

# Utjecaji karakteristika ugrađenog čelika na svojstva izgrađenog trupa broda

---

Dupor, Nikola

Master's thesis / Diplomski rad

2011

*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:235:859984>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-26**

*Repository / Repozitorij:*

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



Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet strojarstva i brodogradnje

# DIPLOMSKI RAD

Nikola Dupor

Zagreb, 2011.

Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet strojarstva i brodogradnje

# DIPLOMSKI RAD

Mentor

Doc.dr.sc. Boris Ljubenkov

Nikola Dupor

Zagreb, 2011.

*Mojim roditeljima, Vidi i Vladimiru*

## Sažetak

Čvrstoća broskog trupa definira se u projektu na osnovi nominalnih karakteristika čelika. Mehanička svojstva stvarno ugrađenog čelika u trup broda mogu se razlikovati od nominalnih. Da bi se dobio uvid u pravu čvrstoću broskog trupa potrebno je ustanoviti i stvarna svojstva ugrađenog materijala. Radi toga je provedeno ispitivanje mehaničkih svojstva materijala statičkim vlačnim pokusom na odabranom uzorku ugrađenog materijala.

Prikazana je teoretska osnova ispitivanja, mjerna oprema i uređaji.

Provedba eksperimenta je opisana od obrade i pripreme uzoraka, preko samog testiranja do prikaza i analize rezultata.

Nadalje, prikazani su principi proračuna uzdužne i granične čvrstoće, s posebnim osvrtom na numeričko rješenje.

Na kraju je proračunata uzdužna i granična čvrstoća broda računalnim programom MARS 2000 sa nominalnim vrijednostima mehaničkih svojstava, a onda i sa eksperimentalno utvrđenim, te je dana usporedba.

Ključne riječi: mehanička svojstva materijala, čvrstoća broda, brodograđevni čelik, rastezna čvrstoća, granična čvrstoća

# Sadržaj

Popis slika .....	3
Popis tablica .....	5
Popis oznaka i mjernih jedinica fizikalnih veličina .....	7
1 Uvod .....	10
2 Postupak ispitivanja materijala .....	12
2.1 Općenito o mehaničkim svojstvima materijala .....	12
2.1.1 Mehanička svojstva brodograđevnog čelika .....	13
2.2 Ispitivanje mehaničkih svojstava materijala .....	14
2.2.1 Statički vlačni pokus .....	14
3 Provedba eksperimenta .....	21
3.1 Ispitne epruvete .....	22
3.2 Ispitni uređaji i oprema .....	24
3.2.1 Video ekstenzometar .....	24
3.3 Prikaz i analiza rezultata mjerenja .....	27
3.3.1 Usporedba eksperimentalno dobivenih vrijednosti i nominalnih vrijednosti .....	31
3.3.2 Usporedba različitih grupa uzoraka .....	33
4 Principi proračuna čvrstoće broda .....	35
4.1 Uzdužna čvrstoća broda .....	35
4.1.1 Brod kao kutijasti nosač .....	35
4.1.2 Raspodjela težina po duljini broda .....	36
4.1.3 Raspodjela uzgona po duljini broda .....	37
4.1.4 Raspodjela opterećenja po duljini broda .....	37
4.1.5 Odziv brodskog trupa na vanjska opterećenja .....	38
4.2 Tipovi loma strukture .....	40
4.2.1 Lokalna plastična deformacija .....	41

4.2.2	Izvijanje nosača i opločenja .....	42
4.2.3	Lom zbog nastanka pukotina.....	43
4.3	Granično stanje ukupne strukture .....	43
4.4	Potreba za procjenom granične čvrstoće .....	45
4.4.1	Analiza progresivnog sloma.....	46
4.4.2	Pojednostavljena (smithova) metoda .....	46
4.5	Teorija proračuna granične čvrstoće broskog trupa .....	48
4.5.1	Analiza izvijanja.....	48
4.5.2	Analiza plastičnih zglobova .....	48
4.5.3	Analiza granične čvrstoće individualnog elementa.....	49
4.5.4	Analiza granične čvrstoće modula trupa .....	50
4.6	Numeričko rješenje problema granične čvrstoće.....	53
4.6.1	Krivulje naprezanje – deformacija .....	53
4.7	Algoritam numeričkog rješenja .....	62
5	Usporedba granične čvrstoće na osnovi nominalnih i stvarnih vrijednosti mehaničkih svojstava čelika .....	65
5.1	Glavne karakteristike broda.....	66
5.2	Karakteristike poprečnog presjeka .....	67
5.3	Proračun granične čvrstoće na osnovi nominalnih vrijednosti mehaničkih svojstava čelika.....	72
5.4	Proračun granične čvrstoće na osnovi stvarnih vrijednosti mehaničkih svojstava čelika.....	75
5.5	Usporedba rezultata .....	78
6	Zaključak.....	79
	Literatura .....	80

## Popis slika

Slika 2-1	Epruveta okruglog presjeka .....	14
Slika 2-2	Način opterećivanja epruvete pri statičkom vlačnom pokusu.....	15
Slika 2-3	Dijagram kidanja za "meki" konstrukcijski čelik.....	16
Slika 2-4	Skica epruvete okruglog presjeka nakon loma.....	17
Slika 2-5	Dijagram naprezanje-istezanje za "meki" konstrukcijski čelik.....	18
Slika 2-6	"Kvalitativni" dijagrami $\sigma$ - $\varepsilon$ za neke metalne konstrukcijske materijale.....	20
Slika 3-1	Skica izrezivanja epruveta iz ispitnog lima/profila u odnosu na smjer valjanja ....	21
Slika 3-2	Epruvete korištene za provedbu eksperimenta.....	23
Slika 3-3	Statička kidalica Messphysik Beta 50-5.....	24
Slika 3-4	Programsko sučelje videoekstenzometra – početak mjerenja .....	25
Slika 3-5	Programsko sučelje videoekstenzometra – prikaz vrata epruvete.....	26
Slika 3-6	Programsko sučelje videoekstenzometra – prikaz loma epruvete.....	26
Slika 3-7	Markeri postavljeni na epruvetu.....	27
Slika 3-8	Dijagram naprezanje – istezanje za profil – uzdužno.....	29
Slika 3-9	Dijagram naprezanje – istezanje za profil - poprečno .....	30
Slika 3-10	Dijagram naprezanje – istezanje za lim – uzdužno .....	30
Slika 3-11	Dijagram naprezanje – istezanje za lim - poprečno .....	30
Slika 3-12	Usporedni dijagram eksperimentalno dobivenih vrijednosti i nominalnih vrijednosti.....	32
Slika 4-1	Raspored težina .....	36
Slika 4-2	Raspored sile uzgona .....	37
Slika 4-3	Raspored poprečnih sila i momenata savijanja pri uzdužnom savijanju broskog trupa.....	38
Slika 4-4	Diferencijalni element grede podvrgnut čistom savijanju .....	39
Slika 4-5	Krivulje ovisnosti opterećenja $q$ i defleksije $\delta$ za razne načine loma strukturnih elemenata.....	41



Slika 4-6	Idealizirani slučaj izvijanja štapa .....	42
Slika 4-7	Odnos naprezanja i defleksije tijekom loma cijele strukture .....	44
Slika 4-8	Ovisnost momenta savijanja o zakrivljenosti trupa.....	51
Slika 4-9	Izgled krivulje $\sigma - \varepsilon$ za elasto – plastični način sloma .....	55
Slika 4-10	Izgled krivulje $\sigma - \varepsilon$ za slom putem gredno – štapnog izvijanja .....	57
Slika 4-11	Izgled krivulje $\sigma - \varepsilon$ za slom putem torzijskog izvijanja.....	59
Slika 4-12	Izgled krivulje $\sigma - \varepsilon$ za slom putem lokalnog izvijanja struka običnih ukrepa ...	61
Slika 4-13	Algoritam numeričkog rješenja proračuna graničnog momenta savijanja .....	64
Slika 5-1	Geometrija glavnog rebra u programu MARS 2000.....	67
Slika 5-2	Uzdužna čvrstoća broda .....	73
Slika 5-3	Dijagram momenta savijanja u ovisnosti o zakrivljenosti trupa $M - \chi$ .....	74
Slika 5-4	Uzdužna čvrstoća broda na osnovi stvarnih vrijednosti mehaničkih svojstava ugrađenog čelikačelika .....	76
Slika 5-5	Dijagram momenta savijanja u ovisnosti o zakrivljenosti trupa $M - \chi$ na osnovi stvarnih mehaničkih svojstava ugrađenog čelika .....	77

## Popis tablica

Tablica 2-1	Iznosi modula elastičnosti za neke metalne materijale i njihove legure.....	20
Tablica 3-1	Grupiranje prema smjeru izrezivanja epruveta iz ispitnog lima/profila u odnosu na smjer valjanja .....	21
Tablica 3-2	Preporučene dimenzije epruveta prema Registru .....	22
Tablica 3-3	Dimenzije za izradu epruveta prema DIN-u.....	22
Tablica 3-4	Promjeri i površine poprečnih presjeka epruveta .....	23
Tablica 3-5	Rezultati mjerenja dobiveni statičkim – vlačnim pokusom.....	28
Tablica 3-6	Kvantitativna usporedba eksperimentalno dobivenih vrijednosti i nominalnih vrijednosti .....	31
Tablica 3-7	Usporedba grupa uzorka dobivenih iz profila .....	33
Tablica 3-8	Usporedba grupa uzorka dobivenih iz lima.....	33
Tablica 3-9	Usporedba grupa uzorka dobivenih izrezivanjem u smjeru valjanja.....	34
Tablica 3-10	Usporedba grupa uzorka dobivenih izrezivanjem poprečno na smjer valjanja .....	34
Tablica 5-1	Glavne karakteristike broda.....	66
Tablica 5-2	Površina (bruto) poprečnog presjeka od čelika nominalnih svojstava [m <sup>2</sup> ] .....	68
Tablica 5-3	Površina (bruto) poprečnog presjeka od čelika stvarnih svojstava [m <sup>2</sup> ].....	68
Tablica 5-4	Geometrijske karakteristike poprečnog presjeka (bruto izmjere).....	68
Tablica 5-5	Profili .....	69
Tablica 5-6	Vojevi .....	69
Tablica 5-7	Površina (neto) poprečnog presjeka od čelika nominalnih svojstava [m <sup>2</sup> ].....	70
Tablica 5-8	Površina (neto) poprečnog presjeka od čelika stvarnih svojstava [m <sup>2</sup> ] .....	70
Tablica 5-9	Geometrijske karakteristike poprečnog presjeka (neto izmjere).....	70
Tablica 5-10	Moment otpora i inercije .....	71
Tablica 5-11	Opterećenje broskog trupa kao grede na osnovi nominalnih vrijednosti mehaničkih svojstava čelika .....	72

Tablica 5-12	Provjera granične čvrstoće (proračun po pravilima registra) na osnovi nominalnih vrijednosti mehaničkih svojstava čelika.....	74
Tablica 5-13	Opterećenje broskog trupa kao grede na osnovi stvarnih vrijednosti mehaničkih svojstava čelika .....	75
Tablica 5-14	Provjera granične čvrstoće (proračun po pravilima registra) na osnovi stvarnih vrijednosti mehaničkih svojstava čelika .....	76
Tablica 5-15	Usporedba rezultata proračuna na temelju nominalnih i stvarnih mehaničkih svojstava materijala .....	78

## Popis oznaka i mjernih jedinica fizikalnih veličina

$A$	- površina poprečnog presjeka elementa, [mm <sup>2</sup> ]
$A_E$	- površina poprečnog presjeka ukrepe s pridruženom oplatom, [mm <sup>2</sup> ]
$A_S$	- površina poprečnog presjeka ukrepe, [mm <sup>2</sup> ]
$b_E$	- širina pridružene oplata, [m]
$d_0$	- početni promjer epruvete, [mm]
$E$	- modul elastičnosti, [N/mm <sup>2</sup> ]
$F_e$	- sila tečenja (razvlačenja), [N]
$F_k$	- sila pri kojoj dolazi do loma epruvete, [N]
$h_W$	- visina struka ukrepe, [mm]
$h_{WE}$	- efektivna visina struka, [mm]
$I$	- moment tromosti poprečnog presjeka, [m <sup>4</sup> ; cm <sup>4</sup> ]
$I_E$	- moment tromosti poprečnog presjeka ukrepe s pridruženom oplatom, [cm <sup>4</sup> ]
$I_P$	- polarni moment tromosti poprečnog presjeka, [cm <sup>4</sup> ]
$L_0$	- početna mjerna duljina epruvete, [mm]
$L_u$	- konačna mjerna duljina epruvete, [mm]
$l$	- duljina ploče, [m]
$M$	- moment savijanja, [Nm]
$M_b$	- ukupni projektni moment [kNm]
$M_{CR}$	- kritični moment savijanja elastičnosti, [Nm]
$M_E$	- moment savijanja elastičnosti, [Nm]
$M_P$	- moment savijanja potpune plastičnosti [Nm]
$M_{SW}$	- projektni moment na mirnoj vodi [kNm]
$M_U, M_{ULT}$	- granični moment savijanja, [Nm]
$M_w$	- projektni moment od valova [kNm]
$R$	- radijus zakrivljenosti, [m]
$R_e$	- granica razvlačenja, [N/mm <sup>2</sup> ]

$R_e^h$	- nominalna granica razvlačenja, [N/mm <sup>2</sup> ]
$R_m$	- rastezna čvrstoća, [N/mm <sup>2</sup> ]
$R_k$	- konačno naprezanje, [N/mm <sup>2</sup> ]
$Q$	- poprečna sila, [N]
$q, q_U, q_T$	- opterećenje, [N/mm <sup>2</sup> ]
$S_0$	- početna površina presjeka epruvete, [mm <sup>2</sup> ]
$s$	- razmak uzdužnjaka [m]; razmak rebara, [m]
$t$	- debljina opločenja, [mm]
$t_P$	- debljina pridružene oplata, [mm]
$z$	- vertikalna koordinata, [m]
$W$	- moment otpora poprečnog presjeka, [m <sup>3</sup> ]
$\beta_E$	- koeficijent izvijanja
$\gamma$	- faktor sigurnosti
$\Delta L$	- produljenje epruvete, [mm]
$\Delta L_u$	- produljenje nakon kidanja epruvete, [mm]
$\Delta \chi$	- inkrement zakrivljenosti, [m <sup>-1</sup> ]
$\varepsilon$	- relativna deformacija
$\varepsilon_{Atr}$	- plastična ili trajna deformacija
$\varepsilon_m$	- deformacija pri najvećem opterećenju
$\varepsilon_u$	- istežanje nakon kidanja; istežljivost [%]
$\varepsilon_Y$	- deformacija popuštanja
$\sigma$	- naprezanje, [N/mm <sup>2</sup> ]
$\sigma_C$	- kritično naprezanje, [N/mm <sup>2</sup> ]
$\sigma_E$	- Eulerovo naprezanje štapnog izvijanja, [N/mm <sup>2</sup> ]
$\tau_{th}$	- teoretsko smično naprezanje, [N/mm <sup>2</sup> ]
$\tau_{stv}$	- eksperimentalno utvrđeno smično naprezanje, [N/mm <sup>2</sup> ]

*Izjavljujem da sam u cjelosti samostalno izradio diplomski rad.*

# 1 Uvod

Proračun čvrstoće je najvažniji zadatak prilikom projektiranja broda. Taj problem nije jednostavno riješiti zbog iznimne kompleksnosti različitih utjecaja. Projektanti se koriste raznim metodama pojednostavljenja kako bi se približili stvarnom rješenju. U tim procesima se koriste različitim faktorima sigurnosti kako bi uzeli u obzir sve utjecaje koje nije moguće jasno sagledati. Pojednostavljeno gledano, čvrstoća bilo koje konstrukcije, pa tako i brodske, usljed opterećenjima kojima je izložena ovisi o geometriji i topologiji strukturnih elemenata te ugrađenom materijalu. Određivanje opterećenja brodske konstrukcije je, sam po sebi, složen problem jer se radi o različitim uvjetima eksploatacije broda kao tehničkog proizvoda. Brod u svom radnom vjeku opterećen je različito zbog raznih režima plovidbe, načina krcanja, oštećenja itd. Opterećenja mogu biti statička i dinamička. Kako opterećenja nisu jednoznačna u zadnje vrijeme ih se razmatra i uzima u proračun koristeći razne statistike. Geometrija strukturnih elemenata se razvila s vremenom, bazirana pretežno na iskustvu prijašnjih konstrukcija te implementirajući znanstvene spoznaje. U radu su prikazane teoretske i praktične metode proračuna čvrstoće broda.

Proračun čvrstoće temelji se na nominalnim vrijednostima mehaničkih svojstava materijala. To bi značilo da je svaki konstrukcijski dio homogen; potpuno jednake kristalne strukture i istog kemijskog sastava. U stvarnosti to nije slučaj i postoje razlike među materijalima istih nominalnih vrijednosti. Uzroci razlika se dijele u dvije grupe. Prva, razlike zbog tehnologije izrade, kao što su: nehomogenost sirovine, različiti okolišni uvjeti proizvodnje, sam tehnološki proces itd. Drugu grupu razlika čine utjecaji prilikom obrađivanja materijala: inicijalne pukotine, unos topline, inicijalne deformacije itd. Sve ove razlike se, kao i opterećenja, mogu statistički opisati kako bi se dobila potpunija slika o stvarno ugrađenom materijalu.

U ovom radu je provedeno testiranje običnog brodograđevnog čelika, oznake „A“ („mild steel“) po *Bureau Veritas*-u, statičkim vlačnim pokusom. Prvenstveno se nastojalo utvrditi postoji li razlika između nominalne i stvarne vrijednosti rastezne i vlačne čvrstoće. U [1] je dan sažetak dosadašnjih istraživanja na ovom području. Navodi se kako statistika, uz veliki broj istraživanja, nije dovoljno sistematizirana zbog nepostojanja standarda istraživanja među različitim institucijama koje su provodile istraživanja. U dosadašnjim razmatranjima se pretpostavljalo da je srednja stvarna vrijednost granice razvlačenja veća od nominalne za 5 – 15 %, a da lognormalna razdioba dobro opisuje rasipanje rezultata oko ove vrijednosti.

Istraživanje [1] provedeno na čelicima iz pet modernih svjetskih čeličana je pokazalo da je srednja granica razvlačenja običnog brodograđevnog čelika veća za 23 - 29 %.



## 2 Postupak ispitivanja materijala

### 2.1 Općenito o mehaničkim svojstvima materijala

Eksploatacijske karakteristike nekog proizvoda su pored cijene njegove izrade, te trajnosti, osnovni pokazatelj uspješnosti proizvoda na tržištu.

Osnovna grupa svojstava koja zajedno s nekim ostalim svojstvima čine eksploatacijska svojstva su mehanička svojstva proizvoda odnosno mehanička svojstva materijala od kojih je načinjen. Prilikom kreiranja proizvoda pri izboru materijala posebno mjesto zauzima skupina mehaničkih svojstava koja treba sagledavati ne samo s gledišta eksploatacije nego i s gledišta izradbe proizvoda.

Svojstva materijala općenito, pa tako i mehanička svojstva isključivo su posljedica strukturnog stanja materijala.

Strukturno stanje nekog materijala dobiva se obradom materijala određenog (kemijskog) sastava određenim tehnološkim postupcima. Tako se izborom određenog materijala i odgovarajućeg tehnološkog procesa postiže ciljano strukturno stanje koje će dati željena svojstva pa tako i mehanička svojstva.

Poznavanjem korelacije strukturno stanje - mehanička svojstva moguće je unaprijed proračunati mehanička svojstva. To, nažalost, vrijedi samo za idealnu tvar. Naime, u realnom materijalu prisutne su različite nepravilnosti u strukturi koje onemogućavaju takav proračun. Nepravilnosti kristalne građe, nulte, prve, druge i treće dimenzije bitno utječu na smanjenje mehaničkih svojstava realnog materijala u odnosu na idealnu tvar. Tako, na primjer teoretsko smično naprezanje potrebno za posmicanje kristalnih ravnina kod idealnog kristala  $\alpha$ -Fe iznosi :

$$\tau_{th} \approx 8400 \text{ N/mm}^2$$

dok ta vrijednost eksperimentalno utvrđena iznosi :

$$\tau_{stv} \approx 10 \text{ N/mm}^2.$$

Razlog tako velikom smanjenju u odnosu na teoretsku veličinu su prvenstveno prisutne dislokacije u rešetci željeznih kristala.

Zbog svih nepravilnosti prisutnih kod realnih materijala, koje je nemoguće obuhvatiti proračunom, mehanička se svojstva mogu utvrditi isključivo eksperimentalnim putem. Zbog

toga je na području ispitivanja mehaničkih svojstava materijala razvijena različita laboratorijska oprema. Naime, pri takvim ispitivanjima često se nastoje imitirati uvjeti u kakvim će određeni materijal biti opterećen tokom eksploatacije. Ispitivanje mehaničkih svojstava materijala provodi se na posebno pripremljenim uzorcima koje se nazivaju "epruvete" ili "ispitni uzorci", ali isto tako i na gotovim strojnim elementima ili čak sklopovima. U skladu s mogućim načinom opterećivanja tokom eksploatacije i epruvete se opterećuju na vlak, tlak, savijanje, uvijanje i smik. Nadalje, opterećenje može biti statičko - konstantno opterećenje tokom vremena ili mali prirast opterećenja u jedinici vremena, odnosno dinamičko ukoliko se njegov intenzitet mijenja tokom vremena. Ta promjena je najčešće periodičkog karaktera. Često se prilikom ispitivanja mehaničkih svojstava simuliraju i neki drugi eksploatacijski uvjeti kao npr. povišena ili snižena temperatura, agresivna atmosfera i sl. Osnovna mehanička svojstva određuju se na epruvetama napregnutim na vlak u uvjetima statičkog opterećenja. Takvo ispitivanje se naziva statički vlačni pokus.

### **2.1.1 Mehanička svojstva brodograđevnog čelika**

Za običan brodograđevni čelik se može koristiti i oznaka MS (eng: mild steel). Brodograđevni čelik normalne čvrstoće je čelik za konstrukciju trupa s minimalnom nominalnom granicom razvlačenja (eng: yield point) od  $R_e^h = 235 \text{ N/mm}^2$ , a rastezna čvrstoća (eng: tensile strength) od  $R_m = 400$  do  $490 \text{ N/mm}^2$ .

Čelici normalne i povišene čvrstoće jesu zavarljivi čelici koji se primjenjuju kao toplo valjani limovi, široke trake, šuplji i puni profili i namjenjeni su poglavito za izradu broskog trupa. Ovi čelici koriste se prvenstveno za dijelove čija debljina ne prelazi 50 mm. Propisana minimalna istezljivost od 22% odnosi se na veće debljine lima ili trake (40 – 50 mm), dok su za manje debljine minimalne vrijednosti istezljivosti posebno propisane.

## 2.2 Ispitivanje mehaničkih svojstava materijala

Uzorak čine proizvodi (npr. limovi ili cijevi) odabrani za određene ispitne količine ili ispitne skupine, sa svrhom da se iz njega izrade epruvete za ispitivanje.

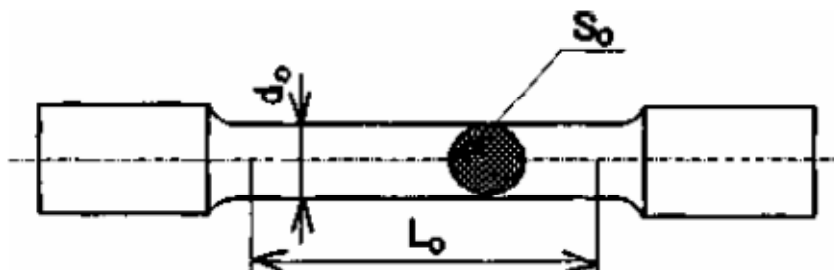
Ispitna količina/ispitna skupina je dio isporučene količine na koju se odnose rezultati ispitivanja. Pojam se može primjeniti npr. na specifični broj proizvoda istih dimenzija, proizvoda različitih dimenzija proizvedenih od jedne taline, ili valjane duljine materijala.

Epruveta za ispitivanje je komad uzet iz uzorka za ispitivanje, koji u obrađenom ili neobrađenom stanju ima propisane dimenzije koji podliježe propisanom ispitivanju.

Svi proizvodi podliježu ispitivanju rastezanjem, kod limova, toplo valjanih traka i širokih traka širine  $\geq 600\text{mm}$  epruvete se uzimaju poprečno na smjer savijanja. Za sve ostale vrste proizvoda epruvete se uzimaju poprečno na smjer valjanja ili paralelno sa smjerom valjanja.

### 2.2.1 Statički vlačni pokus

Iz materijala koji se želi ispitati izrezuje se uzorak propisanog oblika i dimenzija - epruveta ili ispitni uzorak. Najčešće je to (ovisno o obliku poluproizvoda) probni štap cilindričnog oblika, kod kojega su njegov promjer i mjerna duljina u određenom razmjeru. Na slici 2-1. prikazana je epruveta okruglog presjeka.



Slika 2-1 Epruveta okruglog presjeka

Veličine koje karakteriziraju dimenzije epruvete su slijedeće:

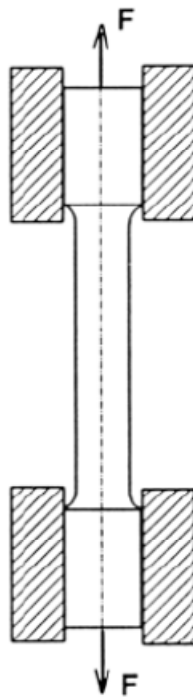
$d_0$  - početni promjer epruvete, mm

$L_0$  - početna mjerna duljina epruvete, mm

$S_0$  - početna površina presjeka epruvete:

$$S_0 = \frac{d_0^2 \cdot \pi}{4}, \quad [\text{mm}^2]$$

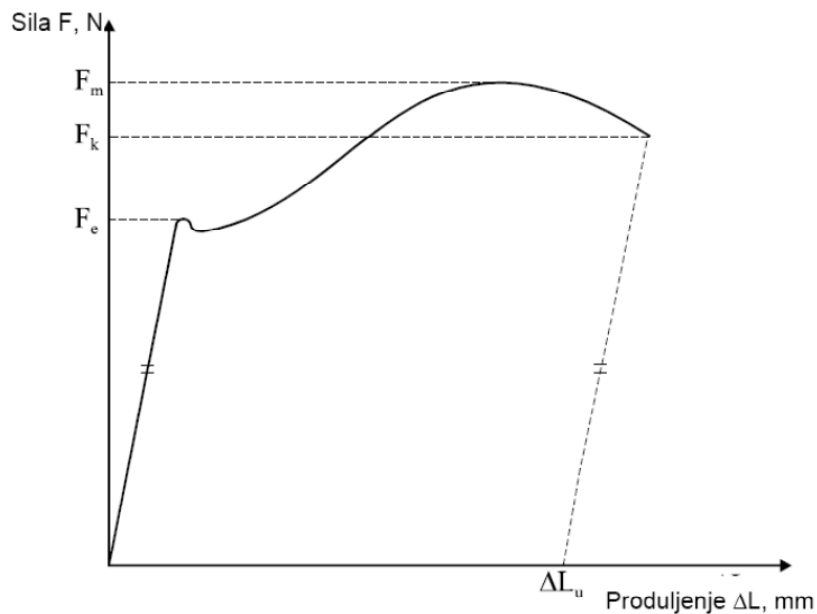
Epruveta se na mjestima zadebljanja ("glava") učvrsti u čeljusti kidalice odnosno stroja na kojem se provodi statičko vlačno ispitivanje (slika 2-2).



Slika 2-2 Način opterećivanja epruvete pri statičkom vlačnom pokusu

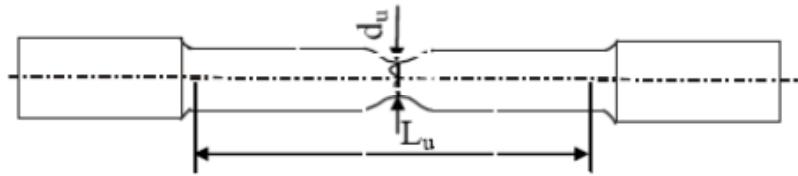
Epruveta se opterećuje vlačnom silom. Prirast sile pri statičkom vlačnom pokusu u jedinici vremena mora biti takav da prirast proizvedenog naprezanja u epruveti bude  $\leq 10$  N/mm<sup>2</sup> u sekundi. Za takvo sporo opterećivanje najprikladniji je hidraulični pogon kidalice, a pri takovom hidrauličkom sustavu moguće je u svakom trenu rasteretiti epruvetu. Iznos sile kojom je opterećena epruveta iskazan je na skali kidalice u njutnima [N] ili kilonjutnima [kN].

Budući da u svakom tijelu opterećenje odnosno proizvedeno naprezanje izaziva deformaciju, tako će se i pri statičkom vlačnom pokusu epruveta produljivati. Stoga se pri statičkom vlačnom ispitivanju pored vrijednosti sile prati i produljenje epruvete. Na kidalici se na pisaču za vrijeme statičkog vlačnog pokusa crta dijagram sila-produljenje,  $F-\Delta L$ , koji se naziva i dijagramom kidanja. Produljenje  $\Delta L$ , u milimetrima [mm] predstavlja povećanje razmaka  $L_0$  koji je naznačen na epruveti prije ispitivanja. Na slici 2-3 nacrtan je dijagram kidanja  $F - \Delta L$  za epruvetu iz mekog konstrukcijskog čelika.



Slika 2-3 Dijagram kidanja za "meki" konstrukcijski čelik

U prvom dijelu dijagrama  $F-\Delta L$  linearna je ovisnost sile i produljenja, što znači da istim prirastima sile odgovaraju i jednaka produljenja. Takva zakonitost vrijedi sve do vrijednosti sile  $F_e$  koja se naziva silom tečenja (razvlačenja). Nakon dostizanja te sile ispitni uzorak se nastavlja produljivati uz čak i mali pad opterećenja. Za daljnji porast produljenja potreban je opet porast sile. Međutim u tom dijelu statičkog vlačnog ispitivanja više ne postoji linearna ovisnost između povećanja sile i produljenja. Opterećenje se povećava sve do dostizanja maksimalne sile  $F_m$ , nakon koje se epruveta nastavlja produljivati uz sve manju i manju silu. Konačno, pri vrijednosti sile  $F_k$  dolazi do loma (pucanja) epruvete. Sastavljanjem puknutog ispitnog uzorka, te mjerenjem razmaka točaka koji je prije ispitivanja iznosio  $L_0$  dobije se konačna mjerna duljina  $L_u$  (slika 2-4).



Slika 2-4 Skica epruvete okruglog presjeka nakon loma

Produljenje nakon kidanja  $\Delta L_u$ , tada iznosi:  $\Delta L_u = L_u - L_0$ . Ta vrijednost naznačena je također na apscisi dijagrama  $F - \Delta L$ , a dobiva se, ako se iz konačne točke dijagrama povuče paralela s linearnim dijelom dijagrama i nađe presjecište tog pravca i osi apscisa (slika 2-3). Iznosi sile pri statičkom vlačnom ispitivanju ne daju uvid u ponašanje materijala ukoliko se u obzir ne uzme površina poprečnog presjeka epruvete. Stoga se uvodi pojam naprezanja, tj. sile po jedinici površine prema izrazu :

$$\sigma = \frac{F}{S_0}, \quad [\text{N/mm}^2],$$

gdje su:

$F$  - sila, [N]

$S_0$  - površina početnog presjeka, [mm<sup>2</sup>].

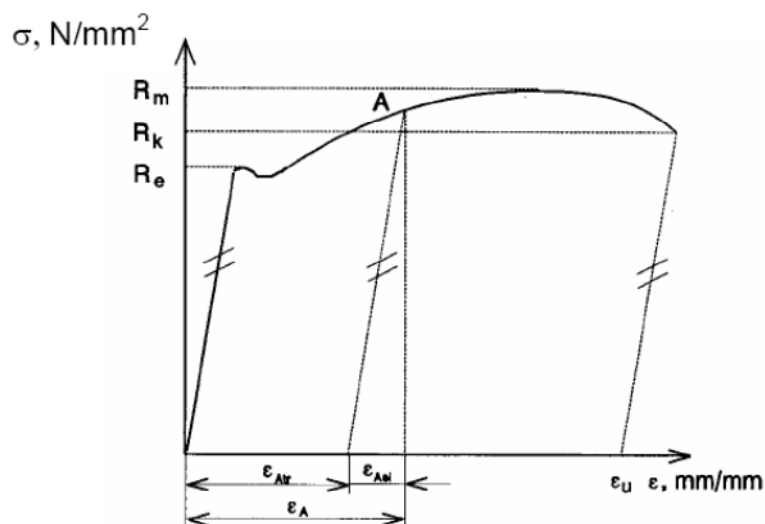
Ukoliko se i vrijednosti produljenja  $\Delta L$  svedu na početnu mjernu duljinu dobiva se pojam istežanja ili relativnog produljenja:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}, \quad [\text{mm/mm}].$$

Istežanje se može izraziti i u postocima :

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100, \quad [\%].$$

Na taj se način iz dijagrama sila - produljenje dobiva dijagram naprezanje - istežanje  $\sigma - \varepsilon$  (slika 2-5).



Slika 2-5 Dijagram naprezanje-istezanje za "meki" konstrukcijski čelik

Dijagram  $\sigma$ - $\epsilon$  je kvalitativno jednak dijagramu  $F$ - $\Delta L$  budući da se svi iznosi sile dijele s istom vrijednošću ( $S_0$ ), a sve vrijednosti produljenja s vrijednošću  $L_0$ . Zbog toga i dijagram  $\sigma$ - $\epsilon$  počinje iz ishodišta pravcem koji se naziva Hooke-ovim pravcem. U tom području naprezanja materijal je deformiran isključivo elastično što znači da u slučaju rasterećenja ( $\sigma=0$ ) iznos trajne deformacije je nula, odnosno razmak mjernih točaka na epruveti jednak je  $L_0$ . Nakon što naprezanje u materijalu (u ovom slučaju "mekom" čeliku) dostigne vrijednost  $R_e$  - granice razvlačenja, on počne teći bez povećanja naprezanja. Granica razvlačenja je po definiciji jednaka :

$$R_e = \frac{F_0}{S_0}, \quad [\text{N/mm}^2].$$

Granica razvlačenja je ono naprezanje kod kojeg materijal počinje teći bez povećanja naprezanja. Nadalje materijal nakon prijedene granice razvlačenja ulazi u područje plastičnih ili trajnih deformacija. Ako se u točki A (slika 2-5) rastereti epruveta ( $\sigma=0$ ) u njoj će ostati prisutna plastična ili trajna deformacija  $\epsilon_{Atr}$ . To znači da će razmak mjernih točaka  $L_0$  biti uvećan za iznos  $\Delta L_A$ , pa je:

$$\epsilon_{Atr} = \frac{\Delta L_A}{L_0}, \quad [\text{mm/mm}].$$

Svaka se deformacija u materijalu (epruveti) nakon prijeđene vrijednosti  $R_e$  sastoji od elastične deformacije  $\varepsilon_{el}$  koja izčežava sa rasterećenjem te od plastične ili trajne deformacije  $\varepsilon_{tr}$  koja ostaje trajno prisutna u materijalu. U dijagramu  $\sigma$ - $\varepsilon$  se iznos trajne deformacije dobije tako da se iz željene točke na dijagramu povuče paralela s Hooke-ovim pravcem i nađe presjecište s osi apscisa. Naprezanje kod maksimalne sile naziva se vlačnom ili rasteznom čvrstoćom i jednako je:

$$R_m = \frac{F_m}{S_0}, \quad [\text{N/mm}^2].$$

Nakon dostignute vrijednosti  $R_m$ , deformacija epruvete nije više jednolika po čitavoj njenoj duljini već se lokalizira na jednom mjestu, nastaje tzv. vrat. Naprezanje kod kojeg epruveta puca naziva se konačnim naprezanjem i jednako je:

$$R_k = \frac{F_k}{S_0}, \quad [\text{N/mm}^2].$$

Vrijednost istežanja nakon kidanja određuje se prema izrazu:

$$\varepsilon_u = \frac{L_u - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L_u}{L_0}, \quad [\text{mm/mm}].$$

Dobiva se u dijagramu  $\sigma$ - $\varepsilon$  na isti način kao i vrijednost  $\Delta L_u$ , u dijagramu  $F$ - $\Delta L$  povlačenjem paralele iz konačne točke dijagrama s Hooke-ovim pravcem i nalaženjem presjecišta tog pravca s osi apscisa (slika 2-5). Vrijednost  $\varepsilon_u$  izražena u postocima naziva se istežljivost.

Početni dio dijagrama  $\sigma$ - $\varepsilon$  je njegov linearni dio. Taj pravac je karakteriziran izrazom:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \quad [\text{N/mm}^2],$$

koji se naziva i "Hooke-ovim zakonom" i vrijedi samo u elastičnom području. Konstanta  $E$  se naziva modulom elastičnosti ili Young-ovim modulom te predstavlja svojstvo materijala ovisno direktno o čvrstoći veze između atoma u kristalnoj rešetci ili amorfnoj strukturi. Što je ta veza jača veći je i modul elastičnosti. Zbog toga najveći modul elastičnosti ima dijamantna struktura. "Hooke-ov zakon" se može napisati i na drugi način:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}, \quad [\text{N/mm}^2].$$

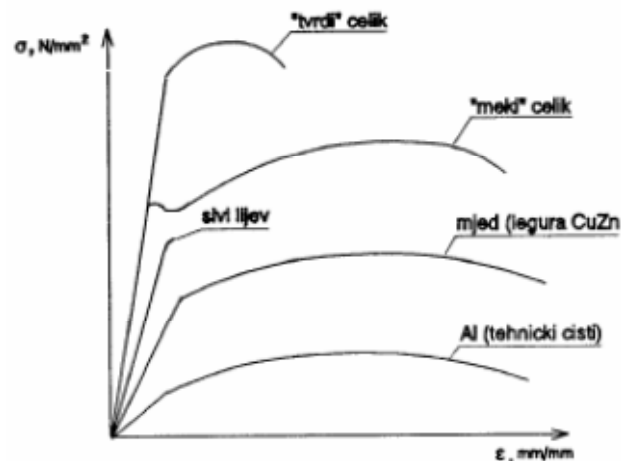


U dijagramu  $\sigma$ - $\epsilon$ , veličina  $E$  predstavlja koeficijent smjera Hooke-ovog pravca. Vrijednosti modula elastičnosti za konstrukcijske materijale su navedene u tablici 2-1.

Tablica 2-1 Iznosi modula elastičnosti za neke metalne materijale i njihove legure

materijal	$E$ [N/mm <sup>2</sup> ].
čelik	210 000
sivi ljev	110 000 – 160 000
Cu i Cu legure	105 000
Al i Al legure	70 000

Posljedica ovakvih vrijednosti E-modula biti će i različiti nagibi Hooke-ovog pravca u dijagramima  $\sigma$ - $\epsilon$  za navedene materijale. Dijagram na slici 2-6 pokazuje kvalitativne dijagrame  $\sigma$ - $\epsilon$  za ove materijale.



Slika 2-6 "Kvalitativni" dijagrami  $\sigma$ - $\epsilon$  za neke metalne konstrukcijske materijale

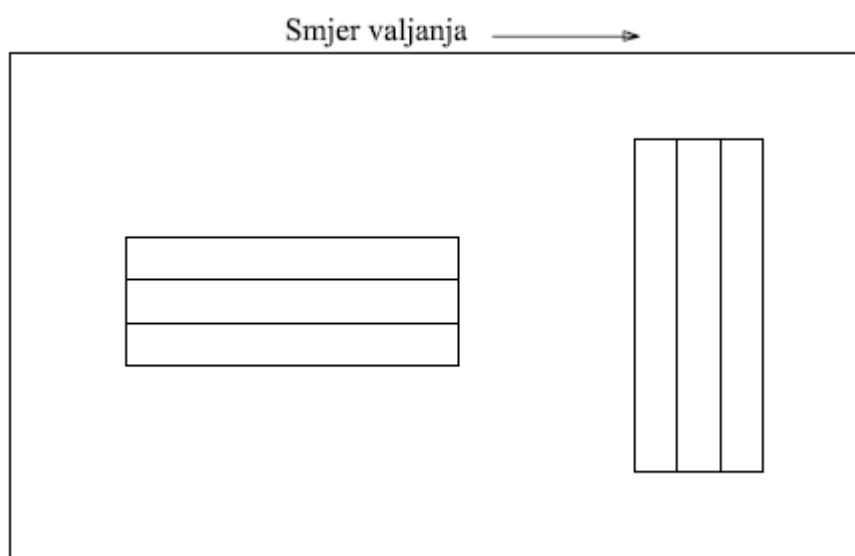
### 3 Provedba eksperimenta

Eksperiment je prvenstveno proveden u svrhu provjere nominalnih vrijednosti mehaničkih svojstava konstruktivnih elemenata, te utvrđivanja eventualnih odstupanja. Zbog toga je bilo potrebno ispitati uzorke ugrađenih limova i profila. Zatim se željelo dobiti uvid u ovisnost mehaničkih svojstava i smjera valjanja prilikom proizvodnje. U uobičajenoj brodograđevnoj praksi limovi i profili, koji sudjeluju u uzdužnoj čvrstoći, se postavljaju tako da se podudara smjer valjanja sa uzdužnom osi broda.

Dakle, ispitivanja su provedena na uzorku koji se sastojao od četiri grupa epruveta prema klasifikaciji prikazanoj u tablici 3-1.

Tablica 3-1 Grupiranje prema smjeru izrezivanja epruveta iz ispitnog lima/profila u odnosu na smjer valjanja

Grupa	Smjer izrezivanja epruvete	Dio	Šifra
E1	U smjeru valjanja	Profil	Profil uzdužno
E2	Poprečno na smjer valjanja	Profil	Profil poprečno
E3	U smjeru valjanja	Lim	Lim uzdužno
E4	Poprečno na smjer valjanja	Lim	Lim poprečno



Slika 3-1 Skica izrezivanja epruveta iz ispitnog lima/profila u odnosu na smjer valjanja

Svaka grupa se sastojala od tri epruvete. Epruvete su izrezivane vodenim mlazom kako bi se izbjegao unos topline koja bi utjecala na strukturu materijala, a time i na mehanička svojstva.

### 3.1 Ispitne epruvete

Prvenstveno treba primjenjivati kratke proporcionalne epruvete, s početnom mjernom duljinom od  $L_0 = 5,65 \cdot \sqrt{S_0}$ , jer se zahtjevi za veličinom produljenja u pravilima Registra odnose na tu mjernu duljinu. Preporučene vrijednosti proporcionalnih okruglih epruveta prema Registru dane su u tablici 3-2.

Tablica 3-2 Preporučene dimenzije epruveta prema Registru

Veličina	$d_0$	$L_0$	$L_c$	$r$
Dimenzija [mm]	14	70	85	10

Pošto ispitni uređaj na kojem će se vršiti ispitivanja može postići maksimalnu silu od 50 kN smanjen je promjer epruvete, prema zahtjevima Registra. U tablici 3-3 dane su dimenzije izrađenih epruveta za ispitivanje prema DIN-u.

Tablica 3-3 Dimenzije za izradu epruveta prema DIN-u

Veličina	$d_0$	$d_1$	$L_0$	$L_c$	$L_u$	$r$	h
Dimenzija[mm]	8	10	40	48	115	10	30

Prije početka eksperimenta epruvete su izmjerene te su određene sve dimenzije relevantne za ispitivanje statičkim vlačnim pokusom. Pomičnim mjerilom su određene širine vrata i debljine epruveta jer je njima definirana površina poprečnog presjeka epruvete koja je uz silu opterećenja najbitnija veličina za određivanje naprezanja. U tablici 3-4 dani su promjeri i površine poprečnih presjeka epruveta. Promjeri vrata epruvete na svakoj epruveti

su mjereni na tri različita mjesta te je za proračun poprečnog presjeka uzeta srednja vrijednost. Epruvete korištene za statički vlačni pokus prikazane su na slici 3-2.

Tablica 3-4 Promjeri i površine poprečnih presjeka epruveta

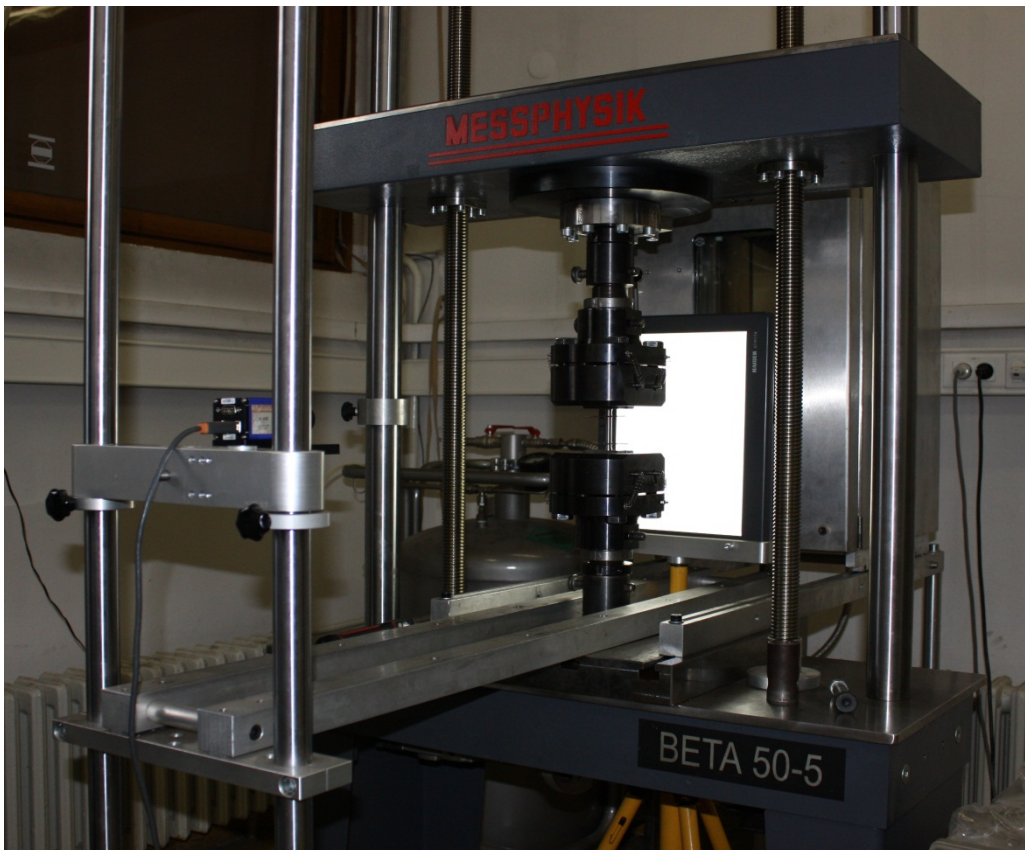
	Epruveta	Promjer [mm]				Površina [mm <sup>2</sup> ]
		gore	sredina	dolje	srednji	
Profil uzdužno	E1-1	8.00	8.01	8.00	8.00	50.28
	E1-2	8.00	8.01	7.99	8.00	50.24
	E1-3	7.99	7.99	7.97	7.98	50.03
Profil poprečno	E2-1	7.98	7.98	7.97	7.98	49.95
	E2-2	8.00	8.01	8.00	8.00	50.28
	E2-3	7.99	8.00	8.01	8.00	50.24
Lim uzdužno	E3-1	8.00	7.99	8.00	8.00	50.2
	E3-2	8.04	8.01	7.98	8.01	50.37
	E3-3	7.98	7.91	7.93	7.94	49.49
Lim poprečno	E4-1	8.00	8.01	8.00	8.00	50.28
	E4-2	8.01	8.01	8.01	8.01	50.37
	E4-3	8.00	7.99	8.01	8.00	50.24



Slika 3-2 Epruvete korištene za provedbu eksperimenta

## 3.2 Ispitni uređaji i oprema

Ispitivanja su provedena na statičkoj kidalici Messphysik Beta 50-5 s maksimalnom silom opterećenja od 50kN (Slika 3-3). Ispitivanje se provodi brzinom od 5 mm/min. Pomak čeljusti kidalice se ostvaruje pomoću dva vretena. Prije početka ispitivanja u programskom sučelju kidalice podešavaju se i unose svi potrebni parametri poput brzine ispitivanja, poprečnog presjeka epruvete, vrste ispitivanja. Ispitivanje je provedeno na sobnoj temperaturi od 23°C .

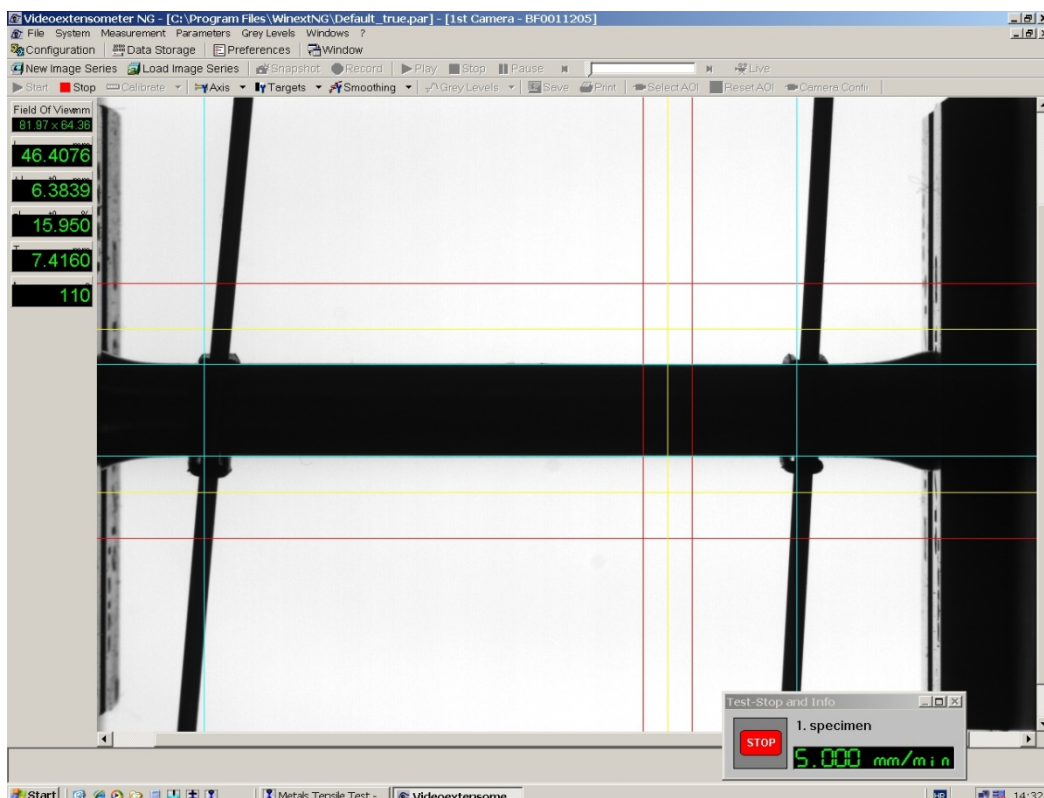


Slika 3-3      Statička kidalica Messphysik Beta 50-5

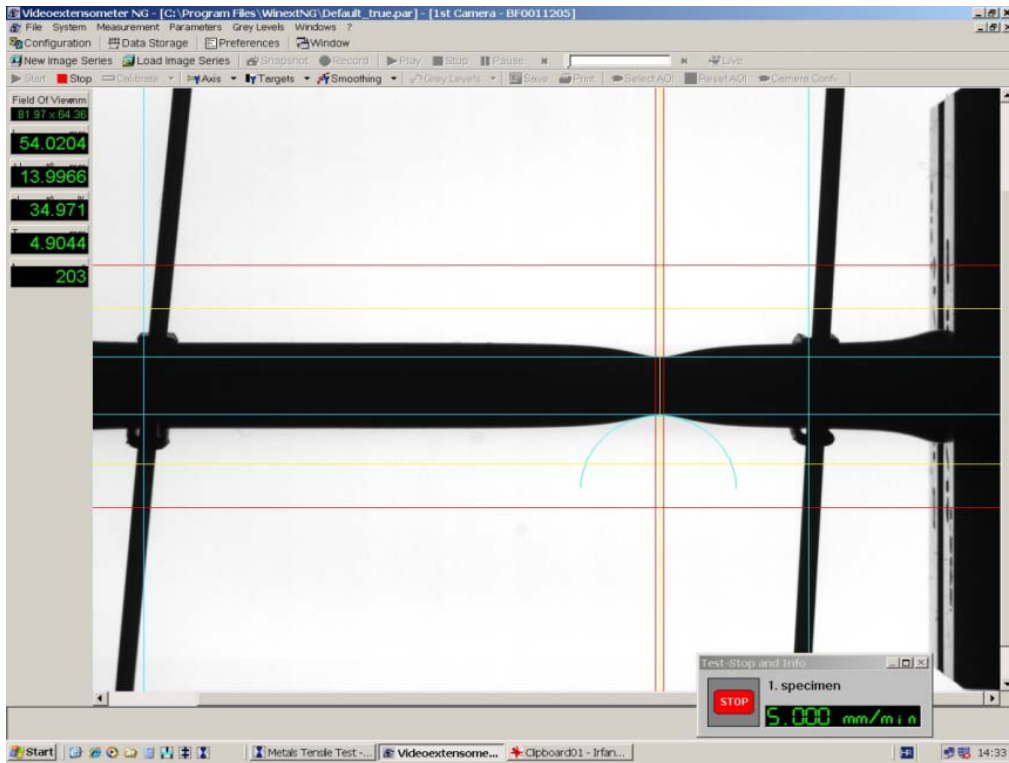
### 3.2.1 Video ekstenzometar

Pri određivanju mehaničkih svojstava materijala potrebno je koristiti precizne mjerne uređaje i instrumente. Naprezanje i istezanje su dva glavna parametra iz kojih se računa većina mehaničkih svojstava tijekom jednog jednoosnog testiranja. Naprezanje je dobiveno namještanjem mjernog uzorka u čeljusti i opterećivanjem pomoću kalibrirane mjerne doze,

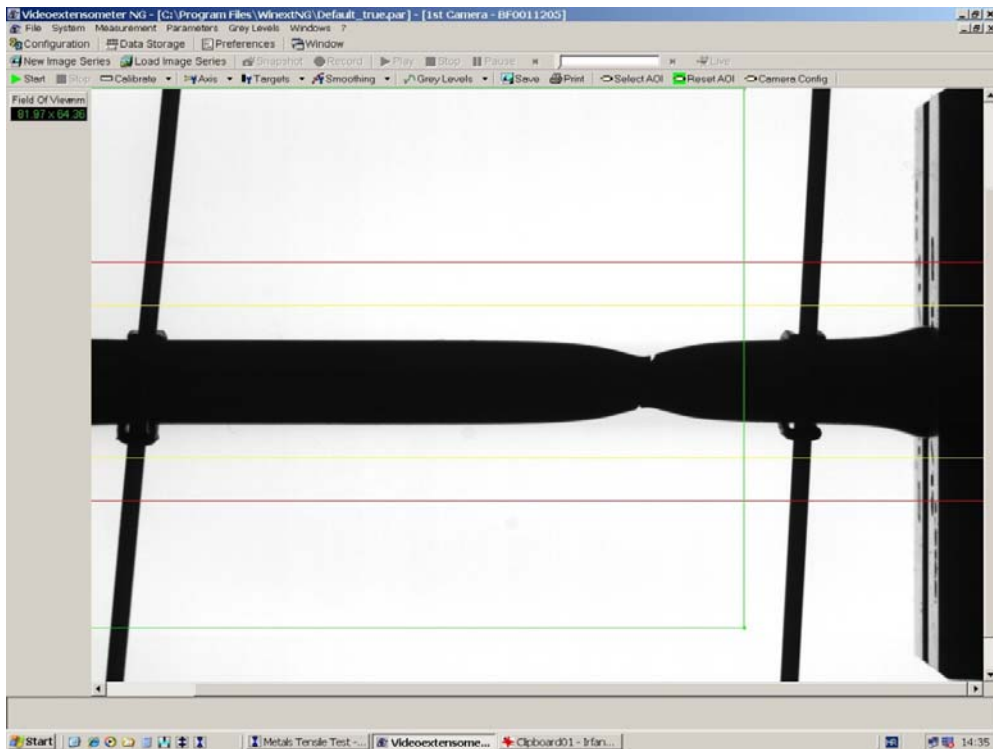
dok se istezanje mjeri pomoću ekstenzometra. Deformacija epruvete izračunava se iz mjerenja relativnog pomaka dviju odabranih točaka na epruveti. Postoji više vrsta ekstenzometara, od običnih elektrootpornih mjernih traka preko mehaničkih, zrcalnih i dr. od kojih svi imaju specifične prednosti i nedostatke. Razvojem digitalnih kamera visoke razlučivosti i brzog prijenosa podataka, u kombinaciji sa snažnim algoritmima za analizu slike, nastala je nova generacija ekstenzometara gdje se ističu dva osnovna tipa: videoekstenzometar (eng. videoextensometer) i laserski ekstenzometar (eng. laser speckle extensometer). U ovom ispitivanju deformacije materijala mjerene su videoekstenzometrom. To je optički mjerni uređaj koji pomoću jedne kamere "prati" deformacije epruvete. Na epruvete se postavljaju markeri prije nego se podvrgnu mjerenju videoekstenzometrom (Slika 3-7.). Istezanje se izračunava iz relativnog pomaka dviju odabranih točaka na epruvete. Program Videoextensometer NG obrađuje prikupljene podatke te navodi ekstenzometar da optički traži najuži presjek epruvete na temelju kojeg se kasnije i može generirati i stvarni dijagram naprezanje - istezanje. Na Slikama 3-4, 3-5, 3-6 prikazana su programska sučelja videoekstenzometra za različite trenutke ispitivanja



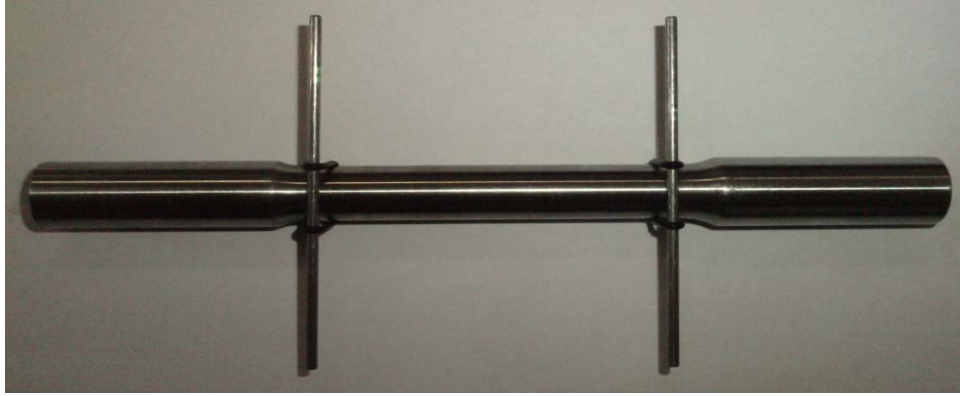
Slika 3-4 Programsko sučelje videoekstenzometra – početak mjerenja



Slika 3-5 Programsko sučelje videoekstenzometra – prikaz vrata epruvete



Slika 3-6 Programsko sučelje videoekstenzometra – prikaz loma epruvete



Slika 3-7 Markeri postavljeni na epruvetu

### 3.3 Prikaz i analiza rezultata mjerenja

U ovom poglavlju dani su rezultati ispitivanja statičkog vlačnog pokusa sa pripadajućim dijagramima, te usporedni dijagram različitih grupa uzoraka sa ciljem utvrđivanja ovisnosti mehaničkih svojstava o tehnologiji proizvodnje.

Uz ispitivanje dana je tablica u kojoj se nalaze dobivene vrijednosti traženih veličina, te će za navedeno ispitivanje biti izračunata i u tablici prikazana srednja vrijednost dobivenih traženih vrijednosti.

U tablicama su prikazane sljedeće veličine:

$d_0$  – početni promjer vrata epruvete

$S_0$  – početna površina poprečnog presjeka

$E$  – modul elastičnosti

$R_e^h$  - nominalna granica razvlačenja

$R_m$  – vlačna čvrstoća

$F_m$  - maksimalna sila

$\varepsilon_m$  – neproporcionalna relativna deformacija pri najvećem opterećenju

$\varepsilon_u$  – istezljivost



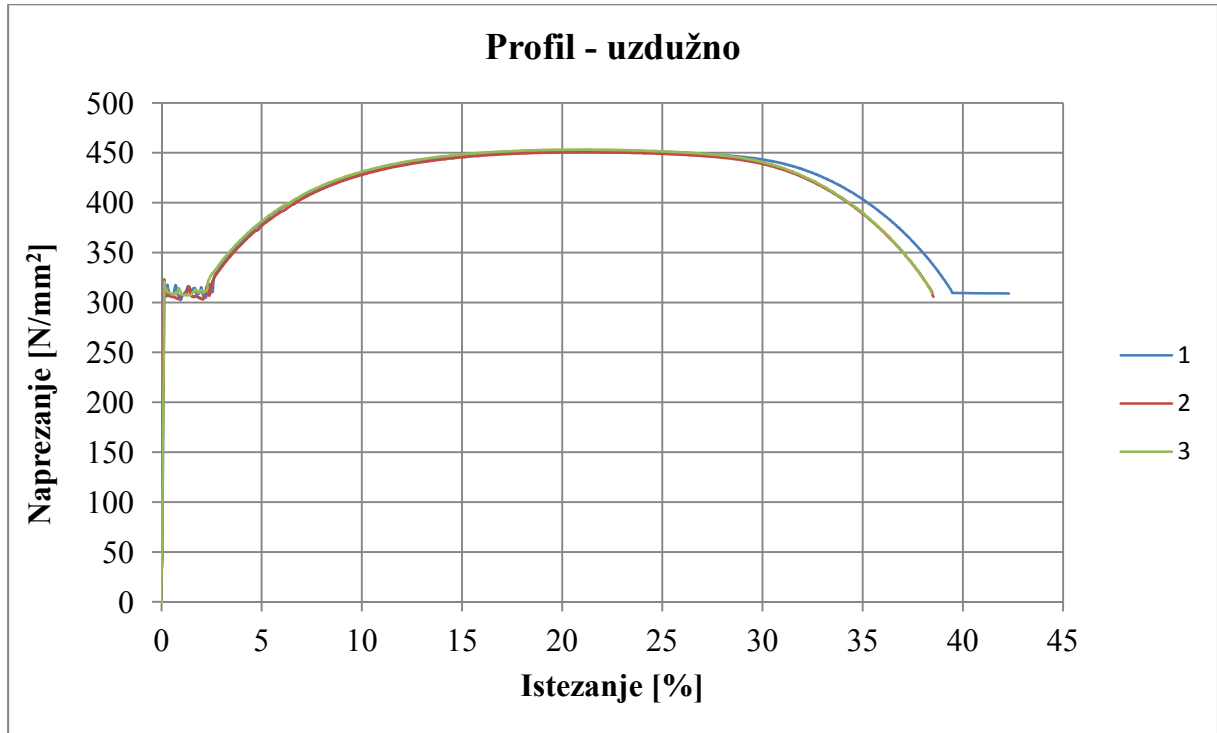
Tablica 3-5 Rezultati mjerenja dobiveni statičkim – vlačnim pokusom

Rezultati mjerenja									
	Epruveta	$d_0$ [mm]	$S_0$ [mm <sup>2</sup> ]	$E^*$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$R_e^h$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$F_m$ [N]	$\varepsilon_m$ [%]	$\varepsilon_u$ [%]
Profil uzdužno	E1-1	8.00	49.81	231	313	449	22542	21.04	42.16
	E1-2	8.00	49.86	214	320	447	22467	21.09	38.39
	E1-3	7.98	49.43	205	317	447	22407	21.25	38.40
	<b>Srednja vrijednost</b>	<b>8.00</b>	<b>49.70</b>	<b>217</b>	<b>317</b>	<b>447</b>	<b>22472</b>	<b>21.13</b>	<b>39.65</b>
Profil poprečno	E2-1 <sup>†</sup>	7.98	48.44	/	/	/	/	/	/
	E2-2	8.00	49.93	181	336	449	22578	20.76	34.92
	E2-3	7.99	49.76	225	322	449	22560	19.89	33.24
	<b>Srednja vrijednost</b>	<b>7.99</b>	<b>49.85</b>	<b>203</b>	<b>329</b>	<b>449</b>	<b>22569</b>	<b>20.33</b>	<b>34.08</b>
Lim uzdužno	E3-1	8.00	49.74	225	336	461	23154	20.71	37.21
	E3-2	8.04	50.09	209	343	467	23472	19.63	34.42
	E3-3	7.98	48.44	208	331	462	22887	20.01	35.21
	<b>Srednja vrijednost</b>	<b>8.01</b>	<b>49.42</b>	<b>214</b>	<b>337</b>	<b>463</b>	<b>23171</b>	<b>20.12</b>	<b>35.61</b>
Lim poprečno	E4-1	8.00	50.08	188	332	468	23537	21.08	37.61
	E4-2	8.01	50.28	207	343	468	23560	20.52	33.33
	E4-3	8.00	50.08	225	343	466	23406	19.55	33.75
	<b>Srednja vrijednost</b>	<b>8.00</b>	<b>50.15</b>	<b>206</b>	<b>339</b>	<b>467</b>	<b>23501</b>	<b>20.38</b>	<b>34.90</b>

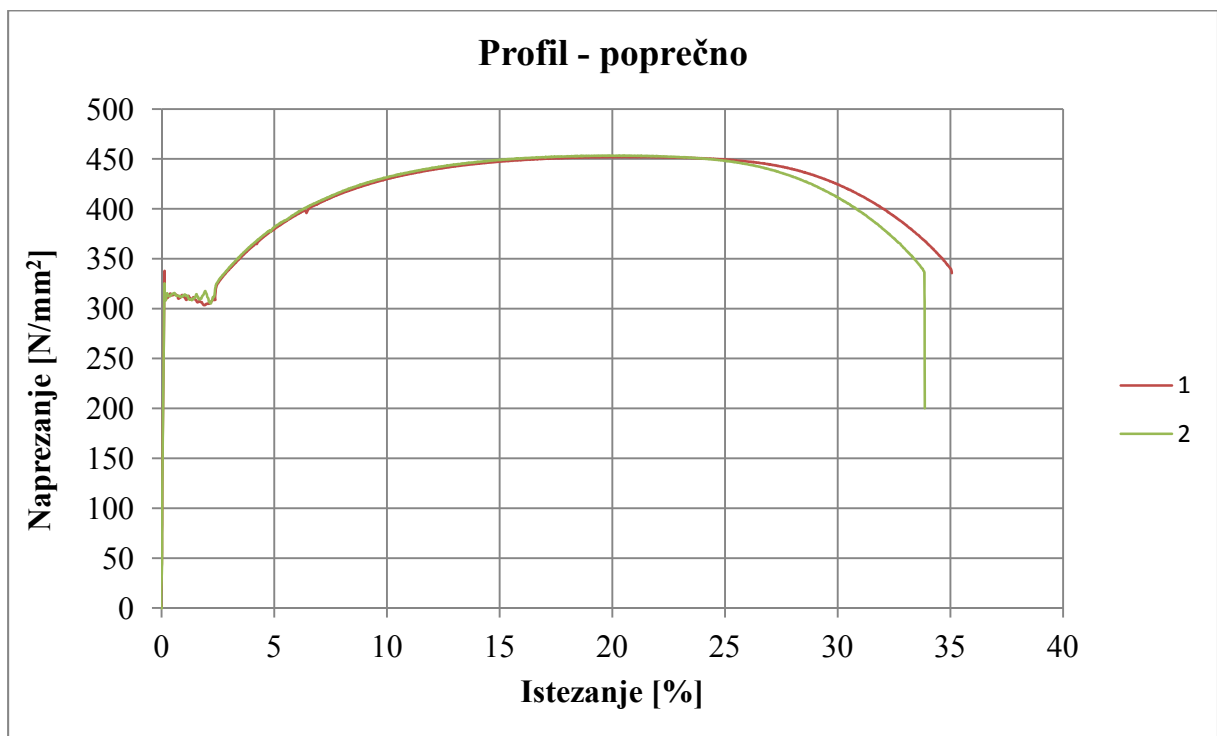
\* Iznosi modula elastičnosti ovise o nagibu regresijskog pravca koji aproksimira „linearno“ područje, tako da je i očekivano veće rasipanje dobivenih vrijednosti. Naime, računalni program kidalice provlači pravac kroz bilo koje dvije mjerne točke, koje je moguće i proizvoljno odabrati, ali se time unosi izvjesna pogreška.

† Epruveta nije ispitana jer je, prilikom nulovanja kidalice, bila izložena skokovitom opterećenju sve do plastične deformacije što je uzrokovalo očvrnuće.

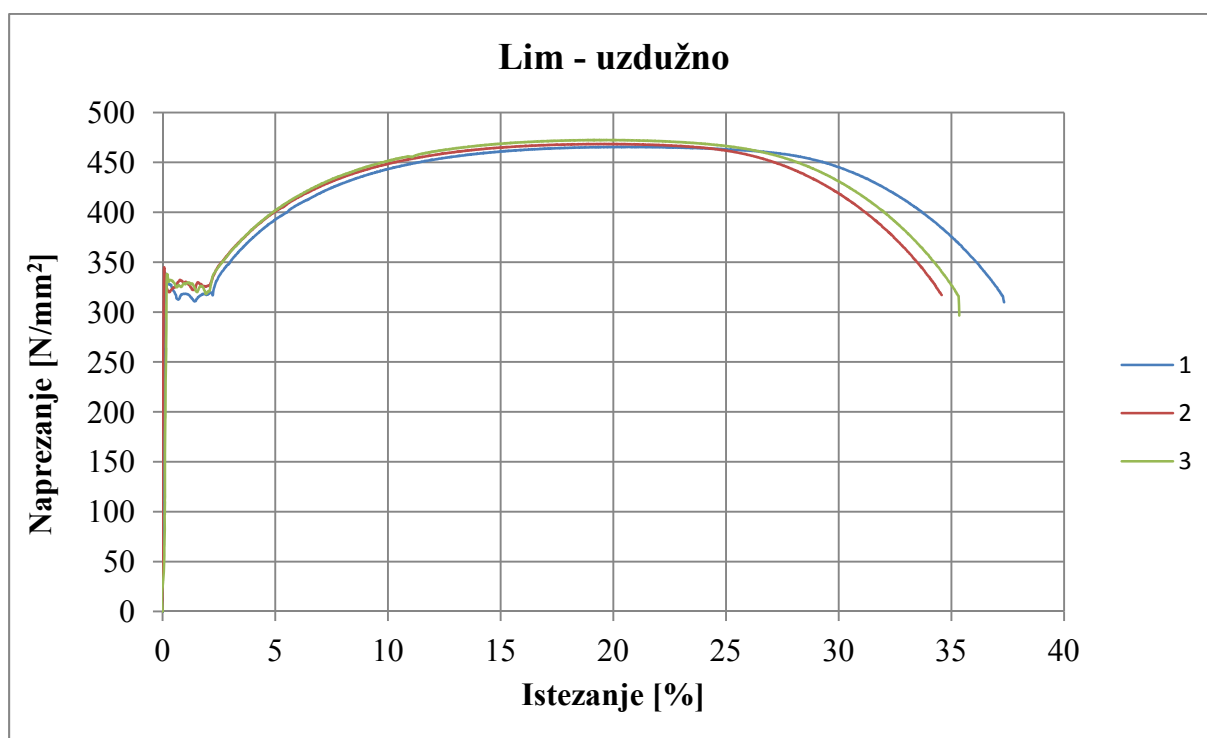
Rezultati ispitivanja prikazani su dijagramima „naprezanje – istezanje“, na kojima su preklapljeni rezultati ispitivanja za tri epruvete iz svake grupe uzoraka.



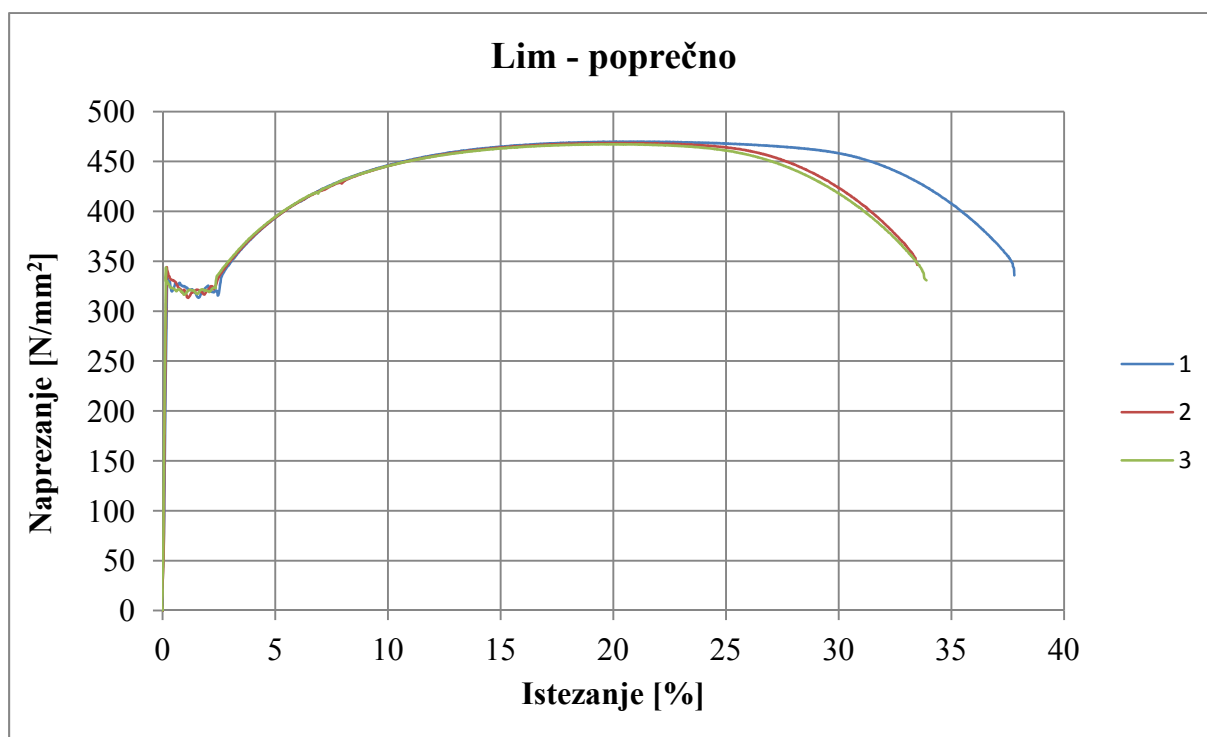
Slika 3-8 Dijagram naprezanje – istezanje za profil – uzdužno



Slika 3-9 Dijagram naprezanje – istežanje za profil - poprečno



Slika 3-10 Dijagram naprezanje – istežanje za lim – uzdužno



Slika 3-11 Dijagram naprezanje – istežanje za lim - poprečno

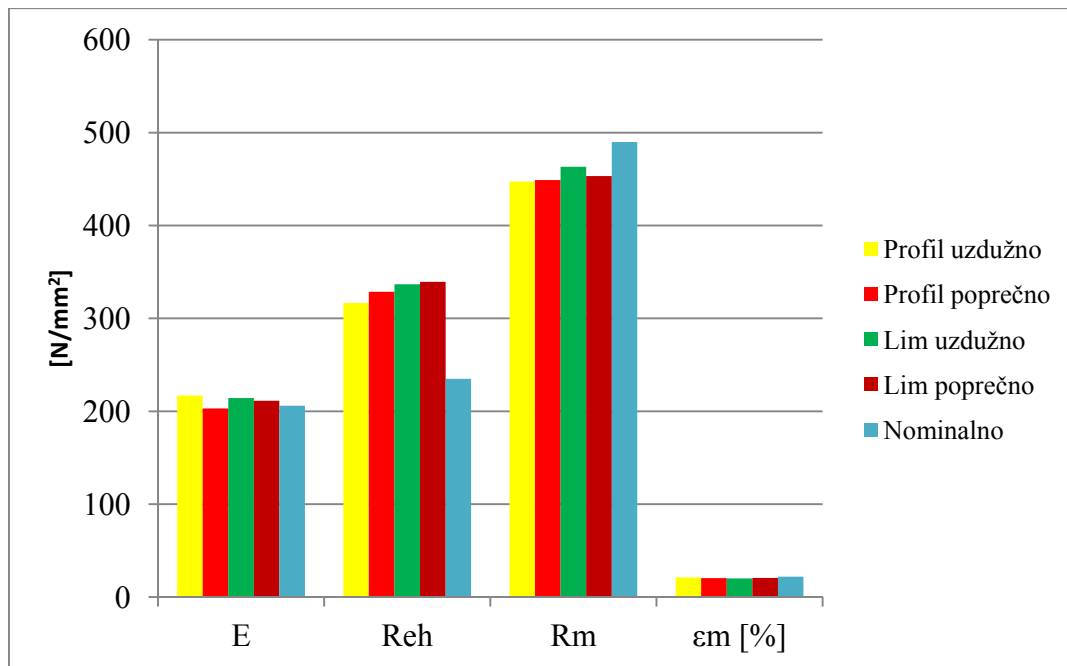
Grafovi prikazuju uobičajene krivulje naprezanje-istezanje što znači da je ispitivanje uspješno provedeno. Može se, općenito, uočiti konzistentnost ispitnih uzoraka, u pogledu mehaničkih svojstava, jer se krivulje dobro preklapaju. Veća odstupanja su u plastičnom području prilikom pucanja epruvete, a posljedica su strukturnih nesavršenosti prilikom izrade epruvete i početnih torzijiskih opterećenja, različitih za pojedina mjerenja, prilikom učvršćivanja epruvete u čeljusti kidalice.

### 3.3.1 Usporedba eksperimentalno dobivenih vrijednosti i nominalnih vrijednosti

Cilj ove usporedbe je potvrditi polaznu pretpostavku da čelici, u pravilu, imaju veću rasteznu čvrstoću od deklarirane. U tablici 3-6 su dani rezultati za sve grupe ispitnih uzoraka i nominalne vrijednosti. Na slici 3-12 je prikazana usporedba ovih vrijednosti.

Tablica 3-6 Kvantitativna usporedba eksperimentalno dobivenih vrijednosti i nominalnih vrijednosti

	$d_0$ [mm]	$S_0$ [mm <sup>2</sup> ]	$E$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$R_e^h$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$F_m$ [N]	$\varepsilon_m$ [%]	$\varepsilon_u$ [%]
Profil uzdužno	8.00	49.70	217	317	447	22472	21.13	39.65
Profil poprečno	7.99	49.85	203	329	449	22569	20.33	34.08
Lim uzdužno	8.01	49.42	214	337	463	23171	20.12	35.61
Lim poprečno	8.00	49.66	211	339	467	22737	20.52	36.45
Nominalno	/	/	206	235	400-490	/	22	/



Slika 3-12 Usporedni dijagram eksperimentalno dobivenih vrijednosti i nominalnih vrijednosti

Sve ispitne grupe imaju veću granicu razvlačenja od nominalne , a vlačna čvrstoća se nalazi unutar nominalnog raspona.

### 3.3.2 Usporedba različitih grupa uzoraka

1) Uspoređuju se posebno grupe uzorka dobivenih iz profila, a posebno grupe uzorka dobivenih iz lima. Ova usporedba se radi da bi se utvrdilo da li i koliko smjer valjanja utječe na mehanička svojstva materijala. Za potrebe ove usporedbe koristile su se srednje vrijednosti svih grupa.

Tablica 3-7 Usporedba grupa uzorka dobivenih iz profila

	$E$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$Re^h$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$F_m$ [N]	$\epsilon_m$ [%]	$\epsilon_u$ [%]
Profil uzdužno	217	317	447	22472	21.13	39.65
Profil poprečno	203	329	449	22569	20.33	34.08
%	106.9	96.3	99.7	99.6	103.9	116.3

Tablica 3-8 Usporedba grupa uzorka dobivenih iz lima

	$E$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$Re^h$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$F_m$ [N]	$\epsilon_m$ [%]	$\epsilon_u$ [%]
Lim uzdužno	214	337	463	23171	20.12	35.61
Lim poprečno	211	339	453	22737	20.52	36.45
%	101.3	99.2	102.2	101.9	98.0	97.7

Granica razvlačenja je veća kod uzorka poprečno na smjer valjanja, ali ova odstupanja nisu velika. Očekivala su se bolja svojstva u smjeru valjanja, ali razlike od svega par posto i s obzirom na uzorak od 3 epruvete nemože se reći da su svojstva u poprečnom smjeru bolja. Dakle, utjecaj smjera valjanja na mehanička svojstva je zanemariv.

2) Uspoređuju se međusobno grupe uzoraka profila i limova jednakih u odnosu na smjer valjanja. Cilj ove usporedbe je dobiti uvid u eventualna odstupanja svojstava zbog različite tehnologije proizvodnje ovih elemenata.

Tablica 3-9 Usporedba grupa uzorka dobivenih izrezivanjem u smjeru valjanja

	$E$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$Re^h$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$F_m$ [N]	$\varepsilon_m$ [%]	$\varepsilon_u$ [%]
Profil uzdužno	217	317	447	22472	21.13	39.65
Lim uzdužno	214	337	463	23171	20.12	35.61
%	101.3	94.0	96.6	97.0	105.0	111.3

Tablica 3-10 Usporedba grupa uzorka dobivenih izrezivanjem poprečno na smjer valjanja

	$E$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$Re^h$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$F_m$ [N]	$\varepsilon_m$ [%]	$\varepsilon_u$ [%]
Profil poprečno	203	329	449	22569	20.33	34.08
Lim poprečno	211	339	453	22737	20.52	36.45
%	96.0	96.9	99.1	99.3	99.0	93.5

U obje grupe granice razvlačenja su veće za limove što bi moglo upućivati na utjecaj tehnologije izrade. Međutim, odstupanja nisu značajna i s obzirom na mali uzorak zaključuje se da je ovaj utjecaj zanemariv.

## 4 Principi proračuna čvrstoće broda

### 4.1 Uzdužna čvrstoća broda

#### 4.1.1 Brod kao kutijasti nosač

Proračun čvrstoće obične grede je zbog poznatih i potvrđenih metoda proračuna daleko jednostavniji od proračuna čvrstoće broskog trupa čija je struktura vrlo složena te je rješavanje problema čvrstoće realne strukture vrlo teško ili nemoguće bez korištenja naprednih metoda poput metode konačnih elemenata (MKE, eng. FEM) koja koristi iznimnu snagu današnjih računala za obavljanje najsloženijih računskih operacija.

Kako bi se proračun uzdužne čvrstoće olakšao, tj. ubrzao, brodski se trup promatra kao idealna greda., tj. tankostijeni (eng. thin walled) kutijasti nosač (eng. box beam). To nosi mnoga pojednostavljenja, a pogreške u rezultatu su zanemarive ukoliko je odnos duljine broda prema visini i širini dosta velik te ako je nadgrađe male duljine ili smješteno po krmi što i je slučaj kod velikih trgovačkih brodova.

Da bi se brod promatrao kao kutijasti nosač, potrebne su određene pretpostavke:

1. Postoji samo jedna nezavisna varijabla, i to uzdužna koordinata. Opterećenja i pomaci imaju samo jednu vrijednost za određenu uzdužnu koordinatu.
2. Kutijasti nosač ostaje elastičan, pomaci su mali, a uzdužno naprezanje zbog savijanja ima linearnu raspodjelu preko poprečnog presjeka oko poprečne osi gdje nema naprezanja (neutralna os).
3. Dinamički utjecaji mogu biti zanemareni ili predstavljeni ekvivalentnim statičkim opterećenjem. Prema tome je moguće postići stanje statičke ravnoteže.
4. Budući da je naprezanje savijanja linearno, horizontalno i vertikalno savijanje mogu se promatrati odvojeno. Kako uzdužno savijanje dominira, uglavnom se proučava utjecaj samo tog savijanja.

Brod, naravno, nije apsolutno krut kao idealna greda, no poprečni elementi konstrukcije broda osiguravaju dovoljnu krutost poprečnih presjeka broda da točnost proračuna uzdužne čvrstoće bude zadovoljavajuća. Budući da ova metoda proračuna nije egzaktna, potrebni su određeni faktori sigurnosti koji odražavaju nepoznavanje rezultata teoretskog proračuna i ponašanja konstrukcije u naravi. Ukoliko je moguće, takve pojednostavljene proračune potrebno je

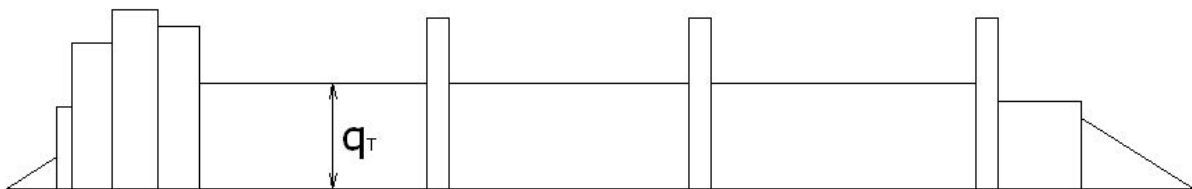


provjeravati naprednijim metodama (MKE) koje daju točnije rezultate te smanjuju potreban faktor sigurnosti odnosno težinu same konstrukcije. Naravno, to nije uvijek moguće iz razloga nedostatka vremena ili financija pa se treba pouzdati u jednostavnije metode koje su ipak zadovoljavajuće točnosti.

#### 4.1.2 Raspodjela težina po duljini broda

Najvažnije opterećenje koje se razmatra u proračunu uzdužne čvrstoće je vertikalni moment savijanja koji može dovesti do zamora, vlačnog popuštanja, izvijanja, i loma strukturnih elemenata. Ukupni moment savijanja koji djeluje na brodski trup dobije se sumiranjem momenta savijanja na mirnoj vodi te momenta savijanja uzrokovanog valovima.

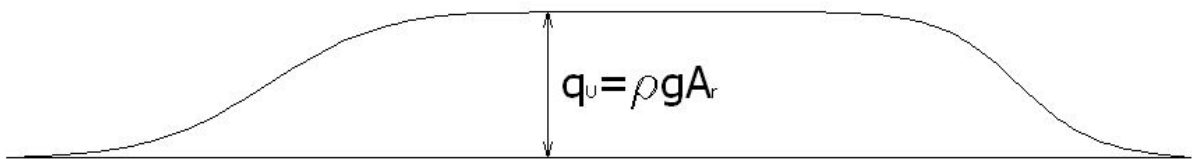
Da bi se odredio moment savijanja na mirnoj vodi potrebno je odrediti raspored težina broda po duljini, i to za kritična stanja krcanja. Tu se opet susrećemo s problemom točnosti podataka jer je točno određivanje rasporeda težina broskog trupa koji, osim konstruktivnih elemenata, sadrži i opremu te teret i zalihe, vrlo teško. Raspored težina uzdužnih elemenata se lako dobije dijeljenjem težine s duljinom elementa. Kod poprečnih elemenata raspored težina se dobije tako da se težina podijeli s razmakom poprečnih elemenata. Da bi se proračun obavio u razumnom vremenu potrebne su neke aproksimacije kao što je trapezni raspored težina. Raspodjela težina je diskontinuirana te je prikazana trokutima, pravokutima i trapezima.



Slika 4-1 Raspored težina

### 4.1.3 Raspodjela uzgona po duljini broda

Prvi uvjet plovnosti je jednakost sila težine i uzgona te podudaranje uzdužnih težišta tih sila. More brodu predstavlja beskonačni niz oslonaca kroz koje se manifestira sila uzgona koja se suprotstavlja sili težine broda. Za računanje rasporeda sile uzgona duž broda koriste se Bonjeanove krivulje iz kojih se, za određeni gaz, očitaju površine teoretskih rebara. Iz krivulje areale rebara, tj. rasporeda površina rebara duž broda, integriranjem se dolazi do volumena istisnine, odnosno do sile uzgona.



Slika 4-2 Raspored sile uzgona

### 4.1.4 Raspodjela opterećenja po duljini broda

Međusobnim zbrajanjem, odnosno oduzimanjem, sila težine broda (u koju moraju biti uračunati i teret i zalihe) te sile uzgona dobije se raspored opterećenja po cijeloj duljini broda:

$$q(x) = q_T(x) \pm q_U(x)$$

Raspored poprečnih sila se dobije integriranjem kontinuiranog opterećenja:

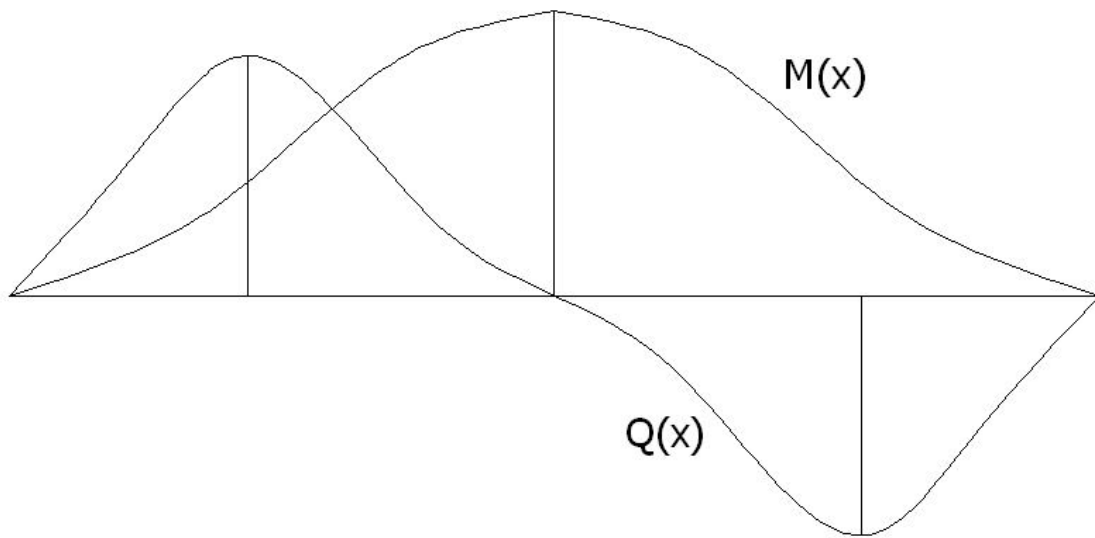
$$Q(x) = \int_0^x q(x) dx$$

Nadalje, raspored momenata savijanja se računa integriranjem rasporeda poprečnih sila:

$$M(x) = \int_0^x Q(x) dx = \iint_{00}^{xx} q(x) dx dx$$

Te je integrale vrlo teško riješiti analitički pa se koriste neke od numeričkih metoda (trapezno, Simpsonovo, Čebišljevo pravilo ...).

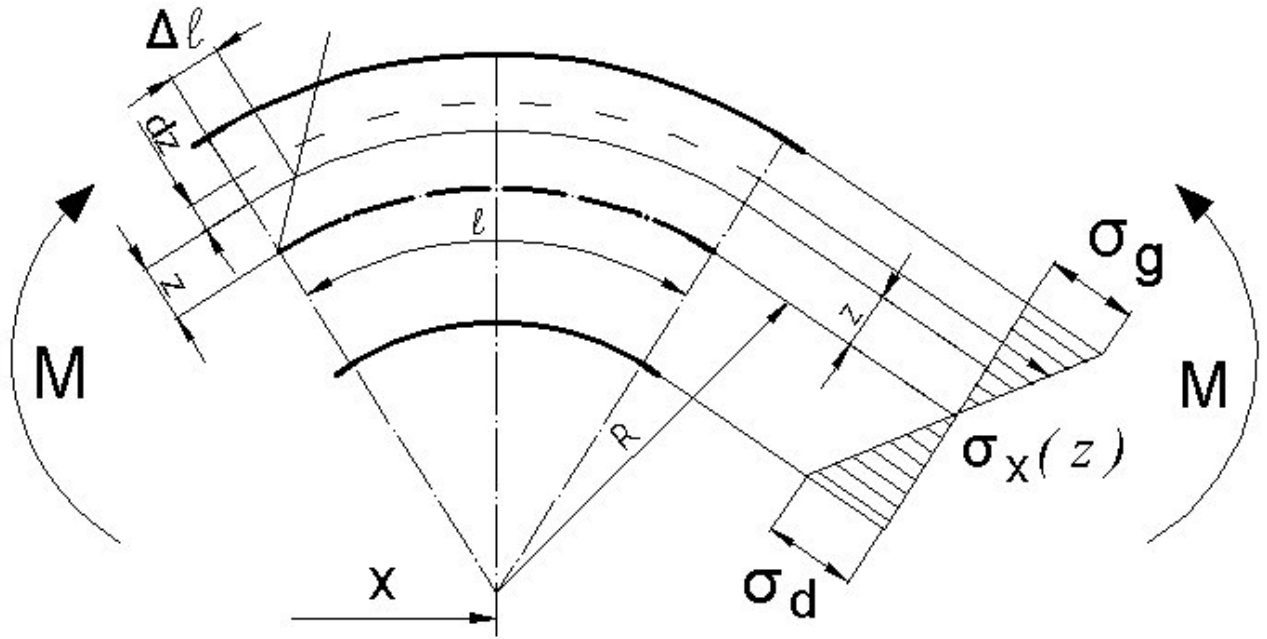
Konvencija o predznacima definira momente koji uzrokuju progib kao negativne, a one koji uzrokuju pregib kao pozitivne.



Slika 4-3 Raspored poprečnih sila i momenata savijanja pri uzdužnom savijanju brodskog trupa

#### 4.1.5 Odziv brodskog trupa na vanjska opterećenja

Nakon što se odrede vanjska opterećenja te poprečne sile i momenti savijanja koji djeluju na brodski trup, da bi se odredila naprezanja u elementima i njihove deformacije, potrebno je dovesti u direktan odnos opterećenja i odziv strukturnih elemenata. Budući da je već u početku uvedena pretpostavka o brodskom trupu kao krutoj gredi, pri određivanju odziva strukture koristimo se elastičnom teorijom grede koja je prikazana na slici 4-4.



Slika 4-4 Diferencijalni element grede podvrgnut čistom savijanju

Na osnovi sličnosti može se postaviti odnos produljenja i duljine luka koji daje iznos relativne deformacije:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{z}{R}$$

Hookeov zakon daje odnos relativne deformacije i naprezanja:

$$\sigma_x(z) = \varepsilon_x \cdot E = \frac{z}{R} \cdot E$$

Na osnovi ravnoteže unutarnjih sila dobiva se slijedeći izraz:

$$\int_A \sigma_x(z) dA = 0$$

Na osnovi ravnoteže momenata dobiva se slijedeći izraz:

$$\int_A \sigma_x(z) z dA = \frac{E}{R_x} \int_A z^2 dA = \frac{E}{R_x} \cdot I_x = M_x \text{ [Nm]}$$

Sada je moguće odrediti naprezanje:

$$\sigma_x(z) = \frac{M_x}{I_x} \cdot z,$$

gdje je  $I_x$  moment tromosti poprečnog presjeka trupa oko neutralne linije.

Budući da naprezanje raste porastom varijable  $z$ , tj. udaljenošću od neutralne osi, najopterećeniji elementi su oni na dnu ili na palubi. Kao uobičajeni kriterij pri provjeri čvrstoće koju propisuju klasifikacijska društva koristi se elastični moment otpora presjeka (eng. section modulus). Moment otpora ili modul presjeka glasi:

$$W_x = \frac{I_x}{z} \quad [\text{m}^3],$$

gdje je  $z$  udaljenost neutralne osi od dna ili palube. Kako je obično udaljenost neutralne osi od osnovice manja od udaljenosti do palube, kao relevantni se moment otpora uzima onaj oko palube:

$$W_x^p = \frac{I_x}{z_p} \quad [\text{m}^3],$$

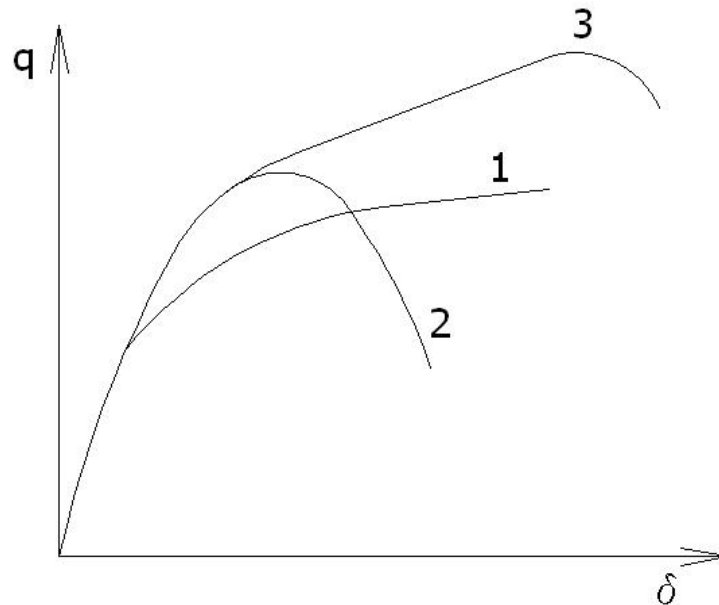
gdje je  $z_p$  udaljenost neutralne osi od palube.

## 4.2 Tipovi loma strukture

Za razliku od analize odziva koja se bavi linearnim elastičnim odgovorom na opterećenje, analiza graničnog stanja određuje veličinu i kombinaciju opterećenja koja uzrokuje lom, kako pojedinih strukturnih elemenata, tako i strukture u cijelini. Pojava loma strukture je nelinearna, bilo zbog geometrijske nelinearnosti (uslijed izvijanja ili drugog značajnog pomaka), bilo zbog nelinearnosti materijala (popuštanje i plastična deformacija). Postoji nekoliko glavnih načina loma čeličnih strukturnih elemenata:

1. Lokalna plastična deformacija
2. Izvijanje nosača
3. Izvijanje opločenja
4. Lom zbog nastanka pukotina

Da bi se moglo analizirati spomenute načine loma, potrebno je poznavati krivulje koje opisuju ovisnost opterećenja i defleksije u nelinearnom području (eng. load – deflection curves) koje se razlikuju za pojedine elemente i načine sloma. Primjer tih krivulja prikazan je na slici 4-5.



Slika 4-5 Krivulje ovisnosti opterećenja  $q$  i defleksije  $\delta$  za razne načine loma strukturnih elemenata

#### 4.2.1 Lokalna plastična deformacija

Ovaj je način loma svojstven elementima čija su aksijalna tlačna opterećenja mala, robusnih su dimenzija ili su potpuno učvršćeni. Krivulja koja opisuje ovaj način loma prikazana je na slici 4-5 pod oznakom 1.

U elasto – plastičnom području ove krivulje, lokalne se plastične deformacije pojavljuju u točkama s najvećim naprezanjima, a to postupno smanjuje krutost elementa. U plastičnom području krivulje, lokalne plastične deformacije se brzo povećavaju i pojavljuju na više mjesta što rezultira smanjenjem krutosti do točke kada element više ne obavlja svoju funkciju. Ne postoji točno određena točka na krivulji u kojoj se događa lom. Za opterećenje koje uzrokuje lom uzima se ono na početku plastičnog područja, kada deformacije počinju brzo rasti. Premda stvarni gubitak funkcije elementa nastupa pri većem opterećenju, rezerva snage je premala da bi je se uzimalo u obzir.

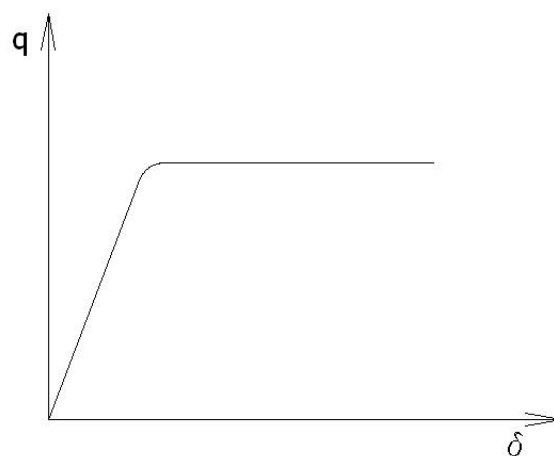
Pri ovom razmatranju pretpostavljeno je da deformacija elementa ne utječe znatno na njegovu geometriju odnosno na jednadžbe postavljene u stanju ravnoteže.

#### 4.2.2 Izvijanje nosača i opločenja

Izvijanje može nastupiti u bilo kojem elementu ili njegovom dijelu koji je opterećen aksijalnim ili ravninskim tlačnim opterećenjem. Najuobičajeniji je primjer izvijanje običnog štapa. Krivulja koja opisuje izvijanje nosača predstavljena je na slici 4-5 pod oznakom 2.

U realnom štapu postoji početan ekscentricitet te aksijalno opterećenje savija štap te uzrokuje daljnu lateralnu defleksiju. Za mala opterećenja ovaj efekt je zanemariv i početni dio krivulje je praktički linearan. S opterećenjem raste i lateralni pomak što rezultira brzim gubitkom krutosti. Zbog ovog gubitka krutosti, krivulja dostiže vrh i nadalje pada. Pad se događa samo ako se opterećenje brzo smanjuje, tako da prati krivulju. Ako se opterećenje ne smanjuje, budući da je krutost elementa nula, defleksija odjednom raste do vrlo velikih vrijednosti, tj. element gubi stabilnost i slama se.

U mnogim slučajevima početna defleksija je relativno mala pa to omogućuje idealizirani pristup, poznat kao pristup svojstvenih vrijednosti (eng. eigenvalue method). U tom se pristupu pretpostavlja da materijal nema geometrijskih ili materijalnih nesavršenosti te da je opterećen tako da se defleksije prije izvijanja događaju samo u smjeru opterećenja. Glavno obilježje ovog idealiziranog oblika izvijanja je da se element može beskonačno izviti bez povećanja u opterećenju. Na slici 4-6 pokazana je krivulja ovisnosti opterećenja i defleksije za taj idealizirani slučaj izvijanja.



Slika 4-6 Idealizirani slučaj izvijanja štapa

Kod opločenja i ukrepljenih panela postoji rezerva snage poslije izvijanja, tj. granično opterećenje je veće od opterećenja izvijanja.

#### **4.2.3 Lom zbog nastanka pukotina**

Dovoljna sigurnost može se postići držanjem opterećenja pojedinog elementa na dosta nižoj razini od granice razvlačenja materijala. Termin „krti lom“ odnosi se na činjenicu da se pri niskim temperaturama granica razvlačenja drastično smanjuje. Opasnost od krtog loma može se umanjiti upotrebom čelika odgovarajućeg kemijskog sastava, što se očituje i klasi čelika A, B; D, E i F za vrlo niske temperature.

Osim statičkog uzroka pukotina, nastajanje pukotina može biti uzrokovano i dinamički, nakon velikog broja ciklusa opterećenja kada mikroskopske pukotine postaju dovoljno velike da uzrokuju lom. Kod dinamičkog su opterećenja važni amplituda naprezanja i broj ciklusa.

### **4.3 Granično stanje ukupne strukture**

Lom strukture je zapravo gubitak cjelokupne krutosti i sposobnosti podnošenja opterećenja. Kod struktura s membranskim opločenjem kao što su trupovi aviona ili podmornica, moguće je da se lom dogodi putem čistog izvijanja pa se proračun može provesti direktnom metodom svojstvenih vrijednosti.

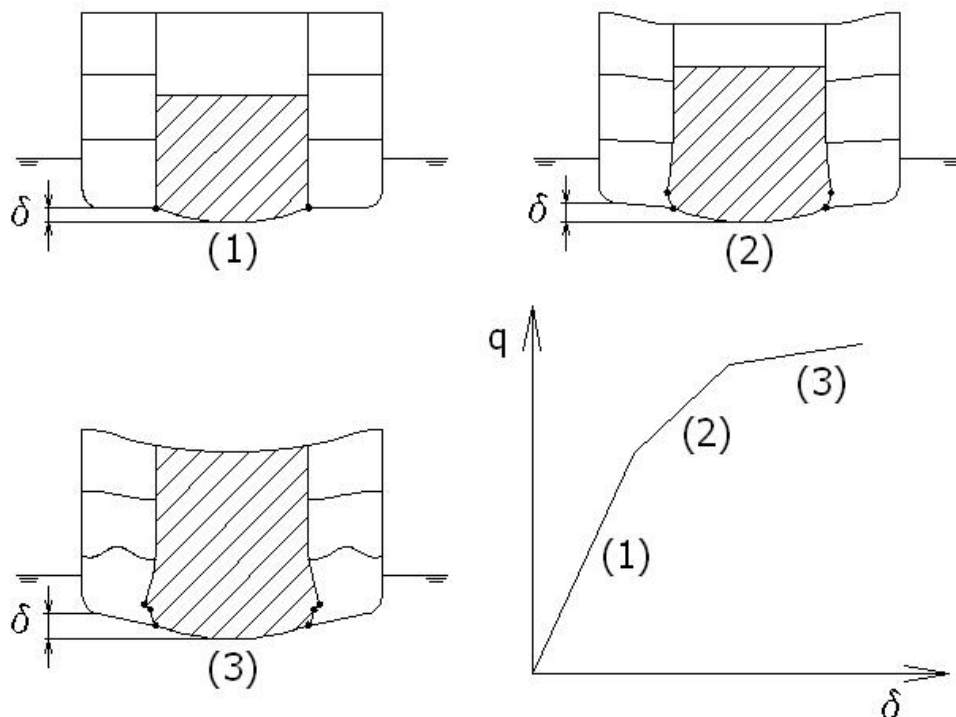
U strukturi broda mnogi elementi nose velike momente savijanja te zbog svojih robusnih proporcija podnose znatno popuštanje, prije i za vrijeme izvijanja. Slika 4-7 prikazuje kako može doći do loma strukture tankera tijekom krcanja tereta ako poprečno ukrepljenje nije dobro dimenzionirano. Da bi prikaz bio što razumljiviji, defleksije su značajno preuveličane. Pretpostavimo da je ovo jedini tank koji se puni, da je gaz konstantan te da opterećenje proizlazi iz samog tereta.

Kako se opterećenje povećava (krcanjem tereta), razni strukturni elementi gube nosivost te se stvaraju plastični zglobovi, bilo zbog popuštanja, izvijanja ili neke njihove kombinacije. Ovi uzastopni lomovi uzrokuju gubitak krutosti cijelokupne strukture (kut nagiba krivulje u  $q - \delta$  dijagramu). Kut ne postaje odmah nula jer ostali elementi još uvijek



moгу podnositi povećano opterećenje. Kako sve više elemenata gubi nosivost (stvaranje sve više plastičnih zglobova), struktura na se kraju lomi. U ovom načinu loma koji uključuje mješovite tipove lomova i nelinearnu interakciju između elemenata, točna vrijednost graničnog opterećenja može se izračunati samo pronalaženjem kompletnog odnosa opterećenja i defleksije, koristeći inkrementalni postupak.

Postupak se sastoji od nametanja serije inkrementalnih opterećenja kako struktura popušta te obnavljajući matematički model trupa tako da uvijek daje vjernu sliku krutosti i ostalih svojstava strukture. Da bi se otkrili lomovi pojedinih elemenata, treba konstantno pratiti unutarnja naprezanja i deformacije te ih uspoređivati s graničnim vrijednostima koje su prethodno izračunate za različite tipove lomova, za različite vrste elemenata. Također treba pratiti krutost cijele strukture da bi se moglo odrediti njen krajnji lom.



Slika 4-7 Odnos naprezanja i defleksije tijekom loma cijele strukture

Općenito, projektni su momenti u slučaju pregiba manji od onih u slučaju progiba, a granični moment progiba je veći od momenta progiba. Kao posljedica, sigurnosni su faktori u

slučaju pregiba veći od onih slučaju progiba. Prema tome, ispitivanjem problema granične čvrstoće moglo bi se doći do racionalnijeg projekta.

Sadašnji zahtjevi na uzdužnu čvrstoću vezani su uz elastične projektne kriterije. Kada se radi o sigurnosti broda, potrebno je proučiti graničnu čvrstoću trupa. Kako bi se postigla odgovarajuća točnost, potrebno je pojasniti ove stavke:

1. Odgovarajuće modeliranje brodske grede i odabir procedure analize.
2. Procjena utjecaja početnih nesavršenosti na graničnu čvrstoću (početne deformacije, zaostala naprezanja zbog zavarivanja itd.).

Točnost određivanja opterećenja (u zahtjevu) je također potrebna da bi se poboljšala procjena. Potrebna je dosljednost u točnosti između opterećenja, čvrstoće i analize. Za razne tipove brodova razlikuju se značajke granične čvrstoće i opterećenja što ovisi o konfiguraciji strukture i uzorka opterećenja.

Postoje mnogi faktori koji utječu na graničnu čvrstoću i opterećenje, a koji se ne mogu uvijek odrediti deterministički već je potrebno istražiti stohastičku prirodu svakog faktora. Također, čvrstoća ovisi o vremenu, tj. trošenju u službi (utjecaj pukotina, korozije).

Mnoge su analize provedene za netaknuto stanje, ali potrebno je analizirati i oštećene brodove.

#### **4.4 Potreba za procjenom granične čvrstoće**

Procjena granične čvrstoće broskog trupa konvencionalnih formi može se obaviti:

1. U projektnom stadiju da bi se postigao što racionalniji projekt, tj. da bi se smanjila težina strukture uz postizanje zahtjeva čvrstoće. To je moguće biranjem konfiguracija čiji se konstrukcijski parametri (težina i trošak) minimiziraju dok se zadovoljavaju zahtjevi lokalne čvrstoće.
2. Za postojeće strukture da bi se procijenila preostala čvrstoća što je od vitalne važnosti za strukture koje su trpjele trošenja tijekom službe uz neizbježan utjecaj korozije.

Za pojedine tipove plovila, procjena granične čvrstoće je važan dio procesa projekta. Plovila poput jaružala i platformi (eng. Floating Production and Storage Offshore Unit) podložna su visokim momentima savijanja u običnom režimu rada pa je potrebna dobra procjena

opterećenja. Kod plovila poput katamarana i ostalih naprednih plovila minimizacija težine je važna, dok je istovremeno važno osigurati sposobnost strukture da podnese savojna, torzijska i udarna opterećenja.

#### **4.4.1 Analiza progresivnog sloma**

U klasičnim se proračunima granična čvrstoća računa ne uzimajući u obzir smanjenje čvrstoće u pojedinim elementima nakon što dosegnu lokalnu graničnu čvrstoću. Takvo promatranje ne predstavlja stvarno ponašanje strukturnih elemenata tijekom procesa sloma pa nije ni moguće očekivati točne rezultate jer lokalni slomovi utječu na slom globalne strukture.

Zbog toga je važno uzeti u obzir smanjenje čvrstoće (eng. load shedding) svakog pojedinog elementa strukture kada se simulira ponašanje broskog trupa u procesu sloma. Takva se metoda simulacije naziva Analiza progresivnog sloma (eng. Progressive Collapse Analysis). Metode predstavljene u nastavku spadaju upravo u tu grupu metoda za određivanje granične čvrstoće. Za sve metode analize progresivnog sloma karakteristično je da se koriste krivulje odnosa srednjeg naprežanja i srednje deformacije elementa (eng. average stress – average strain relationship curves, load – end shortening curves).

#### **4.4.2 Pojednostavljena (smithova) metoda**

Da bi se izbjegla potreba za velikim računalnim i ljudskim resursima, razvijene su neke pojednostavljene metode od kojih je najpoznatija Smithova metoda. Osnovna je ideja uzeti u obzir smanjenje čvrstoće elemenata nakon dosega vlastite granične čvrstoće, kao i faznog pomaka u slamanju pojedinih elemenata. Smith je 1977. godine prvi analitički dokazao da se u poprečnom presjeku ne može razviti potpuni plastični moment savijanja. Po toj metodi, poprečni presjek strukture je podijeljen na male elemente koji se sastoje od ukrepa i sunosive širine oplata, a odnos srednjeg naprežanja i srednje deformacije određen je prije izvođenja analize progresivnog sloma.

Prema Smithu (1983.), ponašanje progresivnog sloma poprečnog presjeka podložno kombiniranom vertikalnom i horizontalnom savijanju, može se simulirati na slijedeće načine:

1. Aksijalna krutost pojedinih elemenata izračunata je upotrebom odnosa srednjeg naprežanja i srednje deformacije.
2. Savojna krutost poprečnog presjeka dobivena je koristeći aksijalnu krutost elemenata.
3. Vertikalne i horizontalne zakrivljenosti broskog trupa uvode se inkrementalno pretpostavljajući da ravni presjeci ostaju ravni te da se savijanje odvija oko trenutne neutralne osi.
4. Određuju se odgovarajući inkrementalni momenti  $i$ , prema tome, porast deformacije i naprežanja elemenata.
5. Inkrementalne zakrivljenosti i momenti savijanja poprečnog presjeka, kao i inkrementalne deformacije i naprežanja zbrajaju se da bi se dobile njihove kumulativne vrijednosti.

Točnost rezultata dobivenih Smithovom analizom uvelike ovisi o točnosti odnosa srednjeg naprežanja i srednje deformacije elemenata. S druge su strane neke analitičke metode predložene za određivanje odnosa srednjeg naprežanja i srednje deformacije za ukrepljene panele.

## **4.5 Teorija proračuna granične čvrstoće broskog trupa**

Kao i kod drugih proračuna, u bilo kojoj tehničkoj struci, tako i u proračunu granične čvrstoće postoji odnos točnosti i troškova proračuna. Budući da je slom strukture broda izuzetno kompleksan problem, do sada nije izvedena metoda koja bi omogućavala njegovu kompletnu i točnu analizu. Zbog toga je potrebno koristiti pojednostavljene i približne pristupe od kojih se većina može podijeliti na dvije kategorije.

Pojednostavljenjem i idealizacijom geometrije broskog trupa moguće je identificirati određene dijelove strukture za koje se mogu razviti i primijeniti približne metode analize granične čvrstoće. Na primjer, paluba i bok broda mogu se promatrati kao roštiljne strukture, dok se dvodno može aproksimirati ortotropnom pločom. Međutim, ovaj pristup ima iste nedostatke kao i analiza odvojenog elementa, a to je nepoznavanje graničnih uvjeta, tj. nepoznavanje interakcije susjednih dijelova strukture, čak i kada se radi o istovrsnim elementima. Osim toga, geometrija broda ne dopušta uvijek takva pojednostavljenja; paluba može imati velike otvore, a dvodno može biti povezano s palubom preko upora.

Drugi pristup, koji se obično koristi da se pojednostavi analiza, je podjela analize na dva dijela; analizu izvijanja te analizu pojave plastičnih zglobova.

### **4.5.1 Analiza izvijanja**

Ova analiza pretpostavlja da do sloma strukture dolazi isključivo putem izvijanja, a relativni odnosi opterećenja se smatraju konstantnim. Ove pretpostavke omogućavaju pretvaranje jednadžbi ravnoteže u problem svojstvenih vrijednosti za koji se brzo može naći direktno rješenje.

### **4.5.2 Analiza plastičnih zglobova**

U ovom se pristupu pretpostavlja da se lom strukture uzrokuje pojavom mjesta velike plastične deformacije, tzv. plastičnih zglobova. Sistematska procedura se koristi za određivanje odnosa opterećenja i nastajanja plastičnih zglobova, tj. najmanjeg opterećenja pri kojem će doći do pojave mehanizma i loma strukture.

Budući da su zasnovana na prethodnom određivanju tipa loma zbog kojeg dolazi do sloma cijele strukture, oba pristupa se mogu baviti graničnim stanjem, odnosno lomom, strukture. Kako nema potrebe za računanjem stanja strukture prije pojave loma, količina potrebnog računanja je relativno mala. Međutim, oba pristupa ignoriraju istovremeno pojavljivanje više načina sloma, na različitim mjestima strukture te mogućnost njihove kombinacije i interakcije.

Posljednjih godina metoda konačnih elemenata prilagođena je upotrebi za rješavanje nelinearnih problema koji uključuju obje nelinearnosti, geometrije i materijala. To je postignuto uvođenjem inkrementalnog i iterativnog pristupa, tj. korištenjem krivulja opterećenje – defleksija. Opterećenje se postupno povećava (određuje se iterativnim putem) te se za svako stanje provodi nekoliko linearnih analiza konačnih elemenata. Ovaj pristup omogućava analizu istovremene pojave izvijanja i popuštanja. Nadalje, moguće ga je primijeniti ne samo na pojedini element strukture, nego i na kompletnu strukturu koja uključuje interaktivni slom nekoliko elemenata zbog kombiniranog izvijanja i popuštanja.

Nažalost, ovaj pristup zahtijeva mnogo računanja te se višestruko povećava porastom i kompleksnošću strukture. Za današnja je računala trošak nelinearne analize konačnih elemenata prevelik da bi se metoda koristila previše rigorozno i za svaki problem. Ipak, superiornost metoda prevladava u analizi individualnog elementa te u analizi cijelokupne strukture, premda je potrebno uvesti neka pojednostavljena da bi se reducirala količina računanja.

#### **4.5.3 Analiza granične čvrstoće individualnog elementa**

Na ovom se nivou nelinearnosti izvijanja i plastičnih deformacija mogu riješiti aproksimirajućim analitičkim metodama zatvorenih formi. Budući da zahtijevaju puno manje računanja, a imaju zadovoljavajuću točnost po pitanju strukture, te metode su poželjne u nelinearnoj analizi konačnih elemenata gdje se analiza mora opetovano izvršavati. Ipak, te su metode približne. U najvećem broju slučajeva, one su poluempirijske te se sastoje od formula koje su izvedene iz temeljne teorije (idealizirane do nekog stupnja) zajedno s nekim numeričkim izrazima ili koeficijentima koji su dobiveni eksperimentalno ili numerički. Zbog

veće točnosti i općenitosti analize konačnih elemenata, njena glavna i najvrednija primjena je provjera točnosti u smislu daljnjeg razvijanja približnih analitičkih metoda.

Da bi se pojednostavile, svaka se od ovih metoda fokusira na specifičan tip strukturnog elementa (ploče, štapovi, grede, ukrepljeni paneli) i način sloma strukture.

#### **4.5.4 Analiza granične čvrstoće modula trupa**

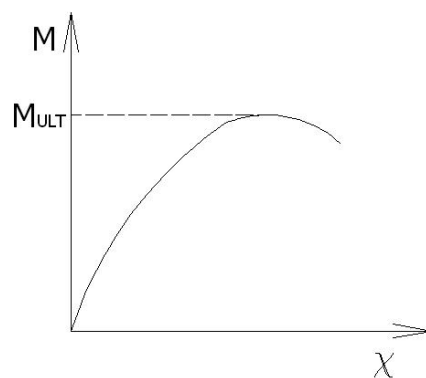
Slom modula trupa je sinonim sloma trupa kao grede što je zapravo, kao što je već navedeno, nesposobnost trupa da podnosi narinuta opterećenja (vertikalno i horizontalno savijanje, smično i torzijsko opterećenje). Drugim riječima, kolaps modula trupa je gubitak krutosti grede na savijanje, smik ili torziju. Pretpostavljeno je da je modul trupa prizmatičan, a poprečna struktura je okomita na uzdužnu. Također, velika ravninska krutost opločenja znači da nema uzdužnih pomaka spojeva. Prema tome može se zaključiti da se opći slom može dogoditi samo u uzdužnom smjeru i/ili u poprečnoj ravnini. Te se dvije kategorije sloma mogu opisati kako slijedi:

1. Uzdužna: slom dovoljnog broja uzdužno orijentiranih elemenata brodske grede što uzrokuje velik gubitak krutosti na savijanje, smik ili torziju.
2. Poprečna: slom dovoljnog broja elemenata da se stvori mehanizam u poprečnom orebrenju što smanjuje potporu elementima uzdužne čvrstoće.

Ove dvije kategorije nisu neovisne jedna o drugoj jer slom u uzdužnom smjeru može uključivati jedno ili više poprečnih rebara. Prema tome, moguće je puno kombinacija sloma uzdužnih i poprečnih elemenata od kojih svaki može uključivati istovremeno izvijanje i plastičnu deformaciju pa bi njihovo uključivanje u analizu granične čvrstoće bilo prezahtjevno za današnja računala. Da bi se analizu učinilo računalno izvedivom, potrebno je uvesti posebna ograničenja. Najjednostavniji način da se to napravi je uvođenje ograničenja da svi poprečni presjeci moraju biti dovoljno čvrsti tako da bi svi uzdužni elementi doživjeli slom između dva poprečna presjeka prije nego što slom uključi više od jednog razmaka između poprečnih presjeka. To značajno pojednostavljuje analizu u dva smjera:

1. Modul trupa može se ispitivati u jednom trenutku preko samo jednog segmenta koji sadrži sve važnije strukturne elemente, a budući da su mnogi segmenti identični, potrebno je analizirati samo one opterećenije.
2. Uzdužni i poprečni tipovi sloma postaju neovisni te se mogu analizirati odvojeno što dodatno reducira količinu računa.

Za uzdužni globalni slom dominantno opterećenje je moment savijanja brodske grede, a glavni je odziv savijanje grede, što može biti izraženo pomoću zakrivljenosti grede  $\chi$ . Svi ostali uzdužni odzivi mogu se predstaviti korekcijama ili modifikacijama glavnog odziva. Izgled krivulje ovisnosti momenta savijanja i zakrivljenost predstavljen je na slici 4-8.



Slika 4-8 Ovisnost momenta savijanja o zakrivljenosti trupa

Kao što je prikazano na slici 4-8, granični moment savijanja je onaj gdje savojna krutost grede, tj. nagib krivulje  $M - \chi$  postaje nula. To se događa kad se dovoljan broj modela unutar pojedinog segmenta broskog trupa slomi, bilo zbog vlačnog ili tlačnog opterećenja. Tijekom globalnog sloma razni paneli nalaze se u različitim stupnjevima slamanja i unutar svakog panela glavni efekt opterećenja je produženje ili skraćenje koje gredi nameće moment savijanja kao rezultat zakrivljenosti  $\chi$ .

Jedna od glavnih prednosti zahtijevanja da nijedan tip sloma ne prethodi slomu između poprečnih presjeka je da brodski trup funkcioniра kao idealna greda cijelim tijekom procesa sloma te se osnovna pretpostavka teorije grede, da poprečni presjeci ostaju u svojoj ravnini, primjenjuje s dovoljnom točnošću. Prema tome, uzdužna se deformacija zbog savijanja grede dobije iz izraza:

$$\varepsilon = z \cdot \chi ,$$



kako i vrijedi za elastično savijanje grede. Očito je da je, budući da je svaki panel izložen procesu loma što uključuje popuštanje, izvijanje ili oboje, odgovarajuća raspodjela naprezanja preko presjeka kritičnog segmenta vrlo nelinearna. Čak i unutar svakog panela odnos između srednjeg naprezanja i deformacije varira kako opterećenje raste. Svejedno, raspored deformacija ostaje približno linearan sve do sloma grede. Prema tome, granične vrijednosti elemenata koje imaju najveću važnost u uzdužnom slomu su vrijednosti granične deformacije  $\varepsilon_{ULT}$  ukrepljenih panela. Za svaki panel granična deformacija  $\varepsilon_{ULT}$  je količina nametnute tlačne deformacije koja uzrokuje slom tog panela. Kako bi se mogao izračunati granični moment  $M_{ULT}$  potrebno je znati graničnu čvrstoću svakog panela, tj. količinu tlačnog opterećenja koje panel nosi u trenutku sloma. To se izražava srednjim naprežanjem panela u trenutku njegovog sloma  $\sigma_{i, ULT}$ .

Za globalni slom u poprečnom smislu glavni efekt opterećenja je moment savijanja u nosačima koji čine poprečno orebrenje, posebno momenti na krajevima i sredini nosača. Taj efekt ima tri različite granične vrijednosti; kritični moment savijanja  $M_{CR}$  za savojno – torzijsko izvijanje te momenti  $M_P$  i  $M_{FY}$  čije vrijednosti uzrokuju plastični zglobovi u nosaču te plastični mehanizam u pojasu nosača, zbog popuštanja pojasa. Slom se događa kada slomovi individualnih elemenata oslabe poprečno orebrenje koje više ne može pružati adekvatnu potporu glavnim uzdužnim elementima. To se uglavnom događa kada se u poprečnom orebrenju stvori plastični mehanizam.

## 4.6 Numeričko rješenje problema granične čvrstoće

U proračunima za potrebe ovog rada se koristio program MARS 2000 koji daje numeričko rješenje granične čvrstoće promatranog broda. Program koristi metodu analize progresivnog sloma s izračunatim krivuljama naprežanje – deformacija (eng. load – end shortening curves). Metoda se zasniva na inkrementalno – iterativnoj proceduri. Inkrementalni se dio očituje u postupnom povećavanju zakrivljenosti, a zakrivljenost svakog koraka  $\chi_i$  i dobije se zbrajanjem zakrivljenosti u prethodnom koraku  $\chi_{i-1}$  i inkrementa  $\Delta\chi$ . Inkrement zakrivljenosti odgovara inkrementu kuta rotacije poprečnog presjeka brodske grede oko svoje horizontalne neutralne osi. Iterativnim se putem u svakom koraku dobiva novi položaj neutralne osi, tj. postavljanjem uvjeta da je sila koja djeluje u elementima koji se nalaze iznad neutralne osi jednaka sili koja djeluje u elementima ispod nje. Na kraju svakog koraka računa se ukupni moment savijanja zbrajanjem doprinosa momentu savijanja svakog pojedinog elementa.

Rezultat metode je krivulja momenta savijanja u ovisnosti o zakrivljenosti  $M - \chi$ , a granični moment predstavlja vršne vrijednosti krivulje, u slučaju progiba (negativni predznak) i pregiba (pozitivni predznak).

### 4.6.1 Krivulje naprežanje – deformacija

Krivulje  $\sigma - \varepsilon$ , „load – end shortening curves“ kako ih naziva IACS<sup>3</sup>, opisuju ponašanje pojedinih vrsta elemenata pri procesu sloma broskog trupa, odnosno pri inkrementalnoj proceduri povećavanja zakrivljenosti. Vrsta krivulje koja će se koristiti za opisivanje ponašanja pojedinog elementa ovisi o njegovom tipu, tj. da li je riječ o tzv. krutom kutu (eng. hard corner), poprečno ukrepljenom opločenju ili uzdužno ukrepljenom panelu. Naravno, vrsta krivulje ovisi i je li element podložan tlačnom ili vlačnom opterećenju, tj. ovisi i o njegovoj poziciji u odnosu na neutralnu os. IACS propisuje šest vrsta krivulja.

---

<sup>3</sup> eng. *International Association of Classification Societies* - Međunarodna udruga klasifikacijskih društava

## 1) Elasto – plastični slom

Krivulja elastično – plastičnog sloma opisuje ponašanje produljenih poprečno ili uzdužno ukrepljenih panela. Na primjer, taj način sloma prati panel dna pri progibu ili panel palube pri pregibu. Po ovom se načinu slamaju i kruti spojevi kao što su spojevi bočnih nosača dvodna s opločenjem dna ili pokrova dvodna. Naprezanje je pozitivno za produljenje, a negativno za skraćenje.

Izraz koji daje naprezanje elementa glasi:

$$\sigma = \Phi \cdot R_e^h \text{ [N/mm}^2\text{] ,}$$

gdje je:

$\Phi$  : Granična funkcija:

$$\Phi = -1 \quad \text{za} \quad \varepsilon < -1$$

$$\Phi = \varepsilon \quad \text{za} \quad -1 < \varepsilon < 1$$

$$\Phi = 1 \quad \text{za} \quad \varepsilon > 1$$

$\varepsilon$ : Relativna deformacija:

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_E}{\varepsilon_Y}$$

$\varepsilon_E$ : Deformacija elementa:

$$\varepsilon = \chi_x \cdot z_i$$

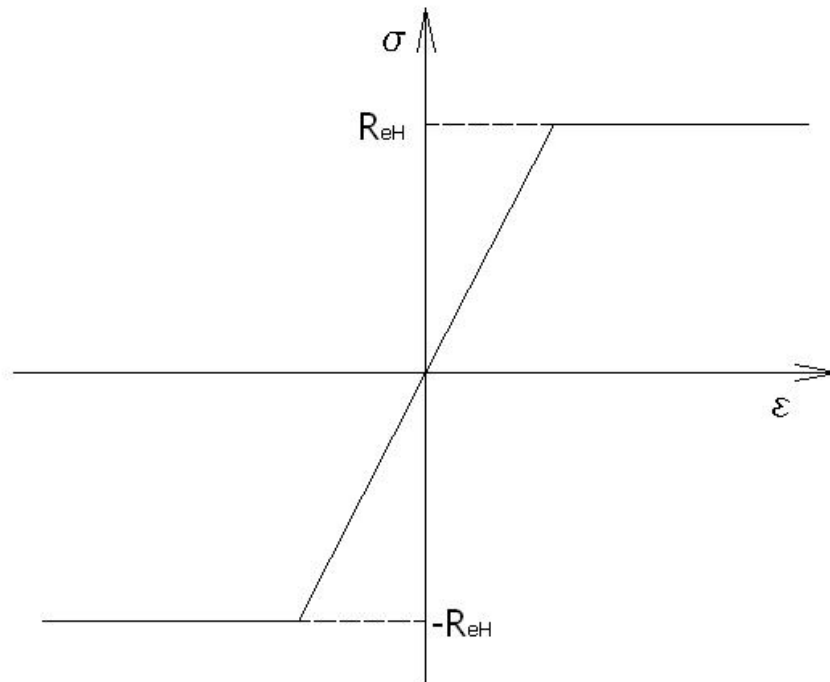
$\varepsilon_Y$ : Deformacija popuštanja materijala:

$$\varepsilon_Y = \frac{R_e^h}{E}$$

$R_e^h$ : Granica razvlačenja

$E$ : Modul elastičnosti

Krivulja naprezanja – deformacije za elasto – plastični slom prikazana je na slici 4-9.



Slika 4-9 Izgled krivulje  $\sigma - \varepsilon$  za elasto – plastični način sloma

## 2) Gredno – štapno izvijanje

Krivulja gredno – štapnog izvijanja opisuje slom skraćenih uzdužno ukrepljenih panela. Na primjer, na taj se način slamaju panel palube pri progibu ili panel dna pri pregibu.

Na temelju rasporeda težina duž broda određuje se moment savijanja na mirnoj vodi.

Izraz naprezanja za gredno – štapno izvijanje:

$$\sigma = \Phi \cdot \sigma_c \frac{A_s + 10 \cdot b_E \cdot t_p}{A_s + 10 \cdot s \cdot t_p} \text{ [N/mm}^2\text{]},$$

gdje je:

$\Phi$  : Granična funkcija

$\sigma_C$ : Kritično naprezanje, [N/mm<sup>2</sup>]:

$$\sigma_C = \frac{\sigma_E}{\varepsilon} \quad \text{za} \quad \sigma_E \leq \frac{R_e^h}{2} \varepsilon$$

$$\sigma_C = R_e^h \left( 1 - \frac{\Phi R_e^h \varepsilon}{4\sigma_E} \right) \quad \text{za} \quad \sigma_E > \frac{R_e^h}{2} \varepsilon$$

$\varepsilon$ : Relativna deformacija

$\sigma_E$ : Eulerovo naprezanje štapnog izvijanja, [N/mm<sup>2</sup>]:

$$\sigma_E = \pi^2 E \frac{I_E}{A_E l^2} 10^{-4}$$

$I_E$ : Moment tromosti običnih ukrepa, [cm<sup>4</sup>], s pridruženom širinom oplata  $b_{El}$ .

$b_{El}$ : Širina pridružene oplata, [m]:

$$b_{El} = \frac{s}{\beta_E} \quad \text{za} \quad \beta_E > 1$$

$$b_{El} = s \quad \text{za} \quad \beta_E \leq 1$$

$\beta_E$ : Koeficijent:

$$\beta_E = 10^3 \frac{s}{t_p} \sqrt{\frac{\varepsilon R_e^h}{E}}$$

$A_E$ : Površina presjeka, [cm<sup>2</sup>], običnih ukrepa s pridruženom širinom oplata  $b_E$

$A_S$ : Površina presjeka struka uzdužnjaka, [cm<sup>2</sup>]

$s$ : Razmak uzdužnjaka, [m]

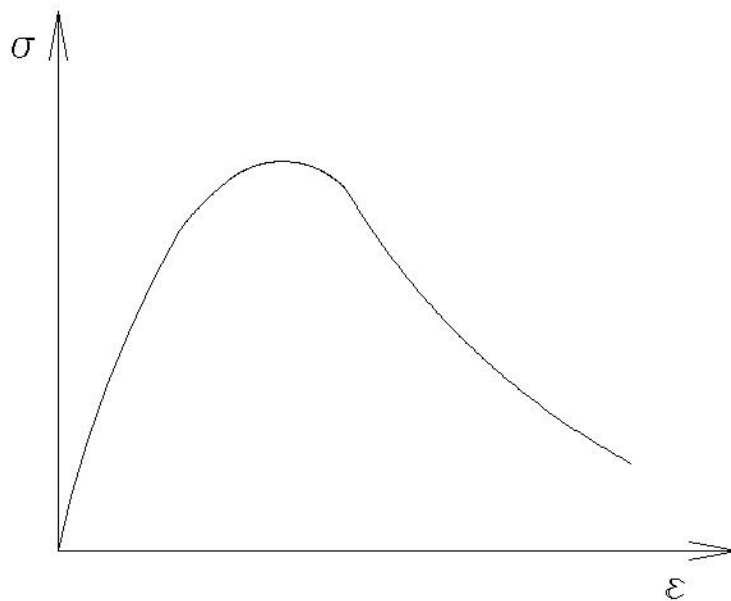
$t_p$ : Debljina pridružene oplata, [mm]

$b_E$ : Širina pridružene oplata, [m]:

$$b_E = \left( \frac{2.25}{\beta_E} - \frac{1.25}{\beta_E^2} \right) s \quad \text{za} \quad \beta_E > 1.25$$

$$b_E = s \quad \text{za} \quad \beta_E \leq 1.25$$

Izgled krivulje naprežanja – deformacije za ovaj način loma prikazan je na slici 4-10.



Slika 4-10 Izgled krivulje  $\sigma - \varepsilon$  za slom putem gredno – štapnog izvijanja

### 3) Torzijsko izvijanje

Po torzijskom se izvijanju također mogu slamati skraćeni uzdužno ukrepljeni paneli koji trpe lateralno – savojna opterećenja.

Izraz koji daje naprežanje elementa:

$$\sigma = \Phi \frac{A_S \cdot \sigma_C + 10 \cdot b_E \cdot t_p \cdot \sigma_{CP}}{A_S + 10 \cdot s \cdot t_p} \quad [\text{N/mm}^2],$$

gdje je:

$\Phi$ : Granična funkcija

$\sigma_C$ : Kritično naprezanje, [N/mm<sup>2</sup>]:

$$\sigma_C = \frac{\sigma_E}{\varepsilon} \quad \text{za} \quad \sigma_E \leq \frac{R_e^h}{2} \varepsilon$$

$$\sigma_C = R_e^h \left( 1 - \frac{\Phi R_e^h \varepsilon}{4\sigma_E} \right) \quad \text{za} \quad \sigma_E \leq \frac{R_e^h}{2} \varepsilon$$

$\sigma_E$ : Eulerovo naprezanje torzijskog izvijanja, [N/mm<sup>2</sup>]

$\varepsilon$ : Relativna deformacija

$\sigma_{CP}$ : Naprezanje izvijanja sunosive širine opločenja, [N/mm<sup>2</sup>]:

$$\sigma_{CP} = \left( \frac{2.25}{\beta_E} - \frac{1.25}{\beta_E^2} \right) R_e^h \quad \text{za} \quad \beta_E > 1.25$$

$$\sigma_{CP} = R_e^h \quad \text{za} \quad \beta_E \leq 1.25$$

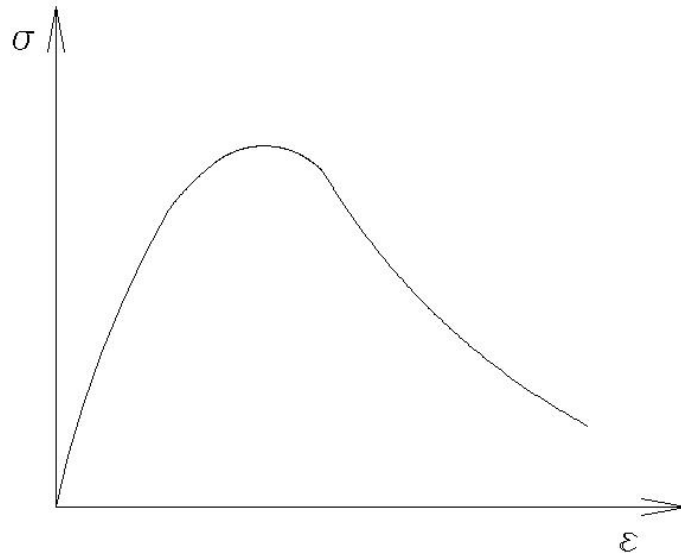
$\beta_E$ : Koeficijent

$A_E$ : Površina presjeka, [cm<sup>2</sup>], običnih ukrepa s pridruženom širinom oplate  $b_E$

$A_S$ : Površina presjeka struka uzdužnjaka, [cm<sup>2</sup>]

$s$ : Razmak uzdužnjaka, [m]

$t_p$ : Debljina pridružene oplate, [mm]



Slika 4-11 Izgled krivulje  $\sigma - \varepsilon$  za slom putem torzijskog izvijanja

#### 4) Lokalno izvijanje struka običnih ukrepa sastavljenih od pojasnih profila

Ovaj način slamanja prate skraćeni uzdužno ukrepljeni paneli.

Izraz za naprezanje elementa:

$$\sigma = \Phi \cdot R_e^h \frac{10^3 \cdot b_E \cdot t_p + h_W \cdot t_W + b_E \cdot t_p}{10^3 \cdot s \cdot t_p + h_W \cdot t_W + b_E \cdot t_p} \text{ [N/mm}^2\text{]},$$

gdje je:

$\Phi$  : Granična funkcija

$b_E$ : Širina pridružene oplata, [m]

$h_W$ : Visina struka, [mm]

$t_W$ : Debljina struka, [mm]

$h_{WE}$ : Efektivna visina struka, [mm]:

$$h_{WE} = \left( \frac{2.25}{\beta_E} - \frac{1.25}{\beta_E^2} \right) h_W \quad \text{za} \quad \beta_E > 1.25$$

$$h_{WE} = h_W \quad \text{za} \quad \beta_E \leq 1.25$$



$\beta_E$ : Koeficijent

$$\beta_E = 10^3 \frac{h_W}{t_W} \sqrt{\frac{\varepsilon R_e^h}{E}}$$

$\varepsilon$ : Relativna deformacija

$s$ : Razmak uzdužnjaka, [m]

$t_p$ : Debljina pridružene oplata, [mm]

### 5) Lokalno izvijanje struka običnih ukrepa sastavljenih od ravnih profila

Također ovaj način slamanja prate skraćeni uzdužno ukrepljeni paneli.

Izraz za naprezanje elementa:

$$\sigma = \Phi \frac{A_S \cdot \sigma_C + 10 \cdot s \cdot t_p \cdot \sigma_{CP}}{A_S + 10 \cdot s \cdot t_p} \text{ [N/mm}^2\text{]},$$

gdje je:

$\Phi$ : Granična funkcija

$\sigma_{CP}$ : Naprezanje izvijanja sunosive širine opločenja, [N/mm<sup>2</sup>]:

$\sigma_C$ : Kritično naprezanje, [N/mm<sup>2</sup>]:

$$\sigma_C = \frac{\sigma_E}{\varepsilon} \quad \text{za} \quad \sigma_E \leq \frac{R_e^h}{2} \varepsilon$$

$$\sigma_C = R_e^h \left( 1 - \frac{\Phi R_e^h \varepsilon}{4\sigma_E} \right) \quad \text{za} \quad \sigma_E \leq \frac{R_e^h}{2} \varepsilon$$

$\sigma_E$ : Eulerovo lokalno naprezanje izvijanja, [N/mm<sup>2</sup>]:

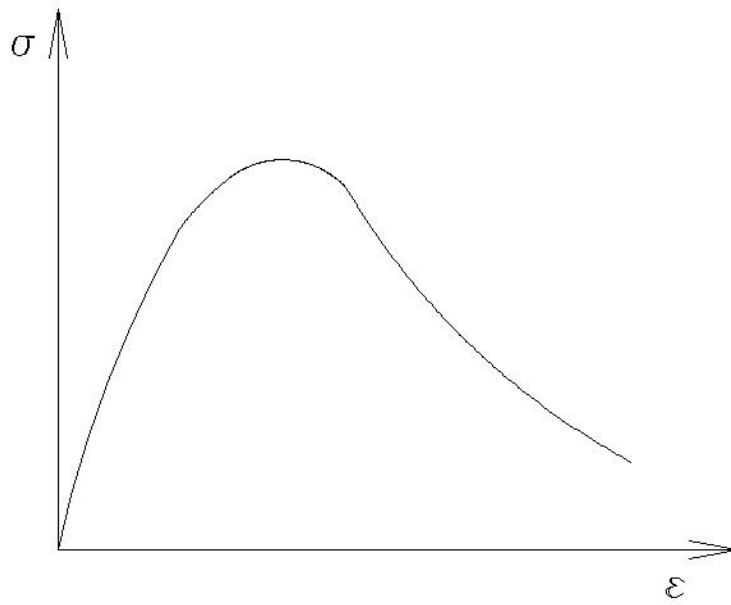
$$\sigma_E = 160\,000 \left( \frac{t_W}{h_W} \right)^2$$

$\varepsilon$ : Relativna deformacija

$A_S$ : Površina presjeka struka uzdužnjaka, [cm<sup>2</sup>]

$s$ : Razmak uzdužnjaka, [m]

$t_p$ : Debljina pridružene oplata, [mm]



Slika 4-12 Izgled krivulje  $\sigma - \varepsilon$  za slom putem lokalnog izvijanja struka običnih ukrepa

## 6) Izvijanje opločenja

Ovaj izraz opisuje način slamanja putem izvijanja poprečno ukrepljene oplata:

$$\sigma = R_e^h \left[ \frac{s}{l} \left( \frac{2.25}{\beta_E} - \frac{1.25}{\beta_E^2} \right) + 0.1 \left( 1 - \frac{s}{l} \right) \left( 1 + \frac{1}{\beta_E^2} \right)^2 \right], \quad [\text{N/mm}^2],$$

gdje je:

$s$ : Razmak rebara, [m]

$l$ : Duljina ploče, [m]

## 4.7 Algoritam numeričkog rješenja

Zakrivljenost izaziva aksijalne deformacije svakog strukturnog elementa trupa, čije vrijednosti ovise o vertikalnoj poziciji elementa. U slučaju progiba, strukturni elementi koji se nalaze iznad neutralne osi skraćuju se, dok se elementi ispod neutralne osi produljuju. Obrnuto je u slučaju pregiba. Kao što je već napomenuto, naprezanje kojemu je podvrgnut pojedini element određuje se pomoću krivulja „load – end shortening curves“ elementa. Te krivulje određuju ponašanje elementa u nelinearnom elasto – plastičnom području.

Raspored naprezanja svih elemenata koji čine poprečni presjek trupa određuje, za svaki korak, trenutnu neutralnu os budući da odnos naprezanja i deformacije  $\sigma - \varepsilon$  nije linearan. Nova neutralna os koja se odnosi na promatrani korak određuje se iterativnim putem, tako da se odredi ravnoteža između naprezanja koja djeluju u elementima strukture.

Kada je određena neutralna os i prema tome raspored naprezanja, moment savijanja  $M_i$  oko nove neutralne osi, koji odgovara zakrivljenosti u promatranom koraku  $\chi_i$ , dobije se zbrajanjem doprinosa momentu savijanja svakog elementa posebno.

Slijedeći su glavni koraci inkrementalno – iterativnog pristupa proračunu graničnog momenta savijanja:

1. Podjela poprečnog presjeka na elemente ukrepljenih panela
2. Određivanje neutralne osi za nedeformiranu strukturu
3. Definicija odnosa naprezanje – deformacija za sve elemente
4. Početak postupka određivanjem početne zakrivljenosti
5. Određivanje odgovarajućeg naprezanja za svaki element
6. Nalaženje nove neutralne osi postavljanjem uvjeta ravnoteže preko cijelog presjeka
7. Račun ukupnog momenta savijanja zbrajanjem doprinosa svih elemenata momentu savijanja

Početna se zakrivljenost dobije iz izraza:

$$\chi_0 = 0.01 \cdot \varepsilon_Y ,$$

gdje je  $\varepsilon_Y$  deformacija popuštanja.

Deformacija popuštanja:

$$\varepsilon_Y = \frac{R_e^h}{E}$$

Postavljanje ravnoteže naprezanja preko cijelog poprečnog presjeka trupa izvodi se tako da sila koju uzrokuje naprezanje u elementima iznad neutralne osi bude jednaka sili koju izaziva naprezanje u elementima ispod neutralne osi.

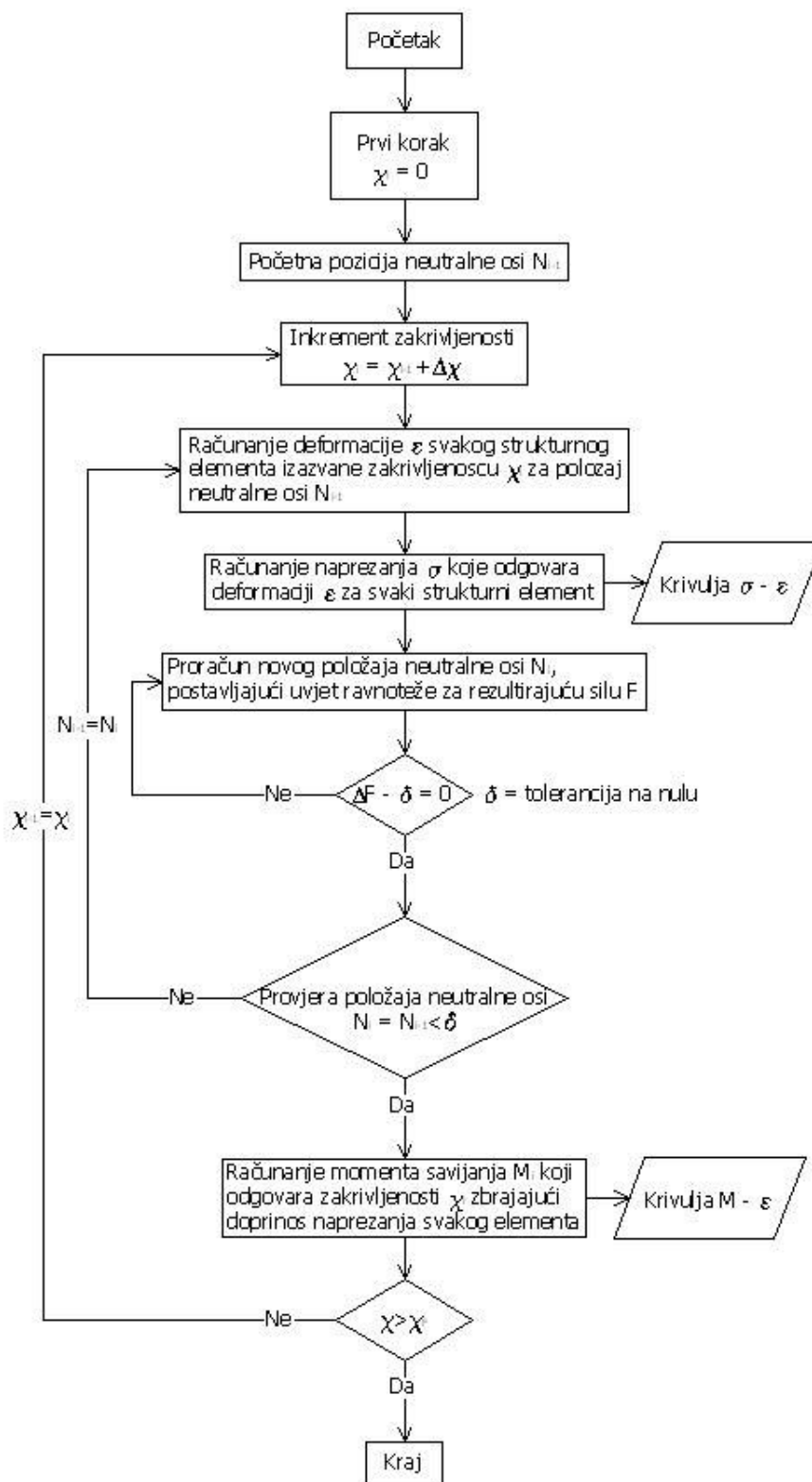
Jednadžba uvjeta ravnoteže:

$$\sum A_i \sigma_i = \sum A_j \sigma_j, \quad [\text{N}],$$

gdje je  $i$  indeks elemenata ispod, a  $j$  indeks elemenata iznad neutralne osi.

Kada je izračunata neutralna os za pojedini korak, treba zbrojiti doprinos naprezanja svih elemenata presjeka ukupnom momentu savijanja, prema izrazu:

$$M_U = \sum \sigma_{Ui} A_i |z_i - z_{NOi}|, \quad [\text{Nm}]$$



Slika 4-13 Algoritam numeričkog rješenja proračuna graničnog momenta savijanja

## 5 Usporedba granične čvrstoće na osnovi nominalnih i stvarnih vrijednosti mehaničkih svojstava čelika

Proračuni u ovom poglavlju su se proveli pomoću računalnog programa *MARS 2000*, klasifikacijskog društva Bureau Veritas. U njemu su implementirana pravila za konstrukciju broda te numerički kôd, na osnovi inkrementalno-iterativne metode, za proračun granične čvrstoće. U programu je prije svega potrebno definirati geometriju glavnog rebra, zatim karakteristike materijala, te projektna opterećenja, momente i sile. Program računa geometrijske karakteristike poprečnog presjeka moment otpora, moment inercije, udaljenost neutralne osi i površinu. Definiranu konstrukciju uspoređuje sa minimalnim dopuštenim vrijednostima i daje ocjenu krutosti svih strukturnih elemenata. Nadalje, računa uzdužnu čvrstoću broda na osnovi definirane geometrije i materijala, te projektnih i proračunskih opterećenja koja su određena pravilima registra.

Prvi proračun je proveden sa nominalnom vrijednosti običnog brodograđevnog čelika, oznake A, granice razvlačenja  $R_e^h = 235 \text{ N/mm}^2$ , a drugi sa eksperimentalno utvrđenom vrijednosti granice razvlačenja, za limove  $R_e^h = 337 \text{ N/mm}^2$  i profile  $R_e^h = 317 \text{ N/mm}^2$ .

## 5.1 Glavne karakteristike broda

U tablici su prikazane opće karakteristike projekta na kojem je baziran proračun uzdužne i granične čvrstoće. Osim glavnih dimenzija dani su projektni momenti savijanja.

Tablica 5-1 Glavne karakteristike broda

Tip broda	Brod za prijevoz rasutog tereta
Proračunska duljina	180.614 m
Širina	32.240 m
Proračunski gaz	12.350 m
Visina	17.100 m
Koeficijent punoće	0.832
Nosivost	52 000 t
Područje plovidbe	Neograničeno

Momenti savijanja na mirnoj vodi iznose:

Pregib: 1275300 kNm

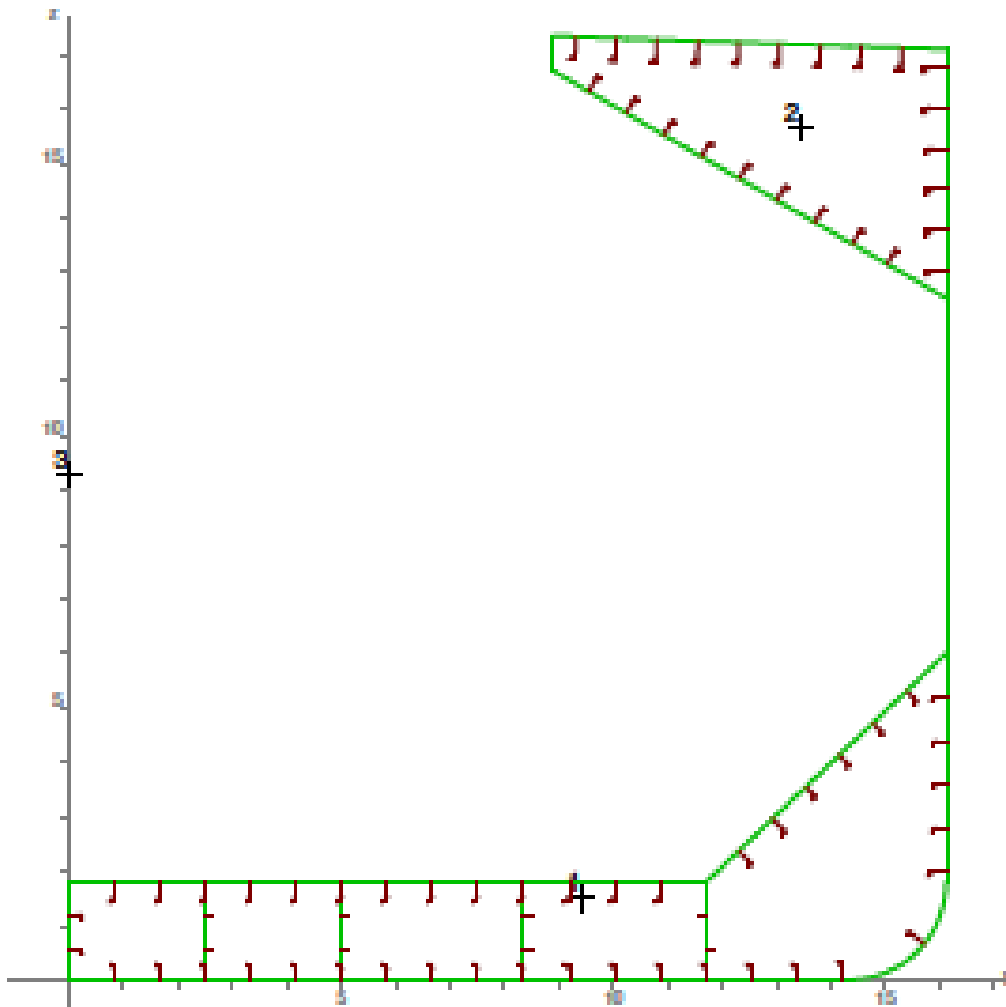
Progib: 1275300 kNm

Razmaci rebara u području skladišta tereta:

$$s = 0.835 \text{ m}$$

## 5.2 Karakteristike poprečnog presjeka

Na slici 5-1 je prikazana geometrija glavnog rebra. Različitim bojama program MARS 2000 prikazuje različite materijale korištene u konstrukciji. I limovi i profili su prikazani jednom bojom, što pokazuje pristup projektiranju glavnog rebra za potrebe ove usporedbe. Naime, svi pojasevi su, bez razlike, izgrađeni od materijala nominalnih karakteristika u prvom proračunu, odnosno, materijala stvarnih karakteristika u drugom proračunu. Na taj način je postignuta zornija usporedba ova dva proračuna. U stvarnoj konstrukciji bi se vjerovatno pribjeglo korištenju čelika povišene čvrstoće, napose u palubnom pojasu. Time bi se izbjegli nepotrebno veliki profili opločenja palube, a bilo bi moguće smanjiti i debljine limova palube i završnog voja.



Slika 5-1 Geometrija glavnog rebra u programu MARS 2000



U nastavku su prikazane brojčane vrijednosti geometrijskih karakteristika. U ovisnosti o kriterijima pravila Registra, proračuni se provode sa bruto i neto izmjerama. Bruto izmjere uzimaju u obzir dodatak za koroziju. Za proračune dimenzija vojeva i ukrepa, koje uključuju proračun zamora strukturnih detalja, te za proračun granične čvrstoće broskog trupa kao grede koriste se neto izmjere. Bruto izmjere se koriste za proračun uzdužne čvrstoće – momenata otpora i provjeru pojave tečenja materijala. Program automatski računa neto vrijednosti iz definiranih bruto vrijednosti.

- **Bruto izmjere**

Tablica 5-2 Površina (bruto) poprečnog presjeka od čelika nominalnih svojstava [m<sup>2</sup>]

<b>Površina poprečnog presjeka</b>	<b>Čelik A235</b>
<b>Vojevi</b>	3.047576
<b>Uzdužnjaci</b>	0.874077
<b>Ukupno</b>	3.921653

Tablica 5-3 Površina (bruto) poprečnog presjeka od čelika stvarnih svojstava [m<sup>2</sup>]

<b>Površina poprečnog presjeka</b>	<b>Čelik 317</b>	<b>Čelik 337</b>	<b>Ukupno</b>
<b>Vojevi</b>	0	3.047576	3.047576
<b>Uzdužnjaci</b>	0.874077	0	0.874077
<b>Ukupno</b>	0.874077	3.047576	3.921653

Tablica 5-4 Geometrijske karakteristike poprečnog presjeka (bruto izmjere)

<b>Veličina</b>	<b>Iznos</b>	<b>Jedinica</b>
Geometrijska površina poprečnog presjeka	3.921653	m <sup>2</sup>
Efektivna površina	3.921653	m <sup>2</sup>
Moment površine oko neutralne osi	12.465680	m <sup>3</sup>
Moment površine oko simetralne osi	20.743200	m <sup>3</sup>
Moment inercije za os y	183.261700	m <sup>4</sup>
Moment inercije za os z	531.035100	m <sup>4</sup>
Položaj neutralne osi (iznad osnovice)	6.76189	m
Moment otpora palube (17.100 m)	17.726810	m <sup>3</sup>
Moment otpora dna (0.000 m)	27.102130	m <sup>3</sup>

Ove značajke su (osim geometrijske površine) efektivne vrijednosti pod pretpostavkom homogenog materijala modula elastičnosti od 206000 (N/mm<sup>2</sup>).

U tablicama 5-5 i 5-6 su prikazani svi konstruktivni elementi glavnog rebra.

Tablica 5-5 Profili

Tip	Dimenzije	Broj
flat	150 × 12.0	16
bulb	430 × 17.0	4
bulb	430 × 15.0	8
bulb	400 × 16.0	10
bulb	370 × 15.0	12
bulb	360 × 13.0	26
bulb	340 × 14.0	2
bulb	340 × 12.0	4
bulb	280 × 12.0	4
bulb	320 × 12.0	12
bulb	300 × 13.0	40
bulb	300 × 11.0	6
bulb	280 × 12.0	4
bulb	260 × 12.0	12
bulb	240 × 10.0	2

Tablica 5-6 Vojevi

Debljina [mm]	Duljina [m]
26.000	43.470
22.500	3.820
22.000	5.614
21.000	5.100
20.500	12.820
20.000	5.480
19.000	11.060
18.500	19.560
17.500	12.816
17.000	13.188
16.000	3.600
14.500	1.800
11.500	10.800

- **Neto izmjere**

Tablica 5-7 Površina (neto) poprečnog presjeka od čelika nominalnih svojstava [m<sup>2</sup>]

<b>Površina poprečnog presjeka</b>	<b>Čelik A235</b>
<b>Vojevi</b>	2.754149
<b>Uzdužnjaci</b>	0.797776
<b>Ukupno</b>	3.551925

Tablica 5-8 Površina (neto) poprečnog presjeka od čelika stvarnih svojstava [m<sup>2</sup>]

<b>Površina poprečnog presjeka</b>	<b>Čelik 317</b>	<b>Čelik 337</b>	<b>Ukupno</b>
<b>Vojevi</b>	0	2.754149	2.754149
<b>Uzdužnjaci</b>	0.797776	0	0.797776
<b>Ukupno</b>	0.797776	2.754149	3.551925

Tablica 5-9 Geometrijske karakteristike poprečnog presjeka (neto izmjere)

<b>Veličina</b>	<b>Iznos</b>	<b>Jedinica</b>
Geometrijska površina poprečnog presjeka	3.551925	m <sup>2</sup>
Efektivna površina	3.551925	m <sup>2</sup>
Moment površine oko neutralne osi	11.349740	m <sup>3</sup>
Moment površine oko simetralne osi	18.782190	m <sup>3</sup>
Moment inercije za os y	167.126100	m <sup>4</sup>
Moment inercije za os z	480.722700	m <sup>4</sup>
Položaj neutralne osi (iznad osnovice)	6.78801	m
Moment otpora palube (17.100 m)	16.206980	m <sup>3</sup>
Moment otpora dna (0.000 m)	24.620770	m <sup>3</sup>

Ove značajke su (osim geometrijske površine) efektivne vrijednosti pod pretpostavkom homogenog materijala modula elastičnosti od 206000 (N/mm<sup>2</sup>).

Tablica 5-10 Moment otpora i inercije

<b>Vertikalni moment savijanja</b>			
Položaj presjeka po duljini broda, X	90.300 [m]		
Minimalni moment otpora glavnog rebra (k=1)	13.697 [m <sup>3</sup> ]		
<b>Zahtjevani momenti otpora</b>			
	Paluba [m <sup>3</sup> ]	Dno [m <sup>3</sup> ]	
Minimalni moment otpora	9.8619	9.8619	
<i>Neoštećeno stanje</i>			
Na osnovi projektnog B.M. <sup>4</sup> u pregibu (2 845 669 kNm)	10.7836	10.7836	
Na osnovi projektnog B.M. u progibu (-2 949 380 kNm)	11.1766	11.1766	
<i>Naplavljeno stanje</i>			
Na osnovi B.M. za oštećeno stanje u pregibu (1 256 295 kNm)	4.7607	4.7607	
Na osnovi B.M. za oštećeno stanje u progibu (-1 339 264 kNm)	5.0751	5.0751	
Zahtjevani moment otpora	11.1766	11.1766	
<b>Provjera momenata otpora i momenata tromosti</b>			
	Zahtjev	Stvarno	
Paluba ( z = 17.100 m)	11.1766	16.2070	
Dno ( z = 0.000 m)	11.1766	24.6208	
Moment tromosti	74.2162	167.1261	
<b>Provjera neto/bruto momenta otpora</b>			
	Bruto	Neto	%
Paluba ( z = 17.100 m)	17.7268	16.2070	91.4
Dno ( z = 0.000 m)	27.1021	24.6208	90.8

<sup>4</sup> eng. *Bending Moment* - moment savijanja

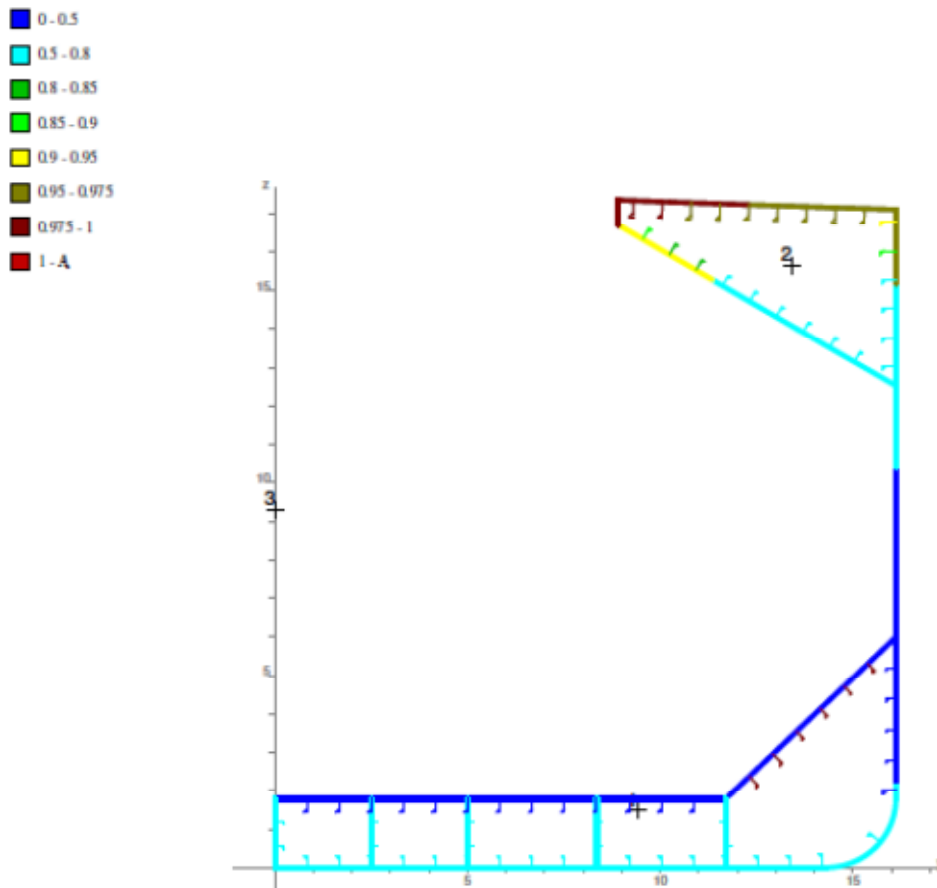
### 5.3 Proračun granične čvrstoće na osnovi nominalnih vrijednosti mehaničkih svojstava čelika

U tablici 5-11 su prikazana opterećenja broskog trupa s kojima se provodio proračun granične čvrstoće na osnovi nominalnih vrijednosti mehaničkih svojstava čelika. Slika 5-2 prikazuje omjere naprezanja pojedinih panela glavnog rebra za zadana opterećenja i definiranu konstrukciju. Dvije nijanse plave boje sugeriraju najmanje opterećenje presjeka. S druge strane, potpuno očekivano, vojevi palube i praznice grotla su najopterećenije, budući da ovaj dio ima najmanju geometrijsku krutost.

Tablica 5-11 Opterećenje broskog trupa kao grede na osnovi nominalnih vrijednosti mehaničkih svojstava čelika

<b>Vertikalni moment savijanja</b>		
	Pregib (kNm)	Progib (kNm)
S.W.B.M <sup>5</sup> . Procjena brodograditelja	1 275 300	1 275 300
S.W.B.M. Preliminarna vrijednost na gl. rebru	1 092 940	989 229
S.W.B.M. Preliminarna vrijednost na X = 90.3 m	1 092 940	989 229
Vertikalni moment savijanja od valova (pravila) X = 90.3 m	1 570 369	1 570 369
<b>Projektna opterećenja trupa na X = 90.3 m</b>		
	Pregib (kNm)	Progib (kNm)
S.W.B.M - $M_{SW}$	1 275 300	1 275 300
Moment savijanja od valova (pravila) - $M_w$	1 570 369	1 674 080
Horizontalni moment savijanja od valova	1 235 738	
	Pozitivna (kN)	Negativna (kN)
Verikalna poprečna sila na mirnoj vodi	0	
Verikalna poprečna sila od valova	17 695	17 695
<b>Dozvoljene verikalne poprečne sile (kN)</b>		
Ukupna dozvoljena verikalna poprečna sila	58 428.	
Pozitivna dozvoljena verikalna poprečna sila	40 733	
Negativna dozvoljena verikalna poprečna sila	40 733	

<sup>5</sup> eng. *Still Water Bending Moment* - moment savijanja na mirnoj vodi,



Slika 5-2 Uzdužna čvrstoća broda

U tablici 5-12 prikazani su rezultati proračuna granične čvrstoće.  $M_u^6$  je granični moment kod kojeg dolazi do početka sloma konstrukcije. Taj moment predstavlja maksimum krivulje u dijagramu  $M - \chi$ . Registar kao mjerodavni granični moment uzima maksimalni moment u linearnom dijelu dijagrama, za sva stanja eksploatacije, te je s njim je računat faktor sigurnosti u zadnjem poglavlju.  $M_b$  se odnosi na ukupni projektni moment savijanja dobiven, prema pravilima registra, po formuli:

$$M_b = M_{SW} + \gamma_W \cdot M_w$$

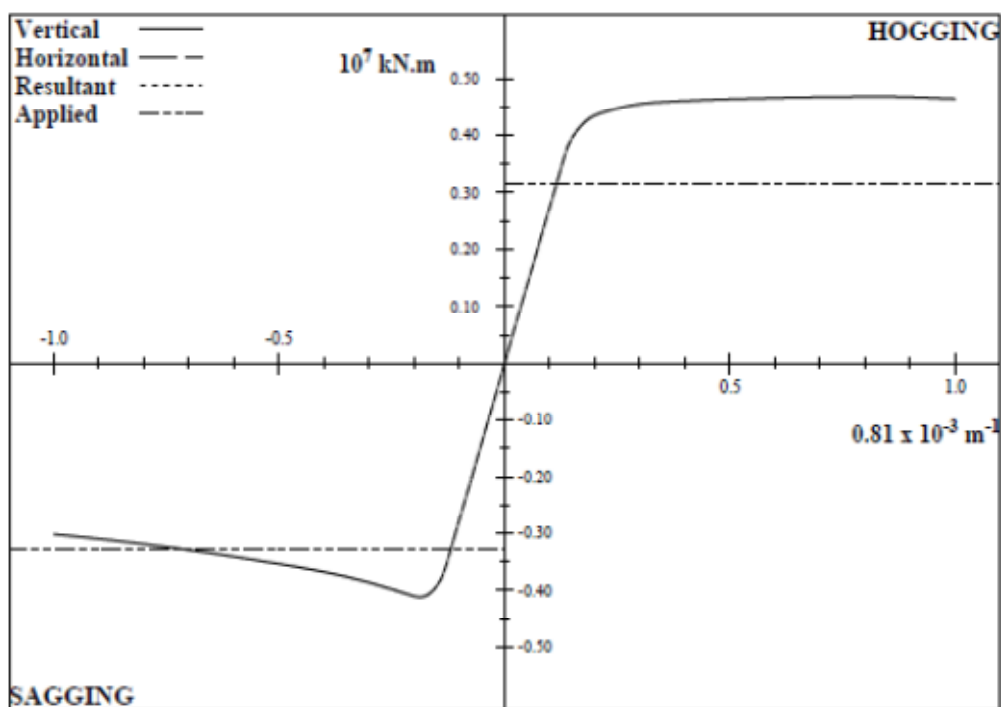
gdje je:

$\gamma_W = 1.2$  - faktor sigurnosti za moment savijanja od valova

<sup>6</sup> eng. *ultimate hull girder bending moment capacity*

Tablica 5-12 Provjera granične čvrstoće (proračun po pravilima registra) na osnovi nominalnih vrijednosti mehaničkih svojstava čelika

<b>Opcije proračuna</b>				
Izmjere		Neto (sa dodatkom za koroziju x 0.5)		
Rješenje		Standardna kontrola		
Moment		Fiksni horizontalno/vertikalni omjer		
Omjer		0.00		
<b>Moment savijanja [kNm]</b>		<b>Pregib</b>		<b>Progib</b>
$M_u$		4 689 207		- 4 116 277
		<b>Granični</b>	$M_b$	<b>%</b>
Navigacija	Pregib	4 262 915	3 159 743	74.12
	Progib	- 3 742 070	- 3 284 196	87.76
Luka	Pregib	4 262 915	2 971 299	69.70
	Progib	- 3 742 070	- 3 083 307	82.40
Oštećeno	Pregib	4 262 915	1 507 554	35.36
	Progib	- 3 742 070	- 1 607 117	42.95



Slika 5-3 Dijagram momenta savijanja u ovisnosti o zakrivljenosti trupa  $M - \chi$

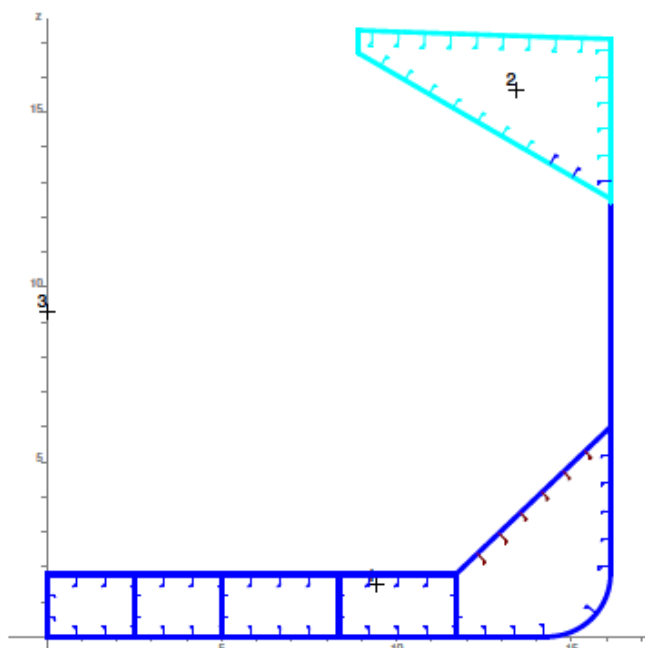
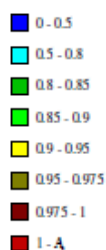
## 5.4 Proračun granične čvrstoće na osnovi stvarnih vrijednosti mehaničkih svojstava čelika

U tablici 5-13 su prikazana opterećenja broskog trupa s kojima se provodio proračun granične čvrstoće na osnovi stvarnih vrijednosti mehaničkih svojstava čelika. Slika 5-3 prikazuje omjere naprezanja pojedinih panela glavnog rebra za zadana opterećenja i definiranu konstrukciju. Za razliku od prethodne slike, uočava se smanjenje razlika naprezanja između pojaseva palube i dna. Dakle, povećanjem svojstava materijala povećala se krutost i tako nadomjestila prethodni nedostatak geometrijske krutosti.

Tablica 5-13 Opterećenje broskog trupa kao grede na osnovi stvarnih vrijednosti mehaničkih svojstava čelika

<b>Vertikalni moment savijanja</b>		
	Pregib (kNm)	Progib (kNm)
S.W.B.M. Procjena brodograditelja	1 275 300	1 275 300
S.W.B.M. Preliminarna vrijednost na gl. rebro	1 092 940	989 229
S.W.B.M. Preliminarna vrijednost na X = 90.3 m	1 092 940	989 229
Vertikalni moment savijanja od valova (pravila) X = 90.3 m	1 570 369	1 570 369
<b>Projektna opterećenja trupa na X = 90.3 m</b>		
	Pregib (kNm)	Progib (kNm)
S.W.B.M - $M_{SW}$	1 275 300	1 275 300
Moment savijanja od valova (pravila) - $M_w$	1 570 369	1 674 080
Horizontalni moment savijanja od valova	1 235 738	
	Positive (kN)	Negative (kN)
Verikalna poprečna sila na mirnoj vodi	0	
Verikalna poprečna sila od valova	17 695	17 695
<b>Dozvoljene Verikalne poprečne sile (KN)</b>		
Ukupna dozvoljena verikalna poprečna sila	78 217	
Pozitivna dozvoljena verikalna poprečna sila	60 522	
Negativna dozvoljena verikalna poprečna sila	60 522	

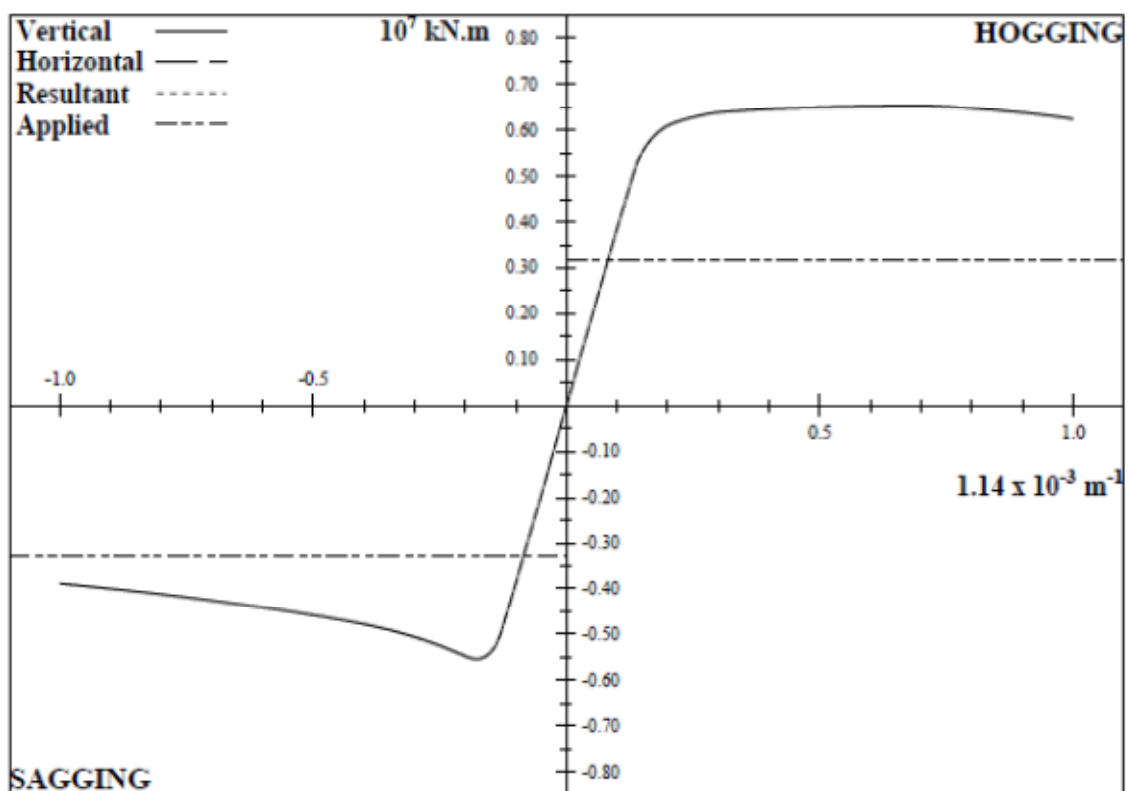




Slika 5-4 Uzdužna čvrstoća broda na osnovi stvarnih vrijednosti mehaničkih svojstava ugrađenog čelikačelika

Tablica 5-14 Provjera granične čvrstoće (proračun po pravilima registra) na osnovi stvarnih vrijednosti mehaničkih svojstava čelika

<b>Opcije proračuna</b>				
Izmjere		Neto (sa dodatkom za koroziju x 0.5)		
Rješenje		Standardna kontrola		
Moment		Fiksni horizontalno/vertikalni omjer		
Omjer		0.00		
<b>Moment savijanja [kNm]</b>		Pregib		Progib
$M_u$		6 540 476		- 5 541 810
		Granični	Mb	%
Navigacija	Pregib	5 945 887	3 159 743	53.14
	Progib	- 5 038 009	- 3 284 196	97.17
Luka	Pregib	5 945 887	2 971 299	64.88
	Progib	- 5 038 009	- 3 083 307	91.23
Oštećeno	Pregib	5 945 887	1 507 554	32.92
	Progib	- 5 038 009	- 1 607 117	47.55



Slika 5-5 Dijagram momenta savijanja u ovisnosti o zakrivljenosti trupa  $M - \chi$  na osnovi stvarnih mehaničkih svojstava ugrađenog čelika

## 5.5 Usporedba rezultata

U tablici 5-15 su prikazana povećanja granične čvrstoće i faktora sigurnosti na osnovi stvarnih karakteristika materijala u odnosu na nominalne. Evidentno je da su ova povećanja proporcionalna razlici mehaničkih svojstava materijala.

Tablica 5-15 Usporedba rezultata proračuna na temelju nominalnih i stvarnih mehaničkih svojstava materijala

		<b>A235</b>	<b>A317/A337</b>	<b>nominalno/stvarno [%]</b>	<b>Faktor povećanja</b>
<b>Dozvoljena vertikalna poprečna sila [kN]</b>	Ukupna	58428	78217	74.7	1.339
	Pozitivna	40733	60522	67.3	1.486
	Negativna	40733	60522	67.3	1.486
<b>Moment savijanja <math>M_b</math> [kNm]</b>	Pregib	3159743	3159743	100.0	1.000
	Progib	-3284196	-3284196	100.0	1.000
<b>Granični moment Savijanja <math>M_u</math> [kNm]</b>	Pregib	4262915	5945887	71.7	1.395
	Progib	-3742070	-5038009	74.3	1.346
<b>Faktor sigurnosti <math>\gamma</math></b>	Pregib	1.349	1.882	71.7	1.395
	Progib	1.139	1.534	74.3	1.346

## 6 Zaključak

Rezultati istraživanja, provedenog pri izradi ovog rada, su potvrdili polaznu tezu o višim stvarnim vrijednostima mehaničkih svojstava od nominalnih. Uz zanemarenje razlika rezultata među pojedinim grupama uzoraka na kojima su se provela ispitivanja, može se utvrditi da su stvarne vrijednosti granice razvlačenja brodograđevnog čelika veće od nominalnih, načelno, za jednu trećinu. Dapače, srednja vrijednost dobivena eksperimentom nadmašuje čak i nominalnu vrijednost čelika povišene čvrstoće oznake AH32. Ta spoznaja nameće potrebu da se nekim budućim eksperimentom istraži stvarna vrijednost ovoga čelika. Iznos vlačne čvrstoće nalazi se u nominalnim granicama. Iz dobivenih grafova statičkog pokusa se vidi da plastično područje ima izraženija odstupanja, a time i iznos vlačne čvrstoće. To upućuje na nelinearno deformiranje materijala u plastičnom području, te je zbog toga teško odrediti jedinstvenu nominalnu vrijednost vlačne čvrstoće, već je ona dana nekim rasponom.

Razlike među grupama uzoraka su male i zaključuje se da je ovisnost mehaničkih svojstava o tehnologiji izrade i o smjeru valjanja limova odnosno profila zanemariva.

Usporedba napravljena u zadnjem poglavlju daje jedan sasvim općeniti uvid u povećanje uzdužne i granične čvrstoće. Budući da je projektant dužan proračunavati čvrstoću sa nominalnim vrijednostima, spoznaja o većim stvarnim vrijednostima povećava marginu sigurnosti. S druge strane, postoji mogućnost snižavanja faktora sigurnosti.

Treba naglasiti da rezultate dobivene i obrađene u ovom radu treba uzeti sa rezervom i prihvatiti ih više kao orijentir za neka buduća istraživanja. Osnovni razlog jest nedovoljna ispitna količina uzoraka koja bi dala neku pouzdaniju statistiku. S druge strane, potpuniju sliku o utjecajima ugrađenog čelika dalo bi istraživanje koje bi obuhvatilo i druge tipove eksperimenata osim statičkog vlačnog pokusa.

## Literatura

- [1] VANDERHORN E., WANG.G.: A statistical study on the material properties of shipbuilding steels; Volume 1: Sustainable Maritime Transportation and Exploitation of Sea Resources; 14<sup>th</sup> international congress of the International Maritime Assosiation of the Mediterranean (IMAM), str. 371 – 378, Genova, 2011.
- [2] FRANZ M.: Mehanička svojstva materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 1998.
- [3] ŽIHA K.: Digitalni udžbenik iz Konstrukcije broda, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2003.
- [4] ŽIHA K., PARUNOV J., TUŠEK B.: Granična čvrstoća broskog trupa, Brodogradnja, br. 58, str. .29-41, Zagreb, 2007.
- [5] TUŠEK B.: Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2005.
- [6] BV.: Common structural rules for bulk carriers, Paris, 2009.