

# Projekt sustava za umjeravanje mjerila razine vode

---

**Deriš, Tomislav**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2020**

*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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:569159>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-10-13**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Tomislav Deriš**

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

**PROJEKT SUSTAVA ZA  
UMJERAVANJE MJERILA RAZINE  
VODE**

Mentor:  
Prof. dr. sc. Lovorka Grgec Bermanec, dipl. ing.

Student:  
Tomislav Deriš

Zagreb, 2020. godina.

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

Zahvaljujem izv.prof.dr.sc. Tatjani Bakran-Petricioli s Biološkog odsjeka Prirodoslovno-matematičkog fakulteta u Zagrebu i Donatu Petricioli, dipl.ing.biologije, iz tvrtke D.I.I.V. d.o.o. Sali na ustupljenim sensorima i čitačima senzora potrebnim za ovaj rad.

Zahvaljujem se profesorici Lovorki Grgec Bermanec na ukazanoj pomoći tijekom izrade ovog završnog rada.

Tomislav Deriš



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

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

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Tomislav Deriš** Mat. br.: 0035204462

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Projekt sustava za umjeravanje mjerila razine vode**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Design of measurement system for calibration of water level sensors**

Opis zadatka:

Za potrebe dugotrajnih i preciznih mjerenja plime i oseke potrebno je karakterizirati samostalne tlačne osjetnike za mjerenje i arhiviranje podataka (data loggere). Potrebno je projektirati sustav za umjeravanje mjerila razine vode koja rade na principu mjerenja tlaka. Predvidjeti mogućnost arhiviranja podataka do 5 godina u mjernom području 0 do 9 m dubine. Koristiti etalonsku mjernu opremu Laboratorija za procesna mjerenja.

U radu je potrebno:

- Opisati mogućnosti i metode mjerenja razine vode.
- Projektirati i izraditi tlačnu komoru za ispitivanje odabranih osjetnika.
- Odabrati etalone, sastaviti i opisati mjerni sustav za umjeravanje u Laboratoriju za procesna mjerenja.
- Odabrati postupak i provesti sljedivo umjeravanje najmanje jednog osjetnika u najmanje pet točaka te odrediti odstupanja.
- Procijeniti mjerne nesigurnosti dobivenih rezultata mjerenja.

U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:  
28. studenog 2019.

Datum predaje rada:  
1. rok: 21. veljače 2020.  
2. rok (izvanredni): 1. srpnja 2020.  
3. rok: 17. rujna 2020.

Predviđeni datumi obrane:  
1. rok: 24.2. – 28.2.2020.  
2. rok (izvanredni): 3.7.2020.  
3. rok: 21.9. - 25.9.2020.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Lovorka Grgec Bermanec

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Igor Balen

## Sadržaj

Sadržaj .....	I
Popis slika .....	III
Popis tablica .....	IV
Popis oznaka .....	V
Sažetak .....	VI
Summary .....	VII
1. Uvod .....	1
2. Metode mjerenja dubine .....	1
2.1. Mjerenje dubine pomoću plovka .....	1
2.2. Mjerenje razine pomoću staklene cjevčice .....	2
2.3. Štapna mjerila dubine .....	3
2.4. Magnetska mjerila dubine .....	3
2.4.1. Magnetni plovak .....	3
2.4.2. Magnetostrikcija .....	4
2.5. Mjerila dubina koja rade na principu mjerenja tlaka .....	5
2.5.1. Hidrostatska mjerila dubine .....	5
2.5.2. „Air Bubbler“ .....	6
2.5.3. Diferencijalna mjerila dubine .....	7
2.6. Ultrazvučna mjerila dubine .....	8
2.7. Radarska mjerila dubine .....	9
2.8. Kapacitativno mjerilo dubine .....	9
3. Mjerni sustav za umjeravanje mjerila dubine .....	10
3.1. Kalibrator tlaka .....	10
3.2. Barometar .....	10
3.3. Konstrukcijsko rješenje tlačne komore .....	11
3.4. Ispitivani tlačni osjetnik .....	12
4. Laboratorijska mjerenja .....	13
4.1. Opis mjerne linije .....	15

4.2. Postupak mjerenja.....	15
4.3. Rezultati mjerenja.....	18
5. Obrada rezultata mjerenja.....	21
5.1. Teorijska osnova mjerne nesigurnosti.....	21
5.1.1. Proširena mjerna nesigurnost .....	23
5.2. Opis metode umjeravanja .....	24
5.2.1. Model zbroj/razlika .....	25
5.2.2. Model umnožak/količnik .....	26
5.2.3. Umjeravanje digitalnog manometra.....	26
5.2.4. Izračun nesigurnosti.....	27
5.3. Procjena mjerne nesigurnosti .....	30
6. Zaključak .....	39
LITERATURA.....	40

## Popis slika

Slika 1. Primjer sustava za mjerenje dubine pomoću plovka .....	2
Slika 2. Sustav za mjerenje dubine pomoću staklene cjevčice .....	2
Slika 3. Štapno mjerilo dubine .....	3
Slika 4. Shema sustava za mjerenje dubine magnetnim plovkom .....	4
Slika 5. Shema mjerenja dubine pomoću magnetostrikcije .....	5
Slika 6. Shema mjerenja dubine pomoću hidrostatskog tlaka .....	6
Slika 7. Shema mjerenja dubine pomoću propuhivanja zrakom .....	7
Slika 8. Shema diferencijalnog mjerila dubine .....	8
Slika 9. Shema ultrazvučnog mjerila dubine .....	8
Slika 10. Radarsko mjerilo dubine .....	9
Slika 11. Kalibrator tlaka PC M Z-01196(TLKAL02) .....	10
Slika 12. Skica tlačne komore .....	11
Slika 13. Detalj tlačne komore .....	11
Slika 14. Tlačna komora .....	12
Slika 15. Mjerilo dubine HOB0 U20-001-01-Ti .....	13
Slika 16. Mjerna linija .....	15
Slika 17. Metoda C umjeravanja .....	16
Slika 18. Sučelje software-a ispitivanog mjerila dubine .....	17
Slika 19. Gaussova razdioba .....	22
Slika 20. Pravokutna razdioba .....	23
Slika 21. Trokutasta razdioba .....	23
Slika 22. Proširena mjerna nesigurnost .....	24
Slika 23. Dijagram odstupanja i mjerne nesigurnosti u milibarima .....	37
Slika 24. Dijagram odstupanja i mjerne nesigurnosti u centimetrima .....	38



## Popis tablica

Tablica 1: Rezultati laboratorijskog mjerenja, točka umjeravanja br. 0 .....	18
Tablica 2: Rezultati laboratorijskog mjerenja, točka umjeravanja br. 1 .....	18
Tablica 3: Rezultati laboratorijskog mjerenja, točka umjeravanja br. 2 .....	19
Tablica 4: Rezultati laboratorijskog mjerenja, točka umjeravanja br. 3 .....	19
Tablica 5: Rezultati laboratorijskog mjerenja, točka umjeravanja br. 4 .....	20
Tablica 6: Rezultati laboratorijskog mjerenja, točka umjeravanja br. 5 .....	20
Tablica 7. Postupak određivanja mjerne nesigurnosti.....	25
Tablica 8. Sastavnice mjerne nesigurnosti.....	29
Tablica 9. Rezultati mjerenja u Laboratoriju za procesna mjerenja .....	30
Tablica 10: Mjerna nesigurnost točke 0.....	31
Tablica 11: Mjerna nesigurnost točke 1.....	32
Tablica 12: Mjerna nesigurnost točke 2.....	33
Tablica 13: Mjerna nesigurnost točke 3.....	34
Tablica 14: Mjerna nesigurnost točke 4.....	35
Tablica 15: Mjerna nesigurnost točke 5.....	36
Tablica 16. Podaci za izračun odstupanja dubine iz izmjerenog odstupanja tlaka .....	38

## Popis oznaka

Oznaka	Jedinica	Opis oznake
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	gustoća
$p$	Pa	tlak
$g$	m/s <sup>2</sup>	ubrzanje sile teže
$h$	m	visina, dubina
$\bar{x}$	-	srednja vrijednost
$s$	-	standardna devijacija
$\sigma$	-	standardna devijacija
$\mu$	-	rezultat sa najvećom vjerojatnošću
$a$	-	polu-interval mjerne nesigurnosti
$k$	-	faktor pokrivanja
$U$	mbar	proširena mjerna nesigurnost
$u$	mbar	standardna mjerna nesigurnost
$c_i$	-	koeficijent osjetljivosti
$U_{etalona}$	mbar	mjerna nesigurnost etalona
$U_r$	mbar	mjerna nesigurnost rezolucije ispitivanog mjerila
$U_h$	mbar	mjerna nesigurnost uslijed histereze
$U_b$	mbar	mjerna nesigurnost uslijed ponovljivosti
$U_{fo}$	mbar	mjerna nesigurnost uslijed pogreške u ništici
$U_{e,kalibratora}$	mbar	mjerna nesigurnost etalonskog kalibratora tlaka
$U_{e,barometra}$	mbar	mjerna nesigurnost etalonskog barometra

## Sažetak

U ovom radu cilj je bio projektirati i izraditi tlačnu komoru za ispitivanje mjerila dubine te provesti sljedivo umjeravanje barem jednog osjetnika. U prvom djelu zadatka dana je teorijska osnova kojom su opisane mogućnosti i metode mjerenja razine vode. Nakon toga je dan opis konstrukcijskog rješenja tlačne komore, projektirana tlačna komora je zrakotijesna do pretlaka 2 bara te se sastoji od pocinčane cijevi nazivnog promjera 32mm i duljine 600mm, lijevanih kapa i brtvenog materijala. Mjerenja su provedena na mjernoj liniji koja se sastojala od tlačnog kalibratora, barometra, tlačne komore i predmeta umjeravanja. Predmet umjerevanja je bilo mjerilo razine vode mjernog područja do 9 metara dubine. Tijekom razrade ovog zadatka korištene su smjernice prema metodama DKD-R6-1 i EURAMET. Korištena je etalonska mjerna oprema Laporatorija za procesna mjerenja.

## Summary

The goal of this paper was to design and make a pressure vessel for calibrating depth sensors and to carry out at least one traceable calibration of a depth sensor. First of all, the theoretical background and the possibilities and methods of measuring depth and fluid level is given. Furthermore, the description of the pressure vessel is given, the designed pressure vessel must be airtight under overpressure of 2 bars and be made of 600 mm long galvanized steel pipe with a nominal diameter of 32 mm, cast caps and sealant material. Measurements were done on a measuring line made of a pressure calibrator, barometer, the designed pressure vessel and the subject of calibration. The subject of calibration was a depth sensor with a range of up to 9 meters. This paper was made with DKD-R6-1 and EURAMET guidelines. The reference equipment of the Laboratory for process measurements was used in this paper.

## 1. Uvod

Od početka civilizacije ljudi su se naseljavali u blizini vodenih površina te je zbog toga mjerenje razine vode jedno od najstarijih mjerenja. Još od vremena starog Egipta u područjima sklonim poplavama koristile su se oznake vodostaja kako bi se predvidjele moguće poplave. Nadalje, ljudi su mjerili razinu mora kako bi znali kada nastupa plima, a kada oseka. U današnje vrijeme mjerenje vodostaja te razina kapljevina općenito i dalje je jedno od najvažnijih mjerenja pa su se razvile razne tehnologije za mjerenje razine vode, ali i drugih kapljevina. Kao jedan od najvećih problema 21. stoljeća se trenutno nameću klimatske promjene te postoji potreba za kvalitetnim i dugoročnim praćenjem vodostaja. Upravo tu dugoročnost i preciznost nam omogućuju samostalni tlačni osjetnici za mjerenje i arhiviranje podataka (tako zvani data loggeri). Kako bi se uspostavila što točnija veza između stvarne fizikalne veličine i veličine koja je prikazana na mjernom uređaju osjetnike je potrebno umjeravati u određenim vremenskim intervalima. U sklopu ovog rada projektirana je tlačna komora za umjeravanje mjerila dubine te je postavljena mjerna linija na kojoj je provedeno umjeravanje osjetnika.

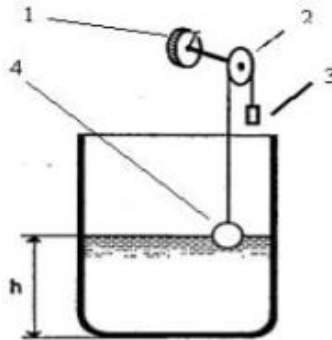
## 2. Metode mjerenja dubine

Mjerila dubine su mjerni instrumenti pomoću kojih se dobije podatak o dubini ili razini kapljevine. U nastavku su nabrojene i objašnjene razne metode mjerenja dubine i razine.

### 2.1. Mjerenje dubine pomoću plovka

Jedna od mogućih izvedbi je mjerni sustav koji se sastoji od plovka(4), koloture(2), protu-utega(3) i potenciometra(1). Pošto je plovak manje gustoće od kapljevine u kojoj se nalazi on pluta, te je pomak plovka jednak promjeni razine tekućine u spremniku. Plovak je povezan mehaničkim putem za kliznik potenciometra, te se njegovim

pomakom mijenja električni otpor potenciometra. Iz očitane jačine električnog otpora može se izraziti razina tekućine u spremniku.[1]



Slika 1. Primjer sustava za mjerenje dubine pomoću plovka[1]

## 2.2. Mjerenje razine pomoću staklene cjevčice

Ovo mjerilo se sastoji od staklene cjevčice ili cjevčice sa staklenim prozorom koja se nalazi izvan spremnika i povezana je s njim. Rad ovog mjerila se temelji na zakonu spojenih posuda. Na samoj cjevčici ili prozoru se nalazi mjerna skala sa koje se direktno očitava razina kapljevine u spremniku.[1][2]



Slika 2. Sustav za mjerenje dubine pomoću staklene cjevčice[3]

### 2.3. Štapna mjerila dubine

Štapna mjerila dubine su najjednostavnija i najstarija mjerila dubine. Postave se vertikalno na dno rijeke, jezera, mora ili spremnika, te je na njima ucratana skala sa koje se očitava razina kapljevine. Ovaj način mjerenja je jako grub i u pravilu se koristi za praćenje vodostaja rijeka, jezera i mora.[4]



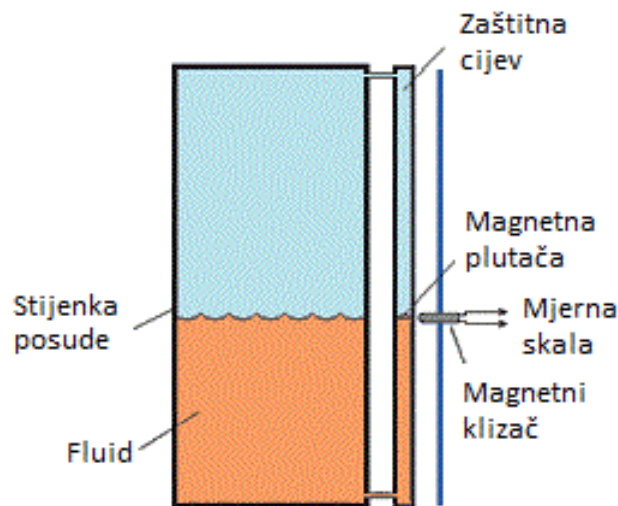
Slika 3. Štapno mjerilo dubine

### 2.4. Magnetska mjerila dubine

#### 2.4.1. Magnetni plovak

Ova mjerila se sastoje od plutače na kojoj se nalazi jaki permanentni magnet, u pravilu je plutača smještena unutar zaštitne cijevi koja joj ograničava kretanje u horizontalnom

smjeru tako da je pozicija plutače uvijek uz stijenku. Kako se plutača pomiče gore ili dolje, s vanjske strane spremnika je prati magnetizirani čunak ili igla koji ukazuju na poziciju plutače. Ovaj sustav funkcionira jedino ako su zaštitna cijev i spremnik napravljeni od nemagnetiziranog materijala. Većina proizvođača ovih mjerila dubine nude konstrukcijska rješenja optimizirana prema vrsti kapljevine čija se razina mjeri, što znači da ova mjerila mogu podnijeti visoke temperature i tlakove te korozivne okoliše.[2][5]



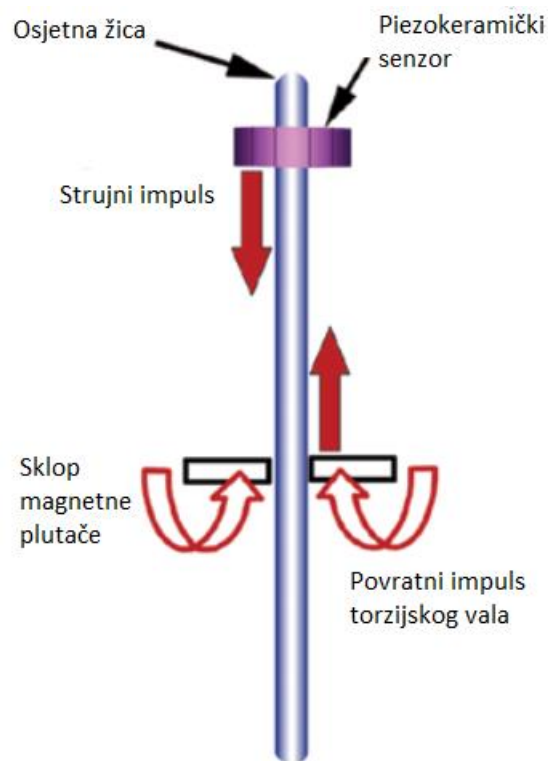
Slika 4. Shema sustava za mjerenje dubine magnetnim plovkom[5]

#### 2.4.2. Magnetostrikcija

Naspram klasične plutače sa permanentnim magnetima, magnetostriktivni odašiljači koriste brzinu torzijskog vala duž žice kako bi pronašli plutaču te zabilježili njezinu poziciju. Osjetna žica je s jedne strane spojena na piezokeramički osjetnik a s druge strane je pričvršćena na dno spremnika tako da je stalno napeta. Osjetna žica se mora nalaziti u cijevi koja služi za zaštitu i vođenje žice. Kako bi se našla pozicija plutače odašiljač pusti kratki impuls struje kroz osjetnu žicu čime se oko žice stvara magnetno polje. Istovremeno se aktivira mjerilo vremena. Magnetno polje inducirano impulsom struje iz odašiljača automatski djeluje na magnetno polje permanentnih magneta koji se nalaze na plutači. Zajednički učin ovog međusobnog djelovanja je nastajanje torzijske



sile u žici, koja poput vala ili ultrazvučne vibracije putuje nazad prema prema piezokeramičkom osjetniku karakterističnom brzinom. Kada osjetnik detektira val, on generira električni signal kojim se gasi mjerilo vremena, te se dobiva vrijeme između početka impulsa i dolaska vala do osjetnika. Iz ovih podataka se vrlo precizno može odrediti pozicija plutače. Glavne prednosti ove metode da je brzina vala poznata i konstatna u odnosu na promjene tlaka i temperature te što mjerilo sadrži malo pomičnih dijelova.[2][5]



Slika 5. Shema mjerenja dubine pomoću magnetostrikcije[5]

## 2.5. Mjerila dubina koja rade na principu mjerenja tlaka

### 2.5.1. Hidrostatska mjerila dubine

Hidrostatska mjerila dubine su najrasprostranjenija mjerila dubine, uglavnom zbog njihove jednostavnosti i primjenjivosti u gotovo svim kapljevinama. Hidrostatski osjetnik

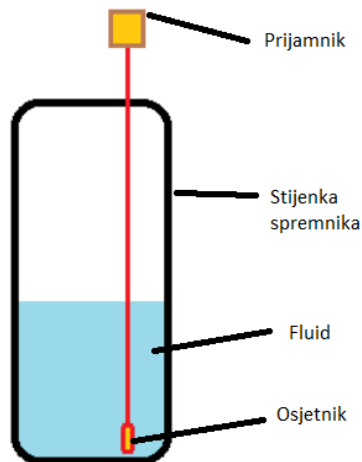
mjeri tlak fluida na dubini na koju je postavljen, to može biti na dnu spremnika ili nekoj drugoj visini. Princip rada hidrostatskih mjerila dubine zasniva se na definiciji hidrostatskog tlaka koja kaže da tlak ovisi o gustoći fluida  $\rho$ , ubrzanju sile teže  $g$ , te dubini  $h$  na kojoj se tlak mjeri.

$$p = \rho g h$$

Iz čega proizlazi da je dubina:

$$h = \frac{p}{\rho g}$$

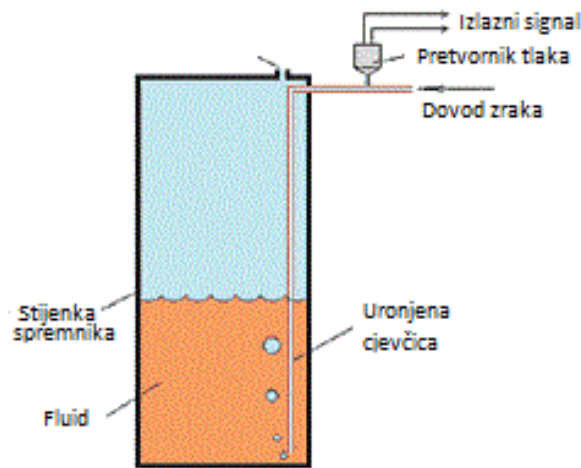
Mogu mjeriti i apsolutni tlak i pretlak, u slučaju mjerenja pretlaka moraju biti povezani sa atmosferom što se najčešće postiže cjevčicom koja je spojena na mjerilo i postavljena izvan fluida. Ako mjerilo mjeri apsolutni tlak moramo istovremno mjeriti atmosferski tlak iznad fluida radi kompenzacije barometarskog tlaka. U ovu skupinu mjerila dubine spada i mjerilo koje se umjerava u ovom završnom radu to jest samostalni tlačni osjetnik za mjerenje i arhiviranje podataka(data logger).[5][6]



Slika 6. Shema mjerenja dubine pomoću hidrostatskog tlaka[6]

### 2.5.2. „Air Bubbler“

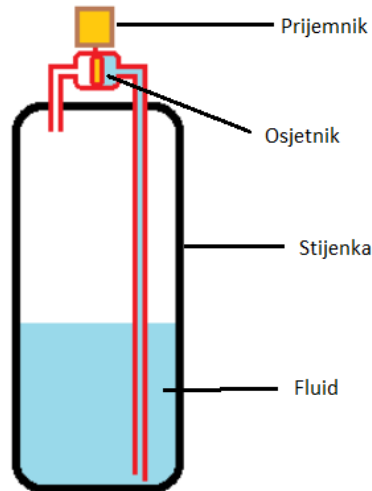
„Air bubbler“ je mjerilo dubine koje se sastoji od tlačnog osjetnika, pumpe i cjevčice koja doseže dno spremnika. Pumpa se koristi kako bi natlačila zrak u cjevčici. Pumpa natlačuje cjevčicu dokle god tlak u cjevčici nije dostatan da zrak izlazi iz cjevčice na dnu spremnika. Količina tlaka potrebna da zrak izlazi iz cjevčice ovisi o tlaku na dnu spremnika. Dok se cjevčica tlači tlačni osjetnik konstantno mjeri tlak, kada je tlak u cjevčici dostatan da zrak izađe iz nje sustav bilježi taj tlak kao tlak na dnu spremnika. Air bubbler sustavi su vrlo pouzdani i jeftini sustavi za mjerenje razine kapljevine. Najbolje im odgovaraju otvoreni spremnici vode koji ne sadrže nestabilne i opasne kapljevine. Glavne prednosti ovih mjerila su samočišćenje sustava te mogućnost odvajanja pumpe i senzora od samog spremnika na neko sigurnije mjesto.[5][6]



Slika 7. Shema mjerenja dubine pomoću propuhivanja zrakom[5]

### 2.5.3. Diferencijalna mjerila dubine

Diferencijalna mjerila dubine mjere razliku tlaka na dnu i na vrhu spremnika te prevode taj podatak u količinu fluida unutar spremnika. Jako je korisna metoda za zatvorene spremnike poput spremnika ukapljenih plinova ili spremnika u kojem su pare fluida poput benzina zadržane unutar spremnika. U pravilu se koriste samo kada je neizbježno zbog visoke cijene samog senzora.[5][6]



Slika 8. Shema diferencijalnog mjerila dubine[6]

## 2.6 Ultrazvučna mjerila dubine

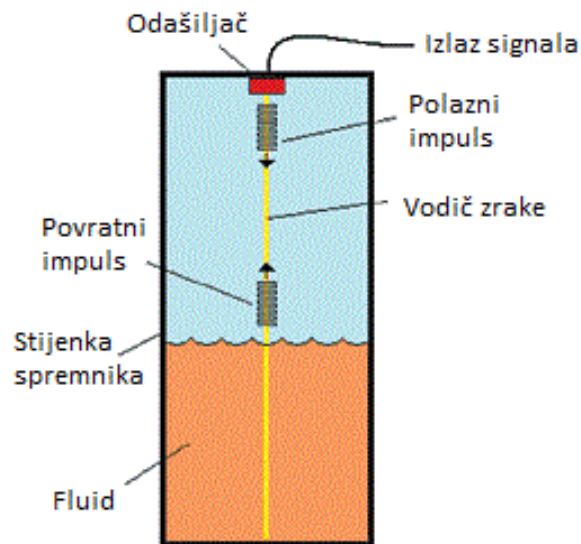
Ultrazvučna mjerila dubine mjere dubinu kapljevine tako da očitavaju vrijeme potrebno da se emitirani ultrazvučni impuls nakon refleksije na površini kapljevine vrati do osjetnika. Osjetnik detektira impuls koji se reflektira od površine vode, te pošto su nam poznate brzine zvuka u raznim kapljevinama i pri raznim temperaturama i tlakovima može se iz podatka vremena potrebnog za putovanje impulsa izračunati dubina kapljevine. Ultrazvučna mjerila dubine su u pravilu smještena na vrhu spremnika, ali postoje izvedbe gdje je pozicija mjerila na dnu.[4][6]



Slika 9. Shema ultrazvučnog mjerila dubine[4]

## 2.7. Radarska mjerila dubine

Radarsko mjerilo dubine radi na jako sličnom principu kao i ultrazvučno, samo što je val impulsa puno veće frekvencije. Visoka frekvencija radarskog vala omogućuje mu puno bolju penetraciju kroz pare, prašinu i ostale čestice u spremnicima te osjetnik puno čišće „vidi“ površinu kapljevine.[6]



Slika 10. Radarsko mjerilo dubine[5]

## 2.8. Kapacitivno mjerilo dubine

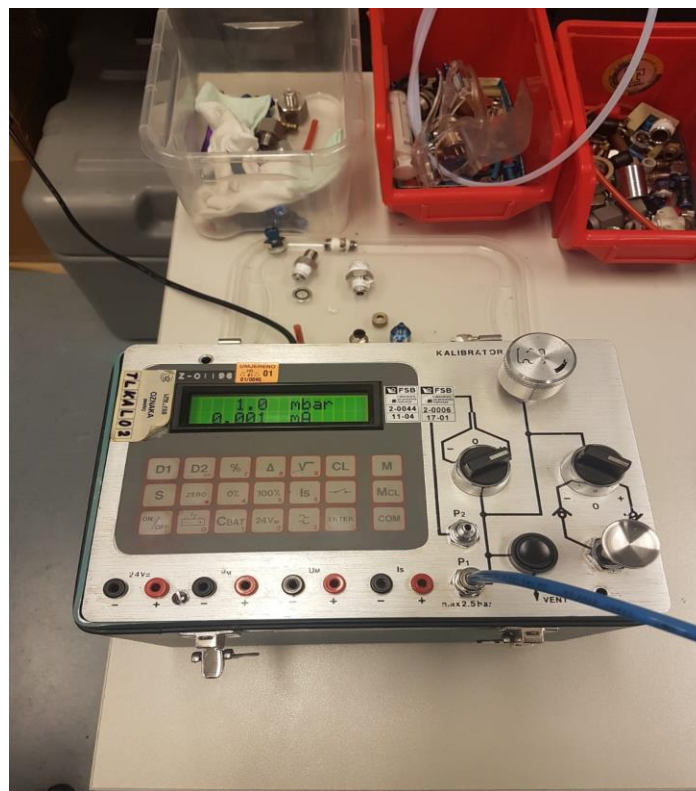
Ova vrsta mjerenja temelji se na razlici relativne dielektrične konstante kapljevine i relativne dielektrične konstante zraka koje se nalazi iznad kapljevine. Mjerilo se sastoji od elektrode spojene na odašiljač koja sa stjenkom spremnika ili drugom referentnom elektrodom stvara kondenzator. Izmjereni kapacitet kondenzatora jednak je zbroju kapaciteta kapljevine čija se razina mjeri i kapaciteta zraka iznad kapljevine. Zbroj kapaciteta ovisi o duljini elektrode uronjene u kapljevinu. Pošto je elektroda fiksirana,

dužina dijela elektrode koji je uronjen u kapljevinu ovisi o razini kapljevine u spremniku.[6]

### 3. Mjerni sustav za umjeravanje mjerila dubine

#### 3.1. Kalibrator tlaka

U ovom završnom radu korišten je etalonski kalibrator tlaka PC M Z-01196 interne oznake TLKAL02. Kalibrator tlaka služi za natlačivanje tlačne komore te za očitavanje tlaka unutar komore. Proizvođač kalibrатора tlaka PC M Z-01196 je MARUS Zagreb, te je mjerno područje kalibratora od -1 do 2,5 bara. TLKAL02 je umjeren na etalonskoj tlačnoj vagi Laboratorija za procesna mjerenja.



Slika 11. Kalibrator tlaka PC M Z-01196(TLKAL02)

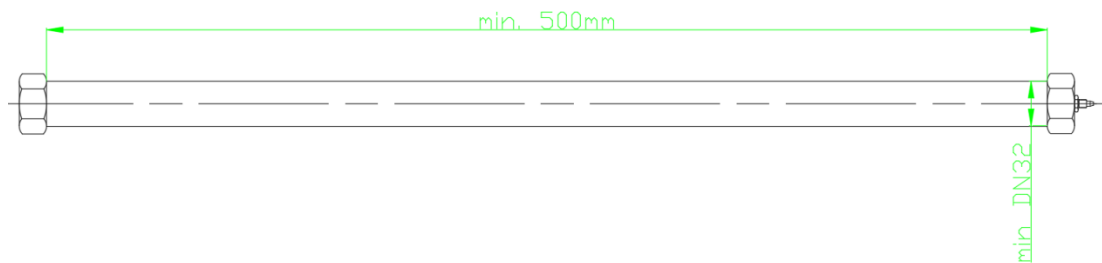
#### 3.2. Barometar

Pošto nam kalibrator tlaka pokazuje pretlak u komori a ispitivano mjerilo mjeri apsolutni tlak potrebno je radi kompenzacije pratit i bilježiti barometarski tlak u laboratoriju. Za praćenje barometarskog tlaka koristio se etalonski barometar Vaisala.

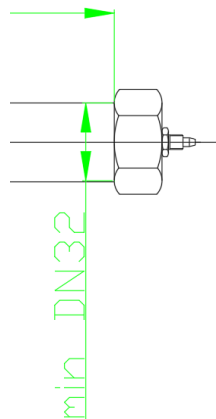
### 3.3. Konstrukcijsko rješenje tlačne komore

Osnovni zahtjevi prilikom konstrukcije tlačne komore su:

- Tlačna komora mora podneti tlak od minimalno 2,5 bara
- Tlačna komora mora biti duga minimalno 500mm, kako bi se istovremeno moglo ispitivati do 3 mjerila dubine
- Tlačna komora zbog dimenzija ispitivanog mjerila dubine mora biti najmanjeg nazivnog promjera 25mm



Slika 12. Skica tlačne komore



Slika 13. Detalj tlačne komore

Kako bi se ispunili ovi zahtjevi odabrana je šavna pocinčana cijev nazivnog promjera 32 mm i duljine 600mm. Cijev na krajevima ima urezan metrički navoj na koji se pričvrste lijevane kape. Kako bi se spoj zabrtvio koristi se nit za brtvljenje cijevi i navoja Loctite 55 koji je certificiran za brtvljenje cijevi koje sadržavaju plinove (certifikat EN 751-2 Brtvena sredstva za metalne navojne spojeve u dodiru s plinovima prve, druge i treće skupine plinova i vrućom vodom).



Slika 14. Tlačna komora

### 3.4. Ispitivani tlačni osjetnik

Ispitivano mjerilo je samostalni tlačni osjetnik za mjerenje i arhiviranje podataka naziva HOBO U20-001-01-Ti Data Logger. Kućište osjetnika je napravljeno od titana te je pogodan za primjenu u morskoj vodi. Mjerilo mjeri apsolutni tlak i temperaturu, što znači da moramo posebno mjeriti barometarski tlak radi kompenzacije. Mjerilo kontinuirano bilježi apsolutni tlak i temperaturu u intervalu koji odabere korisnik. Baterija je



integrirana i traje do 5 godina što znači da je ovo mjerilo pogodno za dugoročna ispitivanja. Ispitivano mjerilo mjeri do 9 metara dubine pri temperaturama od -20 °C do 50 °C.[7]



Slika 15. Mjerilo dubine HOBO U20-001-01-Ti[11]

#### 4. Laboratorijska mjerenja

Eksperimentalni dio završnog rada obavljen je u Laboratoriju za procesna mjerenja Fakulteta strojarstva i brodogradnje.

**Laboratorij za procesna mjerenja (LPM)** dio je Zavoda za termodinamiku, toplinsku i procesnu tehniku Fakulteta strojarstva i brodogradnje (FSB) Sveučilišta u Zagrebu. LPM se bavi nastavom, laboratorijskim vježbama, znanstvenoistraživačkim radom i publiciranjem na području teorije i primjene mjerenja toplinskih i procesnih veličina kao što su: temperatura, tlak, vlažnost, protok, brzina strujanja fluida, masa, nivo, sastav plinova, vlažnosti, termo fizikalna svojstva, toplinska energija, i drugo.

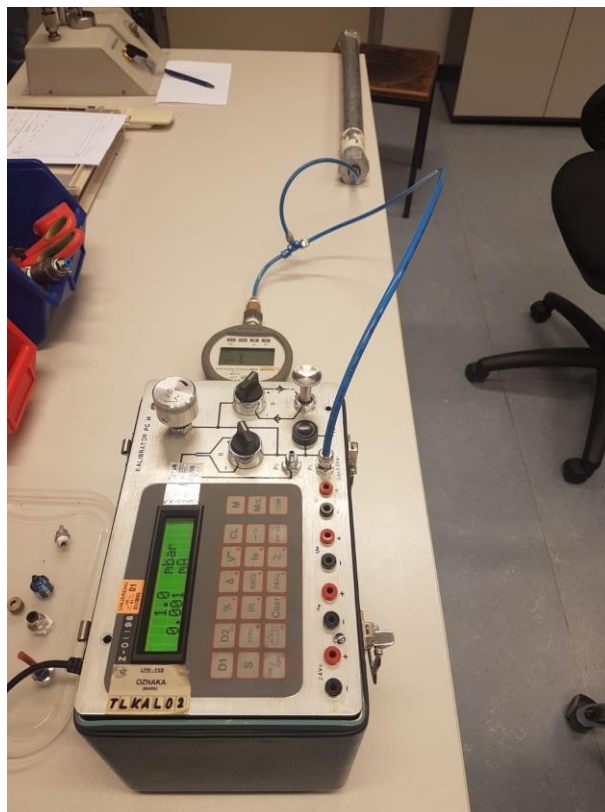
**LPM je nositelj Državnih etalona temperature i tlaka Republike Hrvatske** temeljem Rješenja Državnog Zavoda za normizaciju i mjeriteljstvo (DZNM RH) od 21. listopada 2002. Fundamentalni zadatak LPM-a je ostvarivanje, čuvanje i održavanje ove zakonske fizikalne jedinice sukladno Međunarodnom sustavu mjernih jedinica (SI) i prema potrebama hrvatskog gospodarstva, zaštite života i zdravlja ljudi i životinja, zaštite okoliša i tehničke sigurnosti. LPM osigurava sljedivost Državnih etalona temperature i tlaka RH prema međunarodnim etalonima SI sustava te prenosi iste fizikalne veličine na etalone niže razine za potrebe Nacionalne akreditacijske službe odnosno za potrebe ispitnih, umjernih, znanstvenoistraživačkih i proizvodnih djelatnosti. Prema tome, LPM je na vrhu mjeriteljske hijerarhije temperature i tlaka u Republici Hrvatskoj. Potvrde o umjeravanju koje izdaje LPM dokazuju da je umjereni objekt sljediv sa državnim etalonima. Za čuvanje, održavanje i uporabu Državnih etalona temperature i tlaka LPM je odgovoran i podliježe nadzoru Državnog zavoda za normizaciju i mjeriteljstvo Republike Hrvatske. LPM u državnom etalonskom opsegu i u Rješenju navedenoj najboljoj mjeriteljskoj sposobnosti u potpunosti ispunjava zahtjeve za ispitne i umjerne laboratorije propisane normom HRN ISO/IEC 17025 što je potvrđeno međunarodnom akreditacijom.

**LPM je akreditirani DKD laboratorij** (DKD - Deutscher Kalibrierdienst -Njemačka umjerna služba) akreditiran od strane PTB-a (Physikalisch-Technische Bundesanstalt-Fizikalno tehnički savezni ured, Republika Njemačka) prema normi ISO/IEC 17025 za umjeravanje mjerila temperature i tlaka pod DAR registracijskim brojem DKD-K-35601 (DAR – Deutscher Akkreditierungs Rat - Njemački akreditacijski savjet). DKD potvrde o umjeravanju koje izdaje LPM dokumentiraju sljedivost umjerenog objekta prema međunarodnom sustavu jedinica (SI). DKD je potpisnik multilateralnog sporazuma Europske suradnje za akreditaciju (EA – European co-operation for accreditation) i Međunarodne suradnje za akreditaciju laboratorija (ILAC -International laboratory Accreditation cooperation) za međusobno priznavanje potvrda o umjeravanju.

**LPM je ovlaštenu laboratorij DZNM** (Državnog zavoda za normizaciju i mjeriteljstvo) za ovjeravanje mjerila tlaka, temperature i toplinske energije.

#### 4.1. Opis mjerne linije

Mjerna linija se sastoji od kalibratora PC M Z-01196, etalonskog barometra, tlačne komore koja je konstruirana i napravljena u sklopu ovog završnog rada, mjerila dubine HOBO U20-001-01-Ti te spojnih elemenata testiranih na zrakotijesnost.



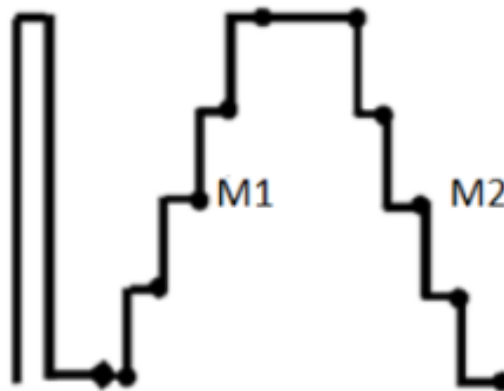
Slika 16. Mjerna linija

#### 4.2. Postupak mjerenja

Prije svega potrebno je spojiti sve elemente mjerne linije. Mjerilo treba staviti unutar tlačne komore nakon čega se ona zatvara i brtvi. Nakon toga se tlačna komora spaja na

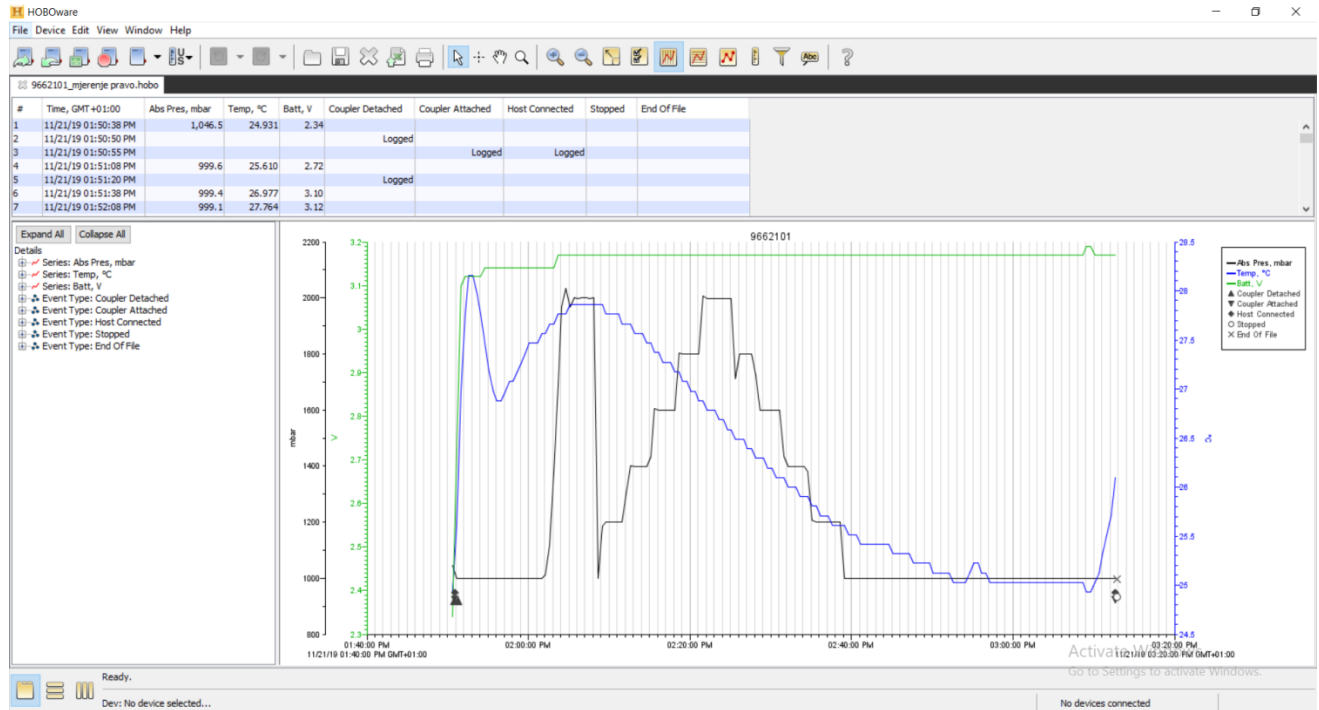
kalibrator te se provjerava da li je zrakotijesna do 2,5 bara. Pošto mjerilo mjeri apsolutni tlak kontinuirano se bilježi tlak koji pokazuje barometar radi kompenzacije. Postupak mjerenja proveden je u 6 točaka prema tipu C postupka umjeravanja.

### METODA C



Slika 17. Metoda C umjeravanja[8]

Prema tipu C postupka umjeravanja potrebno je prije početka komoru natlačiti na najveći tlak ispitivanja. Nakon toga se komora rastereti na polazne postavke. Zatim se po odabranim točkama umjeravanja (M1) postepeno povisuje tlak do najvećeg tlaka, te se po istim točkama umjeravanja (M2) sustav vrati u polazno stanje. Nakon što je sustav u polaznom stanju tlačna komora se otvara te se očitavaju rezultati mjerenja.



Slika 18. Sučelje software-a ispitivanog mjerila dubine

## 4.3. Rezultati mjerenja

Tablica 1: Rezultati laboratorijskog mjerenja, točka umjeravanja br. 0

Red. br. mjer.	Pretlak etalona (mbar)	(M1)Tlak okoline (mbar)	(M1)Apsolutni tlak etalona (mbar)	(M1)Tlak ispitivanog mjerila (mbar)	Devijacija (mbar)	(M2)Tlak okoline (mbar)	(M2)Apsolutni tlak etalona (mbar)	(M2)Tlak ispitivanog mjerila (mbar)	Devijacija (mbar)
1.	0,3			999,3				999,6	
2.	0,3			999,6				999,4	
3.	0,3			999,4				998,8	
$\bar{x}$	0,3	998,02	998,32	999,4	1,08	998,01	998,31	999,3	0,99

Tablica 2: Rezultati laboratorijskog mjerenja, točka umjeravanja br. 1

Red. br. mjer.	Pretlak etalona (mbar)	(M1)Tlak okoline (mbar)	(M1)Apsolutni tlak etalona (mbar)	(M1)Tlak ispitivanog mjerila (mbar)	Devijacija (mbar)	(M2)Tlak okoline (mbar)	(M2)Apsolutni tlak etalona (mbar)	(M2)Tlak ispitivanog mjerila (mbar)	Devijacija (mbar)
1.	200,3			1199,7				1199,5	
2.	200,3			1199,5				1199,3	
3.	200,3			1199,2				1199,0	
$\bar{x}$	200,3	998,12	1198,42	1199,5	1,08	997,96	1198,26	1199,3	1,04

Tablica 3: Rezultati laboratorijskog mjerenja, točka umjeravanja br. 2

Red. br. mjer.	Pretlak etalona (mbar)	(M1)Tlak okoline (mbar)	(M1)Apsolutni tlak etalona (mbar)	(M1)Tlak ispitivanog mjerila (mbar)	Devijacija (mbar)	(M2)Tlak okoline (mbar)	(M2)Apsolutni tlak etalona (mbar)	(M2)Tlak ispitivanog mjerila (mbar)	Devijacija (mbar)
1.	400,1			1399,9				1399,2	
2.	400,1			1399,1				1399,2	
3.	400,1			1399,4				1398,9	
$\bar{x}$	400,1	997,99	1398,09	1399,5	1,41	998,09	1398,19	1399,1	0,91

Tablica 4: Rezultati laboratorijskog mjerenja, točka umjeravanja br. 3

Red. br. mjer.	Pretlak etalona (mbar)	(M1)Tlak okoline (mbar)	(M1)Apsolutni tlak etalona (mbar)	(M1)Tlak ispitivanog mjerila (mbar)	Devijacija (mbar)	(M2)Tlak okoline (mbar)	(M2)Apsolutni tlak etalona (mbar)	(M2)Tlak ispitivanog mjerila (mbar)	Devijacija (mbar)
1.	600,5			1599,6				1600,0	
2.	600,5			1599,7				1599,8	
3.	600,5			1599,5				1599,6	
$\bar{x}$	600,5	998,05	1598,55	1599,6	1,05	998,06	1598,56	1599,8	1,24

Tablica 5: Rezultati laboratorijskog mjerenja, točka umjeravanja br. 4

Red. br. mjer.	Pretlak etalona (mbar)	(M1)Tlak okoline (mbar)	(M1)Apsolutni tlak etalona (mbar)	(M1)Tlak ispitivanog mjerila (mbar)	Devijacija (mbar)	(M2)Tlak okoline (mbar)	(M2)Apsolutni tlak etalona (mbar)	(M2)Tlak ispitivanog mjerila (mbar)	Devijacija (mbar)
1.	800,7			1799,9				1800,0	
2.	800,7			1800,1				1799,7	
3.	800,7			1799,8				1800,0	
$\bar{x}$	800,7	997,95	1798,65	1799,9	1,25	998,03	1798,73	1799,9	1,17

Tablica 6: Rezultati laboratorijskog mjerenja, točka umjeravanja br. 5

Red. br. mjer.	Pretlak etalona (mbar)	(M1)Tlak okoline (mbar)	(M1)Apsolutni tlak etalona (mbar)	(M1)Tlak ispitivanog mjerila (mbar)	Devijacija (mbar)	(M2)Tlak okoline (mbar)	(M2)Apsolutni tlak etalona (mbar)	(M2)Tlak ispitivanog mjerila (mbar)	Devijacija (mbar)
1.	1000			1998,6				1999,0	
2.	1000			1998,8				1998,6	
3.	1000			1998,4				1998,6	
$\bar{x}$	1000	997,99	1997,99	1998,6	0,61	998,04	1998,04	1998,7	0,66



## 5. Obrada rezultata mjerenja

### 5.1. Teorijska osnova mjerne nesigurnosti

Mjerna nesigurnost je parametar pridružen rezultatu mjerenja, koji opisuje rasipanje vrijednosti koje se može opravdano pripisati mjerenoj veličini.[9] Procjena mjerne nesigurnosti temelji se na principima vjerojatnosti. Niti jedno mjerilo nije savršeno, niti je moguće svako mjerenje provesti u savršenim uvjetima što znači da sva mjerenja imaju određenu mjernu nesigurnost. Rezultat nekog mjerenja nije kompletan dok mu se ne pridruži odgovarajuća mjerna nesigurnost.

Neki od uzorka mjerne nesigurnosti su:

- ljudski faktor tj. vještina mjeritelja
- mjerilo koje se umjerava
- mjerna metoda
- parametri okoline
- mjerni instrumenti
- uvezene nesigurnosti

Standardna mjerna nesigurnost se procjenjuje na dva načina:

#### 1) Tip A

Vrsta procjene koja počiva na statističkim metodama analize niza ponovljenih mjerenja uz primjenu normalne i studentove razdiobe. Za određivanje nesigurnosti koristi se standardna devijacija, što odgovara normalnoj ili Gaussovoj razdiobi. U normalnoj ili Gaussovoj razdiobi podaci su okupljeni oko srednje vrijednosti.[10]

Srednja vrijednost:

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Eksperimentalno standardno odstupanje:

$$s(\bar{x}_i) = \sqrt{\frac{1}{1-n} \sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2}$$

Eksperimentalno standardno odstupanje srednje vrijednosti:

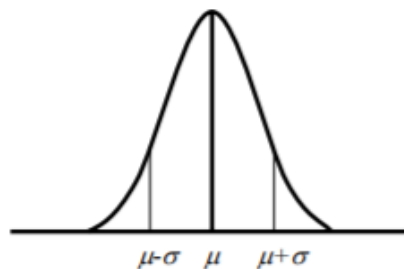
$$s(\bar{x}_i) = \frac{\bar{x}}{\sqrt{n}}$$

Mjerna nesigurnost:

$$u(x_i) = s(x_i)$$

## 2) Tip B

Vrsta procjene koja se temelji na prosudbi drugih podataka, poput prošlog iskustva, poznavanja ponašanja i svojstava instrumenata, podataka s umjernica i ovjernica, podataka iz priručnika, prethodni mjerni rezultati, podataka iz objavljenih znanstvenih članaka itd. Ova procjena se provodi na temelju apriornih razdioba vjerojatnosti (normalna ili Gaussova, pravokutna ili jednolika, trokutasta, itd.) [10]



Slika 19. Gaussova razdioba [10]

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

$\sigma$  – standardna devijacija

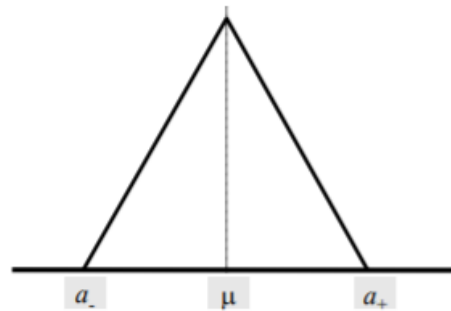
$\mu$  - rezultat s najvećom vjerojatnošću



Slika 20. Pravokutna razdioba[10]

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

$a$  – poluinterval nesigurnosti



Slika 21. Trokutasta razdioba[10]

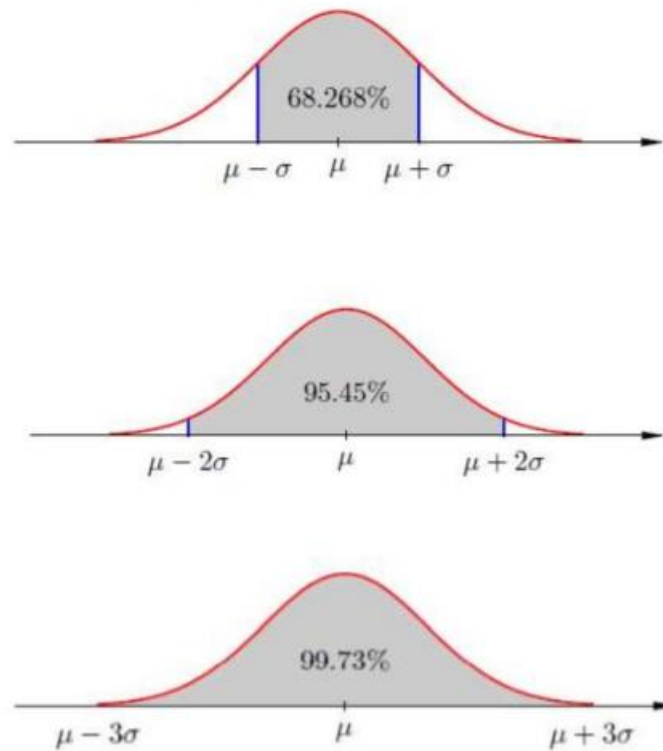
$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{6}}$$

### 5.1.1. Proširena mjerna nesigurnost

Proširena nesigurnost je veličina koja nam govori interval oko rezultata mjerenja za koji sa određenom sigurnošću možemo reći da sadrži stvarnu veličinu. Računa se kao umnožak stvarne nesigurnosti i faktora pokrivanja  $k$ . [9]

$$U = k * u$$

Za  $k=1$  smo 68,27% sigurni da se stvarna veličina nalazi u intervalu, za  $k=2$  95,45% te za  $k=3$  99,73%.



Slika 22. Proširena mjerna nesigurnost[11]

## 5.2. Opis metode umjeravanja

Mjerilo dubine koje je ispitivano u ovom radu, radi na principu mjerenja hidrostatskog tlaka. Umjeriti ćemo ga prema metodi *EURAMET Calibration Guide No. 17* koja sadrži upute za umjeravanje elektromehaničkih manometara.

Za analizu bilance nesigurnosti koristi se postupak prema sljedećoj tablici:

Funkcija modela			$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N)$
Standardna mjerna nesigurnost	$u(x_i)$	standardna nesigurnost pridružena ulaznoj veličini $x_i$	
	$c_i$	koeficijent osjetljivosti	$c_i = \partial f / \partial x_i$
	$u_i(y)$	doprinos standardnoj nesigurnosti pridružene mjernom rezultatu izazvan standardnom nesigurnošću $u(x_i)$ ulazne veličine $x_i$	$u_i(y) = c_i \cdot u(x_i)$
	$u(y)$	standardna nesigurnost pridružena rezultatu	$u^2(y) = \sum_{i=1}^N u_i^2(y)$ $u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2(y)}$
Povećana mjerna nesigurnost	$U(y)$	povećana mjerna nesigurnost	$U(y) = k \cdot u(y)$
	$k$	faktor pokrivanja	$k = 2^{\text{1}}$

Tablica 7. Postupak određivanja mjerne nesigurnosti[12]

Osim ovog općeg pravila izračunavanja nesigurnosti, postoje dva posebna slučaja koji dovode do sume kvadrata apsolutnih nesigurnost  $u, U$ . U modelu zbroj/razlika koeficijent osjetljivosti poprima vrijednost  $c_i = \pm 1$  dok u modelu umnožak/količnik koeficijent osjetljivost poprima vrijednost  $c_i = \pm y * x^{-1}$ . [12]

### 5.2.1. Model zbroj/razlika

$$Y = X + \sum_{i=1}^n \delta X_i$$

$Y$  – izlazna veličina

$X$  – ulazna veličina o kojima mjerene veličine ovise

$\delta X_i$  – neispravljene pogreške

$E(\delta X_i) = 0$  – očekivane vrijednosti, ne pridonose izlaznoj veličini nego nesigurnosti

Ovaj model je prikladan za određivanje pogrešaka pokazivanja manometra. [12]

### 5.2.2. Model umnožak/količnik

$$Y = X * \prod_{i=1}^n K_i$$

Y – izlazna veličina

X – ulazna veličina

$K_i = (1 + \delta X_i)$  – faktori ispravka

$E(\delta X_i) = 0$ ;

$E(\delta X_i) = 1$ ; očekivane vrijednosti (nema doprinosa izlaznoj veličini nego mjernoj nesigurnosti)

Ovaj je model prikladan za određivanje koeficijenta prijenosa tlaka s električnim izlazom uporabom odgovarajućih mjernih nesigurnosti.[12]

### 5.2.3. Umjeravanje digitalnog manometra

Za ovo umjeravanje odabran je model zbroj/razlika koji se upotrebljava kako bi se odvojeno odredila pogreška pokazivanja i njezina nesigurnost za vrijednosti izmjerene pri rastućem i padajućem tlaku.[12]

$$\begin{aligned} \Delta p &= p_{\text{pokazivanja}} - p_{\text{etalona}} + \sum_{i=1}^2 \delta p_i \\ &= p_{\text{pokazivanja}} - p_{\text{etalona}} + \delta p_{\text{pogreške u ništici}} + \delta p_{\text{ponovljivosti}} \end{aligned}$$

Kada se u obzir uzme doprinos histereze, dobijemo izračun pogreške  $\Delta \bar{p}$  srednje vrijednosti pokazivanja.[12]

$$\begin{aligned}\bar{\Delta p} &= \bar{p}_{\text{pokazivanja}} - p_{\text{etalona}} + \sum_{i=1}^2 \delta p_i \\ &= \bar{p}_{\text{pokazivanja}} - p_{\text{etalona}} \delta p_{\text{pogreške u ništici}} + \delta p_{\text{ponovljivosti}} + \delta p_{\text{histereze}}\end{aligned}$$

#### 5.2.4. Izračun nesigurnosti

Kako bi izračunali mjernu nesigurnost prema EURAMET no.17 metodi treba u obzir uzeti sljedeće sastavnice mjerne nesigurnost:

- 1) Nesigurnost etalona
- 2) Nesigurnost rezolucije ispitivanog mjerila
- 3) Nesigurnost uslijed histereze
- 4) Nesigurnost uslijed pogreške u ništici
- 5) Nesigurnost uslijed ponovljivosti

Nesigurnost etalona,  $U_{\text{etalona}}$

Uzima se u obzir zbog utjecaja uvjeta uporabe, sama vrijednost nesigurnosti etalona se nalazi u podacima o etalonu.

Nesigurnost rezolucije ispitivanog mjerila,  $u_r$

Ako se pokazivanje uređaja ne promijeni za više od jedne znamenke prilikom rasterećivanja onda nesigurnost rezolucije ispitivanog mjerila odgovara koraku promjene znamenaka. U suprotnom treba procijeniti interval promjenjivosti  $2a=r$  pravokutne razdiobe.[12]

Nesigurnost uslijed histereze,  $u_h$

Histereza je jednaka razlici uzlaznog i silaznog mjerenja iste mjerne točke. Histereza se računa prema sljedećoj formuli, u formuli prvi broj u indeksu označava mjernu seriju, a drugi broj se odnosi na mjernu točku.

$$h = \frac{1}{n} \{ |(x_{2,j} - x_{1,0})| - |(x_{1,j} - x_{1,0})| + |(x_{4,j} - x_{3,0})| - |(x_{3,j} - x_{3,0})| \}$$

Nesigurnost uslijed histereze se izračunava po sljedećoj formuli:

$$u_h = \sqrt{\frac{1}{3} * \left(\frac{h}{2}\right)^2}$$

Nesigurnost uslijed ponovljivosti,  $u_b$

Ponovljivost uz nepromjenjenu postavu mjerne linije se računa kao razlika dva uzlazna mjerenja iste radne točke ispravljene za ništicu. Sljedeće formule se koriste za izračunavanje ponovljivosti:

$$b'_{rastući,j} = \max\{|(x_{3,j} - x_{3,0})| - |(x_{1,j} - x_{1,0})|, |(x_{5,j} - x_{5,0})| - |(x_{1,j} - x_{1,0})|, |(x_{5,j} - x_{5,0})| - |(x_{3,j} - x_{3,0})|\}$$

$$b'_{padajući,j} = \max\{|(x_{4,j} - x_{4,0})| - |(x_{2,j} - x_{2,0})|, |(x_{6,j} - x_{6,0})| - |(x_{2,j} - x_{2,0})|, |(x_{6,j} - x_{6,0})| - |(x_{4,j} - x_{4,0})|\}$$

$$b'_{srednja\ vrijednost,j} = \max\{b'_{rastući,j}, b'_{padajući,j}\}$$

Nesigurnost uslijed ponovljivosti se računa prema sljedećem izrazu:

$$u_{b'} = \sqrt{\frac{1}{3} * \left(\frac{b'}{2}\right)^2}$$

Nesigurnost uslijed pogreške ništice,  $u_{f_0}$

Ova nesigurnost se očituje u razlici koje pokazuje mjerilo u ništici između dva mjerna ciklusa, te je jednaka toj razlici.

$$f_0 = \max\{|x_{2,0} - x_{1,0}|, |x_{4,0} - x_{3,0}|, |x_{6,0} - x_{5,0}|\}$$

$$u_{f_0} = \sqrt{\frac{1}{3} * \left(\frac{f_0}{2}\right)^2}$$



Br.	Veličina	Procjena	Jedinica <sup>3)</sup>	Interval promjenjivosti	Razdioba vjerojatnosti	Djelitelj	Standardna nesigurnost	Koeficijent osjetljivosti	Doprinos nesigurnosti
	$X_i$	$x_i$	bar	$2a$	$P(x_i)$		$u(x_i)$	$c_i$	$u_i(y)$
1	$P$ pokazivanja ili $\bar{P}$ pokazivanja	$P_i$ , pokazivanja ili $\bar{P}_i$ , pokazivanja	bar	$r$ (razlučivanje)	Pravokutna	$\sqrt{3}$	$u(r) = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot \left(\frac{r}{2}\right)^2}$	1	$u_r$
2	$p_{etalona}$	$p_i$ , etalona	bar		Normalna	2	$u(p_{etalona})$	-1	$u_{etalona}$
3	$\delta p_{pogreške u nuli}$	0	bar	$f_0$	Pravokutna	$\sqrt{3}$	$u(f_0) = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot \left(\frac{f_0}{2}\right)^2}$	1	$u_{f_0}$
4	$\delta p_{ponovljivosti}$	0	bar	$b'$	Pravokutna	$\sqrt{3}$	$u(b') = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot \left(\frac{b'}{2}\right)^2}$	1	$u_{b'}$
5	$\delta p_{histeraze}$	0	bar	$h$	Pravokutna	$\sqrt{3}$	$u(h) = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot \left(\frac{h}{2}\right)^2}$	1	$u_h$
	$Y$	$\Delta p$ ili $\frac{\Delta p}{\Delta p}$	bar						$u(y)$

Tablica 8. Sastavnice mjerne nesigurnosti[12]

## 5.3. Procjena mjerne nesigurnosti

Tablica 9. Rezultati mjerenja u Laboratoriju za procesna mjerenja

Redni broj mjerne točke	Apsolutni Tlak etalona (mbar)	Prosjek tlaka mjerila (mbar)	Odstupanje (mbar)	Histereza (mbar)	Ponovljivost (mbar)	$U_r$ (mbar)	$U_h$ (mbar)	$U_{fo}$ (mbar)	$U_{etalona,k}$ (kalibrator) (mbar)	$U_{etalona,b}$ (barometar) (mbar)	$U_{b'}$ (mbar)
0.	998,32	999,4	1,08	0,1	0,1	0,0289	0,0289	0	0,1	0,02	0,0289
1.	1198,42	1199,5	1,08	0,2	0,1	0,0289	0,0577	0	0,1	0,02	0,0289
2.	1398,09	1399,5	1,41	0,4	0,1	0,0289	0,1155	0	0,1	0,02	0,0289
3.	1598,55	1599,6	1,05	0,2	0,1	0,0289	0,0577	0	0,1	0,02	0,0289
4.	1798,65	1799,9	1,25	0	0,1	0,0289	0	0	0,1	0,02	0,0289
5.	1997,99	1998,6	0,61	0,1	0,1	0,0289	0,0289	0	0,1	0,02	0,0289
5.	1998,04	1998,7	0,66	0,1	0,1	0,0289	0,0289	0	0,1	0,02	0,0289
4.	1798,73	1799,9	1,17	0	0,1	0,0289	0	0	0,1	0,02	0,0289
3.	1598,56	1599,8	1,24	0,2	0,1	0,0289	0,0577	0	0,1	0,02	0,0289
2.	1398,19	1399,1	0,91	0,4	0,1	0,0289	0,1155	0	0,1	0,02	0,0289
1.	1198,26	1199,3	1,04	0,2	0,1	0,0289	0,0577	0	0,1	0,02	0,0289
0.	998,31	999,3	0,99	0,1	0,1	0,0289	0,0289	0	0,1	0,02	0,0289

Tablica 10: Mjerna nesigurnost točke 0.

Veličina	Širina Distribucije (2a)(mbar)	Razdioba vjerojatnosti	Djelitelj	Standardna mjerna nesigurnost	Koeficijent osjetljivosti	Doprinos nesigurnosti (mbar)
Histereza	0,1	Pravokutna	$\sqrt{3}$	$u_h = \sqrt{\frac{1}{3} * \left(\frac{h}{2}\right)^2}$	1	0,0289
Pogreška u ništici	0	Pravokutna	$\sqrt{3}$	$u_{f_0} = \sqrt{\frac{1}{3} * \left(\frac{f_0}{2}\right)^2}$	1	0
Rezolucija	0,1	Pravokutna	$\sqrt{3}$	$u_r = \sqrt{\frac{1}{3} * \left(\frac{r}{2}\right)^2}$	1	0,0289
Ponovljivost	0,1	Pravokutna	$\sqrt{3}$	$u_{b'} = \sqrt{\frac{1}{3} * \left(\frac{b'}{2}\right)^2}$	1	0,0289
Etalon, kalibrator	0,1	Normalna	2	$U_{etalona,k}$	-1	-0,1
Etalon, barometar	0,02	Normalna	2	$U_{etalona,b}$	-1	-0,02

Mjerna nesigurnost(mbar):  $u(y) = 0,1136$  mbar

Proširena mjerna nesigurnost(mbar;  $k=2$ ):  $U(y) = k * u(y) = 0,2272$  mbar

Tablica 11: Mjerna nesigurnost točke 1.

Veličina	Širina Distribucije (2a)(mbar)	Razdioba vjerojatnosti	Djelitelj	Standardna mjerna nesigurnost	Koeficijent osjetljivosti	Doprinos nesigurnosti (mbar)
Histereza	0,2	Pravokutna	$\sqrt{3}$	$u_h = \sqrt{\frac{1}{3} * \left(\frac{h}{2}\right)^2}$	1	0,0577
Pogreška u ništici	0	Pravokutna	$\sqrt{3}$	$u_{f_0} = \sqrt{\frac{1}{3} * \left(\frac{f_0}{2}\right)^2}$	1	0
Rezolucija	0,1	Pravokutna	$\sqrt{3}$	$u_r = \sqrt{\frac{1}{3} * \left(\frac{r}{2}\right)^2}$	1	0,0289
Ponovljivost	0,1	Pravokutna	$\sqrt{3}$	$u_{b'} = \sqrt{\frac{1}{3} * \left(\frac{b'}{2}\right)^2}$	1	0,0289
Etalon, kalibrator	0,1	Normalna	2	$U_{etalona,k}$	-1	-0,1
Etalon, barometar	0,02	Normalna	2	$U_{etalona,b}$	-1	-0,02

Mjerna nesigurnost(mbar):  $u(y) = 0,1241$  mbar

Proširena mjerna nesigurnost(mbar;  $k=2$ ):  $U(y) = k * u(y) = 0,2482$  mbar

Tablica 12: Mjerna nesigurnost točke 2.

Veličina	Širina Distribucije (2a)(mbar)	Razdioba vjerojatnosti	Djelitelj	Standardna mjerna nesigurnost	Koeficijent osjetljivosti	Doprinos nesigurnosti (mbar)
Histereza	0,4	Pravokutna	$\sqrt{3}$	$u_h = \sqrt{\frac{1}{3} * \left(\frac{h}{2}\right)^2}$	1	0,1155
Pogreška u ništici	0	Pravokutna	$\sqrt{3}$	$u_{f_0} = \sqrt{\frac{1}{3} * \left(\frac{f_0}{2}\right)^2}$	1	0
Rezolucija	0,1	Pravokutna	$\sqrt{3}$	$u_r = \sqrt{\frac{1}{3} * \left(\frac{r}{2}\right)^2}$	1	0,0289
Ponovljivost	0,1	Pravokutna	$\sqrt{3}$	$u_{b'} = \sqrt{\frac{1}{3} * \left(\frac{b'}{2}\right)^2}$	1	0,0289
Etalon, kalibrator	0,1	Normalna	2	$U_{etalona,k}$	-1	-0,1
Etalon, barometar	0,02	Normalna	2	$U_{etalona,b}$	-1	-0,02

Mjerna nesigurnost(mbar):  $u(y) = 0,1594$  mbar

Proširena mjerna nesigurnost(mbar;  $k=2$ ):  $U(y) = k * u(y) = 0,3188$  mbar

Tablica 13: Mjerna nesigurnost točke 3.

Veličina	Širina Distribucije (2a)(mbar)	Razdioba vjerojatnosti	Djelitelj	Standardna mjerna nesigurnost	Koeficijent osjetljivosti	Doprinos nesigurnosti (mbar)
Histereza	0,2	Pravokutna	$\sqrt{3}$	$u_h = \sqrt{\frac{1}{3} * \left(\frac{h}{2}\right)^2}$	1	0,0577
Pogreška u ništici	0	Pravokutna	$\sqrt{3}$	$u_{f_0} = \sqrt{\frac{1}{3} * \left(\frac{f_0}{2}\right)^2}$	1	0
Rezolucija	0,1	Pravokutna	$\sqrt{3}$	$u_r = \sqrt{\frac{1}{3} * \left(\frac{r}{2}\right)^2}$	1	0,0289
Ponovljivost	0,1	Pravokutna	$\sqrt{3}$	$u_{b'} = \sqrt{\frac{1}{3} * \left(\frac{b'}{2}\right)^2}$	1	0,0289
Etalon, kalibrator	0,1	Normalna	2	$U_{etalona,k}$	-1	-0,1
Etalon, barometar	0,02	Normalna	2	$U_{etalona,b}$	-1	-0,02

Mjerna nesigurnost(mbar):  $u(y) = 0,1241$  mbar

Proširena mjerna nesigurnost(mbar;  $k=2$ ):  $U(y) = k * u(y) = 0,2482$  mbar

Tablica 14: Mjerna nesigurnost točke 4.

Veličina	Širina Distribucije (2a)(mbar)	Razdioba vjerojatnosti	Djelitelj	Standardna mjerna nesigurnost	Koeficijent osjetljivosti	Doprinos nesigurnosti (mbar)
Histereza	0	Pravokutna	$\sqrt{3}$	$u_h = \sqrt{\frac{1}{3} * \left(\frac{h}{2}\right)^2}$	1	0
Pogreška u ništici	0	Pravokutna	$\sqrt{3}$	$u_{f_0} = \sqrt{\frac{1}{3} * \left(\frac{f_0}{2}\right)^2}$	1	0
Rezolucija	0,1	Pravokutna	$\sqrt{3}$	$u_r = \sqrt{\frac{1}{3} * \left(\frac{r}{2}\right)^2}$	1	0,0289
Ponovljivost	0,1	Pravokutna	$\sqrt{3}$	$u_{b'} = \sqrt{\frac{1}{3} * \left(\frac{b'}{2}\right)^2}$	1	0,0289
Etalon, kalibrator	0,1	Normalna	2	$U_{etalona,k}$	-1	-0,1
Etalon, barometar	0,02	Normalna	2	$U_{etalona,b}$	-1	-0,02

Mjerna nesigurnost(mbar):  $u(y) = 0,1099$  mbar

Proširena mjerna nesigurnost(mbar;  $k=2$ ):  $U(y) = k * u(y) = 0,2198$  mbar

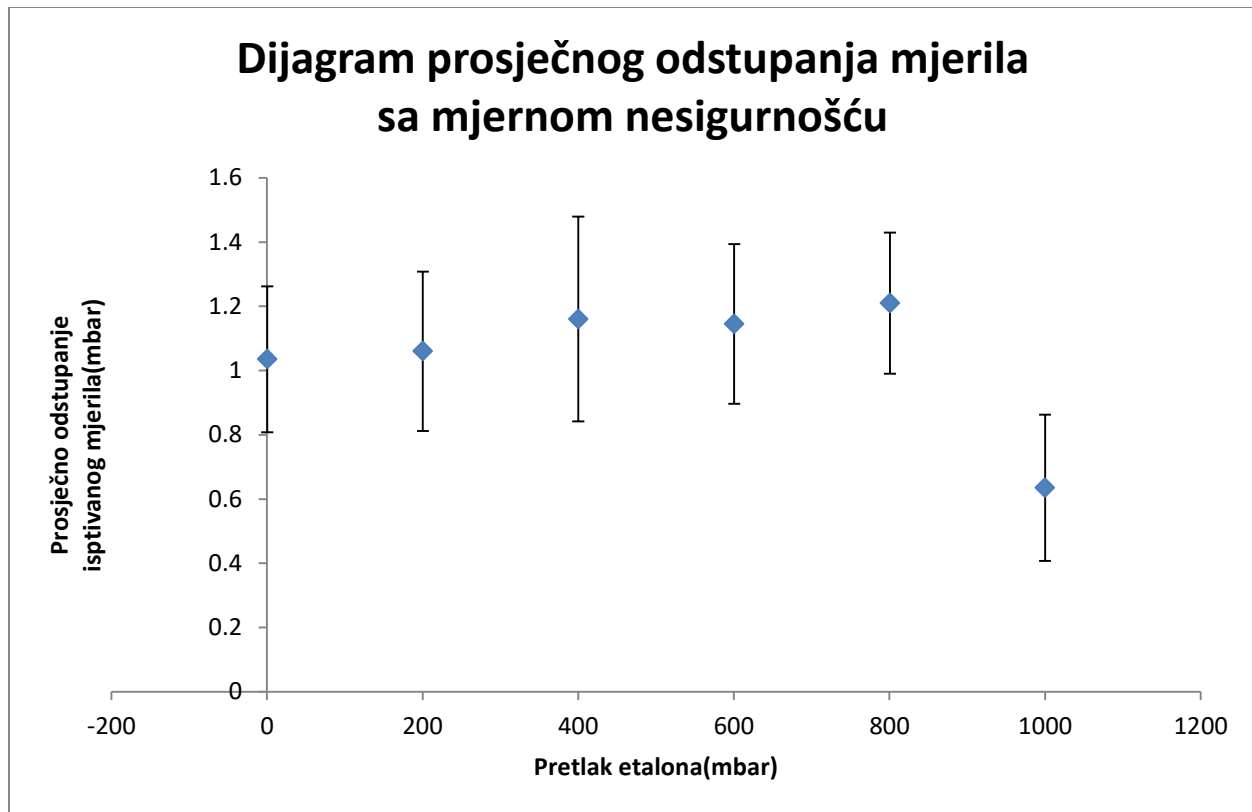
Tablica 15: Mjerna nesigurnost točke 5.

Veličina	Širina Distribucije (2a)(mbar)	Razdioba vjerojatnosti	Djelitelj	Standardna mjerna nesigurnost	Koeficijent osjetljivosti	Doprinos nesigurnosti (mbar)
Histereza	0,1	Pravokutna	$\sqrt{3}$	$u_h = \sqrt{\frac{1}{3} * \left(\frac{h}{2}\right)^2}$	1	0,0289
Pogreška u ništici	0	Pravokutna	$\sqrt{3}$	$u_h = \sqrt{\frac{1}{3} * \left(\frac{f_0}{2}\right)^2}$	1	0
Rezolucija	0,1	Pravokutna	$\sqrt{3}$	$u_h = \sqrt{\frac{1}{3} * \left(\frac{r}{2}\right)^2}$	1	0,0289
Ponovljivost	0,1	Pravokutna	$\sqrt{3}$	$u_h = \sqrt{\frac{1}{3} * \left(\frac{b'}{2}\right)^2}$	1	0,0289
Etalon, kalibrator	0,1	Normalna	2	$U_{etalona,k}$	-1	-0,1
Etalon, barometar	0,02	Normalna	2	$U_{etalona,b}$	-1	-0,02

Mjerna nesigurnost(mbar):  $u(y) = 0,1136$  mbar

Proširena mjerna nesigurnost(mbar;  $k=2$ ):  $U(y) = k * u(y) = 0,2272$  mbar





Slika 23. Dijagram odstupanja i mjerne nesigurnosti u milibarima

Iz podatka o prosječnom odstupanju tlaka ispitivanog mjerila lako se dođe do podatka o odstupanju izmjerene dubine. Dubina se može izračunati pomoću formule za izračun hidrostatskog tlaka:

$$p = \rho * g * h$$

Iz čega slijedi:

$$h = \frac{p}{\rho * g}$$

U našem slučaju formula glasi:

$$\Delta h = \frac{\Delta p}{\rho * g}$$

$\Delta h$  – prosječno odstupanje izmjerene dubine

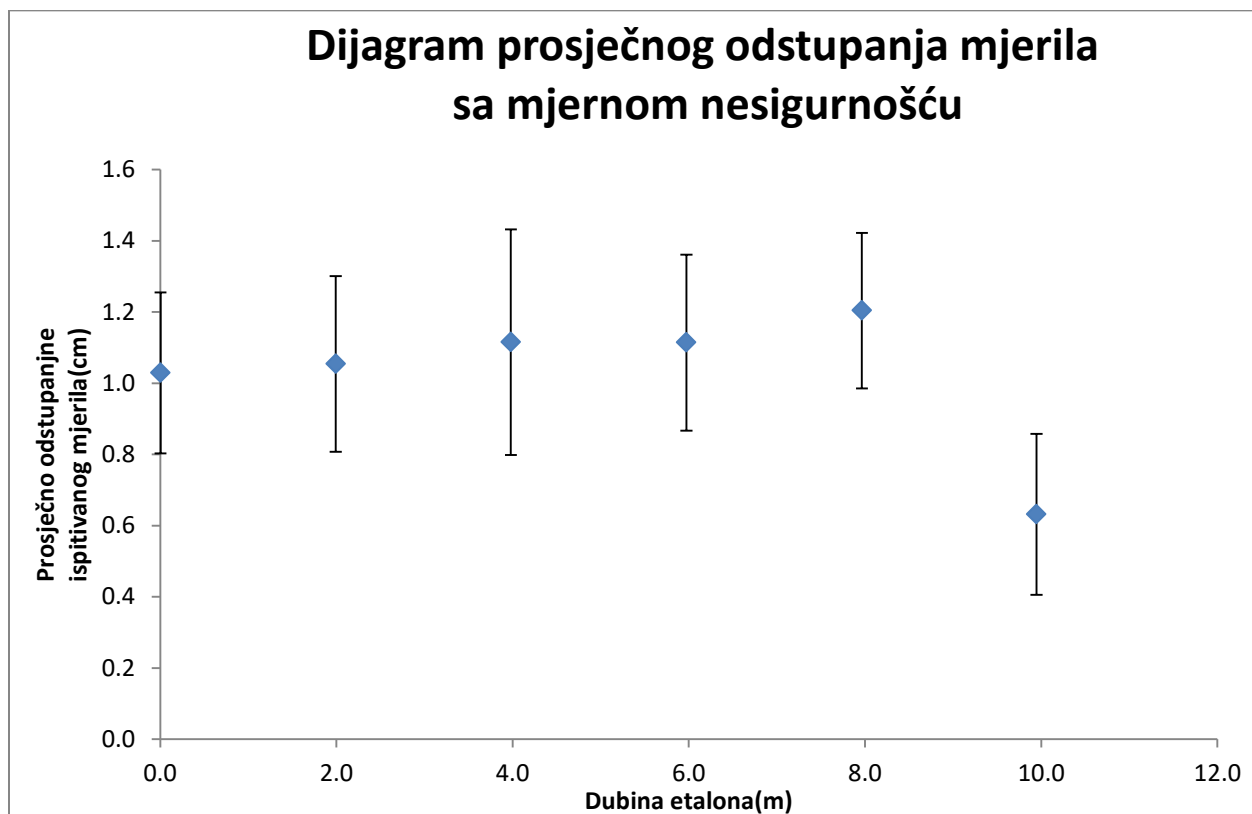
$\Delta p$  – prosječno odstupanje izmjerenog tlaka

$g$  – akceleracija sile teže, uzima se standardna akceleracija  $9,80665 \text{ m/s}^2$

$\rho$  – gustoća kapljevine kojoj se mjeri dubina

Red. Br. Mjer.	Prosječni apsolutni tlak etalona (mbar)	Prosječno odstupanje mjerila sa nesigurnosti (mbar)	Temperatura (°C)	Gustoća morske vode saliniteta 38g/L (kg/m <sup>3</sup> )	Dubina etalona (m)	Prosječno odstupanje mjerila dubine sa nesigurnosti (m)
0	0,3	1,035±0,23	25,872	1025,368	2,98*10 <sup>-3</sup>	0,0103±2,26*10 <sup>-3</sup>
1	200,3	1,06±0,25	26,540	1025.328	1,99	0,0105±2,47*10 <sup>-3</sup>
2	400,1	1,16±0,32	26,764	1025.084	3,98	0,0115±3,17*10 <sup>-3</sup>
3	600,5	1,145±0,25	26,684	1025.110	5,97	0,0114±2,47*10 <sup>-3</sup>
4	800,7	1,21±0,22	26,749	1025.089	7,97	0,0120±2,19*10 <sup>-3</sup>
5	1000	0,635±0,23	26,697	1025.106	9,95	6,32*10 <sup>-3</sup> ±2,26*10 <sup>-3</sup>

Tablica 16. Podaci za izračun odstupanja dubine iz izmjerenog odstupanja tlaka



Slika 24. Dijagram odstupanja i mjerne nesigurnosti u centimetrima

## 6. Zaključak

U ovom radu je konstruirana tlačna komora za ispitivanje mjerila dubine, te je uspješno provedeno sljedivo umjeravanje barem jednog osjetnika. Također je iznesena teorijska osnova o mogućnostima i metodama mjerenja dubine te je opisan postupak umjeravanja. Mjerenje i obrada podataka su bila izvedena u Laboratoriju za procesna mjerenja pomoću EURAMET smjernica, te smo obradom podataka zaključili da su mjerenja provedena kvalitetno. Rezultati pokazuju da je umjeravani osjetnik daje rezultate unutar raspona propisanog od strane proizvođača.

## LITERATURA

- [1] T. Torman, „Primjena uređaja za mjerenje razine u industrijskim pogonima“, Osijek, 2015.
- [2] <https://new.abb.com/products/measurement-products/level/a-dozen-ways-to-measure-fluid-level>(Pristupljeno Veljača 2020.)
- [3] Z. Valter: „Procesna mjerenja“, Osijek, 1994.
- [4] <https://www.sensortips.com/capacitive/the-evolution-of-liquid-level-sensing/>  
(Pristupljeno Veljača 2020.)
- [5] <https://www.fiercееlectronics.com/components/a-dozen-ways-to-measure-fluid-level-and-how-they-work> (Pristupljeno Veljača 2020.)
- [6] <http://www.leveldevilsensors.com/main/electronic-sensors-inc-esi-level-devil-american-made-tank-monitors-and-tank-monitoring-systems/tabk-sensor/>  
(Pristupljeno Veljača 2020.)
- [7] <https://www.onsetcomp.com/products/data-loggers/u20-001-01-ti>(Pristupljeno Veljača 2020.)
- [8] Guideline DKD-R 6-1 Calibration of Pressure Gauges, Physikalisch Technische Bundesanstalt
- [9] D. Zvizdić, L. Grgec Bermanec: Predavanja iz kolegija toplinska i procesna mjerenja (mjerenja u energetici), FSB – LPM
- [10] S. Mahović, Podloge iz predavanja Teorija i tehnika mjerenja, [https://www.fsb.unizg.hr/atlantis/upload/newsboard/01\\_04\\_2010\\_10686\\_TTM2009.pdf](https://www.fsb.unizg.hr/atlantis/upload/newsboard/01_04_2010_10686_TTM2009.pdf) (Pristupljeno Veljača 2020.)
- [11] B. Omerzo, „Usporedba rezultata umjeravanja pretvornika tlaka s strujnim izlazom 4-20 mA“, Zagreb, 2019.
- [12] Guidelines on the Calibration of Electromechanical and Mechanical Manometers, EURAMET Calibration Guide No. 17 Version 4.0 (04/2019)