

# Provjera početne poprečne stabilnosti školsko-istraživačkog broda M/B "Naše more"

---

**Dajak, Andro**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2021**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Dubrovnik / Sveučilište u Dubrovniku**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:155:968811>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-17**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Dubrovnik](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE U DUBROVNIKU  
POMORSKI ODJEL

PREDDIPLOMSKI STUDIJ NAUTIKA

PROVJERA POČETNE POPREČNE STABILNOSTI  
ŠKOLSKO-ISTRAŽIVAČKOG BRODA  
M/B "Naše more"

ZAVRŠNI RAD

Dubrovnik, 2021.

SVEUČILIŠTE U DUBROVNIKU  
POMORSKI ODJEL

PREDDIPLOMSKI STUDIJ NAUTIKA

PROVJERA POČETNE POPREČNE STABILNOSTI  
ŠKOLSKO-ISTRAŽIVAČKOG BRODA  
M/B "Naše more"

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

doc. dr. sc. Srđan Vujičić kap.d.pl.

Student/Pristupnik:  
Andro Dajak

Komentor:

doc. dr. sc. Maro Ćorak

Dubrovnik, 2021.

REPUBLIKA HRVATSKA

**SVEUČILIŠTE U DUBROVNIKU**

**POMORSKI ODJEL**

**Preddiplomski studij Nautika**

Ur. broj:

Dubrovnik (09./2021.)

Kolegij: Konstrukcija broda i stabilitet I

Mentor: doc. dr.sc. Srđan Vujičić kap. d. pl.

Komentor: doc. dr. sc. Maro Ćorak

## **ZADATAK ZAVRŠNOG RADA**

Pristupnik: **Andro Dajak**

ZADATAK: PROVJERA POČETNE POPREČNE STABILNOSTI ŠKOLSKO-ISTRAŽIVAČKOG BRODA M/B "Naše more"

Rad treba sadržavati:

Opću definiciju i podjelu stabiliteta

1. Nacrti i opis broda M/B "Naše more"
2. Izračun pozicije težišta istisnine i mase
3. Provjeru kriterija stabilnosti zadanih prema pravilima IMO-a

Osnovna literatura:

- 1.) Grubišić Izvor (2001.); Geometrija broda; Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje
- 2.) Marinka Franko (1999.); Stabilnost broda, Znanje d.d. , Zagreb
- 3.) Buljan Ivo (1982.); Stabilnost broda, Školska knjiga, Zagreb

Zadatak uručen pristupniku: (11./2020.)

Rok za predaju završnog rada: 5.9.2021.

Mentor:

**doc. dr. sc. Srđan Vujičić kap. d. pl.**

Komentor:

**doc. dr. sc. Maro Ćorak**

Pročelnik Pomorskog odjela:

**izv. prof. dr. sc. Žarko Koboević**



## Izjava:

S punom odgovornošću izjavljujem da sam završni rad izradio samostalno, služeći se navedenim izvorima podataka i uz stručno vodstvo mentora i komentora.

Ime i prezime studenta:

Andro Dajak, student Pomorskog odjela, preddiplomskog studija, smjer Nautika

Potpis: \_\_\_\_\_



## Sažetak:

U ovom završnom radu obrađen je i definiran osnovni pojam brodskog stabiliteta te njegova podjela s obzirom na vrstu nagiba.

Analizirana je poprečna stabilnost školsko-istraživačkog broda M/B "Naše more". U tu svrhu, za zadani gaz, proračunat je volumen istisnine, položaj težišta istisnine te visina metacentra na temelju metacentarskog radijusa i priloženih linija broda.

Za zadani raspored masa napravljen je proračun centracije i određen položaj težišta mase. Proračunata metacentarska visina uspoređena je s preuzetim vrijednostima iz knjige trima i stabiliteta. Na temelju empirijskih formula određen je period ljuljanja za oba slučaja, iz knjige trima i stabiliteta te proračunski.

Nakon provjere početnog poprečnog stabiliteta broda treba napraviti pregled proračuna i kriterija za stabilnost broda kod kutova nagiba iznad  $12^\circ$  te objasniti što znače za M/B "Naše more".

Ključne riječi: M/B "Naše more", poprečna stabilnost, težište sustava, račun centracije, volumen istisnine, metacentar

## **Abstract:**

This final paper deals with and defines the basic concept of ship stability and its division with regard to the position it affects.

The transverse stability of the research ship M/V "Naše more" was analysed. For this purpose, for a given draft, the displacement volume, the position of the centre of gravity of the displacement and the height of the metacentre were calculated based on the metacentric radius and the attached ship lines.

For the given mass distribution, a centration calculation was made and the position of the centre of gravity of the mass was determined. The calculated metacentric height was compared with the values taken from the trim and stability book. Based on empirical formulas, the period of oscillation was determined for both cases, from the book of trim and stability and the budget.

After checking the initial transverse stability of the ship, it is necessary to review the calculation and criteria for the stability of the ship at angles above  $12^\circ$  and explain what they mean for M/V "Naše more".

Keywords: M/V "Naše more", transverse stability, system centre of gravity, centration calculus, volume of displacement, metacentre

# Sadržaj:

<b>Sažetak:</b> .....	I
<b>Abstract:</b> .....	II
<b>1. Uvod</b> .....	1
<b>2. Osnovna obilježja M/B "Naše more"</b> .....	2
<b>3. Osnovno o stabilnosti broda</b> .....	3
<b>4. Podjela stabilnosti i uvjeti plovnosti</b> .....	4
4.1 Početna poprečna stabilnost	5
4.2 Presjek broda i točke poprečnog stabiliteta	6
4.3 Proračun momenta statičke stabilnosti	8
<b>5. Proračun geometrijskih karakteristika forme M/V "Naše More"</b> .....	9
5.1 Izračun uronjenih površina rebara	10
5.2 Izračun uronjenog volumena ispod konstruktivne vodene linije	12
5.3. Vertikalni položaj težišta istisnine	13
<b>5.4 Izračun metacentarskog radijusa</b> .....	16
<b>6. Položaj sustavnog težišta G prema stvarnim težinama</b> .....	18
<b>7. Usporedba stvarne i proračunate metacentarske visine te pripadnih perioda valjanja</b> .....	20
<b>8. Kriteriji stabilnosti za kutove nagiba veće od 12°</b> .....	22
<b>Zaključak</b> .....	24
<b>Literatura:</b> .....	25
<b>Popis slika:</b> .....	26
<b>Popis tablica:</b> .....	27
<b>Popis grafikona:</b> .....	28
<b>Prilog 1: Bočni pogled na M/B "Naše more" nakon restauracije</b> .....	29
<b>Prilog 2: Dvodno i međupaluba M/B "Naše more" s položajem tankova</b> .....	30
<b>Prilog 3: Pogled na uronjeni dio broda s tablicom visina i poluširina</b> .....	31
<b>Prilog 4: Knjiga trima i stabiliteta: Uvodne napomene</b> .....	32
<b>Prilog 5: Knjiga trima i stabiliteta: Kriteriji stabiliteta i opće napomene</b> .....	33
<b>Prilog 6: Knjiga trima i stabiliteta: Dijagram poluga statičkog stabiliteta</b> .....	34
<b>Prilog 7: Knjiga trima i stabiliteta: Dijagramni list M/B "Naše more"</b> .....	35

# 1. Uvod

Već u naslovu ovog završnog rada jasno i precizno se definira tematika rada, a to je proračun početne poprečne stabilnosti broda M/B "Naše more" i analiza navedenih proračuna.

Ovaj rad ne obuhvaća sve potrebne proračune stabilnosti broda, već detaljno analizira dio osnovnog proračuna početne stabilnosti. Navedeni proračuni su zahtjevi međunarodnih pravila (IMO rezolucija A.749(18) Code on Intact Stability for All Types of Ships) za brodove u međunarodnoj plovidbi, i nacionalnih pravila koja su u ovom slučaju propisana od strane Hrvatskog registra brodova u dijelu 4 "Stabilitet" (više u prilogu 5). Poslovi tehničkog nadzora kojima se utvrđuje sposobnost broda za plovidbu, u ime državnih službi povjereni su klasifikacijskim ustanovama, točnije u ovom slučaju Hrvatskom registru brodova (HRB).

U ovom radu pažnja je posvećena izračunu sustavnog težišta te metacentarske visine kao jednog od najvažnijih kriterija stabilnosti.

Nakon što su objašnjeni osnovni pojmovi vezani za stabilnost broda, preći će se na izračun pozicije težišta istisnine, pozicije sustavnog težišta broda te na kraju metacentarske visine i perioda valjanja.

Zbog nedostupnosti materijala, račun i crtanje GH krivulje za izračun stabilnosti broda pri velikim kutevima nagiba nije bilo moguće te je ona precrtana iz Knjige trima i stabiliteta (prilog 6).

## 2. Osnovna obilježja M/B "Naše more"

Školsko-istraživački brod M/B "Naše more" izgrađen je u talijanskom brodogradilištu Arturo Stabile u Trapaniu. Prvobitno ime broda bilo je "Ligny Secondo" što bi u prijevodu s talijanskog jezika značilo "Druga lignja". Brod 1998. godine mijenja ime u "Naše more", a 2000. godine biva rekonstruiran u Remontnom brodogradilištu Šibenik. Rekonstruiran je i prenamijenjen od prvotnog ribarskog broda u školsko-istraživački brod koji je opremljen s tri biološka laboratorija i smještajem za 19 članova posade (prikaz broda nakon rekonstrukcije je prikazan u prilogu 1).

Duljina preko svega M/B "Naše more" iznosi 31.35 m, a najveća širina iznosi 7.4 m. Glavni porivni stroj je četverotaktni dizelski motor finskog proizvođača Wartsila snage 662 kW što je približno 887 KS koji pokreće fiksni četverokrilni brončani vijak. Ima dva bočna propulzora od kojih se jedan nalazi na krmu, a jedan na pramčanom dijelu broda. Faktori koji utječu na stabilitet ovog broda su njegove zalihe koje uključuju tankove: goriva, vode, ulja, otpadne vode i kaljuže. Tankovi ovog broda zauzimaju dvije razine, to su međupaluba i prostor ispod međupalube (raspored tankova prikazan je u prilogu 2). Nakon rekonstrukcije, kapacitet posade na brodu se znatno povećao te je došlo do prenamjene tankova. Za vrijeme rekonstrukcije svi tankovi su očišćeni i degazirani, kaljužni tank na krmu sada služi kao tank slatke vode kapaciteta 12 m<sup>3</sup> koji je odvojen koferdamima od tankova goriva. Jedan tank ulja pregrađen je u 2 tanka od kojih je jedan tank čistog (1.4 m<sup>3</sup>), a drugi tank odrađenog ulja (1.65 m<sup>3</sup>). Kapacitet pramčanih tankova smanjen je na ukupno 11.4 m<sup>3</sup> zbog ugradnje tanka za otpadne vode kapaciteta 5.7 m<sup>3</sup> i dva koferdama koji ga odvajaju od pramčanih tankova pitke vode a s krmene strane od tankova goriva. U strojarnici je izrađen tank kaljužne vode kapaciteta 1000 L. Nakon remonta ukupna količina goriva na brodu svedena je na 38 m<sup>3</sup>.

### 3. Osnovno o stabilnosti broda

*Pod stabilnošću broda podrazumijeva se svojstvo broda da se opire djelovanju svih sila i momenata koji ga nastoje pomaknuti iz položaja ravnoteže, tj. svojstvo broda da se vrati u ravnotežni položaj nakon prestanka djelovanja sila i momenata koji su ga iz tog položaja pomakli [2].*

Svako tijelo koje pliva u moru, pa tako i brod, izloženo je djelovanju dviju sila: uzgonu i gravitacijskoj sili tj. sili teži.

Sva tijela sastavljena su od pojedinih materijalnih točaka tj. čestica mase čiji zbroj daje masu cijelog tijela. Umnožak pojedine mase i gravitacijskog ubrzanja definira težinu promatrane čestice. Težine pojedinih materijalnih točaka su paralelne sile koje djeluju prema središtu Zemlje tako da je rezultanta svih sila zapravo težina tijela, a hvatište navedene rezultante je težište sustava tijela. Sve ovo vrijedi i za brod pa se hvatište rezultante svih težina broda zove težište broskog sustava, a označuje se slovom  $G$  (centre of gravity).

Sile hidrostatskog tlaka oko broda mogu se rastaviti na 3 komponente od kojih su dvije horizontalne (jedna u smjeru duljine broda, druga u poprečnom smjeru broda) i treća vertikalna komponenta. Za brod na ravnoj kobilici bez nagiba, zbroj horizontalnih sila je približno jednak nuli, odnosno zanemariv. Rezultat vertikalne komponente ima konačnu vrijednost koju zovemo uzgonom, te djeluje vertikalno prema gore što odgovara Arhimedovu zakonu koji kaže da na svako tijelo uronjeno u vodu djeluje sila jednaka sili teže, ali suprotnog smjera tj. uzgon, a djeluje iz težišta uzgona odnosno točke  $B$  (centre of buoyancy).

Jedno od osnovnih svojstava koje mora imati svaki brod je plovnost u položaju stabilne ravnoteže. Brod koji nema dovoljnu stabilnost može se prevrnuti pod utjecajem vanjskih sila kao što su: vjetar, valovi, morske struje itd. što može rezultirati gubitkom broda, tereta i, u najgorem slučaju, gubitkom ljudskih života.

Stabilnost broda ovisi o dva osnovna faktora - oblik podvodnog dijela trupa i razmještaj težina na brodu. Položaj težišta sustava je prema tome uvjetovan rasporedom težina broda što uključuje i teret. Težište sustava broda određeno je dvjema koordinatama - njegovom udaljenošću od krmene okomice (aft perpendicular, dolazi od lat. "perpendicular" što znači okomica) i visinom iznad unutarnje strane kobilice tj. osnovke (keel).

## 4. Podjela stabilnosti i uvjeti plovnosti

Nagibanje broda može biti oko uzdužne i oko poprečne osi. Uzdužna os je ona koja dijeli brod na lijevi i desni dio, a poprečna ga dijeli na prednji i zadnji dio. Nagib broda oko uzdužne osi uzrokuje nagib na lijevu ili desnu stranu gdje se takve kretanje broda nazivaju poprečnim nagibanjem, a stabilnost koja se javlja pri takvim nagibima nazivamo poprečnom stabilnošću broda. Nagib broda oko poprečne osi naziva se uzdužnim nagibanjem, a stabilnost uzdužnom stabilnošću [2].

Stabilnost broda javlja se kao posljedica utjecaja raznih sila i nagibnih momenata koje djeluju na njega. Kada na brod sile djeluju statički (stalno tj. kontinuirano djelovanje), koje mogu biti uzrokovane: ukrcanim teretom, prodorom vode, pomakom tereta i slično, stabilnost kojom se brod suprotstavlja takvom djelovanju sila i momenata naziva se statičkom stabilnošću broda [2].

Stabilnost broda koja je prouzročena djelovanjem vanjskih utjecaja tj. sila i momenata koje su uzrokovane: vjetrom, valovima, morskim strujama itd. koje djeluju trenutačno ili s prekidima, naziva se dinamička stabilnost broda.

Prilikom utjecaja sila ili momenata, bez obzira na njihovu vrstu, brod treba posjedovati stabilnost i ostati u stanju plovnosti [2].

Prema tome, da bi brod mogao plutati potreban mu je uzgon ( $B$ ), koji je jednak težini broda i djeluje na brod u težištu istisnine vertikalno prema gore iz čega proizlazi prvi uvjet plovnosti. Prvi uvjet plovnosti govori da na svako tijelo uronjeno u tekućinu djeluje sila uzgona, koja odgovara težini istisnute tekućine, tj. umnožak volumena podvodnog dijela broda i gustoće vode u kojoj brod pliva i gravitacijske konstante, mora biti jednak ukupnoj težini broda tj. deplasmanu (izraz 1).

$$D = B = V \cdot \rho \cdot g \quad (1)$$

Gdje je:  $D$  deplasman tj. volumen istisnine broda,  $B$  uzgon,  $\rho$  gustoća tekućine u kojoj se brod nalazi i  $g$  konstanta sile teže.

Da bi brod bio uporabljiv i u plovnom stanju mora biti stabilan što znači da mora zadovoljiti tri osnovna uvjeta plovnosti. Kao što je već rečeno, stabilnost broda jest svojstvo broda koje mu omogućava da se odupire silama koje ga nastoje pomaknuti iz početnog položaja te da se nakon prestanka djelovanja tih sila vrati u početni položaj. Prvi uvjet plovnosti koji brod mora zadovoljiti je taj da sila uzgona i težina broda tj. gravitacijska sila moraju biti jednake, drugi uvjet je taj da težina broda i sila uzgona moraju ležati na istom pravcu koji je okomit na vodenu liniju u datom trenutku.



Treći uvjet plovnosti zahtjeva da brod u plovidbi mora imati stabilnu ravnotežu i u slučaju djelovanja vanjske sile, odnosno prekretnog momenta. Kod naginjanja broda težište uzgona premješta se u novu točku težišta istisnine jer uronjeni dio broda mijenja oblik. U tom slučaju sile uzgona i težina broda predstavljaju uspravljaјуći par sila, odnosno moment uspravljanja koji će vratiti brod u prvobitni položaj nakon prestanka utjecaja vanjske sile [3].

## 4.1 Početna poprečna stabilnost

*Početna poprečna stabilnost je ona stabilnost koju brod posjeduje kada se nalazi u uspravnom stanju ili je malo nagnut s obzirom na uzdužnu os broda. Malim kutovima nagiba smatraju sad kutovi do 12 stupnjeva bočnog nagiba [2].*

Vrijednost početne poprečne stabilnosti broda koji se nalazi uspravnom položaju izražava se kao udaljenost sustavnog težišta broda od točke metacentra, tj. metacentarska visina GM.

U praksi, veća pozornost se posvećuje poprečnoj stabilnosti, tj. nagibima oko uzdužne osi broda jer kutovi prouzročeni nagibanjem broda oko uzdužne osi imaju znatno veću vrijednost od onih kutova koji su nastali naginjanjem broda oko poprečne osi. Razlog tomu je taj što uronjena forma broda naginjanjem oko uzdužne osi pruža najmanji otpor silama koje nastoje izbaciti brod iz položaja ravnoteže. Djelovanjem vanjskih sila i zakretnih momenata, naginjanjem oko uzdužne osi dolazi do najvećih kutova nagiba te se smatra da je poprečna stabilnost važnija od uzdužne stabilnosti.

## 4.2 Presjek broda i točke poprečnog stabiliteta

Karakteristične točke bitne za poprečni stabilitet su one točke koje su bitne za određivanje momenta stabilnosti i pomaka težišta sustava. Te točke uključuju: sustavno težište broda  $G$ , težište djelovanja sile uzgona  $B$  i točku metacentra  $M$ . Kobilicu (*Keel*) ne gledamo kao ključnu točku broskog stabiliteta, ali od nje računamo vertikalne visine ostalih točaka.

*Sustavno težište broda je zamišljena točka iz koje djeluje rezultanta sila svih težina koje se nalaze na brodu. Označava se s  $G$  (Centre of Gravity), a njezinu visinu iznad kobilice označavamo s  $KG$  [6].*

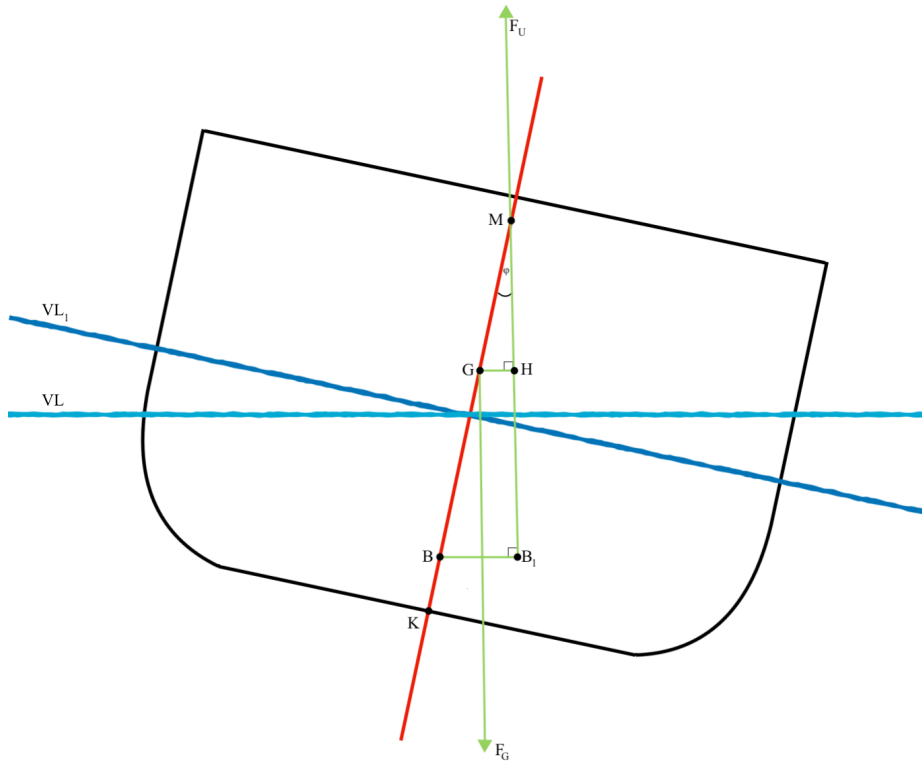
Središte djelovanja sile uzgona tj. težište istisnine označava se s  $B$  (*Centre of Buoyancy*), a ono je zamišljena točka koja leži na istom pravcu kao i sustavno težište broda. *Ono je zamišljena točka u kojoj smatramo da su koncentrirane sve sile uzgona uronjenog dijela broda* [2]. Vertikalna udaljenost (visina) od težišta istisnine od kobilice označava se s  $KB$ .

Kada se brod nalazi u uspravnom položaju tj. položaju ravnoteže, te sile su raspoređene ravnomjerno te na taj način djeluju na uronjeni dio broda. Oblik vodenih linija lijevo i desno od uzdužnice je jednak i zbog toga sile uzgona djeluju jednako na uronjeni dio broda te se težište uzgona nalazi u uzdužnici (simetrali) broda. Ako se međutim brod iz nekog razloga nađe u nagnutom položaju dolazi do promjene oblika uronjenog dijela broda pa i samim tim do položaja težišta uzgona.

*Na strani nagiba povećava se volumen uronjenog dijela broda, a s tim i djelovanje sile uzgona. Na strani suprotnoj od strane nagiba smanjuje se volumen uronjenog dijela broda, a s njim i djelovanje sile uzgona. Zbog takvog odnosa težište istisnine  $B$  pomiče se u točku  $B_1$  na stranu nagiba kao što je prikazano na Slici 1 [2].*

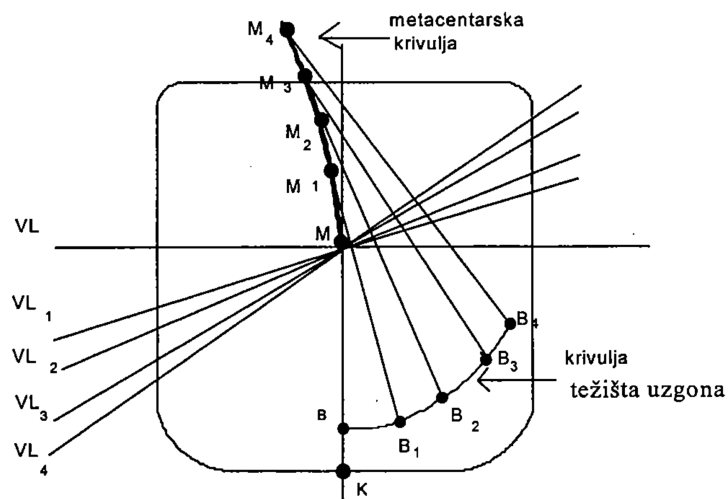
*Metacentar je materijalna točka, simetričnoga tijela što pliva u moru, u kojoj pravac sile uzgona ( $B$ ) siječe ravninu simetrije pri pomaku iz položaja ravnoteže [3].*

Položaj početnog metacentra  $M$  koji se definira kao visina metacentra određen je udaljenošću od kobilice i označava se s  $KM$  [2].



Slika 1: Spreg sila uspravljanja broda

Ako se promatra početna poprečna stabilnost malih kutova nagiba (do  $12^\circ$ ), ona je sjecište pravaca sile uzgona i simetrale broda, što znači da se pravi metacentar nalazi u simetrali broda. Ta točka naziva se početni poprečni metacentar, označava se s  $M$ , a njezina udaljenost od kobilice s  $KM$ , odnosno visina metacentra. Tijelo stabilno pliva ako mu se metacentar nalazi iznad težišta.



Slika 2: Krivulje težišta uzgona B i metacentra M [2]

Pri većim kutovima nagiba (više od  $12^\circ$ ) točka metacentra izlazi iz uzdužnice broda i kreće se po metacentarskoj krivulji, a presjecišta sile uzgona i simetrale broda nazivaju se prividni metacentri.

### 4.3 Proračun momenta statičke stabilnosti

Uvjeti plovnosti zahtijevaju da tijelo koje pluta na moru uvijek bude u stanju statičke stabilnosti ili u stanju stabilne ravnoteže. Uslijed djelovanja vanjske sile brod će se nagnuti te će doći do poremećaja stabilnosti tj. ravnoteže. Brod se odupire takvom poremećaju ravnoteže i nastoji se vratiti u uspravan položaj čim prestane djelovanje sile koja ga je iz tog položaja pomaknula.

Pretpostavka je da se brod uslijed djelovanja vanjske sile nagne za neki kut  $\varphi$ , zbog nagiba njegov je podvodni volumen promijenio oblik, težište sile uzgona će se pomaknuti u položaj  $B_1$ . Sila uzgona iz  $B_1$  djeluje okomito prema gore. Točka u kojoj smjer sile uzgona siječe uzdužnu simetralu broda naziva se metacentar ( $M$ ). Težište sile teže ( $G$  - *sustavno težište broda*) je ispod metacentra, kao težište trupa broda i svih težina koje brod nosi ostalo je u svom početnom položaju. Sila teža to jest deplasman ( $D$ ) broda djeluje okomito prema dolje iz točke  $G$ .

Formule pomoću kojih se računa vrijednost momenta stabilnosti:

Deplasman se računa prema već navedenoj formuli (izraz 1).

Moment stabilnosti računa se kao:

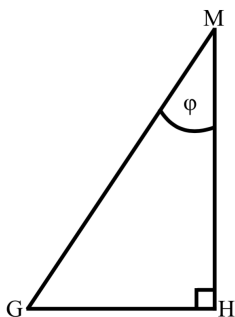
$$M_{ST} = D \cdot GH \quad (2)$$

Gdje je  $M_{ST}$  u tm,  $D$  deplasman u t i  $GH$  duljina  $GH$  poluge u m.

$$M_{ST} = D \cdot MG \cdot \sin(\varphi) \quad (3)$$

Gdje je  $M_{ST}$  u tm,  $D$  deplasman u t, i  $MG$  udaljenost metacentra od težišta sustava u m i  $\varphi$  kut nagiba broda u stupnjevima.

Iz slike 3, proizlazi:



$$\sin(\varphi) = \frac{GH}{MG} \quad (4)$$

$$GH = MG \cdot \sin(\varphi) \quad (5)$$

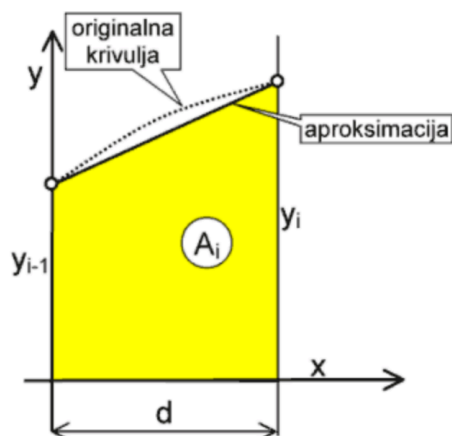
Slika 3: Trokut GHM

## 5. Proračun geometrijskih karakteristika forme M/V “Naše More”

Osnovne geometrijske karakteristike forme su volumen istisnine te položaj težišta volumena. Pozicija sustavnog težišta određuje se prema dvije koordinate. Najčešće su to udaljenost od krmenog prependiculara (*LCB* - longitudinal centre of buoyancy) i udaljenost od osnovice tj. kobilice (*KB*). Vrijednost *KB* se često označava i sa *VCG* (vertical centre of gravity). Proračun koji slijedi napravljen je za M/B "Naše more" u potpuno opremljenom stanju sa 100% zaliha i ukrcanom posadom, tj. kada se brod nalazi na konstruktivnoj vodenoj liniji (KVL).

Navedene geometrijske karakteristike forme možemo odrediti integriranjem, odnosno određivanjem površine karakterističnih funkcija forme broda. Da bi izračunali površinu ispod krivulje potrebno je znati točan matematički izvod funkcije koja predstavlja tu krivulju ili iskoristiti jedno od pravila za numeričko integriranje. Jedno od tih pravila je i tzv. “trapezno pravilo”. Trapezno pravilo je jedno od najjednostavnijih pravila za numeričku integraciju. Da bi se odredila površina omeđena nekom krivuljom, mora se podijeliti u dovoljan broj jednakih dijelova  $A_i$ . Pretpostavlja se da su pojedini dijelovi trapezi. Što je više takvih dijelova rezultat će biti točniji. Površina ( $A$ ) ispod zadane krivulje smatra se sumom svih elementarnih površina pojedinih trapeza  $A_i$  [1].

Graf 1: Izvod trapeznog pravila



Tablica 1: Izračunavanje površine ispod krivulje trapeznim pravilom

Broj ordinate	Ordinata	Koeficijent	Umnožak
0	$y_0$	1/2	$y_0 * 1/2$
1	$y_1$	1	$y_1 * 1$
2	$y_2$	1	$y_2 * 1$
3	$y_3$	1	$y_3 * 1$
...	...	...	...
...	...	...	...
...	...	...	...
...	...	...	...
...	...	...	...
n-1	$y_{n-1}$	1	$y_{n-1} * 1$
n	$y_n$	1/2	$y_n * 1/2$
		Suma:	$\Sigma_A$

Najjednostavniji način za doći do površine ( $A$ ) je pomoću tablice, i to na način da se u jedan stupac upišu sve ordinate  $Y$ , u drugi stupac koeficijenti kojima se množe te ordinate (prva i posljednja množe se s 0.5, a sve ostale s 1, a u treći stupac umnoške ordinate i koeficijenata.

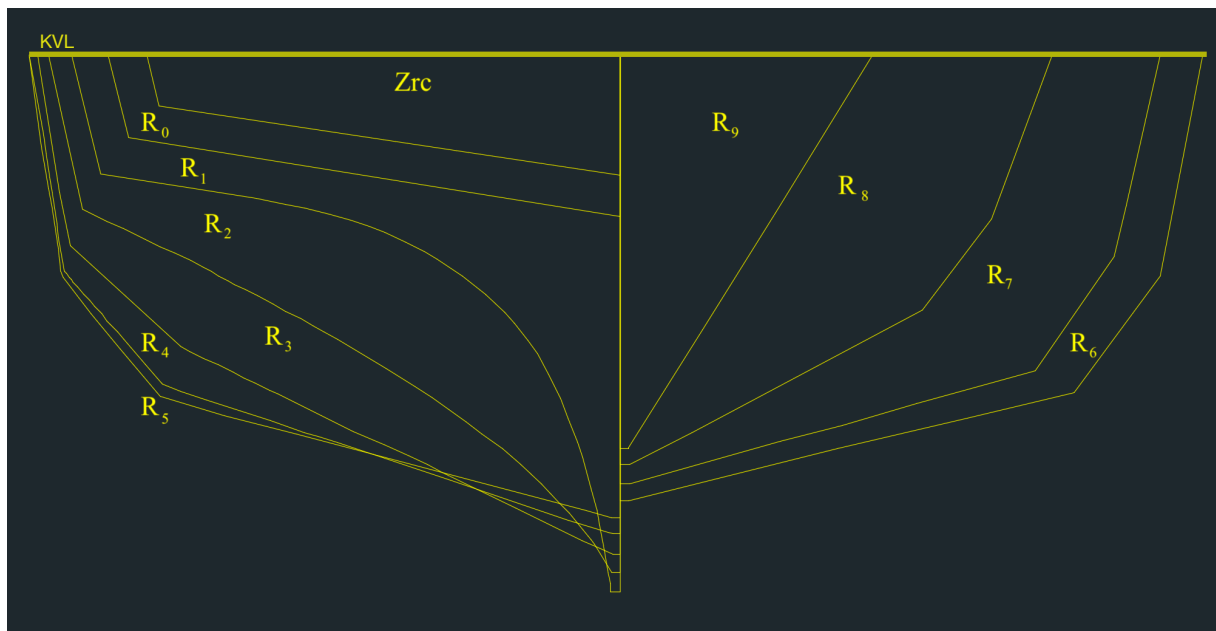
Sumu svih članova iz trećeg stupca treba još pomnožiti s razmakom ordinata  $d$ , da bismo dobili površinu  $A$  [1]. Proračun po ovim formulama izvodi se tablično prema prikazanoj shemi.

## 5.1 Izračun uronjenih površina rebara

Da bi se izračunao volumen uronjenog dijela broda prvo se mora odrediti uronjena površina teoretskih rebara te njihova udaljenost od početne točke. Ovaj rad, za početnu točku koristi krmeno zrcalo te se od njega određuju udaljenosti prema dobivenim nacrtima. Razmak između teoretskih rebara prikazan je u tablici 2 a njihov položaj vidljiv je u prilogu 3.

Uronjene površine računate su za sljedeće teoretske elemente brodske konstrukcije: krmeno zrcalo te rebra: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 i 10. Deseto rebro je posljednji element konstrukcije koji se razmatra zato što je ono prvi element koji se nalazi iznad konstruktivne vodene linije (KVL) što znači da nema uronjenih djelova. Ti konstruktivni elementi prikazani su u prilogu br. 3 kao i na slici br. 4.

Na nacrtu u prilogu br. 3 prikazan je stvaran oblik uronjenog dijela broda, udaljenosti između rebara te je priložena tablica poluširina koja sadržava dimenzije poluširina za prethodno navedene konstruktivne elemente. Dobivene vrijednosti uronjenih površina rebara prikazane su u tablici br. 1 a njihova ovisnost o dužini broda prikazana je u grafu br. 1.



Slika 4: Površinski oblik rebara ispod konstruktivne vodene linije

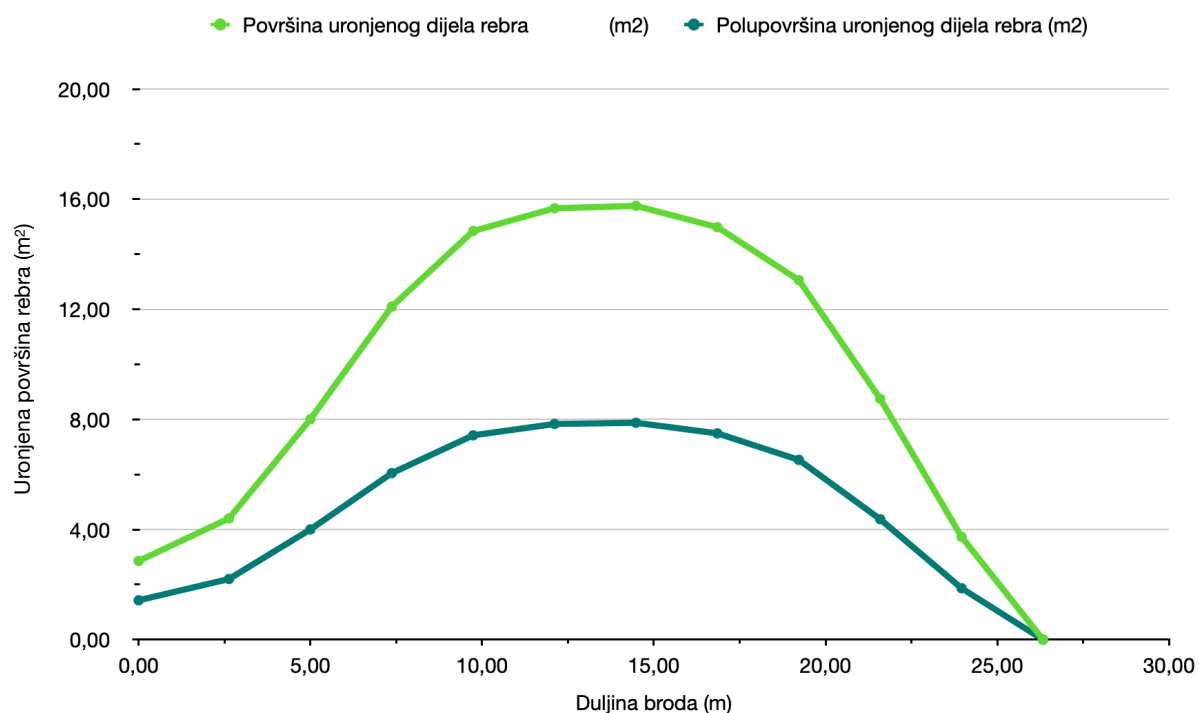
Tablica 2: Uronjene površine rebara i njihova udaljenost

Ime	Oznaka	Polupovršina uronjenog dijela rebra (m <sup>2</sup> )	Površina uronjenog dijela rebra (m <sup>2</sup> )	Udaljenosti od zrcala (m)	Udaljenost između dva susjedna rebara (m)	Rebro:
Zrc	Z	1,428	2,856	0,00		Zrc
Rebro 0	R <sub>0</sub>	2,202	4,404	2,63	2,63	Rebro 0
Rebro 1	R <sub>1</sub>	4,003	8,006	5,00	2,37	Rebro 1
Rebro 2	R <sub>2</sub>	6,048	12,096	7,37	2,37	Rebro 2
Rebro 3	R <sub>3</sub>	7,421	14,842	9,74	2,37	Rebro 3
Rebro 4	R <sub>4</sub>	7,834	15,668	12,11	2,37	Rebro 4
Rebro 5	R <sub>5</sub>	7,878	15,756	14,48	2,37	Rebro 5
Rebro 6	R <sub>6</sub>	7,491	14,982	16,85	2,37	Rebro 6
Rebro 7	R <sub>7</sub>	6,530	13,060	19,22	2,37	Rebro 7
Rebro 8	R <sub>8</sub>	4,374	8,748	21,59	2,37	Rebro 8
Rebro 9	R <sub>9</sub>	1,866	3,732	23,96	2,37	Rebro 9
Rebro 10	R <sub>10</sub>	0,000	0,000	26,33	2,37	Rebro 10
Ukupno:	U	/	/	/	/	/

Općenito, areala je krivulja koja prikazuje ovisnost površine o linearnoj dimenziji. To može biti ovisnost površine rebra do neke vodne linije u ovisnosti o apscisi rebra (dakle po duljini broda) kao što je u ovom slučaju [1].

U grafu 1 na Y osi je prikazana površina u m<sup>2</sup>, a na osi X je prikazana dužina broda izražena u m. Točke na krivulji po osi X prikazuju rebara i krmeno zrcalo.

Graf 2: Areala rebara



## 5.2 Izračun uronjenog volumena ispod konstruktivne vodene linije

Volumen uronjenog dijela broda, odnosno istisnine može se izračunati na temelju površine teoretskih rebara. *Areala rebara predstavlja zakonitost promjene površine presjeka forme (rebara, vodnih linija ili uzdužnica) duž jedne dimenzije (duljine, širine ili visine)* [1]. Određivanjem površine ispod te krivulje može se odrediti volumen istisnine.

Nakon što je objašnjen postupak pomoću kojega se izračunao uronjeni volumen, u sljedećem dijelu su navedeni dobivene vrijednosti nakon proračuna uronjenog volumena za "M/B" Naše more".

Volumen istisnine računa se kao:

$$\nabla = \int_0^z A_g(x) dx \quad (6)$$

$$V = d \cdot \sum k_i \cdot A_i = 267.5 \text{ m}^3 \quad (7)$$

Gdje je: V volumen istisnine u m<sup>3</sup>, d razmak rebara u m, k<sub>i</sub> koeficijent zadan trapeznim pravilom i A<sub>i</sub> površina rebara u m<sup>2</sup>.

Tablica 3: Površina ispod krivulje izračunata pomoću trapeznog pravila

Rebro:	Ime:	Koordinate:	Površina rebara (m <sup>2</sup> )	Koeficijent:	Umnožak:	Uronjeni dio između dva rebara (m <sup>3</sup> )	Rebro:
Zrc	Z	Y <sub>z</sub>	2,856	0,50	1,428	3,756	Zrc
Rebro 0	R <sub>0</sub>	Y <sub>0</sub>	4,404	1,00	4,404	10,437	Rebro 0
Rebro 1	R <sub>1</sub>	Y <sub>1</sub>	8,006	1,00	8,006	18,974	Rebro 1
Rebro 2	R <sub>2</sub>	Y <sub>2</sub>	12,096	1,00	12,096	28,668	Rebro 2
Rebro 3	R <sub>3</sub>	Y <sub>3</sub>	14,842	1,00	14,842	35,176	Rebro 3
Rebro 4	R <sub>4</sub>	Y <sub>4</sub>	15,668	1,00	15,668	37,133	Rebro 4
Rebro 5	R <sub>5</sub>	Y <sub>5</sub>	15,756	1,00	15,756	37,342	Rebro 5
Rebro 6	R <sub>6</sub>	Y <sub>6</sub>	14,982	1,00	14,982	35,507	Rebro 6
Rebro 7	R <sub>7</sub>	Y <sub>7</sub>	13,060	1,00	13,060	30,952	Rebro 7
Rebro 8	R <sub>8</sub>	Y <sub>8</sub>	8,748	1,00	8,748	20,733	Rebro 8
Rebro 9	R <sub>9</sub>	Y <sub>9</sub>	3,732	1,00	3,732	8,845	Rebro 9
Rebro 10	R <sub>10</sub>	Y <sub>10</sub>	0,000	0,50	0,000		Rebro 10
Ukupno:	U	Y <sub>u</sub>	/	/	/	267,522	/



### 5.3. Vertikalni položaj težišta istisnine

Vertikalni položaj težišta istisnine dobiva se kao omjer momenta volumena uronjenog dijela broda i volumena istisnine. Moment volumena uronjenog dijela broda oko osnove bazira se na momentima površina dostupnih teoretskih rebara. Prikazom momenta površina navedenih rebara u ovisnosti o duljini broda dobiva se krivulja koja omeđuje neku površinu. Površina ispod krivulje jednaka je momentu volumena istisnine. Navedeni postupak je prikazan u nastavku u tablicama 4-6.

U ovom slučaju, površine rebara su simetrične što izračun čini uvelike lakšim zbog toga što se težište nalazi negdje u osi simetrije što znači da je potrebno odrediti samo jednu koordinatu težišta tj. koordinatu Y. Visine težišta pojedinih površina prikazane su u tablici br. 4.

Momenti površine za navedena rebra računaju se kao visina težišta pomnožena s površinom rebra:

$$m_z = V_t \cdot A \quad (8)$$

Gdje je:  $M_z$  moment površine u  $m^3$ ,  $V_t$  visina težišta u m i A površina rebra u  $m^2$ .

Nakon što se pomnože visine težišta s površinom rebra dobiju se momenti površine za navedena rebra koji su prikazani u tablici br. 5. Težište za rebro broj 10 nije bilo potrebno određivati zato što deseto rebro nema uronjenu površinu na konstruktivnoj vodenoj liniji pa mu tako tako i moment površine iznosi nula.

Moment volumena računa se kao površina ispod krivulje iz grafa br. 4. Za izračun površine ispod te krivulje koristi se trapezno pravilo koje je već objašnjeno.

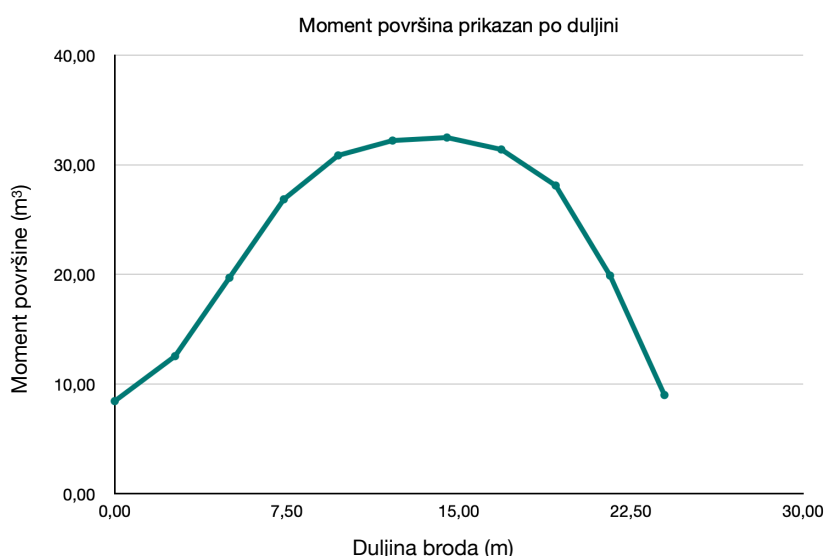
Tablica 4: Visina težišta za pojedina rebra

Rebro:	Ime	Visina (mm)	Visina (m)	Površina rebra ( $m^2$ )
Zrc	Z	2959,10	2,959	2,856
Rebro 0	R <sub>0</sub>	2850,20	2,850	4,404
Rebro 1	R <sub>1</sub>	2461,30	2,461	8,006
Rebro 2	R <sub>2</sub>	2220,40	2,220	12,096
Rebro 3	R <sub>3</sub>	2079,40	2,079	14,842
Rebro 4	R <sub>4</sub>	2056,20	2,056	15,668
Rebro 5	R <sub>5</sub>	2062,20	2,062	15,756
Rebro 6	R <sub>6</sub>	2096,10	2,096	14,982
Rebro 7	R <sub>7</sub>	2152,70	2,153	13,060
Rebro 8	R <sub>8</sub>	2274,90	2,275	8,748
Rebro 9	R <sub>9</sub>	2413,30	2,413	3,732
Prosjeak	AVG	2329,62	2,330	/

Tablica 5: moment površine za pojedinačna rebra u  $m^3$

Rebro:	Ime	Moment ( $m^3$ )
Zrc	Z	8,45
Rebro 0	R <sub>0</sub>	12,55
Rebro 1	R <sub>1</sub>	19,71
Rebro 2	R <sub>2</sub>	26,86
Rebro 3	R <sub>3</sub>	30,86
Rebro 4	R <sub>4</sub>	32,22
Rebro 5	R <sub>5</sub>	32,49
Rebro 6	R <sub>6</sub>	31,40
Rebro 7	R <sub>7</sub>	28,11
Rebro 8	R <sub>8</sub>	19,90
Rebro 9	R <sub>9</sub>	9,01
Rebro 10	R <sub>10</sub>	0,00
Suma	Sum	251,56

Graf 3: Grafički prikaz momenta površina u odnosu na duljinu



Kada se moment površine u  $m^3$  pomnoži s pripadajućim koeficijentom  $n$  i lineranim faktorom (u ovom slučaju udaljenost izražena u  $m$ ) dobiti će se moment volumena koji će biti izražen u  $m^4$ . Tablica br. 6 prikazuje momente volumena za uronjene djelove rebra ispod konstruktivne vodene linije.

Moment volumena po visini (u smjeru osi  $Z$ ) može se odrediti iz krivulje momenata rebra prema osnovici:

$$M_z = \int_0^r m_z(x) dx \quad (9)$$

$$M_z = d \cdot \sum k_i \cdot m_z = 567.62 \text{ m}^4 \quad (10)$$

Gdje je:  $M_z$  moment volumena u  $m^4$ ,  $d$  razmak rebra u  $m$ ,  $k_i$  koeficijent zadan trapeznim pravilom a  $m_z$  moment površina u  $m^3$ .

Tablica 6: Momenti volumena

Rebro:	Ime:	Koordinate:	Moment površine (m³)	Koeficijent:	Umnožak:	Moment volumena (m⁴)
Zrc	Z	Y <sub>Z</sub>	8,451	0,50	4,23	11,11
Rebro 0	R <sub>0</sub>	Y <sub>0</sub>	12,552	1,00	12,55	29,75
Rebro 1	R <sub>1</sub>	Y <sub>1</sub>	19,705	1,00	19,71	46,70
Rebro 2	R <sub>2</sub>	Y <sub>2</sub>	26,858	1,00	26,86	63,65
Rebro 3	R <sub>3</sub>	Y <sub>3</sub>	30,862	1,00	30,86	73,14
Rebro 4	R <sub>4</sub>	Y <sub>4</sub>	32,217	1,00	32,22	76,35
Rebro 5	R <sub>5</sub>	Y <sub>5</sub>	32,492	1,00	32,49	77,01
Rebro 6	R <sub>6</sub>	Y <sub>6</sub>	31,404	1,00	31,40	74,43
Rebro 7	R <sub>7</sub>	Y <sub>7</sub>	28,114	1,00	28,11	66,63
Rebro 8	R <sub>8</sub>	Y <sub>8</sub>	19,901	1,00	19,90	47,16
Rebro 9	R <sub>9</sub>	Y <sub>9</sub>	9,006	0,50	4,50	10,67
Ukupno:	U	Y <sub>U</sub>	251,56	/	/	576,62

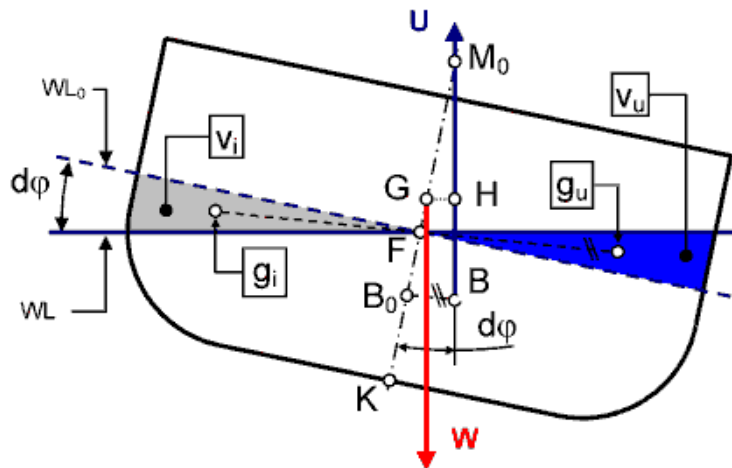
Kada se dobiju i sumiraju pojedinačni momenti volumena može se izračunati položaj vertikalnog težišta istisnine. Vertikalno težište računa se tako da se ukupni moment volumena tj. suma pojedinačnih volumena podjeli s ukupnim volumenom istisnine (izraz 11) te se dobije sljedeća vrijednost:

$$\begin{aligned} KB &= M_V / V && (11) \\ KB &= 576.62 / 267.52 \\ KB &= 2.155 \text{ m} \end{aligned}$$

Gdje je KB udaljenost težišta istisnine od kobilice u m,  $M_V$  moment volumena u  $m^4$ , a  $V$  uronjeni volumen broda u  $m^3$ .

## 5.4 Izračun metacentarskog radijusa

Poprečni stabilitet broda zasniva se na postojanju para sila tj. uzgona i težine, koji se suprotstavljaju momentu koji nagiba brod. Za male nagibe broda može se pretpostaviti da će jedan bok uroniti dok će drugi izroniti jer se ukupna istisnina ne mijenja. Uronjeni klin ostvaruje dodatni uzgon dok se na izronjenom klinu javlja manjak uzgona iste apsolutne veličine. Slika 5 prikazuje izronjeni i uronjeni klin [1].



Slika 5: Položaj klinova i poprečnog metacentra [1]

Vidljivo je da položaj metacentra ovisi o poprečnom momentu inercije vodne linije i volumenu istisnine. Metacentarski radijus je radijus kružnice po kojoj se pomiče težište istisnine za male kutove nagibanja. Središte te kružnice je u metacentru.

Metacentarski radijus računa se po formuli:

$$\overline{B_0M_0} = \frac{I_T}{\nabla} \quad (12)$$

Gdje je:  $B_0M_0$  udaljenost od težišta istisnine do metacentra u m,  $\nabla$  uronjeni volumen broda u  $m^3$ , a  $I_T$  moment inercije vodne linije oko simetrale.

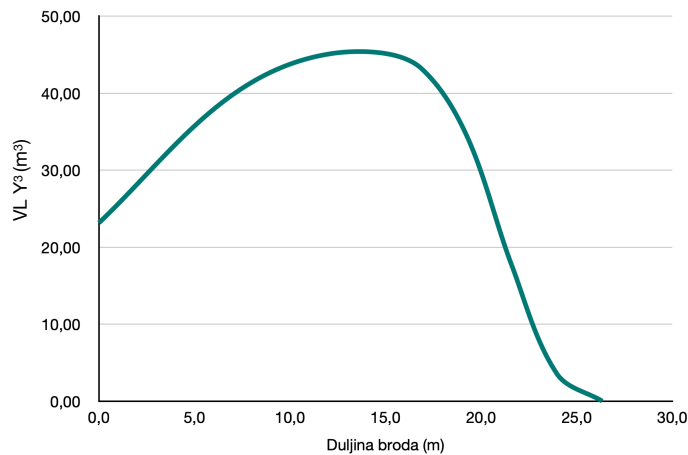
$I_T$  tj. moment inercije vodne linije oko simetrale računa se po formuli:

$$I_T = 2 \cdot \frac{1}{3} \int_0^L y^3 \cdot dx \quad (13)$$

Gdje je  $y$  polovina širine vodne linije, u ovom slučaju KVL.

Moment inercije vodne linije računali smo pomoću trapeznog pravila, na  $Y$  osi prikazali smo kubirane poluširine u  $m^3$ , a na osi  $X$  duljinu broda u m te to prikazali krivuljom u grafu 4.

Graf 4: Određivanje momenta inercije plovne linije KVL



Tablica 7: Proračun vrijednosti površine ispod krivulje prikazane u grafu 4

Udaljenost između dva susjedna rebra	Rebro:	Udaljenost od zrcala (m)	Poluširina rebra na konstruktivnoj vodnoj liniji (m)	Kub poluširine rebra	Koeficijent	Površina
2,63	Zrc	0,0	2,85	23,15	0,50	30,44
2,37	Rebro 0	2,6	3,09	29,36	1,00	69,58
2,37	Rebro 1	5,0	3,31	36,10	1,00	85,56
2,37	Rebro 2	7,4	3,45	40,89	1,00	96,90
2,37	Rebro 3	9,7	3,52	43,43	1,00	102,93
2,37	Rebro 4	12,1	3,56	45,12	1,00	106,93
2,37	Rebro 5	14,5	3,57	45,31	1,00	107,38
2,37	Rebro 6	16,9	3,51	43,24	1,00	102,49
2,37	Rebro 7	19,2	3,26	34,58	1,00	81,96
2,37	Rebro 8	21,6	2,61	17,68	1,00	41,90
2,37	Rebro 9	24,0	1,53	3,55	1,00	8,41
2,37	Rebro 10	26,3	0,00	0,00	0,50	0,00
Suma:	/	/	/	/	/	834,47

Nakon što je površina ispod krivulje izračunata trapeznim pravilom, dobivena vrijednost može se uvrstiti u formulu za dobivanje momenta inercije vodne linije oko simetrale (izraz 13) te se dobije:

$$I_T = 2/3 \cdot A$$

$$I_T = 2/3 \cdot 834.47$$

$$I_T = 556.31 \text{ m}^4$$

Vrijednost  $I_T$  uvrštava u formulu za izračun metacentarskog radijusa (izraz 12), te kada se podjeli s računatim volumenom od  $267,52 \text{ m}^3$  dobije se:

$$B_0M_0 = I_T / V$$

$$B_0M_0 = 556.31 \text{ m}^4 / 267.52 \text{ m}^3$$

$$B_0M_0 = 2.08 \text{ m}$$

## 6. Položaj sustavnog težišta G prema stvarnim težinama

Nakon gradnje broda, brodogradilište može na više načina provjeriti položaj sustavnog težišta broda. Njegova visina ovisi o težini praznog broda i položaju ugrađenih težina te se takav KG ne mijenja [2].

*Ukrcajem bilo koje težine na brod doći će do pomaka sustavnog težišta broda jer se poremetio prethodni odnos težina. Koliki će taj pomak biti ovisi o ukrcanoj težini te njenoj udaljenosti od kobilice [2].*

Ukrcajem težine ispod sustavnog težišta točka G se pomiče prema dolje te se udaljenost KG samnjuje dok se kod ukrcaja težina iznad sustavnog težišta točka G pomiče prema gore te se udaljenost KG povećava. Za ukrcaj težine u ravnini sustavnog težišta točka G se ne pomiče.

Knjiga trima i stabiliteta za M/B "Naše more" daje potrebne podatke za izračun sustavnog težišta tj. poziciju težišta mase.

U tablici 8 navedeni su svi tankovi i drugi elementi koji utječu na pomak težišta. Navedeni podaci u tablici odnose se na potpuno opremljen brod sa 100% zaliha. Iz Knjige trima i stabiliteta mogu se preuzeti mase, njihov LCG (longitudinal centre of gravity) i VCG (vertical centre of gravity). Pomoću tih podataka mogu se izračunati longitudinalni i vertikalni momenti mase, i to na način da se masa pomnoži s LCG da bi se dobio longitudinalni, a s VCG da bi se dobio vertikalni moment mase. Koristeći izraze 15 i 16 dobiju se vrijednosti prikazane u tablici br. 8.

$$MLCG = m \cdot LCG \quad (14)$$

Gdje je: MLCG longitudinalni moment mase u tm, m masa u t, a LCG longitudinalno težište mase u m.

$$MVCG = m \cdot VCG \quad (15)$$

Gdje je: MVCG longitudinalni moment mase u tm, m masa u t, a LCG vertikalna visina težišta mase u m.

Tablica 8: Težine i položaji težišta pojedinih tankova

Naziv	Masa (t)	LCG [m]	VCG [m]	MLCG [tm]	MVCG [tm]
Prazan i opremljen	208,69	/	/	2229,76	832,97
Provijant	1,00	11,50	3,00	11,50	3,00
Pitka voda L/R (3-I)	12,00	18,90	1,82	226,80	21,84
Otpadna voda (5-I)	/	/	/	/	/
Sl. voda sred. (20-II)	4,34	-2,170	3,67	-9,42	15,93
Sl. voda L/R (20-II)	5,18	-2,170	3,75	-11,24	19,43
Tank goriva L (10-I)	4,96	7,85	1,72	38,94	8,53
Tank goriva R (11-I)	4,96	7,85	1,72	38,94	8,53
Tank goriva L (15-II)	4,40	0,016	3,62	0,07	15,93
Tank goriva R (17-II)	4,40	0,016	3,62	0,07	15,93
Potrošni tank goriva L (12-II)	1,84	1,504	3,35	2,77	6,16
Svježe ulje R (13-II)	0,98	1,504	3,40	1,47	3,33
Odrađeno ulje R (14-II)	1,15	1,504	3,51	1,73	4,04
Tank hidraulike	0,75	9,530	5,40	7,15	4,05
Tank kaljuže	0,120	2,800	2,00	0,34	0,24
Posada	1,80	/	/	22,50	17,10
Suma	256,57			2561,37	977,00

Kada se zbroje pojedinačni momenti dobiti će se suma momenta LCG i VCG koja nam je potrebna za određivanje pozicije težišta sustava.

Longitudinalna pozicija težišta sustava (LCG) određuje se gledajući udaljenost od krmenog perpendikulara i to na način da se suma momenta LCG ( $\sum MLCG$ ) podjeli s deplasmanom D (izraz 18).

Vertikalna pozicija težišta sustava (VCG) definirana je kao udaljenost točke G od kobilice, ta se udaljenost može označiti i s KG. Udaljenost VCG tj. KG dobija se na način da se suma momenata VCG ( $\sum MVCG$ ) podjeli s deplasmanom (izraz 17).

Oznake u zagradi pokraj naziva, u tablici broj 8 upućuju na prilog br. 2 gdje su ucrtani i shodno tome označeni navedeni elementi u tablici.

$$KG = \sum MVCG / D \quad (16)$$

$$KG = 977.00 / 256,57$$

$$KG = 3.81 \text{ m}$$

Gdje je KG udaljenost težišta sustava od kobilice u m,  $\sum MVCG$  suma momenata VCG u tm i D deplasman u t.

$$LCG = \sum MLCG / D \quad (17)$$

$$LCG = 2561.37 / 256.57$$

$$LCG = 9.98 \text{ m}$$

Gdje je LCG longitudinalna udaljenost težišta sustava od krmenog perpendikulara u m,  $\sum MLCG$  suma momenata LCG u tm i D deplasman u t.

## 7. Usporedba stvarne i proračunate metacentarske visine te pripadnih perioda valjanja

Do metacentarske visine može se doći na način da se metacentarski radijus koji je izračunat u poglavlju 5.4 zbroji s udaljenošću težišta istisnine koja je izračunata u poglavlju 5.3.

Kada se zbroji iznos metacentarskog radijusa koji iznosi 2,08 m s visinom KB koja iznosi 2.15 m (izraz 19) dobije se udaljenost metacentra od kobilice tj. visina metacentra KM.

$$\begin{aligned} KM &= KB + B_0M_0 & (18) \\ KM &= 2.15 + 2.08 \\ KM &= 4.23 \text{ m} \end{aligned}$$

Gdje je KM vertikalna udaljenost metacentra od kobilice u m, KB vertikalna udaljenost težišta istisnine od kobilice u m i  $B_0M_0$  udaljenost točke B od metacentra u m.

Uspoređujući izračunatu visinu metacentra s onom prikazanom u dijagramnom listu koji se nalazi u prilogu 4 koja iznosi 4.58 m, dobije se da su visine slične. Usporedbom se dobije da je metacentarska visina izračunata u ovom radu manja za otprilike 7%. Odnos udaljenosti KB i metacentarsog radijusa prikazan je na slici 1.

Visina  $M_0G$  sada se može izračunati kao razlika visina KG i KM ili pomoću empirijske formule navedene u izrazu 20.

$$M_0G = (0.44 \cdot B/t)^2 \quad (19)$$

Gdje je:  $M_0G$  udaljenost metacentra od težišta sustava u m,  $B$  najveća širina broda u m, a  $t$  vrijeme u skeundama potrebno da se brod nagne s boka na bok i natrag.

Koristeći izraz 21, visina KG koja je izračunata u poglavlju 6 te iznosi 3.81 oduzima se od izračunate visine KM čiji je iznos 4.23 dobije se:

$$\begin{aligned} M_0G &= KM - KG & (20) \\ M_0G &= 4.23 - 3.81 \\ M_0G &= 0.42 \text{ m} \end{aligned}$$

Gdje je:  $M_0G$  udaljenost metacentra od težišta sustava u m, KM visina udaljenost metacentra od kobilice u m i KG visina težišta sustava u m.



Uvrsti li se u izraz 21, vrijednost visine KG koja je izračunata u poglavlju 6 te iznosi 3.81 i zadane visina KM koja iznosi 4.56, dobije se:

$$M_0G = 4.58 - 3.81$$

$$M_0G = 0.77 \text{ m}$$

Pomoću tih podataka može se izračunati period valjanja broda pomoću prethodno zadane empirijske formule. Okrenuvši zadanu formulu dobija se izraz pod brojem 22 zaizračun perioda valjanja.

$$t = \frac{0.44 \cdot B}{\sqrt{MG}} \quad (21)$$

Gdje je:  $M_0G$  udaljenost metacentra od težišta sustava u m,  $B$  najveća širina broda u m, a  $t$  vrijeme u skeundama potrebno da se brod nagne s boka na bok i natrag.

Uvrstivši u izraz pod brojem 22 računatu vrijednost MG dobije se period valjanja koji iznosi:

$$T = (0.44 \cdot B) / \sqrt{MG}$$

$$t = (0.44 \cdot 7.4) / \sqrt{0.42}$$

$$t = 5.0 \text{ s}$$

Uvrstivši u izraz pod brojem 22 zadanu vrijednost MG (vrijednost dobivena kao razlika stvarne visine KM i KG) dobije se period valjanja koji iznosi:

$$T = (0.44 \cdot B) / \sqrt{MG}$$

$$t = (0.44 \cdot 7.4) / \sqrt{0.77}$$

$$t = 3,7 \text{ s}$$

## 8. Kriteriji stabilnosti za kutove nagiba veće od 12°

M/B “Naše more” mora zadovoljiti kriterije zadane prema Kodeksu o stabilnosti u neoštećenom stanju za sve vrste brodova (Code on Intact Stability for All Types of Ships Covered by IMO Instruments: Resolution A.749 (18) ).

Taj kodeks nalaže da:

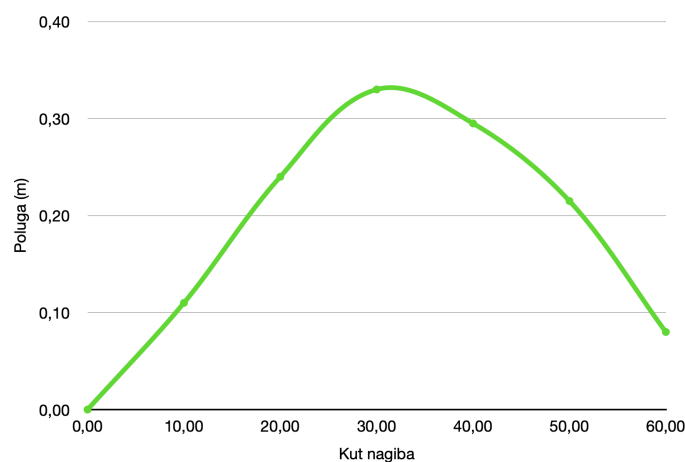
- površina ispod krivulje ne smije biti manja od 0.055 metar-radijana do 30° kuta nagiba i ne manja od 0.09 metar-radijana do 40° kuta nagiba
- maksimalni moment uspravljanja trebao bi se pojaviti pri kutu nagiba od 30°
- površina ispod krivulje od kuta nagiba 30° do kuta nagiba od 40° ne smije biti manja od 0.03 metar-radijana
- početna metacentarska visina ne smije biti manja od 0.15m

Zbog nedostupnosti podataka za crtanje krivulje statičkog stabiliteta, krivulja je preuzeta iz knjige trima i stabiliteta te su prikazane vrijednosti površine ispod iste također preuzete iz knjige trima i stabiliteta.

Dijagram poluga statičkog stabiliteta s vrijednostima površine ispod iste prikazana je u prilogu 5.

Površine ispod krivulje određuju se pomoću tzv. “Simpsonovih pravila”. *Simpsonovo pravilo je najčešće korišteno pravilo za tablični pristup numeričkom integriranju. Kod upotrebe ovog pravila elementarne su površine, one čijih suma daje ukupnu površinu ispod krivulje omeđene parabolama drugog stupnja. Simpsonovim prvim pravilom postiže se jednostavnim računom dovoljna točnost. Zbog toga se ono i najčešće upotrebljava kod brodograđevnih proračuna [1].*

Graf 5: Dijagram poluga statičkog stabiliteta



Tablica 9: Vrijednosti GH poluge za pripadajuće kutove nagiba

Kut nagiba	Poluga (m)	Koordinate Y
0°	0,00	Y <sub>0</sub>
10°	0,11	Y <sub>1</sub>
20°	0,24	Y <sub>2</sub>
30°	0,33	Y <sub>3</sub>
40°	0,30	Y <sub>4</sub>
50°	0,22	Y <sub>5</sub>
60°	0,08	Y <sub>6</sub>

Nakon izračuna površine ispod krivulje do kuta nagiba 30° i 40°, dobili smo sljedeće navedene podatke. Koristeći I. Simpsonovo pravilo (izraz 23), utvrđeno je da površina ispod krivulje do kuta nagiba 40° iznosi:

$$P_{(0^{\circ}-40^{\circ})} = 3/8 \cdot 10/57.3 (Y_0 + 4Y_1 + 2Y_2 + 4Y_3 + Y_4) \quad (22)$$

$$P_{(0^{\circ}-40^{\circ})} = 3/8 \cdot 10/57.3 (0 + 4 \cdot 0.11 + 2 \cdot 0.24 + 4 \cdot 0.33 + 0.3)$$

$$P_{(0^{\circ}-40^{\circ})} = 0.166 \text{ mRad}$$

Gdje su Y<sub>n</sub> vrijednosti poluge za određeni kut nagiba. Vrijednosti poluge za određene kutove nagiba prikazane su u tablici 9.

Koristeći II. Simpsonovo pravilo (izraz 24) utvrđeno je da površina ispod krivulje od kuta nagiba 0° do kuta nagiba 30° iznosi:

Te računate površine odgovaraju onima prikazanim u dijagramu poluga statičkog stabiliteta u prilogu 5.

$$P_{(0^{\circ}-30^{\circ})} = 3/8 \cdot 10/57.3 (Y_0 + 3Y_1 + 3Y_2 + Y_3) \quad (23)$$

$$P_{(0^{\circ}-30^{\circ})} = 3/8 \cdot 10/57.3 (0 + 3 \cdot 0.11 + 3 \cdot 0.24 + 0.33)$$

$$P_{(0^{\circ}-30^{\circ})} = 0.090 \text{ mRad}$$

Gdje su Y<sub>n</sub> vrijednosti poluge za određeni kut nagiba. Vrijednosti poluge za određene kutove nagiba prikazane su u tablici 9. Te računate površine odgovaraju onima prikazanim u dijagramu poluga statičkog stabiliteta u prilogu 5.

Visine točke metacentra (KM), prikazane su u dijagramnom listu na kraju rada.

## Zaključak

Ovim radom nastojalo se napraviti provjeru nekih od osnovnih faktora koji utječu na stabilnost M/B "Naše more" te objasniti postupak dobivanja pozicije nekih od ključnih točaka vezanih uz brodski stabilitet. U ovom radu, provjera početnog stabiliteta je napravljena za M/B "Naše more" u potpuno opremljenom stanju sa 100% zaliha.

Kao referencu za provjeru točnosti dobivenih izračuna koristili smo Knjigu trima i stabiliteta M/B "Naše more". Neki dijelovi Knjige trima i stabiliteta koji su korišteni u radu su prikazani u priložima.

Kod izračuna uronjenog volumena došlo je do greške od +4%. Do te greške dolazi zbog toga što smo uronjeni volumen računali kao umnožak uronjene površine teoretskih rebara s udaljenošću do susjednog teoretskog rebra. Takav račun nam teoretski daje prizmatični oblik, koji nije potpuno vjerna reprezentacija uronjenog oblika broda. Također, na točnost računa utječe i uronjena površina teoretskih rebara do koje smo došli na način da smo nacrt iz priloga br. 3 pomoću računalnog programa "AutoCAD 2019" skalirali u mjerilo 1:1 te na taj način došli do površine teoretskih rebara. Iz prethodno navedenih razloga, do greške sličnih proporcija dolazi i kod izračuna visine težišta istisnine KB.

Faktori koji utječu na stabilitet i ovog broda su njegove zalihe koje uključuju i tankove goriva, vode, ulja itd. te su navedeni u tablici br. 8 a njihov položaj prikazan je u prilogu br. 2.

Zbog već navedene greške u izračunu volumena dolazi i do greške u izračunu visine metacentra. Za računatu visinu KM dobivena je vrijednost od 4.23m što je uspoređujući sa stvarnom vrijednošću iz dijagramnog lista u prilogu 7 koja iznosi 4.58 m razlika od 8%.

Zbog tih grešaka dolazi do znatne razlike u vrijednost  $M_0G_0$ . Prema podacima iz Knjige trima i stabiliteta izračunato je da bi vrijednost  $M_0G_0$  trebala iznositi 0.77m što je za 0.35 m veće od računate vrijednosti koja iznosi 0.42 m. Obje vrijednosti udovoljavaju IMO rezoluciji A.749(18) Code on Intact Stability for All Types of Ships tj. veće su od 0.15 m što je minimalno propisano navedenim pravilnikom.

Uzevši u obzir sve prethodno navedene greške, dobivena je razlika od 1.3 s u periodu valnja. Izračunato je da period valjanja iznosi 3.7 s prema vrijednostima koje su računate u ovom radu. Prema vrijednostima korištenim iz knjigre trima i stabiliteta dobija se iznos perioda valjanja od 5 s.

Iz navedenog može se zaključiti da je brod jako osjetljiv na stanje mora te da nije naročito ugodan za plovidbu po valovitom moru.

## Literatura:

[1] Grubišić Izvor (2001.); Geometrija broda; Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zavod za brodogradnju i pomorsku mehaniku, Katedra za hidomehaniku plovnih objekata

Preuzeto s: <https://www.fsb.unizg.hr/geometrija.broda/>

[2] Marinka Franko (1999.); Stabilnost broda, Znanje d.d. , Zagreb

[3] Buljan Ivo (1982.); Stabilnost broda, Školska knjiga, Zagreb

[4] Kurtela Željko (1999.); Rekonstrukcija školsko - istraživačkog broda "Naše more"

[5] Belamarić Igor (2005.); Brodska tonaža

[6] Itković Hrvoje (2014.); Analiza proračuna poprečne i uzdužne stabilnosti broda

[7] Hrvatski Brodarski institut - Knjiga trima i stabiliteta M/B "Naše more",  
Oznaka - BC-J08-EBN20-000

[8] Code on intact stability for all types of ships covered by IMO instruments  
RESOLUTION A.749(18) adopted on 4 November 1993

Preuzeto s: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.749\(18\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.749(18).pdf)

## **Popis slika:**

Slika 1: Sprog sila uspravljnja broda str. 7

Slika 2: Krivulje težišta uzgona B i metacentra M str. 7

Slika 3: Trokut GHM str. 8

Slika 4 Površinski oblik rebara ispod konstruktivne vodene linije str. 10

Slika 5: Položaj klinova i poprečnog metacentra [1] str. 16

## **Popis tablica:**

Tablica 1: Izračunavanje površine ispod krivulje trapeznim pravilom str. 9

Tablica 2: Uronjene površine rebara i njihova udaljenost str. 11

Tablica 3: Površina ispod krivulje izračunata pomoću trapeznog pravila str. 12

Tablica 4: Visina težišta za pojedina rebra str. 13

Tablica 5: Moment površine za pojedinačna rebra u  $m^3$  str. 13

Tablica 6: Momenti volumena str. 14

Tablica 7: Proračun vrijednosti površine ispod krivulje prikazane u grafu 4 str. 17

Tablica 8: Težine i položaji težišta pojedinih tankova str. 19

Tablica 9: Vrijednosti GH poluge za pripadajuće kutove nagiba str. 23

## **Popis grafikona:**

Graf 1: Izvod trapeznog pravila str. 9

Graf 2: Areal rebara str. 11

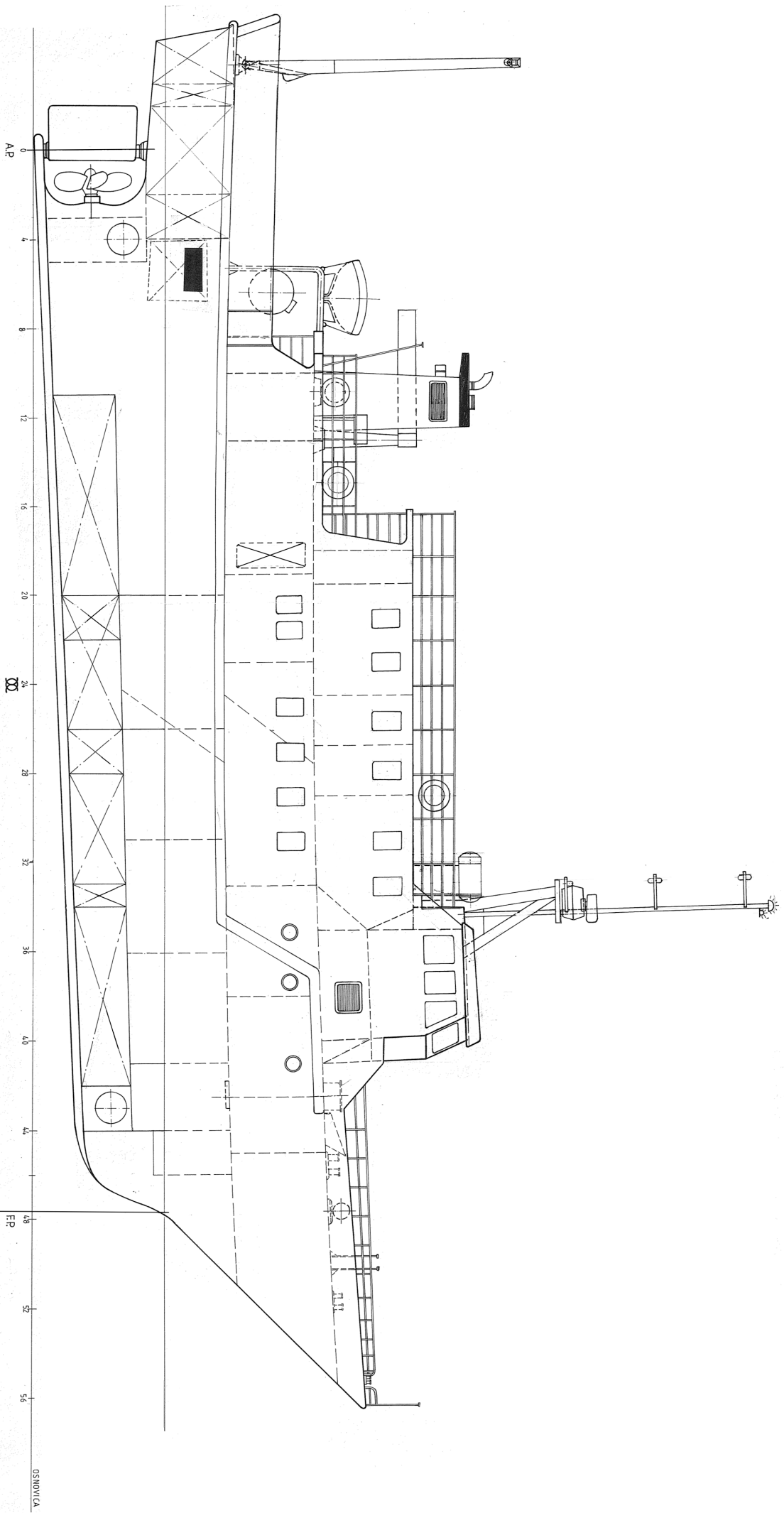
Graf 3: Grafički prikaz momenta površina u odnosu na duljinu str. 14

Graf 4: Određivanje momenta inercije plovne linije KVL str. 17

Graf 5: Dijagram poluga statičkog stabiliteta str. 22



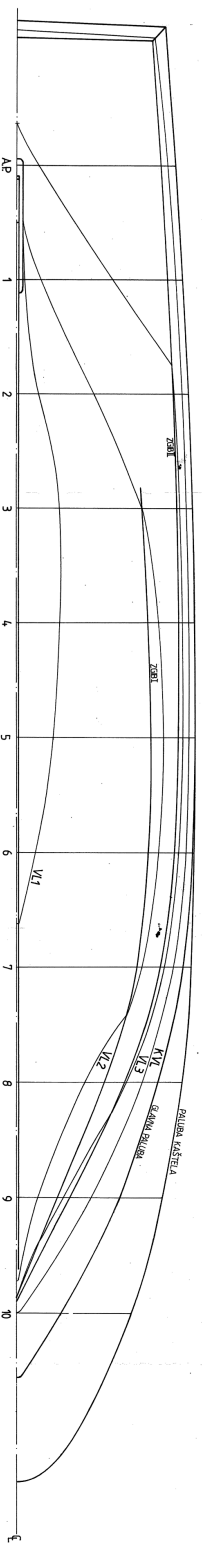
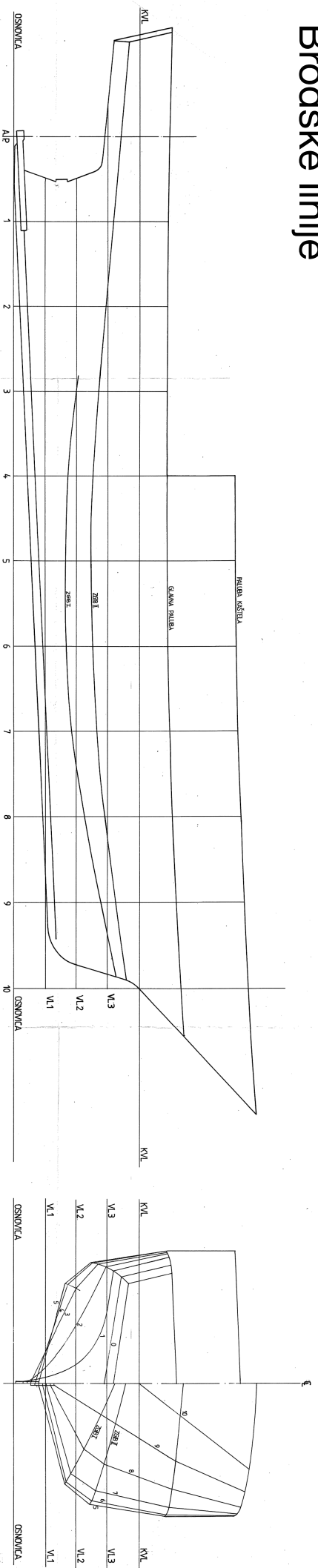
# M/B "Naše more"



Prilog 1 : bočni pogled na M/B "Naše more" nakon restauracije



# Brodске linije



	Poluširine				Visine					
	VL <sub>1</sub>	VL <sub>2</sub>	VL <sub>3</sub>	K.V.L.	G.P.	PK.	Zi	Z <sub>0</sub>	G.P.	PK.
ZRC	/	/	/	2850	3063	/	/	3210	4415	/
R <sub>0</sub>	/	/	430	3085	3295	/	/	3010	4395	/
R <sub>1</sub>	170	518	1975	3305	3505	/	/	2795	4340	/
R <sub>2</sub>	445	1605	3250	3445	3605	/	/	2588	4300	/
R <sub>3</sub>	875	2633	3363	3515	3648	/	1750	2370	4280	/
R <sub>4</sub>	875	2950	3410	3560	3700	3700	1525	2205	4263	6175
R <sub>5</sub>	750	3020	3435	3565	3700	3700	1450	2173	4265	6177
R <sub>6</sub>	375	2940	3335	3510	3648	3670	1488	2188	4270	6190
R <sub>7</sub>	10	2600	3003	3258	3443	3620	1600	2298	4340	6230
R <sub>8</sub>	10	1400	2265	2605	2930	3445	1965	2528	4420	6338
R <sub>9</sub>	/	435	513	1525	2155	3005	2448	2850	4520	6450
R <sub>10</sub>	/	/	/	0	870	2388	/	/	4650	6560
VRH							2835	3135	4740	6780

Prilog 3: Pogled na uronjeni dio broda s tablicom visina i poluširina

## 1. UVODNE NAPOMENE

Istraživačko-školski brod "Naše more" rekonstrukcijom je preinačen iz ribarskog broda. Razlika u odnosu na prvobitno stanje prikazana je u T.O. koji ima oznaku BC-J08-EAL00-000.

Brod je predviđen za područje plovidbe 3, izuzimajući teritorijalna mora Italije, Slovenije, Jugoslavije i Albanije.

Glavne dimenzije:

Duljina preko svega..... 31,75m  
Duljina između okomica.....23,70m  
Maksimalna širina..... 7,40m  
Visina od osnovke.....4,265m  
(na glavnom rebru)

Sve vrijednosti u ovom proračunu odnose se na koordinatni sustav s ishodištem u sjecištu osnovice i krmene okomice (prema nacrtu "Brodске linije" BC-J08-EBJ10-000 ).

**Napomena:** Zagaznice na krmi ( u simetrali zrcala ) mjerene su od osnovice, a zagaznice na pramcu od točke presjecišta pravaca povučenih donjim rubom kobilice i donjim dijelom pramčane statve. Ova točka se nalazi na 1,00 m od osnovice. Prema tome nakon očitavanja gazova na pramcu potrebno je izmjerenu vrijednost povećati za 1,00 m i s tom veličinom očitavati vrijednosti za gazove u tablicama i dijagramima.



## 2. KRITERIJI STABILITETA

### 2.1 Opće napomene

Proračun stabiliteta izrađen je u skladu s pravilima Hrvatskog registra brodova, dio 4- Stabilitet.

Sukladno zahtjevima za brodove posebne namjene (HRB, poglavlje 3, t.3.6), tj. za školske i slične brodove (t.3.6.2) stabilitet je provjeren za slijedeća-standardna-stanja krcanja/opterećenja:

- brod s posebnim osobljem i punim (100%) zaliham
- brod kao i prije, ali sa 75% zaliha
- brod kao i prije, ali s 50% zaliha
- brod kao i prije, ali s 20% zaliha
- brod kao i prije, ali s 10% zaliha
- brod kao i prije, ali s 10% zaliha i praznim tankom (5-1)

Osim za navedena standardna stanja za istu je istisninu (100%, 75%, 50%, 20% i 10%) provjerena granična (minimalna) metacentarska visina  $M_0G$ , odnosno najviši dozvoljeni položaj težišta sustava  $z_G$ .

Tako je dobivena krivulja - na apcisi istisnina/gaz, a na ordinati  $(M_0G)_{min}$  - koja omogućava zapovjedniku broda kontrolu stabiliteta kod najrazličitijih položaja i količina krcanja raznih tereta po brodu.

### 2.2 Kriterij vremenskih prilika (HRB, poglavlje 2, t.2.1)

Stabilitet broda s obzirom na kriterij vremenskih prilika smatra se dovoljnim ako su zadovoljene točke 2.1.1-2.1.7.

Za svako je standardno opterećenje i graničnu vrijednost  $M_0G$  provjerena sposobnost broda da izdrži kombinirano djelovanje bočnog vjeta i valjanja tako da je rad momenta uspravljanja (površina "b" prema t.2.1.2.4) veći od rada momenta nagibanja (površina "a" prema t.2.1.2.4). Zadovoljenje ovog kriterija vidljivo je iz Dijagrama poluga statičkog stabiliteta i poluga momenata vjeta za svako stanje opterećenja.

Pojedine vrijednosti iz 2.1.1-2.1.7 izračunate su kako slijedi:

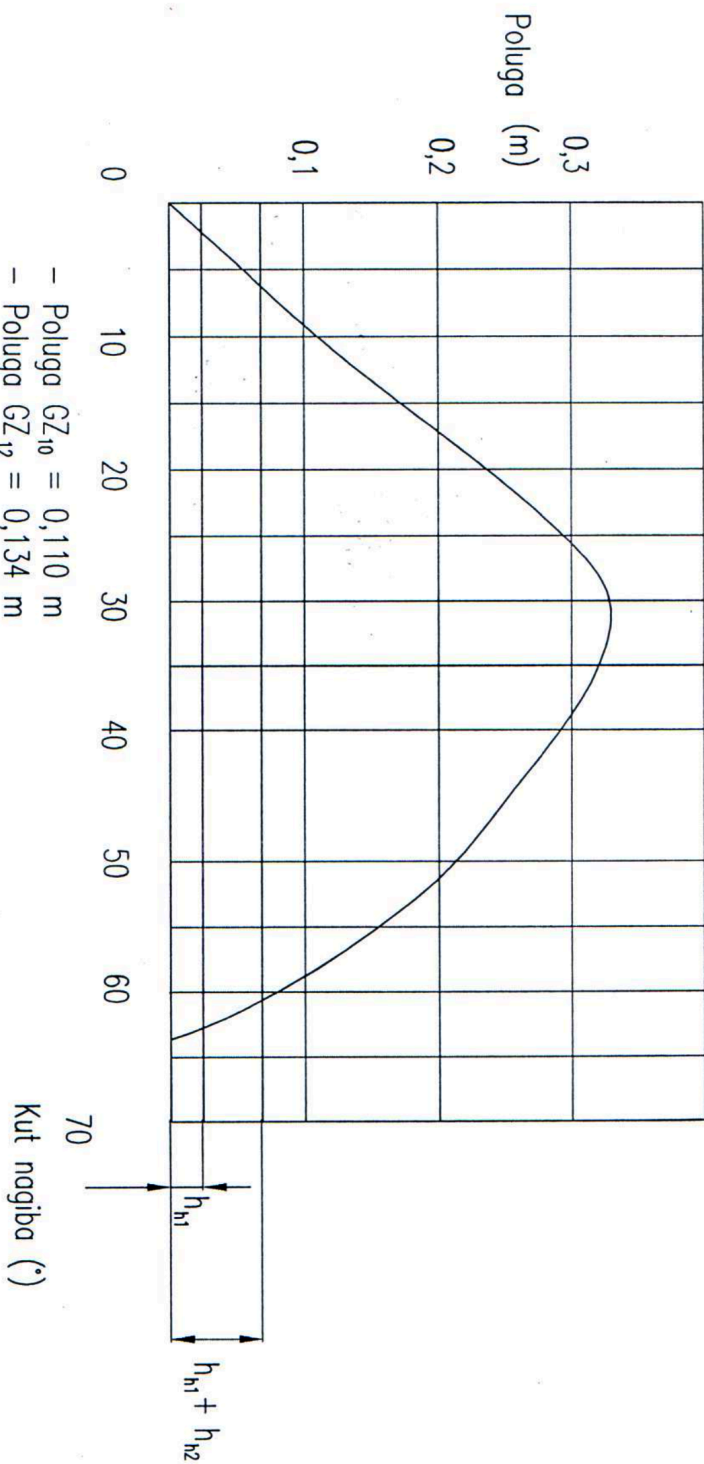
- $\Xi_0$  = kut nagiba uslijed djelovanja stalnog vjeta vidljiv je iz Dijagrama poluga statičkog stabiliteta i poluga momenata vjeta

- $\Xi_1$  = amplituda ljuljanja zbog djelovanja valova prema izrazu (t.2.1.4):

$$\Xi_1 = 109k \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot \sqrt{r \cdot s} \text{ (}^\circ\text{)}$$

Proračun  $\Xi_1$  izveden je prema tablicama na slijedećoj strani:

Dijagram poluga statickog stabiliteta  
100% zalih  
**D = 256,57 t**



- Poluga  $GZ_{10} = 0,110$  m
- Poluga  $GZ_{12} = 0,134$  m
- Poluga kod kuta od  $30^\circ > 0,2$  m
- Povrsina dijagrama do kuta nagiba od  $30^\circ = 0,090 > 0,055$
- Povecanje povrsine dijagrama od kuta od  $30^\circ$  do kuta od  $40^\circ = 0,056 > 0,030$
- $h_{n1} = 0,024$  m  $< 0,110$  m
- $h_{n1} + h_{n2} = 0,068$  m  $< 0,134$  m

## DIJAGRAMNI LIST

Gaz (m)		Volumen na rebru (m <sup>3</sup> )	Istisnina (t)		Položaj težišta istisnine (m)		Visina metacentra (m)	
Pramac	Krma		Slatka voda	Morska voda	Uzd.	Vert.	Pop.	Uzd.
0,400	0,400	0,001	0,00	0,00	-8,27	0,40	0,617	0,397
0,500	0,500	0,038	0,04	0,04	-7,24	0,46	0,533	0,463
0,600	0,600	0,148	0,15	0,15	-6,52	0,53	0,595	22,220
0,700	0,700	0,501	0,51	0,52	-5,75	0,62	1,018	37,510
0,800	0,800	1,248	1,27	1,30	-4,87	0,70	1,347	43,638
0,900	0,900	2,495	2,55	2,61	-4,16	0,78	1,916	62,568
1,000	1,000	4,636	4,73	4,85	-3,24	0,86	2,519	66,784
1,100	1,100	7,517	7,67	7,86	-2,71	0,93	3,251	70,132
1,200	1,200	11,484	11,71	12,00	-2,16	1,01	3,982	66,195
1,300	1,300	16,473	16,80	17,22	-1,74	1,08	4,725	60,186
1,400	1,400	22,485	22,94	23,51	-1,42	1,15	5,472	54,283
1,500	1,500	30,050	30,65	31,42	-1,36	1,21	5,714	47,995
1,600	1,600	37,715	38,47	39,43	-1,11	1,28	5,636	43,311
1,700	1,700	45,853	46,77	47,94	-0,94	1,34	5,390	39,190
1,800	1,800	54,441	55,53	56,92	-0,81	1,41	5,218	36,193
1,900	1,900	63,450	64,72	66,34	-0,71	1,47	5,072	33,901
2,000	2,000	72,885	74,34	76,20	-0,64	1,53	4,981	32,166
2,100	2,100	82,747	84,40	86,51	-0,59	1,59	4,924	30,714
2,200	2,200	93,045	94,91	97,28	-0,55	1,65	4,888	29,592
2,300	2,300	103,751	105,83	108,48	-0,53	1,72	4,813	28,637
2,400	2,400	114,825	117,12	120,05	-0,52	1,78	4,738	27,780
2,500	2,500	126,267	128,79	132,01	-0,52	1,84	4,662	27,601
2,600	2,600	138,176	140,94	144,46	-0,54	1,90	4,621	27,966
2,700	2,700	150,796	153,81	157,66	-0,59	1,96	4,603	29,733
2,800	2,800	163,520	166,79	170,96	-0,63	2,02	4,652	31,374
2,900	2,900	177,298	180,84	185,36	-0,72	2,09	4,645	33,066
3,000	3,000	191,694	195,53	200,42	-0,82	2,15	4,639	33,824
3,100	3,100	206,620	210,75	216,02	-0,93	2,22	4,672	34,225
3,200	3,200	221,981	226,42	232,08	-1,04	2,28	4,654	33,388
3,300	3,300	237,569	242,32	248,38	-1,14	2,34	4,617	32,094
3,400	3,400	253,317	258,38	264,84	-1,23	2,41	4,581	30,765
3,500	3,500	269,251	274,64	281,51	-1,31	2,47	4,558	29,933
3,600	3,600	285,268	290,97	298,24	-1,37	2,53	4,541	28,924
3,700	3,700	301,445	307,47	315,16	-1,44	2,59	4,533	28,024
3,800	3,800	317,783	324,14	332,24	-1,49	2,65	4,530	27,220
3,900	3,900	334,286	340,97	349,49	-1,54	2,71	4,533	26,499
4,000	4,000	350,955	357,97	366,92	-1,58	2,77	4,541	25,849
4,100	4,100	367,793	375,15	384,53	-1,62	2,83	4,553	25,262
4,200	4,200	384,803	392,50	402,31	-1,65	2,88	4,568	24,730
4,300	4,300	401,290	409,32	419,55	-1,68	2,94	4,586	24,281
4,400	4,400	412,860	421,12	431,65	-1,64	2,98	4,594	24,084
4,500	4,500	421,750	430,18	440,93	-1,53	3,01	4,461	19,196

