

# Procjena mjerne nesigurnosti rezultata statičkog vlačnog ispitivanja

---

**Jokić, Denis**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2016**

*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:235:752364>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-18**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Denis Jokić**

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

Mentor:

Doc. dr. sc. Željko Alar, dipl. ing.

Student:

Denis Jokić

Zagreb, 2016.

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

Ovom prilikom iznimno se zahvaljujem mentoru doc. dr. sc. Željku Alaru na savjetima i stručnom vodstvu tijekom izrade diplomskog rada.

Isto tako zahvaljujem se tehničkom suradniku Ivanu Martinku na pomoći tijekom provođenja eksperimentalnog dijela zadatka u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava.

Zahvaljujem se i gospođi Mariji Kekić iz laboratorija za mehanička ispitivanja tvrtke ZIT d.o.o. na pomoći tijekom izvođenja eksperimentalnog dijela te ostalim djelatnicima tvrtke na pruženoj pomoći i ustupljenim materijalima potrebnim za izradu ovog rada.

Posebno se zahvaljujem roditeljima i sestri na beskrajnom strpljenju, razumijevanju i podršci tijekom svih ovih godina studija.

Denis Jokić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala i mehatronika i robotika

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

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **DENIS JOKIĆ** Mat. br.: 0035173715

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **PROCJENA MJERNE NESIGURNOSTI REZULTATA STATIČKOG VLAČNOG ISPITIVANJA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **ESTIMATION OF MEASURING UNCERTENTY FOR RESULTS OF STATIC TENSILE TESTING**

Opis zadatka:

Statičko vlačno ispitivanje je temeljno ispitivanje svojstava materijala a dobiveni rezultati se primjenjuju kod izbora materijala za određeni proizvod, kontrolu kvalitete i predviđanje kako će se materijal ponašati pod opterećenjem. Pri provedbi statičkog vlačnog ispitivanja pojavljuje se čitav niz utjecajnih veličina na rezultate ispitivanja, te se zbog toga rezultatu pridružuje određena procijenjena vrijednost mjerne nesigurnosti.

U radu je potrebno sljedeće:

1. Opisati metodu statičkog vlačnog ispitivanja sukladno normi HRN EN ISO 6892-1.
2. Opisati metode procjene mjerne nesigurnosti.
3. Eksperimentalno provesti statičko vlačno ispitivanje na ispitnim uzorcima od čelika i odrediti utjecajne veličine na pojedino mehaničko svojstvo.
4. Izraditi model procjene mjerne nesigurnosti za pojedino mehaničko svojstvo.
5. Analizirati dobivene rezultate.
6. Donijeti odgovarajuće zaključke.

Zadatak zadan:

5. svibnja 2016.

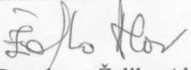
Rok predaje rada:

7. srpnja 2016.

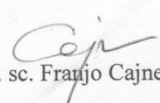
Predviđeni datum obrane:

13., 14. i 15. srpnja 2016.

Zadatak zadao:

  
Doc.dr.sc. Željko Alar

Predsjednik Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Franjo Cajner

# SADRŽAJ

POPIS SLIKA .....	I
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA .....	IV
SAŽETAK.....	VI
ABSTRACT .....	VII
1. UVOD .....	1
2. STATIČKO VLAČNO ISPITIVANJE PREMA NORMI HRN EN ISO 6892-1: 2009 [1] .....	2
2.1. Pojmovi i definicije .....	2
2.2. Oblik i dimenzije ispitnog uzorka .....	4
2.2.1. Priprema ispitnih uzoraka.....	5
2.2.2. Tolerancije dimenzije uzoraka i oblika .....	6
2.3. Brzine ispitivanja.....	7
2.4. Određivanje parametara ispitivanja.....	10
2.5. Mjerna nesigurnost .....	13
3. MJERNA NESIGURNOST .....	14
3.1. Mjera .....	14
3.2. Definicija mjerne nesigurnosti .....	14
3.3. Pogreška i nesigurnost.....	15
3.4. Izvor pogrešaka i nesukladnosti .....	15
3.5. Osnovni statistički parametri.....	16
3.5.1. Aritmetička sredina .....	16
3.5.2. Standardna devijacija .....	17
3.6. Rasipanje rezultata .....	19
3.6.1. Normalna distribucija .....	19

3.6.2.	Pravokutna distribucija.....	20
3.7.	Proračun mjerne nesigurnosti GUM metodom .....	21
3.7.1.	Određivanje standardnih nesigurnosti A i B vrste .....	21
3.7.2.	Određivanje sastavljene standardne nesigurnosti.....	23
3.7.3.	Određivanje proširene nesigurnosti [4].....	24
3.8.	Metode procjene nesigurnosti prema normi HRN EN ISO 6892-1:2009[1].....	24
3.8.1.	Parametri ovisni o materijalu i/ili proceduri ispitivanja.....	27
3.9.	Procjena mjerne nesigurnosti prema [5].....	28
4.	EKSPERIMENTALNI DIO.....	33
4.1.	Ispitni uzorci.....	33
4.2.	Statičko vlačno ispitivanje u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava.....	34
4.2.1.	Rezultati ispitivanja.....	37
4.2.2.	Procjena mjerne nesigurnosti .....	40
4.3.	Statičko vlačno ispitivanje u tvrtki ZIT d.o.o.....	44
4.3.1.	Rezultati ispitivanja.....	47
4.3.2.	Procjena mjerne nesigurnosti .....	50
5.	ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA.....	53
5.1.	Analiza mjesta loma .....	53
5.2.	Analiza rezultata statičkog vlačnog ispitivanja .....	54
5.2.1.	Analiza rezultata mjerenja vlačne čvrstoće i konvencionalne granice razvlačenja .....	54
5.2.2.	Analiza mjerne nesigurnosti istezanja i suženja.....	57
6.	ZAKLJUČAK .....	59
7.	LITERATURA.....	60
	PRILOZI.....	61

## POPIS SLIKA

Slika 1. Strojno obrađeni ispitni uzorak [1] .....	5
Slika 2. Strojno neobrađeni ispitni uzorci [1] .....	6
Slika 3. Određivanje granice razvlačenja [1] .....	11
Slika 4. Određivanje granice razvlačenja kada nije jasno definiran linearni dio krivulje [1] ..	11
Slika 5. Primjer očitavanja i njihove srednje vrijednosti [2].....	17
Slika 6. Primjer normalne distribucije.....	19
Slika 7. Utjecaj parametara očekivanja i varijance na oblik krivulje.....	20
Slika 8. Primjer uniformne distribucije .....	20
Slika 9. odnos između ulaznih veličina i tražene veličine [4].....	21
Slika 10. Studentova razdioba [4] .....	22
Slika 11. Pravokutna razdioba[4] .....	23
Slika 12. Simetrična trokutasta razdioba[4] .....	23
Slika 13. Certifikat materijala ispitivanja.....	33
Slika 14. Ispitni uzorci .....	34
Slika 15. Kidalica WPM Leipzig EU 40 mod .....	35
Slika 16. Ekstenzometar MFA 2 .....	35
Slika 17. Označavanje ispitnog uzorka .....	36
Slika 18. Dijagram sila-produljenje za uzorak 3 .....	39
Slika 19. Dijagram sila-produljenje za uzorak 6 .....	39
Slika 20. Dijagram sila- produljenje za uzorak 8 .....	40
Slika 21. Kidalica 30 TUz 757 .....	44
Slika 22. Brzina ispitivanja .....	45
Slika 23. Postavljeni uzorak u ekstenzometar .....	45
Slika 24. Označavanje duljine ispitivanja .....	46
Slika 25. Dijagram sila-produljenje za uzorak 6 .....	49
Slika 26. Dijagram sila-produljenje za uzorak 9 .....	49
Slika 27. Dijagram sila-produljenje za uzorak 10 .....	50
Slika 28. Ispitni uzorci iz Laboratorija FSB-a.....	53
Slika 29. Ispitni uzorci iz tvrtke ZIT d.o.o. ....	53



Slika 30. Dijagramski prikaz iznosa vlačne čvrstoće za uzorke ispitane na dvije različite kidalice .....	55
Slika 31. Dijagramski prikaz iznosa konvencionalne granice razvlačenja za uzorke ispitane na dvije različite kidalice .....	55
Slika 32. Dijagramski prikaz srednje vrijednosti vlačne čvrstoće i pripadajuće mjerne nesigurnosti .....	56
Slika 33. Dijagramski prikaz srednje vrijednosti konvencionalne granice razvlačenja i pripadajuće mjerne nesigurnosti.....	56
Slika 34. Dijagramski prikaz iznosa istežanja za pojedine uzorke iz oba ispitna laboratorija.	57
Slika 35. Dijagramski prikaz iznosa suženja za pojedine uzorke iz oba ispitna laboratorija...	57
Slika 36. Dijagramski prikaz srednje vrijednosti istežljivosti nakon loma i pripadajuće mjerne nesigurnosti .....	58
Slika 37. Dijagramski prikaz srednje vrijednosti kontrakcije i pripadajuće mjerne nesigurnosti .....	58

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Tolerancije poprečnih dimenzija ispitnih uzoraka [1].....	7
Tablica 2. Brzine naprezanja [1] .....	9
Tablica 3. Doprinosi nesigurnosti ispitnih rezultata [1].....	25
Tablica 4. Primjeri doprinosa nesigurnosti za različite rezultate ispitivanja, zbog mjerne opreme [1] .....	25
Tablica 5. Primjeri sastavljene nesigurnosti [1] .....	26
Tablica 6. Primjeri za 95 % razinu pouzdanosti, $k = 2$ prema tablici 5. [1].....	27
Tablica 7. Dimenzije uzoraka prije ispitivanja.....	37
Tablica 8. Dimenzije uzoraka nakon loma .....	37
Tablica 9. Rezultati ispitivanja svojstava materijala .....	38
Tablica 10. Utjecajne veličine na pojedino mehaničko svojstvo .....	40
Tablica 11. Proračun nesigurnosti površine poprečnog presjeka .....	41
Tablica 12. Proračun mjerne nesigurnosti vlačne čvrstoće .....	41
Tablica 13. Proračun mjerne nesigurnosti granice plastičnog razvlačenja .....	42
Tablica 14. Proračun mjerne nesigurnosti postotnog produljenja .....	42
Tablica 15. Proračun mjerne nesigurnosti konačnog poprečnog presjeka .....	43
Tablica 16. Proračun mjerne nesigurnosti postotnog smanjena površine .....	43
Tablica 17. Dimenzije epruveta prije ispitivanja .....	47
Tablica 18. Dimenzije uzoraka nakon loma .....	48
Tablica 19. Rezultati ispitivanja svojstava materijala .....	48
Tablica 20. Proračun nesigurnosti površine poprečnog presjeka .....	50
Tablica 21. Proračun mjerne nesigurnosti vlačne čvrstoće .....	51
Tablica 22. Proračun mjerne nesigurnosti granice plastičnog razvlačenja .....	51
Tablica 23. Proračun mjerne nesigurnosti postotnog produljenja .....	51
Tablica 24. Proračun mjerne nesigurnosti konačnog poprečnog presjeka .....	52
Tablica 25. Proračun mjerne nesigurnosti postotnog smanjena površine .....	52
Tablica 26. Rezultati ispitivanja u LFSB-u i ZIT-u d.o.o. ....	54

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$A$	%	istezljivost nakon loma
$a$	–	polu duljine intervala na kojem leži veličina
$c_i$	–	koeficijent osjetljivosti povezan sa $x_i$
$d_o$	mm	početni promjer ispitne duljine ispitnog uzorka kružnog presjeka
$E$	N/mm <sup>2</sup>	modul elastičnosti
$e$	mm	istežanje
$\dot{e}$	s <sup>-1</sup>	prirast istežanja
$\dot{e}_{Le}$	s <sup>-1</sup>	prirast istežanja
$F_m$	N	maksimalna sila
$F_p$	N	sila pri kojoj dolazi do određenog trajnog istežanja
$k$	–	koeficijent proporcionalnosti
$L_o$	mm	početna mjerna duljina
$L_e$	mm	mjerna duljina ekstenzometra
$L_u$	mm	mjerna duljina nakon loma
$m_E$	N/mm <sup>2</sup>	nagib krivulje naprežanje-istežanje u području elastične deformacije
$n$	–	broj promatranih rezultata mjerenja
$P$	%	razina pouzdanosti
$R$	mm	raspon rezultata mjerenja ( $x_{\max}-x_{\min}$ )
$R_m$	N/mm <sup>2</sup>	vlačna čvrstoća
$R_{p0,2}$	N/mm <sup>2</sup>	konvencionalna granica razvlačenja
$\dot{R}$	N/mm <sup>2</sup> s	prirast naprežanja
$s$	–	standardna devijacija mjernih rezultata
$S_o$	mm <sup>2</sup>	početna površina poprečnog presjeka ispitne duljine
$S_u$	mm <sup>2</sup>	najmanja površina poprečnog presjeka nakon loma
$t$	–	faktor studentove t - razdiobe
$u(x_i)$	–	standardna nesigurnost veličine $x$
$u_c$	–	sastavljena mjerna nesigurnost
$u_{do}$	–	mjerna nesigurnost početnog promjera
$u_{du}$	–	mjerna nesigurnost konačno promjera

$u_F$	–	mjerna nesigurnost sile
$u_{Lo}$	–	mjerna nesigurnost početne dimenzije
$u_{Lu}$	–	mjerna nesigurnost konačne dimenzije
$u_{So}$	–	mjerna nesigurnost početnog promjera
$u_{Su}$	–	mjerna nesigurnost konačnog promjera
$U(x)$	–	proširena mjerna nesigurnost
$Z$	%	suženje
$\sigma$	N/mm <sup>2</sup>	naprezanje

## SAŽETAK

U teoretskom dijelu rada opisan je postupak statičkog vlačnog ispitivanja prema normi HRN EN ISO 6892-1:2009. U drugom poglavlju opisani su zahtjevi za dimenzije i oblik ispitnih uzoraka, brzine ispitivanja, parametri ispitivanja i popis pojmova te njihove definicije. U trećem poglavlju opisana je metoda procjene mjerne nesigurnosti koja je potrebna kako bi se rezultati dobiveni ispitivanjem mogli usporediti s rezultatima dobivenim u drugim laboratorijima.

U eksperimentalnom dijelu provedena su statička vlačna ispitivanja na ispitnim uzorcima od istog čelika u dva različita laboratorija. Jedno ispitivanje provedeno je u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava FSB-a, drugo u tvrtki ZIT d.o.o. Oprema za ispitivanje u laboratorijima bila je različite mjerne sposobnosti, a okolišni uvjeti su bili slični. Nakon ispitivanja provedena je analiza dobivenih rezultata i provedena je procjena mjerne nesigurnosti. Na temelju analize dobivenih rezultata doneseni su određeni zaključci.

Ključne riječi: statičko vlačno ispitivanje, mjerna nesigurnost, procjena mjerne nesigurnosti

## **ABSTRACT**

In this paper the procedure of tensile testing is described according to HRN EN ISO 6892-1:2009. Requirements for dimensions and shape of test pieces, testing speeds, testing parameters and a list of terms and definitions are given. In third chapter a method for estimation of measurement uncertainty is described, so testing results could be compared between different laboratories.

In experimental part of the paper tensile testing was conducted, on steel test pieces in two different laboratories. First tensile test was done in Laboratory for mechanical properties testing at Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture. Second test was done at the firm ZIT d.o.o. Testing equipment in laboratories had different measurement capabilities, but testing conditions were similar. After testing, an analysis of the results was conducted and estimation of measurement uncertainty was evaluated. In the last part of the paper comments and conclusions for obtained experimental results were given.

Key words: tensile testing, measurement uncertainty, estimation of measurement uncertainty

## 1. UVOD

Kako bi inženjeri odabrali odgovarajući materijal za upotrebu, potrebno je znati svojstva materijala koji se planira upotrijebiti. Određivanje svojstva materijala (toplinska, mehanička, kemijska, fizikalna itd.) provodi se nizom različitih ispitivanja. U diplomskom radu opisano je određivanje mehaničkih svojstava materijala statičkim vlačnim ispitivanjem prema normi HRN EN ISO 6892-1: 2009.

Statičkim vlačnim ispitivanjem se ispituje elastično i plastično ponašanje materijala u uvjetima jednoosnog statičkog vlačnog ispitivanja. Ispitivanje se provodi na kidalici. Analizom dobivenih rezultata može se predvidjeti ponašanje materijala prilikom njegove eksploatacije. Osim za određivanje svojstava materijala, statičko vlačno ispitivanje se koristi i za kontrolu kvalitete materijala u eksploataciji.

Kako bi se odredila valjanost dobivenih rezultata potrebno je usporediti rezultate s referentnom vrijednosti. Dobiveni rezultati neće biti jednaki, niti mogu biti, zbog raznih utjecajnih parametara kao što su na primjer trošenje alata, različiti mjerni uređaji, različiti ispitivači itd. Utjecaj tih parametara na rezultate mjerenja moguće je procijeniti. To se zove mjerna nesigurnost. Mjerna nesigurnost je parametar koji opisuje rasipanje vrijednosti rezultata mjerenja.

## 2. STATIČKO VLAČNO ISPITIVANJE PREMA NORMI HRN EN ISO 6892-1: 2009 [1]

Norma HRN EN ISO 6892-1: 2009 sastoji se od 23 poglavlja i Dodataka označenih slovima od A do K. Ova norma zamjenjuje prethodnu normu HRN EN ISO 10002-1. U ovoj normi su opisane dvije metode upravljanja brzinom ispitivanja. Prva metoda, metoda A, bazira se na brzinama istezanja uključujući brzinu razdvajanja stezne glave. Druga metoda, metoda B, koja je jednaka metodi iz norme HRN EN ISO 10002-1, bazira se na brzinama naprezanja. Metoda A je namijenjena kako bi se minimizirala varijacija testnih brzina u trenutku kada su određeni osjetljivi parametri brzine istezanja i kako bi se minimizirala mjerna nesigurnost rezultata mjerenja.

### 2.1. Pojmovi i definicije

U nastavku su dani neki od pojmova koji će biti obrađeni u radu, prema normi HRN EN ISO 6892-1:2009:

- duljina mjernog područja –  $L$ 
  - duljina paralelnog dijela uzorka ispitivanja na kojem se mjeri produljenje u bilo kojem trenutku tijekom ispitivanja
- početna duljina mjernog područja –  $L_0$ 
  - duljina između oznaka mjernog područja na uzorku izmjerena pri sobnoj temperaturi prije ispitivanja
- konačna duljina mjernog područja nakon loma –  $L_u$ 
  - duljina između oznaka mjernog područja na uzorku izmjerena nakon loma, pri sobnoj temperaturi, tako da su dva dijela pažljivo sastavljena i osi su im poravnate u ravnu liniju
- ispitna duljina uzorka –  $L_c$ 
  - duljina smanjene širine ili promjera uzorka ispitivanja
- produljenje
  - povećanje početne duljine mjernog područja u bilo kojem trenutku ispitivanja
- postotno produljenje
  - produljenje izraženo kao postotak početne duljine mjernog područja,  $L_0$
- trajno postotno produljenje



- povećanje početne duljine uzorka nakon prekida naprezanja, izražena kao postotak početne duljine mjernog područja,  $L_0$
- postotno produljenje nakon loma –  $A$ 
  - trajno produljenje duljine mjernog područja nakon loma,  $(L_u - L_0)$ , izražena kao postotak početne duljine mjernog područja,  $L_0$
- duljina mjernog područja izmjerena ekstenzometrom –  $L_e$ 
  - duljina mjernog područja izmjerena ekstenzometrom
- produljenje
  - povećanje duljine mjernog područja izmjenog ekstenzometrom,  $L_e$ , u bilo kojem trenutku prilikom ispitivanja
- postotno produljenje – „istežanje“
  - produljenje izraženo kao postotak duljine mjernog područja izmjerene ekstenzometrom,  $L_e$
- trajno postotno produljenje
  - povećanje duljinje mjernog područja izmjenog ekstenzometrom, nakon prekida naprezanja na ispitni uzorak, izražena kao postotak duljine mjernog područja izmjenog ekstenzometrom,  $L_e$
- brzina istežanja –  $\dot{\epsilon}_{L_e}$ 
  - povećanje istežanja, izmjereno ekstenzometrom, na području  $L_e$ , u vremenu
- procijenjena brzina istežanja na ispitnoj duljini uzorka –  $\dot{\epsilon}_{L_c}$ 
  - vrijednost povećanja istežanja na ispitnoj duljini uzorka,  $L_c$ , u vremenu bazirano na brzini razdvajanja stezne glave i ispitnoj duljini uzorka
- brzina razdvajanja stezne glave –  $v_c$ 
  - pomak stezne glave u vremenu
- brzina naprezanja –  $\dot{R}$ 
  - povećanje naprezanja u vremenu
- postotno smanjenje površine(suženje ili kontrakcija) –  $Z$ 
  - maksimalna promjena površine poprečnog presjeka koja se dogodila prilikom ispitivanja,  $(S_0 - S_u)$ , izražena kao postotak početne površine poprečnog presjeka,  $S_0$ :

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \times 100 \quad (2.1)$$

- maksimalna sila –  $F_m$ 
  - (za materijale koji ne pokazuju diskontinuirano razvlačenje) najveća sila koju ispitni uzorak može podnijeti tijekom ispitivanja
  - (za materijale koji pokazuju diskontinuirano razvlačenje) najveća sila koju ispitni uzorak može podnijeti tijekom ispitivanja
- naprezanje
  - u bilo kojem trenutku ispitivanja, sila podijeljena s početnom površinom poprečnog presjeka,  $S_0$ , ispitnog uzorka
- vlačna čvrstoća –  $R_m$ 
  - odgovarajuće naprezanje za maksimalnu silu,  $F_m$
- granica razvlačenja
  - kada je metalni materijal izložen fenomenu razvlačenja, naprezanje koje odgovara točki u kojoj se postiže plastična deformacija bez povećanja naprezanja
- granica plastičnog razvlačenja –  $R_p$ 
  - naprezanje pri kojem je plastično produljenje jednako točnom postotku duljine mjernog područja izmjenjenog ekstenzometrom,  $L_e$
- lom
  - pojava koja se događa kada se javi potpuno odvajanje ispitnog uzorka

## 2.2. Oblik i dimenzije ispitnog uzorka

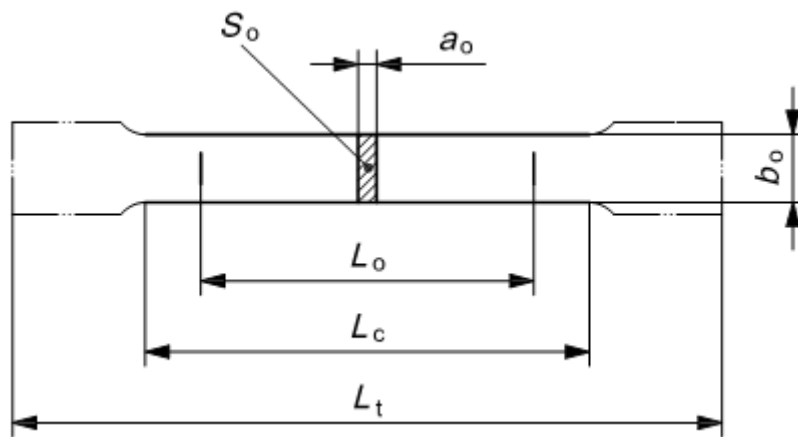
Oblik i dimenzije ispitnih uzoraka mogu biti ograničeni oblikom i dimenzijama metalnog proizvoda iz kojeg su ispitni uzorci uzeti. Ispitni uzorak se uglavnom uzima strojnom obradom iz proizvoda, odljevka ili isprešanog lima. Ipak, proizvodi standardnog poprečnog presjeka (žice, šipke, cijevi itd.) i odliveni ispitni uzorci (npr. lijevano željezo i neobojene legure) mogu se ispitati bez strojne obrade uzorka.

Poprečni presjek ispitnih uzoraka može biti kružni, kvadratni, pravokutni, prstenasti ili u posebnim slučajevima nekog drugog standardnog oblika. Poželjni ispitni uzorci imaju direktnu vezu između početne duljine mjernog područja,  $L_0$ , i početne površine poprečnog presjeka,  $S_0$ , izraženu formulom  $L_0 = k\sqrt{S_0}$ , gdje je  $k$  koeficijent proporcionalnosti. Zato se takvi uzorci zovu proporcionalni ispitni uzorci. Međunarodno prihvaćena vrijednost za  $k$  iznosi 5,65. Početna duljina mjernog područja ne smije biti manja od 15 mm. Kada je površina poprečnog presjeka premala da bi se ovaj uvjet ispunio s  $k = 5,65$ , veća vrijednost se odabire (po mogućnosti  $k = 11,3$ ) ili se može upotrijebiti ne proporcionalni ispitni uzorak. Za ne

proporcionalne ispitne uzorke, početna duljina mjernog područja,  $L_o$ , je neovisna o početnoj površini poprečnog presjeka,  $S_o$ .

### 2.2.1. Priprema ispitnih uzoraka

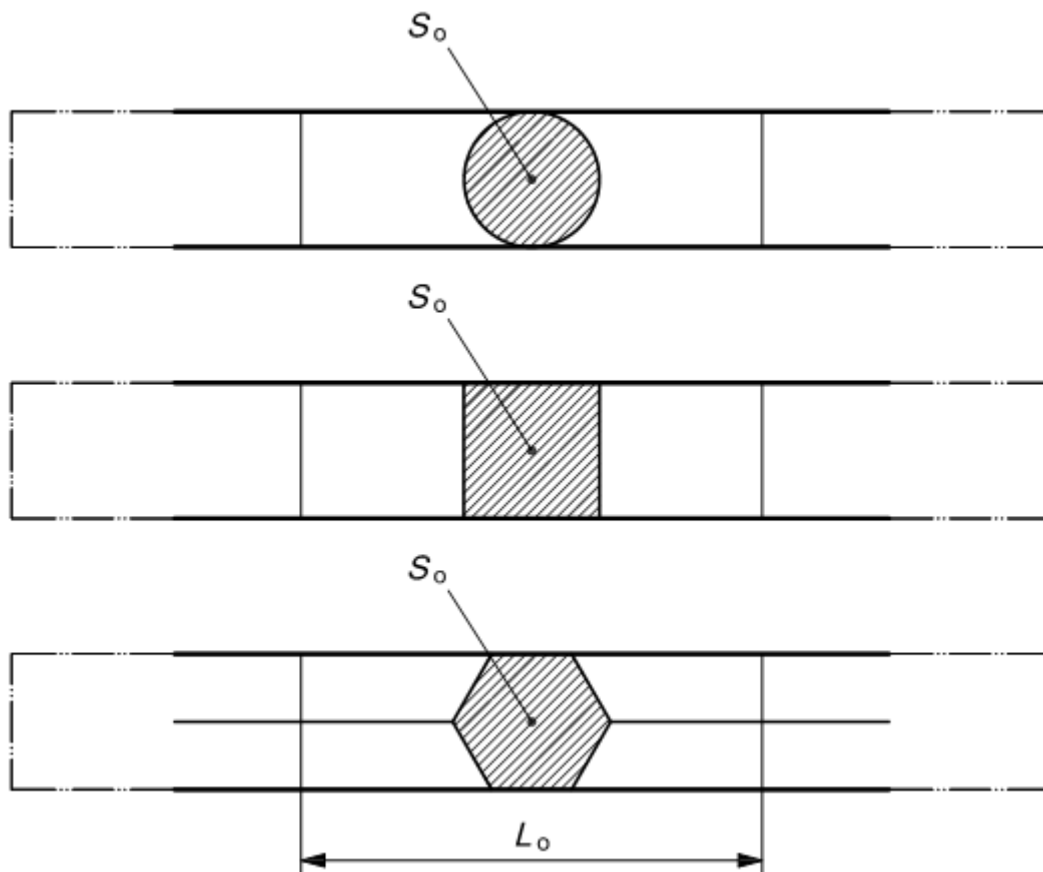
Strojno obrađeni ispitni uzorci, prikazani na slici 1, moraju imati prijelazni radijus između zahvatnih glava i ispitne duljine uzorka, ako su oni različitih dimenzija. Dimenzije prijelaznih radijusa su važne i preporučuje se da su definirane u specifikaciji materijala. Zahvatne glave mogu biti bilo kojeg oblika kako bi odgovarale steznoj napravi kidalice. Os ispitnog uzorka mora se poklapati s osi primijenjene sile. Ispitna duljina uzorka,  $L_c$ , ili u slučajevima gdje ispitni uzorci nemaju prijelazni radijus, duljina između zahvatnih glava je veća od početne duljine mjernog područja,  $L_o$ .



Slika 1. Strojno obrađeni ispitni uzorak [1]

Ako se ispitni uzorak sastoji od strojno neobrađene duljine proizvoda ili od strojno neobrađene ispitne šipke (slika 2), duljina između zahvatnih glava je dovoljna za oznake mjerenja koje se nalaze na razumnoj udaljenosti od zahvatnih glava.

Odliveni ispitni uzorci moraju imati prijelazni radijus između zahvatnih glava i ispitne duljine uzorka. Dimenzije prijelaznog radijusa su bitne i preporučuje se da su definirane u standardu proizvoda. Zahvatne glave mogu biti bilo kojeg oblika kako bi odgovarale steznoj napravi kidalice. Ispitna duljina uzorka,  $L_c$  mora uvijek biti veća od početne duljine mjernog područja,  $L_o$ .



Slika 2. Strojno neobrađeni ispitni uzorci [1]

### 2.2.2. Tolerancije dimenzije uzoraka i oblika

Kako niti jedno mjerenje nije točno, nego uvijek postoje neka odstupanja izmjerenih vrijednosti uslijed raznih utjecajnih parametara, zadaju se tolerancije oblika i dimenzija. U tablici 1. prikazana su dopuštena odstupanja dimenzija i oblika uzoraka.

Ako za primjer uzmemo nazivni promjer od 10 mm dopušteno odstupanje iznosi  $\pm 0,03$  mm, što znači da promjer svakog ispitnog uzorka mora biti između 9,97 mm i 10,03 mm. Tolerancija oblika za ispitne uzorke istog nazivnog promjera iznosi 0,04 mm. To znači da razlika između najmanje i najveće dimenzije pojedinog uzorka neće biti veća od 0,04 mm.

**Tablica 1. Tolerancije poprečnih dimenzija ispitnih uzoraka [1]**

Oznaka	Nazivna poprečna dimenzija	Tolerancija nazivne strojno obrađene dimenzije	Tolerancija oblika
Promjer strojno obrađenog ispitnih uzoraka kružnog poprečnog presjeka i poprečna dimenzija ispitnih uzoraka pravokutnog poprečnog presjeka strojno obrađeni sa sve četiri strane	$\geq 3$ $\leq 6$	$\pm 0,02$	0,03
	$> 6$ $\leq 10$	$\pm 0,03$	0,04
	$> 10$ $\leq 18$	$\pm 0,05$	0,04
	$> 18$ $\leq 30$	$\pm 0,10$	0,05
Poprečna dimenzija ispitnih uzoraka pravokutnog poprečnog presjeka strojno obrađeni na dvije suprotne strane	$\geq 3$ $\leq 6$	$\pm 0,02$	0,03
	$> 6$ $\leq 10$	$\pm 0,03$	0,04
	$> 10$ $\leq 18$	$\pm 0,05$	0,06
	$> 18$ $\leq 30$	$\pm 0,10$	0,12
	$> 30$ $\leq 50$	$\pm 0,15$	0,15

### 2.3. Brzine ispitivanja

Ispitni uzorci moraju biti stegnuti na prikladne načine, kao što su klinovima, vijčanim spojevima, paralelnim vilicama ili držačima. Potrebno je osigurati, što je bolje moguće, da se ispitni uzorci stežu na takav način da sila koja se primjenjuje djeluje aksijalno kako bi se smanjilo savijanje. Ovo je vrlo važno kada se ispituju krhki materijali ili kada se određuje granica razvlačenja. Kako bi se dobio ravan ispitni uzorak i osiguralo poravnanje ispitnog uzorka i stezne naprave, može se primijeniti sila prednaprezanja pod uvjetom da ne prelazi vrijednost koja odgovara 5 % određene ili očekivane granice razvlačenja.

Prema normi HRN EN ISO 6892-1:2009 opisane su dvije metode upravljanja brzinom ispitivanja, metoda A i metoda B.

Metoda A je namijenjena kako bi se minimizirala varijacija ispitnih brzina u trenucima kada se određuju parametri brzine istezanja i kako bi se smanjila mjerna nesigurnost rezultata ispitivanja.

U normi su opisana dva tipa kontrole brzine istezanja. Prvi način je kontrola brzine istezanja,  $\dot{\epsilon}_{Le}$ , koja se bazira na povratnoj informaciji s ekstenzometra. Drugi način je kontrola procjene brzine istezanja na ispitnoj duljini uzorka  $\dot{\epsilon}_{Lc}$ , koja se ostvaruje kontrolom brzine razdvajanja stezne glave pri brzini jednakoj željenoj brzini istezanja pomnoženoj s ispitnom duljinom uzorka. Ako materijal pokazuje homogenu deformaciju i sila je konstantna, brzina istezanja,  $\dot{\epsilon}_{Le}$ , i procijenjena brzina istezanja na ispitnoj duljini uzorka,  $\dot{\epsilon}_{Lc}$ , su približno jednaki. Razlike postoje ako se materijal počne diskontinuirano razvlačiti ili ako se pojavi suženje. Ako se sila povećava, procijenjena brzina istezanja može biti znatno manja od ciljane vrijednosti zbog usklađenosti kidalice.

Ispitna brzina mora ispuniti slijedeće zahtjeve:

- Zahtijevana brzina istezanja,  $\dot{\epsilon}_{Le}$ , mora se koristiti u intervalu do i uključujući s određivanjem  $R_{eH}$ ,  $R_p$  ili  $R_t$ . Kako bi se eliminirao utjecaj usklađenosti kidalice potrebno je koristiti ekstenzometar pričvršćen za kidalicu kako bi se osigurala točna kontrola brzine istezanja. Kod kidalice koje nemaju mogućnost kontrole brzine istezanja, može se koristiti procijenjena brzina istezanja na ispitnoj duljini uzorka,  $\dot{\epsilon}_{Lc}$ .
- Kod diskontinuiranog razvlačenja, koristi se procijenjena brzina istezanja na ispitnoj duljini uzorka,  $\dot{\epsilon}_{Lc}$ . Nije moguće kontrolirati brzinu istezanja koristeći ekstenzometar pričvršćen na ispitni uzorak zbog moguće pojave lokalnog razvlačenja koje može izlaziti izvan mjerne skale ekstenzometra. Potrebna procijenjena brzina istezanja duljine mjernog uzorka može se točno održavati koristeći konstantnu brzinu razdvajanja stezne glave,  $v_c$ , gdje je prema formuli  $v_c = L_c \dot{\epsilon}_{Lc}$ .
- U intervalu  $R_p$  ili  $R_t$  ili pri kraju razvlačenja koristi se  $\dot{\epsilon}_{Le}$  ili  $\dot{\epsilon}_{Lc}$ . Preporučuje se korištenje  $\dot{\epsilon}_{Lc}$  kako bi se izbjegli kontrolni problemi koji se mogu pojaviti ako dođe do suženja izvan područja mjerne skale ekstenzometra.

Brzina istezanja može utjecati na oblik krivulje naprezanje – istezanje u području očvrnuća. Zato je potrebno dokumentirati korištene brzine ispitivanja.

Brzina istezanja mora biti konstantna do trenutka  $i$  u trenutku određivanja  $R_p$ . Tijekom određivanja svojstva materijala brzina istezanja mora biti u jednom od dva slijedeća područja:

Područje 1:  $\dot{\epsilon}_{L_e} = 0,000\ 07\ s^{-1}$ , s tolerancijom od  $\pm 20\%$

Područje 2:  $\dot{\epsilon}_{L_e} = 0,000\ 25\ s^{-1}$ , s tolerancijom od  $\pm 20\%$  (osim ako nije drugačije specificirano).

Prilikom određivanja svojstava  $R_m$ ,  $A$  i  $Z$  procijenjena brzina istezanja na ispitnoj duljini uzorka mora biti u jednom od slijedećih područja:

Područje 2:  $\dot{\epsilon}_{L_c} = 0,000\ 25\ s^{-1}$ , s tolerancijskim poljem od  $\pm 20\%$

Područje 3:  $\dot{\epsilon}_{L_c} = 0,002\ s^{-1}$ , s tolerancijskim poljem od  $\pm 20\%$

Područje 4:  $\dot{\epsilon}_{L_c} = 0,0067\ s^{-1}$ , s tolerancijskim poljem od  $\pm 20\%$

Ako se određuje samo vlačna čvrstoća, onda se može primijeniti brzina  $\dot{\epsilon}_{L_c}$  iz područja 3 ili 4.

Primjenom metode B, brzine ispitivanja moraju odgovarati slijedećim zahtjevima ovisno o prirodi materijala. Ako nije drugačije specificirano, može se koristiti bilo koja pogodna brzina ispitivanja do trenutka kada naprezanje iznosi pola vrijednosti granice razvlačenja. U nastavku su specificirane brzine ispitivanja nakon prelaska te točke.

**Tablica 2. Brzine naprezanja [1]**

Modul elastičnosti materijala $E$ , Mpa	Brzina naprezanja $\dot{R}$ , MPa $s^{-1}$	
	min	max
<150 000	2	20
$\geq 150\ 000$	6	60

- granica plastičnog i razvlačenja,  $R_p$   
Brzina razdvajanja stezne glave kidalice mora biti konstantna i unutar granica prema podacima iz tablice 2 u elastičnom području. U plastičnom području brzina istezanja ne smije prijeći  $0,002\ 5\ s^{-1}$ .
- brzina razdvajanja

Ako kidalica nije u mogućnosti mjeriti ili kontrolirati brzinu istezanja, mora se upotrijebiti brzina razdvajanja stezne glave koja je ekvivalentna brzini naprezanja iz tablice 2.

- $R_m$ ,  $A$  i  $Z$

Nakon određivanja svojstava čvrstoće, brzina ispitivanja se može povećati na brzinu istezanja ili ekvivalentnu brzinu razdvajanja stezne glave koja nije veća od  $0,008 \text{ s}^{-1}$ . Ako se ispituje samo vlačna čvrstoća može se koristiti jedna brzina istezanja tijekom cijelog ispitivanja koja ne smije biti veća od  $0,008 \text{ s}^{-1}$ .

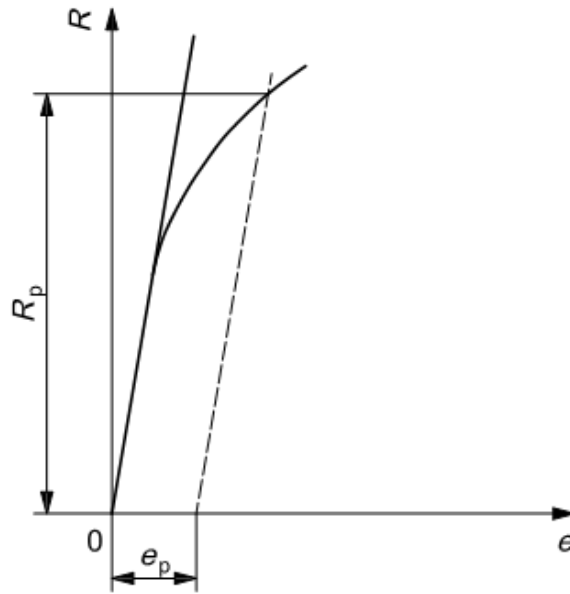
#### **2.4. Određivanje parametara ispitivanja**

Prije početka ispitivanja potrebno je označiti područje mjerenja ispitne duljine uzorka kako bi se nakon ispitivanja moglo izmjeriti produljenje uzorka. Svaki kraj početne duljine mjernog područja,  $L_o$ , mora biti označen finim oznakama ili opisnim linijama, ali ne s zarezima koji bi mogli dovest do preranog loma. Za proporcionalne ispitne uzorke, izračunata vrijednost početne duljine mjernog područja može biti zaokruženo na najbliži višekratnik od 5 mm, pod uvjetom da je razlika između izračunate i označene duljine mjernog područja manja od 10 %  $L_o$ . Početna duljina mjernog područja mora biti označena na točnost od  $\pm 1 \%$ . Ako je ispitna duljina uzorka,  $L_c$ , puno veća od početne duljine mjernog područja, kao što je u slučaju s strojno neobrađenim uzorcima, niz preklapajućih duljina mjernog područja može biti označeno. U nekim slučajevima može biti korisno iscrtati, na površini ispitnog uzorka, liniju paralelnu s longitudinalnom osi, na kojoj će se označiti duljine mjernog područja.

Relevantna dimenzija (poprečna dimenzija) ispitnog uzorka trebala bi biti mjerena na dovoljnom broju poprečnih presjeka okomitih na uzdužnu os u centralnom dijelu ispitne duljine uzorka. Preporučuju se tri poprečna presjeka. Početna površina poprečnog presjeka,  $S_o$ , je prosječna vrijednost površine poprečnog presjeka i mora se izračunati iz mjerenja odgovarajućih dimenzija. Točnost ovog izračuna ovisi o tipu ispitnog uzorka. Prije mjerenja nije potrebno iscrtati mjerno područje.

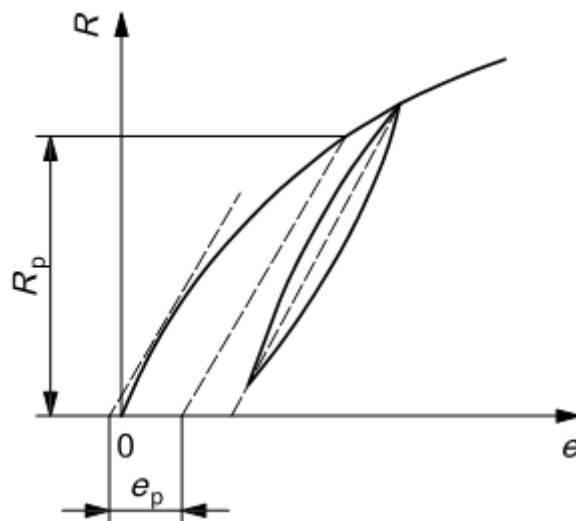
$R_p$  se određuje iz krivulje sila-produljenje (slika 3.) crtanjem paralelne linije s linearnim dijelom krivulje na udaljenosti koja je jednaka postotku plastičnog produljenja. U točki u kojoj linija siječe krivulju dobivamo iznos sile. Naprezanje se dobiva dijeljenjem sile s početnom površinom poprečnog presjeka,  $S_o$ .





Slika 3. Određivanje granice razvlačenja [1]

Ako linearni dio krivulje nije jasno definiran i stoga nije moguće iscrtati paralelnu liniju s dovoljno preciznosti, u tom slučaju se primjenjuje slijedeća procedura prikazana na slici 4. Kada se prekorači pretpostavljena konvencionalna granica razvlačenja, sila se smanjuje na 10% vrijednosti dobivene sile. Zatim se sila povećava dok ne prijeđe izvorno dobivenu vrijednost. Kako bi se odredila konvencionalna granica razvlačenja povlači se linija kroz petlju histereze. Paralelno s tom linijom povlači se linija na udaljenosti, koja odgovara propisanom postotnom plastičnom produljenju, od ispravljenog ishodišta krivulje. Sjecište paralelne linije i krivulje daje odgovarajuću silu. Naprezanje se dobiva dijeljenjem sile s početnom površinom poprečnog presjeka,  $S_0$ .



Slika 4. Određivanje granice razvlačenja kada nije jasno definiran linearni dio krivulje [1]

Prije mjerenja konačne duljine mjernog područja nakon loma potrebno je dva slomljena dijela postaviti tako da se njihove osi poravnaju. Vrlo je važno kod ispitnih uzoraka malog poprečnog presjeka i malih vrijednosti produljenja osigura odgovarajući kontakt između dijelova prilikom mjerenja konačne duljine mjernog područja. Prema slijedećoj formuli dobiva se istezljivost nakon loma:

$$A = \frac{L_u - L_o}{L_o} \times 100 \quad (2.2)$$

gdje je:

$L_o$  – početna duljina mjernog područja;

$L_u$  – konačna duljina mjernog područja nakon loma.

Produljenje nakon loma mora biti određeno na najbližu mjeru od 0,25 mm ili bolje. Ako je specificirano minimalno produljenje manje od 5%, preporučuju se mjere opreza. Rezultat ovakve odluke vrijedi samo kada udaljenost između loma i najbliže oznake mjerenja nije manja od  $L_o/3$ . Ipak, mjerenje je važeće bez obzira na lokaciju loma u slučaju kada je postotak produljenja nakon loma veći ili jednak specificiranoj vrijednosti.

Kada se produljenje nakon loma mjeri ekstenzometrom, nije potrebno označiti područje mjerenja. Produljenje se mjeri kao ukupno produljenje u trenutku loma, i zato je potrebno odbiti elastično produljenje kako bi se dobilo postotno produljenje nakon loma.

Ovako dobiveni rezultati vrijede samo ako se lom i produljenje jave unutar područja mjerenja ekstenzometrom,  $L_e$ . Mjerenje je važeće bez obzira na lokaciju loma u slučaju kada je postotak produljenja nakon loma veći ili jednak specificiranoj vrijednosti.

Prije izračuna kontrakcije, potrebno je dva slomljena dijela postaviti tako da se njihove osi poravnaju. Kontrakcija se izračunava prema formuli 2.1 gdje je  $S_o$  početna površina poprečnog presjeka mjernog područja, a  $S_u$  minimalna površina poprečnog presjeka nakon loma.  $S_u$  je potrebno izmjeriti na točnost od 2 %.

## **2.5. Mjerna nesigurnost**

Nakon svakog ispitivanja potrebno je provesti procjenu mjerne nesigurnosti dobivenih rezultata zbog raznih parametara koji mogu utjecati na dobivene rezultate. U normi HRN EN ISO 6892-1:2009 definirane su smjernice procjene mjerne nesigurnosti, ali zbog svoje nepreciznosti neće biti obrađene. U slijedećem poglavlju definirati će se metode procijene mjerne nesigurnosti.

### **3. MJERNA NESIGURNOST**

Postoji uzrečica koja kaže „Triput mjeri, jednom reži“. To znači da se vjerojatnost pogreške može smanjiti ponovnim mjerenjem prije nego se nastavi dalje s obradom. Zato se preporučuju tri mjerenja.[2]

Ako se mjeri jednom, moguće je da se pogreška ne uoči. Ako se mjeri dva puta, i dobivene mjere se ne slažu, ne zna se koja je mjera „kriva“. Kada se mjeri tri puta i dvije vrijednosti su približno jednake, a treća vrijednost odstupa, tada možemo biti sumnjivi prema trećoj mjeri.[2]

#### **3.1. Mjera**

Pitanje koje je prvo potrebno postaviti je što je mjera? Mjera je informacija o nekom svojstvu nekog objekta kojeg se promatra. Mjera se dobiva mjernim uređajem kao što su metri, termometri, vage, štoperice itd. Mjera se uvijek prikazuje s brojem i mjernom jedinicom.

Svrha mjerenja je određivanje vrijednosti mjere određenog svojstva. Uglavnom je rezultat mjerenja aproksimacija ili procjena vrijednosti, te se ona može izraziti samo kada je uz nju dana nesigurnost te aproksimacije ili procjene.

#### **3.2. Definicija mjerne nesigurnosti**

Mjerna nesigurnost je sumnja u rezultat mjerenja. Pretpostavlja se da su najbolji mjerni instrumenti točni i da daju vjerodostojne rezultate. Ipak, postoji određena sumnja u njihovu točnost.

Mjerna nesigurnost se izražava s dva broja, širinom rasipanja ili intervalom i razinom pouzdanosti koja navodi kolika je vjerojatnost da se mjera nalazi u navedenom intervalu.

Mjernu nesigurnost procjenjujemo zbog nedvosmislenog iskazivanja i usporedbe mjernih rezultata dobivenih u različitim ispitnim laboratorijima, te zbog usporedbe mjernih rezultata sa specifikacijama proizvođača ili zadanom tolerancijom.

### **3.3. Pogreška i nesigurnost**

Pogreška i nesigurnost su dva različita pojma i bitno je ne pomiješati ih.

Pogreška je razlika između izmjerene vrijednosti i „istinite vrijednosti“ [2]. Svako mjerenje ima nesavršenosti koje povećavaju pogrešku. Pogreška se dijeli na slučajnu pogrešku i sustavnu pogrešku.

Slučajna pogreška proizlazi iz nepredvidivih i slučajnih vremenskih i prostornih varijacija utjecajnih veličina. Posljedice tih varijacija povećavaju varijacije u ponavljanim mjerenjima. Iako nije moguće kompenzirati slučajnu pogrešku kod mjernog rezultata, njezin utjecaj se ipak može smanjiti povećanjem broja mjerenja.[3]

Sustavna pogreška se kao i slučajna pogreška ne može eliminirati, ali se njezin utjecaj može smanjiti. Ako sustavna pogreška proizlazi iz poznatog efekta utjecajne veličine na rezultat mjerenja, efekt se može kvantificirati i ako je značajan, primjenom korektivnog faktora može se kompenzirati.[3]

Nesigurnost je kvantitativni prikaz sumnje u rezultat mjerenja [2]. Nesigurnost rezultata mjerenja odražava nedostatak znanja o vrijednosti mjere. Rezultat mjerenja nakon korekcije za sustavnu pogrešku je i dalje procjena vrijednosti mjere zbog nesigurnosti koja proizlazi iz slučajne pogreške i nesavršene korekcije rezultata na sustavnu pogrešku.[3]

### **3.4. Izvor pogrešaka i nesukladnosti**

Niti jedno ispitivanje ne može biti provedeno u idealnim uvjetima. Mnogi vidljivi i nevidljivi nedostaci mogu potkopati mjerenje. Izvor pogrešaka i nesukladnosti su:

- mjerni instrument – pogreške instrumenta proizlaze iz odstupanja, starenja instrumenta, trošenja, loše mogućnosti očitavanja, buke (kod električnih instrumenata) itd.
- objekt mjerenja – upitna je stabilnost objekta mjerenja (npr. veličina kocke leda u toploj vodi).
- postupak mjerenja – mjerenje može biti teško provesti (mjerenje mase male živahne životinje).
- „uvezena“ nesigurnost – umjeravanje instrumenta ima svoju nesigurnost koja pridonosi nesigurnosti rezultata mjerenja (umjeravanje je ipak potrebno, jer nesigurnost ne umjerenog instrumenta ima puno veći utjecaj na nesigurnost rezultata mjerenja)

- iskustvo mjeritelja – neka mjerenja ovise o iskustvu i procjeni mjeritelja. Jedan operater može bolje procijeniti mjeru od drugoga dok drugi ima više iskustva u pripremi ispitivanja. Isto tako vrijeme reakcije između operatera se razlikuje što može utjecati u mjerenju vremena.
- uzrokovanje – mjerenje mora valjano prikazati proces koji se ispituje. Na primjer kod uzrokovanja je bitno da su uzorci odabrani nasumično.
- utjecaj okoliša – temperatura, vlažnost zraka, tlak zraka i ostali uvjeti mogu utjecati na mjerni instrument ili na objekt ispitivanja.

Kada su poznati veličina i utjecaj pogreške moguće je primijeniti korekcije na rezultat mjerenja. Uglavnom, nesigurnosti iz ovih izvora ali i drugih, su pojedinačne nesigurnosti koje pridonose ukupnoj nesigurnosti mjerenja [2].

### 3.5. Osnovni statistički parametri

#### 3.5.1. Aritmetička sredina

Prilikom ponavljanja mjerenja često se dobivaju različiti rezultati iste mjere, što ne znači da radimo ništa loše. To se događa zbog prirodne varijacije onoga što radimo. Ako postoji varijacija kod mjerenja potrebno je provesti ih što više i odrediti njihovu srednju vrijednost. Srednja vrijednost ili aritmetička sredina,  $\bar{x}$ , dobiva se zbrajanjem dobivenih vrijednosti mjerenja i dijeljenjem zbroja brojem mjerenja:

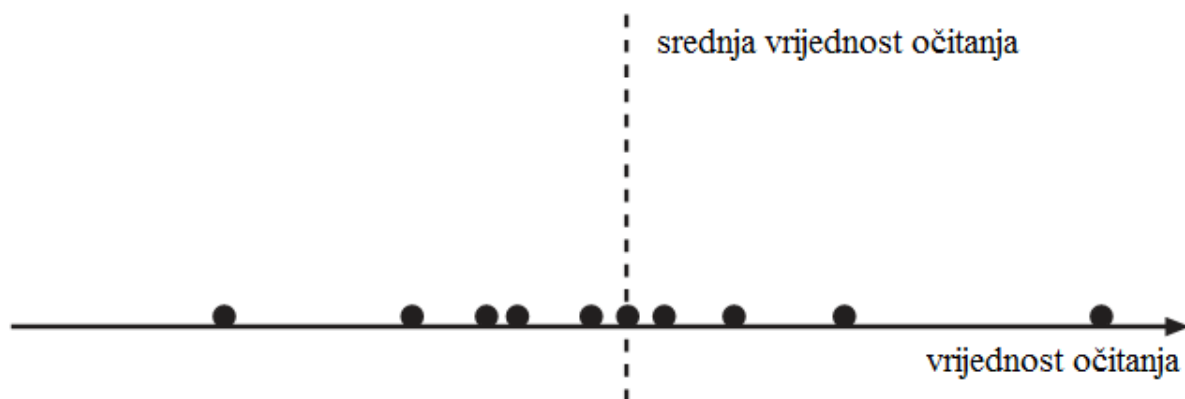
$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (3.1)$$

gdje je:

$\bar{x}$  – aritmetička sredina;

$x_i$  – vrijednost očitavanja;

$n$  – ukupan broj očitavanja.



Slika 5. Primjer očitavanja i njihove srednje vrijednosti [2]

Pitanje koje se postavlja je koliko je mjerenja potrebno? Ne postoji konačan broj, ali što ih je više to je točniji rezultat. Idealno bi bilo beskonačno mnogo mjerenja, no tako veliki broj mjerenja zahtjeva puno vremena.

### 3.5.2. Standardna devijacija

Kada ponovljena mjerenja daju različite rezultate, zanima nas raspon rezultata mjerenja. raspon rezultata može nam reći nešto o mjerenoj nesigurnosti. Ako znamo koliko je veliki raspon rezultata, možemo ocijeniti kvalitetu mjerenja.

Nekada je dovoljno znati raspon,  $R$ , vrijednost između najveće i najmanje vrijednosti mjerenja. Ipak, kod malog seta vrijednosti ne možemo dobiti valjanu informaciju o rasponu između najveće i najmanje vrijednosti. Isto tako veliki raspon može proizaći jer je jedna vrijednost jako daleko od ostalih kao što je slučaj na slici 10.

Uglavnom se raspon kvantificira standardnom devijacijom,  $\sigma$ . Standardna devijacija seta brojeva govori nam koliko je različito pojedino mjerenje od sredine seta. Kao nepisano pravilo dvije trećine mjerenja nalaze se unutar plus/minus jedan sigma aritmetičke sredine mjerenja, a približno 95 % svih mjerenja nalazi se unutar dva sigma [2].

$$\sigma = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n} \quad (3.2)$$

gdje je:

$\sigma$  – standardna devijacija;

$\bar{x}$  – aritmetička sredina;

$x_i$  – vrijednost mjerenja;

$n$  – broj svih mjerenja.

Kao što je vidljivo iz prethodne jednadžbe standardna devijacija se izračunava iz velikog broja podataka odnosno iz cijele populacije. Kako to zahtjeva puno vremena, potrebno je procijeniti standardnu devijaciju iz manjeg broja podataka. Takva standardna devijacija zove se procijenjena standardna devijacija,  $s$ , i dobiva se prema slijedećoj jednadžbi:

$$s = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \quad (3.3)$$

gdje je:

$s$  – procijenjena standardna devijacija;

$\bar{x}$  – aritmetička sredina;

$x_i$  – vrijednost mjerenja;

$n$  – broj mjerenja.

Što se tiče broja mjerenja, kao i kod izračuna aritmetičke sredine, nema nekog pravila. Što je broj mjerenja veći procjena standardne devijacije je bolja. Isto tako je bitno naglasiti da se povećanjem broja mjerenja poboljšava procjena nesigurnosti.



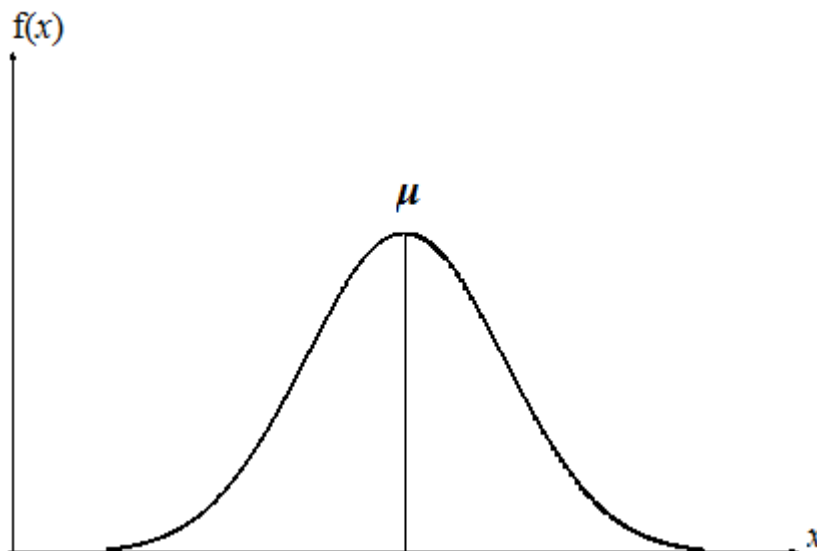
### 3.6. Rasipanje rezultata

Raspon seta podataka može poprimiti razne oblike, distribucije vjerojatnosti [2].

#### 3.6.1. Normalna distribucija

U teoriji vjerojatnosti, normalna ili Gauss-ova distribucija najučestalija je krivulja rasipanja. Normalnom distribucijom se može opisati 33 % događaja u prirodi. Normalna distribucija se definira funkcijom gustoće vjerojatnosti:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}, \text{ za } -\infty \leq x \leq +\infty \quad (3.4)$$

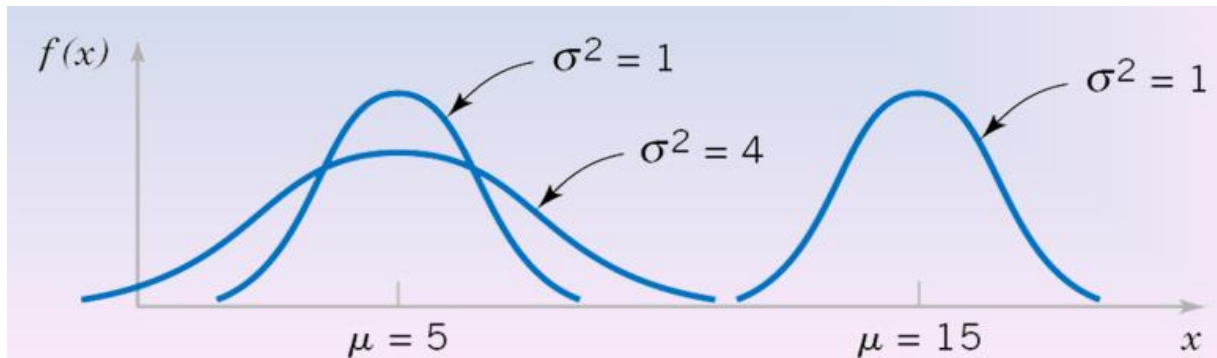


Slika 6. Primjer normalne distribucije

Normalna distribucija se definira s dva parametra, očekivanje,  $\mu$ , i varijancom,  $\sigma^2$ . Očekivanje je vrijednost koja se najveći broj puta pojavljuje i uglavnom se zamjenjuje s aritmetičkom sredinom. Varijanca je kvadrat odstupanja slučajne varijable od njezine sredine.

Krivulja normalne distribucije je zvonastog oblika i simetrična. Os simetrije prolazi kroz točku očekivanja, dok varijanca kazuje koliko je široka krivulja. Površina ispod krivulje iznosi 1

odnosno 100 %. Na slici 7. prikazan je utjecaj očekivanja i varijance na krivulju normalne distribucije.



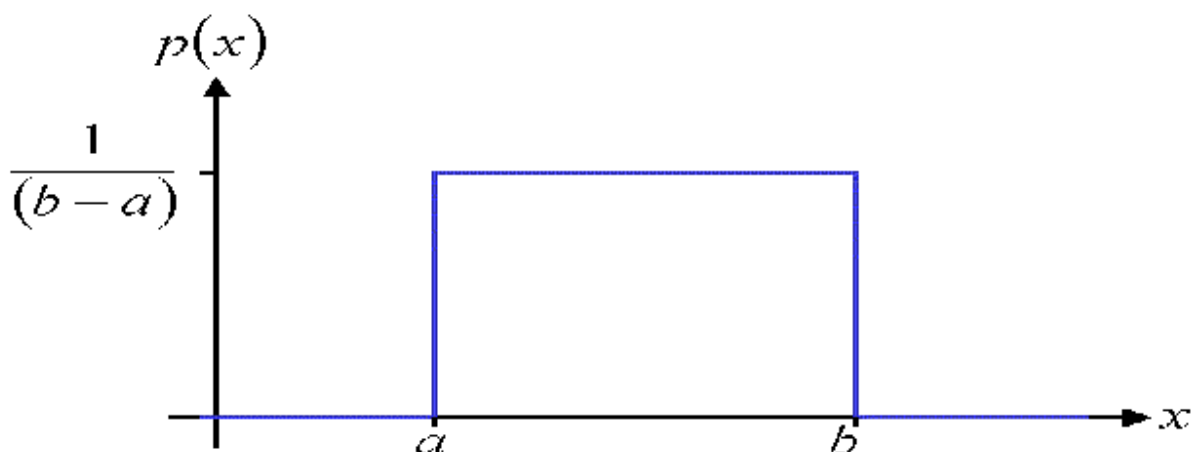
Slika 7. Utjecaj parametara očekivanja i varijance na oblik krivulje

### 3.6.2. Pravokutna distribucija

Pravokutna ili uniformna distribucija pripada skupini simetričnih distribucija vjerojatnosti. Distribucija se definira s dva parametra  $a$  i  $b$  koji čine minimum i maksimum distribucije. Distribucija se označava s  $U(a,b)$ .

Uniformna distribucija je opisana sa slijedećom funkcijom gustoće vjerojatnosti:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} & \text{za } a \leq x \leq b \\ 0 & \text{za } x < a \text{ ili } x > b \end{cases} \quad (3.5)$$

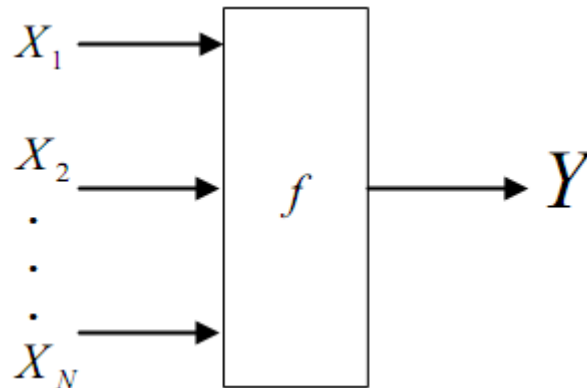


Slika 8. Primjer uniformne distribucije

Postoje i drugi oblici krivulja kao što su pravokutna, M-oblik, asimetrična itd, ali one se puno rjeđe koriste.

### 3.7. Proračun mjerne nesigurnosti GUM metodom

Veličina  $Y$  se uglavnom ne mjeri direktno, nego se određuje iz  $N$  drugih veličina  $X_1, X_2, \dots, X_N$ .



Slika 9. odnos između ulaznih veličina i tražene veličine [4]

Ulazne veličine  $X_1, X_2, \dots, X_N$  mogu se promatrati kao mjerene veličine koje ovise o nekim drugim parametrima što dovodi do složenog funkcijskog odnosa [4].

#### 3.7.1. Određivanje standardnih nesigurnosti A i B vrste

Prema GUM metodi postoji podjela na sastavnice nesigurnosti tipa A i tipa B, koji se razlikuju u načinu proračunavanja. Tip A se temelji na statističkoj analizi niza ponovljenih mjerenja. Procijenjena standardna devijacija dobivena iz niza ponovljenih mjerenja je procijenjena standardna devijacija  $u(x_i)$  koja opisuje sastavnicu nesigurnosti A – vrste. Za opisivanje sastavnice nesigurnosti A – vrste potreban je broj stupnjeva slobode  $\nu_i$  nesigurnosti  $u(x_i)$ . Stupanj slobode  $\nu$ , za veličinu procijenjenu iz srednje vrijednosti niz ponovljenih mjerenja, iznosi  $n - 1$ . U slučaju da se procjena ulazne veličine dobiva iz krivulje dobivene metodom najmanjih kvadrata, broj stupnjeva slobode standardne nesigurnosti iznosi  $n - 2$ .

Standardnu nesigurnost B – vrste nije moguće utvrditi samo statističkom analizom niza ponovljenih mjerenja, već je potrebno primijeniti neke druge metode. Standardna nesigurnost B – vrste  $u(x_i)$  dobiva se iz apriornih razdioba vjerojatnosti. Pri tome se postavlja pitanje broja stupnjeva slobode  $\nu_i$ . Uglavnom se za standardnu nesigurnost B – vrste pretpostavlja da je ona točno poznata te slijedi  $\nu_i \rightarrow \infty$ . U nekim slučajevima je potrebno proračunati broj stupnjeva slobode  $\nu_i$  prema formuli:

$$v_i = \frac{1}{2} \left( \frac{\Delta u(x_i)}{u(x_i)} \right)^{-2} \quad (3.6)$$

gdje je  $\frac{\Delta u(x_i)}{u(x_i)}$  subjektivna veličina čija se vrijednost dobiva znanstvenom prosudbom iz skupa dostupnih podataka.

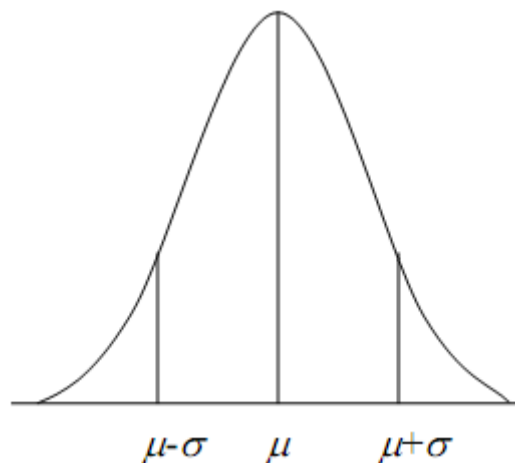
Sastavnice mjerne nesigurnosti A – vrste i B – vrste je zajedničko da se obje vrste proračuna temelje na distribucijama vjerojatnosti.

Ako se procjena ulazne veličine temelji na nizu ponovljenih mjerenja, standardna nesigurnost  $u(x_i)$  dobiva se iz Studentove razdiobe, koja je prikazana na slici 15. Standardna nesigurnost kod Studentove razdiobe dobiva se dijeljenjem Procijenjenog standardnog odstupanja s faktorom Studentove razdiobe  $t_p$ , koji ovisi o broju stupnjeva slobode  $\nu$  i traženoj vjerojatnosti  $P$ . U slučaju kad  $\nu \rightarrow \infty$  Studentova razdioba se približava normalnoj razdiobi, a faktor Studentove razdiobe  $t_p$  dobiva se prema slijedećoj formuli:

$$t_p(\nu) \approx \sqrt{\left(1 + \frac{2}{\nu}\right)} \cdot k \quad (3.7)$$

gdje je

$k$  – faktor pokrivanja za normalnu razdiobu uz vjerojatnost  $P$ .

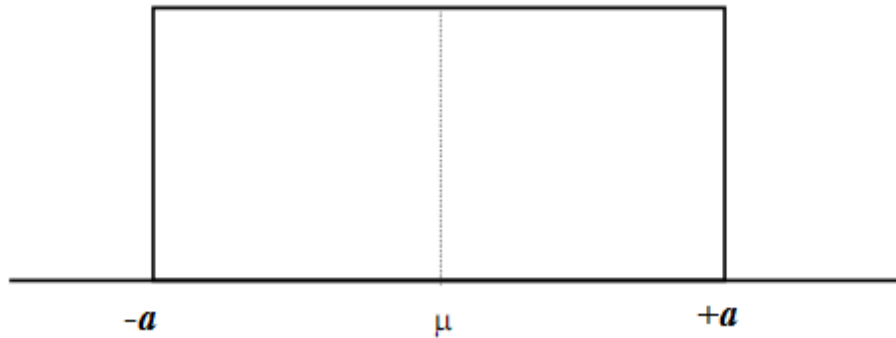


Slika 10. Studentova razdioba [4]

Standardna nesigurnost se dobiva iz pravokutne razdiobe, prikazane na slici 11., u slučajevima kada se procjena ulazne veličine temelji na procjeni granica intervala pojavljivanja od  $-a$  do  $+a$  uz vjerojatnost da se vrijednost nalazi unutar cijelog intervala, odnosno kada je vjerojatnost da

se ulazna veličina nalazi izvan intervala jednaka nuli. Standardna nesigurnost se izračunava prema sljedećoj formuli:

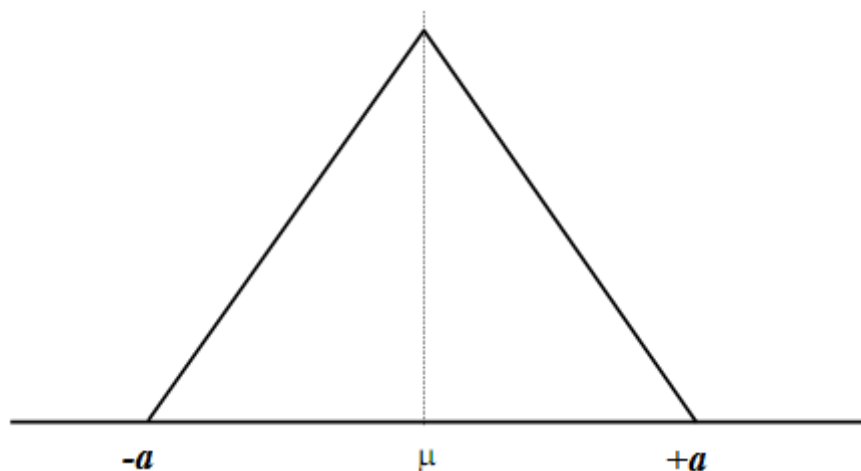
$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (3.8)$$



Slika 11. Pravokutna razdioba[4]

Kada je nepoznata vjerojatnost pojavljivanja ulazne vrijednosti u intervalu od  $-a$  do  $+a$ , koristi se simetrična trokutasta razdioba, prikazana na slici 12. Standardna nesigurnost dobiva se iz sljedeće formule:

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{6}} \quad (3.9)$$



Slika 12. Simetrična trokutasta razdioba[4]

### 3.7.2. *Određivanje sastavljene standardne nesigurnosti*

Sastavljena standardna nesigurnost  $u_c(y)$ , određuje se odgovarajućim sastavljanjem standardnih nesigurnosti  $u(x_i)$  procijenjena ulaznih veličina  $x_1, x_2, \dots, x_N$  [4].

### 3.7.3. *Određivanje proširene nesigurnosti* [4]

Područje oko mjernog rezultata, koje obuhvaća veliki dio razdiobe vrijednosti koje bi se mogle pripisati mjerenoj veličini naziva se proširena mjerna nesigurnost. Proširena mjerna nesigurnost označava se  $U$  i dobiva se množenjem složene standardne nesigurnosti  $u_c(y)$  s faktorom pokrivanja  $k$ , kako stoji u slijedećoj formuli:

$$U = k \cdot u_c(y) \quad (3.10)$$

Vrijednost faktora pokrivanja  $k$  može se dobiti jedino ako postoji znanje o razdiobi vjerojatnost svake ulazne veličine i ako se te razdiobe sastavljaju kako bi se dobila razdioba izlazne veličine. Za mnoga mjerenja faktor pokrivanja  $k$  nalazi se u području između 2 i 3. Kada je razdioba vjerojatnosti normalna, a broj stupnjeva slobode sastavljene standardne nesigurnosti  $u_c(y)$  značajan po iznosu, pretpostavlja se da odabir faktora pokrivanja  $k = 2$  daje vjerojatnost od  $P = 95\%$ . U slučajevima kada ulazne veličine ne podliježu zakonu normalne razdiobe, veličina  $y$  se opisuje normalnom razdiobom primjenom centralnog graničnog teorema.

U određenim slučajevima  $k$  može biti izvan područja od 2 do 3. To se može dogoditi kada nisu zadovoljeni svi uvjeti centralnog graničnog teorema te se njegovom primjenom dobivaju neprihvatljivi rezultati. Isto tako kada je funkcijski odnos između izlazne veličine i njezinih ulaznih veličina nelinearan i razdioba izlazne veličine se ne može dobiti konvolucijom razdioba ulaznih veličina. U tim slučajevima zahtijevaju se druge analitičke ili numeričke metode.

### **3.8. Metode procjene nesigurnosti prema normi HRN EN ISO 6892-1:2009[1]**

Nesigurnost rezultata vlačnog ispitivanja sadrži komponente korištene opreme. Različiti rezultati ispitivanja imaju različite doprinose nesigurnosti ovisno o načinu određivanja. U tablici 3. prikazani su neki od doprinosa nesigurnosti opreme koje je potrebno uzeti u obzir za neka uobičajena svojstva materijala koja se određuju kod vlačnog ispitivanja. Neki rezultati ispitivanja mogu se odrediti s nižom nesigurnosti nego drugi kao na primjer gornja granica razvlačenja,  $R_{eH}$ , koja ovisi o nesigurnostima mjerenja sile i površine poprečnog presjeka, dok granica plastičnog razvlačenja,  $R_p$ , ovisi o sili, produljenju, mjernoj duljini i površini poprečnog presjeka. Za smanjenje površine,  $Z$ , potrebno je razmotriti mjernu nesigurnost površine poprečnog presjeka prije i poslije loma.

Tablica 3. Doprinosi nesigurnosti ispitnih rezultata [1]

Parametar	Rezultati ispitivanja					
	$R_{eH}$	$R_{eL}$	$R_m$	$R_p$	A	Z
Sila	x	x	x	x	–	–
Produljenje	–	–	–	x	x	–
Mjerna duljina	–	–	–	x	x	–
$S_o$	x	x	x	x	–	x
$S_u$	–	–	–	–	–	x
Bilješka x bitno – ne bitno						

U nastavku je prikazan primjer procjene mjerne nesigurnosti prema normi HRN ISO EN 6892-1:2009.

Nesigurnosti rezultata ispitivanja navedeni u tablici 4. mogu biti dobiveni iz certifikata umjeravanja opreme koja je korištena za određivanje rezultata ispitivanja. Na primjer, standardna nesigurnost parametra sile za kidalicu s nesigurnosti iz certifikata od 1,4% iznosi 1,4/2 odnosno 0,70%. Važno je napomenuti da klasifikacija Klasa 1,0 (za kidalice za vlačno ispitivanje ili ekstenzometre) ne garantira nesigurnost od 1 %. Nesigurnost može biti značajno veća ili manja i stoga je potrebno pogledati certifikat opreme.

Tablica 4. Primjeri doprinosa nesigurnosti za različite rezultate ispitivanja, zbog mjerne opreme [1]

Parametar	Doprinos nesigurnosti <sup>a</sup>				
	$R_{eH}$	$R_{eL}$	$R_m$	A	Z
Sila	1,4	1,4	1,4	–	–
Produljenje	–	–	–	1,4	–
Mjerna duljina $L_o$ , $L_e$	–	–	–	1	–
$S_o$	1	1	1	–	1
$S_u$	–	–	–	–	2
<sup>a</sup> Vrijednosti su dane samo za informaciju					

Doprinos nesigurnosti zbog faktora kao što je odstupanje opreme od njegove vrijednosti umjeravanja i upotreba u različitim ekološkim uvjetima mora se isto tako uzeti u obzir.

Prema jednadžbi 3 za prethodni primjer nesigurnosti mjerenja sile, sastavljena nesigurnost rezultata ispitivanja za  $R_{eH}$ ,  $R_{eL}$ ,  $R_m$  i  $A$  iznosi

$$\sqrt{(1,4/2)^2 + (1/\sqrt{3})^2} = \sqrt{0,70^2 + 0,58^2} = 0,91\%. \quad (3.11)$$

Rezultat se dobiva primjenom korijenom sume kvadrata.

Kada se procjenjuje nesigurnost  $R_p$ , nije prikladno zbrojiti komponente standardne nesigurnosti iz klasifikacije mjerne opreme. Potrebno je pregledati krivulju sila-produljenje. Na primjer, ako se određenje  $R_p$  dogodi na krivulji sila-produljenje u točki gdje se sila ne mijenja u području mjerne nesigurnosti produljenja, tada je nesigurnost indikacije sile zbog produljenja mjerne opreme zanemariva. S druge strane, ako se određenje  $R_p$  dogodi na krivulji sila-produljenje u točki gdje se sila značajno mijenja s obzirom na produljenje, nesigurnost očitane sile može biti značajno veća nego nesigurnost iz klasifikacije opreme. Dodatno, određivanje nagiba elastičnog dijela krivulje naprezanje-postotno produljenje  $m_E$  može utjecati na rezultat  $R_p$  ako krivulja u ovom području nije idealna ravna linija.

Sastavljena nesigurnost za parametar  $Z$ ,  $u_Z$ , izražena kao postotak dana je u jednadžbi 4:

$$u_Z = \sqrt{\left(\frac{a_{S_0}}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{a_{S_u}}{\sqrt{3}}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{2}{\sqrt{3}}\right)^2} = \sqrt{0,577^2 + 1,155^2} = \sqrt{0,33 + 1,33} = 1,29 \quad (3.12)$$

Korištenjem istog principa mogu se dobiti vrijednosti sastavljene nesigurnosti za ostale parametre rezultata ispitivanja. Rezultati su dani u tablici 5.

Tablica 5. Primjeri sastavljene nesigurnosti [1]

Sastavljena nesigurnost za različite parametre				
%				
$R_{eH}$	$R_{eL}$	$R_m$	$A$	$Z$
0,91	0,91	0,91	0,91	1,29



Prema ISO/IEC Guide 98-3, proširena nesigurnost dobiva se množenjem sastavljene standardne nesigurnosti s faktorom pokrivanja,  $k$ . Za razinu pouzdanosti od 95 %,  $k = 2$ . Rezultati su prikazani u tablici 6.

Tablica 6. Primjeri za 95 % razinu pouzdanosti,  $k = 2$  prema tablici 5. [1]

95 % razina pouzdanosti, $k = 2$ za različite parametre				
%				
$R_{eH}$	$R_{eL}$	$R_m$	$A$	$Z$
1,82	1,82	1,82	1,82	2,58

Zbrajati se mogu jedino oni doprinosi nesigurnosti s istom jedinicom.

Preporuča se provođenje planiranih periodičkih ispitivanja i vođenje grafova standardne devijacije rezultata ispitivanja određenih materijala. Rezultirajuća standardna devijacija podataka iz uzoraka ispitivanja, nakon određenog vremena može dati dobru indicaciju da li je nesigurnost podataka ispitivanja unutar očekivanih vrijednosti.

### 3.8.1. Parametri ovisni o materijalu i/ili proceduri ispitivanja

Preciznost rezultata vlačnog ispitivanja ovisi o faktorima vezanim s materijalom koji se ispituje, kidalicom, ispitnom procedurom i metodama korištenim za izračun specifičnih svojstava materijala. U idealnom slučaju svi slijedeći faktori moraju se razmotriti:

- temperatura ispitivanja;
- brzine ispitivanja;
- obrada i geometrija ispitnog uzorka;
- metoda prihvata ispitnog uzorka i aksijalnost primijenjene sile;
- karakteristike kidalice (krutost, pogon i način kontrole);
- pogreške operatera i softvera prilikom određivanja vlačnih svojstava;
- geometrija postavljanja ekstenzometra.

Utjecaj ovih faktora ovisi o ponašanju određenog materijala i njegova vrijednost ne može biti definirana. Ako je vrijednost utjecaja poznata, može se uzeti u obzir prilikom računanja nesigurnosti. Prilikom procjene proširene mjerne nesigurnosti moguće je uračunati dodatne izvore nesigurnosti. To se može napraviti na slijedeći način.

- Operater mora identificirati sve dodatne moguće izvore, koji mogu imati utjecaj, direktno ili indirektno na parametar ispitivanja koji se određuje.
- relativni doprinosi mogu varirati prema materijalu ispitivanja i specijalnim uvjetima ispitivanja. Samostalne laboratorije se potiče da pripreme listu mogućih izvora nesigurnosti i procijene njihov utjecaj na rezultat. Ako se odredi značajan utjecaj, nesigurnost,  $u_i$ , on mora biti uračunat u proračun. Nesigurnost  $u_i$  je nesigurnost izvora  $i$  vrijednosti koju je potrebno odrediti kao postotak što je prikazano u jednadžbi 3. Za  $u_i$  funkcija distribucije određenog parametra mora biti identificirana. Zatim je potrebno odrediti utjecaj na rezultat na razini jedne sigme. To je standardna nesigurnost.

Unutar laboratorijska ispitivanja mogu se koristiti za određivanje ukupne nesigurnosti rezultata u uvjetima korištenim u industrijskim laboratorijima, ali takva ispitivanja ne odvajaju utjecaje povezane s nehomogenosti materijala od onih pripisanih ispitnoj metodi. Trebalo bi se cijeniti da kako prikladne certificirane reference materijala postanu dostupne, ponuditi će koristan načina procjene mjerne nesigurnosti na bilo kojoj kidalici, uključujući utjecaj prihvata, svijanja, itd., koje je trenutno teško kvantificirati. Primjer certificirane reference materijala je BCR-661.

### **3.9. Procjena mjerne nesigurnosti prema [5]**

Postoje razni priručnici za procjenu mjeren nesigurnosti koji su napisani kako bi se pojednostavnio način procjene mjerne nesigurnosti. Jedan od takvih je i priručnik [5] koji je napisan od strane UNCERT, projekta financiranog iz programa Europske komisije za standarde, mjere i ispitivanje. U priručniku su opisane metode procijene mjerne nesigurnosti i ispisane su formule za procjenu mjerne nesigurnosti kod statičkog vlačnog ispitivanja. U nastavku su prikazane samo formule korištene za procjenu mjerne nesigurnosti rezultata ispitivanja dobivenih u poglavlju 4.

Procjena mjerne nesigurnosti mjerenja početnog promjera,  $d_o$  i konačnog promjera  $d_u$  dobiva se slijedećom jednadžbom:

$$u_{d_i} = \frac{s_{d_i} \cdot t}{\sqrt{n}}, \quad (3.13)$$

gdje je:

$t$  – faktor studentove razdiobe;

$s_{d_i}$  – standardna devijacija mjerenja promjera;

$n$  – broj mjerenja.

Faktor Studentove razdiobe  $t$  proizlazi iz razine pouzdanosti i stupnjeva slobode.

Procjena mjerne nesigurnosti početne površine poprečnog presjeka,  $S_0$  i konačne površine poprečnog presjeka,  $S_u$ , izračunava se iz slijedeće formule:

$$u_{S_i} = \sqrt{\frac{d_i^2 \pi^2 u_{d_i}^2}{4}}, \quad (3.14)$$

gdje je:

$d_i$  – srednja vrijednost mjerenja promjera;

$u_{d_i}$  – mjerna nesigurnost promjera.

Procjena mjerne nesigurnosti sile izračunava se prema slijedećoj formuli:

$$u_{F_i} = \frac{s_{F_i} \cdot t}{\sqrt{n}}, \quad (3.15)$$

gdje je:

$t$  – faktor studentove razdiobe;

$s_{F_i}$  – standardna devijacija mjerenja sile;

$n$  – broj mjerenja.

Procjena mjerne nesigurnosti vlačne čvrstoće,  $R_m$  i konvencijalne granice razvlačenja  $R_{p0,2}$  izračunava se prema formuli:

$$u_{R_i} = \sqrt{\left(\frac{1}{S_o}\right)^2 u_{F_i}^2 + \left(\frac{F_i}{S_o^2}\right)^2 u_{S_o}^2}, \quad (3.16)$$

gdje je:

$u_{R_i}$  – mjerna nesigurnost naprezanja;

$u_{F_i}$  – mjerna nesigurnost mjerenja sile;

$u_{S_o}$  – mjerna nesigurnost početne površine poprečnog presjeka;

$F_i$  – srednja vrijednost rezultata mjerenja sile;

$S_o$  – srednja vrijednost rezultata površina poprečnog presjeka.

Procjena mjerne nesigurnosti početne duljine,  $L_o$ , i konačne duljine,  $L_u$ , ispitnog uzorka izračunava se prema formuli:

$$u_{L_i} = \frac{s_{L_i} \cdot t}{\sqrt{n}}, \quad (3.17)$$

gdje je:

$t$  – faktor studentove razdiobe;

$s_{L_i}$  – standardna devijacija mjerenja duljine;

$n$  – broj mjerenja.

Procjena mjerne nesigurnosti istezljivosti nakon loma,  $A$ , izračunava se prema formuli:

$$u_A = \sqrt{\left(\frac{1}{L_o}\right)^2 u^2_{L_u} + \left(\frac{1}{L_o} - \frac{L_u - L_o}{L_o^2}\right)^2 u^2_{L_o}}, \quad (3.18)$$

gdje je:

$u_{L_o}$  – mjerna nesigurnost početne duljine uzorka;

$u_{L_u}$  – mjerna nesigurnost konačne duljine uzorka;

$L_o$  – srednja vrijednost početne duljine uzorka;

$L_u$  – srednja vrijednost konačne duljine uzorka.

Procjena mjerne nesigurnosti kontrakcije,  $Z$ , izračunava se prema formuli:

$$u_Z = \sqrt{\left(\frac{S_u}{S_o^2}\right)^2 u^2_{S_o} + \left(\frac{1}{S_o}\right)^2 u^2_{S_u}}, \quad (3.19)$$

gdje je:

$u_{S_o}$  – mjerna nesigurnost površine početnog poprečnog presjeka;

$u_{S_u}$  – mjerna nesigurnost površine konačnog poprečnog presjeka;

$S_o$  – srednja vrijednost rezultata početnih površina poprečnog presjeka;

$S_u$  – srednja vrijednost rezultata konačnih površina poprečnog presjeka.

## 4. EKSPERIMENTALNI DIO

Eksperimentalna ispitivanja su provedena u dva laboratorija na različitim kidalicama, a ukupno je ispitano dvadeset uzoraka. Prvih deset uzoraka ispitivano u tvrtki ZIT d.o.o., dok je drugih deset ispitano na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava. Ispitivanja su provedena na elektronski upravljanoj kidalici u Laboratoriju FSB-a i na ručno upravljanoj hidrauličkoj kidalici u tvrtki ZIT d.o.o. Nakon ispitivanja provedena je procjena mjerne nesigurnosti kako bi se usporedila odstupanja rezultata dobivenih elektronski upravljanom kidalicom iz Laboratorija FSB-a i ručno upravljanom kidalicom iz tvrtke ZIT d.o.o.

### 4.1. Ispitni uzorci

Uzorci su napravljeni iz 6 m duge šipke i promjera 80 mm. Materija uzoraka je 42CrMoS4V čiji je certifikat prikazan na slici 13.

MARCEGAGLIA		Sede Legale e amministrativa: Via Broletto, 14 40146 Casalecchio di Reno Modena (MO) Tel. +39 052 20 10 000 Fax +39 052 20 445 400 www.marcegaglia.com		Type: Inspection Certificate 31 EN 10204								
Customer: STROJOPROMET-ZAGREB d.o.o. ZAGREBACKA 6 10292 SENKOVEC HR		Company: STROJOPROMET-ZAGREB d.o.o. ZAGREBACKA 6 10292 SENKOVEC HR		Number: 10214723019 Issued On: 15/12/2014								
				Delivery No.: 832041796 OK: 15/12/2014 Delivery note nr: 1022011862		Quality Control: G.M.D. A.Del. Prod.: 1/18 Plant Of Control:						
Item/Order No.	Quantity	Heat	C (%)	S (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Cr (%)	Mo (%)	Reb. (ppm)	Sp. (ppm)	A (%)
55003430 TRT 80.00x6000 42CrMoS4V PEL B45/30/ 42CrMoS4V + QT + SH EN10277 1141132587/10 4749-2200-NB-A Date 20/11/2014												
COLD DRAWN ROUND Toll h9 EN 10278												
130008300	960 KG	219980	400	230	.860	0140	0200	1.050	160	858	810	16.5
Remarks: PELLED BARS We certify that material supplied complies with the requirements agreed or order Dimensional and visual check OK.												

PROVERENA I ISPRAVNA KOPIJA

59958/01/C30

17.03.2015.

Slika 13. Certifikat materijala ispitivanja

Uzorci su kružnog poprečnog presjeka duljine  $L_0 = 50$  mm i početnog promjera poprečnog presjeka  $d_0 = 10$  mm, te su prikazani na slici 14. Uzorci su izrađeni prema normi HRN EN ISO 6892-1:2009.



Slika 14. Ispitni uzorci

#### **4.2. Statičko vlačno ispitivanje u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava**

U laboratoriju je ispitivanje provedeno na računalno upravljanoj kraljici WPM Leipzig EU 40 mod, klase točnosti 0,5 koja je prikazana na slici 15.

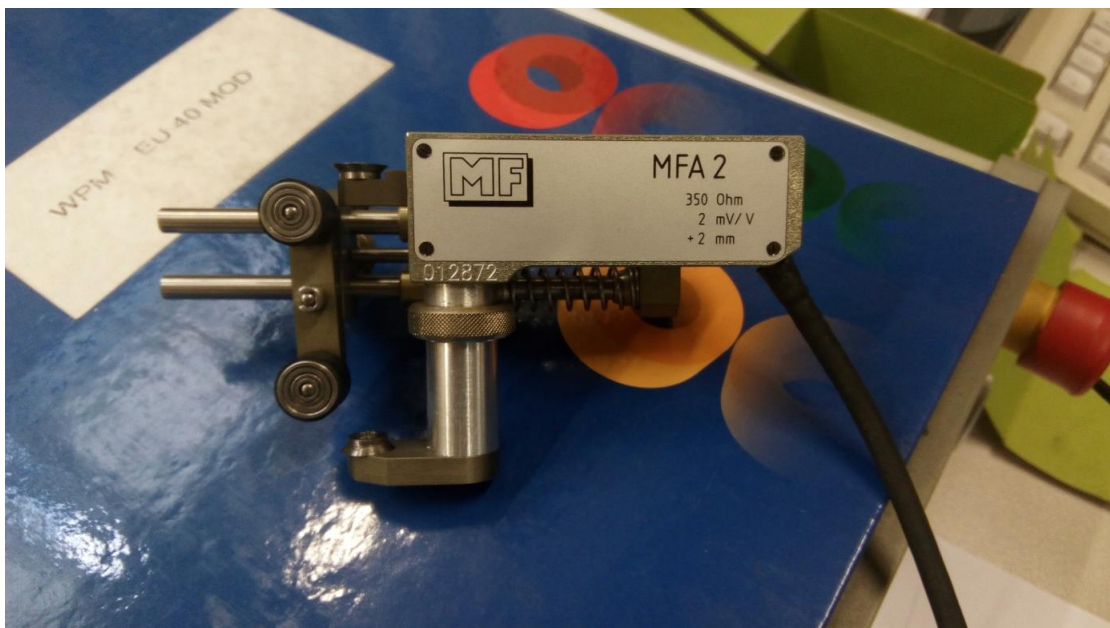




**Slika 15. Kidalica WPM Leipzig EU 40 mod**

Prije statičkog vlačnog ispitivanja napravljeno je probno ispitivanje na jednoj epruveti kako bi se utvrdilo ponašanje materijala i odredili parametri ispitivanja. Sila prednapreznaja je iznosila 2000 N, a brzina ispitivanja je iznosila 300 N/s. Mjerno područje kidalice je od 0 do 400 kN. Temperatura ispitivanja iznosila je  $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ .

Produljenje do granice razvlačenja mjereno je ekstenzometrom MFA 2 koji je prikazan na slici 16.



**Slika 16. Ekstenzometar MFA 2**

Za ispitivanje je uzeto isto 10 uzoraka jednakih dimenzija kao i kod ispitivanja u ZIT-u. Uzorci su iscrtani s dvije linije koje su udaljene 50 mm kako je prikazano na slici 17. Iscrtavanje je napravljeno na način da se na pomičnom mjerilu postavila duljina od 50mm i zatim su se pomoću nje iscrtale linije.



Slika 17. Označavanje ispitnog uzorka

Ispitivanje je provođeno tako da se uzorak opteretio do sile pred opterećenja, nakon čega je postavljen ekstenzometar te je nastavljeno opterećenje uzorka do trenutka kada produljenje iznosi 0.8 % početne duljine. Zatim se ekstenzometar skida s uzorka i ispitivanje se nastavlja do loma. Na kraju ispitivanja, računalo izračunava i prikazuje veličine vlačnu čvrstoću  $R_m$ , konvencionalnu granicu razvlačenja  $R_{p0,2}$ , silu kidanja  $F_k$  i maksimalnu silu  $F_m$ . Prije početka ispitivanja potrebno je unijeti promjer poprečnog presjeka kako bi se dobile površine poprečnog presjeka čime se izračunava vlačna čvrstoća i granica razvlačenja.

U tablici 7. prikazane su dimenzije ispitnih uzoraka prije ispitivanja.

Tablica 7. Dimenzije uzoraka prije ispitivanja

Broj epruvete	Promjer $d_o$ mm	Površina poprečnog presjeka $S_o$ mm <sup>2</sup>	Mjerna duljina $L_o$ mm
1	9,98	78,23	50,00
2	9,99	78,38	50,00
3	9,99	78,38	50,00
4	9,98	78,23	50,00
5	9,97	78,07	50,00
6	9,97	78,07	50,00
7	9,98	78,23	50,00
8	9,97	78,07	50,00
9	10,01	78,70	50,00
10	10,00	78,54	50,00

#### 4.2.1. Rezultati ispitivanja

Nakon provedenog ispitivanja dobivene su vrijednosti konvencionalne granice razvlačenja i vlačne čvrstoće prikazane u tablici 9, a dimenzije uzoraka nakon ispitivanja su ručno izmjerene korištenjem pomičnog mjerila i vrijednosti su prikazane u tablici 8.

Tablica 8. Dimenzije uzoraka nakon loma

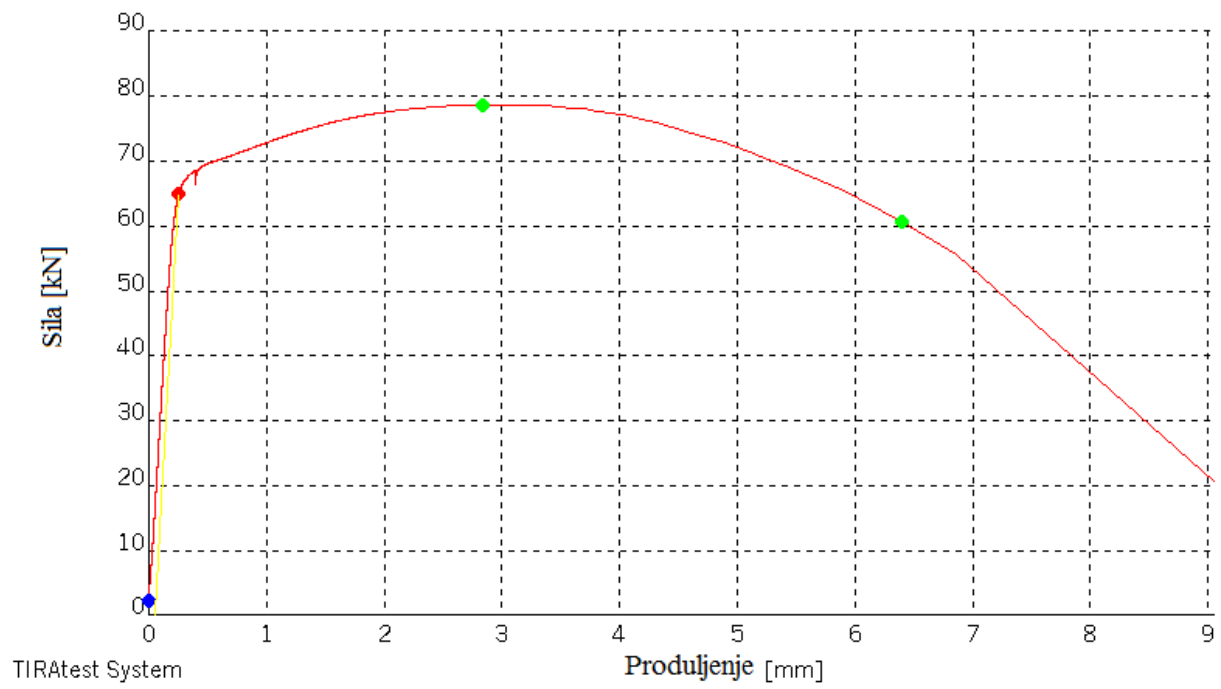
Broj epruvete	Promjer nakon loma $d_u$ mm	Površina poprečnog presjeka nakon loma $S_u$ mm <sup>2</sup>	Mjerna duljina nakon loma $L_u$ mm
1	6,39	32,05	58,79
2	6,33	31,45	59,28
3	6,65	34,71	59,14
4	6,35	31,65	59,25
5	6,68	35,03	58,96
6	6,37	31,85	58,6
7	6,36	31,75	59,23
8	6,51	33,27	58,67

9	6,49	33,06	58,88
10	6,46	32,76	58,61

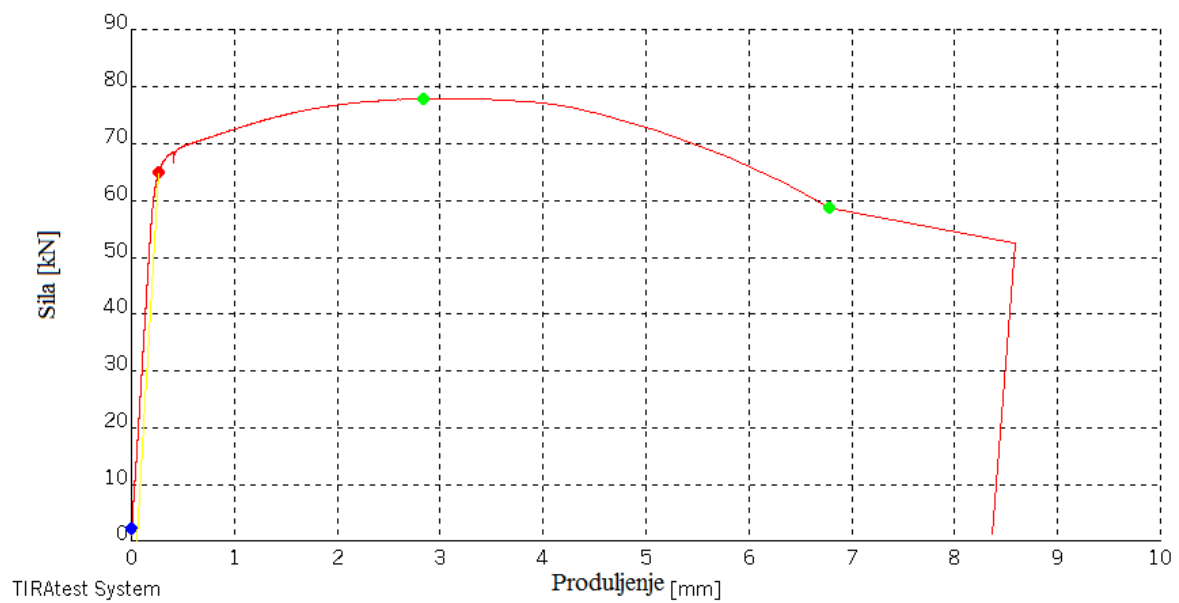
Tablica 9. Rezultati ispitivanja svojstava materijala

Broj epruvete	$R_{p0,2}$ N/mm <sup>2</sup>	$R_m$ N/mm <sup>2</sup>	A %	Z %
1	818,17	978,28	17,76	59,03
2	833,25	1008,04	18,71	59,87
3	827,9	1002,51	18,32	55,71
4	809,3	1004,85	18,38	59,54
5	821,75	1004,49	18,17	55,13
6	831,34	996,61	17,17	59,20
7	840,08	994,44	18,36	59,41
8	809,03	981,73	17,39	57,39
9	801,42	988,23	17,78	57,99
10	809,25	986,08	17,08	58,29
<b>Sred. vrij.</b>	820,15	994,53	17,91	58,16
<b>Std. dev.</b>	12,78703	10,51578	0,560	1,634

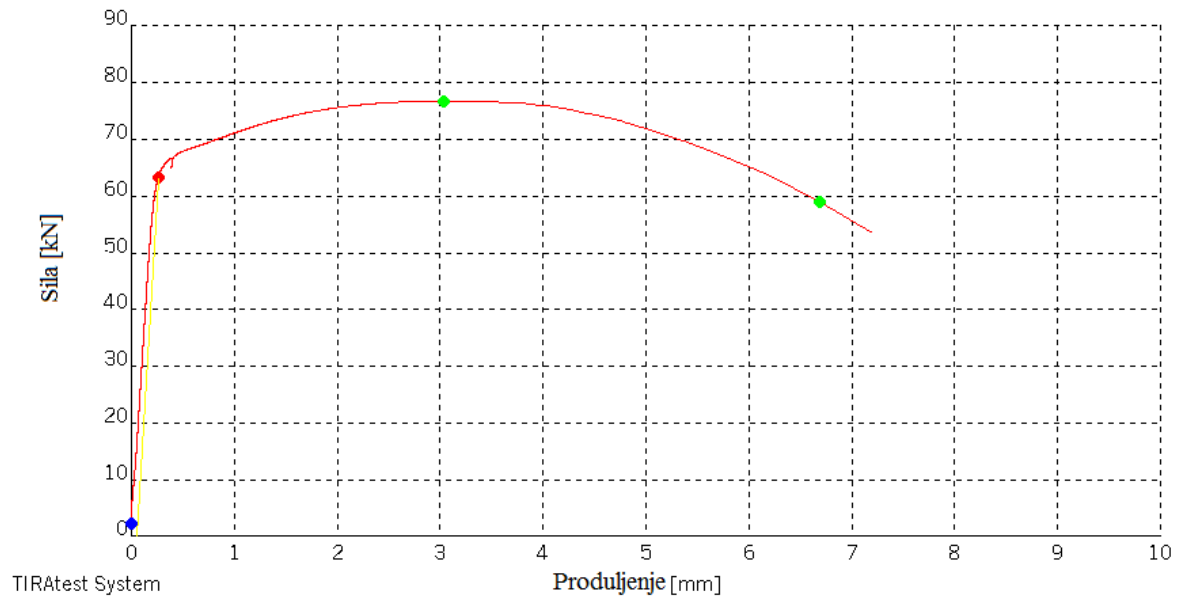
Nakon ispitivanja dobiveni su dijagrami sila-produljenje za svaki uzorak. Na slikama ispod su pokazani neki od njih.



Slika 18. Dijagram sila-produljenje za uzorak 3



Slika 19. Dijagram sila-produljenje za uzorak 6



Slika 20. Dijagram sila- produljenje za uzorak 8

Nakon provedenog ispitivanja određene su utjecajne veličine na mehanička svojstva materijala. Veličine su prikazane u tablici 10.

Tablica 10. Utjecajne veličine na pojedino mehaničko svojstvo

Parametar	Mehanička svojstva			
	$R_m$	$R_p$	$A$	$Z$
Sila	x	x	–	–
Produljenje $L_u$	–	x	x	–
Mjerna duljina $L_o$	–	x	x	–
$S_o$	x	x	–	x
$S_u$	–	–	–	x

#### 4.2.2. Procjena mjerne nesigurnosti

Mjerna nesigurnost izračunava se prema formulama iz poglavlja 3.9 za parametre vlačne čvrstoće  $R_m$ , konvencionalne granice razvlačenja  $R_{p0,2}$ , postotnog produljenja  $A$  i kontrakcije  $Z$ , a vrijednosti mjernih nesigurnosti prikazane su u slijedećim tablicama.

U tablici 11. prikazan je rezultat mjerne nesigurnosti početne površine poprečnog presjeka koja je dobivena formulom 3.14.

Tablica 11. Proračun nesigurnosti površine poprečnog presjeka

Oznaka	Mjerna veličina	Oznaka za nesigurnost	Vrijednost mm	Razdioba	Koeficijent osjetljivosti mm	$u(x_i)$ mm <sup>2</sup>
$d_0$	promjer	$u_{d_0}$	0,0158	normalna	15,67	0,2469
$S_0$	početni poprečni presjek	$u_{S_0}$	Sastavljena mjerna nesigurnost $u_c$		0,2469 mm <sup>2</sup>	

U tablici 12. prikazan je rezultat mjerne nesigurnosti vlačne čvrstoće koja je dobivena formulom 3.16

Tablica 12. Proračun mjerne nesigurnosti vlačne čvrstoće

Oznaka	Mjerna veličina	Oznaka za nesigurnost	Vrijednost	Razdioba	Koeficijent osjetljivosti	$u(x_i)$ N/mm <sup>2</sup>
$F_m$	sila	$u_{F_m}$	965,30 N	normalna	$0,0128 \text{ mm}^{-2}$	12,3297
$S_0$	početni poprečni presjek	$u_{S_0}$	0,2469 mm <sup>2</sup>	pravokutna	12,70 N/mm <sup>4</sup>	3,14
$R_m$	vlačna čvrstoća	Sastavljena mjerna nesigurnost $u_c$			12,722 N/mm <sup>2</sup>	
		Proširena mjerna nesigurnost $U$ , $k = 2, P = 95\%$			25,44 N/mm <sup>2</sup>	

U tablici 13. prikazan je rezultat mjerne nesigurnosti konvencionalne granice razvlačenja koja je dobivena istom formulom kao i vrijednosti iz tablice 12.

Tablica 13. Proračun mjerne nesigurnosti granice plastičnog razvlačenja

Oznaka	Mjerna veličina	Oznaka za nesigurnost	Vrijednost	Razdioba	Koeficijent osjetljivosti	$u(x_i)$ N/mm <sup>2</sup>
$F_{p0,2}$	sila	$u_{F_{p0,2}}$	1107,33 N	normalna	$0,2469 \text{ mm}^{-2}$	14,144
$S_0$	početni poprečni presjek	$u_{S_0}$	0,2469 mm <sup>2</sup>	pravokutna	10,48 N/mm <sup>4</sup>	2,59
$R_{p0,2}$	konvencionalna granica razvlačenja	Sastavljena mjerna nesigurnost $u_c$			14,378 N/mm <sup>2</sup>	
		Proširena mjerna nesigurnost $U$ , $k = 2, P = 95\%$			28,76 N/mm <sup>2</sup>	

U tablici 14. prikazan je rezultat mjerne nesigurnosti istezljivosti nakon loma koji je dobiven prema formuli 3.18.

Tablica 14. Proračun mjerne nesigurnosti postotnog produljenja

Oznaka	Mjerna veličina	Oznaka za nesigurnost	Vrijednost mm	Razdioba	Koeficijent osjetljivosti mm <sup>-1</sup>	$u(x_i)$ mm/mm
$L_0$	početna duljina	$u_{L_0}$	0,0058	pravokutna	0,016	0,0001



<b><i>Lu</i></b>	konačna duljina	$u_{Lu}$	0,3159	normalna	0,02	0,0063
<b><i>A</i></b>	postotno produljenje	Sastavljena mjerna nesigurnost $u_c$			0,006 mm/mm	
		Proširena mjerna nesigurnost $U$ , $k = 2, P = 95\%$			<b>0,013 mm/mm</b>	

U tablici 15. prikazan je rezultat mjerne nesigurnosti konačne površine poprečnog presjeka koji je dobiven formulom 3.13.

Tablica 15. Proračun mjerne nesigurnosti konačnog poprečnog presjeka

Oznaka	Mjerna veličina	Oznaka za nesigurnost	Vrijednost mm	Razdioba	Koeficijent osjetljivosti mm	$u(x_i)$ mm <sup>2</sup>
<b><i>d<sub>u</sub></i></b>	konačni promjer	$u_{d_u}$	0,1455	normalna	10,141	1,4752
<b><i>S<sub>u</sub></i></b>	konačni poprečni presjek	$u_{S_u}$	Sastavljena mjerna nesigurnost $u_c$		1,4752 mm <sup>2</sup>	

U tablici 16. prikazan je rezultat mjerne nesigurnosti kontrakcije koji je dobiven prema formuli 3.19.

Tablica 16. Proračun mjerne nesigurnosti postotnog smanjena površine

Oznaka	Mjerna veličina	Oznaka za nesigurnost	Vrijednost t mm <sup>2</sup>	Razdioba	Koeficijent osjetljivost i mm <sup>-2</sup>	$u(x_i)$ mm <sup>2</sup> /mm <sup>2</sup>
<b><i>a</i></b>		<b><i>t</i></b>				

$S_0$	početni poprečni presjek	$u_{S_0}$	0,2469	pravokutn a	0,0053	0,00132
$S_u$	konačni poprečni presjek	$u_{S_u}$	1,4752	pravokutn a	0,0128	0,0188
$Z$	postotno produljenje	Sastavljena mjerna nesigurnost $u_c$			0,019 mm <sup>2</sup> /mm <sup>2</sup>	
		Proširena mjerna nesigurnost $U$ , $k = 2, P = 95\%$			0,038 mm <sup>2</sup> /mm <sup>2</sup>	

### 4.3. Statičko vlačno ispitivanje u tvrtki ZIT d.o.o.

U tvrtki ZIT d.o.o. provedeno je ispitivanje na mehanički upravljanoj kidalici 30 TUZ 757 300kN proizvođača Otto Wolpert Werke GmbH, prikazan na slici 21.



Slika 21. Kidalica 30 TUz 757

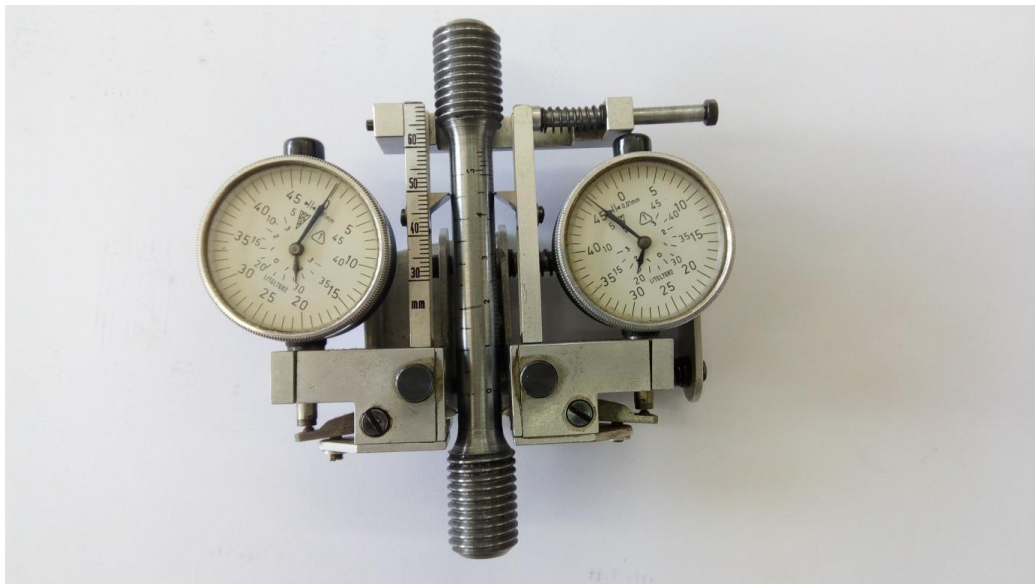
Prije statičkog vlačnog ispitivanja napravljeno je probno ispitivanje na jednoj epruveti kako bi se utvrdilo ponašanje materijala i odredili parametri ispitivanja. Sila prednapreznja je iznosila 5000 N, a brzina ispitivanja je odabrana prema tablici 2 iz točke 2.3. te je iznosila 8 mm/min

(slika 22.). Mjerno područje kidalice je od 0 do 150 kN. Temperatura ispitivanja iznosila je  $23^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ .



**Slika 22. Brzina ispitivanja**

Produljenje do granice razvlačenja mjereno je ekstenzometrom koji je prikazan na slici 23.



**Slika 23. Postavljeni uzorak u ekstenzometar**

Za ispitivanje je uzeto 10 uzoraka na koje je s jedne strane iscrtano 11 linija koje su jedna od druge udaljene za 5 mm, a s druge strane je iscrtano 14 linija gdje je između 7 linije s lijeve i desne strane udaljenost 1,5 mm. Udaljenost između linije s lijeve strane i linije s desne strane

iznosi 50 mm (slika 24.) Ovaj postupak se radi kako bi se izmjerila duljina uzorka nakon loma. Jedanaest linija je iscrtano pomoću okulara dok je 14 linija iscrtano na način da se na pomičnom mjerilu odabrala duljina od 50 mm i onda su iscrtane linije.



**Slika 24. Označavanje duljine ispitivanja**

U tablici 17 prikazane su vrijednosti dimenzija početnog promjera uzorka i početna duljina te početna površina poprečnog presjeka

Tablica 17. Dimenzije epruveta prije ispitivanja

Broj epruvete	Promjer $d_0$ mm	Površina poprečnog presjeka $S_0$ mm <sup>2</sup>	Mjerna duljina $L_0$ mm
1	10,02	78,34	50,00
2	10,01	78,65	50,00
3	9,99	78,33	50,00
4	9,98	78,23	50,00
5	9,98	78,23	50,00
6	10,01	78,65	50,00
7	9,99	7838	50,00
8	9,98	78,23	50,00
9	9,98	78,17	50,00
10	10,01	78,65	50,00

Ispitivanje je provedeno tako da se na kidalici opteretio uzorak do određene sile i nakon toga se popustilo opterećenje do sile predopterećenja te se očitalo produljenje na ekstenzometru. Na taj način dobiveno je 12 točaka iz kojih je napravljen graf i tako je dobivena vrijednost sile granice razvlačenja  $F_{p0,2}$ . Nakon zadnje točke, maknut je ekstenzometar i nastavljeno je ispitivanje do trenutka loma epruvete. Nakon loma očitane su maksimalna sila  $F_m$  i sila kidanja  $F_k$ .

#### **4.3.1. Rezultati ispitivanja**

Nakon provedenog ispitivanja dobivene su vrijednosti granice plastičnog razvlačenja i vlačne čvrstoće, a dimenzije uzoraka nakon ispitivanja su ručno izmjerene korištenjem pomičnog mjerila. Vrijednosti su dane u tablici 18. i tablici 19.

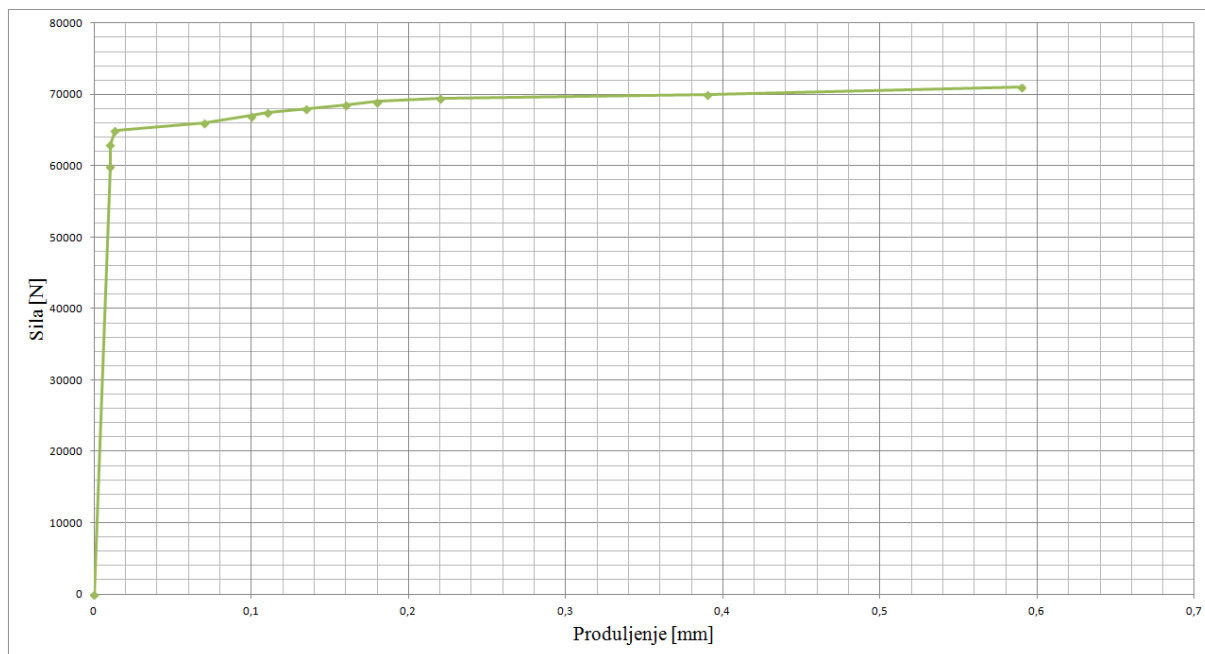
Tablica 18. Dimenzije uzoraka nakon loma

Broj epruvete	Promjer nakon loma $d_u$ mm	Površina poprečnog presjeka nakon loma $S_u$ mm <sup>2</sup>	Mjerna duljina nakon loma $L_u$ mm
1	6,69	35,15	59,30
2	6,53	33,49	60,04
3	6,52	33,39	59,53
4	6,68	35,05	58,88
5	6,55	33,7	59,36
6	6,68	35,05	58,93
7	6,62	34,42	59,53
8	6,67	35,46	58,98
9	6,45	32,67	59,70
10	6,91	37,5	59,02

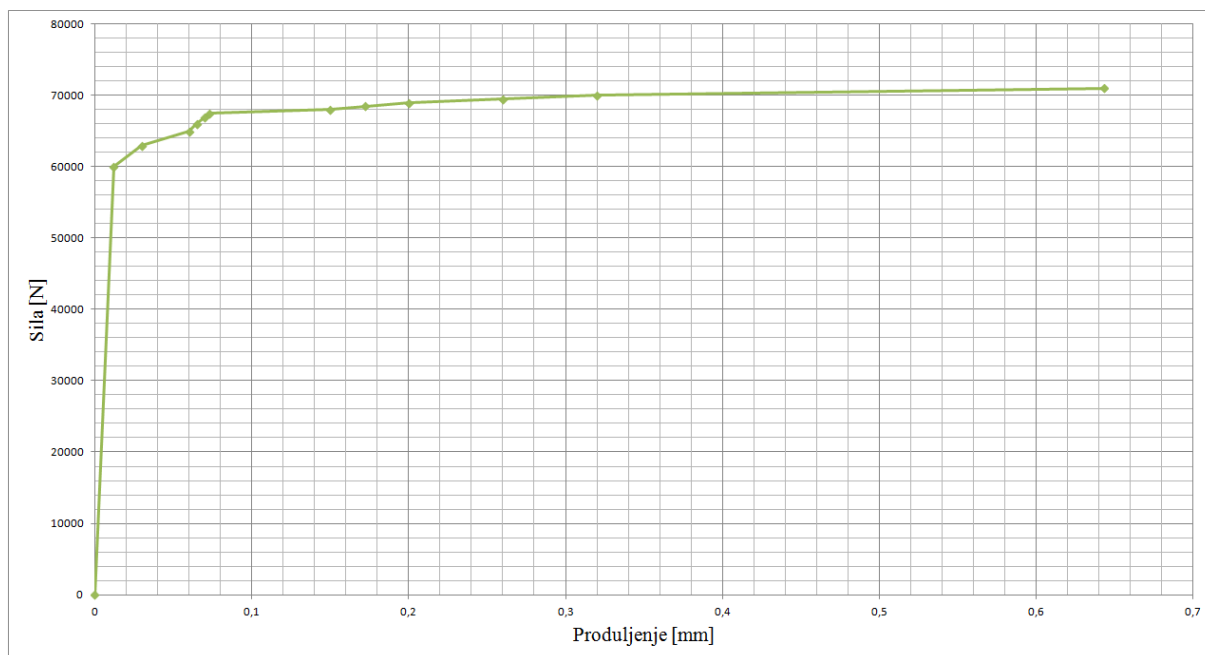
Tablica 19. Rezultati ispitivanja svojstava materijala

Broj epruvete	$R_{p0,2}$ N/mm <sup>2</sup>	$R_m$ N/mm <sup>2</sup>	$A$ %	$Z$ %
1	876,83	990,55	18,7	55,1
2	871,24	963,76	19,8	57,4
3	868,12	979,19	18,9	57,4
4	871,66	981,72	17,9	55,2
5	889,53	989,39	18,8	56,9
6	880,48	982,84	17,9	55,4
7	876,37	978,57	19,1	56,1
8	877,34	988,11	17,9	54,7
9	882,69	985,03	19,4	58,2
10	882,07	984,11	18,0	52,3
<b>Sred. vrij.</b>	877,63	982,33	18,65	55,88
<b>Std. dev.</b>	6,3623	7,6793	0,6960	1,7157

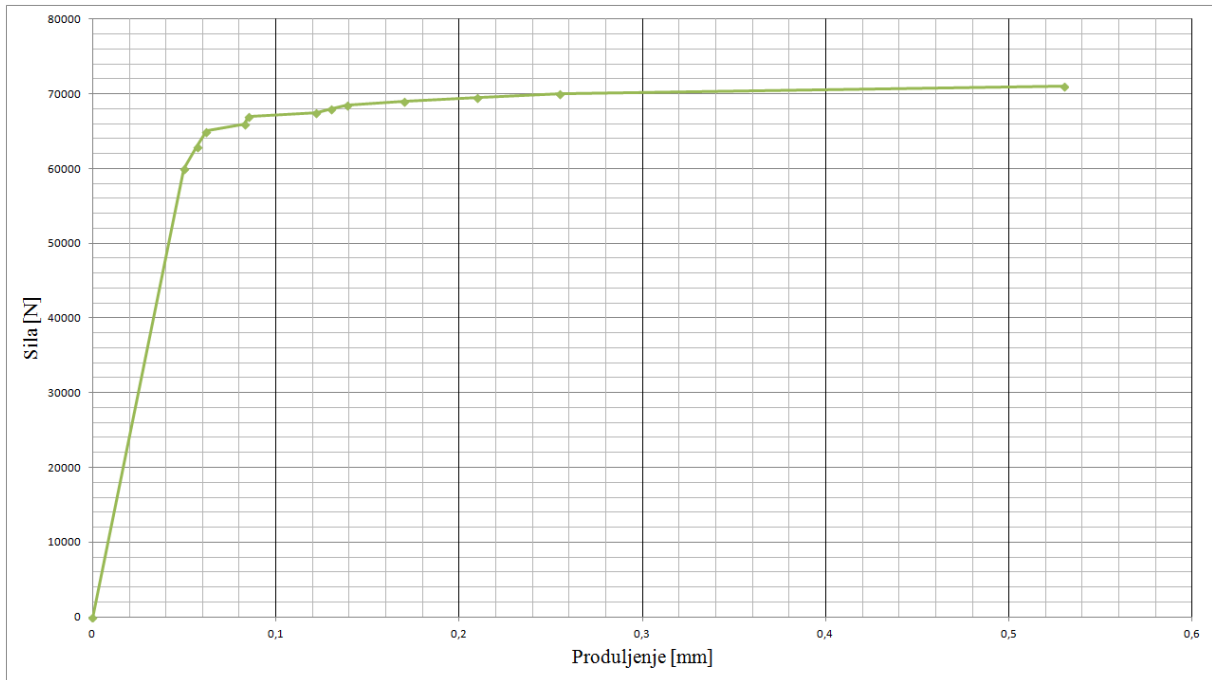
Iz 12 dobivenih točaka iscrtani su dijagrami sila-produljenje korištenjem programa Microsoft Office Excel 2007. Neki od dijagrama su prikazani na slikama ispod.



Slika 25. Dijagram sila-produljenje za uzorak 6



Slika 26. Dijagram sila-produljenje za uzorak 9



Slika 27. Dijagram sila-produljenje za uzorak 10

Utjecajne veličine na rezultate ispitivanja nalaze se u tablici 10.

#### 4.3.2. Procjena mjerne nesigurnosti

Mjerna nesigurnost izračunava se prema formulama iz točke 3.9. za parametre vlačne čvrstoće  $R_m$ , konvencionalne granice razvlačenja  $R_{p0,2}$ , postotnog produljenja  $A$  i kontrakcije  $Z$ , kao i u poglavlju 4.2.2. kod proračuna mjerne nesigurnosti rezultata ispitivanja u Laboratoriju FSB-a. Vrijednosti mjernih nesigurnosti prikazane su u slijedećim tablicama.

Tablica 20. Proračun nesigurnosti površine poprečnog presjeka

Oznaka	Mjerna veličina	Oznaka za nesigurnost	Vrijednost mm	Razdioba	Koeficijent osjetljivosti mm	$u(x_i)$ mm <sup>2</sup>
$d_0$	promjer	$u_{d_0}$	0,0164	normalna	15,69	0,2577
$S_0$	početni poprečni presjek	$u_{S_0}$	Sastavljena mjerna nesigurnost $u_c$		0,2577 mm <sup>2</sup>	



Tablica 21. Proračun mjerne nesigurnosti vlačne čvrstoće

Oznaka	Mjerna veličina	Oznaka za nesigurnost	Vrijednost	Razdioba	Koeficijent osjetljivosti	$u(x_i)$ N/mm <sup>2</sup>
$F_m$	sil	$u_{F_m}$	543,83 N	normalna	$0,0128 \text{ mm}^{-2}$	6,94
$S_o$	početni poprečni presjek	$u_{S_o}$	$0,2577 \text{ mm}^2$	pravokutna	$12,53 \text{ N/mm}^4$	3,23
$R_m$	vlačna čvrstoća	Sastavljena mjerna nesigurnost $u_c$			$7,652 \text{ N/mm}^2$	
		Proširena mjerna nesigurnost $U$ , $k = 2, P = 95\%$			<b><math>15,30 \text{ N/mm}^2</math></b>	

Tablica 22. Proračun mjerne nesigurnosti granice plastičnog razvlačenja

Oznaka	Mjerna veličina	Oznaka za nesigurnost	Vrijednost	Razdioba	Koeficijent osjetljivosti	$u(x_i)$ N/mm <sup>2</sup>
$F_{p0,2}$	sil	$u_{F_{p0,2}}$	523,38 N	normalna	$0,0128 \text{ mm}^{-2}$	6,677
$S_o$	početni poprečni presjek	$u_{S_o}$	$0,2577 \text{ mm}^2$	pravokutna	$11,20 \text{ N/mm}^4$	2,885
$R_{p0,2}$	konvencionalna granica razvlačenja	Sastavljena mjerna nesigurnost $u_c$			$7,274 \text{ N/mm}^2$	
		Proširena mjerna nesigurnost $U$ , $k = 2, P = 95\%$			<b><math>14,55 \text{ N/mm}^2</math></b>	

Tablica 23. Proračun mjerne nesigurnosti postotnog produljenja

Oznaka	Mjerna veličina	Oznaka za nesigurnost	Vrijednost mm	Razdioba	Koeficijent osjetljivosti mm <sup>-1</sup>	$u(x_i)$ mm/mm
$L_o$	početna duljina	$u_{L_o}$	0,0058	pravokutna	0,016	0,0001

$L_u$	konačna duljina	$u_{Lu}$	0,3912	normalna	0,02	0,0078
$A$	postotno produljenje	Sastavljena mjerna nesigurnost $u_c$			0,0078 mm/mm	
		Proširena mjerna nesigurnost $U$ , $k = 2, P = 95\%$			0,0156 mm/mm	

Tablica 24. Proračun mjerne nesigurnosti konačnog poprečnog presjeka

Oznaka	Mjerna veličina	Oznaka za nesigurnost	Vrijednost mm	Razdioba	Koeficijent osjetljivosti mm	$u(x_i)$ mm <sup>2</sup>
$d_u$	konačni promjer	$u_{du}$	0,1325	normalna	10,409	1,3792
$S_u$	konačni poprečni presjek	$u_{Su}$	Sastavljena mjerna nesigurnost $u_c$		1,3792 mm <sup>2</sup>	

Tablica 25. Proračun mjerne nesigurnosti postotnog smanjena površine

Oznaka	Mjerna veličina	Oznaka za nesigurnost	Vrijednost mm <sup>2</sup>	Razdioba	Koeficijent osjetljivosti mm <sup>-2</sup>	$u(x_i)$ mm/mm
$S_o$	početni poprečni presjek	$u_{So}$	0,2577	pravokutna	0,0056	0,00145
$S_u$	konačni poprečni presjek	$u_{Su}$	1,3792	pravokutna	0,0128	0,0176
$Z$	postotno produljenje	Sastavljena mjerna nesigurnost $u_c$			0,01766 mm/mm	
		Proširena mjerna nesigurnost $U$ , $k = 2, P = 95\%$			0,0353 mm/mm	

## 5. ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA

### 5.1. Analiza mjesta loma

Analizom mjesta loma vidljivo je da su uzorci iz Laboratorija za ispitivanje mehaničkih svojstava FSB-a (slika 28.) pucali uglavnom na jednoj trećini duljine kao i uzorci ispitani u laboratoriju tvrtke ZIT d.o.o. (slika 29.).



Slika 28. Ispitni uzorci iz Laboratorija FSB-a



Slika 29. Ispitni uzorci iz tvrtke ZIT d.o.o.

## 5.2. Analiza rezultata statičkog vlačnog ispitivanja

Ispitivanja su provedena na dvije različite kidalice. Kidalica u Laboratoriju FSB-a je računalno kontrolirana, dok je kidalica u tvrtki ZIT kontrolirana ručno od strane operatera. U tablici 26. prikazani su rezultati ispitivanja na obje kidalice i njihove proširene mjerne nesigurnosti.

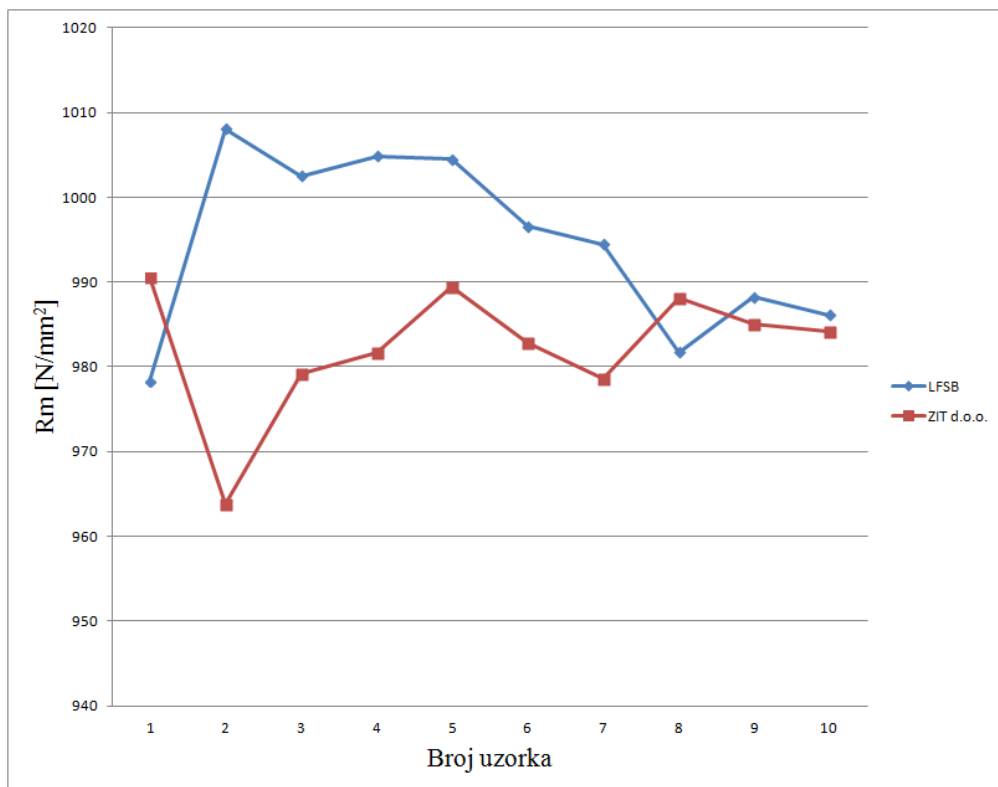
Tablica 26. Rezultati ispitivanja u LFSB-u i ZIT-u d.o.o.

Broj uzorka	LFSB				ZIT d.o.o.			
	$R_m$ N/mm <sup>2</sup>	$R_{p0,2}$ N/mm <sup>2</sup>	A %	Z %	$R_m$ N/mm <sup>2</sup>	$R_{p0,2}$ N/mm <sup>2</sup>	A %	Z %
1	978,28	818,17	17,58	59,03	990,55	876,83	18,7	55,1
2	1008,04	833,25	18,56	59,87	963,76	871,24	19,8	57,4
3	1002,51	827,9	18,28	55,71	979,19	868,12	18,9	57,4
4	1004,85	809,3	18,50	59,54	981,72	871,66	17,9	55,2
5	1004,49	821,75	17,92	55,13	989,39	889,53	18,8	56,9
6	996,61	831,34	17,20	59,20	982,84	880,48	17,9	55,4
7	994,44	840,08	18,46	59,41	978,57	876,37	19,1	56,1
8	981,73	809,03	17,34	57,39	988,11	877,34	17,9	54,7
9	988,23	801,42	17,76	57,99	985,03	882,69	19,4	58,2
10	986,08	809,25	17,22	58,29	984,11	882,07	18,0	52,3
$\bar{x}$	<b>994,53</b>	<b>820,15</b>	<b>17,88</b>	<b>58,16</b>	<b>982,33</b>	<b>877,63</b>	<b>18,65</b>	<b>55,88</b>
$U(x_i)$	<b>±17,38</b>	<b>±28,76</b>	<b>±1,30</b>	<b>±3,80</b>	<b>±15,30</b>	<b>±14,55</b>	<b>±1,60</b>	<b>±3,50</b>

### 5.2.1. Analiza rezultata mjerenja vlačne čvrstoće i konvencionalne granice razvlačenja

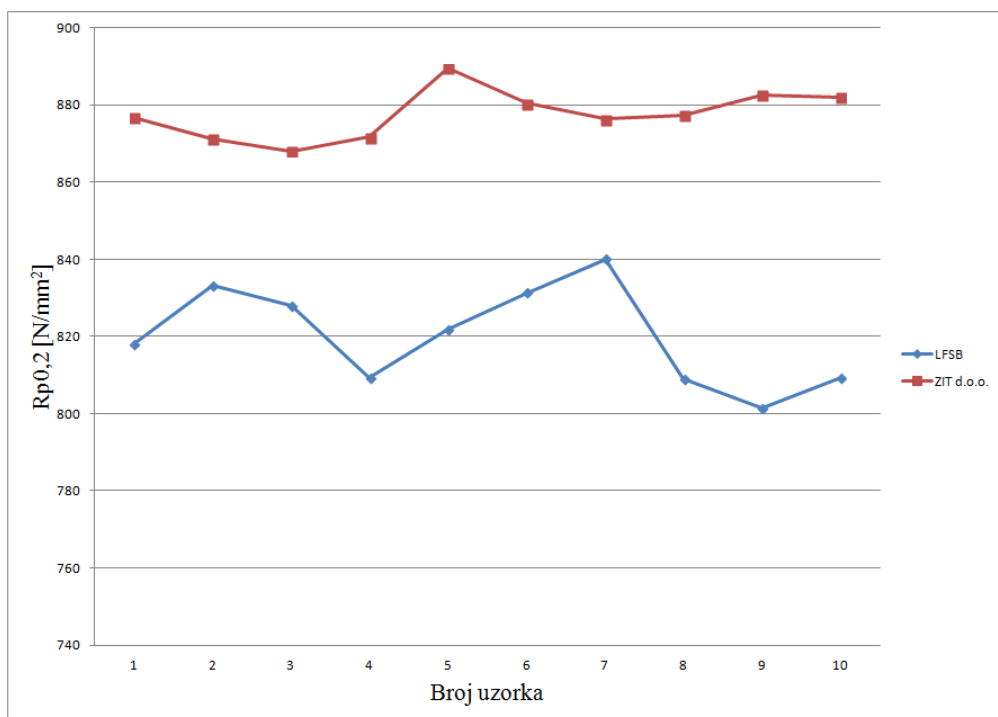
Na slici 30. dijagramski su prikazane vrijednosti vlačne čvrstoće za svaki uzorak, ispitani u Laboratoriju FSB-a i tvrtki ZIT d.o.o.

Iz dijagrama je vidljivo da su vrijednosti vlačne čvrstoće dobivene na kidalici u LFSB-u veće od vrijednosti dobivenih u tvrtki ZIT d.o.o.



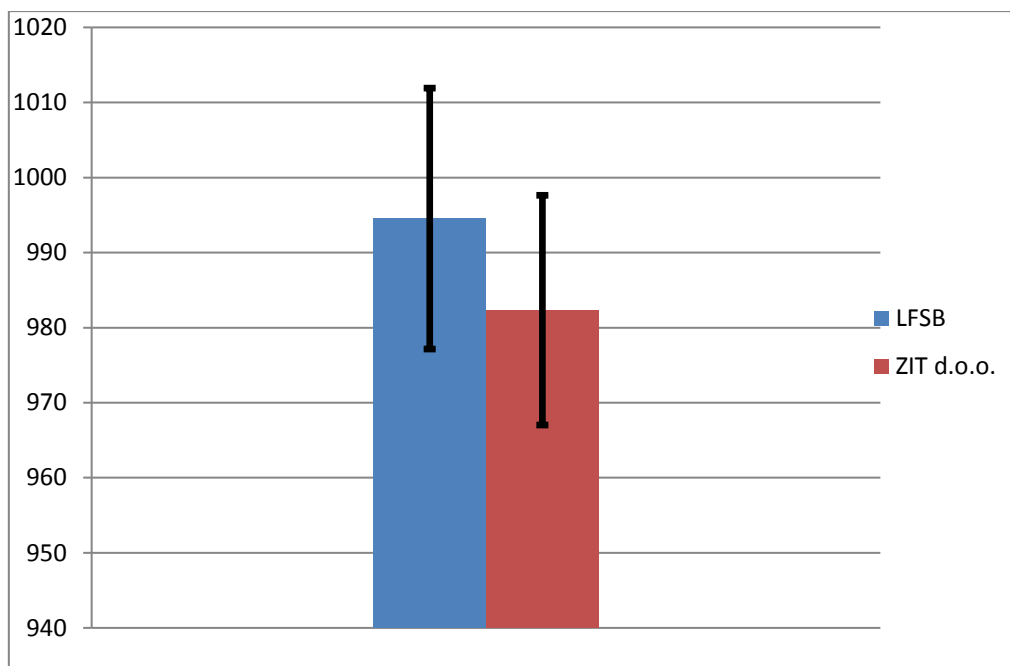
Slika 30. Dijagramski prikaz iznosa vlačne čvrstoće za uzorke ispitane na dvije različite kadalice

Na slici 31. dijagramski su prikazane vrijednosti konvencionalne granice razvlačenja za svaki uzorak, ispitani u oba laboratorija. Iznosi vrijednosti konvencionalne granice razvlačenja veći su u tvrtki ZIT d.o.o. nego u LFSB-u.



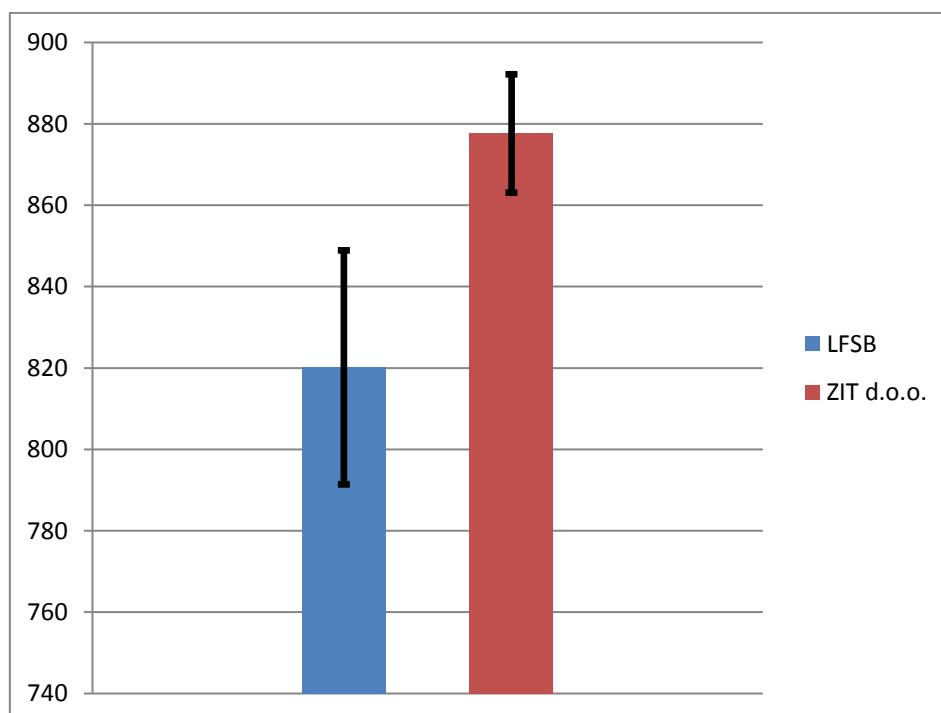
Slika 31. Dijagramski prikaz iznosa konvencionalne granice razvlačenja za uzorke ispitane na dvije različite kadalice

Na slici 32. nalaze se srednje vrijednosti rezultata vlačne čvrstoće za obje kidalice i područja mjerne nesigurnosti koji su označeni crnom linijom.



Slika 32. Dijagramski prikaz srednje vrijednosti vlačne čvrstoće i pripadajuće mjerne nesigurnosti

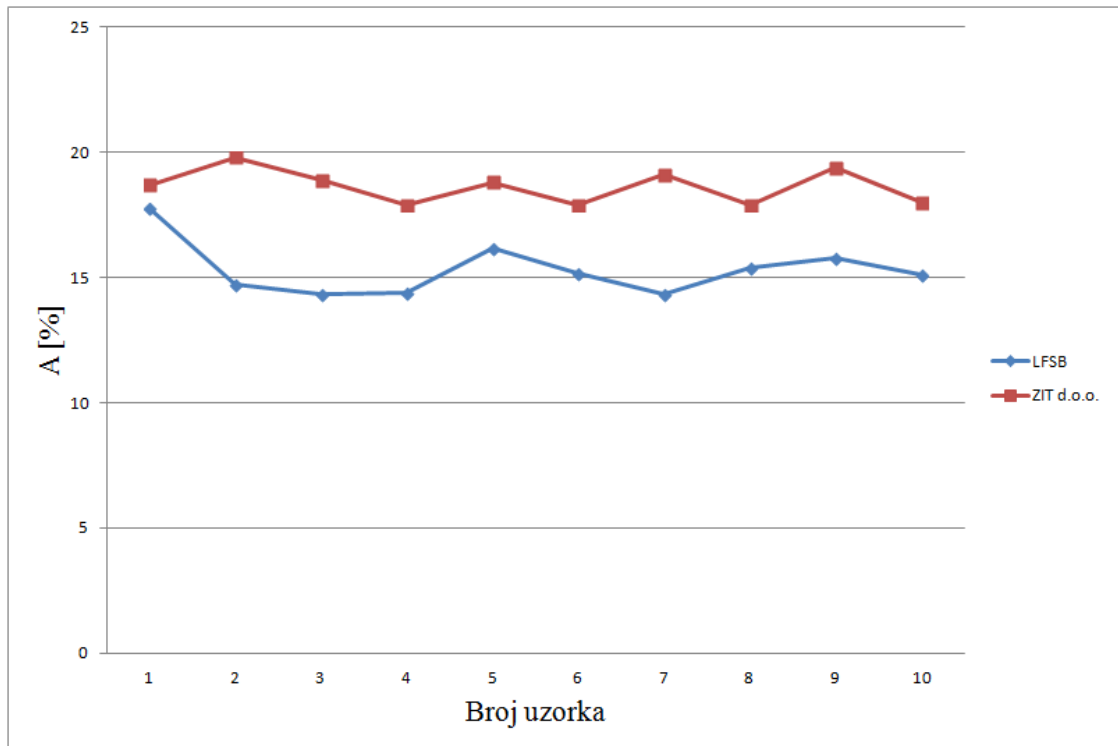
Na slici 33. dijagramski su prikazane srednje vrijednosti konvencionalne granice razvlačenja i pripadajuće mjerne nesigurnosti za obje kidalice.



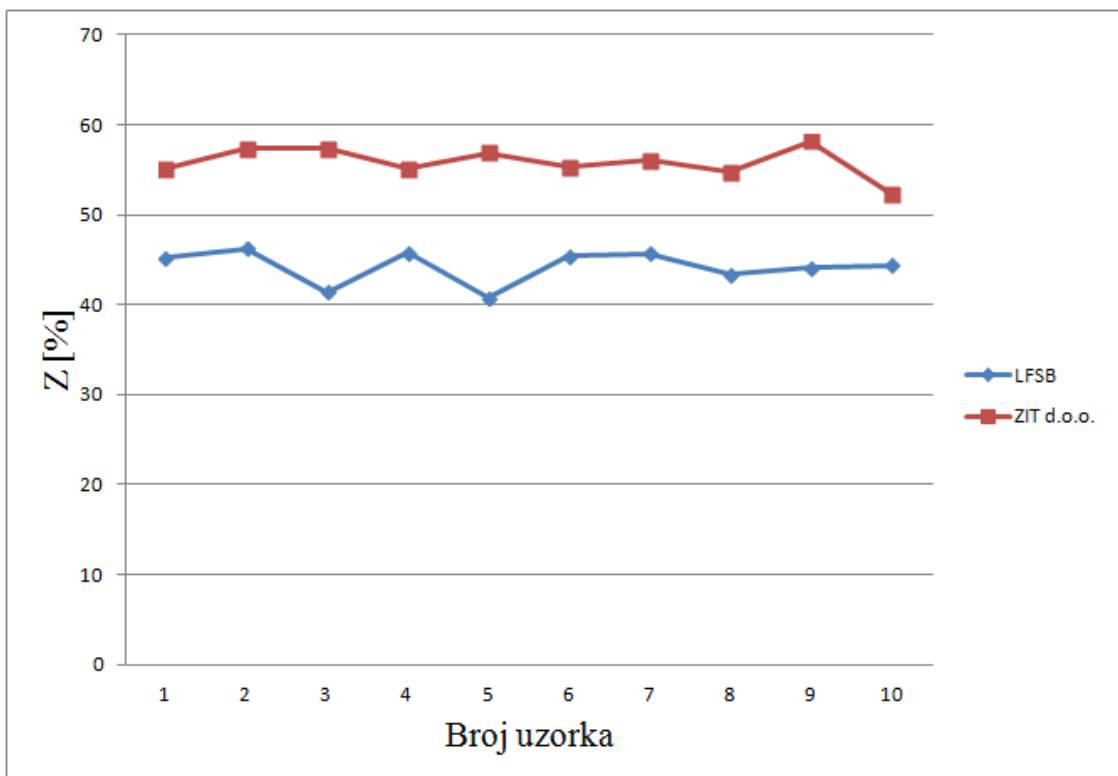
Slika 33. Dijagramski prikaz srednje vrijednosti konvencionalne granice razvlačenja i pripadajuće mjerne nesigurnosti

### 5.2.2. Analiza mjerne nesigurnosti istezanja i suženja

Na slikama 34. i 35. dijagramski su prikazane vrijednosti istezanja i suženja za svaki uzorak.

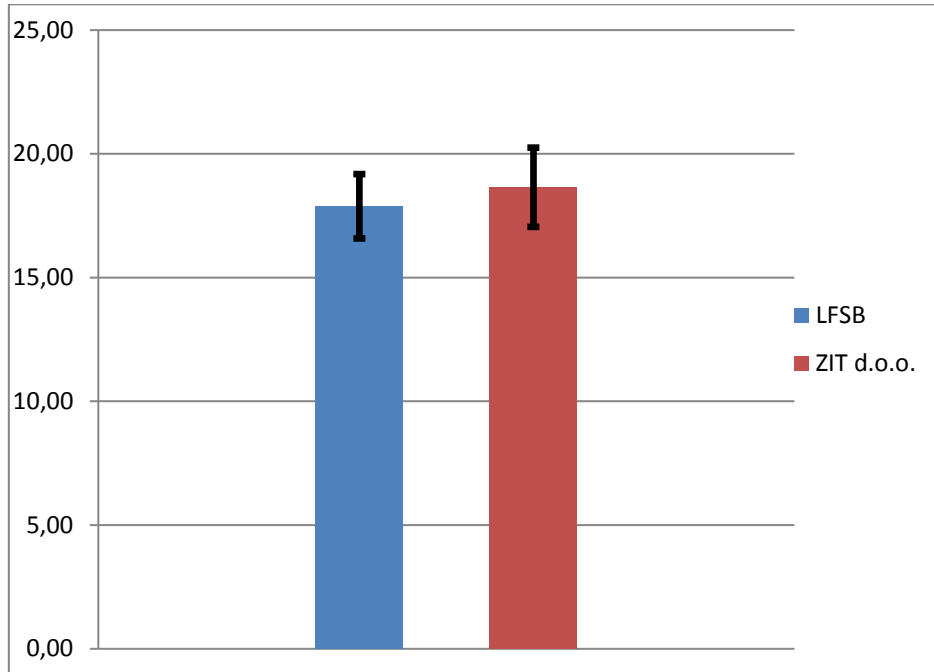


Slika 34. Dijagramski prikaz iznosa istezanja za pojedine uzorke iz oba ispitna laboratorija

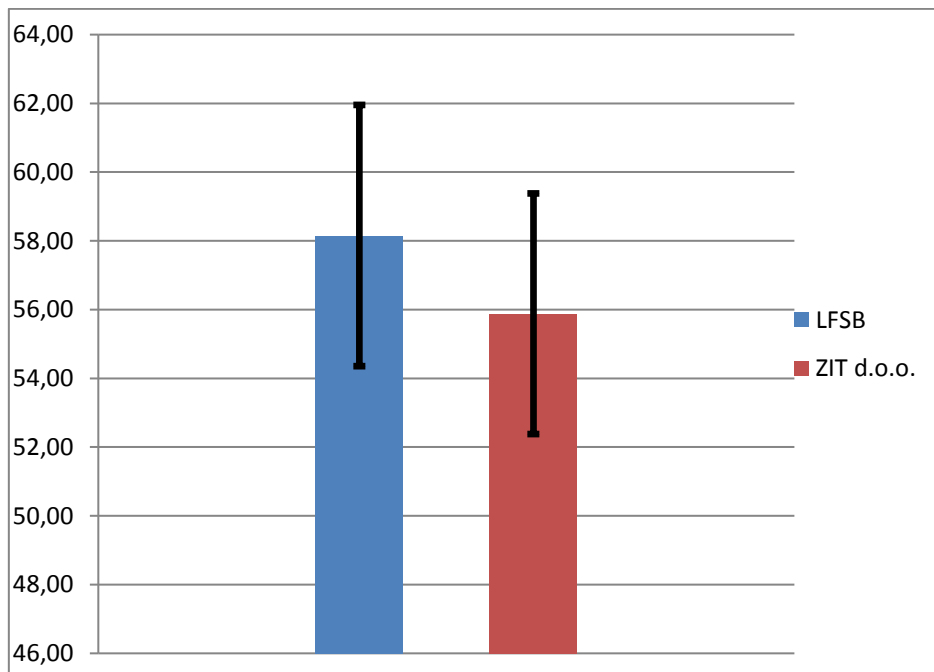


Slika 35. Dijagramski prikaz iznosa suženja za pojedine uzorke iz oba ispitna laboratorija

Na slikama 36. i 37. dijagramski su prikazane srednje vrijednosti istežanja i kontrakcije s pripadajućim mjernim nesigurnostima. Vidljivo je iz dijagram da su vrijednosti približno jednake što je i očekivano kako se radi o istim ispitnim uzorcima.



Slika 36. Dijagramski prikaz srednje vrijednosti istežljivosti nakon loma i pripadajuće mjerne nesigurnosti



Slika 37. Dijagramski prikaz srednje vrijednosti kontrakcije i pripadajuće mjerne nesigurnosti



## 6. ZAKLJUČAK

Statičkim vlačnim ispitivanjem na ispitnim uzorcima od istog materijala utvrđene su vrijednosti  $R_m$ ,  $R_{p0,2}$ ,  $A$ , i  $Z$  na dvjema kidalicama različitih mjernih sposobnosti. Na temelju rezultata mjerenja i analize istih doneseni su zaključci:

- za ispitivani materijal dobivene su slijedeće aritmetičke vrijednosti mehaničkih svojstava:
  - na elektronskoj kidalici:
    - $R_m = 994,53 \text{ N/mm}^2 \pm 17,38 \text{ N/mm}^2$
    - $R_{p0,2} = 820,15 \text{ N/mm}^2 \pm 28,76 \text{ N/mm}^2$
    - $A = 17,88 \% \pm 1,3 \%$
    - $Z = 58,16 \% \pm 3,8 \%$
  - na hidrauličkoj ručno upravljanoj kidalici:
    - $R_m = 982,33 \text{ N/mm}^2 \pm 15,3 \text{ N/mm}^2$
    - $R_{p0,2} = 877,63 \text{ N/mm}^2 \pm 14,55 \text{ N/mm}^2$
    - $A = 18,65 \% \pm 1,6 \%$
    - $Z = 55,88 \% \pm 3,50 \%$
- Veličine srednje vrijednosti vlačne čvrstoće i pripadajuće mjerne nesigurnosti su približno jednake (unutar 1,5 %) te se može zaključiti kako nema razlike između kidalica prilikom ispitivanja vlačne čvrstoće.
- Vrijednosti aritmetičkih sredina konvencionalne granice razvlačenja i pripadajuće mjerne nesigurnosti dobivene na kidalicama se značajno razlikuju. Razlika proizlazi iz upravljanja brzinama pri ispitivanju, ali i primjeni neodgovarajućih ekstenzometara pri malim pomacima produljenja tijela epruvete.
- Veličine istezljivost ( $A$ ) i kontrakcija ( $Z$ ) ovise isključivo o točnosti mjerenja početne i konačne mjerne duljine te proračuna početne i konačne površine poprečnog presjeka. Vrijednosti aritmetičke sredine i proširene mjerne nesigurnosti istezljivosti i kontrakcije su približno jednake u oba slučaja kako je i očekivano jer su uzorci ispitivanja izrađeni od istog materijala.
- Iz analize rezultata mjerenja i modela procjene i proračuna mjerne nesigurnosti vidljivo je da primijenjeni model procjene i proračuna mjerne nesigurnosti nije u potpunosti korektan i treba ga prilagoditi ispitnoj opremi. Ova prilagodba zahtijeva detaljnije poznavanje kako ispitne opreme tako i bolja teoretska znanja o procjeni i proračunu mjerne nesigurnosti.

## 7. LITERATURA

- [1] Hrvatski zavod za norme; Engleska verzija norme HRN EN ISO 6892-1:2009, 2010
- [2] Bell, S.: *A Beginner's Guide to Uncertainty of Measurement* (Issue 2), Crown Copyright, 1999.
- [3] JCGM; *Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement* (First Edition), JCGM, 2008.
- [4] Runje, B.: *Teorija i tehnika mjerenja*, Predavanja iz kolegija Teorija i tehnika mjerenja, Zagreb, 2014.
- [5] Gabauer, W.: *The Determination of Uncertainties in Tensile Testing*, Code of Practice No. 07, Voest-Alpine Stahl Linz GmbH, Austria, 2000.
- [6] Microsoft Office Excel 2007

## **PRILOZI**

- I. CD-R disc