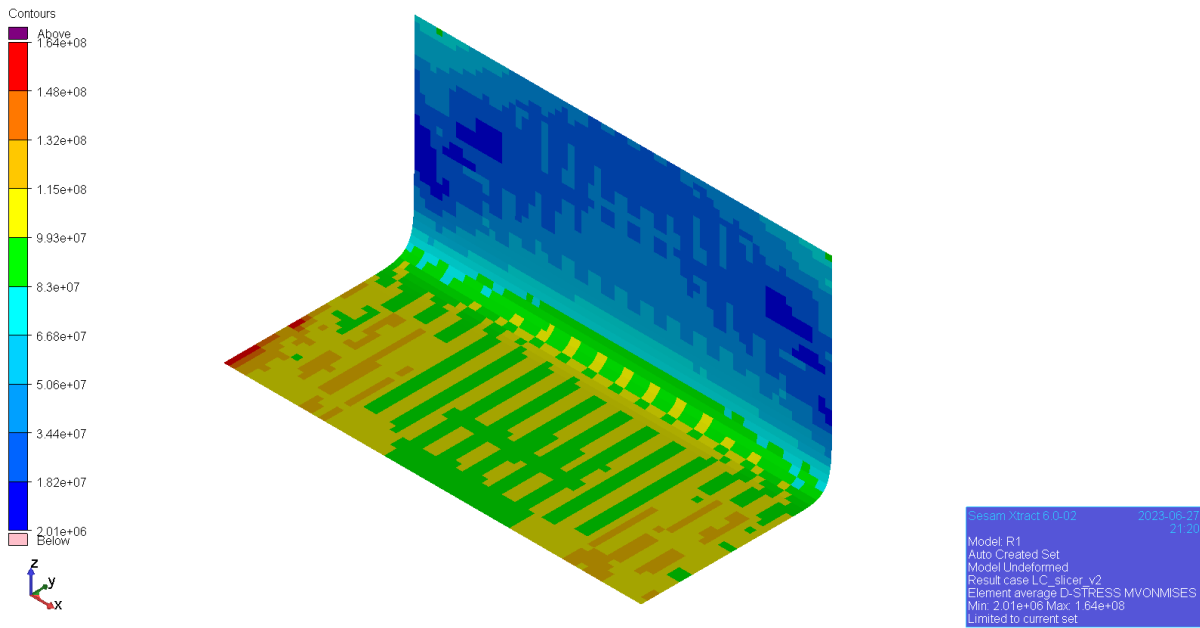
**Slika- C-II Pomaci srednjeg skladišta za slučaj opterećenja L3 (*sagg*) [m]**



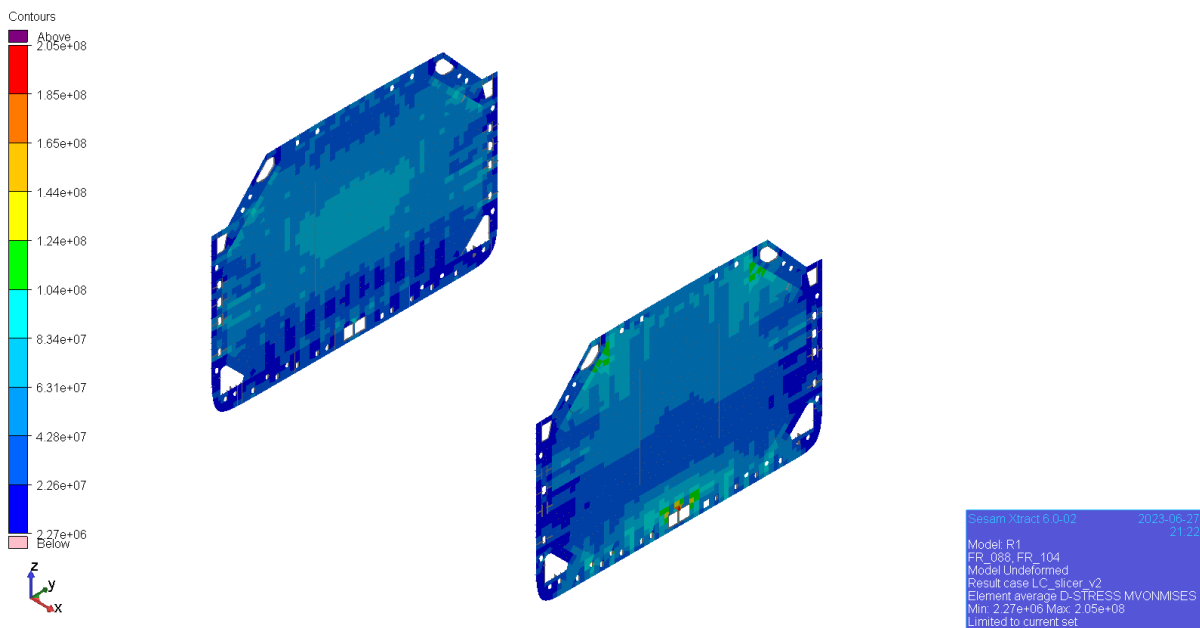
Slika- C-III Pomaci srednjeg skladišta za slučaj opterećenja L3, presjek u  $y=0$  [m]



Slika- C-IV VonMises naprezanja na presjeku  $y = 0$  (centerline) [MPa]

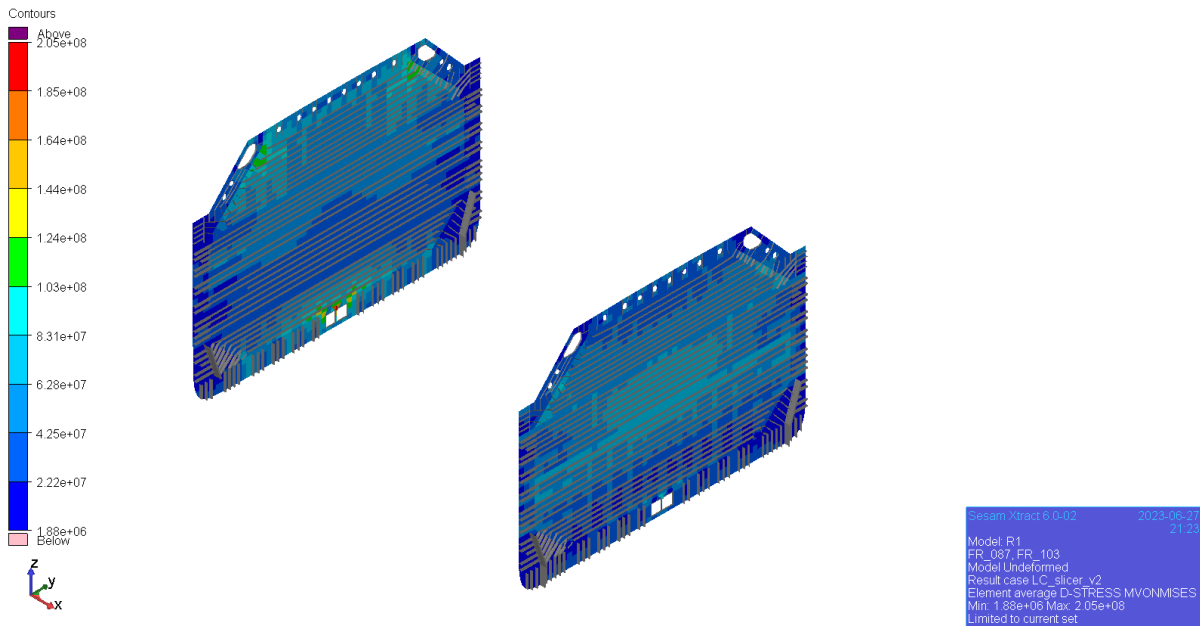


**Slika- C-V VonMises naprezanja na oplati modela na presjeku  $y = 0$ . [MPa]**

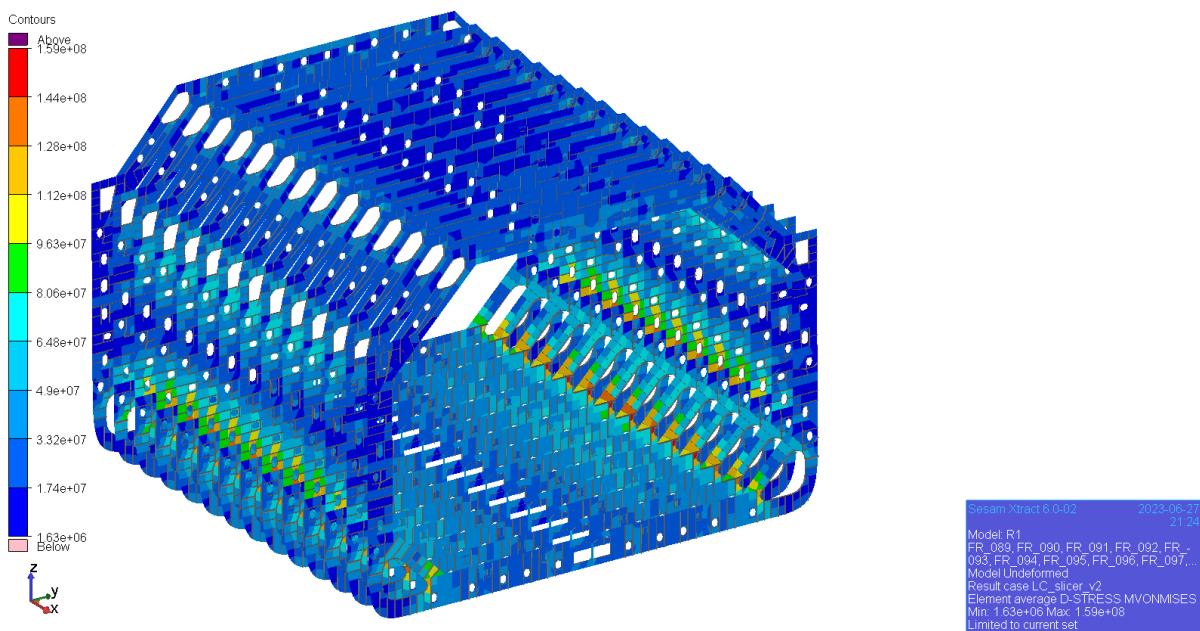


**Slika- C-VI VonMises naprezanja na koferdamskim pregradama [MPa]**

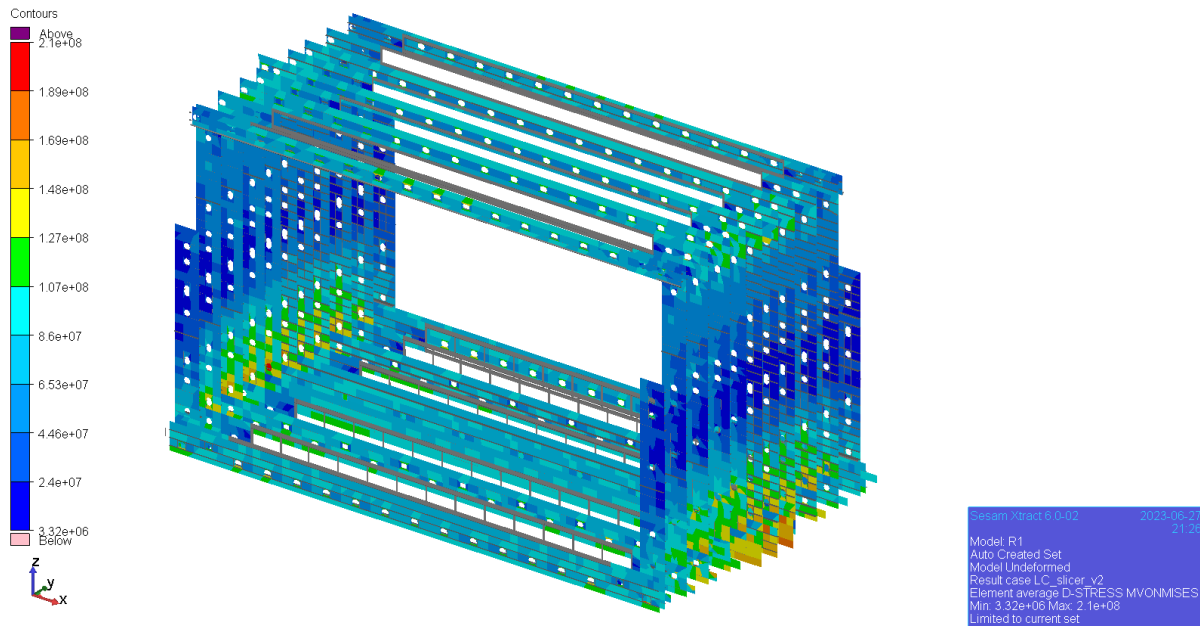




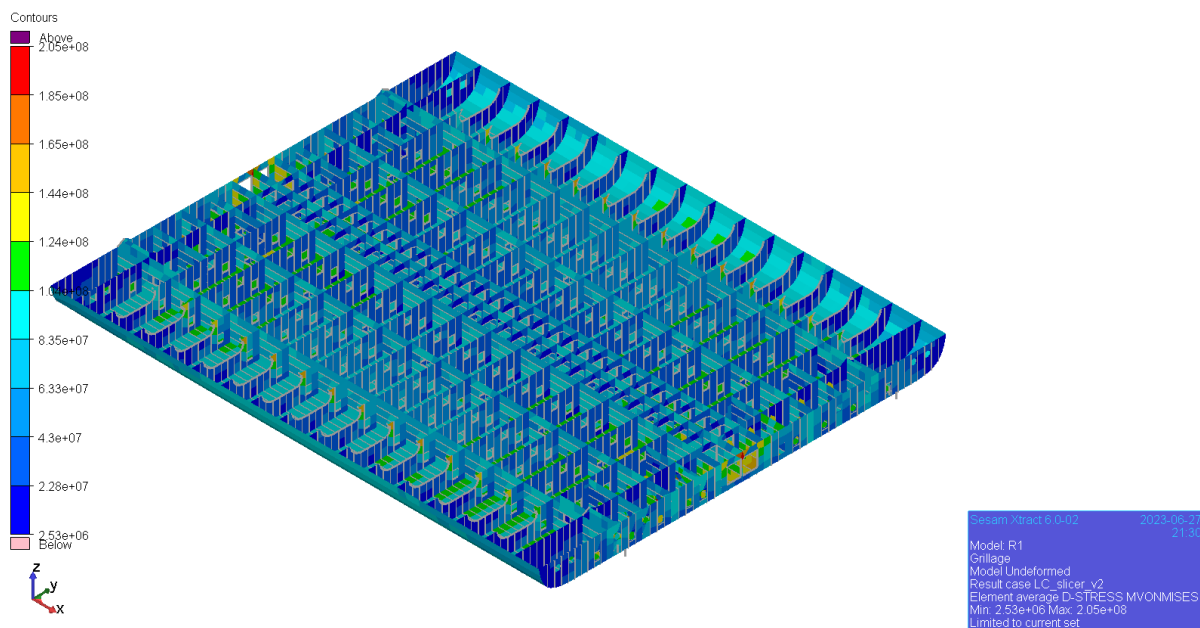
**Slika- C-VII VonMises naprezanja na vodonepropusnim pregrada [MPa]**



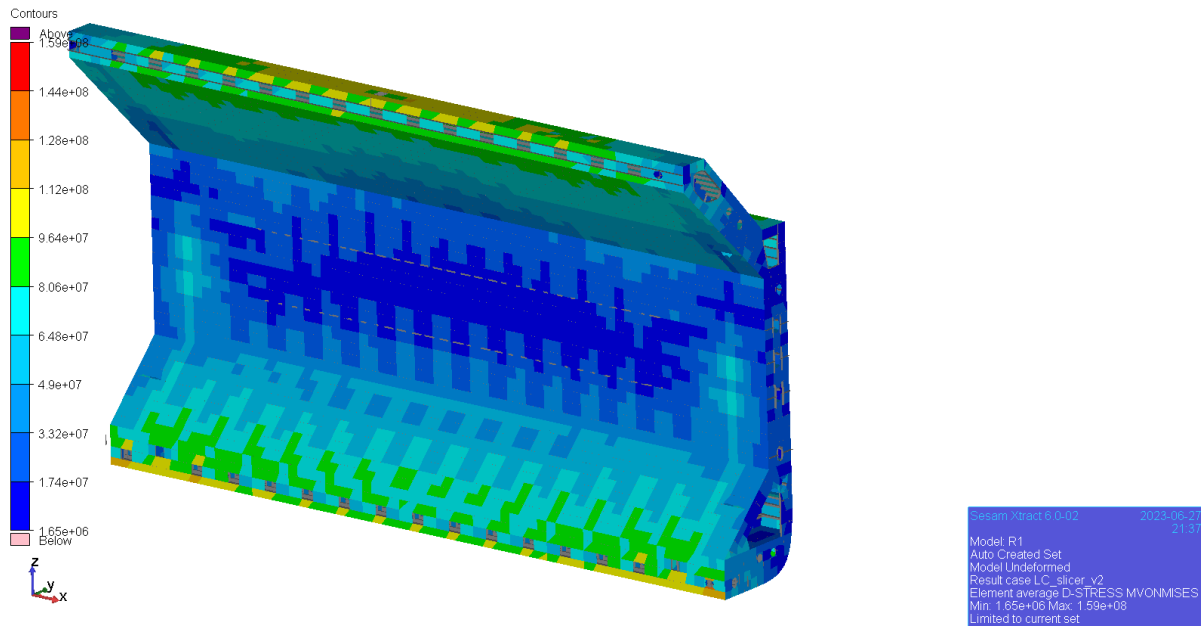
**Slika- C-VIII Prikaz VonMises naprezanja za okvirna rebra (rebro 89-102) [MPa]**



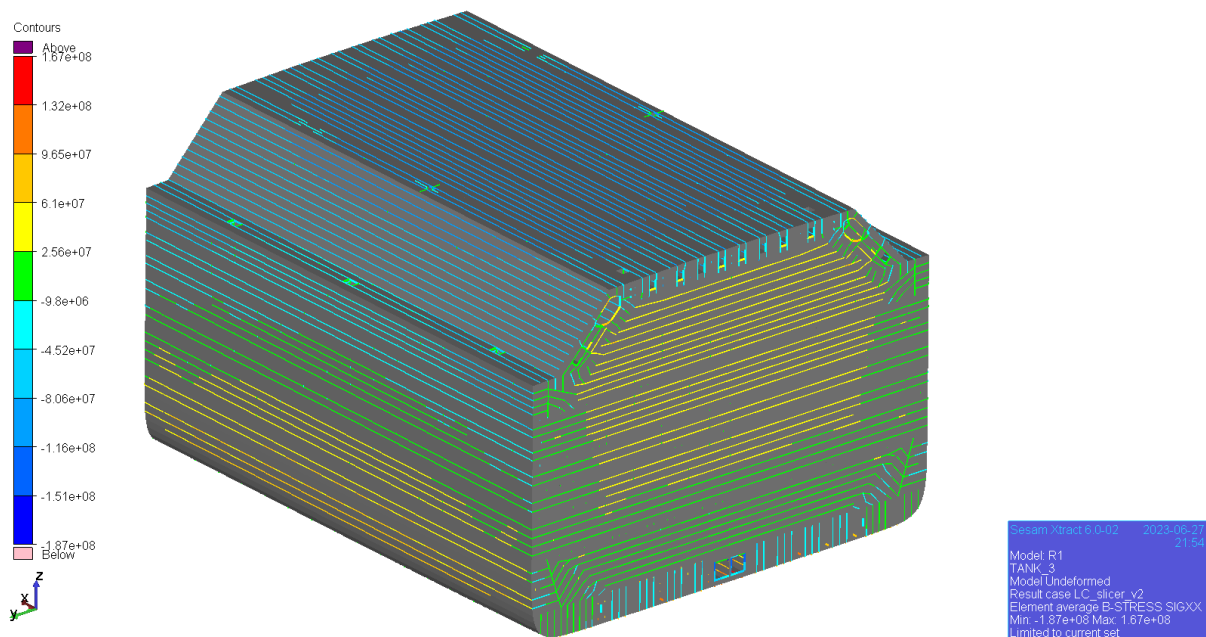
**Slika- C-IX VonMises naprezanja na jakim uzdužnim nosačima dna i palube kao i konstrukcije u koferdamu [MPa]**



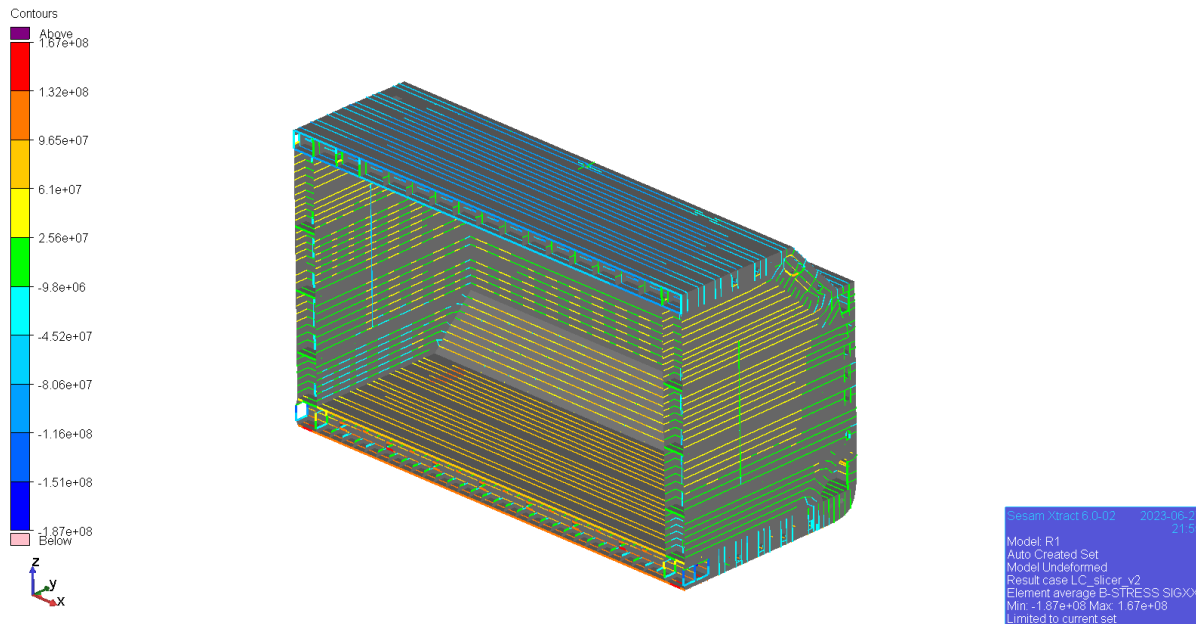
**Slika- C-X VonMises naprezanja u roštilju dvodna [MPa]**



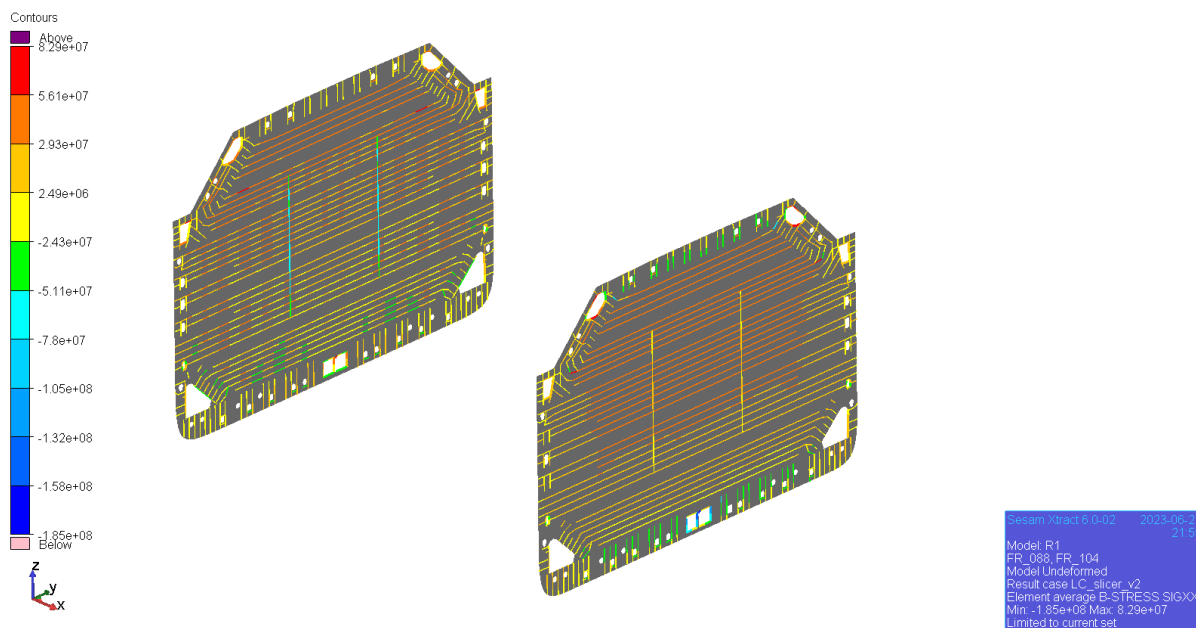
**Slika- C-XI VonMises naprezanja u području uzvojnog tanka i bočne stijenke tanka [MPa]**



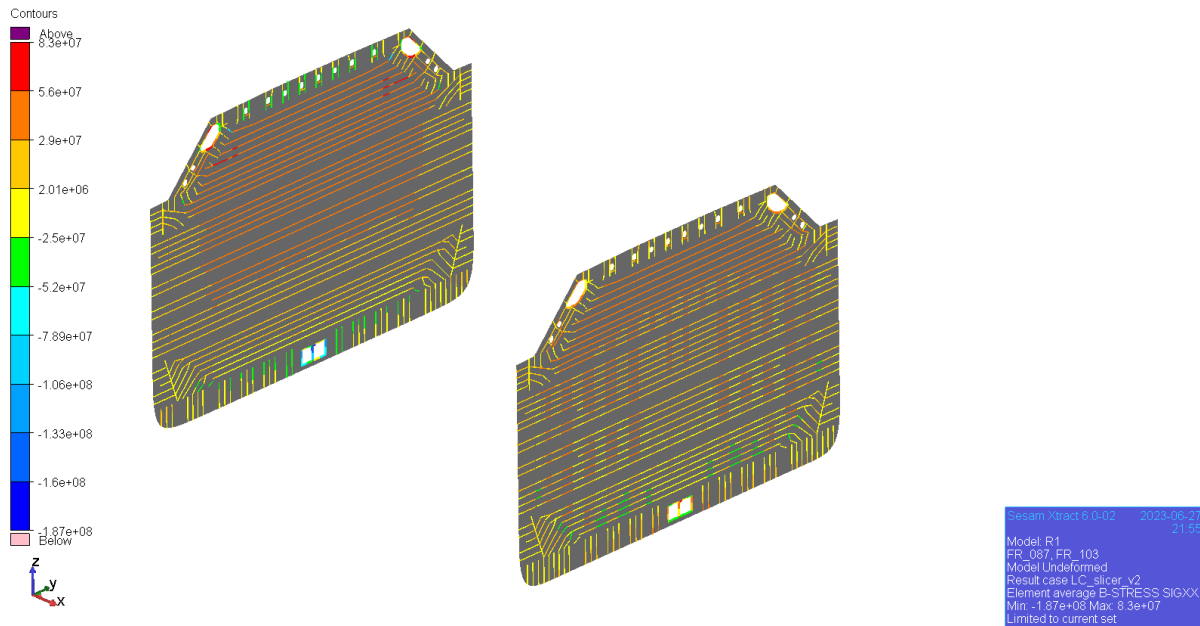
**Slika- C-XII Aksijalna naprezanja u grednim konačnim elementima srednjeg skladišta**



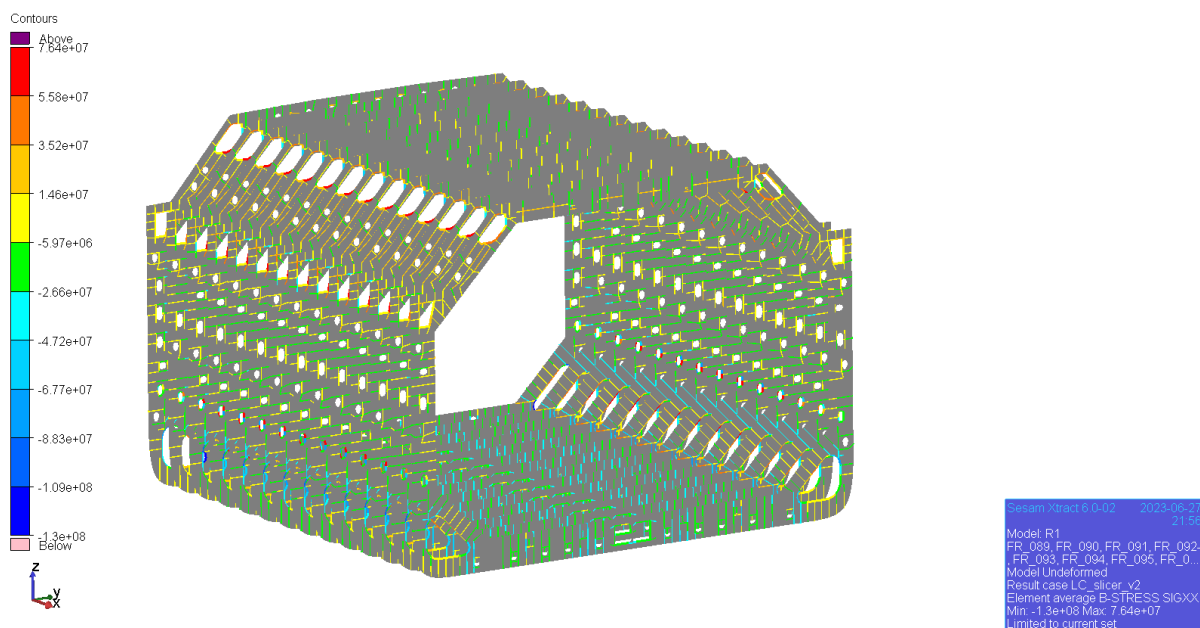
**Slika- C-XIII Aksijalna naprezanja u grednim konačnim elementima na poprečnom presjeku  $y = 0$  [MPa]**



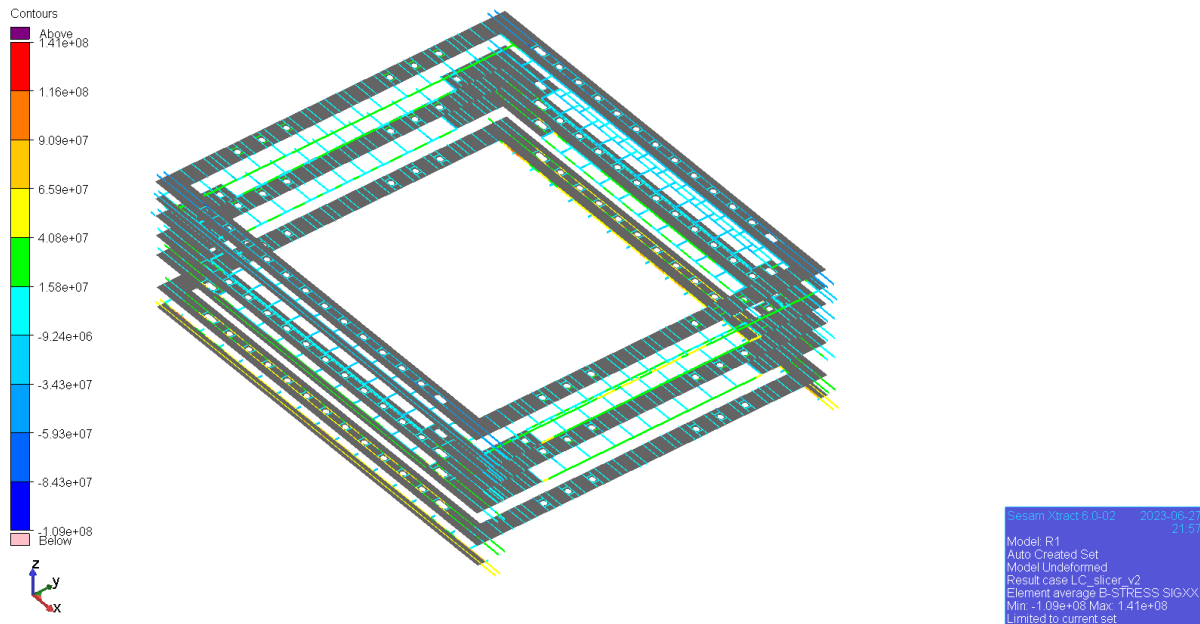
**Slika- C-XIV Aksijalna naprezanja u grednim konačnim elementima na vodonepropusnim poprečnim pregradama (rebro br. 88 i 104) [MPa]**



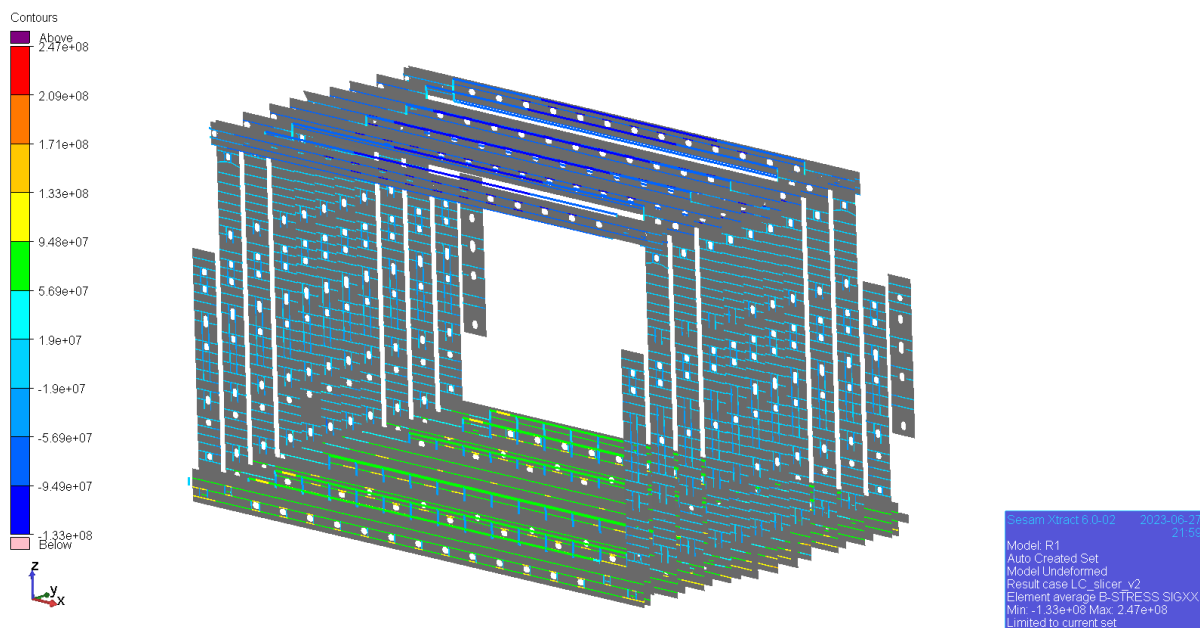
**Slika- C-XV Aksijalna naprezanja u grednim konačnim elementima na vodonepropusnim poprečnim pregradama (rebro br. 87 i 103) [MPa]**



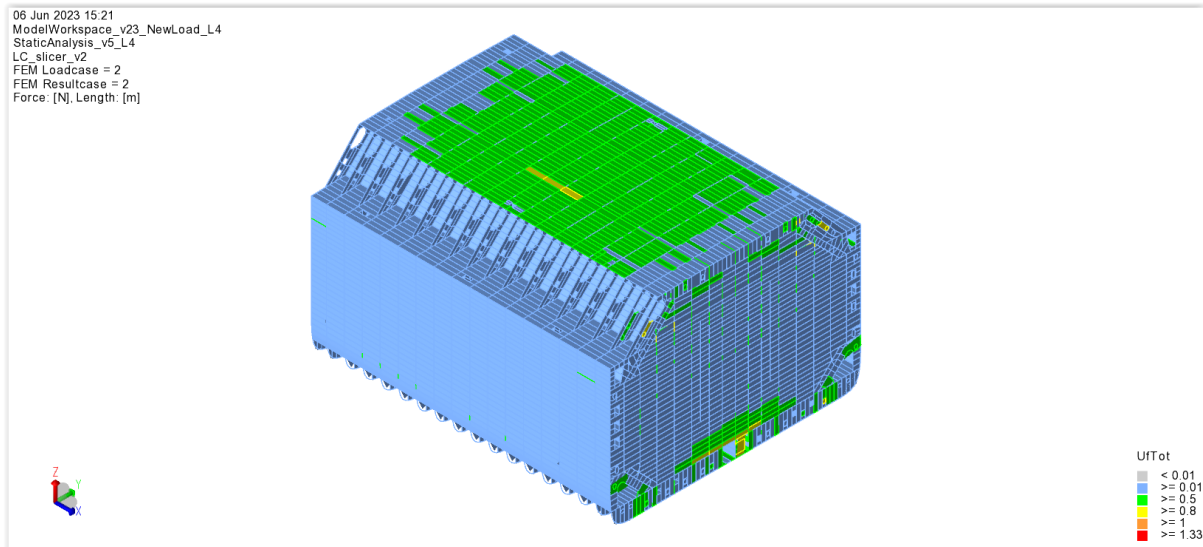
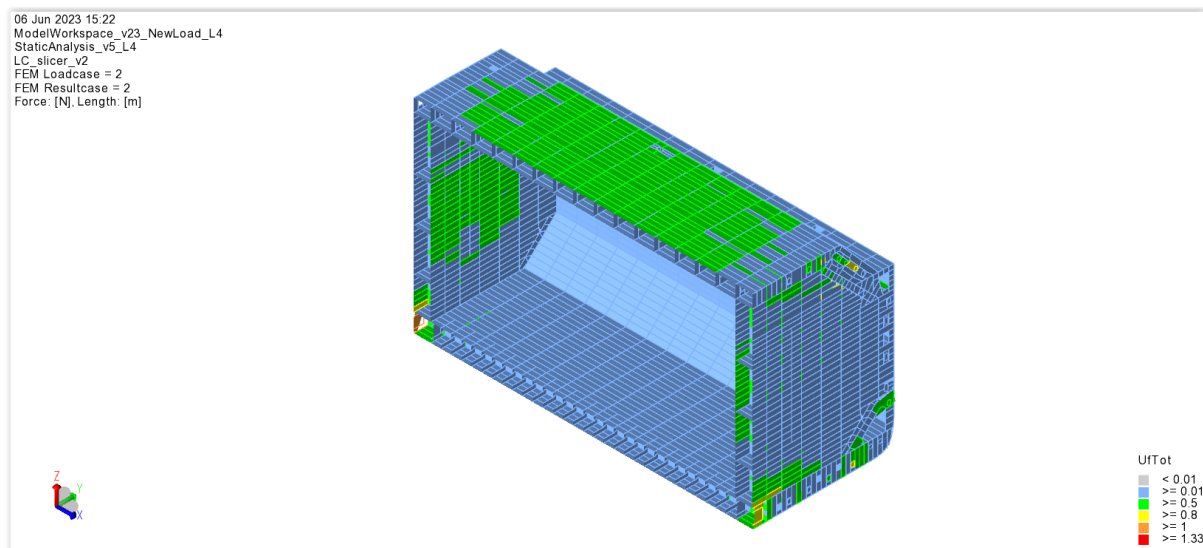
**Slika- C-XVI Aksijalna naprezanja u grednim konačnim elementima na okvirnim rebrima(rebra br. 89-102) [MPa]**



**Slika- C-XVII Aksijalna naprezanja u grednim konačnim elementima na jakim uzdužnim nosačima u dvoboku i pregradama [MPa]**



**Slika- C-XVIII Aksijalna naprezanja u grednim konačnim elementima na jakim uzdužnim nosačima u dvodnu, palubi i pregradama [MPa]**

**PRILOG D****Slika- D-I Ukupni faktor iskoristivosti (popuštanje + izvijanje) za slučaj opterećenja L3****Slika- D-II Ukupni faktor iskoristivosti (popuštanje + izvijanje) – polovinski model za slučaj opterećenja L3**