

# Hidrološko - hidraulička svojstva vodotoka - primjer rijeke Bednje na lokaciji Lovrentovec

---

**Topalović, Dorotea**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2024**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University North / Sveučilište Sjever**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:814696>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-24**

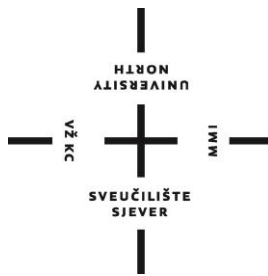


*Repository / Repozitorij:*

[University North Digital Repository](#)



**SVEUČILIŠTE SJEVER**  
**SVEUČILIŠNI CENTAR VARAŽDIN**



ZAVRŠNI RAD br. 481/GR/2024

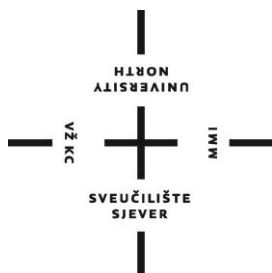
**HIDROLOŠKO - HIDRAULIČKA SVOJSTVA**  
**VODOTOKA – PRIMJER RIJEKE BEDNJE**  
**NA LOKACIJI LOVRENTOVEC**

Dorotea Topalović

Varaždin, srpanj 2024. g.



**SVEUČILIŠTE SJEVER**  
**SVEUČILIŠNI CENTAR VARAŽDIN**  
**Studij Graditeljstvo**



Završni rad br. 481/GR/2024

**HIDROLOŠKO – HIDRAULIČKA SVOJSTVA**  
**VODOTOKA – PRIMJER RIJEKE BEDNJE**  
**NA LOKACIJI LOVRENTOVEC**

Student:

Dorotea Topalović, 0336044277

Mentor:

izv. prof. dr. sc. Bojan Đurin

Varaždin, srpanj 2024. g.

# Prijava završnog rada

## Definiranje teme završnog rada i povjerenstva

ODJEL	Odjel za graditeljstvo		
STUDIJ	preddiplomski stručni studij Graditeljstvo		
PRISTUPNIK	Dorotea Topalović	JMBAG	0336044277
DATUM	01.07.2024.	KOLEGIJ	Hidrologija
NASLOV RADA	Hidrološko - hidraulička svojstva vodotoka - primjer rijeke Bednje na lokaciji Lovrentovec		
NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU	Hydrological - hydraulic properties of watercourses - an example of the Bednja River at the location Lovrentovec		
MENTOR	dr.sc. Bojan Đurin	ZVANJE	Izvanredni profesor
ČLANOVI POVJERENSTVA	1. doc.dr.sc. Željko Kos		
	2. izv.prof.dr.sc. Bojan Đurin		
	3. doc.dr.sc. Marko Šrajbek		
	4. doc.dr.sc. Anđelko Crnoja-zamjenski član		
	5. _____		

## Zadatak završnog rada

SROJ	481/GR/2024
OPIS	U radu će se obraditi hidrološka i hidraulička svojstva rijeke Bednje na lokaciji Lovrentovec u blizini Varaždinskih Toplica. Zbog bujičnog karaktera rijeke Bednje odnosno utjecaja klimatskih promjena, potrebno je analizirati promjene protoka te odrediti režim tečenja. Uz teoretsku podlogu, rad će sadržavati i praktični dio. Za određivanje ulaznih podataka koristiti će se raspoloživi podaci, kao i rezultati dobiveni terenskim radom. Okvirni sadržaj rada sastojati će se od uvodnih razmatranja, analize postojećeg stanja i raspoloživih podataka, prikaza rezultata dobivenih mjerenjem, analize i dobivenih zaključaka.

ZADATAK URUČEN 01.07.2024.



POTPIS MENTORA

KLON  
A15534111

Sveučilište  
Sjever



SVEUČILIŠTE  
SIEVER

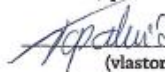
#### IZJAVA O AUTORSTVU

Završni diplomski/specijalistički rad isključivo je autorsko djelo studenta koji je isti izradio te student odgovara za istinitost, izvornost i ispravnost teksta rada. U radu se ne smiju koristiti dijelovi tuđih radova (knjiga, članaka, doktorskih disertacija, magistarskih radova, izvora s interneta, i drugih izvora) bez navođenja izvora i autora navedenih radova. Svi dijelovi tuđih radova moraju biti pravilno navedeni i citirani. Dijelovi tuđih radova koji nisu pravilno citirani, smatraju se plagijatom, odnosno nezakonitim prisvajanjem tuđeg znanstvenog ili stručnoga rada. Sukladno navedenom studenti su dužni potpisati izjavu o autorstvu rada.

Ja, ZORANA TOPALOVIĆ (ime i prezime) pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor/ica završnog/diplomskog/specijalističkog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom HRSLOŠKO - HIRANLIČKA SUGJENA VODONKA - PLIMJE LJEVE (upisati naslov) te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

HRSLOŠKO - HIRANLIČKA  
BESJE NA  
LOKALITETU  
LOKALITETU VSC

Student/ica:  
(upisati ime i prezime)

  
(vlastoručni potpis)

Sukladno članku 58., 59. i 61. Zakona o visokom obrazovanju i znanstvenoj djelatnosti završne/diplomske/specijalističke radove sveučilišta su dužna objaviti u roku od 30 dana od dana obrane na nacionalnom repozitoriju odnosno repozitoriju visokog učilišta.

Sukladno članku 111. Zakona o autorskom pravu i srodnim pravima student se ne može protiviti da se njegov završni rad stvoren na bilo kojern studiju na visokom učilištu učini dostupnim javnosti na odgovarajućoj javnoj mrežnoj bazi sveučilišne knjižnice, knjižnice sastavnice sveučilišta, knjižnice veleučilišta ili visoke škole i/ili na javnoj mrežnoj bazi završnih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice, sukladno zakonu kojim se uređuje umjetnička djelatnost i visoko obrazovanje.

## **Sažetak**

Rad prikazuje hidrološko-hidrauličku analizu rijeke Bednje na lokaciji Lovrentovec, važnog pritoka Drave u sjeverozapadnoj Hrvatskoj. Cilj istraživanja bio je analizirati hidrološke i hidrauličke karakteristike rijeke Bednje na lokaciji Lovrentovec. Analiza je provedena na temelju podataka s hidroloških postaja Ključ i Tuhovec te mjerenja na terenu kod mosta u Lovrentovcu. Proračunom Froudeovog i Reynoldsovog broja utvrđeno je da je tok rijeke miran, ali s turbulentnim zonama tijekom razdoblja visokih protoka. Visoki Reynoldsov broj ukazuje na prisutnost turbulentnog toka, što ukazuje na pažnju kod definiranja mjera zaštite od poplava i projektiranja infrastrukturnih objekata. Rezultati istraživanja naglašavaju važnost kontinuiranog nadzora i evaluacije hidroloških i hidrauličkih uvjeta kako bi se mogle učinkovito planirati mjere za upravljanje vodnim resursima, kao što su izgradnja zaštitnih nasipa, regulacije korita rijeke i sustavi za odvodnju oborinskih voda te građenje malih hidroelektrana.

**KLJUČNE RIJEČI:** hidrologija, hidraulika, rijeka Bednja, Lovrentovec, Froudeov broj, Reynoldsov broj

## **Summary**

The paper presents the hydrological-hydraulic analysis of the Bednja River at the Lovrentovec location, an important tributary of the Drava in northwestern Croatia. The research aimed to analyze the hydrological and hydraulic characteristics of the Bednja River at the Lovrentovec location. The analysis was conducted based on data from the hydrological stations Ključ and Tuhovec and field measurements near the bridge in Lovrentovac. By calculating the Froude and Reynolds numbers, it was determined that the river flow is calm but with turbulent zones in periods of high flows. A high Reynolds number indicates the presence of turbulent flow, which indicates attention to flood protection measures definition and the design of infrastructure facilities. The research results emphasize the importance of continuous monitoring and evaluation of hydrological and hydraulic conditions to effectively plan water resource management measures, such as constructing protective embankments, regulating riverbeds, storm drainage systems, and constructing small hydropower plants.

**KEYWORDS:** hydrology, hydraulics, Bednja river, Lovrentovec, Froude number, Reynold's number



# Sadržaj

1.	Uvod.....	1
2.	Hidrološka analiza vodotoka.....	2
2.1.	Hidrologija.....	2
2.2.	Hidrološki ciklus .....	3
2.3.	Hidrologija površinskih voda .....	6
2.4.	Osnove statistike i računa vjerojatnosti u hidrologiji .....	8
2.5.	Glavni hidrološki prikazi .....	9
3.	Hidraulička analiza vodotoka.....	14
3.1.	Glavne fizičke osobine tekućine.....	15
3.2.	Režim i vrsta tečenja u otvorenim vodotocima .....	16
4.	Analizirani primjer .....	23
4.1.	O rijeci Bednji .....	23
4.2.	Mjerna lokacija Lovrentovec.....	31
4.3.	Terenska istraživanja .....	36
4.4.	Proračun hidrauličkih veličina.....	44
5.	Analiza dobivenih rezultata.....	45
6.	Zaključak.....	46
7.	Literatura .....	47

# 1. Uvod

Hidrološko – hidraulička analiza predstavlja alat u razumijevanju dinamike vodnih tokova i njihove interakcije s okolišem. Rijeka Bednja, kao važan pritok Drave, ima značajnu ulogu u hidrološkom sustavu sjeverozapadne Hrvatske. Razumijevanje njezinih hidroloških i hidrauličkih karakteristika od razvojne je važnosti za upravljanje vodnim resursima, zaštitu od poplava i održivi razvoj lokalnih zajednica.

Lokacija Lovrentovec na rijeci Bednji predstavlja specifično područje interesa zbog svoje geografske i hidrauličke složenosti. Smještena je između dvije hidrološke postaje, Ključ i Tuhovec. Bednja se karakterizira promjenjivim protokom, osobito tijekom kišnih razdoblja. Lokacija u Lovrentovcu sadrži regulirani dio vodotoka rijeke Bednje, sa varijacijama protoka. Posebna pažnja bit će posvećena specifičnostima varijacija protoka na ovom području, koje proizlaze iz njegovog položaja između dviju hidroloških postaja. Izračunavanjem Froudovog i Reynoldsovog broja dobiva se dublji uvid u dinamiku toka rijeke, što je od velike važnosti za učinkovito planiranje mjera zaštite od poplava.

Cilj ovog rada je pružiti sveobuhvatan pregled hidroloških i hidrauličkih karakteristika rijeke Bednje na lokaciji Lovrentovec. Kroz analizu prikupljenih podataka, rad će doprinijeti boljem razumijevanju vodnog režima ovog područja. S obzirom na sve češće ekstremne vremenske uvjete, odnosno klimatske promjene, potrebno je provoditi analize vodotoka kako bi se bolje razumjele njihove karakteristike i ponašanje pod različitim uvjetima. Potrebno je istaknuti da rijeka Bednja nije u potpunosti hidrološki i hidraulički analizirana, kao i mjerena korištenjem hidrometrijskih postupaka. Također, rezultati ovog istraživanja bit će korisni za planiranje mjera upravljanja vodama, smanjenje rizika od poplava te za očuvanje prirodnih resursa rijeke Bednje.

## 2. Hidrološka analiza vodotoka

### 2.1. Hidrologija

Hidrologija je znanost o vodi. Dijeli se na tri grane: gibanje vode u atmosferi, gibanje vode po površini Zemlje, gibanje vode ispod površine Zemlje. Prema mjestu nalaženja vode hidrologija se dijeli na hidrologiju površinskih voda, hidrologiju podzemnih voda i hidrologiju mora [1].

Hidrologija se dijeli na pet osnovnih disciplina:

1. **Hidrometeorologija** je znanost o vodi u atmosferi. Ona povezuje probleme hidrologije i meteorologije u hidrološkome ciklusu, odnosno u kruženju vode u prirodi.

2. **Potamologija** je grana hidrologije koja proučava površinske tokove i njihove vodne režime. Ona uključuje hidrodinamiku te elemente ispiranja (erozije) i taloženja nanosa u vodotocima. U potamologiji se posebno ističu hidrografija, koja opisuje površinske vodne tokove i hidrometrija, tehnika mjerenja površinskih i podzemnih voda.

3. **Limnologija** je znanost o jezerima i slatkim vodama stajaćicama. U izučavanje voda koje miruju uključeni su hidrološki fenomeni, a naročito su naglašene analize utjecaja na okoliš.

4. **Kriologija** proučava vodu u njezinim čvrstim oblicima, npr. led, tuču, snijeg i soliku.

5. **Hidrologija podzemnih voda** je grana hidrologije koja se bavi podzemnim vodama, njihovim pojavama i kretanjima u različitim uvjetima u litosferi. Ova interdisciplinarna znanost pretežno se sastoji od hidrologije i geologije, a bavi različitim pojavama i ponašanjem vode u podzemlju [2].

Dakle, hidrologija je znanost koja se bavi analizama i studijama brojnih utjecaja vode u vezi s njezinim gibanjem i djelovanjem na živu i mrtvu prirodu. U to su uključena motrenja, opažanja, bilježenja pojedinih veličina u prirodi te razrade i analize tih podataka. Na temelju tih podataka i analiza izvode se mjerodavni zaključci o raspoloživim vodnim količinama i u njihovoj raspodjeli u vremenu i prostoru [2].

Zbog složenosti hidroloških problema potreban je interdisciplinarni pristup njihovom izučavanju i rješavanju. Stoga velik doprinos hidrologiji daju sljedeće znanstvene discipline: matematika, vjerojatnost i statistika, geologija, hidrogeologija, geografija, fizika, kemija, biologija, mehanika fluida, meteorologija, pedogeologija s poljoprivredom, šumarstvo i informatika. Matematičkim izrazima se određuju odnosi

između dviju i više veličina, a pojedina bitna svojstva u vezi s otjecanjem opisuje se parametrima. Osim u određivanju odnosa među hidrološkim parametrima, matematički postupci sadržani su u svim hidrološkim izračunima, opisima hidroloških procesa i simulacijama na modelima. Primjenom vjerojatnosti i statistike na nizove hidroloških podataka, izvode se statističke analize i zaključci o vjerojatnosti pojavljivanja budućih hidroloških događaja [2].

Budući da su oborine najvažniji faktor koji uzrokuje otjecanje, meteorologija je nezaobilazna znanstvena disciplina u hidrološkim analizama. Pedologija, poljoprivreda i šumarstvo prvenstveno su važni zbog uvjeta otjecanja vode i stvaranja nanosa. Za određivanje baza hidroloških podataka te uporabe odgovarajućih hidroloških programa i matematičkih modela za simulacije otjecanja neophodna je primjena informatike [2].

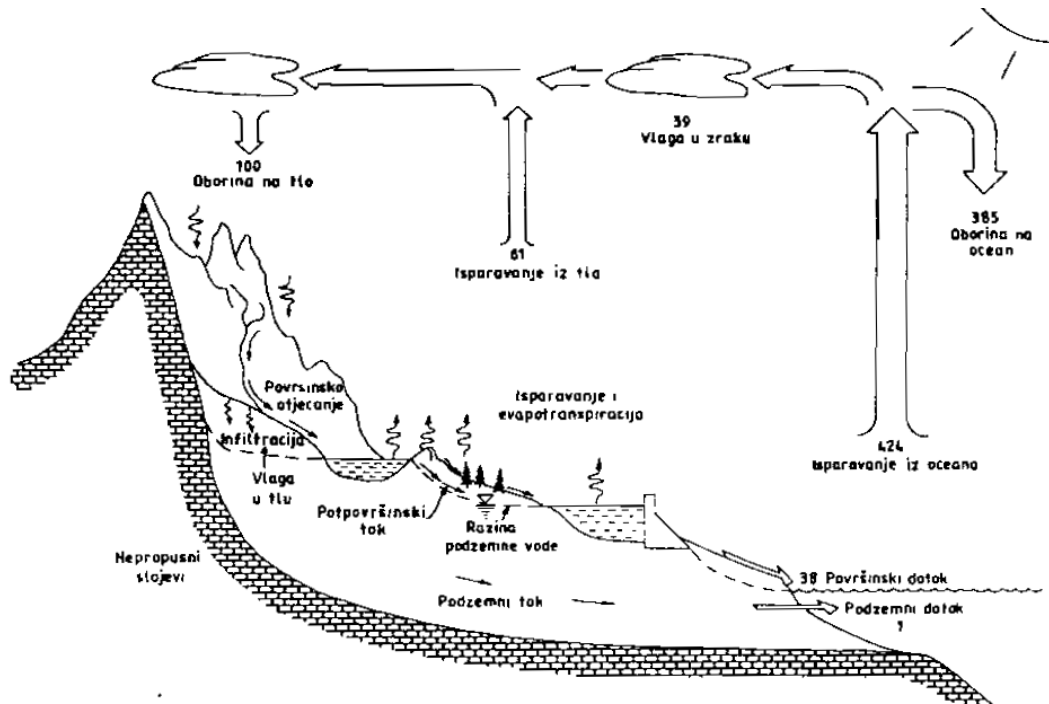
Poznavanje geološke građe slivnoga područja predstavlja preduvjet za donošenje zaključaka o uvjetima otjecanja vode, dok je hidrogeologija neizostavna u proučavanju podzemne komponente otjecanja kod kruženja vode u prirodi. Zemljopisne su osobine općenito značajne u opisivanju slivnoga područja i određivanju mreže vodotoka (hidrografska mreža). Na osnovi topografske sličnosti, a uzimajući u razmatranje i ostale značajke bitne za otjecanje vode – prvenstveno geološke i klimatološke – moguće je izvoditi zaključke o sličnosti različitih slivnih područja u pogledu otjecanja vode.

Fizika, a osobito mehanika fluida, odnosno hidraulika, bitne su zbog proučavanja temeljnih zakonitosti otjecanja vode i nanosa u vodotocima, dok je u proučavanju kakvoće vode osobito značajan doprinos kemije [2].

## **2.2. Hidrološki ciklus**

Hidrološki ciklus (Slika 1.1.) je kruženje vode kroz atmosferu i na Zemljinoj površini. To je slijed prelaženja vode iz atmosfere na Zemlju i njeno vraćanje u atmosferu; isparavanje iz oceana, mora, jezera i rijeka s kopna, pri čemu dolazi do izražaja isparavanje vode iz biljaka. U oblacima dolazi do kondenzacije pa se stvaraju oborine koje padaju natrag u oceane i na kopno. U oceanima, morima, jezerima, vodenim tokovima i na kopnu voda se potom akumulira, te opet isparava [2].

Hidrološki ciklus događa se u Zemljinu sustavu: u atmosferi, hidrosferi (na površini) i litosferi (tvrdi sastav Zemlje ispod hidrosfere). Voda prodire u Zemlju prosječno do 1 km (u kršu i do 2-3 km), a u atmosferu do 15 km, pa se čitav proces zbiva u amplitudi od oko 16 km [2].



Slika 1.1. Hidrološki ciklus [2]

Na slici 1.1. prikazano je kruženje vode u prirodi. Hidrološki ciklus je važan za razumijevanje vodne bilance, odnosno vodnoga balansa. Vodna bilanca je pregled raspoložive vode temeljen na načelu da tijekom određenog vremenskog intervala ukupni višak ili manjak vode u danome slivnom području ili vodnome objektu mora biti jednak zbroju ukupnoga gubitka ili viška vode i neto promijenjene zalihe vode u slivu ili vodnome objektu. Hidrološki/vodni režim je varijacija stanja i karakteristika vodnoga toka, koje se ponavljaju u vremenu i prostoru i koje prolaze kroz faze, npr. sezonske [2].

U tablici 1.1. prikazane su približne količine vode na Zemlji, u atmosferi, hidrosferi, litosferi i biosferi.

Tablica 1.1. Voda na Zemlji [3]

Sfera/pojavni oblik	Količina vode ( $10^3 km^3$ )	Udio od sve vode na Zemlji (%)	Sferna dubina (m)
<b>ATMOSFERA</b>			
- vodena para, oblaci	12,90	0,001	0,025
<b>HIDROSFERA</b>			
- more	1 338 000,00	96,54	2624
- rijeke	2,12	0,0002	0,004
- slatka jezera	91,06	0,0066	0,35
- slana jezera	85,40	0,0062	0,025
- močvare	11,47	0,0008	47,2
- led i snijeg u polarnim krajevima	24 023,50	1,73	
- led i snijeg izvan pol. krajeva	40,6	0,0030	
<b>LITOSFERA</b>			
- vlaga u tlu	16,50	0,0012	0,03
- slatka voda u podzemlju	10 530,00	0,760	
- slana voda u podzemlju	12 870,00	0,928	45,9
- permafrost	300,00	0,022	0,59
<b>BIOSFERA</b>			
- voda u organizmima	1,12	0,0001	0,002

U tablici 1.2. prikazana je prosječna godišnja vodna bilanca Zemljine kugle.

Tablica 1.2. Prosječna godišnja vodna bilanca Zemljine kugle [3]

Područje	Površina ( $10^6 km^2$ )	Količina vode ( $10^3 km^3$ )			Prosjek (mm)		
		Oborina <i>P</i>	Isparavanje <i>E</i>	Otjecanje <i>Q</i>	Oborina <i>P</i>	Isparavanje <i>E</i>	Otjecanje <i>Q</i>
Oceani i mora	361,3	412	448	-36	1140	1240	-100

Kopno s otjecanjem	116,8	89	53	+36	762	454	+308
Kopno bez otjecanja	32,0	10	10	-	313	313	-
Zemlja ukupno	510,1	511	511	-	1002	1002	0

Dio oborina koja isparava iz oceana i mora odlazi u oblacima do kopna iznad kojega se pretvara u oborinu, pada na tlo i otječe. Zbog toga je u tablici 1.2 za oceane i mora otjecanje  $Q$  označeno negativnim, a kod kopna pozitivnim predznakom, dakle količina vode koja ispari iz oceana ne vraća se u njih izravno u obliku oborina, već se nadoknađuje s kopna [2].

### 2.3. Hidrologija površinskih voda

Hidrologija površinskih voda ili potamologija je grana hidrologije koja proučava površinske tokove i njihove hidrološke režime, uključujući riječnu dinamiku, te pojave erozije i pronosa nanosa. Hidrološki ili vodni režim su varijacije (različitosti, promjene) u stanju i karakteristikama vodnoga toka koje se u vremenu i prostoru redovito ponavljaju i koje prolaze kroz faze, npr. sezonske. Vodni režim je općenito sve što se s vodom zbiva na određenome slivu: površinsko otjecanje po slivu i vodotoku, isparavanje, procjeđivanje u gornje površinske slojeve litosfere, prokapljivanje do podzemnih vodonosnih slojeva, te poniranje i podzemno otjecanje u poroznoj sredini ili podzemnim vodotocima. Otjecanje je dio oborine koji se pojavljuje kao vodotok. Dio oborine pale na sliv koji sudjeluje u otjecanju naziva se efektivnom ili neto oborinom, ili oborinom koja otječe [2].

Protok je količina vode što prolazi kroz poprečni presjek vodotoka u jedinici vremena. Prema odabranoj jedinici vremena razlikuju se sekundni, minutni, satni i dnevni protok.

Za veće količine vode obično se rabi jedinica  $m^3/s$ , a za male protoke  $l/s$ . Poprečni presjek vodotoka, presjek ili profil vodotoka je presjek okomit na os tečenja vodotoka u kojemu se provode hidrološka istraživanja. U nekim hidrološkim istraživanjima se unaprijed određuje tzv. reporni protok, koji predstavlja temeljni protok iznad kojega se promatra otjecanje (npr. pri analizama velikih i malih voda). Jedan od temeljnih pojmova kojima se opisuje otjecanje je srednja voda ili prosječni protok, koji se definira kao aritmetička sredina iz dugogodišnjega razdoblja [2].

Srednji godišnji protok je aritmetička sredina srednjih dnevnih protoka razmatrane godine, a srednji mjesečni protok je aritmetička sredina srednjih dnevnih protoka razmatranoga presjeka. Prosječni mjesečni protok je aritmetička sredina svih srednjih mjesečnih protoka za razmatrani mjesec u razdoblju obrade protoka. Ako se u nekom profilu vodotoka želi provoditi redovita motrenja (vodostaji) i mjerenja hidroloških veličina (protoci, temperatura vode, pronos nanosa), potrebno je osnovati hidrološku stanicu [2].

Hidrološki podaci mogu se obrađivati u kalendarskim ili hidrološkim godinama. Kalendarska godina je od 1.1. do 31.12. Hidrološka godina je neprekidno 12-mjesečno razdoblje, odabrano na takav način da su sve promjene na početku i na kraju hidrološke godine minimalne. U njoj se odigravaju svi hidrološki fenomeni koji su u vezi s promjenama. Na taj se način dobiva predodžba o vodostaju od najnižeg do najvišeg, odnosno protoku u godini. Hidrološka godina počinje 1. listopada ili 1. studenoga, ovisno o tome jesu li najniži vodostaji u rujnu ili listopadu, a nakon toga se počinju pojavljivati veće vode. Jedno od osnovnih svojstava hidroloških pojava je cikličnost, odnosno ponavljanje u ciklusima ili serijama [2].

Osnovni dijelovi hidrološkog procesa su: ulaz vode, odziv sredine kroz koju voda prolazi (akumuliranje) i izlaz. Otjecanje vode je vrlo složena prirodna pojava i zbog toga se u hidrološkim analizama primjenjuju i deterministički (određeni) i stohastički (slučajni) pristupi [2].

Determinističko-stohastički proces je metoda analize hidroloških procesa koja se koristi determinističkim pristupom kako bi se ispitalo odgovore hidroloških sustava pomoću različitih parametara te stohastičkim pristupom koji hidrološke procese i fenomene opisuje i analizira pomoću metoda teorije vjerojatnosti [2].

Deterministički procesi u hidrologiji rezultat su zakonitosti mehanike fluida i fizičkih zakona. Ovi se procesi odnose na hidrološke pojave koje se opisuju ograničenim brojem varijabli i mogu se jednoznačno povezati funkcionalnim vezama (npr. protočna krivulja



je funkcionalna veza između vodostaja i protoka). Stohastički procesi u hidrologiji određeni su zakonom slučajnosti (npr. oborine, otjecanja i sl.). Zajednička primjena determinističkih i stohastičkih procesa najbolje opisuje prirodne hidrološke procese i neophodna je za dobivanje pouzdanih znanstvenih i praktičnih informacija važnih za planiranje, korištenje, održavanje i kontrolu raspoloživih voda [2].

Zbog velikog broja različitih utjecaja na postanak hidroloških veličina kojima se opisuje otjecanje, one se mogu prihvatiti kao slučajne promjenjive veličine (slučajne varijable). Hidrološki podaci za ispitivanje osobina slučajnih varijabli dijele se na četiri vrste:

1. Historijski ili kronološki podaci
2. Podaci mjereni duž tokova ili površinski (u prostoru)
3. Laboratorijski ili terenski eksperimentalni podaci
4. Simultana (istovremena) mjerenja [2]

## 2.4. Osnove statistike i računa vjerojatnosti u hidrologiji

U hidrologiji se najčešće rabe sljedeći osnovni statistički parametri:

Centar, sredina niza, prosjek ili aritmetička sredina:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_i^n x_i \quad (2.1.)$$

Srednje kvadratno odstupanje, varijacija ili moment drugoga reda:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_i^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (2.2.)$$

Standardno odstupanje ili standardna devijacija:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_i^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.3.)$$

Koeficijent varijacije:

$$c_v = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad (2.4.)$$

Koeficijent asimetrije:

$$c_s = \frac{m_3}{\sigma^3} \quad (2.5.)$$

gdje je  $m_3$  moment trećeg reda:

$$m_3 = \frac{1}{n} \sum_i^n (x_i - \bar{x})^3 \quad (2.6.) \quad [2]$$

Vrijednosti koeficijenta asimetrije mogu biti pozitivne i negativne. Koeficijent asimetrije  $c_s$  je mjera za asimetriju. Na temelju njegovih apsolutnih vrijednosti ocjenjuje se asimetričnost raspodjele. Obično se uzima da je:

- kada nema asimetrije:  $0,00 < c_s < 0,10$
- kada je asimetrija mala:  $0,10 < c_s < 0,25$
- kada je asimetrija srednja:  $0,25 < c_s < 0,50$
- kada je asimetrija velika:  $c_s < 0,50$

Izraz (2.5.) sadrži centralni moment trećega reda (2.6.) s eksponentom 3, pa su zbog velika utjecaja ekstremnih vrijednosti potrebni što dulji nizovi za njegovo pouzdano određivanje. Taj je problem manje izražen za srednje godišnje protoke (nizovi s ujednačenijim vrijednostima), ali do izražaja dolazi za nizove maksimalnih i naročito minimalnih godišnjih protoka u slučajevima kada se jedan član niza ili nekoliko njih znatno razlikuju od prosjeka [4].

U hidrološkoj praksi se rijetko koriste parametri izvedeni iz statističkih momenata većih od trećega reda. To su koeficijent spljoštenosti (ili krutosti)  $\gamma$ , kojim se opisuje oštrina ili spljoštenost vrha krivulje učestalosti:

$$\gamma = \frac{m_4}{\sigma^4} \quad (2.7.)$$

i eksces:

$$E = \gamma \cdot 3 \quad (2.8.)$$

Eksces predstavlja krutost razmatranoga niza u odnosu na normalnu raspodjelu čiji je standard krutosti  $q=3$ . Parametri  $\gamma$  i  $E$  izravno ovise o centralnome momentu četvrtoga reda:

$$m_4 = \frac{1}{n} \sum_i^n (x_i - \bar{x})^4 \quad (2.9.)$$

Budući da hidrološki nizovi rijetko imaju preko 50 članica, njihovi koeficijenti spljoštenosti i ekscesi – zbog četvrte potencije centralnoga momenta – nisu dovoljno pouzdani karakteristični parametri, pa se rijetko upotrebljavaju u praksi [2].

## 2.5. Glavni hidrološki prikazi

Za poznavanje varijabilnosti otjecanja vode u vodotocima važno je poznavati čimbenike koji utječu na glavne hidrološke parametre. Osnovni grafički prikazi u hidrologiji su:

- nivogram/hod vodostaja
- krivulja učestalosti vodostaja
- krivulja trajanja vodotoka
- hidrogram/hod protoka
- krivulja učestalosti protoka
- krivulja trajanja protoka
- protočna krivulja

Procesi otjecanja i njihova bitna obilježja najbolje prikazuju nivogrami i hidrogrami, koji daju kronološki, vizualan i stvarni prikaz promjene tečenja [2].

Nivogram ili hod vodostaja je osnovni hidrološki grafikon koji prikazuje vodostaje u ovisnosti o vremenu. Nivogramom se također smatra neprekidno bilježenje vodostaja što ga zapisuje poseban uređaj za bilježenje razina vode ili podizanje (elevaciju) slobodnoga vodenog objekta u odnosu na postavljenu razinu. Jednokratno čitanje vodostaja s vodokaza prikazuje se kao srednji dnevni vodostaj (kada nema drugih vrijednosti). Kada je bilježenje vodostaja na limnigrafu neprekidno, nakon obrade limnigrafskih traka definira se srednji dnevni vodostaj i nivogram se crta u obliku srednjih dnevnih vodostaja. Kada se za grafički prikaz usvoji neprekinut vodostaj, dobije se neprekinuti ili kontinuirani nivogram. Iz nivograma se dobiju dvije temeljne hidrološke krivulje: krivulja učestalosti vodostaja i krivulja trajanja vodostaja [2].

Hidrogram ili hod protoka je grafički prikaz protoka vode u ovisnosti o vremenu. Dobiva se kada se iz zabilježenih vodostaja, pomoću protočne krivulje, odrede odgovarajući protoci vode. Na temelju hidrograma se određuju krivulja učestalosti protoka i krivulja trajanja protoka [2].

Protočna krivulja prikazuje protok kao funkciju vodostaja. Može se definirati na temelju Chezyeve, Manningove, Stricklerove i sličnih formula za srednju brzinu u poprečnom profilu. Srednja brzina pomnoži se s površinom poprečnog presjeka, čime se dobije protok [2]:

$$Q = A \cdot v \quad (2.10.)$$

Chezyjeva formula:

$$Q = C \cdot A \cdot \sqrt{RI} \quad (2.11.)$$

Manningova formula:

$$Q = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} \cdot A \cdot \sqrt{I} \quad (2.12.)$$

Stricklerova formula:

$$Q = K_s \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot A\sqrt{I} \quad (2.13.)$$

gdje je:

$A$  – površina poprečnog presjeka ( $m^2$ )

$C$  – Chezyjev koeficijent ( $m^{1/2}/s$ )

$n$  – Manningov koeficijent hrapavosti ( $s/m^{1/3}$ )

$K_s$  – Stricklerov koeficijent glatkosti ( $m^{1/3}/s$ )

$R$  – hidraulički radijus (m)

Za računanje protoka se preporuča korištenje Manningove jednadžbe i Manningovog koeficijenta hrapavosti jer se pokazalo da Chezyjev koeficijent hrapavosti nije konstantan za jedno korito već da ovisi o hidrauličkom radijusu [4].

Definiranje protočne krivulje provodi se tako da se za različite vodostaje  $h$  najprije izračunaju hidrauličke karakteristike poprečnog profila; njegova površina  $A$ , omočeni obod  $O$  i hidraulički radijus  $R$ , definiran kao omjer između površine protjecajnog profila omočenog oboda. Nakon toga se odrede modul protoka  $K_0$  i odgovarajući protok  $Q$  [2].

U prirodnim tokovima pad vodnog lica  $l_0$  rijetko se mjeri. Uz pretpostavku jednolikog tečenja, može se smatrati da je jednak padu energetske linije  $l_c$ . Međutim, budući da tečenje često nije jednoliko, hidrauličko definiranje protočne krivulje može biti izazovno. U hidrologiji se protočna krivulja obično određuje na temelju mjerenja brzine vode u poprečnom profilu, iz čega se definira srednja brzina vode. Protok za određeni vodostaj u profilu izračunava se kao umnožak površine protjecajnog profila  $A$  i srednje brzine  $v$ . Na temelju tako dobivenih protoka za različite vodostaje, protočna krivulja definira se analitički [2].

Hidrološka stanica (Slika 1.2., fotografirano 12.06.2024. g.) je mjesto gdje se obavljaju motrenja i mjerenja hidroloških veličina. Najjednostavnija hidrološka stanica je vodokaz s kojega se obično očitavaju jednom dnevno (u Hrvatskoj u 7:30 ujutro) i ti se podaci prihvaćaju kao srednji dnevni vodostaji, te izvanredno više puta dnevno (za vrijeme pojavljivanja velikih voda). Za neprekidno bilježenje vodostaja rabi se limnigraf (Slika 1.3., fotografirano 12.06.2024. g.), a neprekidni zapis vodostaja na limnigrafskoj traci naziva se limnigram [2].



*Slika 1.2. Hidrološka stanica Tuhovec [5]*



*Slika 1.3. Mjerna letva na lokaciji Tuhovec [5]*

### 3. Hidraulička analiza vodotoka

Mehanika fluida je grana fizike koja proučava oblike i zakone mehaničkoga gibanja i relativnoga mirovanja tekućina (kapljevine i plinovi), te razrađuje načine primjene tih zakona na različita područja tehnike, a naročito u hidrotehnici (npr. hidroenergetika, hidrologija, melioracije, plovni putevi, vodoopskrba, kanalizacija). U mehanici fluida razmatra se gibanje sustava čestica. Materijalna točka je zamišljeno materijalno tijelo čija je masa pridodana točki. „Mehanika fluida“ je najpravičniji naziv za tu znanost, koji se u svijetu najviše rabi. Postoje još i nazivi hidraulika i hidromehanika [2].

Od početka značajnijeg razvoja mehanike fluida, od 16. stoljeća, izvode se teorijske osnove hidrauličkih zakonitosti, a usporedno s njihovom primjenom razvija se i praktična hidraulika. Posebni i često vrlo složeni zahtjevi, prvenstveno kada se radi o projektiranju i izvedbama velikih hidrotehničkih građevina, uvjetovali su razvitak hidrauličkih laboratorija u kojima se na fizikalnim modelima ispituju hidrotehnički problemi koje je vrlo teško, a često i nemoguće, riješiti na temelju teorijskoga pristupa. Prema tome, u mehanici fluida su uzajamno povezani teorija, praksa, eksperimentiranje i matematičko modeliranje [2].

U mehanici fluida postoje tri osnovne veličine s pripadajućim dimenzijama, iz kojih se izvode ostale veličine:

1. dužina:  $L$  (m)
2. vrijeme:  $T$  (s)
3. masa:  $M$  (kg)

Od izvedenih fizičkih veličina ovdje se navode samo najvažnije:

- brzina:  $v = \frac{L}{T}$  (m/s) (3.1.), ( $v = \frac{ds}{dt}$ )  $s$  je put, a  $t$  je vrijeme
- ubrzanje ili akceleracija:  $a = \frac{L}{T^2}$  (m/s<sup>2</sup>) (3.2.) ( $a = \frac{dv}{dt}$ )
- sila:  $F = M \cdot a$  (N) (3.3.)

Izvedena jedinica za silu – Newton ( $N = kg \frac{m}{s^2}$ ) je sila koja masi od jednoga kilograma daje ubrzanje od jednoga .

- protok:  $Q = \frac{L^3}{T}$  (m<sup>3</sup>/s) (3.4.)

Jedinica za protok je m<sup>3</sup>/s , a za male protoke rabi se još i litra u sekundi l/s, pa čak i cm<sup>3</sup>/s.

- mehanički rad:  $R = F \cdot L$  (J) (3.5.)

Jedinica za mehanički rad je Joule (J)=(Nm).

- energija:

Iz jednadžbe  $E = \frac{mv^2}{2}$  (3.6.) može se izvesti dimenzija polja energije  $E$ :

$$E = \frac{(M \cdot L \cdot T^{-1})^2}{1} = M \cdot L^2 \cdot T^{-1} \quad (3.7.)$$

Jedinica za energiju  $E$ , kao i za mehanički rad  $R$  je (J) (3.8.)

$$(J) = (Nm) = (kg \frac{m^2}{s^2}) \quad (3.8.)$$

- snaga:

Snaga  $N$  je energija  $E$  u jedinici vremena  $T$ , pa je u skladu s tim:

$$N = \frac{E}{T} = M \cdot L^2 \cdot T^{-1} \quad (3.9.)$$

Jedinica za snagu je  $(N \frac{m}{s}) = J/s$  [2].

### 3.1. Glavne fizičke osobine tekućine

Tekućina ili fluid je maseno tijelo, čije se pojedine čestice međusobno veoma lako pomiču, tako da može teći, odnosno mijenjati svoj oblik i pri učinku neznatnih sila. U reološkom smislu tekućina (fluid) je tvar (materija) koja pri tangencijalnim (smičnim) naponima neprekidno mijenja oblik, ma kako male bile sile koje su uzrokovale te napone. Prema tome, tekućina nema vlastiti oblik, nego poprima oblik posude u kojoj se nalazi. Reologija je znanost koja se bavi problemima napona i promjena oblika – deformacija [2].

Tekućine se dijele na kapljevine i plinove. Kapljevina je fluid koji u otvorenoj posudi ne može proizvoljno povećati svoj volumen, a plin je ekspanzivni fluid koji uvijek zauzima najveći mogući volumen koji mu je dostupan. Pritom su, za razliku od plinova, kapljevine – kao i kruta tijela – vrlo malo stlačive i ne zauzimaju čitav raspoloživi volumen, tj. imaju slobodnu površinu [2].

Gustoća  $\rho$  je fizička veličina koja pokazuje raspodjelu mase tekućine  $M$  u volumenu  $V$ :

$$\rho = \frac{M}{V} \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (3.10.)$$



Ako je njezina gustoća u svim točkama ista tekućina je homogena. Gustoća vode ovisno o njezinoj temperaturi se vrlo lagano mijenja. U hidrotehnici se temperatura vode obično mijenja u granicama od 0 do 35°C, pa se za praktične proračune može uzeti da je gustoća vode stalna i jednaka:  $\rho=1000 \text{ kg/m}^3$  [2].

Gustoća mora iznosi od 1020 do 1030  $\text{kg/m}^3$ , a u posebnim slučajevima (za velik salinitet mora) 1050  $\text{kg/m}^3$ . Gustoća nafte kreće se unutar granica od 650 do 850  $\text{kg/m}^3$ , a gustoća žive iznosi 13.600  $\text{kg/m}^3$ . Gustoća zraka iznosi 1,293  $\text{kg/m}^3$  (na morskoj površini pri atmosferskome tlaku) [2].

Specifična težina  $\gamma$  je fizička veličina koja prikazuje raspodjelu težine  $G$  u volumenu  $V$  [2]:

$$\gamma = \frac{G}{V} (\text{N/m}^3) \quad (3.11.)$$

Između specifične težine  $\gamma$  i gustoće  $\rho$  postoji sljedeći odnos [2]:

$$\gamma = \rho \cdot g \quad (3.12.)$$

$$\rho = \frac{\gamma}{g} \quad (3.12a)$$

### **3.2. Režim i vrsta tečenja u otvorenim vodotocima**

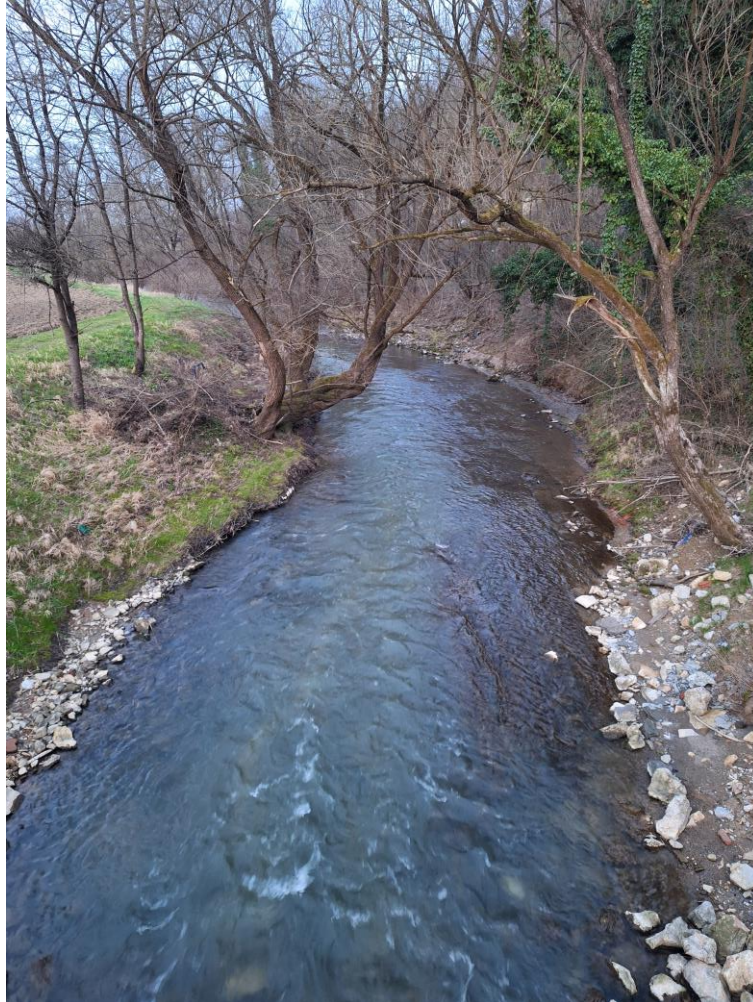
Danas, u opskrbi vodom, navodnjavanju, dreniranju i sanaciji terena, otvoreni vodotoci imaju važnu ulogu u upravljanju riječnim tokovima i kopненоj navigaciji. Od davne prošlosti inženjeri su se bavili tečenjem u otvorenim vodotocima – ovaj oblik tečenja bio je prvi oblik strujanja s kojim su se susreli hidrotehničari [6].

U otvorenim koritima je posebnost postojanje slobodne površine. Tečenje je jednoliko ukoliko se iznos srednje brzine ne mijenja od presjeka do presjeka. To pored slobodne površine znači i nepromjenjivost površine živog presjeka i dubine toka, odnosno normalne dubine koja ovisi o karakteristikama korita i iznosu protoka. Jednoliki tok rezultat je ravnoteže komponente sile teže duž toka i sile posmičnog naprezanja (trenja) [6].

Do nejednolikog toka dolazi ukoliko se iznos srednje brzine toka mijenja duž promatranog dijela toka. Promjena iznosa srednje brzine može biti posljedica promjene površine živog presjeka, promjene nagiba dna kanala ili postojanja hidrotehničkih građevina kao što su npr. brana ili preljev [6].

Ovo sve navedeno utječe na ponašanje toka, a kako u svakom kanalu postoje ove značajke, jednoliko tečenje se praktički nikad ne ostvaruje [6].

Razlikuju se prirodni vodotoci (Slika 3.1., fotografirano 07.03.2024. g) i umjetni vodotoci (Slika 3.2., fotografirano 25.10.2023. g.). U prirodne spadaju rijeke i svi drugi prirodni vodotoci koji su nepravilnog poprečnog presjeka, različitog nagiba dna kanala i od različitih materijala [6].



*Slika 3.1. Primjer prirodnog vodotoka – rijeka Bednja na lokaciji Lovrentovec [5]*



*Slika 3.2. Primjer umjetnog vodotoka – regulirana rijeka Mirna [5]*

Tok može biti karakteriziran u ovisnosti o dva osnovna parametra – vrijeme i udaljenost. Razlikuje se kinematička i dinamička podjela tečenja [6].

Kinematička podjela tečenja odnosi se na podjelu prema vremenskoj ljestvici: stacionarno i nestacionarno tečenje i podjelu prema prostornoj ljestvici: jednoliko i nejednoliko tečenje [6].

Stacionarno jednoliko tečenje karakterizira konstantan protok s vremenom kao i površina poprečnog presjeka korita – primjer su uređeni odnosno regulirani vodotoci. Stacionarno nejednoliko tečenje karakterizira također konstantan protok s vremenom ali površina poprečnog presjeka korita nije – primjer je stacionarno tečenje u rijekama gdje je svaki profil različit. Nestacionarno jednoliko tečenje karakterizira konstantna površina poprečnog presjeka korita, a protok varira kroz vrijeme – primjer je tečenje pod tlakom kroz cijev. Nestacionarno nejednoliko tečenje karakterizira promjena protoka i površine poprečnog presjeka kroz vrijeme – primjer takvog toka i najsloženijeg zadatka za analizu je prolaz vodnog vala kroz prirodno korito [6].

U stacionarnim strujanjima veličine kojim su ona opisana ne mijenjaju se tijekom vremena – brzina, dubina vode, tlakovi, sile i energije. Jednoliko tečenje može se javiti samo u prizmatičnim kanalima, tj. koritima koja imaju konstantan pad i konstantan poprečni presjek. Nejednoliko tečenje podrazumijeva promjenu parametara tečenja duž toka – brzinu, dubinu i protok [6].

U nestacionarnim strujanjima se vodostaji i protoci mijenjaju tokom vremena duž korita i u principu su uvijek nejednolika. Nestacionarnost se javlja uslijed djelovanja vanjskih faktora, a po intenzitetu njihovog djelovanja razlikujemo nestacionarne pojave s naglim promjenama i nestacionarne pojave s blagim promjenama. Primjer naglih promjena je rušenje brane, naglo zaustavljanje ili povećavanje protoka uslijed rada hidroelektrane – takve promjene izazivaju pojavu oštro izraženih valova u vodotoku. Primjer nestacionarnog tečenja s blagim promjenama je propagacija vodnog vala u vodotoku [6]. Dinamička podjela tečenja odnosi se na laminarno i turbulentno tečenje te na miran, kritičan i silovit tok. Prva podjela odnosi se na laminarno i turbulentno tečenje. Njeđa definira Reynoldsov broj – bezdimenzionalna veličina. Brzina kod koje nastaje turbulentno tečenje naziva se kritična brzina. Prijelaz iz laminarnog u turbulentno strujanje ovisi o brzini tekućine i o njezinoj viskoznosti, odnosno žilavosti tekućine [6].

$$R_e = \frac{v \cdot D}{\nu} \quad (3.13.)$$

gdje je:

$R_e$  – Reynoldsov broj

$v$  – brzina toka (m/s)

$D$  – promjer cijevi kod cjevovoda pod tlakom, a kod otvorenih vodotoka zamjenjuje se sa  $4xR$  (m)

$\nu$  – kinematička viskoznost tekućine ( $m/s^2$ ).

S obzirom na to da razlikujemo tečenje u otvorenom vodotoku i tečenje pod tlakom u cijevima, imamo dvije podjele:

1) za cjevovode pod tlakom:

Ako je  $R_e \leq 2300$  onda je tečenje laminarno.

Ako je  $R_e > 2300$  onda je tečenje turbulentno.

2) za otvorene vodotoke:

Ako je  $R_e < 400$  onda je tečenje laminarno.

Ako je  $R_e > 800$  onda je tečenje turbulentno.

Ako je  $400 < R_e < 800$  onda se radi o prijelaznom režimu.

Prijelazni režim tečenja javlja se kada Reynoldsov broj prelazi iz područja laminarnog toka u područje turbulentnog toka. Kada tekućina teče kroz cijev, prijelazni režim se može primijetiti kao pojavljivanje vrtložnih struktura i nepravilnih oblika strujanja nakon određenog protoka. Prijelazni režim u otvorenim kanalima može biti vidljiv kao kombinacija mirnih površinskih valova i mjehurića ili vrtloga [6].

Druga podjela dinamičkog tečenja odnosi se na miran, kritičan i silovit tok. Njega definira Froudiv broj – bezdimenzionalna veličina. On opisuje pojavu nastanka hidrauličkog skoka, koji nastaje na prijelazu iz mirnog u silovito tečenje. Tu dolazi do disipacije (rasipanja) energije i do pretvaranja kinetičke energije mirnog tečenja (velika brzina strujanja) u potencijalnu energiju silovitog tečenja (velika dubina fluida). Hidraulički skok može se uočiti kod protoka vode u otvorenim kanalima, npr. rijeka ili preljev brane [6].

$$F_r = \frac{\bar{v}}{\sqrt{g \cdot y}} \quad (3.14.)$$

gdje je:

$\bar{v}$  – srednja brzina toka [m/s]

$g$  – ubrzanje sile teže [m/s<sup>2</sup>]

$y$  – dubina korita [m].

Ako je  $F_r < 1$  onda je tečenje mirno.

Ako je  $F_r = 1$  onda je tečenje kritično.

Ako je  $F_r > 1$  onda je tečenje silovito.

Mehanička energija mase tekućine koja protječe u jedinici vremena kroz promatrani živi presjek vodotoka, reducirana na jedinicu težine i određena s obzirom na neku horizontalnu ravninu, zove se specifična energija vodotoka  $E$ . Određuje se s obzirom na jednu te istu horizontalnu ravninu [4]:

$$E = z + \frac{p}{\gamma} + \frac{\alpha v^2}{2g} \quad (3.15.)$$

Kod vodotoka sa slobodnom površinom neće se uzimati u obzir atmosferski tlak, koji je isti za sve presjeke, a u izrazu za  $E$  član  $p$  će označavati manometarski tlak. Pri laganom promjenjivom gibanju hidrodinamički tlak raspoređuje se po hidrostatičkom zakonu, pa će zbog toga za svaku točku  $M$  živog presjeka biti [4]:

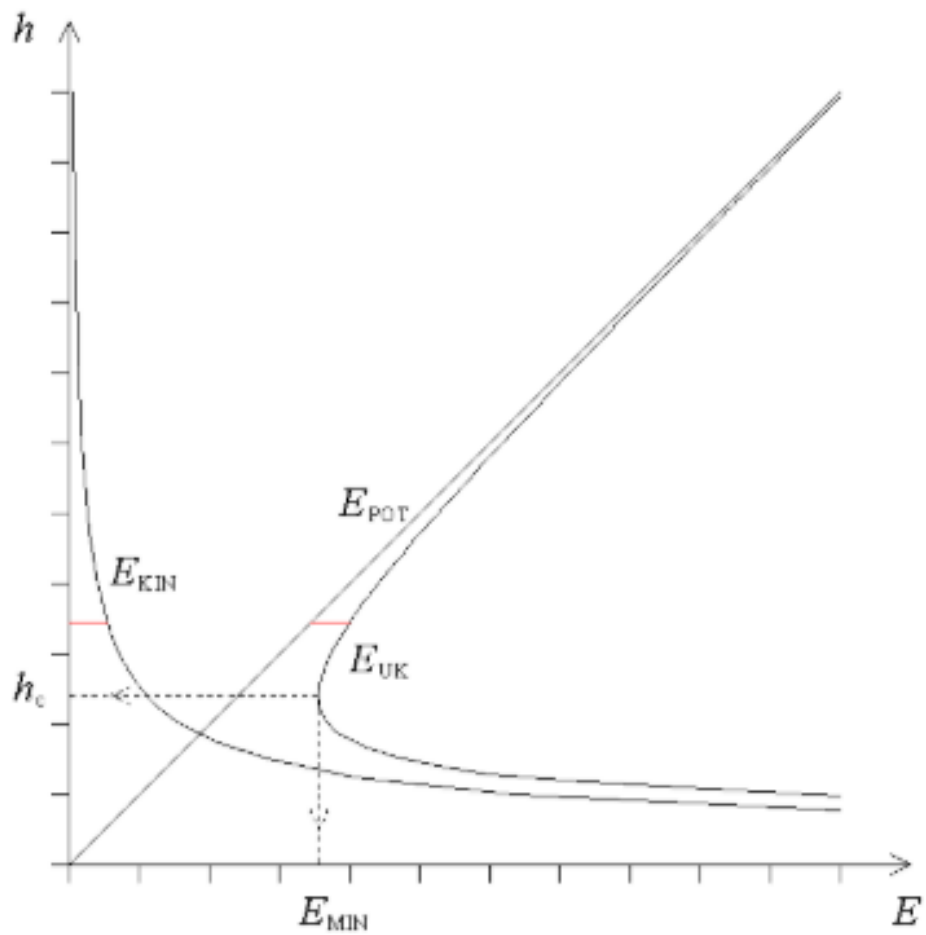
$$z + \frac{p}{\gamma} = z + h' = z_0 + h_0 \quad (3.16.)$$

gdje je  $h$  najveća dubina u živom presjeku.

Također, specifična energija vodotoka (ne uzimajući u obzir atmosferski tlak) može se pri tome izraziti u obliku [4]:

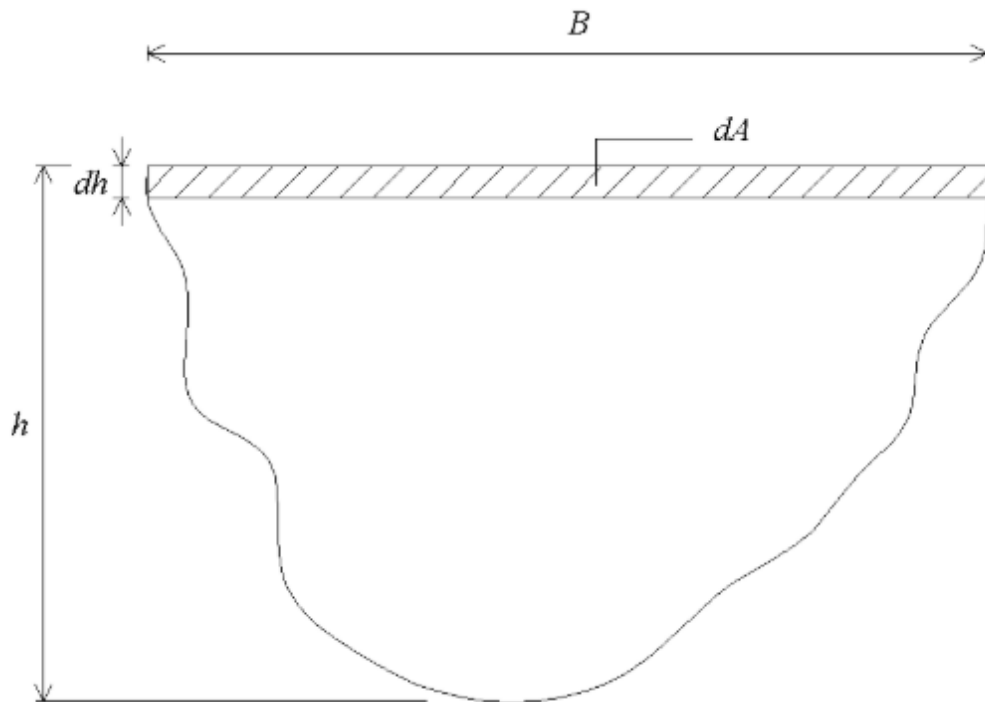
$$E = z_0 + h + \frac{\alpha v^2}{2g} \quad (3.17.)$$

Da bi se odredio režim toka potrebno je odrediti odnos kritične dubine i dubine u koritu, koji se mogu prikazati na dijagramu specifične energije (Slika 3.3.).



Slika 3.3. Krivulja specifične energije za zadani protjecajni presjek i protok [4]

Na slici 3.4. prikazan je zadani poprečni presjek korita.



Slika 3.4. Poprečni presjek korita vezan uz sliku 3.3. [4]

Dubina vodotoka pri kojoj specifična energija presjeka za zadani protok postaje minimalna zove se kritična dubina i označuje se sa  $h_{cr}$ . Iz promatranja krivulje specifične energije presjeka primjećuje se da njezina gornja grana prikazuje porast energije  $E_0$  za  $h > h_{cr}$ , dok njezina donja grana, koja odgovara vrijednostima  $h < h_{cr}$ , prikazuje smanjenje energije  $E_0$  s porastom dubine vodotoka. S obzirom na kritičnu dubinu treba razlikovati ova stanja otvorenih vodotoka [4]:

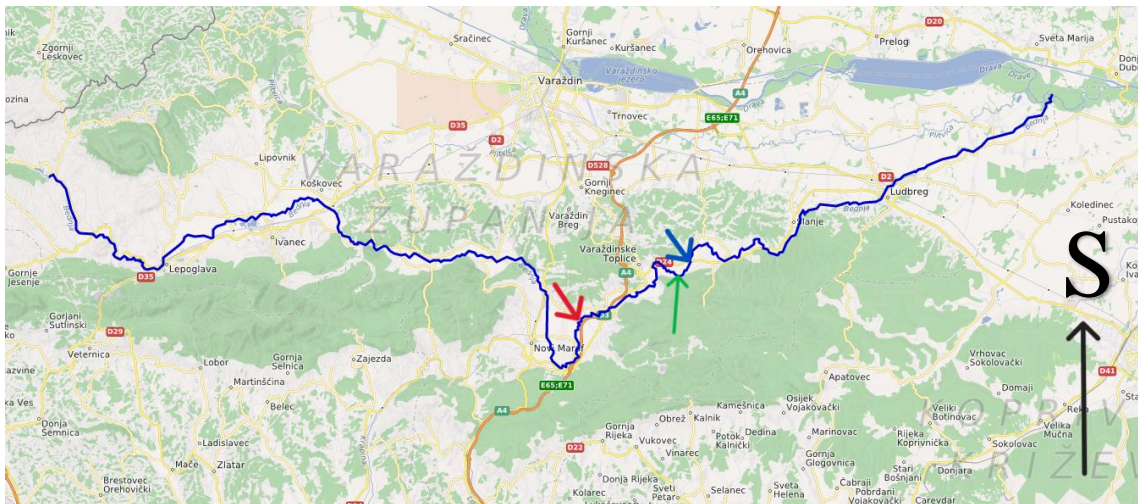
- silovit tok, pri kojem su dubine manje od kritične dubine ( $h < h_{cr}$ ); porast specifične energije presjeka takvog toka nastaje zbog povećanja njegovog kinetičkog dijela energije, uz istodobno smanjenje njegovog potencijalnog dijela
- miran tok, pri kojem su dubine veće od kritične dubine ( $h > h_{cr}$ ); povećanje specifične energije presjeka takvog toka nastaje zbog povećanja njegovog potencijalnog dijela, uz istodobno smanjenje njegovog kinetičkog dijela energije
- kritičan tok, pri kojem je dubina vodotoka jednaka kritičnoj dubini ( $h = h_{cr}$ )

## 4. Analizirani primjer

### 4.1. O rijeci Bednji

Rijeka Bednja (Slika 4.1.) je jedna od rijeka u Hrvatskoj koja cijelim svojim tokom teče kroz Hrvatsku. Mnogo je zanimljiva iz razloga jer je jedna od rijeka koja ima više izvora. Jedan od izvora Bednje smatra se Brezova gora, odnosno više curaka koji izbijaju na visini od 300 m i stvaraju stalni tok. Iz Kamene gorice na istoj nadmorskoj visini teče drugi tok za kojeg se također misli da bi mogao biti izvor Bednje. Po dužini, prema količini vode i karakteristikama uzdužnog profila, oba toka su vrlo slična. Nizvodno se spajaju i poslije 2 km zajedničkog otjecanja jedinstven tok je pregrađen branom. Na taj način voda ispunjava okolno udubljenje i tvori Trakošćansko jezero. Potapanjem doline Bednje i stvaranjem jezera izmijenjen je prirodni tok rijeke, što je vidljivo prilikom ispuštanja vode iz jezera povremenim otvaranjem brane [7].

Rijeka Bednja teče kroz mjesta Bednju, Lepoglavu, Ivanec, Beletinec, Novi Marof, Varaždinske Toplice, Ludbreg, te se ulijeva u Dravu kod Malog Bukovca. Čini sjevernu prirodnu granicu i odvaja planinu Kalnik od Topličkog Gorja. Dužina Bednje je 133 km [7].



Slika 4.1. Tok rijeke Bednje [8]

Plavom strelicom na slici 4.1. označena je hidrološka postaja Tuhovec, dok je crvenom strelicom označena mjerna postaja Ključ. Zelenom strelicom označena je lokacija mjerenja Lovrentovec.



Od mjerne postaje Lovrentovec na rijeci Bednji uzvodno i nizvodno nalaze se dvije hidrološke postaje – Ključ i Tuhovec. Imaju važnu ulogu u praćenju hidroloških uvjeta te predviđanju poplava. Na obje postaje se prikupljaju podaci ključni za razumijevanje ponašanja rijeke i omogućavanje pravovremenih reakcija u slučaju izvanrednih hidroloških situacija. Funkcije hidroloških postaja su mjerenje vodostaja, praćenje protoka, klimatski podaci, predviđanje poplava, izdavanje upozorenja i obavijesti ukoliko je potrebno.

**Hidrološka postaja Ključ** (Slika 4.2., fotografirano 2023. g.) nalazi se kod naselja Orehovec. Radi se o limnigrafskoj postaji koja je počela sa radom 01.01.1986. g. Kota nule iznosi 173,090 m.n.v [9].

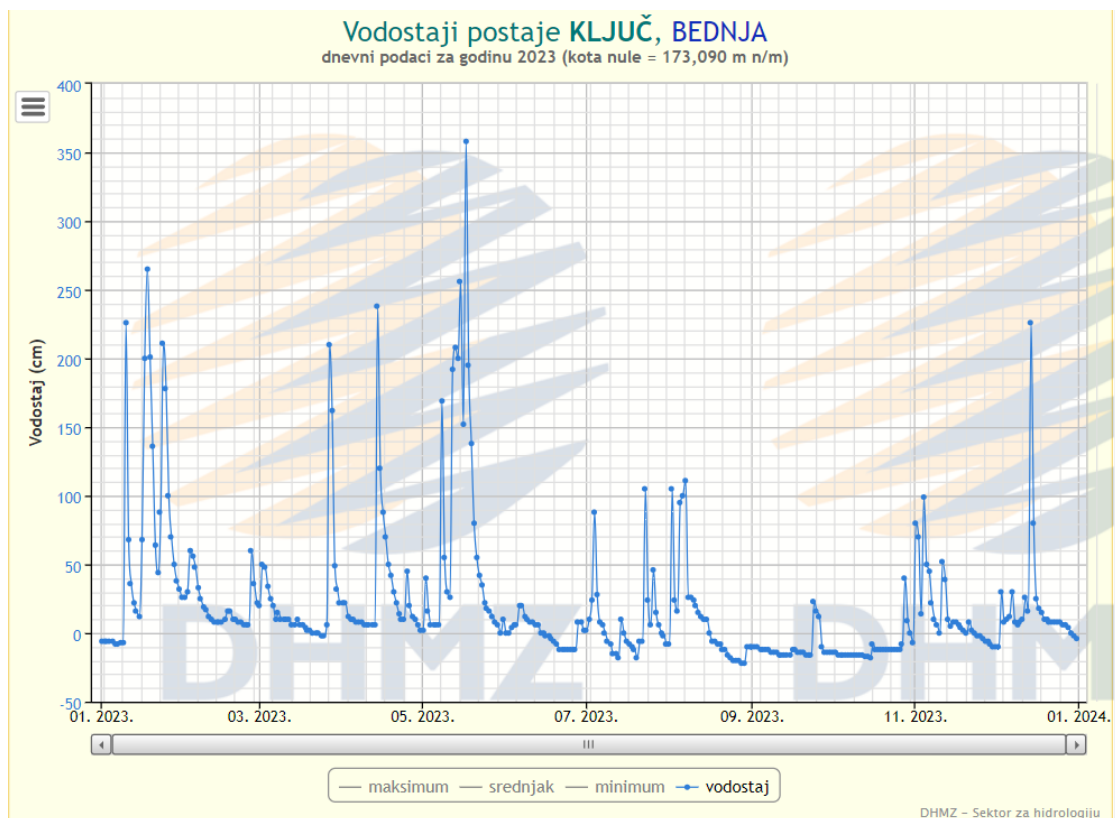


*Slika 4.2. Hidrološka postaja Ključ [10]*

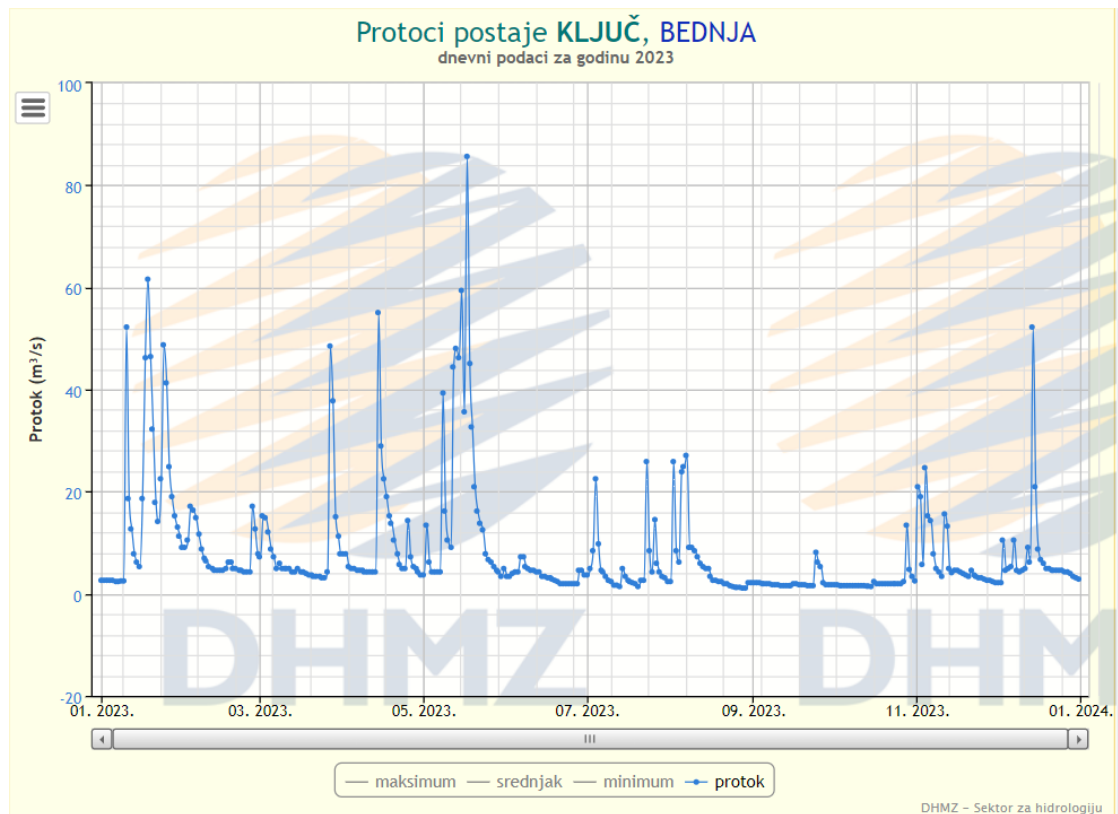
Što se tiče vodostaja, najmanji izmjeren je 1.8.2004. g. i iznosi -48 cm, a najveći izmjeren je 5.12.1997. g. i iznosi 545 cm. Najmanji izmjeren protok je 27.5.1993. g. i iznosi 0.267 m<sup>3</sup>/s, a najveći izmjeren protok je 5.12.1997. g. i iznosi 104.5 m<sup>3</sup>/s. Iz ovih podataka može se zaključiti da minimalan vodostaj ne mora nužno odgovarati minimalnom protoku [9].

Podaci vodostaja i protoka za mjernu postaju Ključ u vremenu za 2023. g. prikazani su na slikama 4.3. i 4.4. [9]:

- na slici 4.3. prikazan je nivogram za 2023. g., najveći izmjeren srednji dnevni vodostaj iznosi 358 cm, 17.05.2023. g., a najmanji izmjeren srednji dnevni vodostaj iznosi -22 cm, 28.8.2023. g.
- na slici 4.4. prikazan je hidrogram za 2023. g., najveći izmjeren srednji dnevni protok iznosi 85,56 m<sup>3</sup>/s, 17.05.2023. g., a najmanji izmjeren srednji dnevni protok iznosi 1,112 m<sup>3</sup>/s, 28.08.2023. g.



Slika 4.3. Nivogram - hidrološka postaja Ključ, 2023. godina [9]



Slika 4.4. Hidrogram - hidrološka postaja Ključ, 2023. godina [9]

Hidrološka postaja Tuhovec (Slika 4.5., 4.6., fotografirano 12.06.2024. g.) nalazi se kod naselja Tuhovec. Na mostu je smještena automatska meteorološka stanica koja mjeri vodostaj i protok svaki sat. Počela je sa radom 12.06.1957. g. a onda staje sa mjerenjima 1975. g. Nazad je u funkciji 1979. g. i radi sve do danas [9].



*Slika 4.5. Hidrološka postaja Tuhovec [5]*

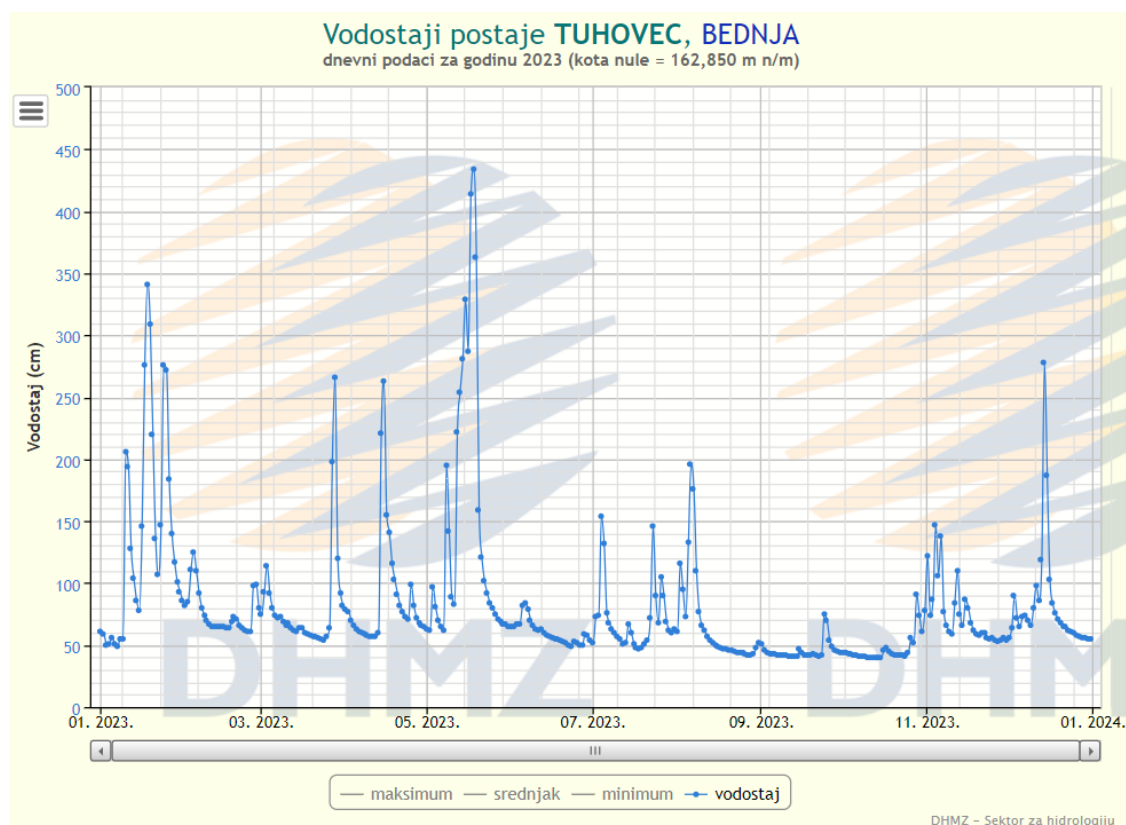


*Slika 4.6. Hidrološka postaja Tuhovec [5]*

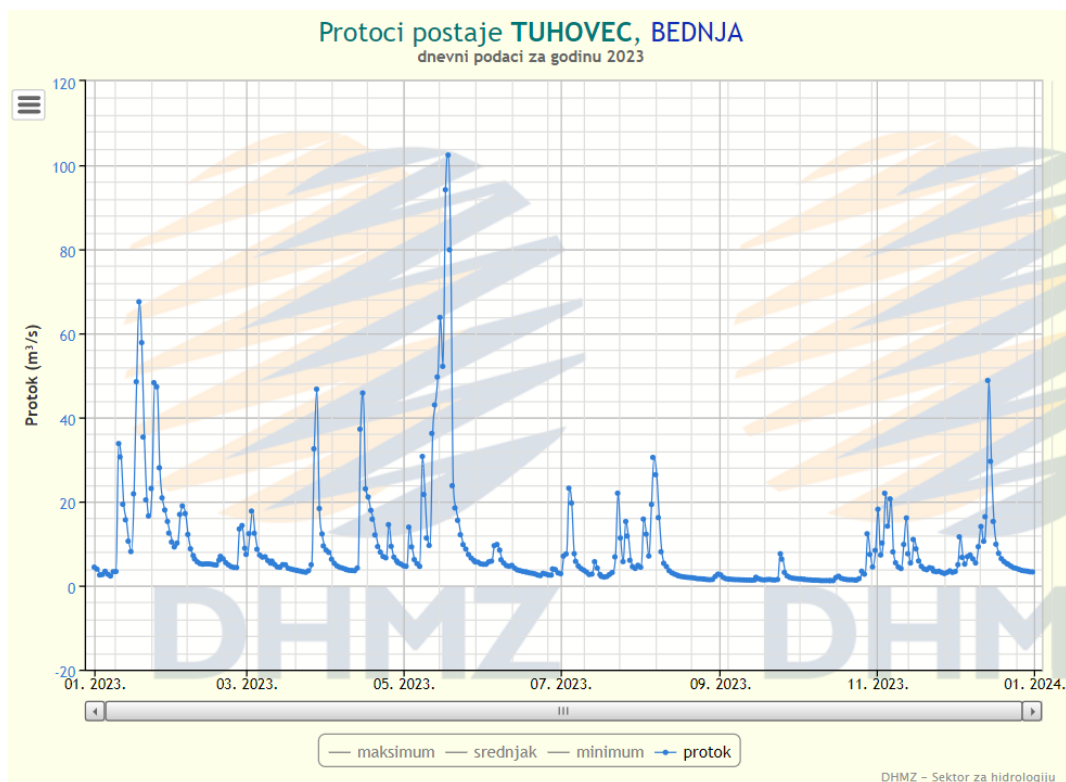
Najveći izmjeren vodostaj iznosi 588 cm, 19.09.2010. g., a najmanji izmjeren vodostaj iznosi 18 cm, 19.05.2022. g. Najveći izmjeren protok iznosi 159.3 m<sup>3</sup>/s, 06.11.1998. g., a najmanji izmjeren protok iznosi 0,163 m<sup>3</sup>/s, 19.5.2022. g.

Podaci vodostaja i protoka za mjernu postaju Tuhovec u vremenu za 2023. g. prikazani su na slikama 4.7. i 4.8. [9]

- na slici 4.7. prikazan je nivogram za 2023. g., najveći izmjeren srednji dnevni vodostaj iznosi 458 cm, 19.05.2023. g., a najmanji izmjeren srednji dnevni vodostaj iznosi 39 cm, 14.10.2023. g.
- na slici 4.8. prikazan je hidrogram za 2023. g., najveći izmjeren srednji dnevni protok iznosi 112,5 m<sup>3</sup>/s, 19.05.2023. g., a najmanji izmjeren srednji dnevni protok iznosi 1,090 m<sup>3</sup>/s, 14.10.2023. g.



Slika 4.7. Nivogram - hidrološka postaja Tuhovec [9]



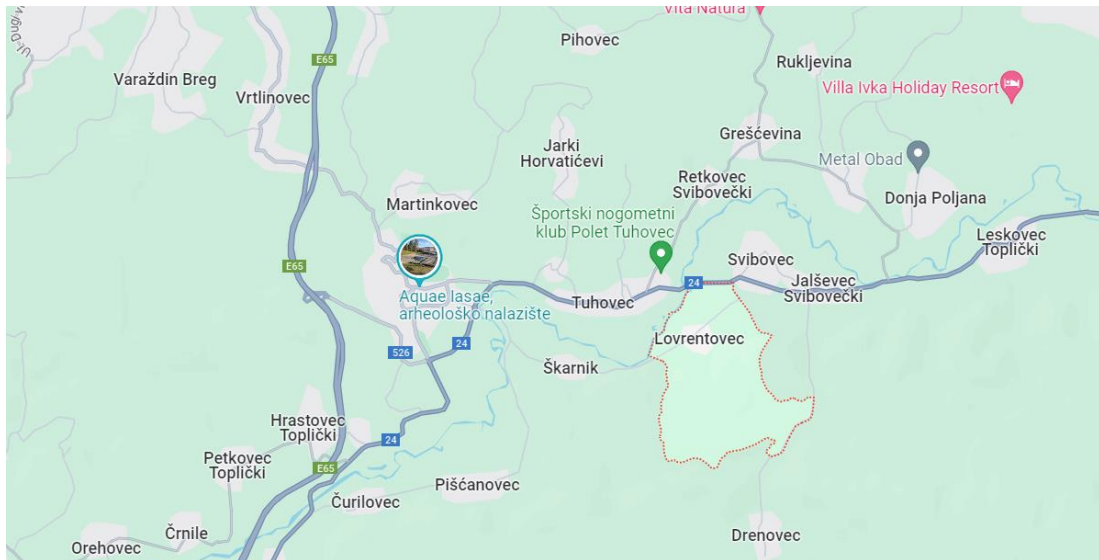
Slika 4.8. Hidrogram – hidrološka postaja Tuhovec [9]

Na temelju podataka s hidroloških postaja Ključ i Tuhovec, vidljivo je da se radi o vodotoku bujičnog karaktera. Tijekom većeg dijela godine, srednji dnevni protoci imaju konstantnu vrijednost. Također, istraživanja su pokazala da se radi o bujičnom vodotoku. U vrijeme velikih oborina dolazi do povećanja protoka i visokog vodostaja, što može uzrokovati poplave, bujice, eroziju tla i sl. Kod rijeke Bednje, povećanje oborina dovodi do povećanja protoka obično od pola dana do dan nakon prestanka oborina. Zbog velikog broja prirodnih pritoka i kanala, kao i složene konfiguracije sliva (uzvišenja terena i depresije/udubljenja), hidrološka svojstva Bednje su složena [11].

Navedeno je razlog za hidrološko-hidrauličku analizu rijeke Bednje. Izabrana je lokacija između dviju hidroloških postaja, kod mosta u Lovrentovcu, u blizini Varaždinskih Toplica, jer se radi o suženju toka rijeke Bednje i vraćanju u približnu širinu nakon mosta, uz pojavu zavoja. Na taj način se analiziraju sve moguće pojave promjene oblika i utjecaj na tok.

## 4.2. Mjerna lokacija Lovrentovec

Lovrentovec (Slika 4.9.) je malo naselje u blizini Varaždinskih Toplica, na području Varaždinske županije. Ima oko 130 stanovnika [12].



### 4.9. Položaj mjesta Lovrentovec [13]

Most na rijeci Bednji u Lovrentovcu predstavlja važan infrastrukturni objekt koji doprinosi svakodnevnom životu i gospodarskoj aktivnosti (poljoprivredi) lokalnog stanovništva. 28. i 29. prosinca 2020. g. (tada) drveni most, ošteto se u potresu te je prometovanje bilo spriječeno. Sanacijom mosta 2023. g. (Slika 4.10.) promet i infrastruktura vratila se u funkciju. Novi sanirani most (Slika 4.11., fotografirano 06.06.2024. g.) sprječava opasnost od daljnjeg urušavanja ustroja mosta i stvaranje pukotina na nosivim stupovima koji su predstavljali opasnost od urušavanja mosta.





*Slika 4.10. Gradnja mosta Lovrentovec [13]*



*Slika 4.11. Novi (izgrađeni) most Lovrentovec [5]*

Također, most osigurava ključnu prometnu vezu za stanovnike Lovrentovca i okolnih naselja, omogućujući pristup obrazovnim ustanovama, zdravstvenim službama, trgovina i sl. Most pomaže u transportu poljoprivrednih proizvoda i drugih dobara, što je od značajne važnosti za lokalno gospodarstvo i omogućava nesmetano kretanje hitnih službi poput vatrogasaca, hitne pomoći i policije.

U proljeće i jesen vodostaj rijeke na ovoj lokaciji je viši te često dolazi do poplava zbog čestih kiša, odnosno naglih vremenskih promjena. Zimi i ljeti to nije slučaj; tada je vodostaj značajno niži.

Na slici 4.12. (fotografirano 07.03.2024. g.) vidi se, lokacija zimi, kad nema većih oborina. Protok je manji, odnosno samim time i brzina je manja. Stanovnici mogu nesmetano obavljati svoje poslove te koristiti most u svrhu prometa. Slučaj izlivanja rijeke iz korita, poplava ili erozija vrlo je rijedak u zimskom periodu.



*Slika 4.12. Most Lovrentovec [5]*

Na slikama 4.13., 4.14. i 4.15. (fotografirano 12.03.2024. g.) vidi se izlivena rijeka iz korita i poplavljeno okolno područje.



*Slika 4.13. Pogled na nizvodnu stranu Bednje [5]*

Na slici 4.14. može se vidjeti da je vodostaj toliko visok da je narastao skoro do mosta/ceste. Protok i brzina Bednje u ovim situacijama su iznimno veliki. Stanovnici su

spriječeni obavljati svoje poljoprivredne poslove, te nekad zbog toga dolazi do izostanka prihoda, smanjene kvalitete života i sl.



*Slika 4.14. Pogled na bočnu stranu Bednje [5]*



*Slika 4.15. Pogled na uzvodnu stranu Bednje [5]*

### **4.3. Terenska istraživanja**

Na ovoj lokaciji obavljeno je mjerenje mjernim uređajem „Flowtracker 2“ (Slika 4.16., fotografirano 13.10.2023. g.) i „Echosounder Echologger EA400“ (Slika 4.22.), kojima su dobiveni potrebni rezultati za proračun hidrauličkih veličina – Froudeov i Reynoldsov broj. „Flowtracker2“ je ručni instrument za mjerenje protoka i brzine vode koji se koristi u hidrološkim istraživanjima i inženjerskim projektima. Koristi ultrazvučnu tehnologiju mjerenja brzine i protoka, što znači da koristi ultrazvučne impulse koji se emitiraju prema vodi i reflektiraju natrag prema uređaju. Kada se uređaj usmjeri prema protoku vode, uređaj emitira ultrazvučni impuls koji putuje kroz vodu, zatim se impuls reflektira natrag na uređaj, a vrijeme potrebno za povratak signala također se mjeri. Na temelju promjene

u vremenu putovanja ultrazvučnog signala, uređaj izračunava brzinu vode. Za izračun protoka vode u vremenu potrebno je izmjeriti dubinu vode – ručno ili automatski, ovisno o postavkama uređaja. Podaci se pohrane na uređaj te se prenose na računalo ili mobilni uređaj radi analize ili daljnje obrade.

Postupak mjerenja ADV-om (Slika 4.17., fotografirano 12.06.2024. g.) sastoji se od:

- obilazak lokacije
- priprema opreme – gumena odijela, mjerni uređaj, drveni štapovi za stabilizaciju hodanja u vodi, sjekira i mačeta za čišćenje mikrolokacije (dno, pokosi vodotoka) od raslinja koje može ometati mjerenje.
- postavljanje mjerne trake za orijentaciju u vodi
- montaža uređaja
- ulazak u vodotok, početak mjerenja
- završetak mjerenja

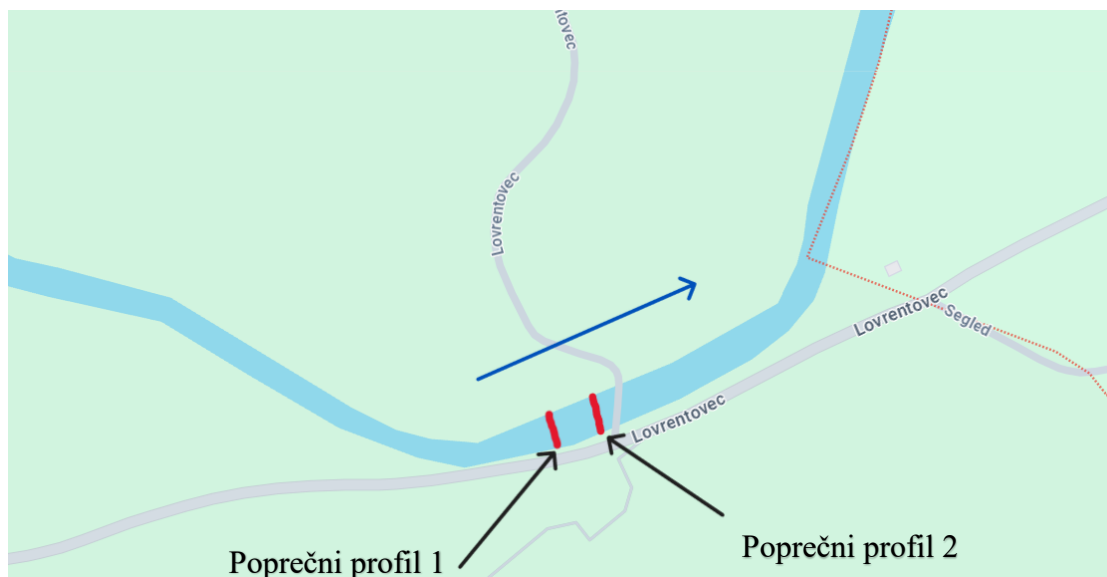


Slika 4.16. Mjerni uređaj „Flowtracker2“ [5]



*Slika 4.17. Mjerenje ADV-om – poprečni profil 1 [5]*

Na slici 4.18. prikazani su položaji mjernih profila.



*Slika 4.18. Položaj mjernih profila [13]*

Mjerenje ADV-om je obavljeno u dva dana, 06.06.2024. g., i 20.06.2024. g., na istim lokacijama, kako bi se dobio veći broj rezultata, čime se omogućava kvalitetnija analiza. Mjerenje poprečnog profila 1 trajalo je 1h i 15 min. Širina poprečnog profila iznosi 14 metara. Od širine poprečnog profila se uzima 1/20 širine kako bi se znalo na koliko točaka

širine se mora napraviti mjerenje. U ovom slučaju bilo je potrebno mjeriti na svakih 0.5 metara, budući da je pravilo struke da je razmak između poprečnih stacionaža 1/20 ukupne širine korita s obzirom na vodno lice.

Rezultati mjerenja 06.06.2024. g. prikazani su u tablici 4.1:

Tablica 4.1. Rezultati mjerenja 06.06.2024. g.

	Ukupna površina	Omočeni obod	Srednja dubina h	Srednja brzina v
Poprečni profil 1	$A=8.735 \text{ m}^2$	$O=14.464 \text{ m}$	$H=0.624 \text{ m}$	$v=0.364 \text{ m/s}$
Poprečni profil 2	$A=6.725 \text{ m}^2$	$O=10.574 \text{ m}$	$H=0.673 \text{ m}$	$v=0.446 \text{ m/s}$

Mjerenje poprečnog profila 2 (Slika 4.19., fotografirano 06.06.2024. g.) trajalo je 1h i 7 min. Širina poprečnog profila iznosi 10 metara. U ovom slučaju bilo je potrebno mjeriti na svakih 0.5 metara.

Rezultati mjerenja 20.06.2024. g. prikazani su u tablici 4.2:

Tablica 4.2. Rezultati mjerenja 20.06.2024.g.

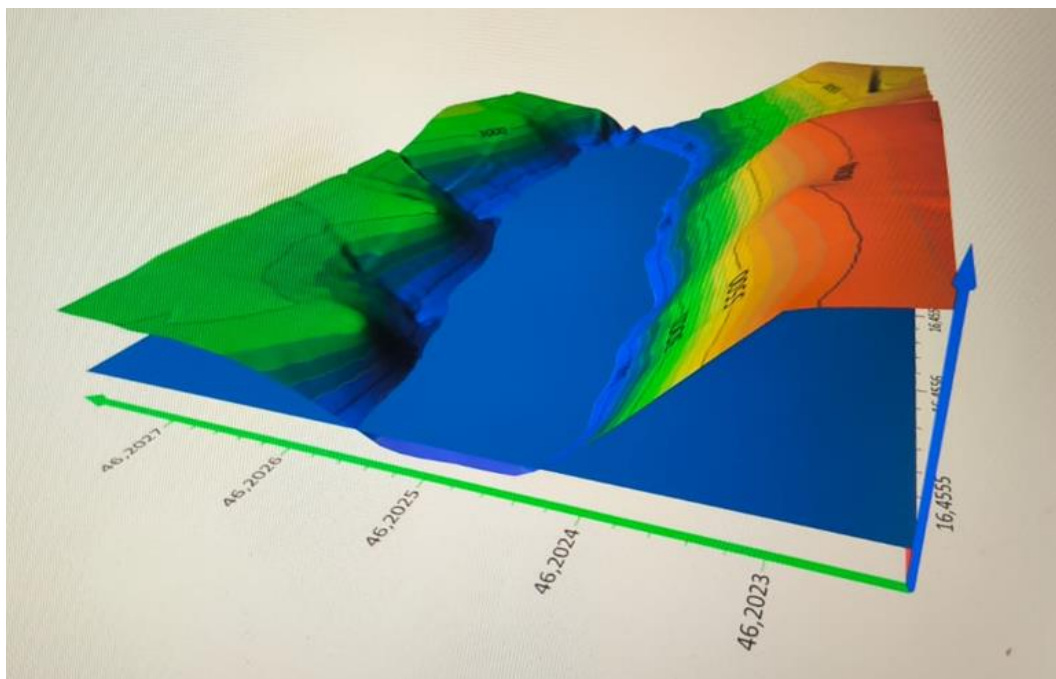
	Ukupna površina	Omočeni obod	Srednja dubina h	Srednja brzina v
Poprečni profil 1	$A=6.2 \text{ m}^2$	$O=10.324 \text{ m}$	$H=0.620 \text{ m}$	$v=0.285 \text{ m/s}$
Poprečni profil 2	$A=6.115 \text{ m}^2$	$O=13.749 \text{ m}$	$H=0.660 \text{ m}$	$v=0.286 \text{ m/s}$





*Slika 4.19. Mjerenje ADV-om – poprečni profil 2 [5]*

„Echosounder Echologger EA400“ (Slika 4.22.) je uređaj koji se koristi za mjerenje dubine vode, kao i za određivanje 2D i 3D karakteristika vodotoka. Koristi zvučni radar za emitiranje zvučnih signala u vodu. Ovi signali se reflektiraju do dna vode ili mora te se detektiraju i mjere vrijeme povratka reflektiranih signala. Na temelju vremena koje je potrebno za povrat reflektiranih signala, uređaj izračunava dubinu vode ili mora. Dubina se može precizno mjeriti čak i u dubokim vodnim tijelima. Grafički prikaz dobivenih rezultata na analiziranoj lokaciji korištenjem „Echosoundera Echologger EA400“ prikazan je na slici 4.21.



*Slika 4.21. Grafički prikaz mjerenja „Echosounderom Echologger EA400“ [10]*

Vidljiv je pravilan i kontinuirani profil korita.

Uređaj cilindričnog oblika postavljen je u zaštitnu plastičnu kutiju kako bi se osigurala stabilnost uređaja i spriječio kontakt sa vodom te omogućilo neometano obavljanje mjerenja.



*Slika 4.22. Mjerni uređaj Echosounder Echologger EA400 [14]*

Postupak mjerenja „Echosounderom Echologgerom EA400“ (Slika 4.23., fotografirano 06.06.2024. g.) sastoji se od:

- obilazak lokacije
- priprema opreme – gumena odijela, mjerni uređaj, drveni štapovi za stabilizaciju hodanja u vodi
- priprema okoliša – uklanjanje vegetacije koje stvaraju smetnje pri kretanju u vodi sjekirom i mačetom
- montaža uređaja
- ulazak u rijeku, početak mjerenja
- završetak mjerenja



*Slika 4.23. Mjerenje Ehosonderom [5]*

Na slici 4.24. (fotografirano 06.06.2024. g.) može se uočiti da je protok rijeke vrlo brz, te na toj nizvodnoj obali nije bilo moguće napraviti mjerenje „Echosonderom Echologgerom EA400“, iz razloga jer nije bilo moguće stajati stabilno u vodi. Provjera

dubine vode na nizvodnoj strani obale pokazala je da je rijeka dvostruko dublja, pa zbog sigurnosnih razloga mjerenje nije započeto.



*Slika 4.24. Lovrentovec – nizvodna strana obale [5]*

#### 4.4. Proračun hidrauličkih veličina

U tablici 4.3. prikazani su rezultati hidrauličkih veličina od mjerenja 06.06.2024. g.

Tablica 4.3. Rezultati hidrauličkih veličina od mjerenja 06.06.2024. g.

	Froudeov broj	Reynoldsov broj
1. mjerenje	0.147	879.297,57
2. mjerenje	0.174	1.134.613,2

Na temelju dobivenih rezultata ADV-om i uvrštavanjem dobivenih podataka u izraz (3.14.) izračunat je Froudeov broj. Za prvo mjerenje izračunat je Froudeov broj od 0.147, a za drugo mjerenje Froudeov broj od 0.174, što ukazuje da je tok miran u oba slučaja, s obzirom na to da je granična vrijednost prijelaza iz mirnog toka u kritičan tok 1.

Uvrštavanjem dobivenih podataka u izraz (3.13.) izračunat je Reynoldsov broj. Za prvo mjerenje izračunat je Reynoldsov broj od 879.297,57, a za drugo mjerenje Reynoldsov broj od 1.134.613,2, što ukazuje na to da je tečenje turbulentno u oba slučaja, s obzirom na to da oba rezultata daleko prelaze graničnu vrijednost prijelaza iz prijelaznog režima tečenja u turbulentni režim (800).

Tablica 4.4. Rezultati hidrauličkih veličina od mjerenja 20.06.2024. g.

	Froudeov broj	Reynoldsov broj
1. mjerenje	0.116	684.618,37
2. mjerenje	0.112	508.805,004

Na temelju dobivenih rezultata ADV-om i uvrštavanjem dobivenih podataka u izraz (3.14.) izračunat je Froudeov broj. Za prvo mjerenje izračunat je Froudeov broj od 0.116, a za drugo mjerenje 0.112, što ukazuje da je tok miran u oba slučaja.

Uvrštavanjem dobivenih podataka u izraz (3.13.) izračunat je Reynoldsov broj. Za prvo mjerenje izračunat je Reynoldsov broj od 684.618,37, a za drugo mjerenje Reynoldsov broj od 508.805,004, što ukazuje da je tečenje turbulentno u oba slučaja.

## 5. Analiza dobivenih rezultata

S obzirom na dobivene rezultate, zaključujemo prema visokim vrijednostima Reynoldsovog broja  $R_e$  da i u sušnom razdoblju vlada turbulentno tečenje, bez obzira što je brzina toka rijeke relativno mala.

Froudeov broj  $F_r$  daje informaciju o brzini toka u odnosu na gravitacijske sile (težina tekućine, potencijalna energija vode), dakle u ovom slučaju su gravitacijske sile veće od inercijskih (sile koje uzrokuju gibanje tekućine), a Reynoldsov broj  $R_e$  daje informaciju o viskoznosti tekućine i omjeru između inercijskih i viskoznih sila. Dakle, u ispitanom području nad brzinom toka vlada gravitacijska sila, a tekućina je slabo viskozna s obzirom na to da je Reynoldsov broj  $R_e$  dosta velik. Na temelju ovih rezultata može se predvidjeti kako će se vodeni tok ponašati u različitim uvjetima, kao što su promjene u protoku, brzini tečenja vode, padalinama ili geometriji korita.

Sa slike 4.12. vidljivo je da kod suženja prije mosta postoje izražena strujanja, no s obzirom da u proračun  $R_e$  i  $F_r$  ulaze srednje brzine, kao i geometrijske karakteristike vodotoka, s obzirom na očekivani siloviti režim tečenja, uspostavilo se da se radi o mirnom režimu tečenja. Mjerenja „Echosouderom Echologgerom EA400“ pokazala su da uzvodni dio Bednje (prije mosta) ima konstantan (nepromjenjiv) poprečni presjek, dok se za nizvodni dio to ne može konstatirati, budući da se nije moglo ući u spomenuti dio vodotoka.

## 6. Zaključak

Zaključuje se da će tečenje rijeke Bednje, uz promjene u protoku kao što su nagle oborine i poplave, i dalje ostati turbulentno, s mogućnošću nastanka silovitog toka tijekom dugotrajnih oborina. Razumijevanje tipa toka pomaže u planiranju mjera za zaštitu od poplava, očuvanje prirodnih resursa, te u projektiranju hidrotehničkih objekata poput mostova, brana i kanala. Dobiveni rezultati pružaju interpretaciju trenutnog stanja, pri čemu ponašanje toka može varirati ovisno o promjenama u protoku, padalinama ili drugim vanjskim utjecajima. Stoga je bitno kontinuirano nadzirati i procjenjivati hidrauličke uvjete kako bi se mogle učinkovito planirati mjere za upravljanje vodnim resursima i zaštitu okoliša, poput izgradnje zaštitnih nasipa, regulacije korita rijeke, sustava za odvodnju oborinskih voda, te postavljanja rješenja za kontrolu erozije i očuvanje prirodnih staništa te kako bi se osigurala sigurnost lokalne zajednice.

Kroz prikupljanje podataka o protoku, analizu terena i primjenu hidrauličkih formula poput Froudeovog broja  $F_r$  i Reynoldsovog broja  $Re$ , istraživanje je dublje sagledalo dinamiku vodnih tokova na ovom području. Odabir lokacije između dviju hidroloških postaja za ovu analizu bio je ključan zbog geografske relevantnosti, variranja protoka, specifičnih hidrauličkih karakteristika i zaštite od poplava.

## 7. Literatura

1. Đurin, B., Autorski materijali za nastavu, Varaždin 2024.
2. Žugaj, R. Hidrologija, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb, 2000.
3. Orešić, D., Hidrogeografija, Voda – strateško dobro 21. stoljeća, [https://www.pmf.unizg.hr/\\_download/repository/Voda\\_stratesko\\_dobro\\_21\\_stoljeca.pdf](https://www.pmf.unizg.hr/_download/repository/Voda_stratesko_dobro_21_stoljeca.pdf)
4. Praktikum iz Hidraulike: [https://www.grad.unizg.hr/\\_download/repository/V01-Nejednoliko\\_tecenje.pdf](https://www.grad.unizg.hr/_download/repository/V01-Nejednoliko_tecenje.pdf), datum pristupa 12.05.2024.
5. Topalović, D., Autorske fotografije od 2023. g. do 2024. g., 2024.
6. Hidraulika:  
[https://www.grad.unizg.hr/\\_download/repository/PREDAVANJA\\_1/PREDAVANJA/h02-tecenje\\_u\\_otvorenim\\_koritima.pdf](https://www.grad.unizg.hr/_download/repository/PREDAVANJA_1/PREDAVANJA/h02-tecenje_u_otvorenim_koritima.pdf), datum pristupa 02.04.2024. g.
7. Počakal, M. (1982.): Hidrografske veličine porječja Bednje. *Geografski glasnik*, vol. 82., no. 44, str. 85-101
8. Karta rijeke Bednje:  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bednja\\_%28rivi%C3%A8re%29.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bednja_%28rivi%C3%A8re%29.png), dostupno 30.05.2024. g.
9. Državni hidrometeorološki zavod – zavod za hidrologiju: <https://hidro.dhz.hr/>, datum pristupa 13.05.2024.
10. Đurin B., Autorske fotografije od 2023. g. do 2024. g., 2024.
11. Yildiz, M. B., Di Nunno, F., Đurin, B., Pham, Q. B., De Marinis G., Granata, F. (2024.): A Combined Seasonal Mann–Kendall and Innovative Approach for the Trend Analysis of Streamflow Rate in Two Croatian Rivers. *Water*, vol. 24, str. 2-12.
12. Wikipedia, [https://hr.wikipedia.org/wiki/Bednja\\_\(rijeka\)](https://hr.wikipedia.org/wiki/Bednja_(rijeka)), datum pristupa 11.7.2024.
13. Google karte:  
[https://www.google.hr/maps/place/42223,+Lovrentovec/@46.2014453,16.4597861,15z/data=!3m1!4b1!4m6!3m5!1s0x4766033a9d82b711:0xdac61ea4cde564d6!8m2!3d46.2053321!4d16.465051!16s%2Fg%2F122cnv1\\_?hl=hr&entry=ttu](https://www.google.hr/maps/place/42223,+Lovrentovec/@46.2014453,16.4597861,15z/data=!3m1!4b1!4m6!3m5!1s0x4766033a9d82b711:0xdac61ea4cde564d6!8m2!3d46.2053321!4d16.465051!16s%2Fg%2F122cnv1_?hl=hr&entry=ttu), datum pristupa 20.05.2024.
14. Echosounder Echologger EA400:  
<https://www.echologger.com/products/autonomous-echosounder>, datum pristupa 11.05.2024.



## Popis slika

Slika 1.1. Hidrološki ciklus [2] .....	4
Slika 1.2. Hidrološka stanica Tuhovec [5].....	12
Slika 1.3. Mjerna letva na lokaciji Tuhovec [5] .....	13
Slika 3.1. Primjer prirodnog vodotoka – rijeka Bednja na lokaciji Lovrentovec [5] .....	17
Slika 3.2. Primjer umjetnog vodotoka – regulirana rijeka Mirna [5] .....	18
Slika 3.3. Krivulja specifične energije za zadani protjecajni presjek i protok [4].....	21
Slika 3.4. Poprečni presjek korita vezan uz sliku 3.3. [4].....	22
Slika 4.1. Tok rijeke Bednje [8].....	23
Slika 4.2. Hidrološka postaja Ključ [10].....	24
Slika 4.3. Nivogram - hidrološka postaja Ključ, 2023. godina [9].....	25
Slika 4.4. Hidrogram - hidrološka postaja Ključ, 2023. godina [9].....	26
Slika 4.5. Hidrološka postaja Tuhovec [5] .....	27
Slika 4.6. Hidrološka postaja Tuhovec [5] .....	28
Slika 4.7. Nivogram - hidrološka postaja Tuhovec [9].....	29
Slika 4.8. Hidrogram – hidrološka postaja Tuhovec [9].....	30
4.9. Položaj mjesta Lovrentovec [13] .....	31
Slika 4.10. Gradnja mosta Lovrentovec [13].....	32
Slika 4.11. Novi (izgrađeni) most Lovrentovec [5] .....	32
Slika 4.12. Most Lovrentovec [5] .....	33
Slika 4.13. Pogled na nizvodnu stranu Bednje [5].....	34
Slika 4.14. Pogled na bočnu stranu Bednje [5].....	35
Slika 4.15. Pogled na uzvodnu stranu Bednje [5].....	36
Slika 4.16. Mjerni uređaj „Flowtracker2“ [5].....	37
Slika 4.17. Mjerenje ADV-om – poprečni profil 1 [5] .....	38
Slika 4.18. Položaj mjernih profila [13] .....	38
Slika 4.19. Mjerenje ADV-om – poprečni profil 2 [5] .....	40
Slika 4.21. Grafički prikaz mjerenja „Echosounderom Echologger EA400“ [10].....	41
Slika 4.22. Mjerni uređaj Echosounder Echologger EA400 [14].....	41
Slika 4.23. Mjerenje Ehosonderom [5].....	42
Slika 4.24. Lovrentovec – nizvodna strana obale [5] .....	43

## **Popis tablica**

Tablica 1.1. Voda na Zemlji

Tablica 1.2. Prosječna godišnja vodna bilanca Zemljine kugle

Tablica 4.1. Rezultati mjerenja 06.06.2024. g.

Tablica 4.2. Rezultati mjerenja 20.06.2024. g.

Tablica 4.3. Rezultati hidrauličkih veličina od mjerenja 06.06.2024. g.

Tablica 4.4. Rezultati hidrauličkih veličina od mjerenja 20.06.2024. g.