

# Usporedba zahtjeva pravila klasifikacijskih društava na dimenzije konstrukcijskih elemenata pramčanog i krmenog dijela broda izloženog valnim udarnim opterećenjima

---

Kraševac, Katarina

Master's thesis / Diplomski rad

2017

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:169461>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-31**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Katarina Kraševac**

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

**USPOREDBA ZAHTJEVA PRAVILA  
KLASIFIKACIJSKIH DRUŠTAVA NA DIMENZIJE  
KONSTRUKCIJSKIH ELEMENATA PRAMČANOG I  
KRMENOG DIJELA BRODA IZLOŽENOG VALNIM  
UDARNIM OPTEREĆENJIMA**

Mentor:

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

Student:

Katarina Kraševac

Zagreb, 2017.

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

Zahvaljujem se mentoru, prof.dr.sc. Jerolimu Andriću na savjetima i stručnoj pomoći pri izradi ovog rada.

Također se zahvaljujem obitelji i prijateljima koji su uvijek bili tu kad je trebalo.

Katarina Kraševac

# DIPLOMSKI ZADATAK

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

Student: **KATARINA KRAŠEVAC**

Mat. br.: 0035176946

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **USPOREDBA ZAHTJEVA PRAVILA KLASIFIKACIJSKIH DRUŠTAVA NA DIMENZIJE KONSTRUKCIJSKIH ELEMENATA PRAMČANOG I KRMENOG DIJELA BRODA IZLOŽENOG VALNIM UDARNIM OPTEREĆENJIMA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **COMPARISON OF VARIOUS CLASSIFICATION SOCIETIES REQUIREMENTS REGARDING STRUCTURAL SCANTLING OF BOW AND STERN AREA SUBJECTED TO WAVE IMPACT LOADS**

Opis zadatka:

Brzi brodovi, vitke forme, velikog pramčanog izboja te ravno položene krme karakterizirani su pojavom velikih valnih udarnih opterećenja koji mogu dovesti do pojave lokalnih oštećenja vanjske oplata u području pramca i krme. Zbog složenosti same pojave za praktičnu uporabu najčešće se koriste pojednostavljena procedura proračuna tlakova i dimenzioniranje strukturnih elemenata prema Pravilima klasifikacijskih društava. U radu će se istražiti kako različiti pristupi različitih klasifikacijskih društava utječu na dimenzije konstrukcijske elemenata (debljina lima i tip profila), te u konačnici na masu trupa broda.

Zadatak obuhvaća:

- 1) Upoznavanje s relevantnim Pravilima nekoliko klasifikacijskih društava: *Det Norske Veritas* (DNV), *Lloyd Register* (LR), *Bureau Veritas* (BV) i *American Bureau of Shipping* (ABS).
- 2) Proračun i usporedbu zahtjeva različitih Pravila, na razini udarnih tlakova za različite brzine broda, udaljenost od vodne linije, poziciji po dužini broda, različite kuteve forme, itd.
- 3) Proračun i usporedbu zahtjeva Pravila za dimenzioniranje debljine lima i ukrepa vanjske oplata broda u relevantnim zonama na krmenom i pramčanom dijelu broda.

Kao testni primjer za koji će se provesti proračun koristiti brod za prijevoz žive stoke (*livestock carrier*) (Loa=181.1m, B=31.1m, T=7.7m, v=19.8 čv, nosivosti oko 11 000 t), čije su detaljne karakteristike forme dane u predlošku.

Zadatak zadan:

Rok predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

17. studenog 2016.

19. siječnja 2017.

25., 26. i 27. siječnja 2017.

Zadatak zadao:

Predsjednica Povjerenstva:

Izv.prof.dr.sc. Jerolim Andrić

Prof. dr. sc. Nastia Degiuli



## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA .....	IV
SAŽETAK.....	V
SUMMARY .....	VI
1. UVOD.....	1
2. VALNO UDARNO OPTEREĆENJE .....	3
2.1. Uzrok i posljedice valnog udarnog opterećenja .....	3
3. ZAHTJEVI KLASIFIKACIJSKIH DRUŠTAVA.....	4
3.1. Pregled zahtjeva i pravila .....	4
3.2. Područje proračunavanja.....	5
3.3. Relevantni kutovi pramca i krme .....	6
4. ODABIR BRODA ZA PRORAČUN VALNOG UDARNOG OPTEREĆENJA .....	9
4.1. Glavne karakteristike odabranog broda .....	9
4.2. Pozicije odabranih točaka za dimenzioniranje.....	9
5. PRORAČUN VALNOG UDARNOG OPTEREĆENJA .....	12
5.1. Tlakovi valnog udarnog opterećenja na području pramca .....	12
5.2. Tlakovi valnog udarnog opterećenja na području krme.....	19
6. PRORAČUN DEBLJINA LIMOVA OPLATE .....	23
6.1. Zahtijevane debljine limova oplata na pramcu .....	23
6.2. Zahtijevane debljine limova oplata na krmi.....	30
7. PRORAČUN UKREPA .....	35
7.1. Zahtijevani momenti otpora presjeka ukrepa na pramcu .....	35
7.2. Zahtijevani momenti otpora presjeka ukrepa na krmi .....	38
8. ZAKLJUČAK.....	39
LITERATURA.....	41
PRILOZI.....	42

## POPIS SLIKA

Slika 1. Valno udarno opterećenje (slamming).....	3
Slika 2. Područje proračunavanja pramčane strukture uslijed valnog udarnog opterećenja prema <i>DNVGL</i> -u.....	5
Slika 3. Relevantni kutovi prema <i>DNVGL</i> -u.....	6
Slika 4. Relevantni kutovi prema <i>BV</i> -u.....	7
Slika 5. Relevantni kutovi prema <i>LR</i> -u.....	7
Slika 6. Relevantni kutovi prema <i>ABS</i> -u.....	8
Slika 7. Kut nagiba pramčane statve.....	8
Slika 8. Točke promatranja na pramcu.....	10
Slika 9. Točke promatranja na krmu.....	11
Slika 10. Raspored tlakova udara po rebrima na razini Dk 3-4.....	15
Slika 11. Raspored tlakova udara po rebrima na razini Dk 4-5.....	15
Slika 12. Raspored tlakova udara po rebrima na razini Dk 5-6.....	16
Slika 13. Raspored tlakova po rebrima na razini Dk 6-7.....	16
Slika 14. Prikaz promjene tlakova po visinama prema <i>DNVGL</i> -u.....	17
Slika 15. Prikaz promjene tlakova po visinama prema <i>BV</i> -u.....	17
Slika 16. Prikaz promjene tlakova po visinama prema <i>LR</i> -u.....	18
Slika 17. Prikaz promjene tlakova po visinama prema <i>ABS</i> -u.....	18
Slika 18. Raspored izračunatih tlakova udara na krmu po rebrima na razini D1.....	20
Slika 19. Raspored izračunatih tlakova na krmu po rebrima na razini D3.....	21
Slika 20. Promjena tlakova po visinama prema <i>DNVGL</i> -u.....	21
Slika 21. Promjena tlakova po visinama prema <i>BV</i> -u.....	22
Slika 22. Promjena tlakova po visinama prema <i>LR</i> -u.....	22
Slika 23. Raspored zahtijevanih debljina limova oplata na razini Dk 3-4.....	26
Slika 24. Raspored zahtijevanih debljina limova oplata na razini Dk4-5.....	26
Slika 25. Raspored zahtijevanih debljina limova oplata na razini Dk 5-6.....	27
Slika 26. Raspored zahtijevanih debljina limova oplata na razini Dk 6-7.....	27
Slika 27. Promjena debljine lima po visinama prema <i>DNVGL</i> -u.....	28
Slika 28. Promjena debljine limova po visinama prema <i>BV</i> -u.....	28
Slika 29. Promjene debljine limova po visinama prema <i>LR</i> -u.....	29
Slika 30. Promjene debljine limova po visinama prema <i>ABS</i> -u.....	29
Slika 31. Raspored zahtijevanih debljina limova oplata na krmu na razini D2.....	32
Slika 32. Raspored zahtijevanih debljina limova oplata na krmu na razini D3.....	32
Slika 33. Promjena debljina limova oplata po visinama prema <i>DNVGL</i> -u.....	33
Slika 34. Promjene debljina limova po visinama prema <i>BV</i> -u.....	33
Slika 35. Promjena debljina limova po visinama prema <i>LR</i> -u.....	34



**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Usporedba proračunatih tlakova na pramcu.....	14
Tablica 2. Usporedba proračunatih tlakova udara na krmi .....	20
Tablica 3. Usporedba zahtijevanih debljina limova oplate na pramcu .....	25
Tablica 4. Usporedba zahtijevanih debljina limova oplate na krmi .....	31
Tablica 5. Usporedba zahtijevanih profila na pramcu.....	37
Tablica 6. Usporedba zahtijevanih profila na krmi .....	38

## POPIS OZNAKA

$L$	[ m ]	duljina broda
$B$	[ m ]	širina broda
$T$	[ m ]	gaz broda
$V$	[ čv ]	brzina plovidbe broda
$C_B$	-	koeficijent istisnine
$z$	[ m ]	relevantna visina
$p_{FB}$	[ kN/m <sup>2</sup> ]	tlak udara prema <i>DNVGL</i> -u
$p_{BI}$	[ kN/m <sup>2</sup> ]	tlak udara prema <i>BV</i> -u
$P_{bf}$	[ kN/m <sup>2</sup> ]	tlak udara prema <i>LR</i> -u
$P_{bij}$	[ kN/m <sup>2</sup> ]	tlak udara prema <i>ABS</i> -u
$\alpha$	[ ° ]	kut nagiba između vertikalne linije i tangente na oplati prema <i>DNVGL</i> -u i <i>BV</i> -u
$\beta$	[ ° ]	kut između uzdužne osi i tangente na oplati u promatranoj točki prema <i>DNVGL</i> -u i <i>BV</i> -u
$\alpha_p$	[ ° ]	kut između uzdužne linije broda i nagiba oplata gledanog u uzdužnoj ravnini prema <i>LR</i> -u
$\beta_p$	[ ° ]	kut između oplata i horizontalne osi prema <i>LR</i> -u
$\gamma_p$	[ ° ]	kut između vodne linije i uzdužne linije broda prema <i>LR</i> -u
$C_d$	-	koeficijent plastičnog kapaciteta
$P_{st}$	[ kN/m <sup>2</sup> ]	efektivni tlak na ukrepi prema <i>DNVGL</i> -u
$R_{eH}$	[ N/mm <sup>2</sup> ]	nominalna granica razvlačenja
$a_0$	-	parametar akceleracije
$h_{SI}$	m	referentna vrijednost relativnog gibanja broda
$Z_{pl}$	[ cm <sup>3</sup> ]	minimalni plastični moment otpora presjeka ukrepe prema <i>DNVGL</i> -u
$Z_{pl}'$	[ cm <sup>3</sup> ]	stvarni plastični moment otpora presjeka ukrepe prema <i>DNVGL</i> -u
$t$	[ mm ]	zahtijevana debljina lima oplata
$Z_p$	[ cm <sup>3</sup> ]	minimalni plastični moment otpora presjeka ukrepe prema <i>LR</i> -u
$Z_{pa}$	[ cm <sup>3</sup> ]	stvarni plastični moment otpora presjeka ukrepe prema <i>LRu</i>
$h_{ij}$	[ m ]	vertikalna udaljenost od vodne linije do promatrane točke
$\alpha_{ij}$	[ ° ]	kut vodne linije prema <i>ABS</i> -u
$\beta_{ij}$	[ ° ]	kut nagiba oplata u vertikalnom smislu prema <i>ABS</i> -u
$\gamma$	[ ° ]	kut nagiba pramčane statve
$s$	[ mm ]	razmak između uzdužnjaka
$f_2$	-	koeficijent materijala
$SM$	[ cm <sup>3</sup> ]	zahtijevani plastični moment otpora presjeka prema <i>ABS</i> -u

## SAŽETAK

Udarno valno opterećenje je fenomen koji se javlja prilikom izranjanja tijela iz vode i naknadnog udaranja o morsku površinu. Ovakav tip udaraca je kratkog trajanja i velikog intenziteta pa kod brzih brodova sa velikim pramčanim izbojom te ravno položenom krmom može doći do pojave lokalnih oštećenja vanjske oplata. U cilju što boljeg iskorištenje prostora za smještaj tereta na novim se brodovima povećava kut izbočenja pramca, što za posljedicu ima veća udarna opterećenja te lokalna oštećenja konstrukcije.

Za praktične svrhe, vrijednosti tlakova uobičajeno se dobivaju pojednostavljenim procedurama proračuna prema preporukama klasifikacijskih društava. U radu je udarno valno opterećenje na izbačenu formu pramca i krme analizirano primjenjujući trenutno važeća pravila klasifikacijskih društava. Usporedba rezultata različitih klasifikacijskih društava ukazuje na značajnu razliku izračunatih vrijednosti udarnih tlakova te , analogno, različitosti u u izračunatim dimenzijama konstrukcije. Ovakva usporedba rezultata nam jasno prikazuje razlike u pristupu procjeni tlakova i dimenzioniranju konstrukcije za svaki pojedino Klasifikacijsko društvo.

Ključne riječi: udarno valno opterećenje, dimenzioniranje konstrukcijskih elemenata, zahtjevi klasifikacijskih društva

## **SUMMARY**

Impact wave load is a result of ship emerging from the water and slamming the sea surface. This way of impact has short period and high intensity but it can cause local structural damage to outer shell, especially for fast ships with a large bow flare and straight stern. In order to provide more cargo space on the new ships, the angle of the bow is changed which increases impact loads and local structural damage.

Calculation of the wave impact pressure is performed from rules of Classification Societies. In this thesis impact wave load to ejected form of the bow and stern is analyzed using currently valid rules of Classification Societies. Comparison of results different Societies indicates a significant difference in impact pressure and, analogically, a significant difference in structure dimensions. Comparison of results also indicate differences in approach between each Classification Society.

Keywords: impact wave load, , designing ship structure, requirements of Classification Societies

## 1. UVOD

Prilikom sudara između broda i tekućine pojavljuju se impulsna opterećenja vrlo visokih tlakova koje nazivamo udaranje u valove (engl. *slamming*) i događa se kada se brod velikom brzinom sudara sa valovima. Ovaj fenomen je najizraženiji na pramčanom dijelu broda zato jer je relativna vertikalna brzina između broda i valova ovdje najveća. Udaranje broda u valove se javlja češće kada je brod u balastnom stanju nego u nakrcanom stanju, te također predstavlja veći problem za brodove sa nižim koeficijentom punoće nego za brodove punije forme.

Udaranje u valove je prepoznato kao izvor oštećenja na brodu, a možemo ga promatrati na globalnoj i na lokalnoj razini. Udarci manjeg intenziteta na lokalnoj razini uzrokuju izvijanje i plastične deformacije, dok dugotrajniji udarci jačeg intenziteta uzrokuju vibracije cijelog trupa broda. Ukratko, udaranje o valove uzrokuje velika naprezanja u nosačima, deformacije oplata i pregrada, oštećenja tereta i oštećenja brodske opreme.

Najizloženiji dijelovi broda ovoj pojavi su pramčani i krmeni dio broda, pa je stoga potrebno posvetiti veću pažnju kod dimenzioniranja upravo tih dijelova broda.

Općenito, kako bi se povećao teretni prostor kod brodova za prijevoz automobila ili kontejnera šire se krajnji dijelovi palube. Posljedica toga je mali kut između oplata na pramcu odnosno na krmi i slobodne površine fluida, što posredno znači veći tlak udara koji može prouzrokovati strukturna oštećenja. Problem je dodatno izraženiji i zbog trenda "vožnje" broda kroz loše vremenske uvjete. Osim toga, problemi postaju sve složeniji zbog stohastičke prirode mora i procjene najgorih vremenskih uvjeta koje će brod doživjeti tijekom eksploatacije.

U ovom radu je udarno opterećenje na formu pramca i krme analizirano primjenjujući trenutno važeća pravila klasifikacijskih društava, u svrhu što točnijeg dimenzioniranja tih dijelova broda.

Pravila Klasifikacijskih društava su nastajala kroz povijest kombinacijom različitih analitičkih metoda, proračuna i empirijskih ograničenja što je u konačnici dovelo do toga da za jedan te isti brod dobivamo različite strukturne dimenzije. Zbog toga su u ovom radu analizirane razlike u pristupu Registara ovom fenomenu.

---

Za usporedbu rezultata su korištena zajednička pravila *Det Norske Veritasa* i *Germanischer Lloyd* (DNVGL), pravila *Bureau Veritasa* (BV), *Lloyd's Registera* (LR) i pravila *American Bureau of Shipping-a* (ABS). U radu je provedeno dimenzioniranje konstrukcijskih elemenata vanjske oplata pramčanog i krmenog dijela broda.

## 2. VALNO UDARNO OPTEREĆENJE

### 2.1. Uzrok i posljedice valnog udarnog opterećenja

Udaranje o valove nastaje prilikom potpunog izranjanja dijela oplata dna te naglog uranjanja koje slijedi neposredno nakon izrona tako da je kut između tangente na površinu oplata i slobodne površine fluida vrlo malen. Kod udara o dno dolazi do nastanka vrlo velikih impulsnih sila koje traju kratko vremensko razdoblje.

Općenito se interakcija tekućine i brodske strukture pri impulsnom tipu opterećenja kao što je udaranje o valove može promatrati u nekoliko vremenskih faza [1]. Neposredno nakon udara počinje period lokalnog utjecaja gdje su naprezanja i deformacije lokalizirane na vanjskoj oplati koja je u neposrednom doticaju s tekućinom. Slijedi prijelazni period tijekom kojeg naprezanja propagiraju u okolne elemente brodske konstrukcije, a na kraju slijedi period globalnog utjecaja na brodski trup koji se manifestira u povećanju momenta savijanja na glavnom rebru te u obliku vibracija cjelokupne konstrukcije.

Prema dosadašnjim istraživanjima pokazalo se da značajnija oštećenja elemenata konstrukcije uzrokuju samo djelovanja na lokalnoj i globalnoj razini.

Najkritičnije stanje je u slučaju suprotnih faza između gibanja vala i pramca broda u vertikalnoj ravnini, odnosno kada se pramac ili krma giba prema dolje, a val prema gore. Na Slici 1. je prikazano silovito udaranje pramca o valove jednog putničkog broda.



Slika 1. Valno udarno opterećenje (*slamming*)

### 3. ZAHTJEVI KLASIFIKACIJSKIH DRUŠTAVA

#### 3.1. Pregled zahtjeva i pravila

*DNVGL* (2016) ima univerzalna pravila za sve tipove brodova. U Part 3, Chapter 10, Section 1, 2.1. i Section 3, 2.1. su dani izrazi za izračun tlakova u željenim točkama oplate, pripadajuće debljine limova te izrazi za izračun momenata otpora ukrepe [2].

*BV* (2016) također koristi općenita pravila za čelične brodove, pa se tako u Part 3, Chapter 8, Section 1, 4.2. nalaze izrazi za udarni tlak na području pramca sa pripadajućim izrazima za proračunavanje pripadajuće oplate i orebrenja, te u Section 2, 4.2. izrazi za izračun tlakova, debljine oplate i momenti otpora ukrepa na području krme [3].

*LR* (2010) ima posebna pravila za putničke brodove, RO-RO brodove, trajekte i brodove za prijevoz kontejnera. U Part 4, Chapter 2, Section 4 i Section 5 su dani izrazi za izračun tlakova u željenim točkama oplate, pripadajuće debljine limova te izrazi za izračun momenata otpora ukrepe [4].

*ABS* (2016) daje posebna pravila za plovila namijenjena prijevozu kontejnera duljine između 130m i 450m, pa tako u Part 5C, Chapter 5, Section 3, 11.3.1. se mogu naći izrazi za udarne tlakove na području pramca, a u 23.3. izrazi za debljinu opločenja i momenata otpora ukrepa [5]. Ovdje je bitno naglasiti kako *ABS* propisuje pravila za valno udarno opterećenje samo na području pramca i pramčanog dna, dok za krmeni dio ne propisuje pravila, tako da u ovom slučaju proračun za krmeni dio prema *ABS*-u nije proveden.

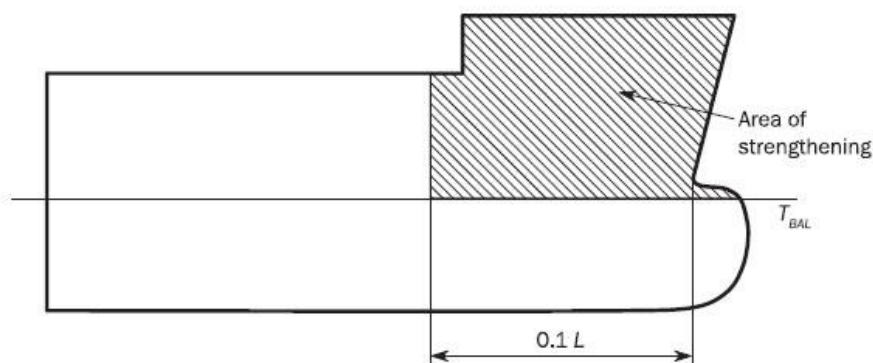
Svi proračuni koji su bili potrebni u ovom radu napravljeni su u Microsoftovom programskom paketu Excel, dok je proračun po pravilima *Lloyd's Registera* proveden pomoću programskog alata MathCAD 14.0.



### 3.2. Područje proračunavanja

Prema *DNVGL*-u ojačanje strukture protiv valnog udarnog opterećenja se procjenjuje u području od  $0,9 L$  pa do pramčane okomice (F.E.) i vertikalno prema gore od minimalnog balastnog gaza kao što je prikazano na Slici 1.

Na krmenom dijelu je analogna situacija, odnosno promatra se područje od krmene okomice pa do  $0,1 L$ .



**Slika 2. Područje proračunavanja pramčane strukture uslijed valnog udarnog opterećenja prema *DNVGL*-u [2]**

Područje razmatranja valnog udarnog opterećenja prema *BV*-u se također na pramčanom dijelu proteže od  $0,9L$  pa do pramčane okomice, a u vertikalnom smislu od ljetne vodne linije pa do pune visine broda na tom dijelu. Zahtjev za proračun krmenog dijela se odnosi na sve ravne dijelove koji su izloženi djelovanju valnim udarcima, a čiji kut nagiba ne prelazi  $30^\circ$ .

S druge strane *LR* zahtijeva ojačavanje oplata broda na dijelovima iznad vodne linije gdje trup ima značajne promjene forme.

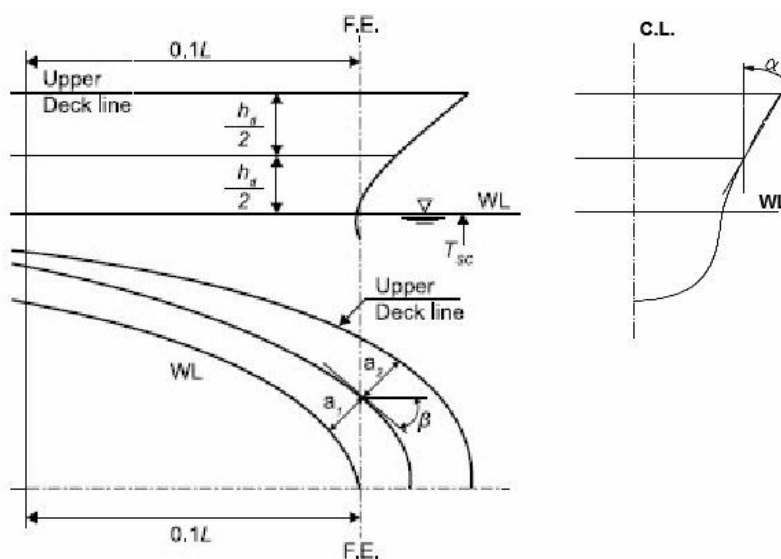
Područje ojačavanja strukture prema *ABS*-u je nešto preciznije specificirano, te se ono za pramčano područje proteže od  $0,75L$  pa gotovo do same pramčane okomice, odnosno do  $0,9875L$ , a sve iznad vodne linije.

Za potrebe ovog rada odabrane su točke koje zadovoljavaju područje razmatranja prema svim Registrima, a prikazane su u Prilogu 1 i Prilogu 2.

### 3.3. Relevantni kutovi pramca i krme

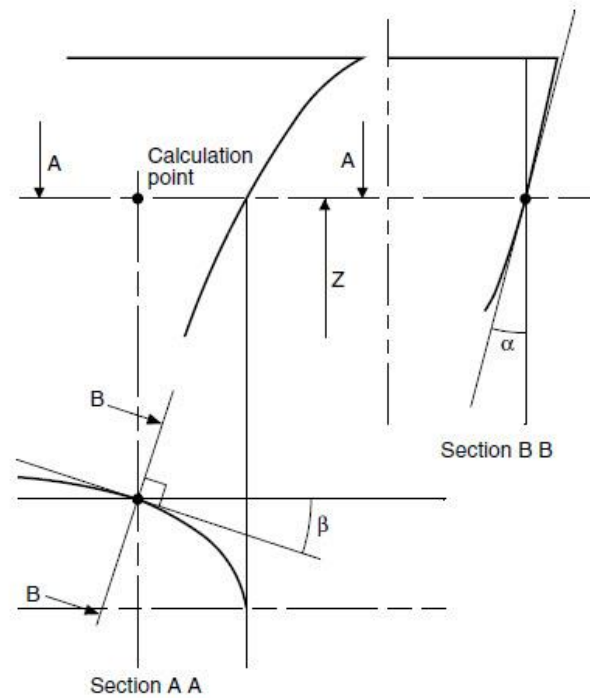
Za pravilno opisivanje veličine tlaka udara vala potrebno je poznavati formu trupa broda, odnosno kutove nagiba vanjske oplata u odnosu na određene ravnine.

Pa tako *DNVGL* opisuje formu trupa broda pomoću kutova  $\alpha$  koji je definiran kao kut između vertikalne osi i tangente vanjske oplata u promatranoj točki te kut  $\beta$  koji predstavlja kut vodne linije, odnosno kut između uzdužne osi i tangente vanjske oplata u promatranoj točki, kako je prikazano na Slici 3.



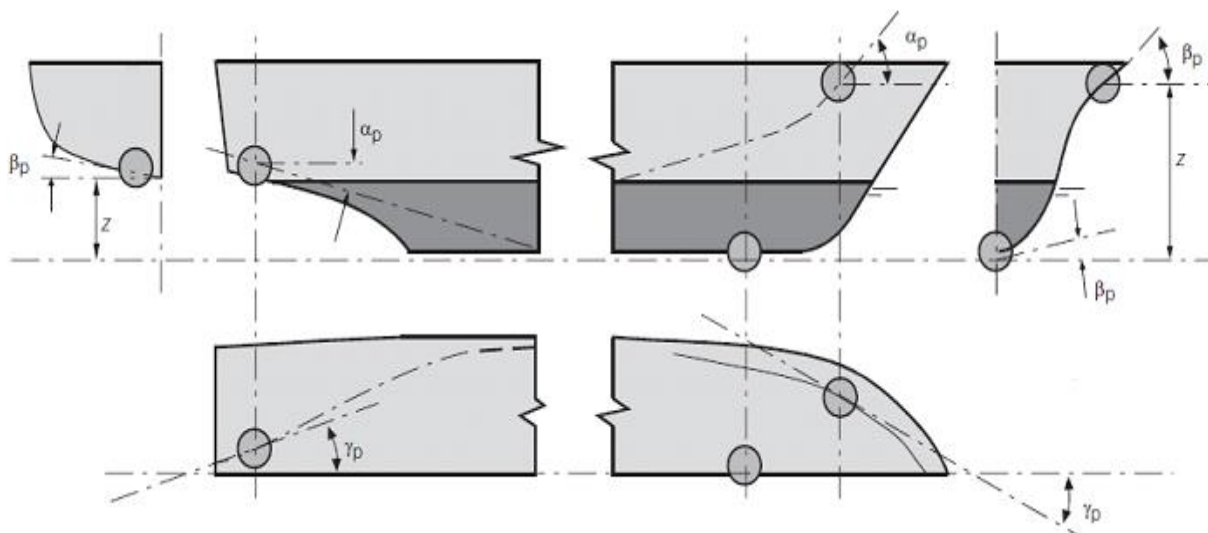
Slika 3. Relevantni kutovi prema *DNVGL*-u [2]

*BV* kutove za opis forme trupa definira slično kao i prethodni registar. Kut  $\alpha$  je kut nagiba u promatranoj točki, definiran kao kut između vertikalne osi i tangente na bočnoj oplati, mjereno u vertikalnoj ravnini, a kut  $\beta$  je upadni kut vodne linije u promatranoj točki, odnosno kut između uzdužne osi (C.L.) i tangente u točki vanjske oplata, mjereno u horizontalnoj ravnini. Kutovi koje propisuje *BV* su prikazani na Slici 4.



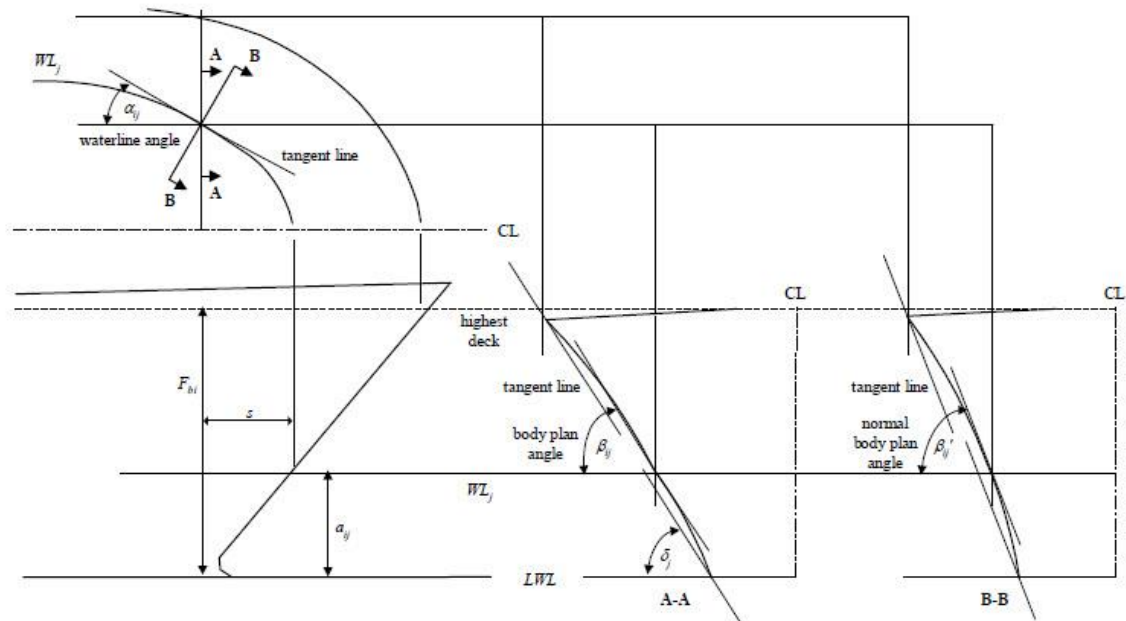
Slika 4. Relevantni kutovi prema BV-u [3]

*LR* pak formu pramca i krme opisuje pomoću tri kuta: kut  $\alpha_p$  koji predstavlja kut između uzdužne linije broda i nagiba oplata gledanog u uzdužnoj ravnini, kut  $\beta_p$  koji se mjeri kao kut između oplata i horizontalne osi i kut  $\gamma_p$  koji je definiran kao kut između vodne linije i uzdužne linije broda, prikazano na Slici 5.

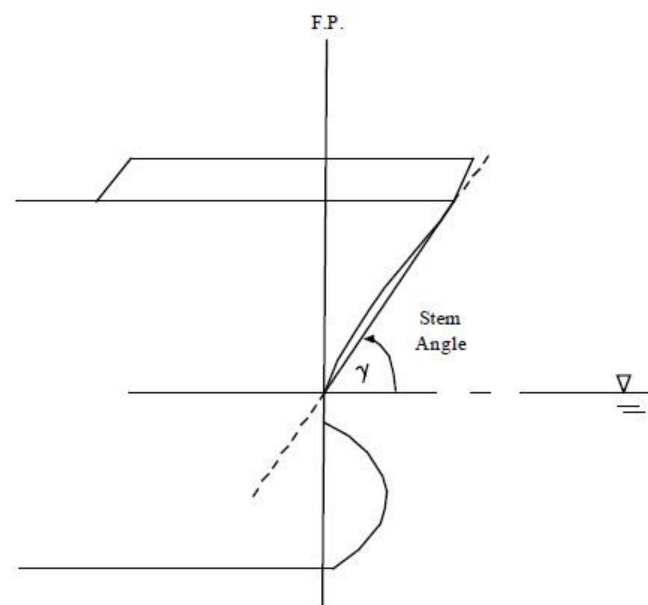


Slika 5. Relevantni kutovi prema LR-u [4]

ABS kod svojih pravila za valno udarno opterećenje koristi samo dva kuta, a to su kut  $\alpha_{ij}$  odnosno kut nagiba vodne linije i kut  $\beta_{ij}$  koji se mjeri u vertikalnoj ravnini i to između vertikalne osi i tangente vanjske oplate u promatranoj točki. Kod ovih proračuna ABS još uzima i kut nagiba pramčane statve, takozvani kut  $\gamma$ . Svi kutovi koje propisuje ABS su prikazani na Slici 6.



Slika 6. Relevantni kutovi prema ABS-u [5]



Slika 7. Kut nagiba pramčane statve [5]

## 4. ODABIR BRODA ZA PRORAČUN VALNOG UDARNOG OPTEREĆENJA

Za provedbu proračuna i usporedbu zahtjeva Registara odabran je brod za prijevoz žive stoke (engl. Livestock Carrier) brodogradilišta Uljanik, gradnja broj 486,487 koji je projektiran prema pravilima *Registro Italiano Navale (RINA)* iz 2008. godine.

### 4.1. Glavne karakteristike odabranog broda

Brod za prijevoz žive stoke je tipski najbližiji brodovima za prijevoz kontejnera. Ovakvi brodovi se mogu projektirati kao novogradnje ili kao kontejnerski brodovi prenamijenjeni u svrhu prijevoza žive stoke. Ovakvi brodovi su vrlo vitke forme, imaju visoka nadgrađa i plove relativno velikim brzinama plovidbe.

Glavne karakteristike odabranog broda su:

$$L_{oa} = 181,1 \text{ m}$$

$$L_{bp} = 169,25 \text{ m}$$

$$B = 31,1 \text{ m}$$

$$T = 7,7 \text{ m}$$

$$V = 19,8 \text{ čv}$$

$$C_B = 0,6$$

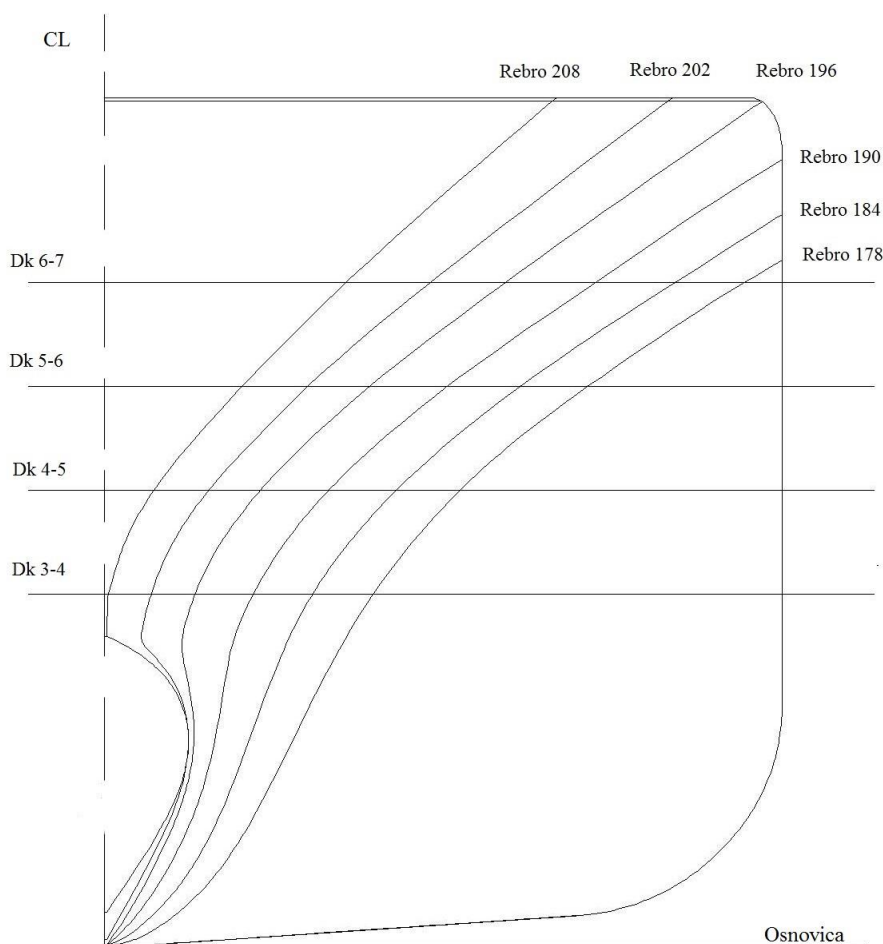
### 4.2. Pozicije odabranih točaka za dimenzioniranje

Proračun udarnog valnog opterećenja podrazumijeva dimenzioniranje brodske strukture na lokalnoj razini i to na dijelovima gdje je najveća vjerojatnost da će doći do oštećenja. Vrlo su male šanse da će do oštećenja doći u točki gdje se križaju uzdužni i poprečni elementi strukture (npr. rebro i paluba) pa shodno tome i Registri propisuju položaj točke proračuna na ovakvu vrstu opterećenja. Ta točka se nalazi u centru pravokutnika čiji su rubni dijelovi u vertikalnom smislu razmak između paluba, a u uzdužnom smislu razmak između nosača.

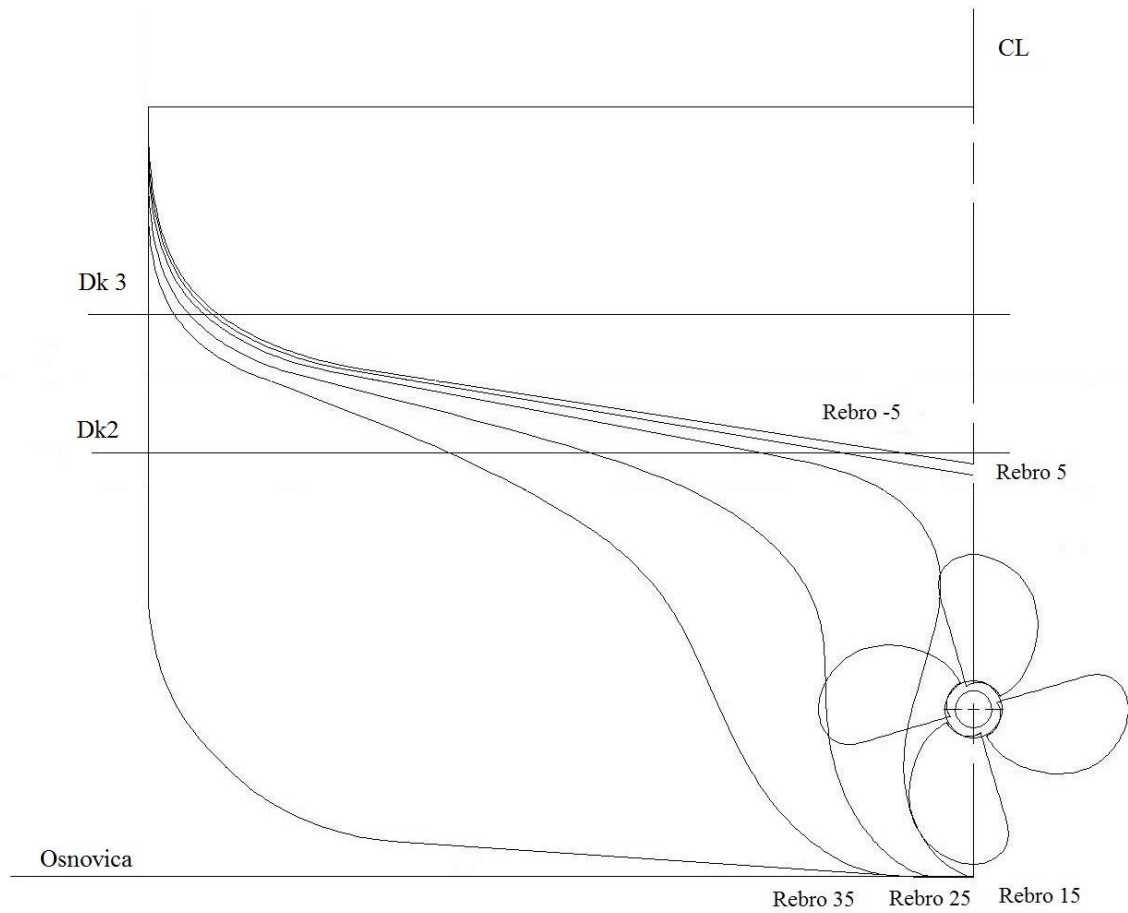
U ovom radu točke u kojima se proračunava udarno valno opterećenje se protežu od  $0,86L$  pa sve do pramčanog perpendikulara, točnije na rebrima 178, 184, 190, 196, 202 i 208, dok su na krmenom dijelu odabrane točke u području od  $-0,0186L$  pa do  $0,148L$ , odnosno rebra -5, 5, 15, 25 i 35.

Tlakovi udara vala, debljine limova oplata i momenti otpora ukrepa na pramcu su određeni za šest gore navedenih rebara na četiri visine iznad vodne linije. Prva razina se nalazi između paluba D3 i D4 (Dk3-4) na visini od 8.205m, druga razina se nalazi između paluba D4 i D5 (Dk4-5) na visini od 10.655m iznad osnove. Slijedeća razina je između paluba D5 i D6 (Dk 5-6) na visini od 13.205m dok se posljednja razina nalazi između paluba D6 i D7 (Dk 6-7) na visini od 15.74m iznad osnove. Na krmenom dijelu je proveden proračun tlakova, debljine limova oplata i momenata otpora ukrepa za pet gore navedenih rebara na dvije visine iznad vodne linije. Prva razina je označena sa D2 i nalazi se na visini od 8.25 m iznad osnove dok je druga razina označena sa D3 i nalazi se na visini od 10m iznad osnove.

U Prilogu 1. su priloženi dijelovi nacrtu raskroja oplata limova krme i pramca sa označenim izabranim točkama, dok su odabrana rebra i visine prikazane na Slici 8 i Slici 9.



**Slika 8. Točke promatranja na pramcu**



**Slika 9. Točke promatranja na krmi**

## 5. PRORAČUN VALNOG UDARNOG OPTEREĆENJA

### 5.1. Tlakovi valnog udarnog opterećenja na području pramca

Proračun valnog udarnog opterećenja na području pramca je proveden po *DNVGL*-u, *BV*-u, *LR*-u i *ABS*-u i to u točkama prikazanim u poglavlju 4.2.

Dobiveni rezultati su prikazani u Tablici 1., te na Slikama 10. do 13.

*DNVGL*-ova formula za izračun veličine tlaka na pramčanom dijelu glasi:

$$p_{FB} = C(2, 2 + C_f)(0,4 * V * \sin \beta + 0,6 * \sqrt{L})^2 \quad [\text{kN/m}^2] \quad (1)$$

Veličina tlaka udara na pramcu prema *BV*-u se računa prema sljedećoj formuli:

$$p_{Bl} = (1510 - 2,5L)C_1C_{SL} \quad [\text{kN/m}^2] \quad (2)$$

*LR*-ova univerzalna formula za izračun veličine tlaka udara na pramcu glasi:

$$P_{bf} = 0,5(K_{bf}V_{bf}^2 + K_{rv}H_{rv}V_{rv}^2) \quad [\text{kN/m}^2] \quad (3)$$

Za izračun udara tlaka na pramcu prema *ABS*-u koristi se formula:

$$P_{bij} = k_2k_3 \left[ c_2 + K_{ij}M_{vi}(1 + E_{ni}) \right] \quad [\text{kN/m}^2] \quad (4)$$

Iz rezultata je vidljivo da su vrijednosti tlaka ujednačene za *DNVGL* i *BV* i po promatranim visinama i u uzdužnom smislu, odnosno po rebrima. Kod *LR*-a vrijednosti tlaka odskaču, posebice kada se promatra po visinama. Tlakovi izračunati prema *ABS*-u daju nešto manje vrijednosti nego kod prva dva Registra, međutim vidljivo je da na višim palubama i krajnjim rebrima te vrijednosti značajno rastu. Za razinu Dk 3-4 koja ja najbliža vodnoj liniji *DNVGL* procjenjuje najviše tlakove od sva četiri Registra, dok na ostalim razinama *LR* procjenjuje najviše tlakove od svih Registara.

Također, na Slikama 14. 15. 16 i 17. je vidljivo kako su tlakovi ujednačeni za svaki Registar te se jasno vidi razlika u pristupu kod procjene tlaka udara. Zanimljivo je da kod *DNVGL*-a tlak po visini pada, odnosno najveći tlak je na najnižoj razini (Dk 3-4), dok su



najmanji tlakovi prisutni na višim razinama (Dk 6-7). Kod ovog Registra je razlika između tlakova na najnižoj i najvišoj razini  $\Delta p = 200 \text{ kN/m}^2$ . Kod *LR*-a je obrnuta situacija: na razini DK 3-4 proračunavamo najmanje vrijednosti tlaka udara te on po visini raste i to u rasponu od  $\Delta p = 500 \text{ kN/m}^2$ . Kod *BV*-a i *ABS*-a su izmještane vrijednosti tlaka udara po visinama. *BV* procjenjuje najmanje tlakova na DK3-4 a najviše na DK 5-6 i ovdje je razlika tlakova udara u vrijednosti od  $\Delta p = 150 \text{ kN/m}^2$ . *ABS* procjenjuje najniže tlakove na razini Dk 6-7, a najviše na Dk 5-6. Razlika tlakova između najniže i najviše razine je  $\Delta p = 250 \text{ kN/m}^2$ .

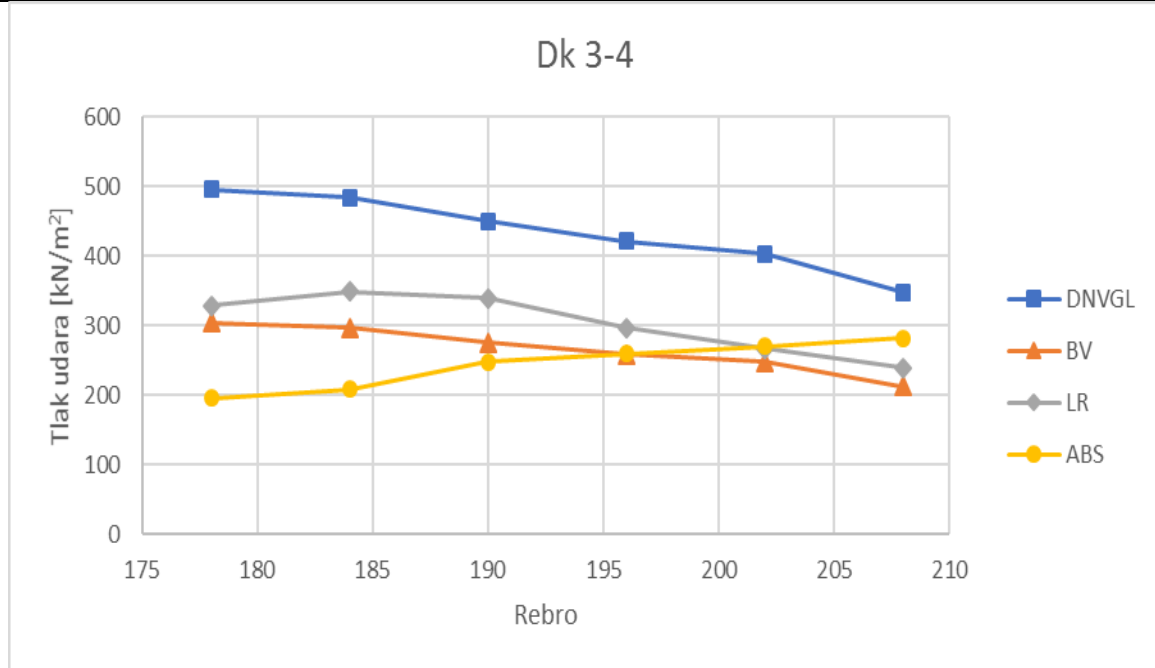
Očito *LR* ima najstrože kriterije za procjenu tlaka udara vala, te je vidljivo kako su ti tlakovi na samom pramcu i na višim razinama vrlo izraženi. Razlog tome je što ovaj Registar uzima velike faktore sigurnosti te općenito dosta konvencionalno pristupa procjeni tlaka valnog udara, što za posljedicu može imati predimenzioniranu strukturu koja neposredno utječe na masu broda.

Kod ostalih registara (*DNVGL* i *BV*) je vidljivo da je pristup procjeni tlaka udara vala nešto blaži, odnosno, svi tlakovi su manji nego kod prethodnog Registra, a i vidi se da su rebra na samom pramcu izložena djelovanju manjih tlakova od rebra koja su pomaknuta prema krmi, što zapravo dobro opisuje prirodu ove pojave: struktura na samom pramcu iznad vodne linije nije toliko izložena djelovanju valnog udara koliko dio pramčane strukture pomaknute prema krmi na kojoj se počinje mijenjati forma trupa odnosno kutevi oplata su jako mali u odnosu na liniju vodene površine pa će na tom dijelu udari vala jače doći do izražaja.

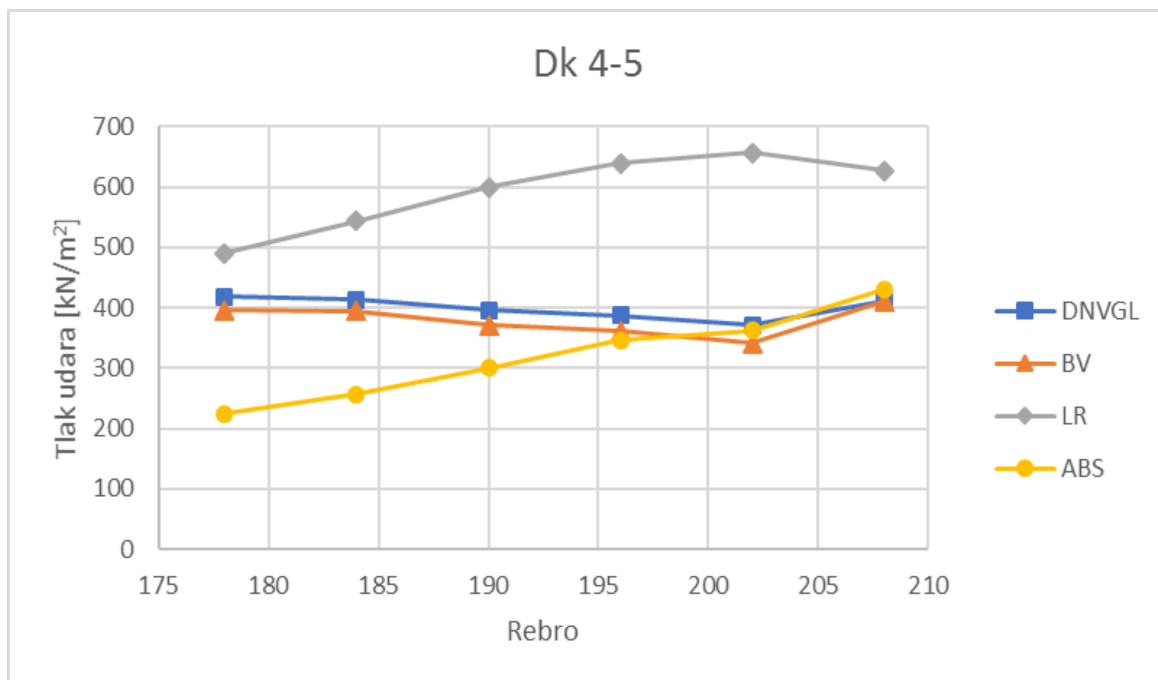
*ABS* slično kao i *LR* procjenjuje najviše tlakove na prednjem dijelu pramčanog pika dok prema krmi ti tlakovi opadaju. Iz prikazanih slika je također vidljivo da *ABS* procjenjuje jako niske i ujednačene tlakove duž pramčanog pika za niže razine, dok na višim razinama postaje izraženija razlika tlakova na samom pramcu i tlakova na udaljenijim rebrima.

Tablica 1. Usporedba proračunatih tlakova na pramcu

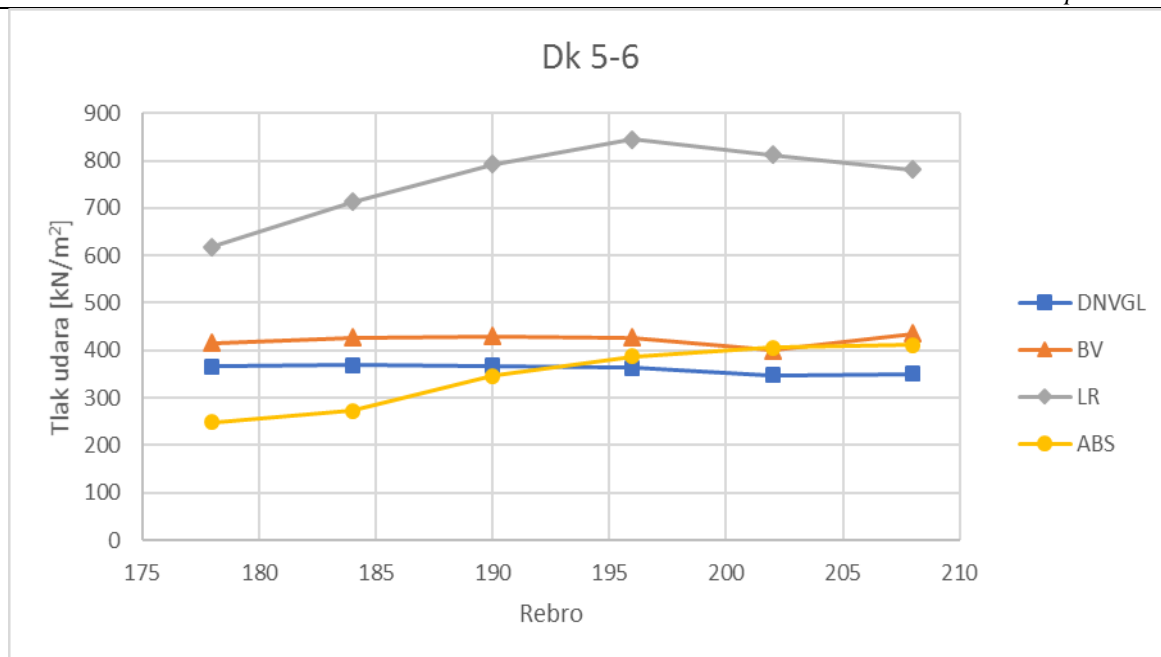
Frame	Registar	Tlak udara na pramcu [kN/m <sup>2</sup> ]			
		Deck 3-4	Deck 4-5	Deck 5-6	Deck 6-7
178	DNVGL	495,7	418,3	365,5	312,3
	BV	304,1	396,2	415,9	350,3
	LR	328,4	490,7	618,0	681,9
	ABS	195,5	224,6	248,1	118,0
184	DNVGL	484,1	413,1	369,0	306,7
	BV	297,0	393,9	427,0	346,9
	LR	348,3	543,6	713,7	710,2
	ABS	208,1	256,1	273,2	123,8
190	DNVGL	449,9	395,4	368,2	308,6
	BV	275,9	370,7	430,3	357,9
	LR	339,1	600,0	791,8	796,3
	ABS	247,6	299,7	346,4	137,0
196	DNVGL	449,9	395,4	368,2	308,6
	BV	275,9	370,7	430,3	357,9
	LR	339,1	600,0	791,8	796,3
	ABS	247,6	299,7	346,4	137,0
202	DNVGL	403,2	370,5	348,0	305,3
	BV	247,2	341,6	400,1	366,6
	LR	266,6	656,7	812,3	888,9
	ABS	270,1	362,2	405,6	171,1
208	DNVGL	347,8	411,2	350,2	300,4
	BV	213,0	410,8	435,6	385,8
	LR	239,6	626,2	781,6	832,9
	ABS	282,0	430,8	411,2	193,8



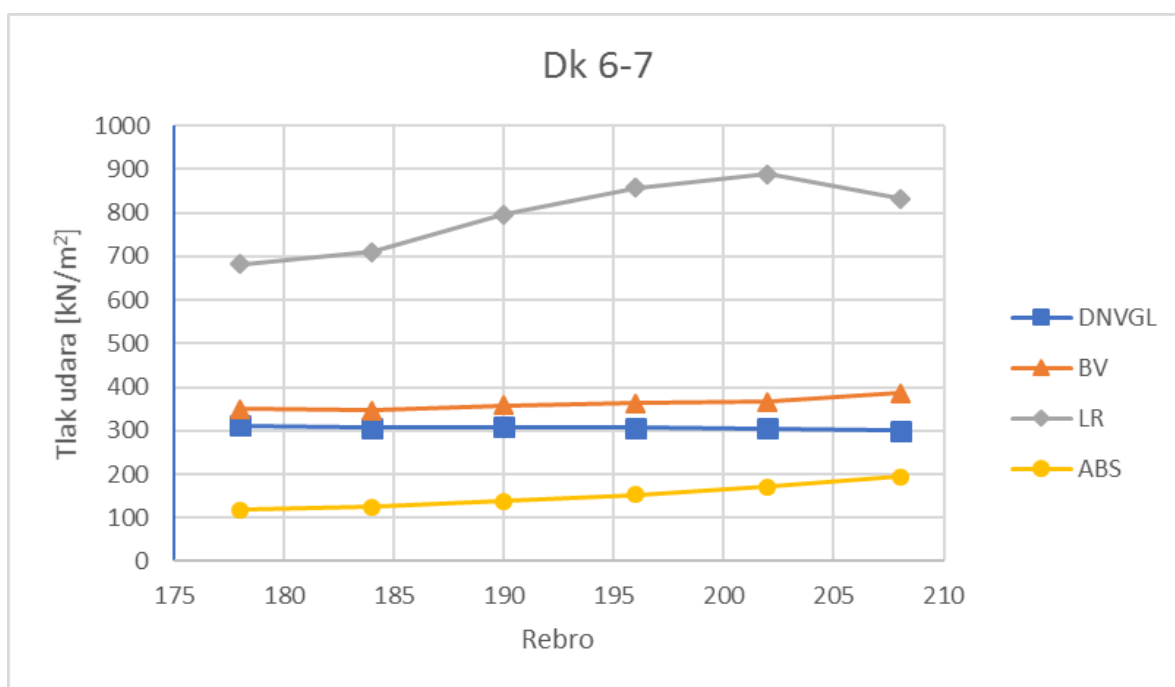
Slika 10. Raspored tlakova udara po rebrima na razini Dk 3-4



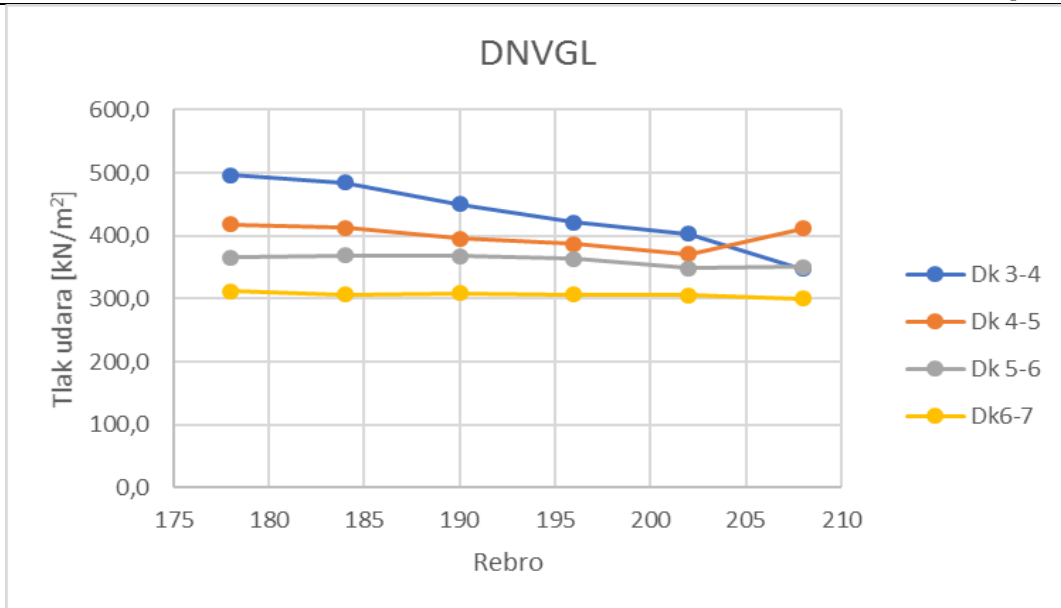
Slika 11. Raspored tlakova udara po rebrima na razini Dk 4-5



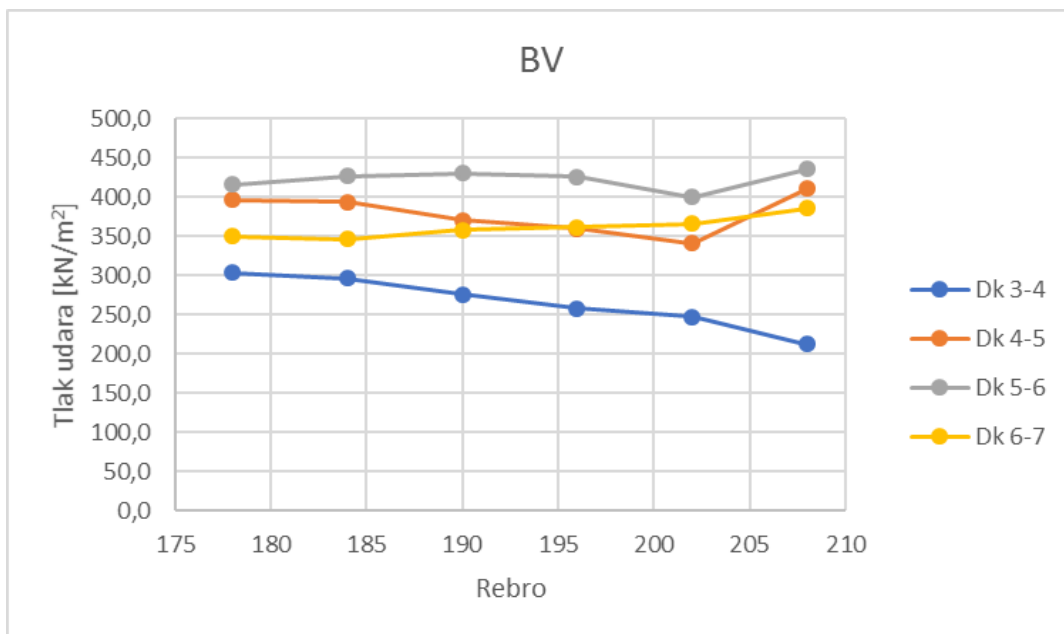
Slika 12. Raspored tlakova udara po rebrima na razini Dk 5-6



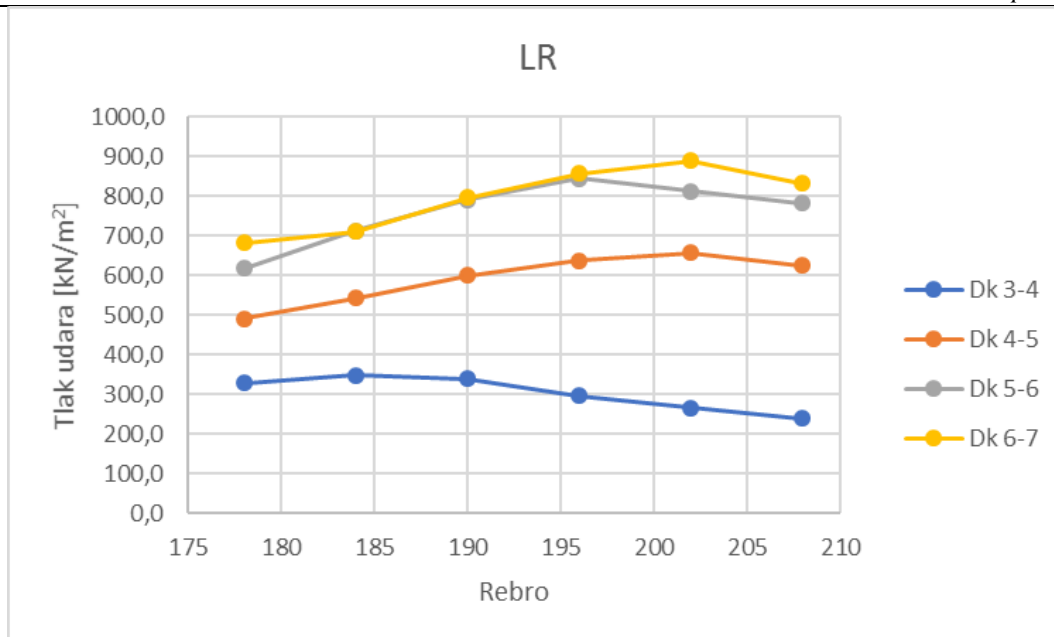
Slika 13. Raspored tlakova po rebrima na razini Dk 6-7



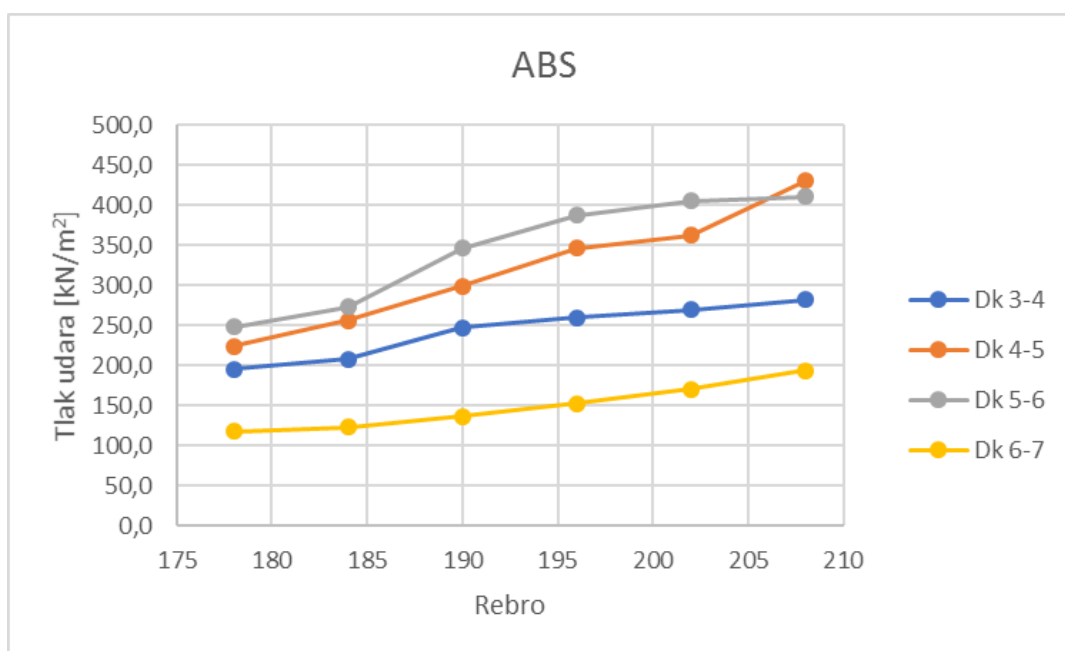
Slika 14. Prikaz promjene tlakova po visinama prema DNVGL-u



Slika 15. Prikaz promjene tlakova po visinama prema BV-u



Slika 16. Prikaz promjene tlakova po visinama prema LR-u



Slika 17. Prikaz promjene tlakova po visinama prema ABS-u

## 5.2. Tlakovi valnog udarnog opterećenja na području krme

Za točke odabrane u Poglavlju 4. proveden je proračun udarnog valnog opterećenja na području krme prema pravilima koje propisuju Klasifikacijska društva navedena u Poglavlju 3. Rezultati proračuna su prikazani u Tablici 2.

Za izračun veličine udarnog tlaka na krmi *DNVGL* koristi slijedeću formulu:

$$P_{SS} = 2,2CL \left( 0,6 + \frac{1,65a_0 \sin^3 \alpha}{2C_B} \right)^2 \quad [\text{kN/m}^2] \quad (5)$$

Prema *BV*-u ta formula glasi:

$$P_{SI} = \frac{300}{\tan \beta} \frac{h_{SI}^2 - (z - T_1)^2}{L} \quad [\text{kN/m}^2] \quad (6)$$

*LR*-ova formula za izračun veličine tlaka udara na krmi je jednaka formuli za izračun veličine tlaka udara na pramcu s tim da treba naglasiti da kod proračuna tlakova udara na krmi, *LR* uzima da je brzina plovidbe jednaka nuli.

Kao što je navedeno u Poglavlju 3., *ABS* ne propisuje pravila za procjenu tlaka udara na krmenom području tako da u ovom slučaju proračun tlakova udara na krmeni dio nije proveden.

Zbog kompleksnosti zakrivljenja oplata krmenog pika, u rezultatima su vidljiva značajna odstupanja obzirom na visinu i obzirom na rebra.

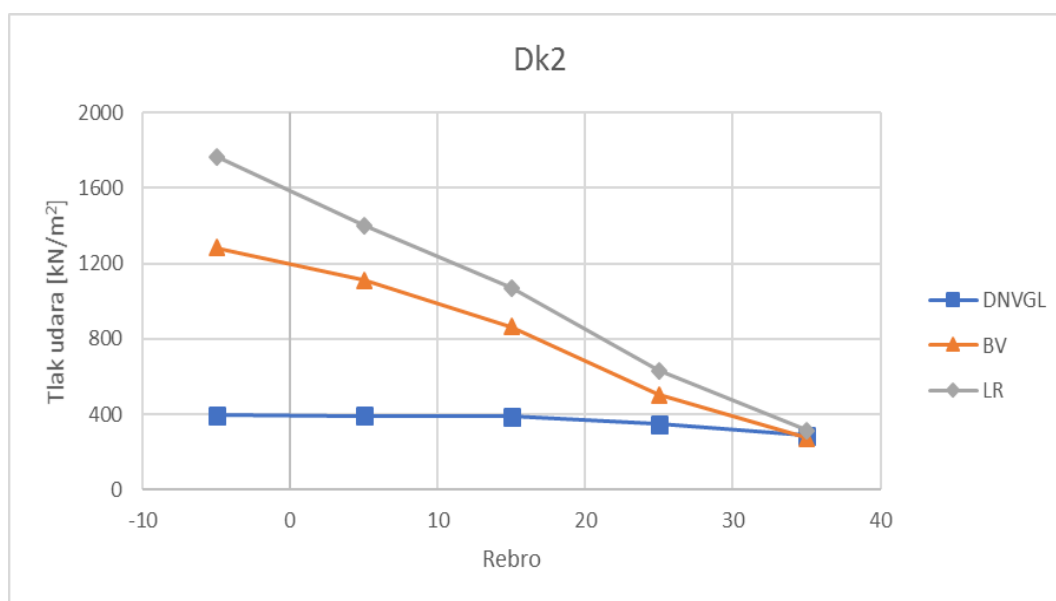
Vrijednosti dobivene prema *DNVGL*-u pokazuju ujednačenost tlakova i po visini i po rebrima, međutim, kod *BV*-a i *LR*-a je jasno izražena razlika u tlakovima na različitim visinama. Na Slikama 18. i 19. se jasno vidi kako su najviši tlakovi prisutni na krmenom zrcalo što je i očekivano. Ovi registri pokazuju značajnu osjetljivost na promjenu kuta zakrivljenja vanjske oplata, odnosno, čim kut između horizontalne osi i vanjske oplata počinje padati tlak se značajno povećava, što je također u skladu sa očekivanjima, Slika 21. i 22.

Također, za očekivati je da će rebra blizu krmenog zrcala biti izložena najvećim opterećenjima što pokazuju i rezultati u Tablici 2. dobiveni prema svima Registrima.

Promatrajući po visinama, prema svim Registrima proračunati tlakovi počinju padati s udaljavanjem od vodne linija, također i kako se i udaljavamo od krmenog zrcala.

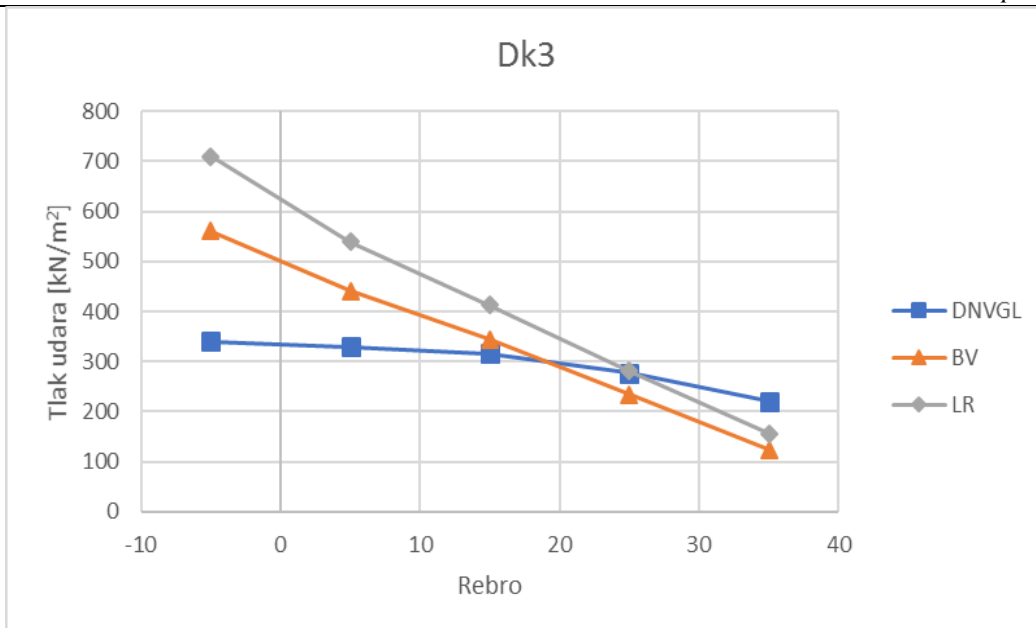
Tablica 2. Usporedba proračunatih tlakova udara na krmi

Frame	Registar	Tlak udara na krmi [kN/m <sup>2</sup> ]	
		Dk 2	Dk3
-5	DNVGL	394,5	339,7
	BV	1284,6	560,6
	LR	1768,0	710,4
5	DNVGL	391,6	328,8
	BV	1112,6	440,6
	LR	1401,0	539,4
15	DNVGL	386,5	316,2
	BV	864,2	344,4
	LR	1072,0	413,2
25	DNVGL	345,6	276,6
	BV	502,7	233,3
	LR	629,7	280,3
35	DNVGL	288,1	219,8
	BV	273,6	123,0
	LR	314,5	156,3

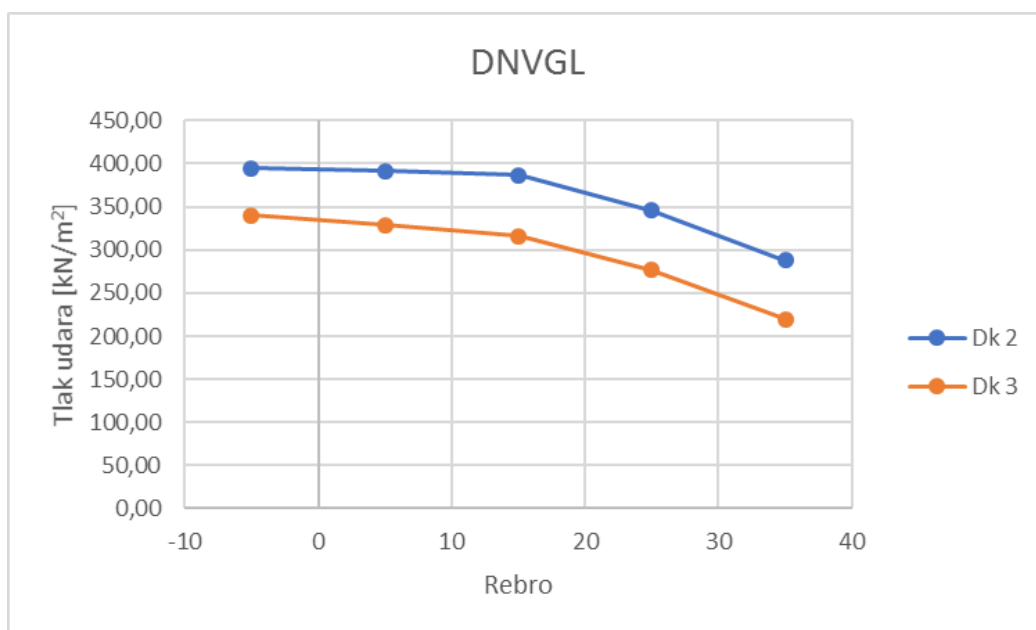


Slika 18. Raspored izračunatih tlakova udara na krmi po rebrima na razini Dk2

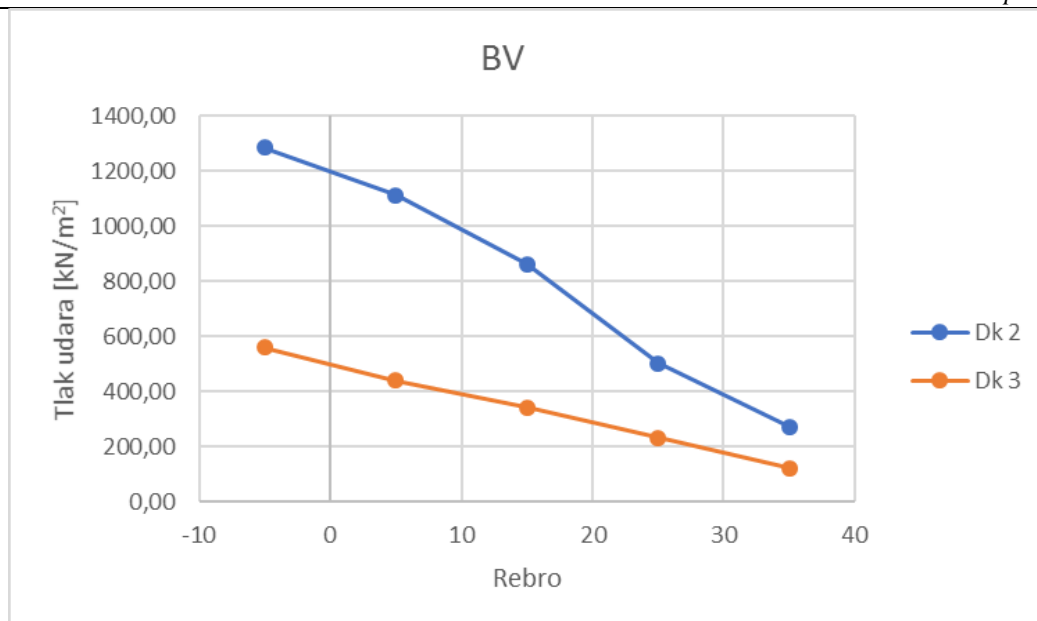




Slika 19. Raspored izračunatih tlakova na krmi po rebrima na razini Dk3



Slika 20. Promjena tlakova po visinama prema DNVGL-u



Slika 21. Promjena tlakova po visinama prema BV-u



Slika 22. Promjena tlakova po visinama prema LR-u

## 6. PRORAČUN DEBLJINA LIMOVA OPLATE

### 6.1. Zahtijevane debljine limova oplata na pramcu

Izračun potrebnih debljina oplata limova trupa se provodi pomoću prethodno izračunatih vrijednosti tlaka u dotičnoj točki. Proračun debljina limova je proveden prema pravilima Klasifikacijskih društava navedenih u Poglavlju 3. Sve izračunate vrijednosti debljine oplata su proračunske vrijednosti, odnosno, vrijednosti bez korozijskog dodatka.

*DNVGL* koristi slijedeću formulu za izračun debljine lima oplata:

$$t = 0,0158k_a b \sqrt{\frac{P_{pl}}{C_d R_{eH}}} \quad [\text{mm}] \quad (7)$$

Minimalnu zahtijevanu debljinu lima oplata *BV* specificira kao:

$$t = \frac{15,8\alpha_s}{C_d} \sqrt{\frac{P_l}{R_{eH}}} \quad [\text{mm}] \quad (8)$$

*LR*-ova univerzalna formula za izračun debljine limova oplata glasi:

$$t = 3,2s_c \sqrt{kh_s} C_R 10^{-2} \quad [\text{mm}] \quad (9)$$

Prema *ABS*-u debljina lima oplata na pramcu ne smije biti manja od vrijednosti dobivene prema slijedećoj formuli:

$$t = 0,73s \left( k_2 \frac{P_s}{f_2} \right)^{1/2} \quad [\text{mm}] \quad (10)$$

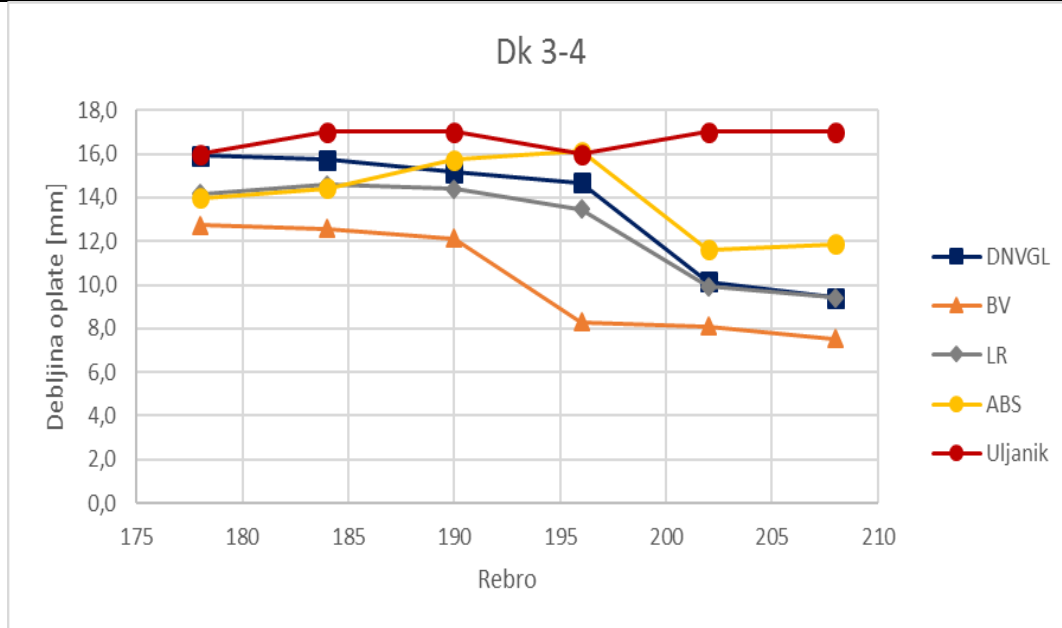
U Tablici 3. su prikazane minimalne zahtijevane vrijednosti debljine oplata, te su za usporedbu date stvarne vrijednosti implementirane na dotični brod. Važno je napomenuti kako su u radu proračunate vrijednosti bez korozijskog dodatka, dok su Uljanikove vrijednosti sa uključenim korozijskim dodatkom, prema Pravilima *RINA*-e iz 2008.

Vrijednosti zahtijevanih debljina oplata su u skladu sa prije izračunatim tlakovima. Dakle, analogno tlakovima, vidljivo je da *DNVGL*-u i *BV* zahtijevaju veće debljine na rebrima bliže krmi, dok su skroz prednja rebra zadovoljena sa manjim debljinama oplata. Također kod *LR*-a i *ABS*-a zahtjevi za većim debljinama su na samom pramcu, dok je za rebra bliža krmi dovoljna manja debljina lima. Također je vidljivo kako *LR* na višim razinama prilično odskakće sa zahtjevima za debljinu oplata, tako na primjer za rebro 196 zahtjevi po *LR*-u zahtjeva veću debljinu lima za 2% za razinu DK 3-4 od ostalih Registara. Za slijedeće dvije razine zahtjeva do čak 30% veću debljinu lima oplata, dok za Razinu Dk 6-7 oja je najudaljenija od vodne linije *LR* zahtjeva 50% veću debljinu lima nego ostali Registri.

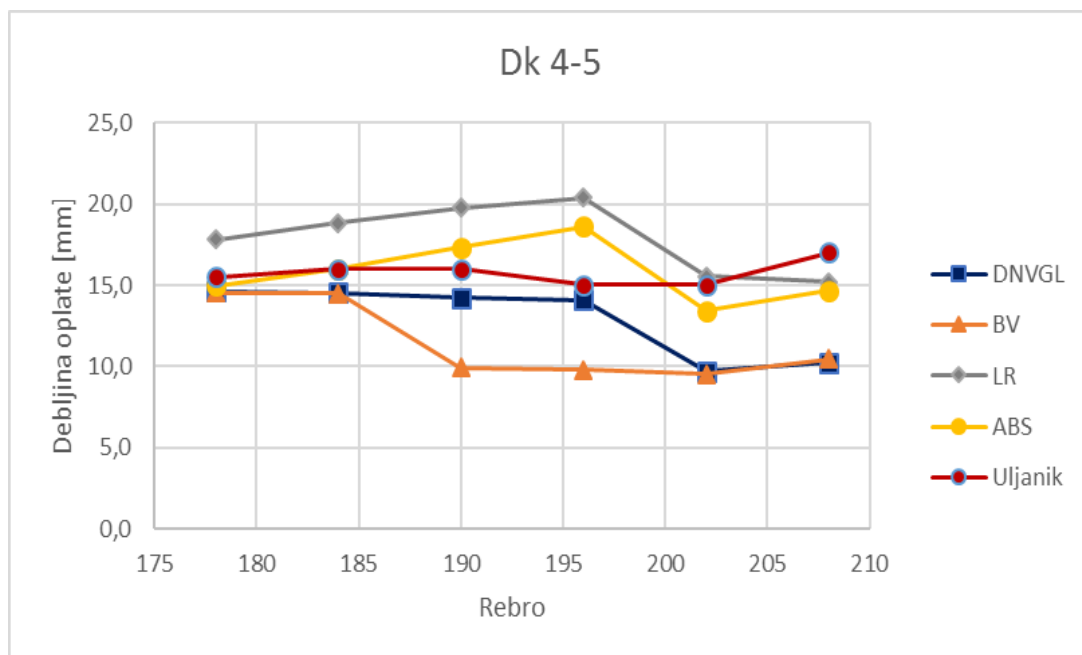
Vrijednosti debljine lima koje je odabrao Uljanik za promatrani brod se nalaze između razmatranih Registara u ovom radu. Iz tablice je također vidljivo kako Uljanik (*RINA*) ima veće zahtjeve za debljinu lima u razinama oko vodne linije, dok na razinama udaljenijima od vodne linije ti zahtjevi su slični zahtjevima Registara promatranih u ovom radu.

Tablica 3. Usporedba zahtijevanih debljina limova oplata na pramcu

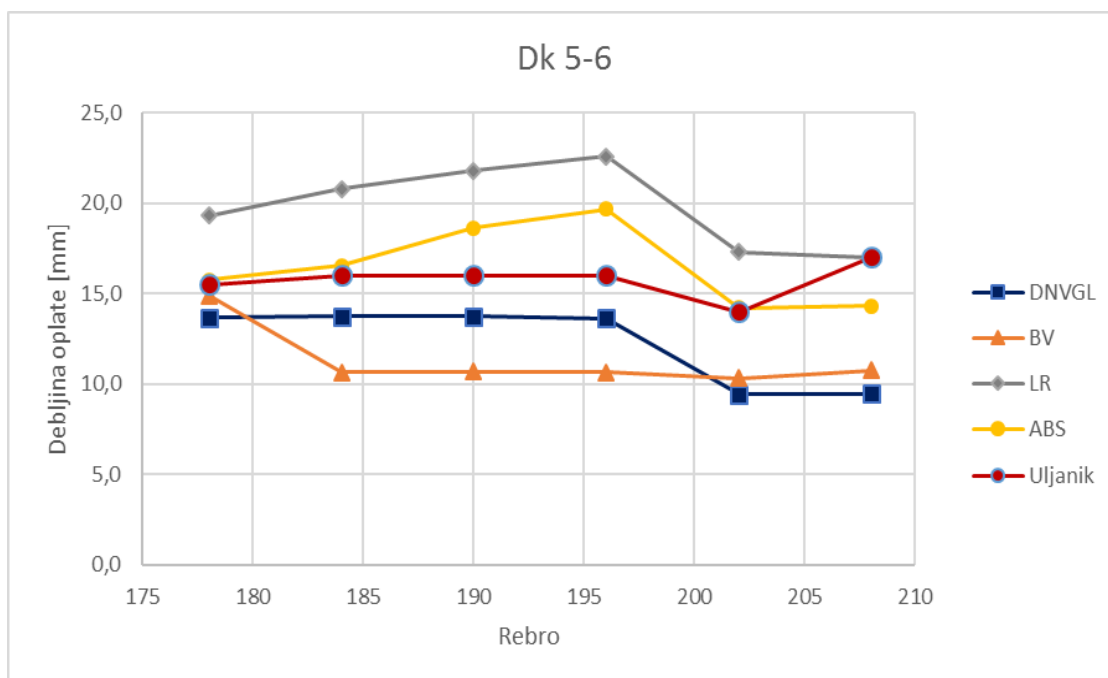
Frame	Registar	Zahtijevane debljine limova oplata [mm]			
		Deck 3-4	Deck 4-5	Deck 5-6	Deck 6-7
178	DNVGL	15,9	14,6	13,7	12,6
	BV	12,7	14,5	14,9	9,6
	LR	14,2	17,8	19,3	20,3
	ABS	14,0	15,0	15,8	10,9
	Uljanik	16	15,5	15,5	14,0
184	DNVGL	15,7	14,5	13,7	12,5
	BV	12,6	14,5	10,6	9,6
	LR	14,6	18,8	20,8	20,7
	ABS	14,4	16,0	16,5	11,1
	Uljanik	17,0	16,0	16	14,0
190	DNVGL	15,2	14,2	13,7	12,6
	BV	12,1	9,9	10,7	9,7
	LR	14,4	19,8	21,8	22,0
	ABS	15,7	17,3	18,6	11,7
	Uljanik	17,0	16	16,0	14,0
196	DNVGL	14,7	14,1	13,6	12,5
	BV	8,3	9,8	10,6	9,8
	LR	13,5	20,4	22,6	22,8
	ABS	16,1	18,6	19,7	12,4
	Uljanik	16	15,0	16,0	14,0
202	DNVGL	10,1	9,7	9,4	8,8
	BV	8,1	9,5	10,3	9,9
	LR	9,9	15,6	17,3	18,1
	ABS	11,6	13,4	14,2	9,2
	Uljanik	17	15,0	14,0	14,0
208	DNVGL	9,4	10,2	9,4	8,8
	BV	7,5	10,4	10,8	10,1
	LR	9,4	15,2	17,0	17,5
	ABS	11,9	14,7	14,3	9,8
	Uljanik	17,0	17,0	17,0	14,0



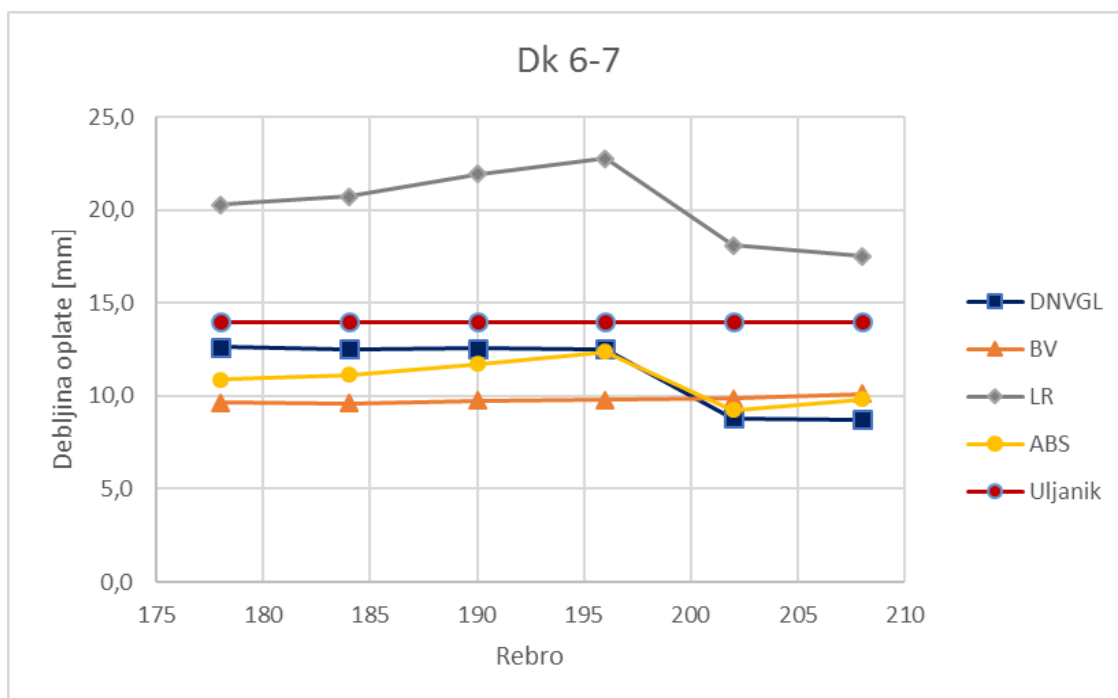
Slika 23. Raspored zahtijevanih debljina limova oplata na razini Dk 3-4



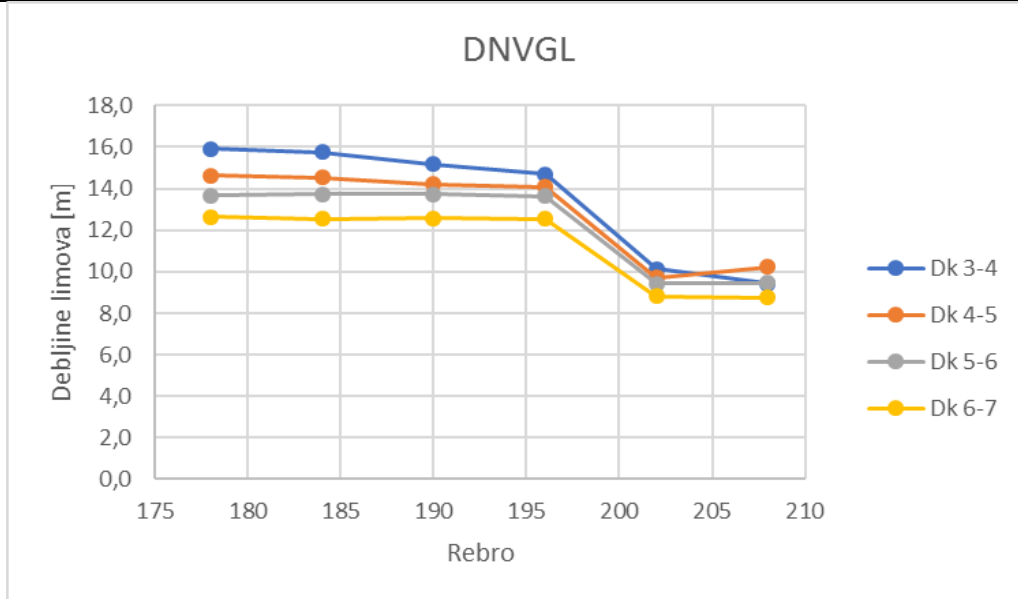
Slika 24. Raspored zahtijevanih debljina limova oplata na razini Dk4-5



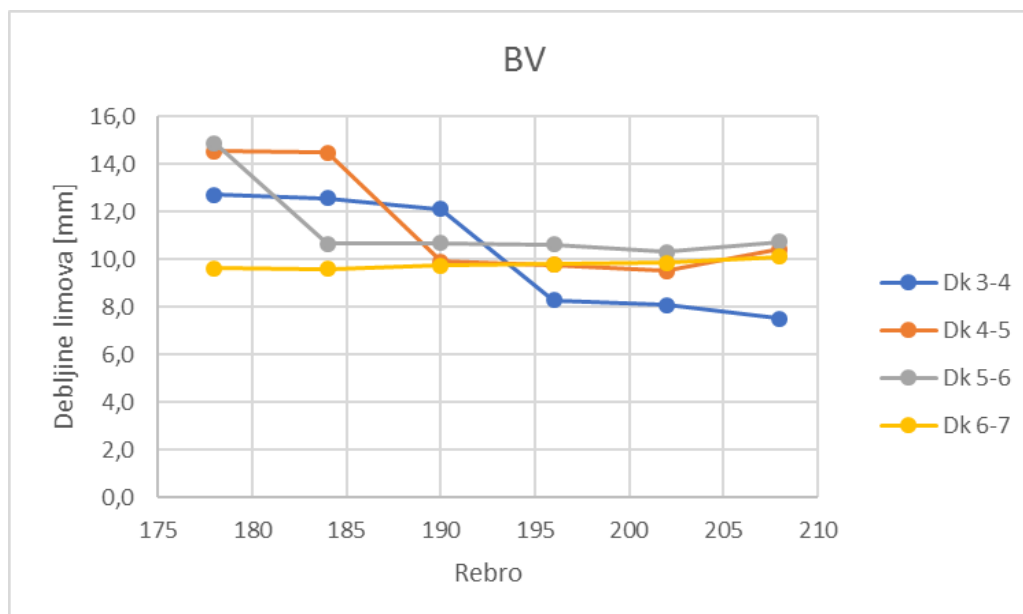
Slika 25. Raspored zahtijevanih debljina limova oplata na razini Dk 5-6



Slika 26. Raspored zahtijevanih debljina limova oplata na razini Dk 6-7

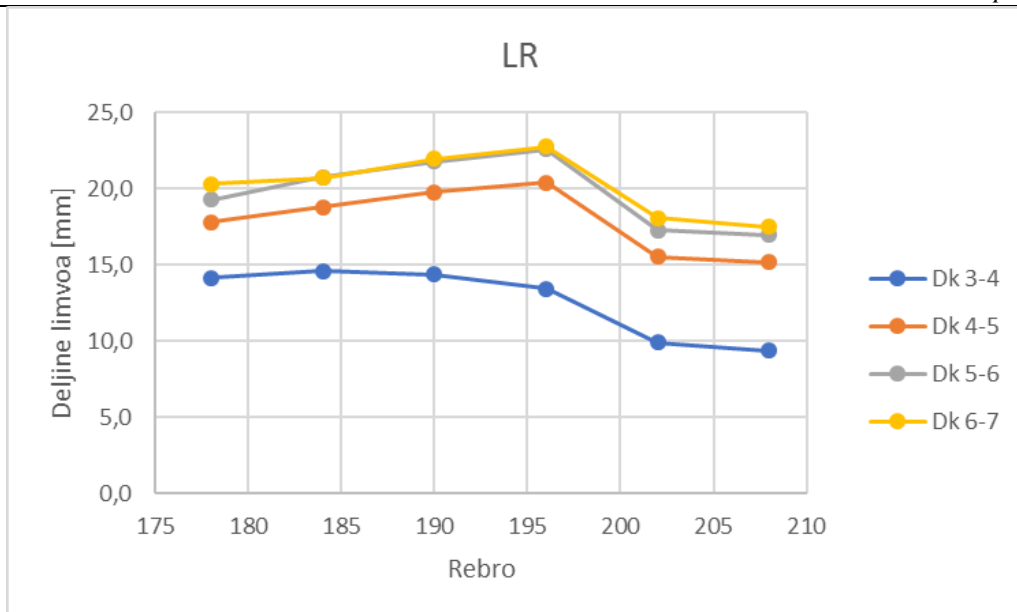


**Slika 27. Promjena debljine lima po visinama prema DNVGL-u**

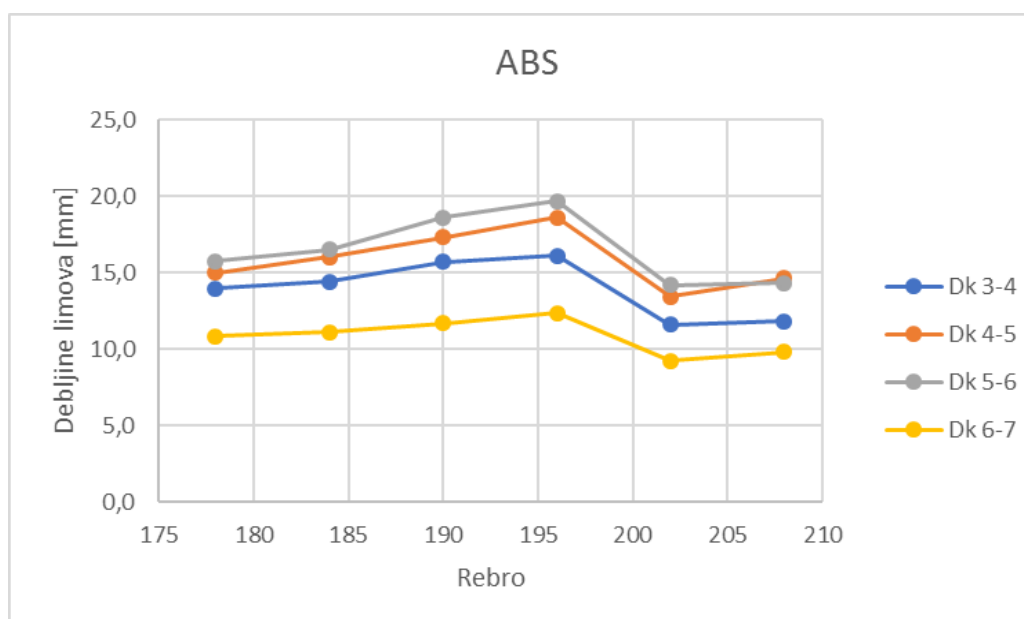


**Slika 28. Promjena debljine limova po visinama prema BV-u**





Slika 29. Promjene debljine limova po visinama prema LR-u



Slika 30. Promjene debljine limova po visinama prema ABS-u

## 6.2. Zahtijevane debljine limova oplata na krmu

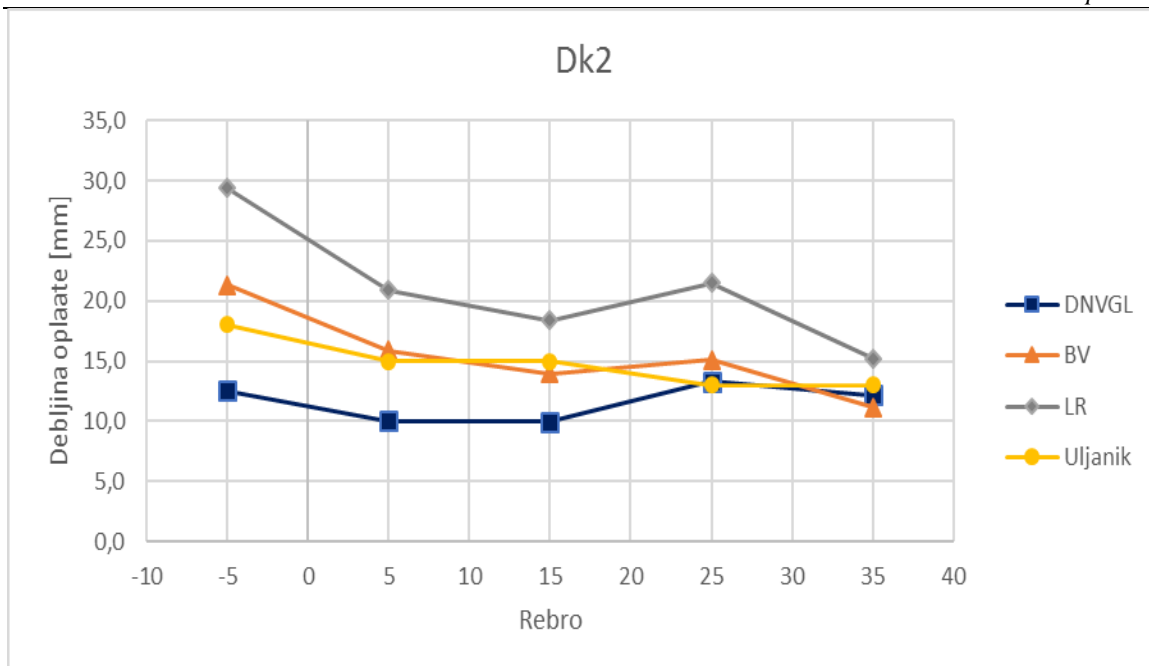
Proračun zahtijevanih debljina limova oplata na krmu se provodi ne temelju izračunatih vrijednosti tlakova valnog udara na krmu. Izrazi za tražene debljine na krmu su jednaki izrazima za debljine na pramcu, točka 6.1.

Vrijednosti proračunatih debljina limova oplata se ponašaju analogno prije izračunatih tlakovima na krmu. Iz Tablice 4. je vidljivo da se za Dk2 zahtijevaju veće debljine nego na Dk3, čemu je razlog maleni kut nagiba oplata prema horizontalnoj osi, pa je jasno da će ovdje zbog izrazito velikih tlakove biti potrebne i velike debljine lima. Ovdje se također vidi kako Uljanikove vrijednosti za debljinu lima dobro prate vrijednosti dobivene po *DNVGL*-u i *BV*-u, dok su vrijednosti dobivene prema *LR*-u značajno veće, posebice na krajnjim rebrima i to na nižoj razini, odnosno na razini Dk 2 *LR* zahtjeva 34% veće debljine lima nego ostali Registri, a na Dk 3 22% veću debljinu lima nego ostali Registri.

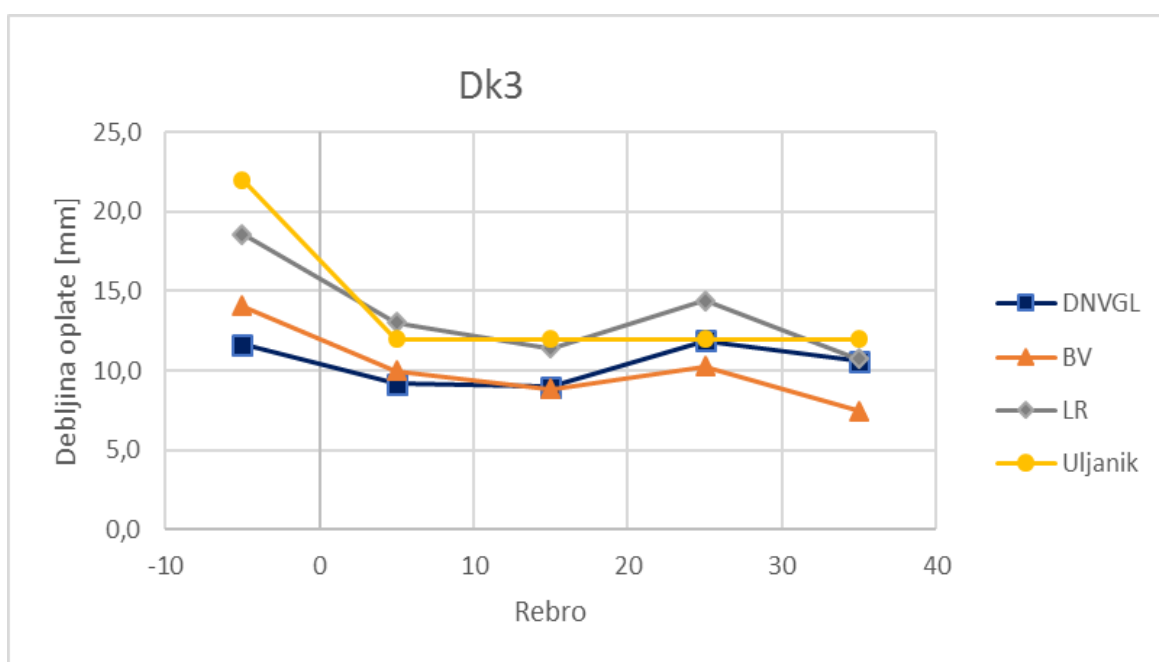
Također na Slikama 33.,34. i 35. se vidi kao izračunate debljine limova oplata prate isti trend kako se udaljavamo od vodne linije, a to vrijedi za sve Registre.

Tablica 4. Usporedba zahtijevanih debljina limova oplata na krmu

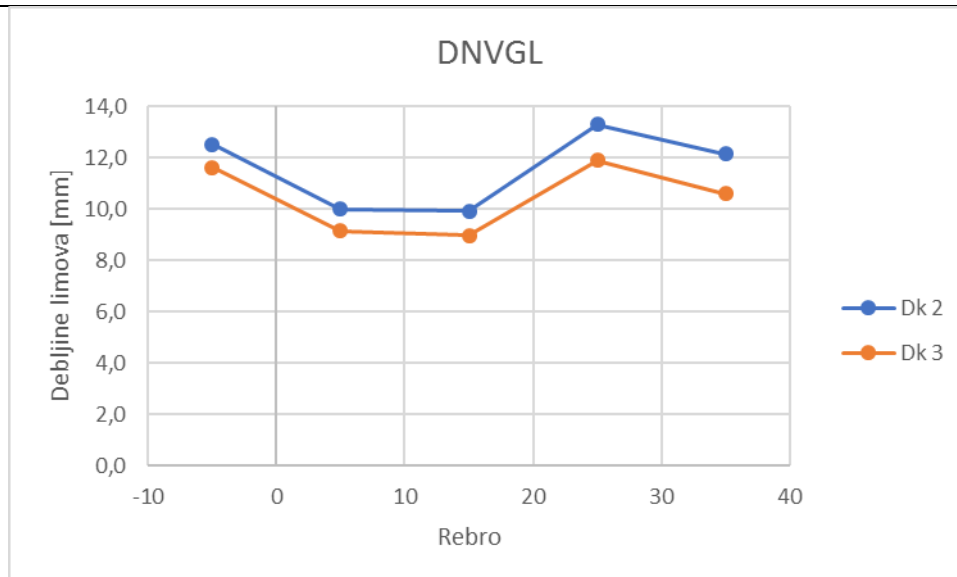
		Tražene debljine limova oplate na krmu [mm]	
Frame	Registar	Dk 2	Dk3
-5	<i>DNVGL</i>	12,5	11,6
	<i>BV</i>	21,3	14,1
	<i>LR</i>	29,4	18,6
	<i>Uljanik</i>	18,0	22,0
5	<i>DNVGL</i>	10,0	9,2
	<i>BV</i>	15,9	10,0
	<i>LR</i>	20,9	13,0
	<i>Uljanik</i>	15,0	12,0
15	<i>DNVGL</i>	9,9	9,0
	<i>BV</i>	14,0	8,8
	<i>LR</i>	18,4	11,4
	<i>Uljanik</i>	15,0	12,0
25	<i>DNVGL</i>	13,3	11,9
	<i>BV</i>	15,1	10,3
	<i>LR</i>	21,5	14,4
	<i>Uljanik</i>	13,0	12,0
35	<i>DNVGL</i>	12,1	10,6
	<i>BV</i>	11,1	7,5
	<i>LR</i>	15,2	10,8
	<i>Uljanik</i>	13,0	12,0



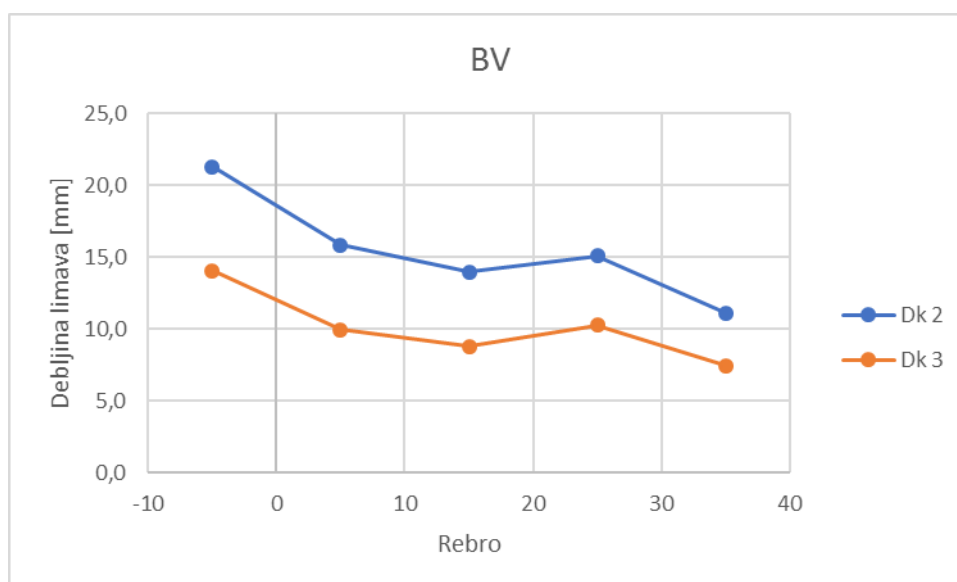
Slika 31. Raspored zahtijevanih debljina limova oplata na krmi na razini Dk 2



Slika 32. Raspored zahtijevanih debljina limova oplata na krmi na razini Dk 3



Slika 33. Promjena debljina limova oplata po visinama prema *DNVGL*-u



Slika 34. Promjene debljina limova po visinama prema *BV*-u



**Slika 35. Promjena debljina limova po visinama prema LR-u**

## 7. PRORAČUN UKREPA

### 7.1. Zahtijevani momenti otpora presjeka ukrepa na pramcu

Za dimenzioniranje profila ukrepa potrebno je proračunati vrijednosti momenta otpora presjeka profila. Formule za izračun obuhvaćaju prethodno izračunate tlakove i debljinu oplate. Klasifikacijska društva daju formule za plastični moment otpora profila prema kojem se dimenzionira određeni strukturni element.

Prema *DNVGL*-u, plastični moment otpora presjeka profila ne smije biti manji od:

$$Z_{pl} = \frac{1,2P_{st}sl_{bdg}^2}{f_{pl}R_{eH}} + \frac{n_s \left[ 1 - \sqrt{1 - (t_w/t_{wa})^2} \right] h_w t_w (h_w + t_p)}{8000} \quad [\text{cm}^3] \quad (11)$$

Dok se stvarna vrijednost momenta otpora presjeka računa prema *DNVGL*-u računa kao:

$$Z_{pl}' = \frac{h_w t_w (h_w + t_p) \sin \varphi_w}{2000} + \frac{(2\gamma - 1)A_f \left[ (h_{f-ctr} + t_p / 2) \sin \varphi_w - b_{f-ctr} \cos \varphi_w \right]}{1000} \quad (12)$$

Prema *BV*-u, ukrepe izložene valnom udarnom opterećenju ne smiju biti manje od vrijednosti:

$$Z_{pl} = \frac{P_I}{0,9(n+2)4R_{eH}} sl^2 10^3 \quad [\text{cm}^3] \quad (13)$$

Dok se stvarna vrijednost momenta otpora profila računa prema:

$$Z_{pl}' = \frac{f_w h_w^2 t_w}{2000} \sin \alpha + (2\gamma - 1) \frac{A_f (h_{f-ctr} \sin \alpha - b_{f-ctr} \cos \alpha)}{1000} \quad [\text{cm}^3] \quad (14)$$

Plastični moment otpora profila prema *LR*-u ne smije biti manji od:

$$Z_{pl} = 3,75h_s s_{cm} k l_e^2 10^{-3} \quad [\text{cm}^3] \quad (15)$$

Stvarni moment otpora profila prema *LR*-u:

$$Z_{pl} = 2,8s_{cm} t_p^2 10^{-4} - b_f b_{fc} t_f \sin \theta_e 10^{-3} + 5(h_w^2 t_w + 2b_f t_f h_w) \cos \theta_e 10^{-4} \quad [\text{cm}^3] \quad (16)$$

ABS također preporuča formulu za izračun minimalne vrijednosti momenta otpora ukrepa koja glasi:

$$SM = \frac{p_s s l^2 10^3 / k}{0,9 S_m f_y} \text{ [cm}^3\text{]} \quad (17)$$

Kao što se vidi iz tablice 5., *LR* i kod odabira profila ukrepa ima najstroži pristup. Na razinama blizu vodne linije profili ne odudaraju mnogo od profila odabranih po ostalim registrima, dok na razinama udaljenijima od vodne linije odabrane dimenzije profila znatno odskaku.

Kod usporedbe dimezija koje je odabrao Uljanik je vidljivo da se one dosta dobro poklapaju sa odabranim dimenzijama proračunatima po *DNVGL*-u, *BV*-u i *ABS*-u. Uljanik ima uniformnu dimenziju koja se proteže po svim visinama uzduž pramčanog pika koja zadovoljava zahtijevane kriterije. Ta dimenzija je ujednačena zbog jednostavnije narudžbe materijala i zbog jednostavnije implementacije ukrepa na brodsku strukturu.



Tablica 5. Usporedba zahtijevanih profila na pramcu

Frame	Registar	Odabrani profili ukrepa na pramcu			
		Deck 3-4	Deck 4-5	Deck 5-6	Deck 6-7
178	<i>DNVGL</i>	HP 220x12	HP 260x12	HP 260x12	HP 240x12
	<i>BV</i>	HP 220x12	HP 240x12	HP 240x12	HP 220x12
	<i>LR</i>	HP 340x16	HP 430x16	HP 400x19	HP 500x15
	<i>ABS</i>	HP 220x10	HP 240x12	HP 260x10	HP 200x11
	<i>Uljanik</i>	HP 260x11	HP 260x11	HP 260x11	HP 260x11
184	<i>DNVGL</i>	HP 220x12	HP 260x12	HP 240x12	HP 240x12
	<i>BV</i>	HP 220x12	HP 240x12	HP 220x12	HP 220x12
	<i>LR</i>	HP 340x15	HP 430x15	HP 400x18	HP 500x14
	<i>ABS</i>	HP 220x10	HP 260x10	HP 260x11	HP 200x10
	<i>Uljanik</i>	HP 260x11	HP 260x11	HP 260x11	HP 260x11
190	<i>DNVGL</i>	HP 220x12	HP 240x12	HP 240x11	HP 240x11
	<i>BV</i>	HP 220x12	HP 220x12	HP 220x12	HP 220x12
	<i>LR</i>	HP 340x14	HP 430x14	HP 400x17	HP 500x13
	<i>ABS</i>	HP 240x10	HP 280x11	HP 280x12	HP 200x10
	<i>Uljanik</i>	HP 260x11	HP 260x11	HP 260x11	HP 260x11
196	<i>DNVGL</i>	HP 200x11	HP 240x11	HP 220x11	HP 240x11
	<i>BV</i>	HP 200x12	HP 220x12	HP 220x12	HP 240x12
	<i>LR</i>	HP 340x13	HP 400x14	HP 400x16	HP 500x12
	<i>ABS</i>	HP 240x10	HP 280x12	HP 300x11	HP 200x10
	<i>Uljanik</i>	HP 260x11	HP 260x11	HP 260x11	HP 260x11
202	<i>DNVGL</i>	HP200x11	HP240x11	HP200x10	HP220x11
	<i>BV</i>	HP 200x12	HP 240x12	HP 220x12	HP 240x12
	<i>LR</i>	HP340X12	HP340X12	HP550X12	HP370X14
	<i>ABS</i>	HP220X10	HP260X10	HP260X12	HP200X10
	<i>Uljanik</i>	HP260X11	HP260X11	HP260X11	HP260X12
208	<i>DNVGL</i>	HP 200x11	HP 240x11	HP 240x10	HP 260x11
	<i>BV</i>	HP 200x12	HP 260x12	HP 240x12	HP 260x12
	<i>LR</i>	HP 340x12	HP 340x12	HP 550x12	HP 370x13
	<i>ABS</i>	HP 220x10	HP 280x11	HP 280x12	HP 200x10
	<i>Uljanik</i>	HP 260x11	HP 260x11	HP 260x11	HP 260x12

## 7.2. Zahtijevani momenti otpora presjeka ukrepa na krmi

Za dimenzioniranje profila ukrepa na krmenom dijelu koji je opterećenja valnim udarcima potrebno je znati debljine oplate i tlakove. Formule koje popisuje Registri za momente otpora profila ukrepa na krmenom dijelu su jednake formulama za momente otpora pramčanog dijela.

Odabir profila na krmi pokazuje, kao i kod proračuna debljina i tlakova, jasnu ovisnost *LR*-ovih zahtjeva o kutu vodne linije. Iz Tablice 6. se vidi da *LR* kod malih kutova u odnosu na horizontalnu os traži jače profile, dok kod većih kutova zahtjev za odabrani profil postaje manji čak i od zahtjeva ostalih Registarara. Kod ostalih registara se vidi da imaju ujednačene zahtjeve za dimenzijama profila, dok Uljanikovi odabrani profili najbolje prate profile proračunate prema *BV*-u. Ovdje se također vidi ujednačenost odabranih profila kod Uljanika po visinama i uzduž krmenog dijela.

**Tablica 6. Usporedba zahtijevanih profila na krmi**

Usporedba zahtijevanih profila na krmi			
Frame	Registar	Dk 2	Dk3
-5	<i>DNVGL</i>	HP 430x12	HP 280x12
	<i>BV</i>	HP 320x12	HP 320x12
	<i>LR</i>	HP 430x15	HP 300x12
	<i>Uljanik</i>	HP 320x12	HP 320x12
5	<i>DNVGL</i>	HP 400x12	HP 260x12
	<i>BV</i>	HP 320x12	HP 300x11
	<i>LR</i>	HP 300x11	HP 200x12
	<i>Uljanik</i>	HP 320x12	HP 320x12
15	<i>DNVGL</i>	HP 400x12	HP 260x12
	<i>BV</i>	HP 320x12	HP 280x11
	<i>LR</i>	HP 260x12	HP 200x9
	<i>Uljanik</i>	HP 320x12	HP 320x12
25	<i>DNVGL</i>	HP 320x12	HP 240x12
	<i>BV</i>	HP 300x11	HP 260x10
	<i>LR</i>	HP 650x12	HP 450x12
	<i>Uljanik</i>	HP 300x11	HP 300x11
35	<i>DNVGL</i>	HP 260x12	HP 220x12
	<i>BV</i>	HP 280x11	HP 240x10
	<i>LR</i>	HP 430x15	HP 340x12
	<i>Uljanik</i>	HP 300x11	HP 300x11

## 8. ZAKLJUČAK

Usporedba zahtjeva klasifikacijskih društava *DNVGL*, *BV*, *LR* i *ABS* je pokazala da za iste uvjete *LR* procjenjuje prilično veće vrijednosti tlaka udara vala od onih procijenjenih od strane ostalih registara. Pri odabiru debljine limova, a analogno prethodno izračunatim tlakovima, *LR* zahtijeva u prosjeku oko 25% veću debljinu opločenja od ostalih Registara za točke na pramcu, dok za točke na krmi zahtijeva od 22% do 34% veće debljine limova nego ostali Registri. Kod ovog Registra su također izraženi zahtjevi obzirom na udaljenost od vodne linije. Pa tako, za razine udaljenije od vodne linije *LR* zahtijeva i do 50% veće debljine limova nego ostali Registri. Vidljivo je da *LR* ima dosta konvencionalan pristup dimenzioniranju struktura na valno udarno opterećenje te da ima jako izraženu osjetljivost na kut vodne linije  $\gamma_p$  te na udaljenost od vodne linije.

Pri odabiru debljine oplata je zanimljivo da *BV* i *DNVGL* kod velikih kutova vodne linije daju vrlo male zahtjeve za vrijednosti debljine lima, što posredno može značiti veliku uštedu u ukupnoj masi broda. Kod ova dva Registra su usklađeni zahtjevi za tlakove pa tako i vrijednosti debljine limova opločenja prate isti trend obzirom na udaljenost od vodne linije kao i na udaljenosti u uzdužnom smislu.

Dimenzioniranje profila ukrepa je usko povezano s kutom vodne linije i proračunatim debljinama limova opločenja. Gledajući pramac, *LR* traži nešto veće profile ukrepa od ostalih Registara. Također, analogno debljinama limova opločenja, ovdje su zahtjevi za momente otpora profila veći kod razina udaljenijih od vodne linije. Ostali Registri skladno prate zahtjeve za odabrane momente otpora profila odnosno odabrane profile ukrepa. Dolaskom na krmeni dio gdje su po visini izabrane vrlo različite točke gledano prema iznosu kuta  $\beta$ , potvrđuje se važnost te ulazne veličine. Svi Registri također zahtijevaju na rebrima blizu krmenog zrcala dosta velika ojačanja konstrukcije, što je u skladu sa očekivanjima.

Zanimljivo je još da *ABS* u svim točkama na pramcu proračunava dosta manje vrijednosti tlakova no što ga računaju ostali registri, i to čak do 66% manje tlakove za točke na pramcu, dok kod proračuna debljine lima i odabira ukrepa, te vrijednosti se dobro slažu sa vrijednostima *DNVGL*-a i *BV*-a, pa čak ih u nekim točkama i znatno premašuju. *ABS*, slično kao i *LR*, ima izraženu osjetljivost na udaljenost od vodne linije, a to se najviše očituje u tlakovima, međutim, prilikom procjene debljine limova opločenja, ta razlika se izgubi, te se vrijednosti počinju ponašati skladno sa vrijednostima dobivenim po *DNVGL*-u i *BV*-u. Ovaj

primjer je dobro pokazuje kako različiti pristupi proračunavanja određenih veličina dovode do sličnih rješenja, koja su u skladu sa očekivanjima.

Potrebno je naglasiti da su vrijednosti dobivene prema *DNV*-u i *BV*-u slične vrijednostima debljine oplata lima i tipova profila kao kod Uljanikovog broda za prijevoz žive stoke koji je projektiran prema Pravilima *RINA*-e, koji je poslužio kao predložak za ovaj rad.

To neposredno dovodi do zaključka da su *RINA*, *DNVGL* i *BV* prilično usklađeni u svojim zahtjevima za dimenzioniranje krmenog i pramčanog dijela brodske strukture na udarno valno opterećenje.

**LITERATURA**

- [1] Mate Grgić, Lokalno opterećenje i odziv strukture broda uslijed udaranja o valove, Doktorski rad, Zagreb, 2015.
- [2] *DNVGL*, Rules for Classification, General regulations, Edition July 2016.
- [3] *Bureau Veritas*, Rules for the Classification of Steel Ships, July 2014. with Amendments January 2016.
- [4] *Lloyd's Register*, Rules and Regulations for the Classification of Ships - Part 4 Ship Structures (Ship Types)“, July 2010.
- [5] *American Bureau of Shipping*, Rules for building and classing steel vessels, Part 5C Specific Vessel Types, 2016

## **PRILOZI**

- I. Promatrane točke na pramcu
- II. Promatrane točke na krmu