

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Juraj Rukavina**

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentori:

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

Student:

Juraj Rukavina

Zagreb, 2023.

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

Zahvaljujem se Prof. dr. sc. Jerolimu Andriću na uloženom trudu, vremenu i prenesenom znanju pri izradi ovog rada. Zahvaljujem se svojoj obitelji, djevojci i prijateljima na bezuvjetnom povjerenju i potpori.

Juraj Rukavina



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

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Juraj Rukavina** JMBAG: **0035 217777**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Projektiranje glavnog rebra riječnog broda za prijevoz tekućeg tereta**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Structural design of midship section of inland tanker**

Opis zadatka:

Potrebno je projektirati uzdužne konstrukcijske elemente glavnog rebra riječnog tankera tipa C (*Type C*) slijedećih izmjera:  $Loa=110$  m;  $B=11.4$  m;  $T=3$  m,  $IWW=0.6$ ,  $C_B=0.8$  i nosivosti oko 3 000 t, prema Pravilima Bureau Veritas-a (BV) i priloženom predlošku geometrije glavnog rebra.

U radu je potrebno :

- 1) Analizirati dostupnu literaturu i upoznati se s relevantnim Pravilima BV-a za dimenzioniranje konstrukcijskih elementa brodskog trupa u području teretnog prostora.
- 2) Dimenzionirati sve uzdužne konstrukcijske elemente s obzirom na zahtjeve za globalnom i lokalnom čvrstoćom. Proračun provesti koristeći program MARS-Inland klasifikacijskog društva BV-a.
- 3) Predložiti nekoliko varijanti s različitim razmacima okvirnih rebara te različitim razmakom uzdužnjaka. Za sve predložene varijante dimenzionirati konstrukcijske elemente tako da svi kriteriji čvrstoće (popuštanje i izvijanje) budu zadovoljeni. Težiti konstrukciji minimalne mase.
- 4) Usporediti rezultate s obzirom na postignutu masu konstrukcije i moment otpora glavnog rebra.
- 5) Konstrukcijske dimenzije odabrane varijante usporediti s onom iz predloška projektiranom po Pravilima HRB-a.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć

Zadatak zadan:

30. 11. 2022.

Datum predaje rada:

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

Predvideni datumi obrane:

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

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Jerolim Andrić

Predsjednik Povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Ivan Čatipović

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE .....	IV
POPIS OZNAKA .....	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY .....	VII
1. UVOD.....	1
2. PROJEKTNI ZADATAK.....	3
2.1. Definirane varijanti modela .....	3
2.2. Definiranje modela u Mars Inland programu.....	4
2.2.1. Ulazni podatci za brod .....	4
2.2.2. Generiranje panela .....	6
2.2.3. Generiranje čvorova.....	6
2.2.4. Generiranje vojeva .....	7
2.2.5. Generiranje uzdužnjaka.....	8
2.2.6. Generiranje poprečnih elemenata.....	9
2.3. Proračun korištenjem programa Mars Inland.....	10
2.3.1. Rezultati i redimenzioniranje konstrukcijskih elemenata .....	11
3. ANALIZA REZULTATA .....	14
3.1. Proračun sponje.....	14
3.2. Sumiranje dobivenih rezultata .....	16
3.3. Usporedba referentnog i odabranog modela .....	18
4. UZDUŽNA GRANIČNA ČVRSTOĆA .....	22
4.1. Proračun uzdužne čvrstoće.....	22
5. ZAKLJUČAK.....	25
LITERATURA.....	26
PRILOZI.....	27

**POPIS SLIKA**

Slika 1.	Unos glavnih dimenzija.....	4
Slika 2.	Unos globalnih momenata savijanja i gaza .....	5
Slika 3.	Definiranje materijala modela .....	5
Slika 4.	Panel vanjske oplata sa svojim karakteristikama .....	6
Slika 5.	Definiranje čvorova .....	7
Slika 6.	Generiranje vojeva .....	8
Slika 7.	Generiranje uzdužnjaka .....	9
Slika 8.	Generiranje rebra .....	10
Slika 9.	Prozor za definiranje proračuna .....	11
Slika 10.	Lokalna čvrstoća za vojeve .....	12
Slika 11.	Lokalna čvrstoća za uzdužnjake.....	12
Slika 12.	Faktor iskoristivosti vojeva (lokalno).....	13
Slika 13.	Faktor iskoristivosti uzdužnjaka (lokalno) .....	13
Slika 14.	Sučelje Alata za rješavanje s unesenim ograničenjima za proračun .....	16
Slika 15.	Zavisnost mase tanka o razmaku uzdužnjaka.....	18
Slika 16.	Udio pojedinih konstrukcijskih elemenata u ukupnoj masi referentnog modela ..	20
Slika 17.	Udio pojedinih konstrukcijskih elemenata u ukupnoj masi odabranog modela....	21
Slika 18.	M- $\chi$ krivulja.....	24

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Varijante predloženih modela .....	3
Tablica 2. Proračun momenta otpora sponje referentnog modela.....	14
Tablica 3. Proračun momenta otpora sponje za razmak okvira $w = 1479$ mm .....	15
Tablica 4. Suma masa po svim varijantama .....	17
Tablica 5. Usporedba masa referentnog i odabranog modela .....	18
Tablica 6. Usporedba debljina limova po zonama .....	19
Tablica 7. Usporedba profila na presjeku glavnog rebra.....	19

---

## **POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE**

- 1 Geometrija presjeka glavnog rebra
- 2 Uzdužnjaci i poprečni elementi na običnom rebru
- 3 Raskroj limova na glavnom rebru
- 4 Presjek na okvirnom rebru  $w = 1479 \text{ mm}$



**POPIS OZNAKA**

Oznaka	Jedinica	Opis
$L$	[m]	Računska duljina broda
$B$	[m]	Širina broda
$T$	[m]	Gaz broda
$D$	[m]	Visina broda
$V$	[čv]	Brzina broda
$s$	[mm]	Razmak uzdužnjaka
$w$	[mm]	Razmak okvirnih rebara
$M_{sw}$	[kNm]	Maksimalni moment savijanja na mirnoj vodi
$M_{wv}$	[kNm]	Maksimalni moment savijanja na valovima
$M_U$	[kNm]	Granični moment savijanja
$\gamma_S$		Parcijalni faktor sigurnosti za moment savijanja na mirnoj vodi
$\gamma_W$		Parcijalni faktor sigurnosti za moment savijanja na valovima
$\gamma_R$		Parcijalni faktor sigurnosti graničnog vertikalnog momenta savijanja
$\gamma_M$		Parcijalni faktor sigurnosti za vertikalni granični moment savijanja, uzima u obzir nesigurnosti vezane uz materijal i geometrijske karakteristike
$\gamma_{DB}$		Parcijalni faktor sigurnosti za vertikalni granični moment savijanja, uzima u obzir utjecaj savijanja dvostrukog dna
$\rho_{\check{c}}$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Gustoća čelika
$m$	[kg]	Masa
$b_f$	[mm]	Širina prirubnice nosača
$t_f$	[mm]	Debljina prirubnice nosača
$h_w$	[mm]	Visina struka nosača
$t_w$	[mm]	Debljina struka nosača
$b_p$	[mm]	Širina opločenja koja efektivno sudjeluje u savijanju nosača
$t_p$	[mm]	Debljina opločenja, prirubnice nosača
$\chi$	[rad]	Zakrivljenost trupa

**SAŽETAK**

U ovom radu je projektirano glavno rebro broda za prijevoz tekućeg tereta u unutarnjoj plovidbi. Analiziran je referentni model dimenzioniran prema pravilima Hrvatskog registra brodova te druge varijante koje su proizašle iz tog modela. Variranjem razmaka uzdužnjaka i okvira analiziran je utjecaj na pojedine konstrukcijske elemente. Naglasak u samoj analizi je na procjeni mase.

Nakon modeliranja i analiziranja referentnog modela napravljeno je redimenzioniranje konstrukcijskih elemenata programom Mars Inland u kojemu su implementirana pravila “Rules for the Classification of Inland Navigation Vessels“. Nakon redimenzioniranja predložene su dodatne varijante s različitim razmacima uzdužnjaka i okvira kako bi se za konceptualnu fazu konstruiranja broda pronašla pogodna varijanta koja bi poslužila kao polazna točka za razvoj broda. Dimenzije okvira i rebrenica su preuzete iz tehničkih nacrti za referentni model Hrvatskog registra brodova.

S obzirom na procjenu mase, među predloženim varijantama odabrana je varijanta koja teži najmanjoj masi i uspoređena je s referentnim modelom. Nakon analize je razmotren zahtjev uzdužne čvrstoće na primjeru glavnog rebra odabranog modela.

Ključne riječi: unutarnja plovidba, projektiranje brodske konstrukcije, tanker za prijevoz tekućeg tereta, minimalna masa, razmak okvirnih rebara, razmak uzdužnjaka, granična čvrstoća, Bureau Veritas

---

**SUMMARY**

In this paper has been made structural design of ship midsection of inland tanker. Reference model designed by the rules of Croatian Register of Shipping and the other suggested models have been analysed. By varying the spacing of longitudinals and web frames it has been analyzed how they affect on certain groups of construction elements. The emphasis was on assessment of construction mass.

Redimensionating of construction elements has been made after modeling and analysing reference model. Redimensionating has been carried out with the help of Mars Inland program which has Bureau Veritas “Rules for the Classification of Inland Navigation Vessels“ implemented in itself. After redimensionating, other variations have been given with changed spacing of frames and longitudinals so the favorable variant could serve as starting point for conceptual phase of ship development. Dimensions of web frame and floor have been taken from reference model made by Croatian Register of Shipping.

With respect to carried out analysis of construction mass, favorable variation has been selected and compared to reference model. After analysis, ultimate longitudinal strength of ship hull criteria has been observed on the example of main frame of selected favorable variant.

Key words: inland navigation, ship structure design, liquid cargo tanker, minimum mass, web frame spacing, longitudinals spacing, ultimate longitudinal strength, Bureau Veritas

## 1. UVOD

Prijevoz brodom je danas najzastupljeniji način prijevoza sirovina, ljudi, materijala i ostalih dobara. Danas, uz brojne energetske i ekonomske zahtjeve, cilj je smanjiti potrošnju energije i materijala potrebnih za dobivanje željene konstrukcije koja će moći sigurno i efikasno obavljati predviđenu zadaću. Zbog efikasnosti i mogućnosti prijevoza tereta brodovima, danas je cilj sve više raširiti takav tip prijevoza. Prijevoz tereta rijekama, kanalima, jezerima pokazao se značajno jeftinijim i ekološki prihvatljivijim vidom transporta naspram ostalih tipova prijevoza robe posebno u usporedbi s cestovnim prometom. To je dovelo do značajnog razvoja unutarnje plovidbe. Više od 37000 kilometara vodenih puteva povezuje gradove i industrijske regije. Transport unutarnjom plovidbom predstavlja kompetitivnu alternativu cestovnom i željezničkom transportu. Konkretno, pruža ekološki prihvatljivu alternativu i u vidu potrošnje energije i emisije buke. Energetska potrošnja prema km/t prevezene robe čini otprilike 17% one od cestovnog transporta i 50% željezničkog transporta. Povrh svega, unutarnja plovidba osigurava visoku razinu sigurnosti, posebice u prijevozu opasnog tereta. Doprinosi i rasterećivanju preopterećenih cesta u jako napučenim regijama[1].

Brodovi su u ovom načinu plovidbe značajno manje opterećeni jer najčešće nema velikih naleta vjetrova, prelijevanja palube vodom i značajne valne visine su u pravilu manje nego na otvorenim morima. S obzirom na nerijetko manja opterećenja u usporedbi s brodovima za plovidbu otvorenim morima, mnogi konstrukcijski elementi su manjih dimenzija što dovodi do ušteda.

Pri konstrukciji broda potrebno je smanjiti ukupne troškove proizvodnje a maksimizirati iskoristivi prostor u brodu za prijevoz tereta. U konceptualnoj fazi je potrebno predložiti nekoliko varijanti glavnog rebra broda za prijevoz tekućeg tereta pri čemu se varira razmak uzdužnjaka i okvirnih rebara. Teži se projektiranju konstrukcije minimalne mase. Konstrukcijski elementi su dimenzionirani prema pravilima "Rules for the Classification of Inland Navigation Vessels" klasifikacijskog društva Bureau Veritas koja vrijede za sve brodove s ugovorima za izgradnju potpisanima 6. lipnja 2021. godine ili kasnije.

Definiranje zadatka i projektnih parametara je opisano u drugom poglavlju. Opisan je i postupak definiranja modela u programu Mars Inland.

U trećem poglavlju su sumirani rezultati svih varijanti te je odabran model konstrukcije koji teži minimalnoj masi. Provedena je analiza i usporedba između referentnog modela proračunatog prema pravilima Hrvatskog registra brodova i odabranog modela koji teži

minimalnoj masi prema pravilima Bureau Veritasu. Analiza mase je provedena na temelju jednog tanka odnosno teretnog prostora. Priloženi su i tehnički nacrti odabranog redimenzioniranog modela prema Bureau Veritasu.

U četvrtom poglavlju je napravljen kratak pregled problema granične čvrstoće trupa broda i analize navedenog problema na primjeru odabrane konstrukcije glavnog rebra uz pomoć programa Mars2000.

U petom poglavlju je izveden zaključak na temelju dobivenih rezultata i provedene analize.

## 2. PROJEKTNI ZADATAK

Cilj ove studije je predložiti nekoliko modela glavnog rebra riječnog tankera za prijevoz tekućeg tereta od kojih će na kraju biti odabrana varijanta koja teži minimalnoj masi. Dimenzioniranje svih konstrukcijskih elemenata je provedeno u računalnom programu Mars Inland. U svim varijantama su zadovoljeni uvjeti lokalne i globalne čvrstoće. Polazišna točka pri modeliranju i razvoju svih modela je bio model glavnog rebra s konstrukcijskim elementima definiranim prema Pravilima Hrvatskog registra brodova (HRB). Ulazni podatci i glavne dimenzije broda, preuzete od strane Hrvatskog registra brodova, su sljedeće:

$$L = 106.254 \text{ m}$$

$$B = 11.400 \text{ m}$$

$$T = 3.200 \text{ m}$$

$$D = 4.580 \text{ m}$$

$$C_B = 0.923$$

$$V = 9.5 \text{ čv}$$

nosivosti oko 3000 DWT

### 2.1. Definirane varijanti modela

U tablici 1. nalazi se dvanaest različitih varijanti odnosno kombinacija razmaka okvira ( $w$ ) i razmaka uzdužnjaka ( $s$ ) prema kojima će se definirati modeli u programu Mars Inland.

**Tablica 1. Varijante predloženih modela**

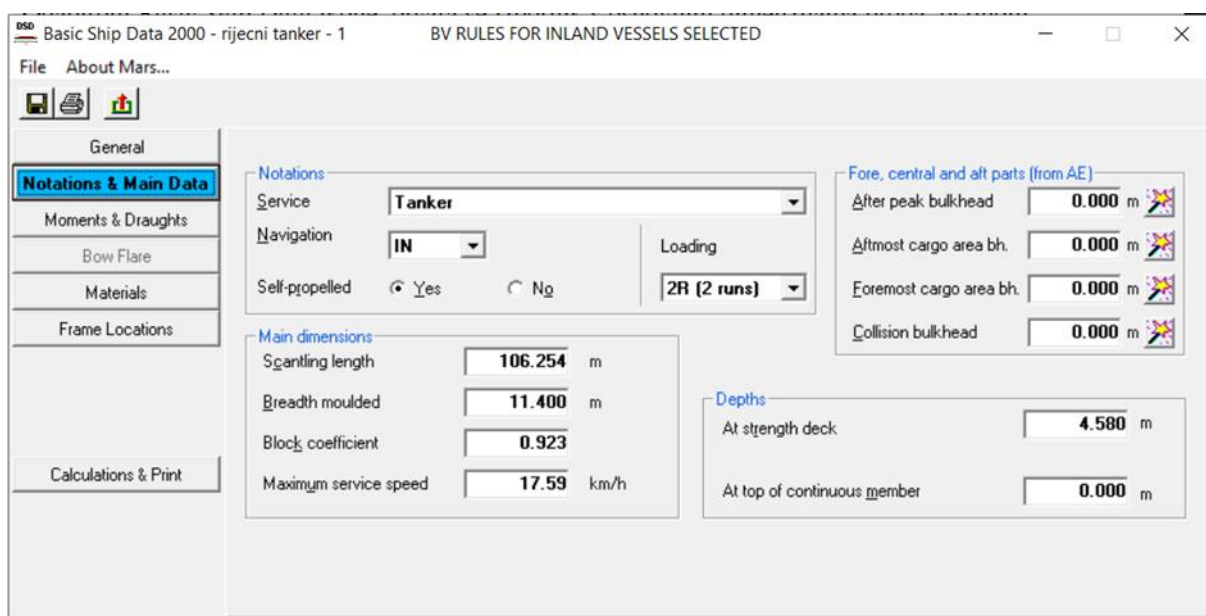
varijanta	$w$ [mm]	$s$ [mm]
1	2070	468
2		520
3		670
4		780
5	1725	468
6		520
7		670
8		780
9	1479	468
10		520
11		670
12		780

## 2.2. Definiranje modela u Mars Inland programu

U ovom radu je korišten softver Mars Inland razvijen od strane klasifikacijskog društva Bureau Veritas. U njemu su implementirana Pravila za klasifikaciju polovila za unutarnju plovidbu. Može se koristiti za proračun geometrijskih karakteristika presjeka, granične čvrstoće trupa, lokalne čvrstoće oplata i ukrepa.

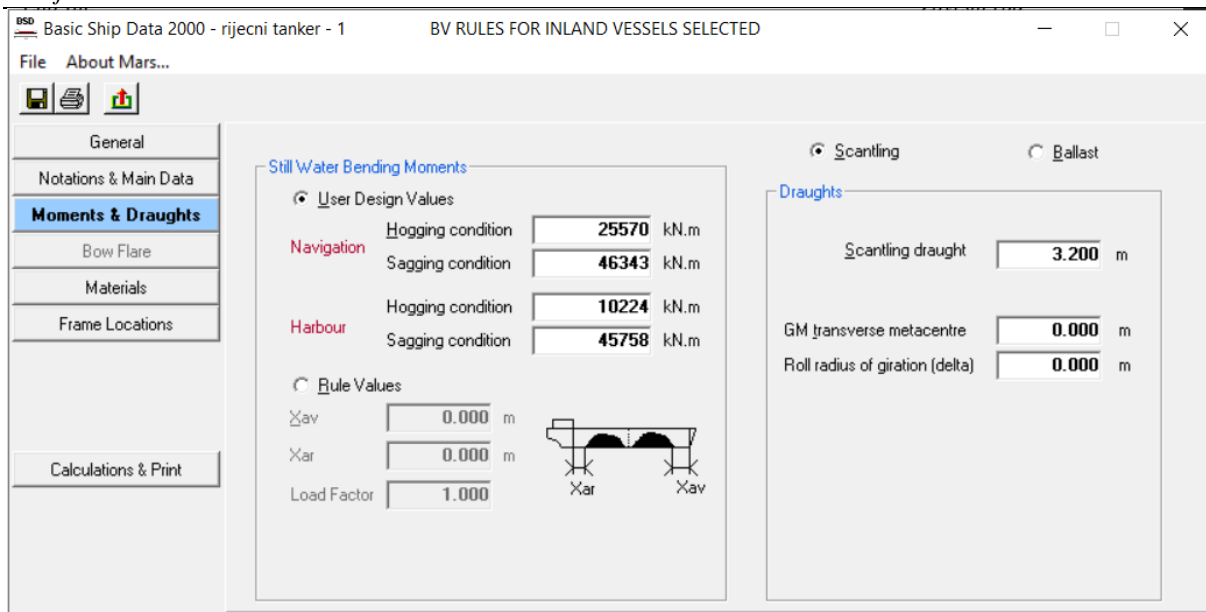
### 2.2.1. Ulazni podatci za brod

Pokretanjem računalnog programa Mars Inland i biranjem opcije *Basic Ship Data* otvaraju se prozori u kojim je potrebno unijeti glavne izmjere broda, blok koeficijent, brzinu broda, globalne momente savijanja na mirnoj vodi te definirati materijale koji će se koristiti.



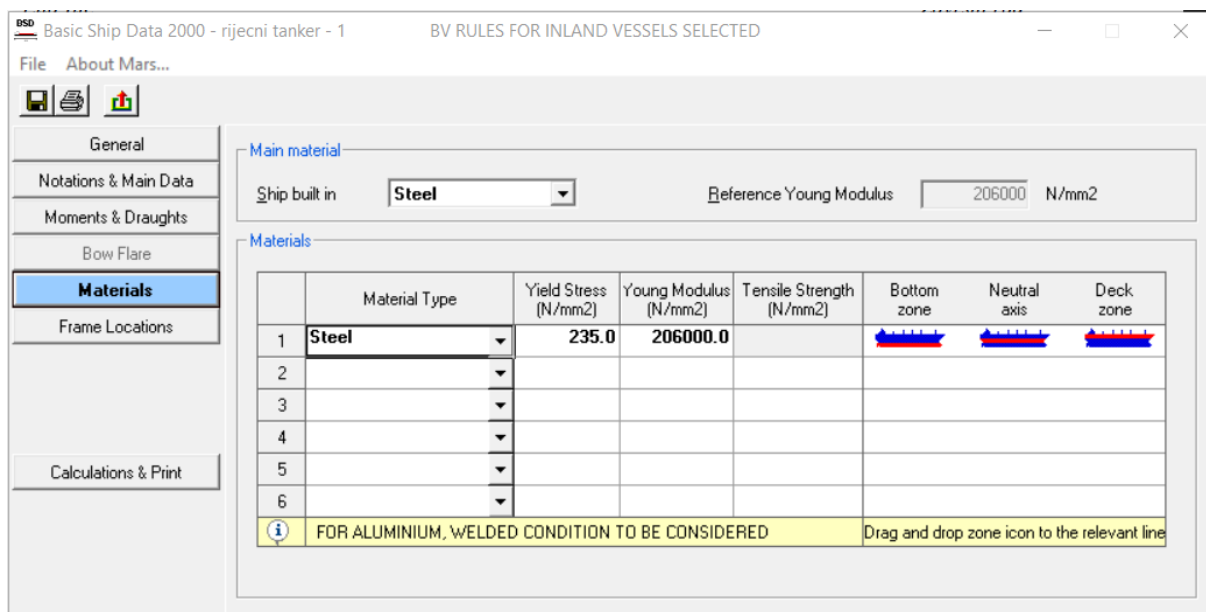
The screenshot shows the 'Basic Ship Data 2000 - rijecni tanker - 1' window with 'BV RULES FOR INLAND VESSELS SELECTED'. The 'Notations & Main Data' tab is active. The 'Notations' section includes Service (Tanker), Navigation (IN), and Self-propelled (Yes). The 'Loading' section is set to '2R [2 runs]'. The 'Main dimensions' section shows Scantling length (106.254 m), Breadth moulded (11.400 m), Block coefficient (0.923), and Maximum service speed (17.59 km/h). The 'Depths' section shows 'At strength deck' (4.580 m) and 'At top of continuous member' (0.000 m). The 'Fore, central and aft parts (from AE)' section shows 'After peak bulkhead', 'Aftmost cargo area bh.', 'Foremost cargo area bh.', and 'Collision bulkhead', all set to 0.000 m.

Slika 1. Unos glavnih dimenzija



**Slika 2. Unos globalnih momenata savijanja i gaza**

Momenti savijanja na mirnoj vodi su definirani za stanje u luci i za stanje plovidbe. Podatci su ustupljeni od strane Hrvatskog registra brodova.



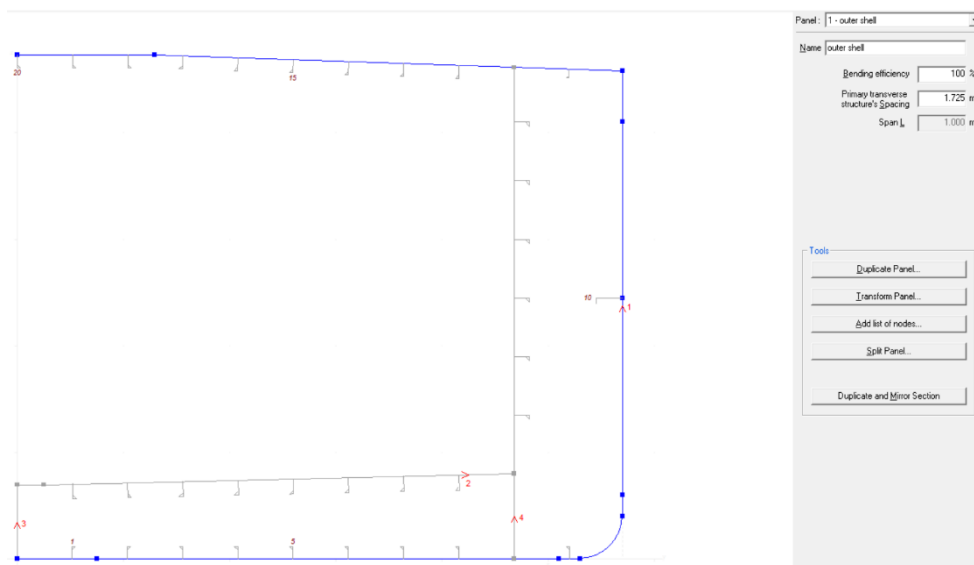
**Slika 3. Definiranje materijala modela**

U ovom radu je korišten isključivo običan brodograđevni čelik ST24 s granicom razvlačenja 235 N/mm<sup>2</sup>.



### 2.2.2. Generiranje panela

Definiranje presjeka započinje odabirom tipke *Edit*. Odabirom tipke *Panels* otvara se prozor u kojem se definiraju karakteristike panela.

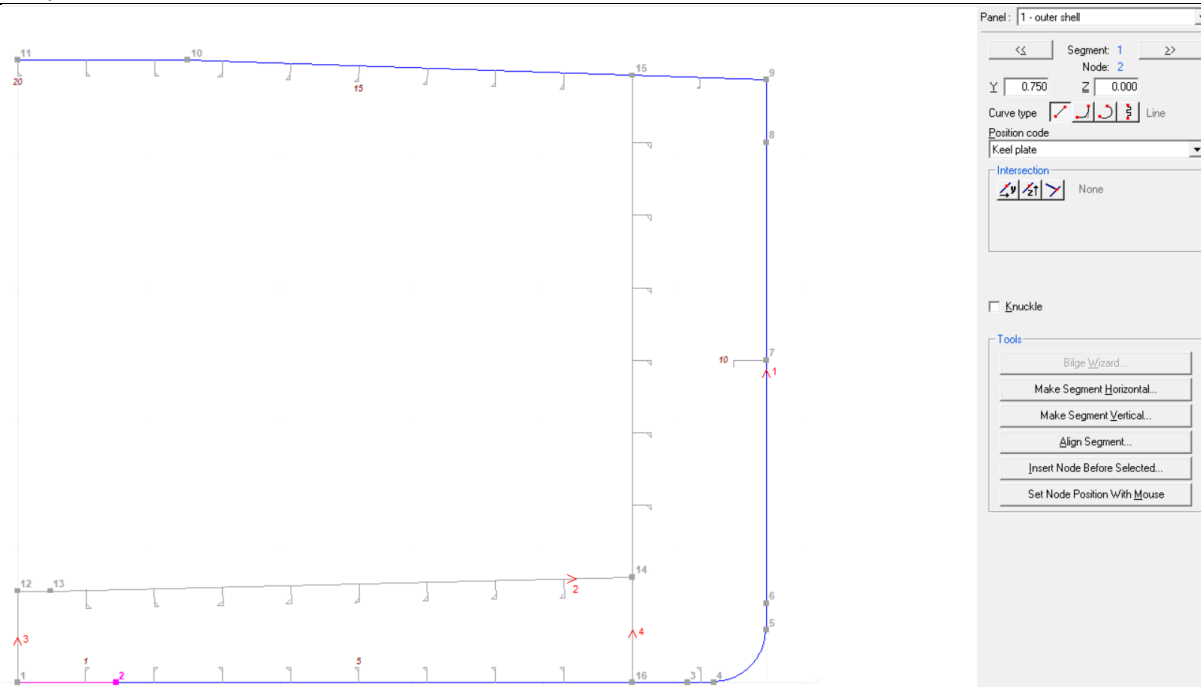


**Slika 4. Panel vanjske oplata sa svojim karakteristikama**

Na desnoj strani slike 4. vidi se naziv odabranog panela s pripadnim postotkom koji označava sudjelovanje u graničnoj čvrstoći te razmak između oslonaca koji, u slučaju ovog projektnog zadatka varira, s obzirom na razmak okvira.

### 2.2.3. Generiranje čvorova

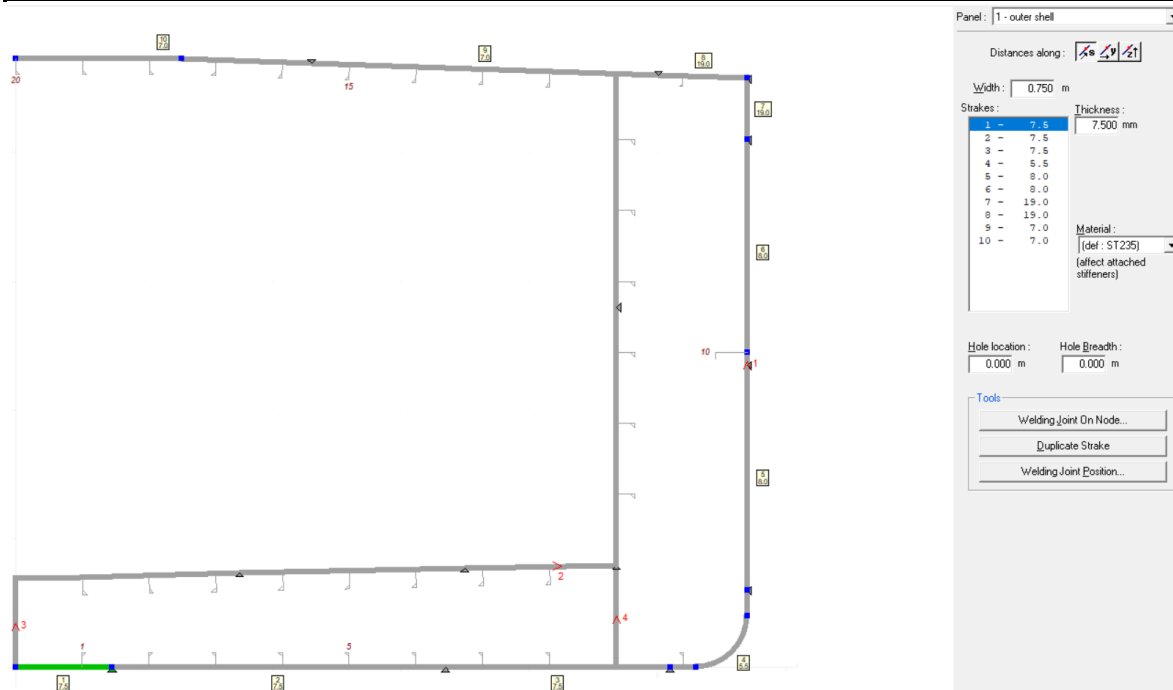
U programu Mars Inland je bitno adekvatno generirati čvorove s obzirom da su oni referentni za vojeve i uzdužnjake generiranog modela. Čvorovi se nalaze na karakterističnim točkama modela, najčešće je to spoj različitih konstrukcijskih elemenata ili panela različitih karakteristika. Čvorovi se definiraju X i Y koordinatama i tipom krivulje. Također je iznimno bitno definirati *Position code* koji služi programu da provede proračun po pripadajućim pravilima za određeni konstrukcijski element.



**Slika 5. Definiranje čvorova**

#### 2.2.4. Generiranje vojeva

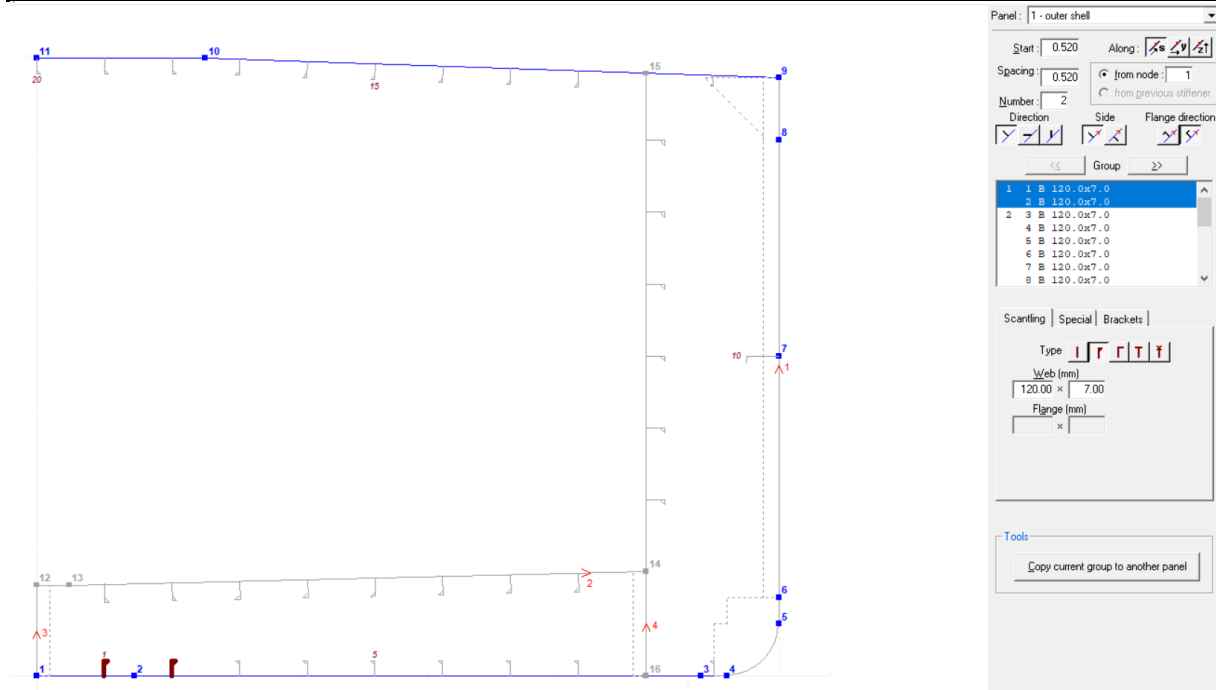
Odabirom tipke *Strakes* ulazi se u prozor za definiranje vojeva. Pri generiranju vojeva definiraju se širina, debljina i materijal. Kod definiranja vojeva je bitno obratiti pažnju na definiranje širine lima s obzirom da su limovi standardnih dimenzija, najčešće ne širi od tri metra. Također treba pripaziti da ne dođe do gomilanja zavora. Materijal voja ne definira nužno i materijal uzdužnjaka koji će biti definirani na tom voju. Na slici 6. je vidljivo sučelje programa pri definiranju vojeva i mogućnosti promjene određenih parametara vojeva.



Slika 6. Generiranje vojeva

### 2.2.5. Generiranje uzdužnjaka

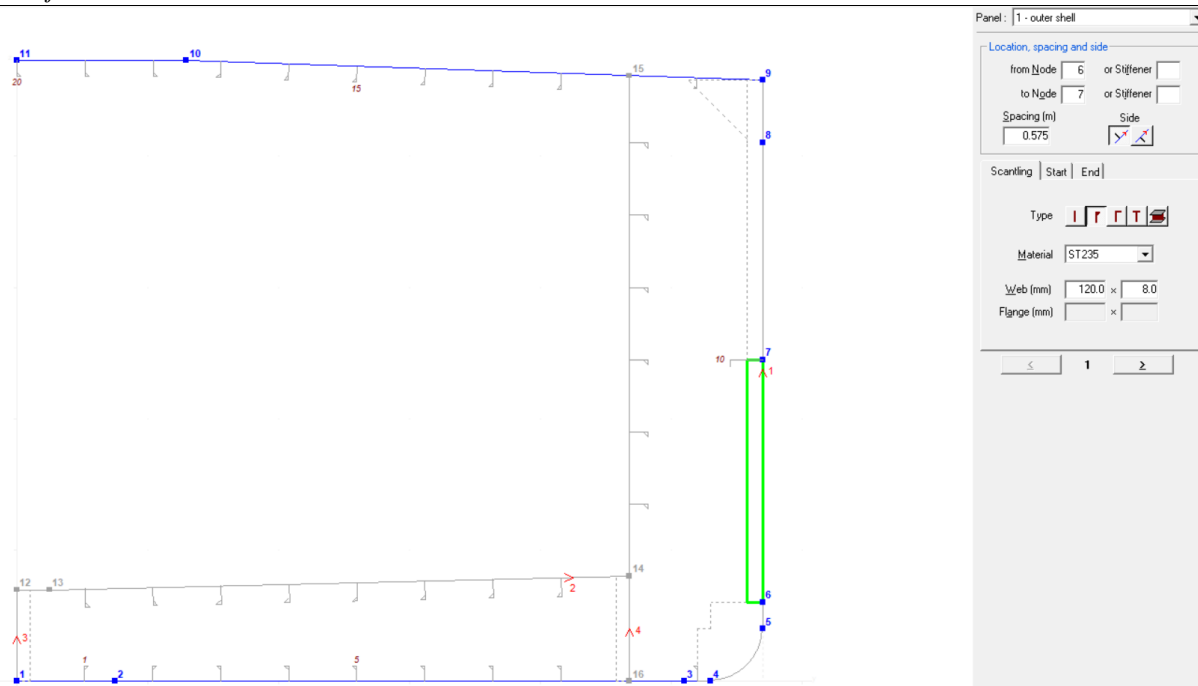
Tipkom *Longitudinal stiffeners* počinje generiranje uzdužnjaka. Definiraju se s obzirom na jedan od prije definiranih čvorova ili prethodno generirani uzdužnjak. Parametri potrebni za definiranje uzdužnjaka su početne koordinate, razmak i broj uzdužnjaka, smjer i orijentacija, smjer flanže te sam tip uzdužnjaka. Mars proračunava svaki uzdužnjak zasebno no praksa je da se grupiraju po određenim vojevima.



Slika 7. Generiranje uzdužnjaka

### 2.2.6. Generiranje poprečnih elemenata

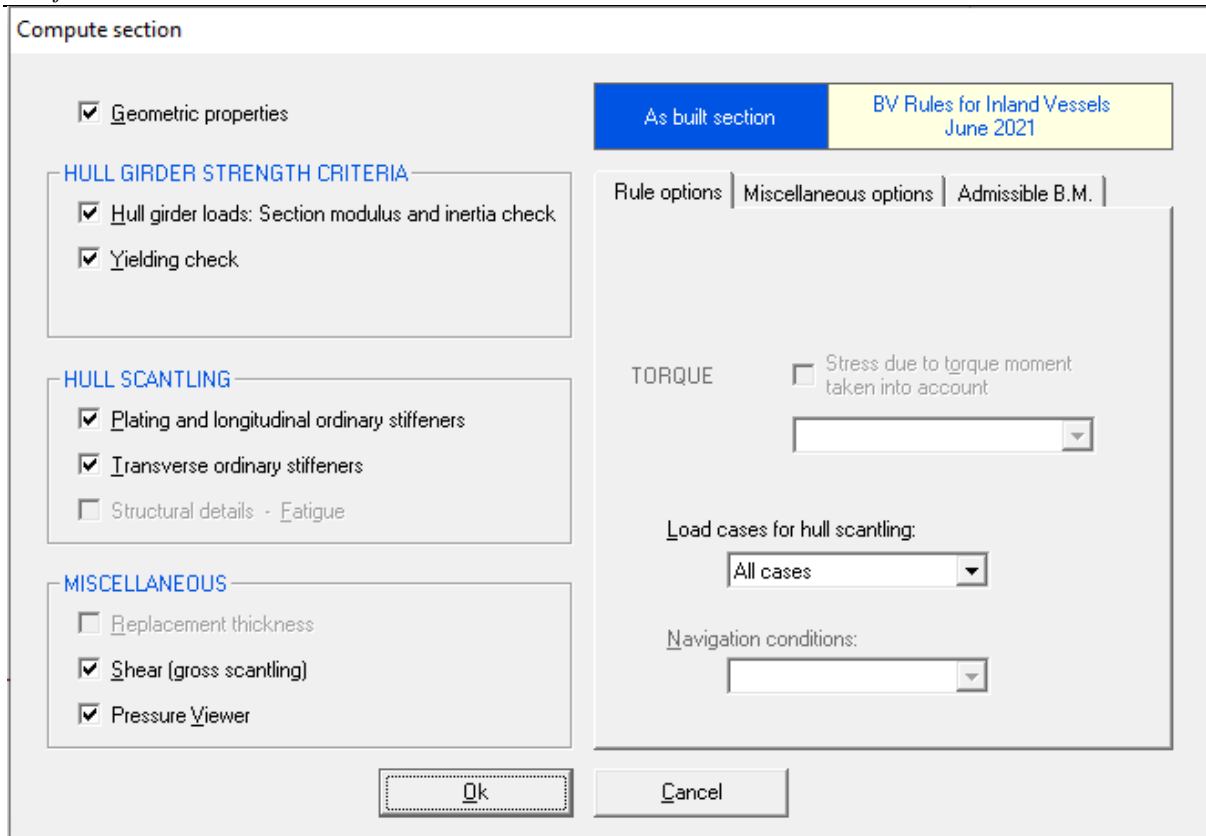
Program Mars Inland je prvenstveno program za proračun uzdužnih elemenata no moguće je i definirati poprečne elemente kao što su rebra, koljena i ukrepe okvira. Ulaskom u *Transverse stiffening* počinje definiranje poprečnih elemenata. Postoji određena analogija s definiranjem uzdužnjaka. Potrebno je definirati početak poprečnog elementa (od čvora ili od ukrepe), razmak te vrstu poprečnog elementa i pripadna koljena ako je potrebno. Na slici 8. se vidi sučelje programa pri definiranju rebra na modelu.



Slika 8. Generiranje rebra

### 2.3. Proračun korištenjem programa Mars Inland

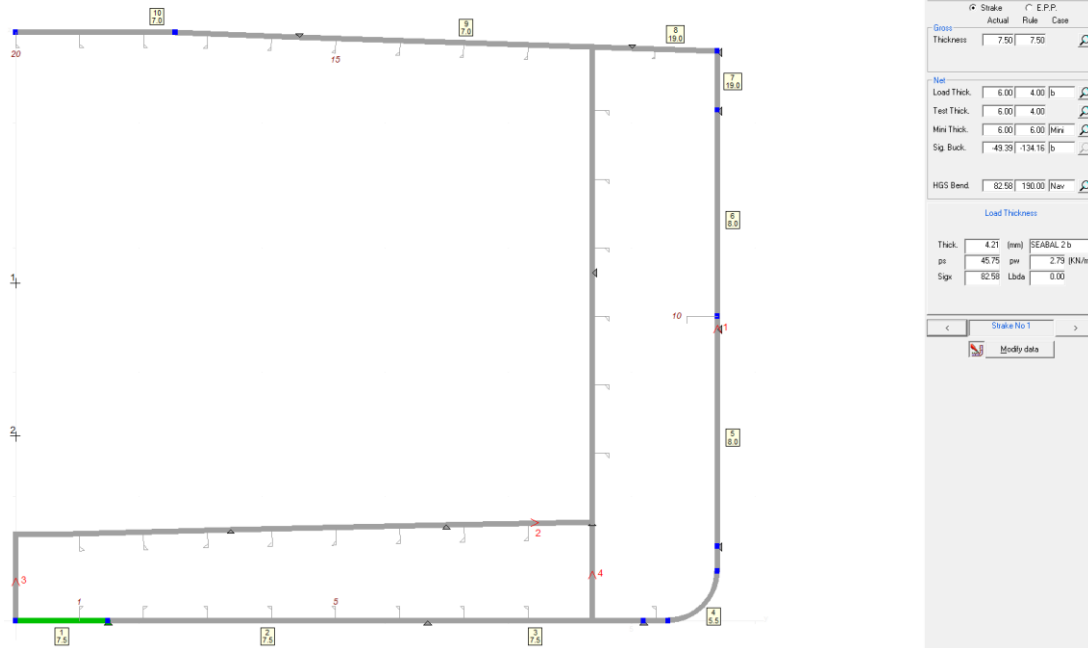
Korištenjem opcije *Rule* provodi se proračun konstrukcijskih elemenata prema pravilima klasifikacijskog društva Bureau Veritas za brodove u unutarnjoj plovidbi.



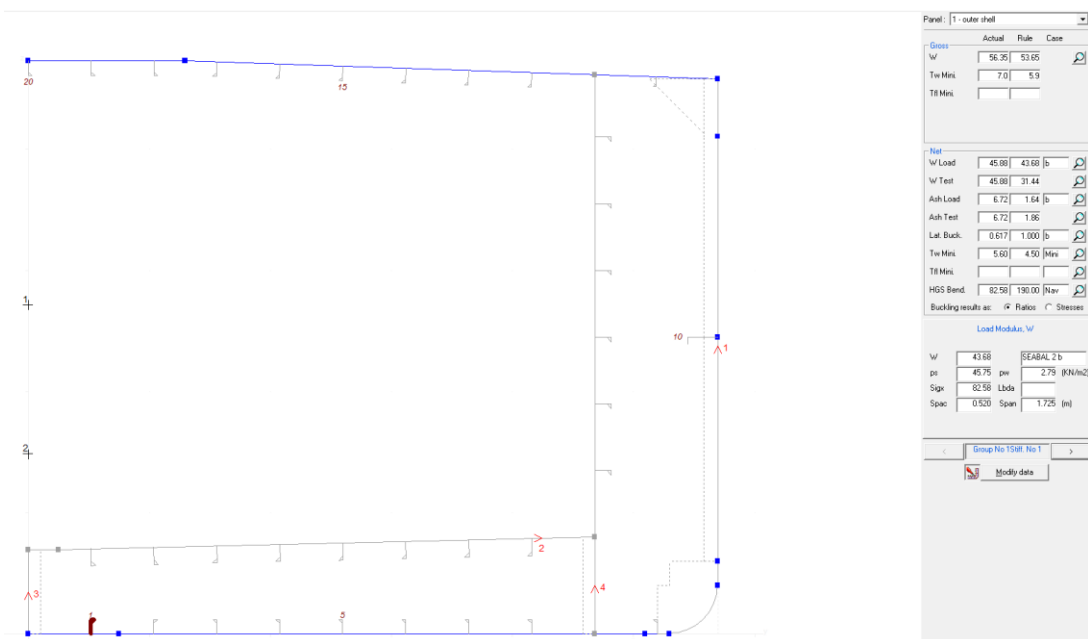
Slika 9. Prozor za definiranje proračuna

### 2.3.1. Rezultati i redimenzioniranje konstrukcijskih elemenata

Korištenjem Mars programa dobiva se brz i jednostavan uvid u same rezultate proračuna konstrukcije. Cilj je zadovoljiti i lokalnu i globalnu čvrstoću no svakako je potrebno svesti utrošeni materijal na minimum. Pri proračunu vojeva potrebno je zadovoljiti minimalnu traženu debljinu a kod proračuna uzdužnjaka i rebra je potrebno zadovoljiti minimalne zahtijevane momente otpora i površine poprečnih presjeka. U slučaju da inicijalne dimenzije ne zadovoljavaju tražene zahtjeve ili nude mogućnost uštede materijala smanjenjem presjeka nosača ili debljine lima vrši se redimenzioniranje korištenjem Mars *Edit* opcije.

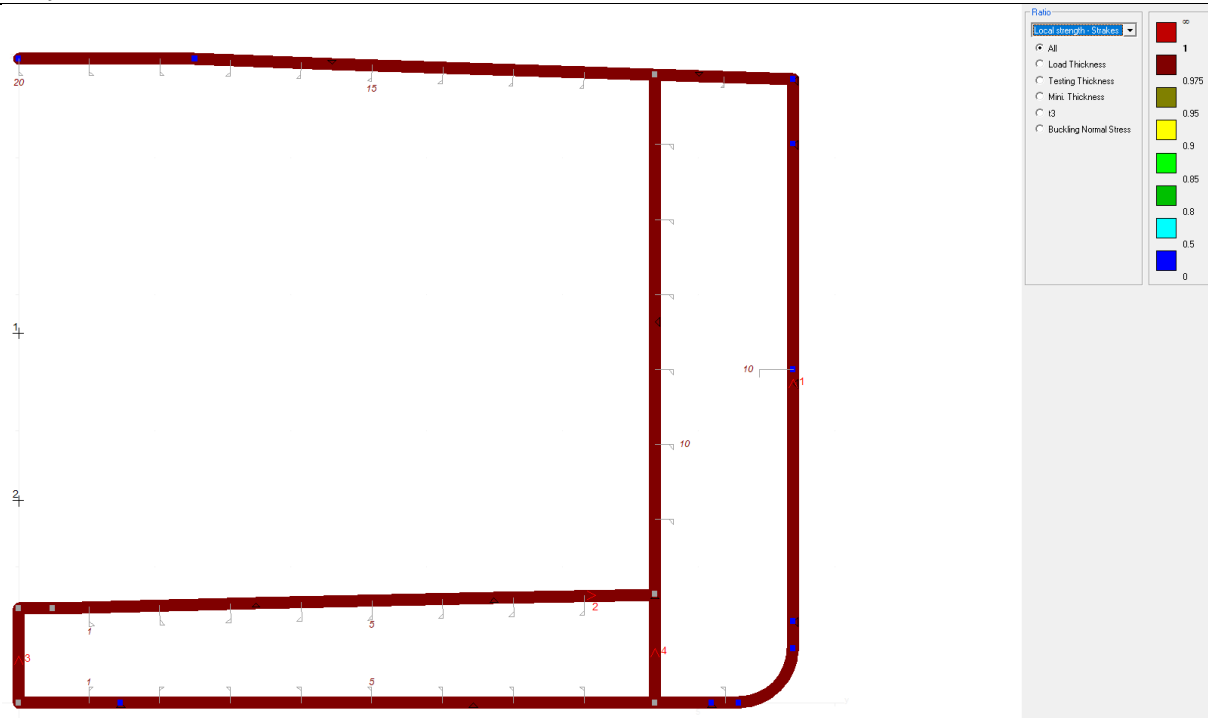


**Slika 10. Lokalna čvrstoća za vojeve**

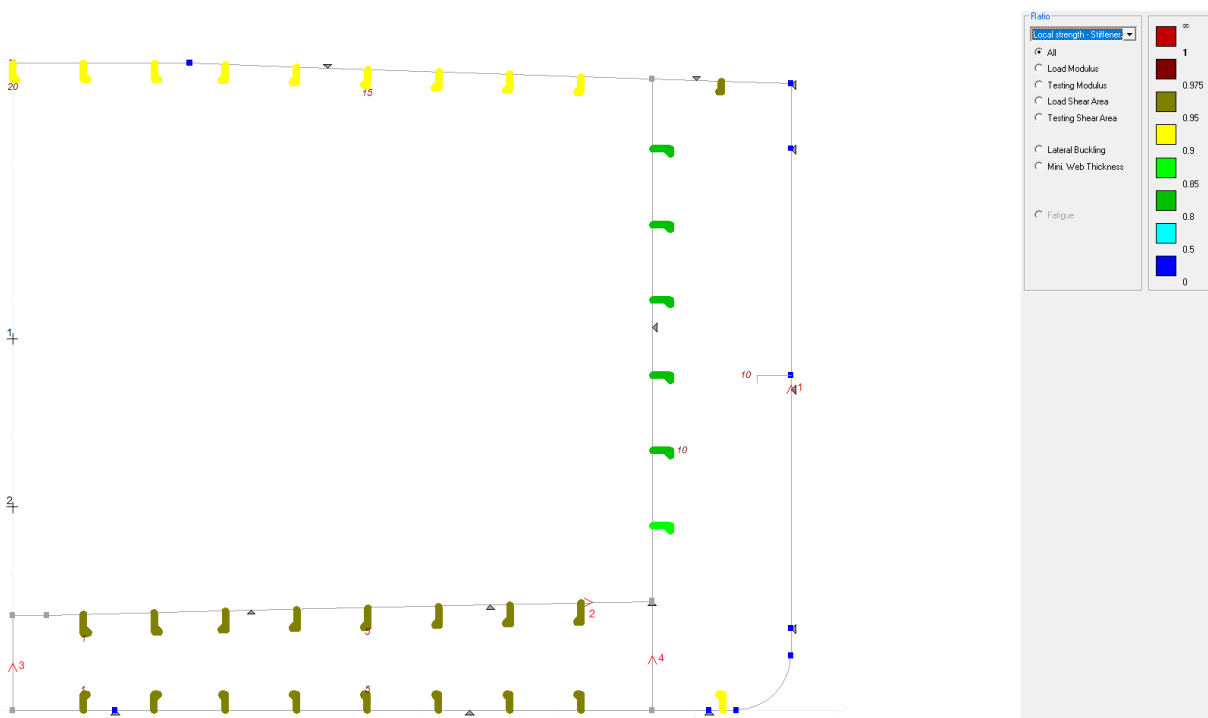


**Slika 11. Lokalna čvrstoća za uzdužnjake**

Program Mars Inland ima pogodnu opciju pregleda iskorištenosti rezervi kod zadovoljavanja uvjeta čvrstoće. Prikazan je kao faktor iskoristivosti s rasponom vrijednosti između nula i jedan. Cilj je postići vrijednosti što je više moguće bliže 1. Faktori iskoristivosti po poprečnom presjeku za vojeve i uzdužnjake su prikazani na slikama 12. i 13..



Slika 12. Faktor iskoristivosti vojeva (lokalno)



Slika 13. Faktor iskoristivosti uzdužnjaka (lokalno)



### 3. ANALIZA REZULTATA

Pomoću modela i pripadajućih rezultata iz programa Mars Inland je provedena analiza mase jednog teretnog prostora. Masa uzdužnih elemenata je dobivena množenjem površine poprečnog presjeka uzdužnih elemenata duljinom jednog tanka duljine 10.350 m i gustoćom čelika  $\rho_{\text{č}}=7.85 \text{ t/m}^3$ . Sve mase su izražene u tonama.

Površine i debljine okvira i rebrenica su preuzete iz predloška Hrvatskog registra brodova.

#### 3.1. Proračun sponje

Većina dimenzija poprečnih elemenata je preuzeta od predloška dobivenog od strane Hrvatskog registra brodova jer je Mars Inland primarno alat za proračun uzdužnih elemenata. S obzirom da se radi gruba procjena mase u redu je pretpostaviti linearno mijenjanje momenta otpora presjeka sponje s promjenom razmaka okvira. Pomoću inicijalnih dimenzija sponje u referentnom modelu je proračunat njen moment otpora. Taj moment otpora se uvećava ili smanjuje množenjem s omjerom razmaka okvira modela za koji se proračunava nova sponja okvira i razmakom okvira referentnog modela. Tako uvećani ili smanjeni moment otpora se uzima kao minimalni zahtijevani moment otpora za dimenzioniranje nove sponje. U referentnom modelu je sponja izvedena kao struk s flanžom u obliku punog kružnog presjeka dok je u novim predloženim varijantama sponja izvedena u obliku T nosača. U tablicama 2. i 3. je prikazan proračun momenta otpora sponje za referentni model i za model s promijenjenim razmakom okvira  $w = 1479 \text{ mm}$ .

**Tablica 2. Proračun momenta otpora sponje referentnog modela**

$d_f$	50	mm
$h_w$	400	mm
$t_w$	8	mm
$t_p$	8	mm
$b_p$	1212.01	mm
$I_{\text{flange}}$	2.12E+08	mm <sup>4</sup>
$I_{\text{web}}$	7.69E+07	mm <sup>4</sup>
$I_{\text{deck}}$	9.82E+07	mm <sup>4</sup>
$I_{\text{sponja}}$	3.87E+08	mm <sup>4</sup>
$W_{\text{sponja}}$	1095.48	cm <sup>3</sup>

**Tablica 3. Proračun momenta otpora sponje za razmak okvira  $w = 1479$  mm**

$t_f$	8	mm
$b_f$	155	mm
$h_w$	443	mm
$t_w$	7	mm
$t_p$	7	mm
$b_p$	1152	mm
$I_{flange}$	1.51E+08	mm <sup>4</sup>
$I_{web}$	9.82E+07	mm <sup>4</sup>
$I_{deck}$	8.27E+07	mm <sup>4</sup>
$I_{sponja}$	3.32E+08	mm <sup>4</sup>
$W_{min}$	939.25	cm <sup>3</sup>
$W_{sponja}$	940.37	cm <sup>3</sup>

Za slučaj u tablici 3. minimalni moment otpora je dobiven kao:

$$W_{min} = \frac{S_{BV}}{S_{CRS}} * W_{ref}$$

Pri čemu je:

- $S_{BV}$  novi razmak okvira za koji se dimenzionira nova sponja (1479 mm)
- $S_{CRS}$  novi razmak okvira referentnog modela (1725 mm)
- $W_{ref}$  moment otpora sponje referentnog modela (1095.48 cm<sup>3</sup>)
- $W_{min}$  minimalni zahtijevani moment otpora nove sponje

Pri dimenzioniranju poprečnog presjeka nosača korišteni su sljedeći uvjeti koji pružaju određenu sigurnost od izvijanja nosača pod vlastitom težinom:

$$\frac{h_w}{t_w} < 90$$

$$4 < \frac{b_f}{t_f} < 25$$

$$0.2 < \frac{b_f}{h_w} < 0.5$$

$$1 < \frac{t_f}{t_w} < 3$$

Korištenjem Excel dodatka *Alat za rješavanje* provedena je iteracija u kojoj su za tražene minimalne momente otpora, dobivene minimalne površine poprečnog presjeka uz poštivanje gore navedenih ograničenja.

Parametri alata za rješavanje

Postavljanje cilja: SK\$21

Prima:  Maksimum  Minimum  Vrijednost: 0

Promjenom varijabilnih ćelija: SK\$5:\$K\$8

Podložno ograničenjima:

- SK\$44 >= 1
- SP\$47 >= 1
- SP\$47 <= 3
- SK\$5:\$K\$8 >= 7
- SK\$5:\$K\$8 = cijeli broj
- SP\$44 <= 90
- SP\$45 <= 25
- SP\$45 >= 4
- SP\$46 <= 0.5
- SP\$46 >= 0.2

Pretvori varijable bez ograničenja u pozitivne

Odaberite metodu rješavanja: GRG nelinearno

Metoda rješavanja

Za jednostavne nelinearne probleme alata za rješavanje odaberite GRG nelinearni mehanizam. Za linearne probleme alata za rješavanje odaberite jednostavni LP mehanizam, a za složene probleme alata za

Pomoć Riješi Zatvori

Slika 14. Sučelje Alata za rješavanje s unesenim ograničenjima za proračun

### 3.2. Sumiranje dobivenih rezultata

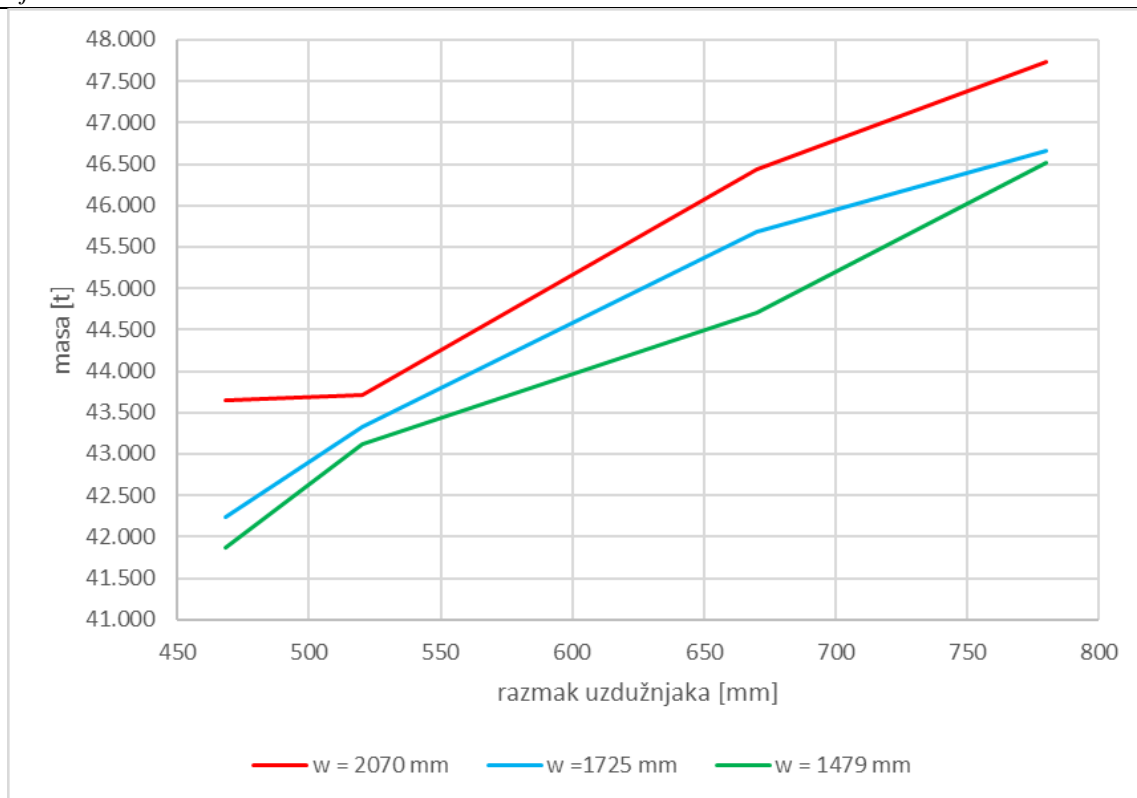
U tablici 4. su prikazani dobiveni rezultati svih masa uzetih u obzir pri procjeni mase jednog teretnog prostora u konceptualnoj fazi konstrukcije broda.

**Tablica 4. Suma masa po svim varijantama**

razmak [mm]		masa [t]					
okvirna rebra	uzdužnjaci	uzdužni elementi	rebra	sponje	okviri i rebrenice	ukrepe okvira	$\Sigma m$
2070	468	39.578	0.563	0.193	3.190	0.117	43.641
	520	39.645	0.563	0.193	3.190	0.117	43.708
	670	42.378	0.563	0.192	3.190	0.117	46.440
	780	43.561	0.676	0.192	3.190	0.117	47.736
1725	468	37.347	0.537	0.219	3.988	0.141	42.231
	520	38.163	0.811	0.219	3.988	0.141	43.323
	670	40.518	0.811	0.219	3.988	0.141	45.677
	780	41.774	0.537	0.219	3.988	0.141	46.658
1479	468	36.048	0.626	0.244	4.785	0.164	41.867
	520	36.974	0.946	0.244	4.785	0.164	43.113
	670	38.883	0.626	0.243	4.785	0.164	44.701
	780	40.385	0.946	0.243	4.785	0.164	46.523

U tablici 4. je žutom bojom označena varijanta 9 s razmakom okvira  $w = 1479 \text{ mm}$  i razmakom uzdužnjaka  $s = 468 \text{ mm}$  kao odabrana pogodna varijanta među predloženim modelima. Na slici 15. je prikazan dijagram koji predstavlja zavisnost mase tanka o razmaku uzdužnjaka i razmaku okvira.

Rješenje najmanje mase ide prema minimalnom razmaku uzdužnjaka i okvira.



**Slika 15. Zavisnost mase tanka o razmaku uzdužnjaka**

### 3.3. Usporedba referentnog i odabranog modela

U Tablici 5. je prikazana usporedba dobivenih rezultata referentnog i odabranog modela.

**Tablica 5. Usporedba masa referentnog i odabranog modela**

	referentni model	odabrani model	
w [mm]	1725	1479	
s [mm]	520	468	razlika masa [t]
uzdužni elementi	44.502	36.048	-8.454
rebro	0.767	0.626	-0.141
sponje	1.897	0.244	-1.653
okviri i rebrenice	3.988	4.785	0.798
Ukrepe okvira	0.217	0.164	-0.052
$\Sigma m$ [t]	51.370	41.867	-9.503

U tablici 6. je dana usporedba debljina po zonama za referentni i odabrani model.

**Tablica 6. Usporedba debljina limova po zonama**

	referentni model	odabrani model
	debljina lima [mm]	
paluba	8	7
završni voj	20	18.5
bok	9	7.5
tank	8	5.5
		6.5
uzvoj	12	5.5
dno	10	7.5
pokrov dvodna	8	6.5
jaki nosač u dvodnu	8	5.5
hrptenica	8	5.5

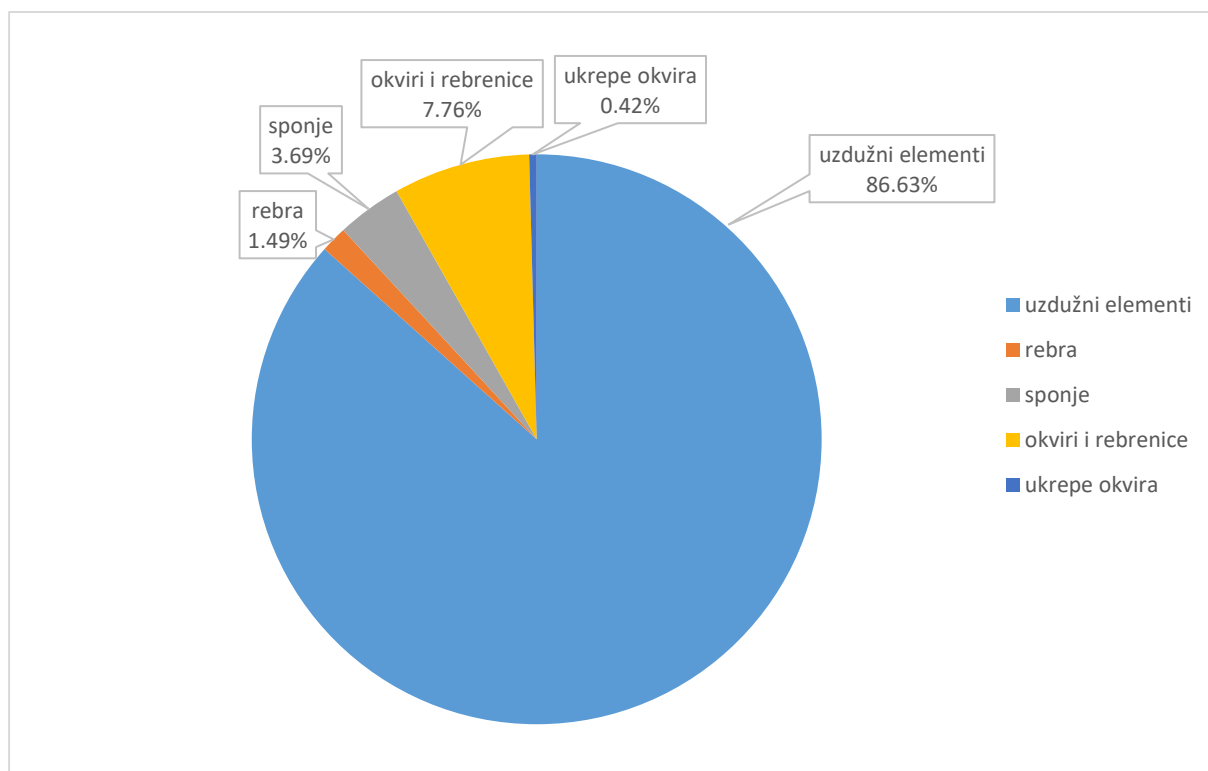
U tablici 7. je dan usporedni prikaz tipova i dimenzija profila uzdužnjaka po zonama, rebara na boku te ukrepa u dvodnu.

**Tablica 7. Usporedba profila na presjeku glavnog rebra**

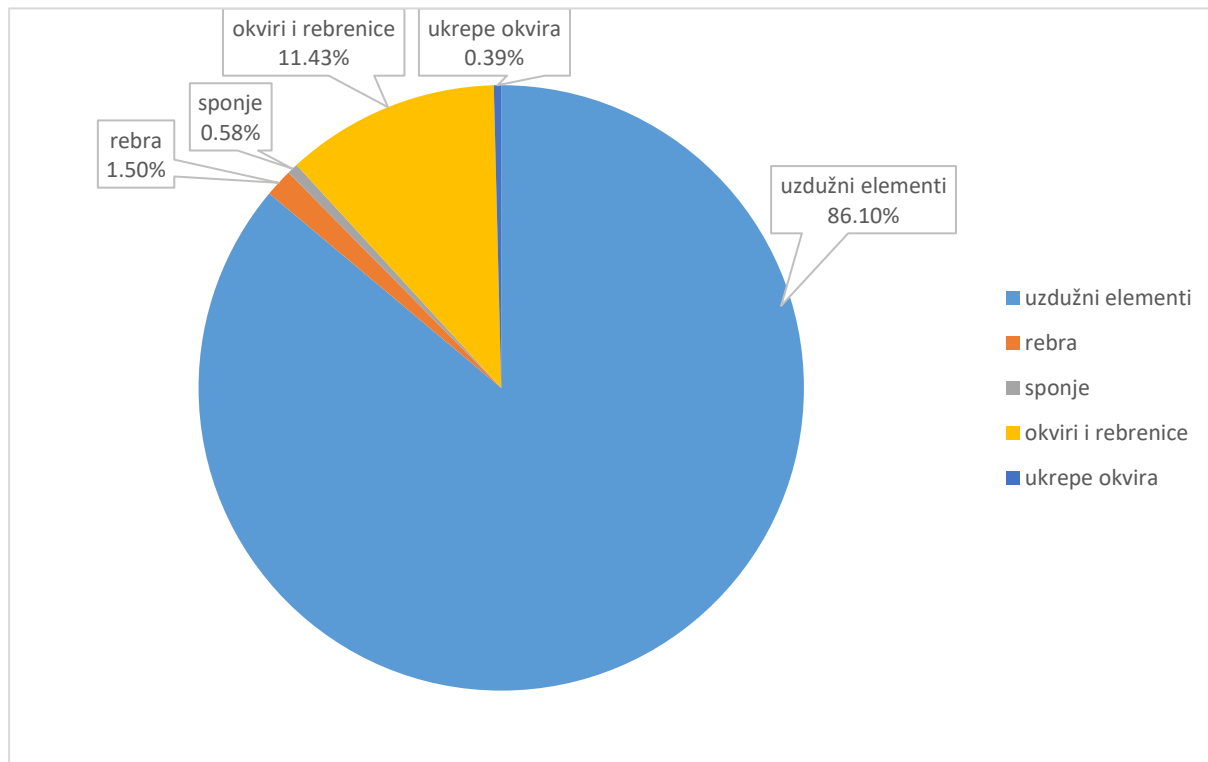
	referentni model	odabrani model
	dimenzije profila [mm]	
Dno	HP 120X8	HP 100X6
paluba	HP 160X8	HP 100X7
Pokrov dvodna	HP 140X8	HP 120X7
Tank	HP 140X7	HP 120X6
Bok (rebro)	HP 120X8	HP 100X6
Ukrepe u dvodnu	FB 100x10	FB 100x6.5
Sponja	400x8/Ø50	T 443x7/155x8

Po svim grupama elemenata su zabilježene uštede mase osim okvira i rebrenica gdje je masa 20% veća od referentnog modela odnosno 0.798 t. Čak i prije samih rezultata povećanje mase okvira i rebrenica je bilo i očekivano s obzirom da su njihove dimenzije preuzete iz referentnog modela i dovele samo do linearnog porasta mase s obzirom na smanjenje razmaka okvira. To je prihvatljivo, barem s aspekta konceptualne faze, s obzirom da je na svim ostalim elementima napravljena značajna redukcija mase od 10.301 t. Najznačajniji doprinos smanjenju mase je zabilježen kod uzdužnih elemenata (uzdužnjaci, oplata, jaki nosači u dvodnu, hrptenica). Smanjenje nepoduprtog raspona bitno utječe na zahtijevane minimalne momente otpora i površine poprečnog presjeka uzdužnjaka. Njihovim redimenzioniranje postignuta je ušteda od 8.454 t (19%). Redimenzioniranje sponja je također značajno doprinijelo smanjenju mase. Kod

referentnog modela masa sponja je činila 3.69% ukupne mase dok je kod odabranog redimenzioniranog modela taj postotak sveden na 0.58% ukupne mase. Krajnja masa odabranog modela je 18.5% manja od referentnog modela. Udjeli pojedinih grupa konstrukcijskih elemenata u ukupnoj masi referentnog i odabranog modela su prikazani u tortnim dijagramima na slikama 16. i 17..



**Slika 16. Udio pojedinih konstrukcijskih elemenata u ukupnoj masi referentnog modela**



**Slika 17. Udio pojedinih konstrukcijskih elemenata u ukupnoj masi odabranog modela**

Pregledom tortnih dijagrama na slikama 16. i 17. može se zaključiti da je ugrubo udio mase uzdužnih elemenata, ukrepe okvira i rebara ostao jednak s obzirom na odgovarajući model dok su najveće promjene zabilježene kod sponja, okvira i rebrenica. Naravno ove rezultate kod potonjih treba uzeti s rezervom s obzirom da dimenzije okvira i rebrenica nisu direktno računane prema pravilima Bureau Veritasa već su preuzete od strane Hrvatskog registra brodova. Rezultati su pak dovoljno točni za konceptualnu fazu u kojoj je cilj samo zaključiti koja varijanta ima najviše smisla za kasniji razvoj projekta i samu izgradnju broskog trupa.

U prilogu su dani nacrti geometrije presjeka glavnog rebra, dimenzije uzdužnjaka i rebara, raskroja limova te presjeka na okvirnom rebro za odabrani model.



## 4. UZDUŽNA GRANIČNA ČVRSTOĆA

Pojam uzdužne granične čvrstoće trupa može se definirati kao stanje naprezanja i deformacije na razini trupa koje odgovara maksimalnom opterećenju (granični moment savijanja) koje konstrukcija može izdržati. Svako daljnje povećanje momenta savijanja dovodi do kolapsa trupa broda[2]. To stanje je posljedica kolapsa pojedinačnih strukturnih elemenata od kojih se sastoji brodska konstrukcija. Vrijednost graničnog momenta dobije se zbrajanjem doprinosa svih elemenata koji sudjeluju u uzdužnoj čvrstoći trupa. U obzir se moraju uzeti stupanj deformiranosti i čvrstoća nakon kolapsa pojedinih strukturnih elemenata. Obzirom na način opterećenja, ovisno o tome da li se brod nalazi na valnom brijegu ili između dva vala u valnom dolu, konstrukcijski elementi mogu biti u stanju vlačnog ili tlačnog naprezanja, što znači da su neki elementi deformirani na način da su „izduženi“ dok su neki uslijed tlačnog naprezanja „skraćeni“. Konačni rezultat ovakvog stanja jest određena zakrivljenosti trupa[3]. Inkrementalno-iterativna metoda analize progresivnog sloma broskog trupa s izračunatim krivuljama naprezanje-deformacija pojednostavljena je metoda koja omogućuje veliku točnost u oponašanju progresivnog sloma pri uzdužnom savijanju. Inkrementalni dio očituje se u postupnom povećanju zamišljene zakrivljenosti broskog trupa kao idealne grede. Dok se iterativnim putem u svakom koraku dobije novi položaj neutralne linije presjeka trupa zbog gubitka čvrstoće pojedinih uzdužnih elemenata. Ova metoda rezultira krivuljom momenta savijanja  $M$  u ovisnosti o zakrivljenosti  $\chi$ [4].

### 4.1. Proračun uzdužne čvrstoće

Kriterij uzdužne čvrstoće može se prikazati u vidu nejednadžbe (1).

$$\gamma_S * M_{sw} + \gamma_W * M_{wv} \leq \frac{M_U}{\gamma_R} \quad (1)$$

$\gamma_S$  - parcijalni faktor sigurnosti za moment savijanja na mirnoj vodi. Vrijednost faktora je 1.0

$\gamma_W$  - parcijalni faktor sigurnosti za moment savijanja na valovima. Vrijednost faktora je 1.10

$\gamma_R$  – parcijalni faktor sigurnosti graničnog vertikalnog momenta savijanja. Računa se prema izrazu  $\gamma_R = \gamma_m * \gamma_{DB}$ . Vrijednost faktora je 1.05 i za stanje pregiba i progiba.

$\gamma_M$ - parcijalni faktor sigurnosti za vertikalni granični moment savijanja, uzima u obzir nesigurnosti vezane uz materijal i geometrijske karakteristike

$\gamma_{DB}$  - parcijalni faktor sigurnosti za vertikalni granični moment savijanja, uzima u obzir utjecaj savijanja dvostrukog dna. Vrijednost koeficijenta za stanje pregiba je veća jer u tom stanju

savijanje dvodna ima značajan utjecaj za razliku od stanja progiba gdje je taj utjecaj znatno manje izražen.

Valni moment savijanja na valovima je računat prema formuli (2).

$$M_w = \pm 0,045 * L^2 * B * C_B \quad (2)$$

U gore navedenoj formuli predznak ovisi je li riječ o stanju pregiba ili progiba.

- Stanje pregiba (engl. *Hogg*)  $M_{wv,hogg} = 5345.76 \text{ kNm}$
- Stanje progiba (engl. *Sagg*)  $M_{wv,sagg} = -5345.76 \text{ kNm}$

Granični moment savijanja je dobiven korištenjem Mars 2000 *Rule* opcije koja omogućava proračun granične čvrstoće na temelju definiranog presjeka trupa.

- $M_{U,hogg} = 133359 \text{ kNm}$
- $M_{U,sagg} = -102401 \text{ kNm}$

Maksimalni momenti savijanja na mirnoj vodi:

- Stanje pregiba (engl. *Hogg*)  $M_{sw,hogg} = 25570 \text{ kNm}$
- Stanje progiba (engl. *Sagg*)  $M_{sw,sagg} = -46343 \text{ kNm}$

Provjera uzdužne čvrstoće za stanje pregiba (engl. *Hogg*):

$$1 * 25570 + 1.1 * 5345.76 \leq \frac{133359}{1.05}$$

$$31450.34 < 127008.57$$

Provjera uzdužne čvrstoće za stanje progiba (engl. *Sagg*):

$$|1 * (-46343) + 1.1 * (-5345.76)| \leq \left| \frac{-102401}{1.05} \right|$$

$$|-52223.34| \leq |-97524.76|$$

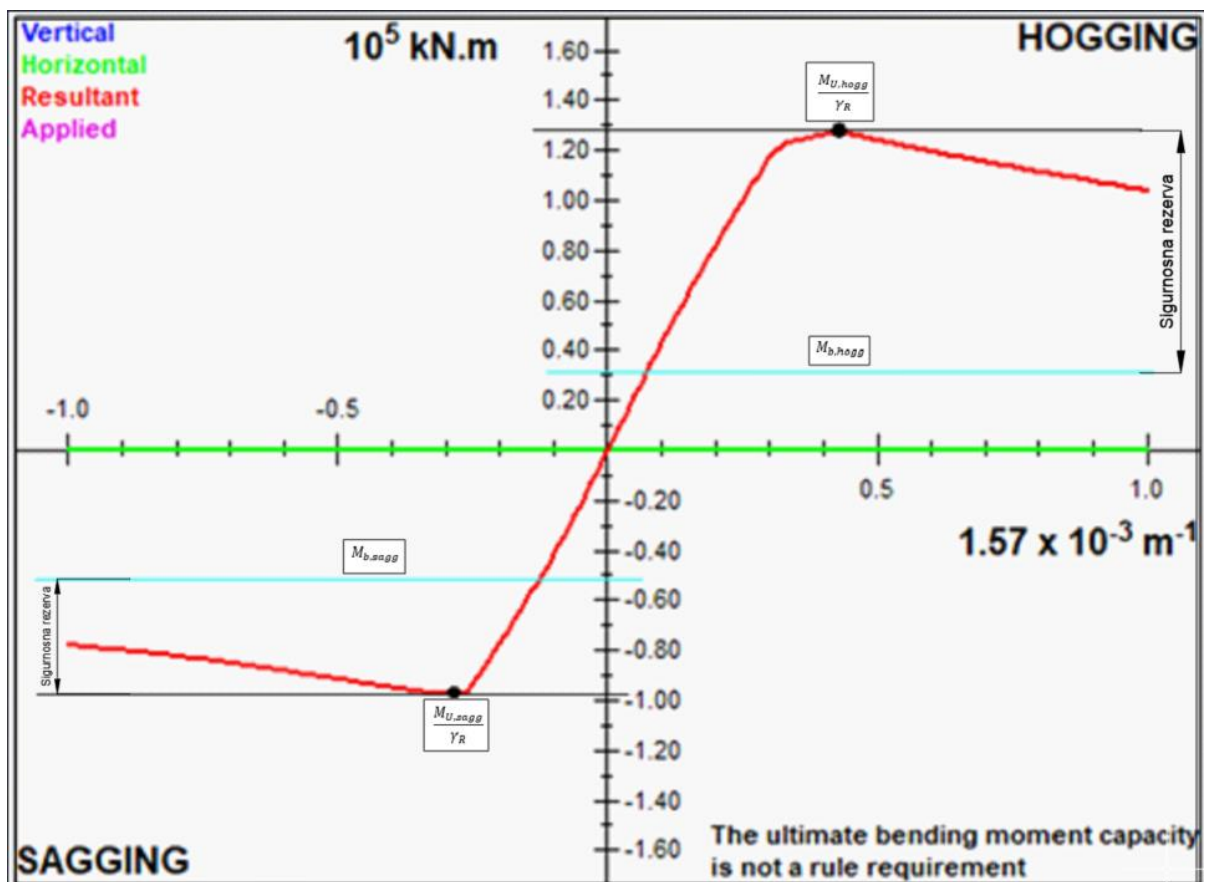
Nejednadžba (1) je zadovoljena i za stanje pregiba i za stanje progiba.

Definiranjem globalnog faktora sigurnosti  $S_F$  prema izrazu (3) jednostavno se može predočiti sigurnosna rezerva koja je preostala trupu broda prije kolapsa..

$$S_F = \frac{\frac{M_U}{\gamma_R}}{\gamma_S * M_{sw} + \gamma_W * M_{wv}} \quad (3)$$

- Stanje pregiba (engl. *Hogg*)  $S_{F,hogg} = 4.04$
- Stanje progiba (engl. *Sagg*)  $S_{F,sagg} = 1.78$

Na slici 18. je prikazan rezultat inkrementalno-iterativne metode u vidu dijagrama  $M-\chi$ . Krivulja u tom dijagramu pokazuje vrijednosti vertikalnih momenata savijanja, s uračunatim parcijalnim faktorima sigurnosti, u ovisnosti o zakrivljenosti broskog trupa. Dijagram je dobiven korištenjem računalnog programa Mars2000. Na dijagramu su naznačene vrijednosti graničnih momenata savijanja za stanje pregiba i progiba ( $M_U$ ) kao i stvarni momenti koje brodski trup apsorbira ( $M_b$ ) uvećane za parcijalne faktore sigurnosti. Time je slikovito prikazana sigurnosna rezerva broskog trupa.



Slika 18.  $M-\chi$  krivulja

## 5. ZAKLJUČAK

Bit konceptualne faze konstrukcije broda jest smanjiti ukupne troškove proizvoda, te maksimalno iskoristiti volumen trupa kao teretni prostor.

Svrha ove faze jest predložiti nekoliko varijanti s različitim razmacima okvirnih rebara te različitim razmakom uzdužnjaka[5]. Uzdužni elementi te rebra i ukrepe okvira su dimenzionirani prema pravilima klasifikacijskog društva Bureau Veritas. Osnovna ideja je bila zadovoljavanje uvjeta lokalne i globalne čvrstoće uz maksimalnu moguću uštedu materijala. Vidljivo je da je i samim redimenzioniranjem referentnog modela prema pravilima Bureau Veritasa, uz zadržavanje razmaka uzdužnjaka i okvirnih rebara, dolazi do primjetne uštede. Najveće uštede su ipak zabilježene pri smanjenju razmaka okvira (nepoduprti raspon) i uzdužnjaka. Prema grafu na slici 15. očito nije došlo do promjene toka krivulje što ukazuje da nije postignut maksimum odnosno minimum funkcije koji bi lako moguće značio i veću uštedu mase naspram trenutnog odabranog modela. U ovoj fazi konstrukcije broda naglasak je pak na proučavanju interakcije uzdužnih i poprečnih elemenata i trenda uštede mase koji proizlazi iz te interakcije. Pri razmaku okvira  $w = 2070$  mm masa konstrukcije značajno odstupa od masa pri razmaku okvira od 1725 i 1479 mm. Smanjenjem razmaka okvira odnosno nepoduprtog raspona, koji bitno utječe na zahtjeve na čvrstoću uzdužnih elemenata, se bilježi najveća ušteda s obzirom da površinom to jest volumenom čine najznačajniji udio promatrane konstrukcije.

Proračunom odabranog modela (varijanta 9) na kriterij uzdužne granične čvrstoće pokazano je da je taj kriterij ispunjen. Kod proračuna brodova za unutarnju plovidbu manje su vjerojatnosti za premašivanje graničnog momenta savijanja s obzirom na manja opterećenja primarno na valovima koja se manifestiraju u proračunu granične čvrstoće kroz parcijalni faktor sigurnosti  $\gamma_R$ . Globalni faktor sigurnosti je, između ostalog i zbog tih razloga, veći nego kod ekvivalentnog broda za plovidbu otvorenim morima.

Provođenjem ove sažete studije vidljivo je u kojem smjeru se može težiti s ciljem uštede materijala (mase) no nikako ne predstavlja konačni optimalni stadij same analize i projektiranja konstrukcije. U nekoj od opširnijih i temeljitijih studija je prijedlog da se razmotri više modela s različitim razmakom uzdužnjaka i okvira (uz njihovo egzaktno proračunavanje) kako bi se zabilježila dodatna ušteda.

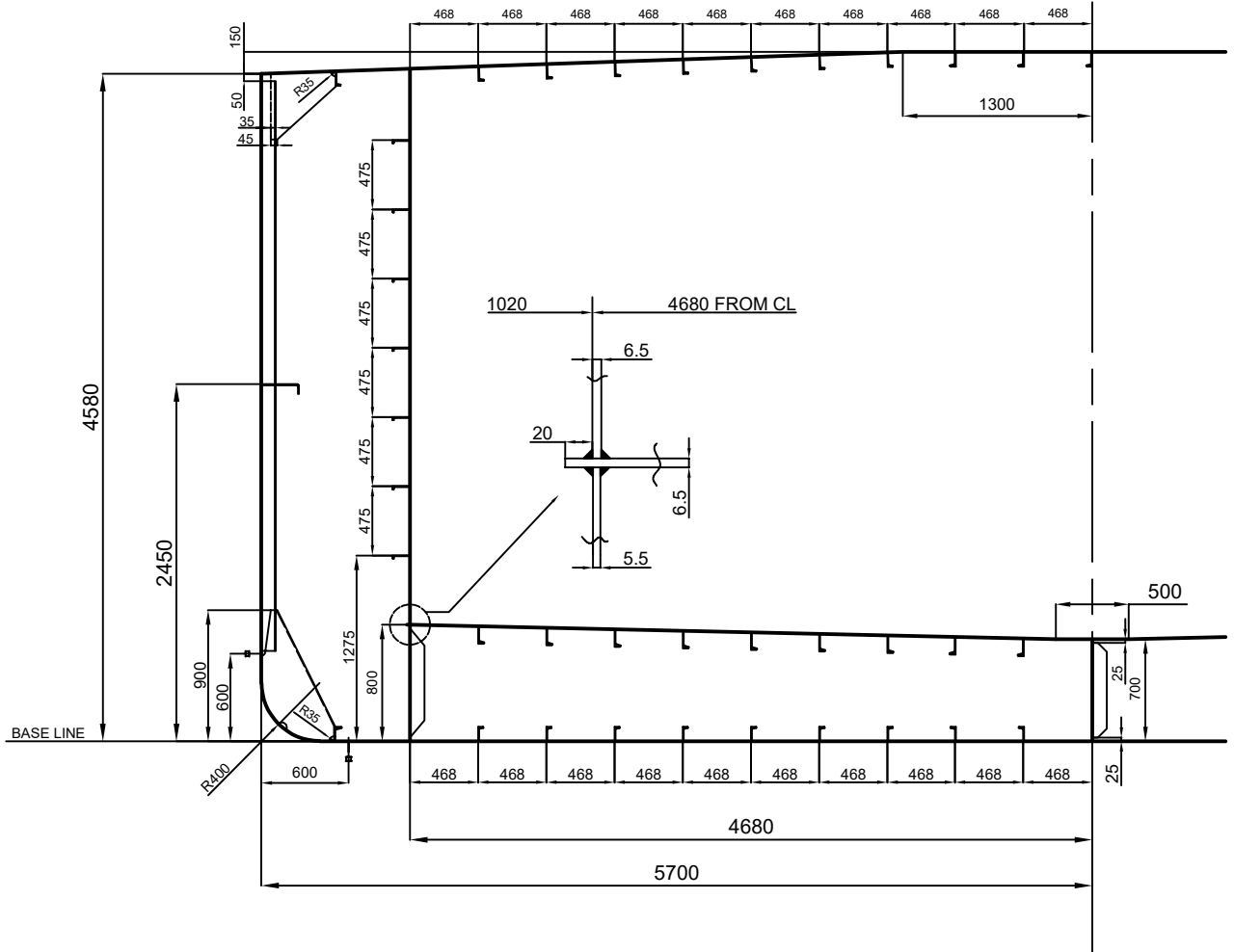
**LITERATURA**


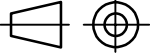
- [1] [https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/inland-waterways\\_en](https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/inland-waterways_en)
- [2] Andrić, J., Metodologija konceptualnog projektiranja brodskih konstrukcija s interakcijom trup-nadgrađe, Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2007.
- [3] Gledić, I., Propagacija oštećenja brodske konstrukcije izazvanoga sudarom ili nasukavanjem, Disertacija, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2021.
- [4] Common Structural Rules for Bulk carriers and Oil Tankers. International association of classification societies, January 2015.
- [5] Ilić, E., Projektiranje konstrukcije glavnog rebra broda za prijevoz kemikalija, Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2022.

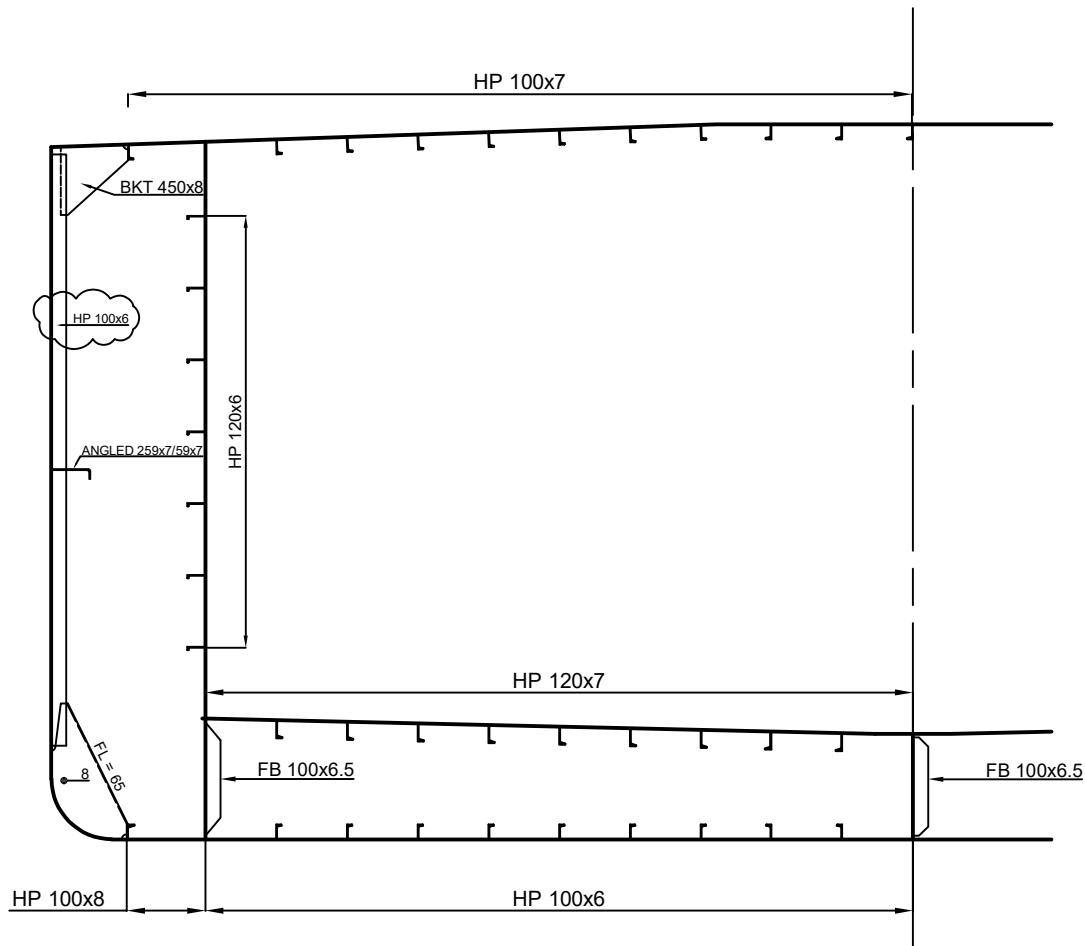
---


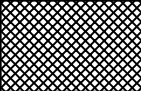
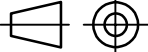
**PRILOZI**

I. Tehnička dokumentacija

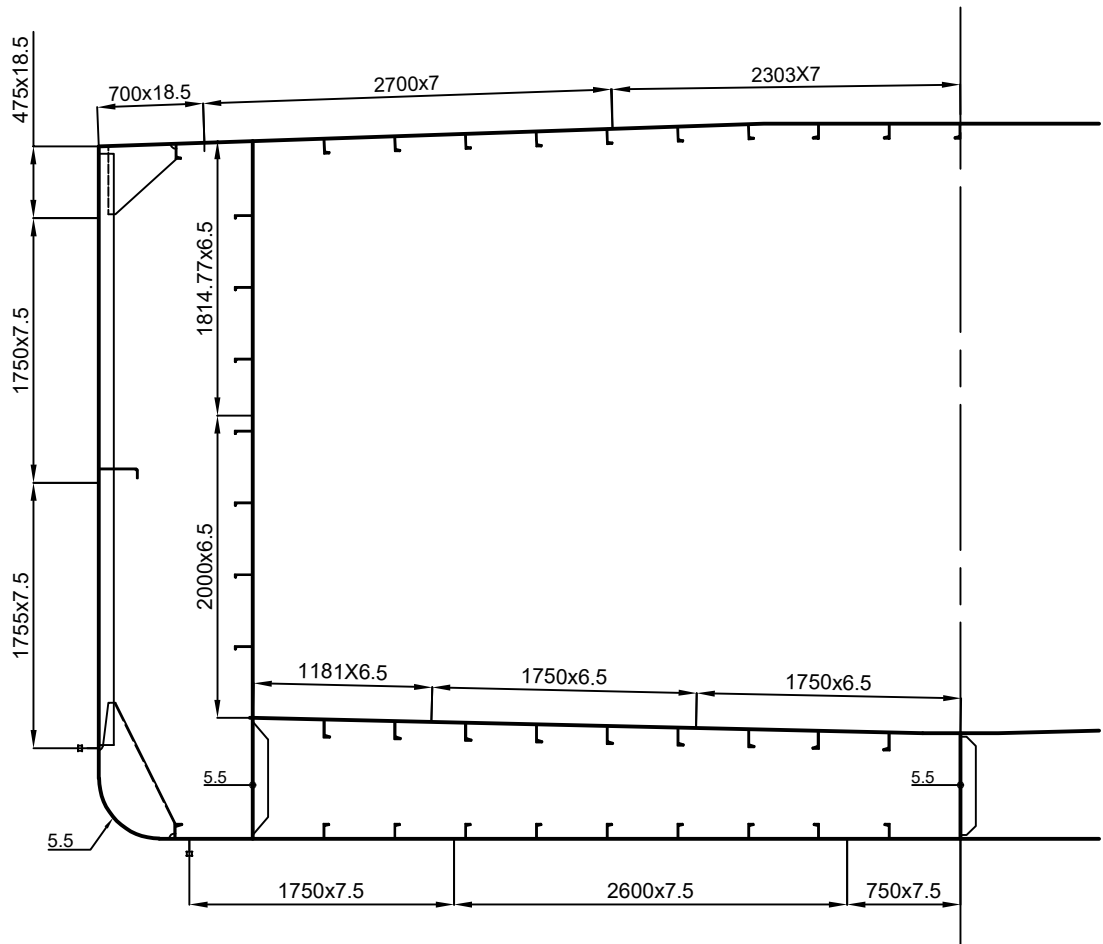



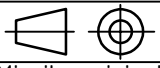
	Datum	Ime i prezime	Potpis	 <b>FSB Zagreb</b>
Projektirao	14.02.2023.	Juraj Rukavina		
Razradio				
Crtao	14.02.2023.	Juraj Rukavina		
Pregledao				
Objekt:			Objekt broj:	
			R. N. broj:	
Napomena:				
Materijal: <b>ST24</b>			Masa:	<div style="background-color: #cccccc; border: 1px solid black; width: 100%; height: 100%;"></div>
 Naziv: <b>Geometrija presjeka glavnog rebra</b>			Pozicija:	
Mjerilo originala <b>M 1:50</b>			Format: A4	
			Listova: 4	
			List: 1	
			Crtež broj: 1	

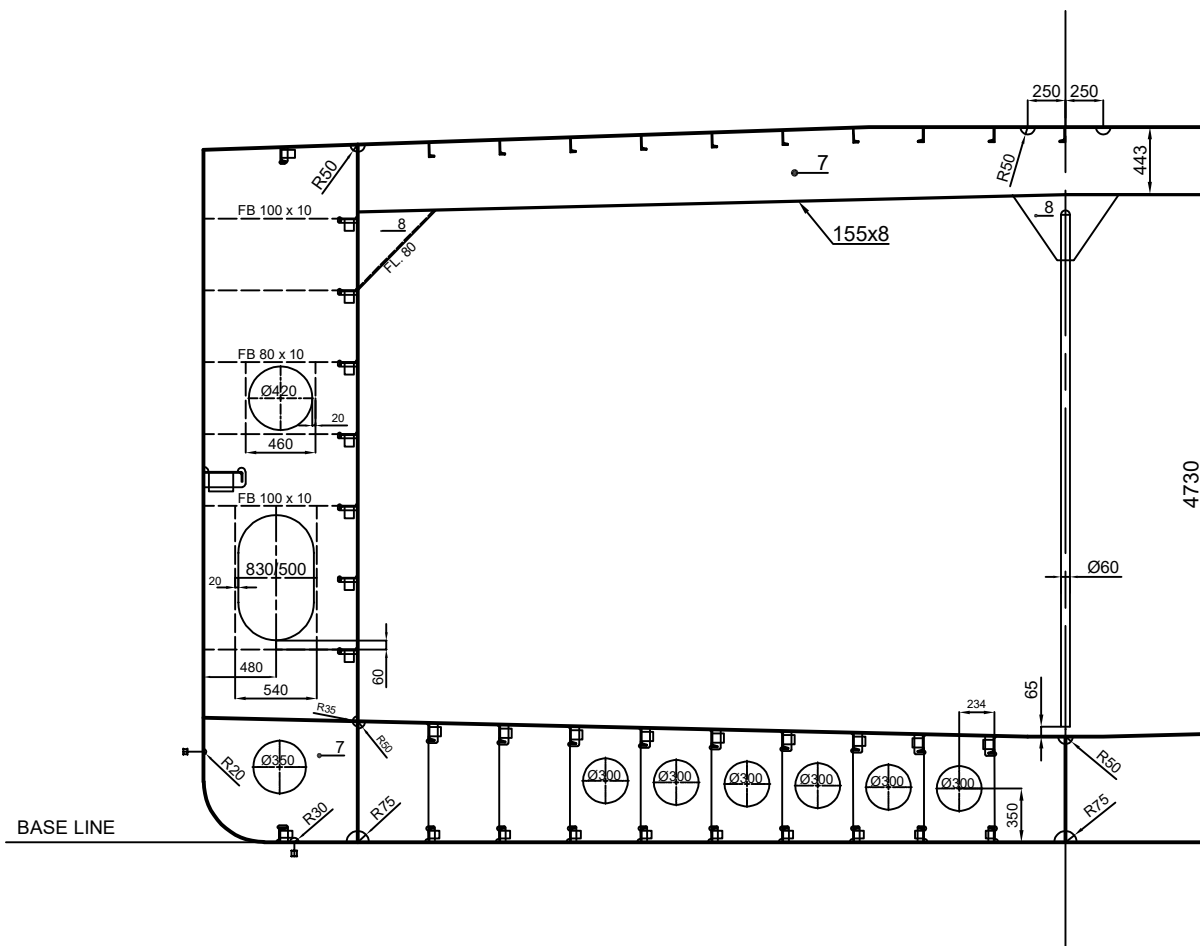



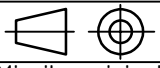
	Datum	Ime i prezime	Potpis		
Projektirao	14.02.2023.	Juraj Rukavina			
Razradio					
Crtao	14.02.2023.	Juraj Rukavina			
Pregledao					
Objekt:			Objekt broj:		
			R. N. broj:		
Napomena:			Kopija		
Materijal: <b>ST24</b>			Masa:		
			Naziv:		
Mjerilo originala			Uzdužnjaci i poprečni elementi na običnom rebru		Pozicija:
M 1:50			Crtež broj: 1		Format: A4
					Listova: 4
					List: 2





	Datum	Ime i prezime	Potpis	
Projektirao	14.02.2023.	Juraj Rukavina		
Razradio				
Crtao	14.02.2023.	Juraj Rukavina		
Pregledao				
Objekt:			Objekt broj:	
			R. N. broj:	
Napomena:				Kopija
Materijal: <b>ST24</b>			Masa:	
 Mjerilo originala	Naziv:		Pozicija:	
M 1:50	Raskroj limova na glavnom rebru			Format: A4
	Crtež broj: 1			Listova: 4
				List: 3



	Datum	Ime i prezime	Potpis	
Projektirao	14.02.2023.	Juraj Rukavina		
Razradio				
Crtao	14.02.2023.	Juraj Rukavina		
Pregledao				
Objekt:			Objekt broj:	
			R. N. broj:	
Napomena:			Kopija	
Materijal:	ST24	Masa:		
 Mjerilo originala M 1:50	Naziv: Presjek na okvirnom rebru w = 1479mm		Pozicija:	Format: A4 Listova: 4 List: 4
			Crtež broj: 1	