

Obrada eksperimentalnog profila brzine za rubne uvjete Q1d1

Zaplatić, Lucija

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:995358>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-29**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,
University of Zagreb](#)





Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Lucija Zaplatić

**OBRADA EKSPERIMENTALNOG PROFILA
BRZINE ZA RUBNE UVJETE Q1d1**

ZAVRŠNI ISPIT

Zagreb, 2024.



Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Lucija Zaplatić

**OBRADA EKSPERIMENTALNOG PROFILA
BRZINE ZA RUBNE UVJETE Q1d1**

ZAVRŠNI ISPIT

Mentori:

Izv.prof.dr.sc. Gordon Gilja

dr. sc. Antonija Harasti

Zagreb, 2024.



University of Zagreb

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Lucija Zaplatić

**ANALYSIS OF FLOW VELOCITY PROFILE FOR
BOUNDARY CONDITIONS Q1d1**

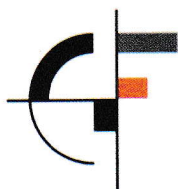
FINAL EXAM

Supervisors:

Assoc. Prof. Gordon Gilja

Antonija Harasti

Zagreb, 2024



OBRAZAC 3

POTVRDA O POZITIVNOJ OCJENI PISANOG DIJELA ZAVRŠNOG ISPITA

Student/ica :

Lucija Zaplatić (Ime i prezime)	0082064565 (JMBAG)
------------------------------------	-----------------------

zadovoljio/la je na pisanom dijelu završnog ispita pod naslovom:

Obrada eksperimentalnog profila brzine za rubne uvjete Q1d1 (Naslov teme završnog ispita na hrvatskom jeziku)
--

Analysis of flow velocity profile for boundary conditions Q1d1 (Naslov teme završnog ispita na engleskom jeziku)

i predlaže se provođenje daljnjeg postupka u skladu s Pravilnikom o završnom ispitu i diplomskom radu Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta.

Pisani dio završnog ispita izrađen je u sklopu znanstvenog projekta: (upisati ako je primjenjivo)

R3PEAT, UIP-2019- 04-4046, izv.prof.dr.sc. Gordon Gilja (Naziv projekta, šifra projekta, voditelj projekta)
--

Pisani dio završnog ispita izrađen je u sklopu stručne prakse na Fakultetu: (upisati ako je primjenjivo)

 (Ime poslodavca, datum početka i kraja stručne prakse)
--

Datum: 21. 8. 2024.

Mentor: izv.prof.dr.sc. Gordon Gilja

Potpis mentora: 

Komentor: dr. sc. Antonija Harasti



Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet



OBRAZAC 5

IZJAVA O IZVORNOSTI RADA

Ja :

LUCIJA ŽAPLATIĆ, 0082064565

(Ime i prezime, JMBAG)

student/ica Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta ovim putem izjavljujem da je moj pisani dio završnog ispita pod naslovom:

OBRADA EKSPERIMENTALNOG PROFILA BRZINE ZA RUBNE UVJETE Q1d1

(Naslov teme završnog ispita na hrvatskom jeziku)

izvorni rezultat mojega rada te da se u izradi istoga nisam koristio/la drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni.

Datum: 26.08.2024

Potpis: Lucija Žaplatić



Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet



OBRAZAC 6

IZJAVA O ODOBRENJU ZA POHRANU I OBJAVU PISANOG DIJELA ZAVRŠNOG ISPITA

Ja:

LUCIJA ZAPLATIO, 59165852519

(Ime i prezime, OIB)

ovom izjavom potvrđujem da sam autor/ica predanog pisanog dijela završnog ispita i da sadržaj predane elektroničke datoteke u potpunosti odgovara sadržaju dovršenog i obranjenog pisanog dijela završnog ispita pod naslovom:

OBRAĐA EKSPERIMENTALNOG PROFILA BRZINE ZA RUBNE UVJETE Q1d1

(Naslov teme završnog ispita na hrvatskom jeziku)

koji je izrađen na sveučilišnom prijediplomskom studiju Građevinarstvo Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta pod mentorstvom:

IZV.PROF.DR.SC. GORDON GILJA

(Ime i prezime mentora)

i obranjen dana:

03.09.2024.

(Datum obrane)

Suglasan/suglasna sam da pisani dio završnog ispita bude javno dostupan, te da se trajno pohrani u digitalnom repozitoriju Građevinskog fakulteta, repozitoriju Sveučilišta u Zagrebu te nacionalnom repozitoriju.

Datum:

26.08.2024.

Potpis:

Lucija Zaplatić

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentoru izv.prof.dr.sc. Gordonu Gilji, koji je pomogao u izradi ovog završnog rad, na objašnjenju istraživanja, danim savjetima i komentarima koji su bili od velike važnosti za ovaj rad te asistentu mag.ing,aedif. Robertu Fliszaru na pojašnjenju eksperimenta te laboratorijskim mjerenjima. Ovaj rad je sufinancirala Hrvatska zaklada za znanost projektom R3PEAT (UIP-2019-04-4046). Zahvaljujem se i njima zbog preuzetih podataka o brzini.

SAŽETAK

U sklopu ovog rada trebalo je analizirati podatke o profilu brzine snimljene Vectrino Profilerom tijekom eksperimenta u hidrauličkom kanalu. Istraživanja se provode u sklopu projekta R3PEAT. Obuhvaćaju mjerenja profila brzine pri protoku $Q1$ (30 l/s) i dubini toka $d1$ (30 cm). Zadatak je prikazati profil brzine kroz sve 3 komponente (u , v , w) te turbulentne karakteristike toka (Reynoldsovo naprezanje i turbulentnu kinetičku energiju).

Ključne riječi: hidraulički kanal, R3PEAT projekt, turbulencija, podlokavanje mosta, profil brzine, Vectrino Profiler

SUMARRY

As part of this work, it was necessary to analyze the velocity profile data recorded by the Vectrino Profiler during the experiment in the hydraulic channel. Research is carried out as part of the R3PEAT project. They include velocity profile measurements at flow rate $Q1$ (30 l/s) and flow depth $d1$ (30 cm). The task is to show the velocity profile trough all 3 components (u , v , w) and turbulent flow characteristics (Reynolds stress and turbulent kinetic energy).

Keywords: hydraulic flume, R3PEAT project, turbulence, bridge scour, velocity profile, Vectrino Profiler

SADRŽAJ

ZAHVALE.....	i
SAŽETAK.....	ii
SUMARRY.....	iii
SADRŽAJ.....	iv
1. UVOD.....	1
2. PODLOGE.....	4
2.1. Morfologija korita	4
2.2. Protok	5
2.3. Reynoldsovo posmično naprezanje i turbulentna kinetička energija	5
2.4. Vectrino	7
2.5. Obrađivanje podataka iz laboratorija.....	8
3. PREGLED STANJA ZNANJA.....	10
3.1. Zaštita stupova mosta na rijeci Nakdong.....	10
3.2. Laboratorijsko istraživanje podlokavanja oko pera	13
3.3. Istraživanje podlokavanja oko stupova mostova na rijeci Mississippi	14
4. REZULTATI.....	16
4.1. Opis rezultata.....	16
4.2. Diskusija	27
5. ZAKLJUČAK.....	29
POPIS LITERATURE.....	30
POPIS SLIKA.....	32

1. UVOD

U današnje vrijeme se, uz suvremenu tehnologiju koja uvelike pridonosi istraživanjima, pokušava na razne načine spriječiti šteta i omogućiti čim duže trajanje neke građevine. Veliku ulogu u nastanku šteta ima porast učestalosti pojavljivanja ekstremnih klimatskih događaja potaknutih klimatskim promjenama. Kroz prošlost ima dosta slučajeva hidrotehničkih građevina koje su izgubile stabilnost zbog utjecaja vodotoka, tj. poplava koje uzrokuju promjene u riječnom koritu, a pretežno djeluju na donju konstrukciju mosta zbog čega građevina gubi svoju sigurnost.

Ključnu ulogu u oblikovanju krajolika te značajan utjecaj okoliš ima erozija. To je proces pomicanja krutih stvari djelovanjem prirodnih sila [1]. Tipovi mogu biti: eolska, glacijalna, gravitacijska i vodena koja je posebno bitna za ovaj rad. Varijanta vodene erozije može biti erozija riječnim tokom gdje rijeke erodiraju svoje korite i obale prenoseći sediment nizvodno. Posljedice do kojih dolazi su: poplave, oštećenje infrastrukture, sedimentacija i dr.

Pod specifičnu vrstu erozije spada podlokavanje. Podlokavanje između stupova se dijeli na opće, kontrakcijsko i lokalno podlokavanje [2]. Opće predstavlja degradaciju i agradaciju riječnog korita. Kontrakcijsko je posljedica građenja hidrotehničkih građevina duž vodnih tokova, a nastaje zbog smanjenja poprečnog presjeka korita. U temeljima mosta se javlja lokalno podlokavanje. Ima 2 tipa, a to su: podlokavanje djelovanjem bistre vode i podlokavanje djelovanjem vode zamućene vučenim nanosom. Podlokavanjem temelja mosta se smatra kad voda koja teče ispod temelja može uzrokovati uklanjanje materijala i stvaranje šupljina što može dovesti do urušavanja mosta. Varira ovisno o rasporedu stupova i upornjaka mosta te o karakteristikama i obliku toka. Uzroci podlokavanja su brzina protoka vode, promjene u toku rijeke, turbulencija, poplave i materijal temelja. Veće brzine protoka povećavaju erozivnu moć vode, dok promjene u toku rijeke mogu preusmjeriti vodu k temeljima mosta i tako povećati rizik od podlokavanja. Kod turbulencije, voda nailazi na stupove mosta i može doći do stvaranja vrtloga koji povećavaju erozivnu moć vode, a kod poplava je za to zaslužan povećani protok vode i sedimenta. Temelji koji su izgrađeni na pijesku ili šljunku su podložniji navedenom problemu od onih koji su na čvrstom materijalu. Određivanje dubine podlokavanja mosta bitno je za planiranje mjera zaštite i sanacije za dugoročnu stabilnost i sigurnost mosta. Pouzdani podaci mogu se dobiti direktnim mjerenjem na terenu ili laboratorijskim simulacijama na modelu umanjenog mjerila.

Na temelju navedenih problema, u nastavku će biti opisana samo dva od brojnih primjera u Hrvatskoj gdje je došlo do gubitka stabilnosti mosta, a to su: Željeznički most Jakuševac (Slika 1) i most Đurmanec (Slika 2). Kod Jakuševca je zbog visokog vodostaja došlo do popuštanja potpornog stupa u koritu te je kolosijek ulegnut za 1,5 m [3]. Nakon havarije vršilo se snimanje poprečnog profila korita rijeke i brzine protoka, geodetsko praćenje ponašanja stupa te sanacija dna nasipavanjem kamenja oko stupova. Kod Đurmanca je za vrijeme velikovodnog događaja došlo do erodiranja obale uz upornjak mosta [4]. Na eroziju obale utjecao je i plutajući nanos koji se je nagomilao na središnjem otvoru mosta te onemogućio protok kroz taj raspon i usmjerio ga u desni gdje je došlo do erozije što je rezultiralo naginjanjem upornjaka. Značaj za ovu situaciju predstavlja i nagli zavoj rijeke koji nepovoljno djeluje na režim voda i nanosa.



Slika 1.: Željeznički most Jakuševac (Izvor: [3])



Slika 2.: Most Đurmanec (Izvor : [4])

Eksperiment ovog rada se sastoji od cijevi koja se nalazi u hidrauličkom kanalu te stimulira stup mosta, a oko stupa je kameni nabačaj koji služi kao zaštita od podlokavanja, tj. da se ne bi stvorila rupa i naštetila statici. Potrebno je bilo analizirati podatke o profilu brzine tijekom eksperimenta u hidrauličkom kanalu. Točnije, trebalo je prikazati profil brzine te turbulentne karakteristike toka.

Cilj rada je analiza podataka o profilu brzine vodotoka snimljenih tijekom eksperimenta u hidrauličkom kanalu. Na temelju tih podataka ispitat će se veza između karakteristika toka i pokretnog materijala na dnu korita. Zanima nas kako se, zbog položaja stupa, ostvari turbulencija u okolini i opasnost kad dođe do podlokavanja te što se događa kad se promjeni protok i brzina toka.

2. PODLOGE

2.1. Morfologija korita

Korito je dio riječnog sustava gdje voda teče, a obuhvaća njegov oblik, strukturu i fizičke karakteristike. Morfologija korita proučava te karakteristike i njihove promjene tijekom vremena pod utjecajem prirodnih i antropogenih faktora. Neki od ključnih aspekata su: oblik korita, profil korita, sedimentacija, struktura dna korita i hidraulički režimi. Oblik korita može biti ravan, gdje je ono ravno i linearno te se nalazi u gornjim tokovima planinskih rijeka. Zatim meandrirajuće, gdje je korito ima izražene zavoje i krivine koje se formiraju zbog erozije vanjskih dijelova zavoja i taloženja sedimenta na unutarnjim dijelovima i razgranato koje je sastavljeno od više isprepletenih kanala. Profil korita je uzdužni i poprečni. Uzdužni profil prikazuje promjene visine korita od izvora do ušća rijeke, a poprečni presjek korita rijeke na određenoj točki. Sedimentacija je proces taloženja čestica tla i stijena na dno korita, što može promijeniti njegovu dubinu i oblik. Izvorom sedimenta se pretežno smatraju erozija tla i obala. Sedimenti se talože sloj po sloj, pri čemu se najteže čestice talože prve, a one lakše kasnije. Tipovi mogu biti različiti kao što su: pijesak, šljunak, glina i mulj te organski sediment. Nakupljanje tih čestica može smanjiti kapacitet korita rijeke i tako povećati rizik od poplava. Struktura dna korita uključuje navedene sedimente, a utječe na hidrauličke karakteristike protoka vode. Pod hidrauličke režime spadaju: protok, brzina, dubina i volumen vode koji su ključni za razumijevanje dinamike korita.

Stabilnost korita je bitan pojam kod rijeka koji se odnosi na otpornost korita rijeke na promjene i eroziju pod djelovanjem vode. Stabilno korito održava svoj oblik i položaj kroz vrijeme bez velikih deformacija ili pomjeranja materijala. Nailazimo na dva tipa problema kada je riječ o stabilnosti korita, a to je narušavanje globalne i lokalne stabilnosti korita [5]. Globalna nestabilnost korita nastaje kada zbog erozijske sposobnosti vodenog toka cjelokupni profil vodotoka počne erodirati. Lokalna nestabilnost korita nastaje uslijed izgradnje građevina u koritu vodotoka koja remete režim strujanja, uslijed naglih promjena geometrije korita uzduž toka i uslijed pojave valova. Oko stupova i upornjaka mosta događa se lokalna erozija i to zbog produljenja strujnica koje se orijentiraju na rubove građevine te nastanka vrtloga gdje dolazi do povećanja brzine što utječe na promjenu posmičnih naprezanja.

2.2. Protok

Protok vode (Q) predstavlja količinu vode koja prolazi kroz određeni presjek riječnog korita ili kanala u određenom vremenskom razdoblju [6]. Mjerna jedinica je metar kubni po sekundi (m^3/s) ili litra po sekundi (l/s), a osnovna formula za protok je:

$$Q = A \cdot v \quad (1)$$

Gdje je:

Q – protok [m^3/s]

A – poprečna površina presjeka korita [m^2]

v – prosječna brzina vode [m/s]

Padaline su jedan od faktora čija količina i intenzitet izravno utječu na protok vode u rijekama. Što su one veće i intenzivnije, to je veći i protok. Topografija, odnosno nagib terena i oblik sliva, utječu na brzinu kojom voda teče prema riječnim koritima. Strmiji nagibi znače brzi protok. Propusnost tla također je jedan od faktora. Propusna tla smanjuju površinski protok, a nepropusna povećavaju.

Protok vode nosi čestice tla i stijena te na taj način uzrokuje eroziju obala i korita te sedimentaciju nizvodno. Oni visoki mogu uzrokovati zamućenost vode, a niski mogu smanjiti kapacitet razrjeđivanja i pročišćavanja vode. Podaci o protoku vode pomažu kod dizajna i upravljanja branama, kanalima, nasipima i drugih struktura.

Regulacijom rijeka, tj. gradnjom brana i akumulacija kontrolira se protok. Njihova zadaća je sprječavanje poplava i osiguranje vodoopskrbe. Zaštita obala služi za sprječavanje erozije obala i očuvanje korita rijeka. Još jedna opcija je sustav odvodnje za kontrolu površinskog otjecanja i smanjenja rizika od poplava.

2.3. Reynoldsovo posmično naprezanje i turbulentna kinetička energija

Bilo koje svojstvo tekućine je funkcija prostora i vremena kao što su gustoća, tlak, temperatura pa tako i vektor brzine koji je bitan za ovaj rad. Vektor se raščlani na u , v i w komponentu brzine u x , y i z smjeru. Komponenta "u" je u smjeru toka, "v" poprečna i "w" vertikalna. Na slici je prikazana Reynolds-ova dekompozicija stvarne brzine (Slika 3) $u(t)$ u nekom trenutku na stacionarnu srednju vrijednost brzine U i fluktuirajuću komponentu $u'(t)$ te vrijedi [7]:

$$u(t) = U + u'(t) \quad (2)$$

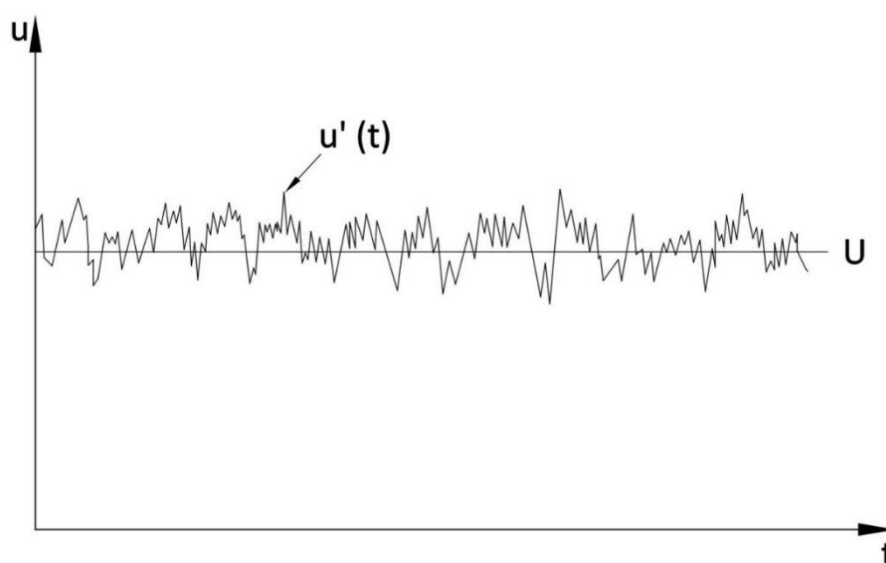
Gdje su:

$u(t)$ – stvarna brzina [m/s]

U – srednja brzina [m/s]

$u'(t)$ – fluktuirajuća komponenta brzine [m/s]

Na taj način se označavaju i ostali parametri toka, u smislu srednjih vrijednosti kao što su U, V, W i neke statističke karakteristike fluktuirajuće komponente: u', v', w' .



Slika 3.: Reynoldsova kompozicija stvarne brzine (Izvor: [7])

Turbulentnim se naziva režim strujanja gdje brzina i ostali parametri toka variraju kaotično i slučajno. Takvo kretanje je nestacionarno i kod uspostavljenih konstantnih rubnih uvjeta. Pojavljuje se u tekućinama kao nepravilno vrtložno gibanje. Za nastanak turbulencije potrebna je nestabilnost i mehanizam pokretanja nestabilnosti. Na takvu situaciju možemo naići kod riječnog mosta koja može dovesti do nepoželjnih slučajeva. Turbulencija iskopava čestice materijala, šalje ih nizvodno te produbljuje korito što dovodi do smanjenja sigurnosti stupa ili da stup ostane u zraku odnosno dolazi do podlokavanja pod temeljem. Pomoću vizualizacije turbulentnog strujanja potvrđeno je postojanje vrtloga. Čestice koje prostorno razmještene na velikoj udaljenosti, vrtložnim gibanjem se mogu potpuno približiti, a i udaljiti. To prikazuje na prisutnost mehanizma izmjene topline, mase ili količine gibanja. Najveći turbulentni vrtlozi ekstrahiraju energiju iz "osrednjenog" toka kroz proces

vrtiložno rastezanje. Kod prisutnosti gradijenta u profilima brzina osrednjenog strujanja, vrtlozi se deformiraju zbog prisile na brže gibanje jednog dijela vrtloga od drugog. Manji vrtlozi su intenzivno deformirani od strane većih vrtloga i manje intenzivno od strane osrednjenog strujanja. Na taj način se kinetička energija velikih vrtloga predaje na manje vrtloge. Mjere turbulencije su Reynoldsovo posmično naprezanje i turbulentna kinetička energija.

Reynoldsovo posmično naprezanje (RSS) možemo definirati kao silu po jedinici površine. To je dodatno naprezanje koje nastaje zbog turbulencije unutar tekućine. Pojavljuje se kao rezultat interakcije između molekula fluida koje se kreću na različitim brzinama i u različitim pravcima. U turbulentnom toku, brzine fluida variraju u prostoru i vremenu te njihove fluktuacije generiraju navedena naprezanja. Ta naprezanja su ključna u analizi turbulentnog toka jer utječu na raspodjelu momenta, energije i drugih svojstava unutar fluida. Dobiva se formulom:

$$RSS_{u,w} = \overline{u \cdot w'} \quad (3)$$

$$RSS_{v,w} = \overline{v \cdot w'} \quad (4)$$

Gdje je:

u', v', w' - turbulentne fluktuacije pojedine komponente brzine [m/s]

Turbulentna kinetička energija (TKE) je energija koja se objašnjava kao količina gibanja po jedinici mase povezane s turbulentnim gibanjima. Pratimo gdje je ta količina najveća. TKE je direktno povezana uz transport količine gibanja i topline. Mjera je inteziteta turbulencije:

$$TKE = 0,5 (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (5)$$

Gdje je:

u', v', w' - turbulentne fluktuacije pojedine komponente brzine [m/s]

2.4. Vectrino

U prikupljanju podataka, glavnu ulogu ima uređaj za mjerenje protoka Acustic dopler velocity Profiler (ADVP) ili Vectrino (Slika 4). Koristi se za mjerenje brzine vode u 3 dimenzije (x, y, z). Sastoji se od 4 akustična pretvornika i senzora u obliku valjka radijusa 6 mm i visine 1 mm koji odašilje signal. Koristi Doppler efekt, tj. uređaj emitira zvučni signal koji se odbija od čestica u vodi. Pomak frekvencije između emitiranog i reflektiranog signala koristi se za izračun brzine čestica. Maksimalno može izmjeriti stupac od 3 cm koji se sastoji od ćelija iznosa 1 mm, tj. jedan stupac ima 30 ćelija. Postoji i ograničenje, a to je da uređaj ne može prikupiti prostorno puno podataka jer je osjetljiv (u 1 s prikupi se 100

podataka frekvencijom od 100 Hz). Mjerenja su napravljena za rubne uvjete kombinirajući dvije brzine protoka ($Q_1 = 30 \text{ L/s}$ i $Q_2 = 50 \text{ L/s}$) i dvije dubine protoka ($d_1 = 30 \text{ cm}$ i $d_2 = 20 \text{ cm}$) [9].



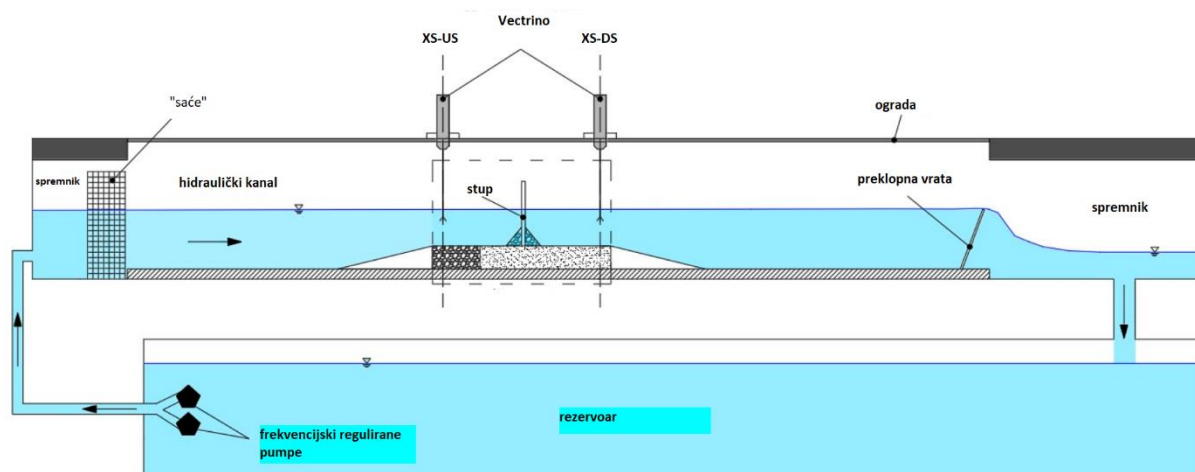
Slika 4.: Vectrino uređaj u laboratoriju (Autor: Lucija Zaplatić)

Prednosti ovog uređaja su velika preciznost u mjerenju brzine protoka, detaljni podaci o turbulentnosti vezane za transport sedimenta i trodimenzionalnim brzinama te je pouzdan i izdržljiv pa se može koristiti u raznim uvjetima. Specijalizirani softver dolazi s uređajem te omogućuje konfiguraciju uređaja, praćenje mjerenja u stvarnom vremenu i analizu prikupljenih podataka. Pruža mogućnosti za vizualizaciju podataka i izvođenje naprednih analiza. Eksperiment ovog završnog rada u sklopu je projekta R3PEAT – “Remote Real-time Riprap Protection Erosion Assessment on large rivers”. To je projekt Hrvatske zaklade za znanost financiran u okviru programa “Instalacijski istraživački projekti”. Obuhvaća laboratorijska mjerenja profila brzine pri određenom protoku i dubini toka.

2.5. Obradivanje podataka iz laboratorija

Podaci su dobiveni iz laboratorija pomoću Vectrina koji daje podatke profila brzine. Tamo je izrađen hidraulički kanal (Slika 5) dužine 18 m, širine i dubine od 0,9 m [9]. Dno kanala

obloženo je betonom, a bočne stijenke su izrađene od stakla. Radna površina koju promatramo duga je 3 m, široka 0,4 m te duboka 0,8 m i ima jedan stup koji predstavlja stup mosta. Postoje 2 ADVP mjerenja, a to su nizvodno i uzvodno .



Slika 5.: Shema hidrauličkog kanala (Izvor: [8])

Obrađuje se jedna mjerna točka za 5 različitih protoka ($Q_1 = 5 \text{ l/s}$, $Q_2 = 10 \text{ l/s}$, $Q_3 = 15 \text{ l/s}$, $Q_4 = 30 \text{ l/s}$, $Q_5 = 40 \text{ l/s}$). Ona sadrži 30 mjernih ćelija veličine 1 mm, tj. zapis je profil brzine veličine 3 cm. Mjerenje ćelije traje 12 min odnosno 720 s dok frekvencija uređaja iznosi 100 Hz što nam daje 100 podataka o brzini u 1 s. Za svaku ćeliju je dobiveno otprilike 72000 zapisa. Uz 3 komponente brzine (u , v , w) za mjernu točku potrebno je proračunati mjere turbulencije. Rubni uvjeti su $Q_1 d^1$.

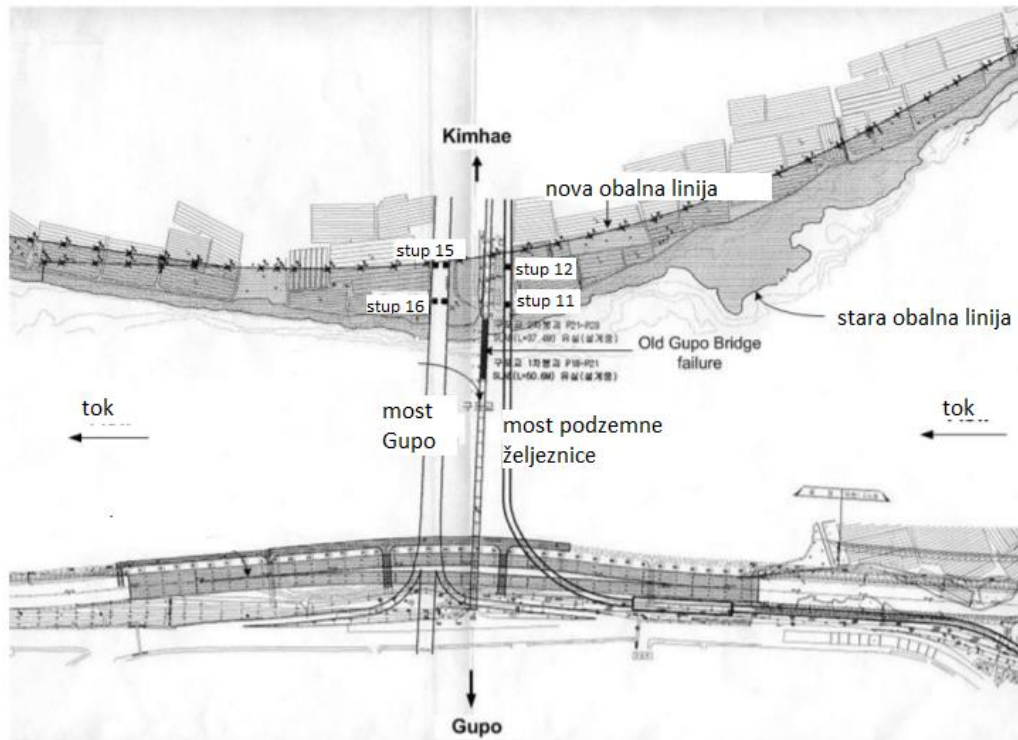
3. PREGLED STANJA ZNANJA

Problem podlokavanja oko stupova mosta potaknuo je stručnjake na izvođenje raznih istraživanja koja mogu biti laboratorijska ili terenska. Kod laboratorijskih eksperimenata koriste se fizički modeli za simulaciju podlokavanja gdje su omogućeni kontrolirani uvjeti u kojima se mogu proučavati razni faktori koji utječu na naveden problem. Dosta često se izvode u hidrauličkom kanalu koji je izrađen u umanjenom mjerilu. Neke od komponenti kanala su struktura, sistem za protok vode i instrumentacija. Struktura označava dimenzije, tj. koliko je kanal dug, širok i dubok ovisno o opsegu istraživanja i materijal koji omogućava vizualno praćenje. Za protok vode koriste se pumpe i rezervoari kojima se kontrolira protok i brzina vode. Također se sastoji od ventila i mjerača protoka postavljenih duž kanala. Od instrumentacije se koriste senzori i kamere. Terenski eksperimenti se provode na stvarnim lokacijama kako bi se procijenili uvjeti podlokavanja u realnom okruženju.

Cilj ovih istraživanja je razvoj efikasnih metoda za predviđanje, prevenciju i sanaciju podlokavanja kako bi se osigurala dugoročna stabilnost i sigurnost objekta. Postoji mnogo slučajeva rušenja mosta podlokavanjem, gdje za iste ima navedene poduzete mjere, na temelju kojih se dolazi do empirijskih jednadžbi koje kasnije služe za usporedbu metoda za izračun podlokavanja [10]. One se temelje na eksperimentalnim podacima te se koriste za opisivanje odnosa između različitih faktora koji utječu na ovaj problem. Često zavise o uvjetima eksperimenta pa njihova točnost može varirati u različitim okruženjima pa je poželjno da se kombiniraju s terenskim podacima i numeričkim modelima kako bi se dobili što pouzdaniji rezultati. U nastavku slijedi prikaz par slučajeva navedenog problema.

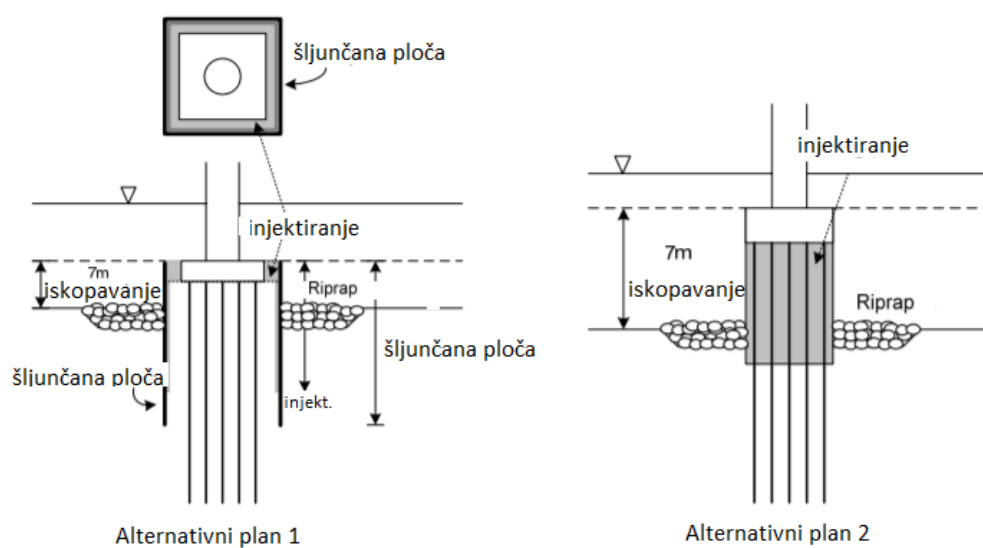
3.1. Zaštita stupova mosta na rijeci Nakdong

Julien, Ruff i Ji proveli su istraživanje u potrazi za najboljim načinom za zaštitu stupova mosta na rijeci Nakdong, tj sigurnim rješenjem za naknadnom ugradnjom stupova mosta. Cilj istraživanja je izračunati dubinu podlokavanja te širinu otvora oko stupa uzrokovanu navedenim problemom i provesti 3 alternativna načina za sprječavanje rušenja mosta te ispitati svaki od tih načina kako bi se pronašao najizvediviji plan [11]. Na slici su prikazani stupovi za koje se nalazilo rješenje (Slika 6).



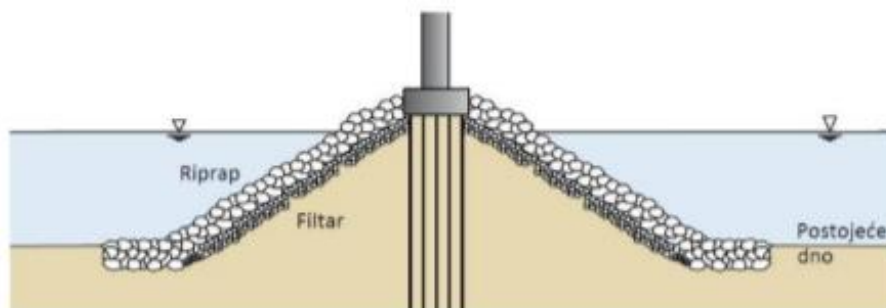
Slika 6.: Područje mosta Gupo i mosta podzemne željeznice (Izvor: [11])

Koristile su se empirijske jednadžbe za izračun podlokavanja u hidrauličkim uvjetima: Laursen, Neill, Melville i dr.. Prvi alternativni plan koristi šljunčanu ploču i riprap za zaštitu stupova, a drugi je metoda zidnog kesona injektiranjem izloženog dijela ispod originalnog temelja (Slika 7).



Slika 7.: Predložena 2 alternativna plana (Izvor: [11])

Plan 1 je proglašen jako dobro izvedivim za stupove navedenih mostova. Prednosti su da nije izložen te nema ugroze potpornih pilota ispod temelja što kazuje na jaku stabilnost i povoljan je za plovidbu. Također je i vrijedan dobitak u kapacitetu podnošenja poplava. Loša strana je mogućnost manjeg poremećaja i slijeganja terena te izvedba može biti skupa. Plan 2 se nije pokazao najboljim rješenjem zbog slabe stabilnosti radi izlaganja te ugrožavanja potpornih stupova i stvaranja dodatnog opterećenja na potporne pilote zbog kesona. Prednosti su što ne zahtjeva dodatne strukture, najprikladniji je za plovidbu i jednostavna izrada zidnog kesona. Na kraju je eliminiran iz daljnjeg promatranja zbog moguće nestabilnosti tijekom izgradnje. Posljednja od alternativnih metoda zaštite od erozije uzrokovanu strujom vode bila je konusni riprap (Slika 8).



Slika 8.: Predloženi 3. alternativni plan (Izvor:[10])

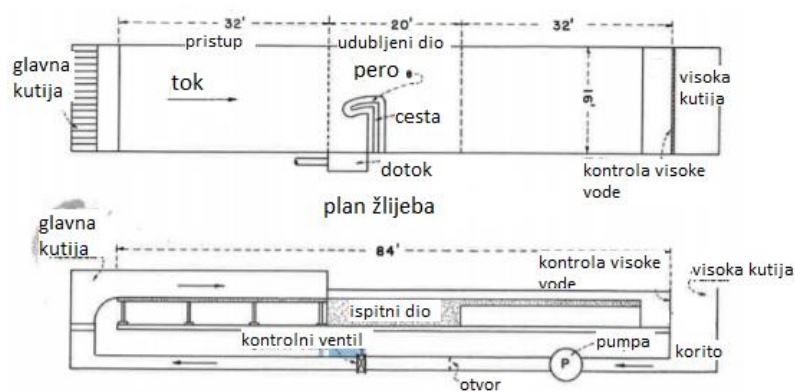
To je specifična metoda postavljanja kamena u konusni oblik oko stupova mosta. Neke od prednosti su da takav oblik pomaže u ravnomjernom raspoređivanju sila, smanjenje stvaranja vrtložnih struja oko stupova te zbog vlastite težine je povećana stabilnost. Kako bi ga proračunali, koristili su metode posmičnih naprezanja. Na ovaj način je osigurana stabilnost stupova jer potporni piloti nisu bili oštećeni za vrijeme naknadne ugradnje. Plan se smatra ekonomičnim i stabilnim, ali njegov dizajn bi mogao uzrokovati probleme u plovidbi. Uz to ima jednostavnu konstrukciju i lak je popravak šteta. Nedostatak je erozija čestica za vrijeme poplava te spuštanje i klizanje riprapa.

Za konačan projekt usvojena je modificirana verzija posljednjeg plana. Dugoročno rješenje problema podlokavanja nije samo u odabiru veličine blokova riprapa nego je potrebno proučiti njegov prostorni raspored i utjecaj na širi potez korita. Bitan zaključak ovog istraživanja je da je moguća naknadna ugradnja stupova mosta. Detaljne procjene dubine i širine podlokavanja oko stupova sa zaštitom od riprapa i filtera dobivene su i uspoređene s eksperimentalnim laboratorijskim studijima za plan 1.

3.2. Laboratorijsko istraživanje podlokavanja oko pera

Pošto postoji dosta istraživanja kojima su se utvrdile jednadžbe podlokavanja, uočen je nedostatak jednadžbi koja obrađuju podlokavanje oko riprapa. Detaljna istraživanja podlokavanja pera, koja se izvode od kamenog nabačaja, većinom su izvedena na fizičkim modelima zbog otežanih terenskih mjerenja za vrijeme velikih voda. Među prvima je Susumu Karaki proveo laboratorijsko istraživanje kako bi utvrdio zaštitu za upornjake mosta od opasnosti podlokavanja stupova te određivanje odnosa između drugačijih geometrijskih parametra. Podlokavanje oko stupova je uglavnom uzrokovano koncentracijama protoka i turbulencijama. Te koncentracije se mogu smanjiti tako da se pojednostavi pristup otvoru mosta izradom pera. Pero služi za ispravno usmjeravanje toka te zaštitu temelja od podlokavanja sprječavanjem stvaranja vrtloga i turbulencija te smanjenjem velikih brzina [12].

Istraživanje je provedeno u dvije faze. U prvoj fazi se određivalo učinkovitost pera te njegova lokacija i oblik dok se u drugoj određivala duljina pera na određenoj lokaciji. Istraživanje je provedeno u modelu kanala (Slika 9) duljine 26 m i širine oko 5 m. Imao je 2 žljeba, a svaki od njih je bio dug oko 10 m te je postojao dio koji ih je odvajao dubine oko 1,2 m i duljine oko 6 m. Uloga tog dijela je bila osiguranje dubine čišćenja na ispitanom dijelu. Dno kanala je bilo prožeto pijeskom kako bi se formiralo erozivno korito. Mjerenje brzine u kanalu je izvedeno Pitotovom cijevi te su napravljene prilagodbe u glavnoj kutiji tako da se dobila jednolika raspodjela protoka preko širine žlijeba.



Slika 9.: Shematski prikaz opreme (Izvor: [12])

Kod prve faze rupa od podlokavanja uzrokovana je velikim brzinama koje razvijaju sile veće nego što materijal na dnu može izdržati. Kad je pero pomaknuto od upornjaka dolazi do

sve većeg podlokavanja, a kada je dovoljno pomaknuto formiraju se dvije rupe podlokavanja i to na upornjaku te vrhu pera. Testom se utvrdilo da je najučinkovitiji položaj pera na upornjaku. Kada je kanal sužen kolnikom, zapriječeni tok mora teći oko suženja. Zakrivljeno pero je zato bolje za razvoj strujnice od ravnog. Što je oblik pera bliži kružnom obliku, dolazi do povećanja dubine podlokavanja.

Kako bi pero izvršavalo funkcije za koje služi, bitni su oblik, mjesto i njegova duljina. Ispitivanja u prvoj fazi su značajna za ispitivanje duljine pera u drugoj fazi. Kad se duljina pera povećava dolazi do povećanja širine širenja koncentriranog toka. Tako se dolazi do smanjenih brzina što je rezultat manjih dubina podlokavanja. Pera napravljena od zemljanog nasipa zahtijevaju riprapp zaštitu kako bi se spriječilo podlokavanje. Ovom fazom se pokazalo da je riprapp potreban od glave pa do polovice duljine pera s prednje strane dok je sa stražnje dovoljna četvrtina.

Ova studija je pokazala da je ona samo početak o istraživanju pera te da je potrebno izvesti mnogo dodatnih istraživanja kako bi se došlo do boljeg razumijevanja ovog problema i tako uspostavili bolji kriteriji za dizajn. Nadalje da pera imaju dobru učinkovitost za sprječavanje podlokavanja na upornjacima mosta te da su zakrivljena pera bolji od ravnih radi lakšeg usmjeravanja toka.

3.3. Istraživanje podlokavanja oko stupova mostova na rijeci Mississippi

Kako bi se predstavila tehnologija terenskog mjerenja i odabrala metodologija koja je bila bitna za obradu podatka, provodilo se veliko terensko mjerenje koje bi omogućilo provjeru fizičkog modela umanjelog mjerila. Za terensko mjerenje upotrijebiti će se istraživanje u saveznoj državi Mississippi koje ima podatke o podlokavanju stupova na 22 odabrana mosta tijekom 1938. - 1994. godine [13].

Podlokavanje oko stupova može biti rezultat bilo koje od 3 sljedeće navedenih komponenta ili njihovih kombinacija. Prva je lokalno podlokavanje gdje je erozija uzrokovana lokalnim poremećajima u protoku kao što su vrtlozi. Druga je podlokavanje suženja gdje je erozija uzrokovana povećanom brzinom toka kroz otvore mosta. Posljednja je općenito podlokavanje gdje je progresivna degradacija uzrokovana prirodnim procesima. Praksa u projektiranju mosta je procijeniti svaku navedenu komponentu posebno i kombinirati predviđene dubine podlokavanja za procjenu ukupne dubine podlokavanja. Većina tih jednadžbi se temelji na laboratorijskim istraživanjima i nisu provjereni na terenu zbog nedostatka podataka o velikom protoku. Ciljevi ove studije su: izvesti mjerenja podlokavanja visokog protoka na odabranim mjestima na licu mjesta, procjena korisnosti

jednadžbe podlokavanja za procjenu lokalnih podlokavanja te razviti predviđanje iste jednadžbe koja bi se koristila za bolju procjenu lokalnog podlokavanja.

Istraživanjem su opisane metode za mjerenje podlokavanja te hidraulične i geometrijske karakteristike mosta na svakom mjestu. Terensko mjerenje može dati pouzdane podatke, ako se mjeri za vrijeme velikog vodenog vala kada se dolazi do maksimalnih dimenzija. Mjerenja su se izvodila napravama koje su bile pričvršćene za čamac. Takva mjerenja u uvjetima gdje se stvaraju vrtlozi oko stupova je izuzetno opasno pa je potrebno osmisliti alternativne tehnike bilježenja podataka npr. na način da se mjerni instrumenti pričvrste za stup. Dubine podlokavanja uzvodno i nizvodno uspoređivale su se za svaki stup te je maksimalna dubina prikazana u izvješću. Svakom mjerenju podlokavanja dodijeljena je približna točnost na temelju uvjeta mjerenja na mjestu. Materijal na koritu sastojao se od pijeska i šljunka, a ponegdje pijesak i šljunak s glinenim slojem za koji se smatra da utječe na podlokavanje. Tijekom istraživanja koristile su se razne empirijske jednadžbe zbog manjka podataka o protoku na licu mjesta te je predstavljena tehnologija mjerenja.

4. REZULTATI

4.1. Opis rezultata

Na temelju dobivenih brzina iz laboratorija izračunaju se brzine, turbulentna kinetička energija i Reynoldsovo posmično naprezanje. Izračunom srednje vrijednosti tih podataka svake ćelije posebno, dobivena je srednja brzina te se na taj način računa za u , v i w komponentu (\bar{u} , \bar{v} , \bar{w}) u mjernoj jedinici mm/s. Nadalje pomoću formule (2) su dobivene fluktuirajuće komponente koje su bitne za turbulentnu kinetičku energiju i Reynoldsovo posmično naprezanje. Kinetička energija (TKE) je dobivena formulom (5) iz 3. poglavlja u mjernoj jedinici $(\text{mm/s})^2$, a 2 naprezanja srednjom vrijednosti umnoška fluktuirajuće komponente u i w ($\text{RSS}(u,w)$) te v i w ($\text{RSS}(v,w)$) u mjernoj jedinici mPa. Za kraj, uzeta je srednja vrijednost izmjerenih udaljenosti korita od glave uređaja te se izračunao omjer udaljenosti svake ćelije od glave uređaja i te srednje vrijednosti (y/h). U nastavku slijedi tablični prikaz (Tablica 1, 2, 3, 4, 5) tih izračunatih podataka za svaki protok te grafički prikaz (Slika 10, 11, 12, 13, 14, 15) svakog podatka posebno u odnosu na protoke.

Tablica 1. Podaci za protok $Q1 = 5 \text{ l/s}$

	y/h	\bar{u} [mm/s]	\bar{v} [mm/s]	\bar{w} [mm/s]	TKE [mm ² /s ²]	RSS(u,w) [mPa]	RSS(v,w) [mPa]
1	0,50	-59,22	5,07	-4,93	71235,22	-0,58	-0,12
2	0,51	-77,98	4,43	-3,93	64506,94	-0,55	0,02
3	0,52	-104,00	3,85	-3,26	58816,23	-0,38	0,03
4	0,53	-147,88	2,57	-2,76	51540,83	-0,25	-0,05
5	0,55	-189,95	0,20	-2,24	43846,58	-0,15	-0,03
6	0,56	-226,17	-0,84	-0,41	36408,51	0,28	-0,01
7	0,57	-247,17	-2,92	1,11	31372,72	0,73	0,03
8	0,59	-259,20	-3,89	1,86	27848,71	0,93	0,08
9	0,60	-265,38	-5,06	2,76	25836,58	1,07	0,10
10	0,61	-267,41	-4,77	2,89	24576,37	1,00	0,09
11	0,62	-266,83	-4,98	2,93	24245,36	0,96	0,05
12	0,64	-265,16	-4,55	2,58	24166,24	0,93	0,06
13	0,65	-262,25	-3,83	2,10	24463,81	0,81	0,03
14	0,66	-258,14	-4,59	1,69	25039,41	0,67	0,11
15	0,67	-253,76	-4,06	1,81	25789,53	0,59	0,05
16	0,69	-248,47	-4,35	2,20	26798,96	0,62	0,05
17	0,70	-243,37	-3,40	2,18	27299,12	0,56	0,02
18	0,71	-236,80	-4,15	2,60	28048,11	0,60	0,02
19	0,72	-232,61	-2,53	2,07	28562,55	0,48	0,08
20	0,74	-223,48	-2,45	1,57	29905,57	0,37	0,07
21	0,75	-215,36	-3,42	0,67	31404,34	0,20	-0,02
22	0,76	-204,77	-3,16	-0,09	32767,25	-0,03	0,04
23	0,78	-193,04	-0,17	-0,19	34754,42	-0,18	0,07
24	0,79	-181,46	-0,40	-0,24	36890,93	-0,29	-0,07
25	0,80	-168,58	-0,34	0,07	39526,63	-0,26	0,05
26	0,81	-157,09	-0,05	0,13	42382,05	-0,24	-0,07
27	0,83	-140,81	0,23	0,17	45701,54	-0,28	0,01
28	0,84	-127,14	-0,47	-0,10	49009,10	-0,27	0,02
29	0,85	-111,32	0,68	0,26	52654,38	-0,22	-0,02
30	0,86	-96,49	1,66	-0,31	56009,96	-0,24	0,03

Tablica 2. Podaci za protok $Q_2 = 10 \text{ l/s}$

	y/h	\bar{u} [mm/s]	\bar{v} [mm/s]	\bar{w} [mm/s]	TKE [mm ² /s ²]	RSS(u,w) [mPa]	RSS(v,w) [mPa]
1	0,48	-99,02	5,41	1,38	70988,09	-0,38	0,06
2	0,49	-122,28	2,32	0,53	61828,61	0,19	0,02
3	0,51	-154,86	1,25	0,68	53032,48	0,23	-0,02
4	0,52	-194,28	-0,81	-0,69	44282,99	0,28	-0,01
5	0,53	-231,76	-1,56	-0,12	35813,05	0,29	0,07
6	0,54	-255,35	-2,16	0,38	29161,73	0,25	0,08
7	0,56	-269,72	-2,11	1,31	24816,43	0,30	0,07
8	0,57	-278,45	-3,66	1,74	21633,52	0,29	0,04
9	0,58	-281,42	-3,67	2,31	19871,36	0,27	0,03
10	0,59	-282,52	-4,11	2,82	18787,15	0,26	0,02
11	0,61	-283,28	-4,94	2,55	18257,60	0,30	0,04
12	0,62	-282,26	-5,01	2,44	18112,62	0,30	0,06
13	0,63	-280,62	-4,35	1,90	18240,86	0,28	0,09
14	0,64	-277,27	-4,37	1,98	18666,28	0,34	0,10
15	0,65	-272,59	-4,00	2,00	19443,13	0,33	0,09
16	0,67	-269,36	-3,89	2,28	19549,48	0,29	0,07
17	0,68	-265,57	-3,63	2,49	20375,65	0,34	0,09
18	0,69	-260,66	-3,19	2,18	21025,69	0,32	0,06
19	0,70	-254,96	-3,39	1,93	21922,34	0,26	0,03
20	0,72	-247,42	-2,41	1,26	23390,98	0,30	0,07
21	0,73	-238,23	-1,85	0,42	24803,53	0,31	-0,03
22	0,74	-229,28	-1,21	0,46	26839,39	0,26	0,02
23	0,75	-220,80	-0,96	0,48	28729,21	0,29	0,05
24	0,77	-209,25	-0,61	0,56	31364,25	0,37	0,04
25	0,78	-197,67	-0,36	0,09	34355,76	0,31	0,01
26	0,79	-184,51	-0,01	0,47	37823,85	0,27	0,02
27	0,80	-170,53	-0,28	0,15	41906,02	0,21	0,01
28	0,82	-152,64	0,03	-0,22	46478,11	0,15	0,02
29	0,83	-137,04	1,46	-0,11	50584,06	0,16	0,09
30	0,84	-121,68	0,63	-0,86	55461,73	0,11	0,04

Tablica 3. Podaci za protok Q3 = 15 l/s

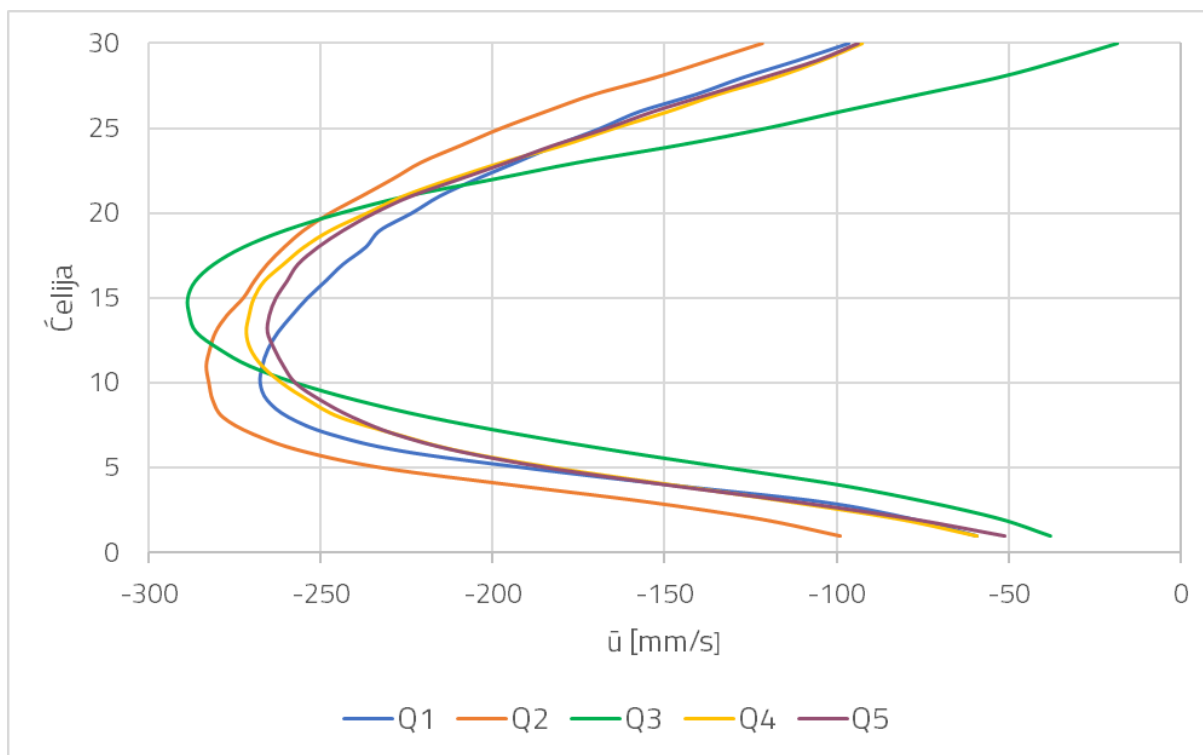
	y/h	\bar{u} [mm/s]	\bar{v} [mm/s]	\bar{w} [mm/s]	TKE [mm ² /s ²]	RSS(u,w) [mPa]	RSS(v,w) [mPa]
1	0,50	-37,78	-2,37	-2,76	126203,83	-0,43	0,12
2	0,51	-52,33	1,15	-2,79	117633,47	-0,14	0,21
3	0,52	-73,54	-0,23	-1,83	107988,48	-0,15	0,17
4	0,53	-98,95	-0,91	-2,28	94791,38	-0,54	0,15
5	0,55	-131,09	-1,81	0,09	81785,92	-0,10	0,07
6	0,56	-163,29	-1,23	1,45	68896,14	0,33	0,15
7	0,57	-192,67	-1,93	2,94	57795,76	0,80	0,17
8	0,58	-218,45	-1,94	4,23	47203,64	1,11	0,17
9	0,60	-239,54	-1,90	4,77	37827,03	1,31	0,14
10	0,61	-256,82	-3,26	4,71	29559,14	1,35	0,08
11	0,62	-270,43	-3,79	5,01	23467,59	1,44	0,09
12	0,64	-279,31	-3,01	5,08	19174,44	1,47	0,08
13	0,65	-286,01	-3,43	4,94	15903,58	1,35	0,12
14	0,66	-288,03	-3,39	4,73	14094,78	1,21	0,07
15	0,67	-288,48	-3,28	4,48	13102,52	1,02	0,08
16	0,69	-286,31	-3,79	4,44	13030,82	0,98	0,05
17	0,70	-280,92	-3,43	4,14	13932,18	0,81	0,04
18	0,71	-272,37	-4,01	4,14	15965,44	0,76	0,05
19	0,72	-260,18	-3,82	4,12	19355,63	0,70	0,04
20	0,74	-244,27	-3,89	4,01	23989,80	0,62	0,01
21	0,75	-225,01	-4,05	3,40	30228,07	0,60	0,01
22	0,76	-199,69	-1,90	2,84	38698,37	0,52	0,08
23	0,77	-174,83	-1,41	2,20	47657,74	0,37	0,07
24	0,79	-146,04	-2,18	1,66	57779,37	0,27	0,03
25	0,80	-120,47	-2,11	0,61	68768,42	0,13	0,02
26	0,81	-98,60	-2,49	0,23	78049,55	0,14	0,06
27	0,83	-75,72	-1,77	-0,33	86626,14	0,15	-0,07
28	0,84	-52,84	-3,62	-0,72	94445,82	0,21	0,05
29	0,85	-34,72	-0,30	-0,78	100468,12	0,31	-0,11
30	0,86	-18,37	-1,03	-0,41	105435,89	0,65	0,08

Tablica 4. Podaci za protok $Q_4 = 30 \text{ l/s}$

	y/h	\bar{u} [mm/s]	\bar{v} [mm/s]	\bar{w} [mm/s]	TKE [mm ² /s ²]	RSS(u,w) [mPa]	RSS(v,w) [mPa]
1	0,49	-59,36	-10,46	-2,41	73668,53	-0,17	-0,03
2	0,51	-82,14	-11,48	-2,21	67532,50	-0,11	0,02
3	0,52	-113,47	-12,50	-1,89	59326,24	-0,28	0,03
4	0,53	-147,55	-13,94	-0,44	49780,74	-0,28	-0,03
5	0,54	-181,65	-14,18	0,69	40637,15	-0,17	0,06
6	0,56	-209,61	-15,15	1,28	33416,15	0,12	0,03
7	0,57	-228,20	-15,08	2,14	28579,04	0,22	-0,05
8	0,58	-244,46	-15,98	2,83	24410,39	0,37	-0,01
9	0,59	-253,63	-14,94	3,25	21482,36	0,50	0,01
10	0,61	-261,24	-16,00	3,52	19140,74	0,62	0,04
11	0,62	-266,94	-15,45	3,49	17365,44	0,64	0,03
12	0,63	-270,41	-14,75	3,67	16287,46	0,71	0,07
13	0,64	-271,61	-15,21	4,13	15770,71	0,81	0,06
14	0,66	-270,80	-14,98	3,99	15755,94	0,66	0,05
15	0,67	-269,43	-15,18	3,80	15843,09	0,55	0,03
16	0,68	-266,41	-15,94	3,50	16150,19	0,49	0,02
17	0,70	-260,83	-16,08	3,30	17126,81	0,38	0,02
18	0,71	-254,90	-15,32	2,89	17963,74	0,28	0,01
19	0,72	-247,13	-15,43	2,76	19387,31	0,15	-0,03
20	0,73	-236,61	-15,76	2,31	20977,83	0,08	-0,02
21	0,75	-226,06	-15,30	2,22	23065,31	0,09	-0,03
22	0,76	-212,42	-14,71	1,52	26197,85	0,03	-0,02
23	0,77	-197,15	-14,31	1,06	29316,28	0,01	0,02
24	0,78	-179,63	-14,79	0,24	33677,69	-0,18	0,02
25	0,80	-164,74	-14,23	-0,15	37246,86	-0,28	-0,05
26	0,81	-148,87	-12,49	-0,94	41340,42	-0,40	0,04
27	0,82	-134,59	-11,54	-1,34	45320,14	-0,57	0,06
28	0,83	-117,97	-11,44	-1,96	48958,83	-0,60	-0,06
29	0,85	-104,44	-9,70	-2,38	51973,25	-0,58	-0,02
30	0,86	-92,70	-9,30	-2,74	54510,14	-0,51	-0,09

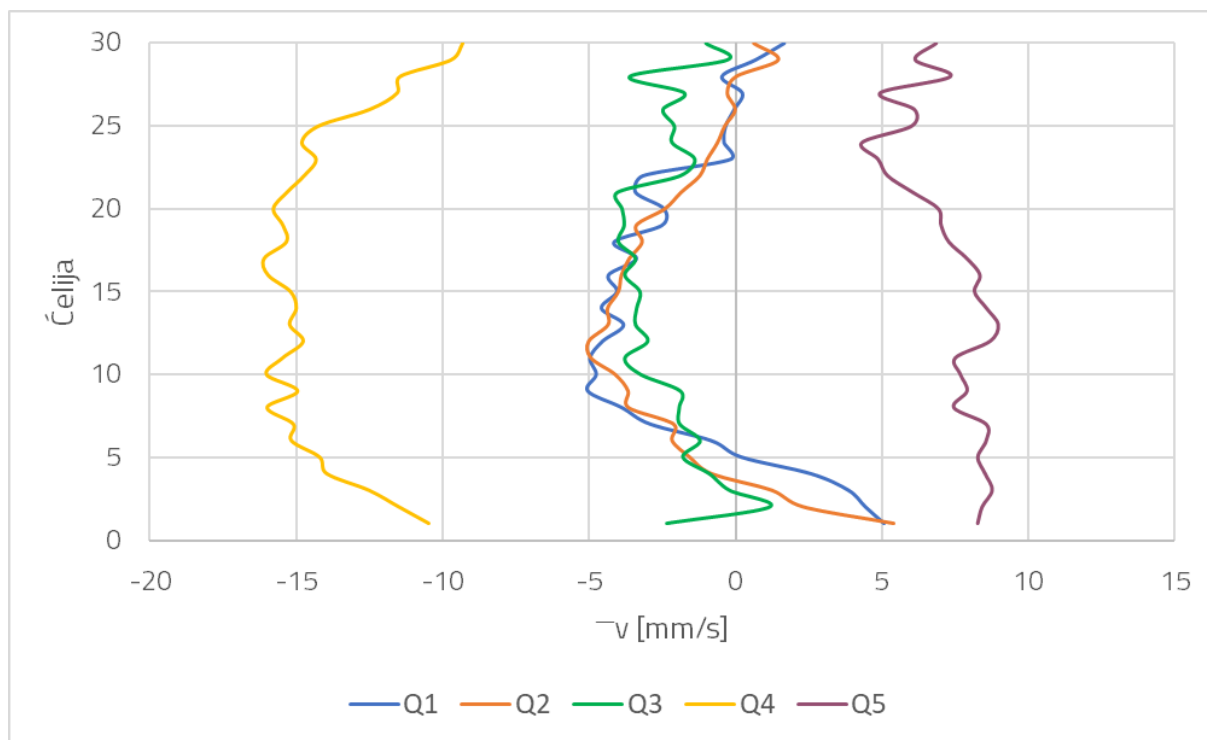
Tablica 5. Podaci za protok $Q_5 = 40 \text{ l/s}$

	y/h	\bar{u} [mm/s]	\bar{v} [mm/s]	\bar{w} [mm/s]	TKE [mm ² /s ²]	RSS(u,w) [mPa]	RSS(v,w) [mPa]
1	0,50	-51,09	8,26	-4,30	73607,27	-0,20	0,01
2	0,51	-77,92	8,41	-4,19	66738,33	-0,27	-0,04
3	0,52	-111,42	8,76	-3,61	58270,05	-0,47	-0,03
4	0,54	-148,98	8,52	-1,70	48527,84	-0,43	-0,02
5	0,55	-183,53	8,27	-0,41	39683,51	-0,27	-0,04
6	0,56	-210,01	8,55	0,79	32859,67	0,05	0,03
7	0,57	-228,40	8,55	1,22	28076,38	0,13	0,01
8	0,59	-240,72	7,45	2,19	24334,79	0,30	0,01
9	0,60	-249,98	7,90	2,29	21596,26	0,35	0,01
10	0,61	-257,21	7,67	2,69	19364,98	0,52	0,02
11	0,63	-260,73	7,50	2,62	17976,24	0,56	0,02
12	0,64	-263,39	8,68	3,35	17042,57	0,78	0,03
13	0,65	-265,40	8,96	3,22	16311,25	0,68	-0,00
14	0,66	-264,86	8,56	3,34	16161,04	0,66	0,00
15	0,68	-262,99	8,16	3,04	16219,88	0,50	-0,03
16	0,69	-259,75	8,34	3,02	16685,10	0,47	-0,04
17	0,70	-256,56	7,90	2,66	17015,93	0,29	-0,02
18	0,71	-250,75	7,28	2,65	18029,60	0,31	-0,04
19	0,73	-243,33	7,02	2,52	19317,84	0,19	-0,06
20	0,74	-234,49	6,92	2,16	20847,16	0,16	-0,07
21	0,75	-223,75	6,05	2,11	23153,65	0,17	-0,02
22	0,77	-209,74	5,19	1,36	25714,07	0,03	-0,01
23	0,78	-195,62	4,86	0,85	29417,80	0,02	-0,00
24	0,79	-182,26	4,31	0,18	32670,22	-0,09	-0,06
25	0,80	-166,80	6,01	-0,86	36449,36	-0,36	-0,04
26	0,82	-153,09	6,11	-2,18	40192,76	-0,56	0,00
27	0,83	-137,01	4,93	-2,46	43940,95	-0,54	0,01
28	0,84	-121,21	7,33	-3,69	47770,74	-0,69	0,04
29	0,85	-105,62	6,13	-4,29	50971,31	-0,67	-0,02
30	0,87	-93,72	6,85	-4,64	54036,03	-0,51	-0,03



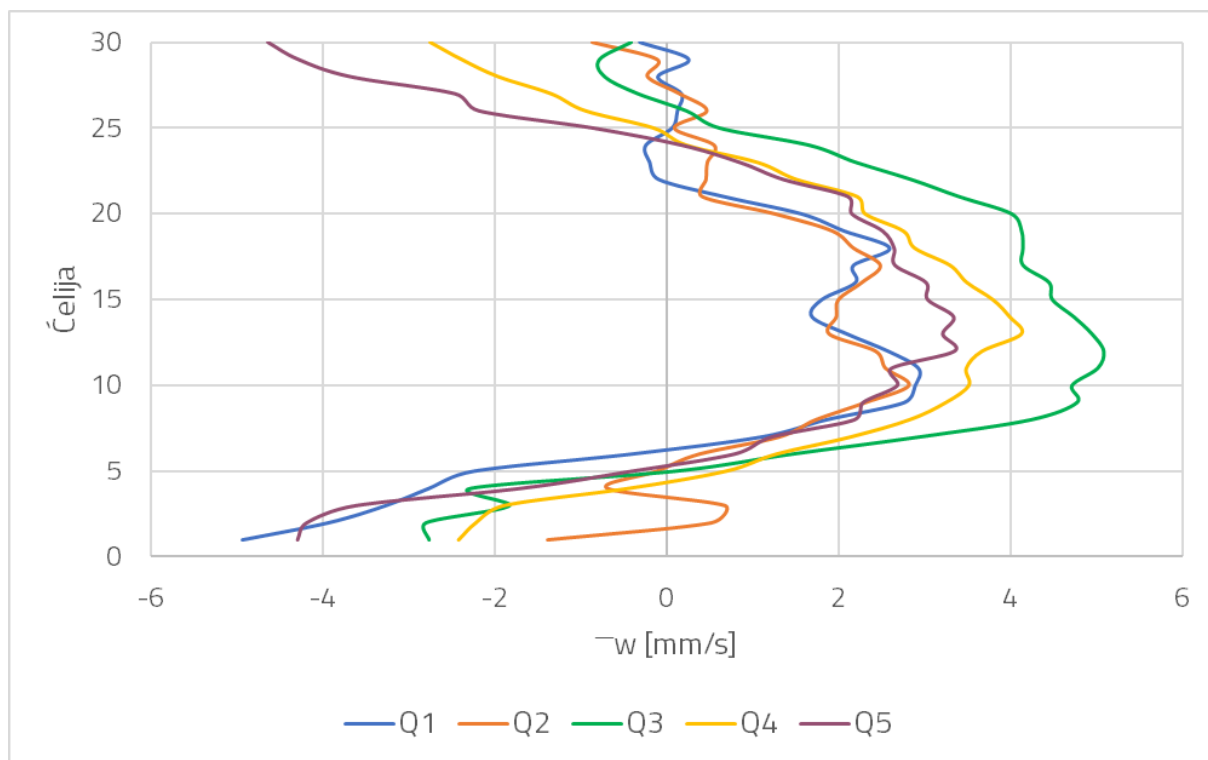
Slika 10.: Grafički prikaz komponente \bar{u} svih protoka

Graf prikazuje srednje vrijednosti komponente brzine "u" za svih 5 protoka. Vidi se da nema velikih razlika između brzina protoka te da se radi o velikim iznosima. Da bi se utvrdilo da se radi o malim iznosima, izračunata je razlika brzina svakog protoka na 15. ćeliji. Prvo se radi o razlici Q1 s drugim protocima: Q1 i Q2 = 7,15%, Q1 i Q3 = 12,81%, Q1 i Q4 = 5,99%, Q1 i Q5 = 3,57%. Zatim sljedeći na redu je Q2: Q2 i Q3 = 5,66%, Q2 i Q4 = 1,17%, Q2 i Q5 = 3,58%. Za kraj su ostali Q3 i Q4: Q3 i Q4 = 6,83%, Q3 i Q5 = 9,25% te Q4 i Q5 = 2,42%. Na početku se uoči da brzine rastu do, otprilike, sredine puta mjenog mjesta, a dalje što je veća dubina se smanjuju. Iz ovog rezultata se može primijetiti da se pri dnu događa taloženje sedimenta. Nema naglih skokova pa je zaključak da se radi o stabilnijim protocima.



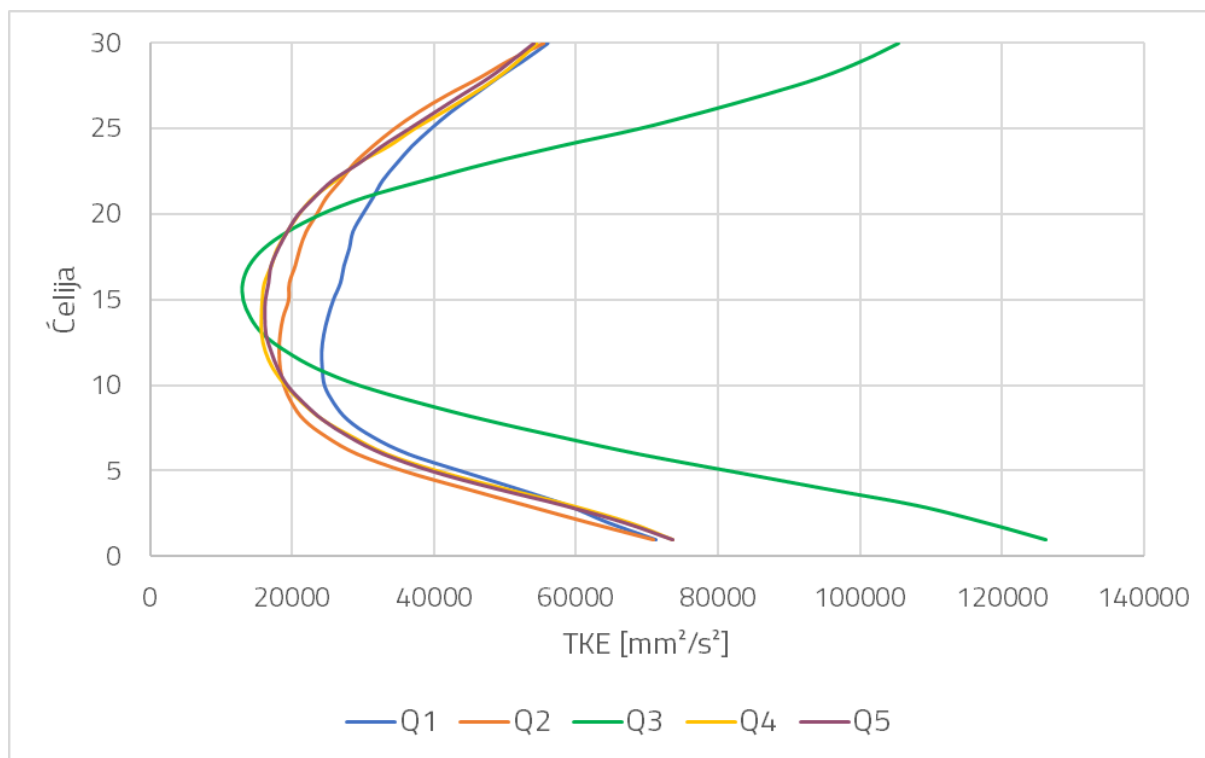
Slika 11.: Grafički prikaz komponente \bar{v} svih protoka

Kod ovog grafa, koji prikazuje srednju vrijednost komponente brzine "v" za 5 protoka, uočene su razlike kod brzina. U odnosu na prošli graf, ovdje se radi o puno manjim brzinama te je prisutna turbulencija duž cijele dubine kod svih protoka pa se može primijetiti erozija. Pozitivne vrijednosti brzine označavaju kretanje fluida u smjeru koji je definiran kao pozitivan, a negativne označavaju protok fluida u suprotnom smjeru od pozitivnog. Dok su brzine kod manjih protoka slične i relativno male, od njih se izdvajaju one u većim protocima. Kod Q5 su relativno ujednačene vrijednosti brzine s manjim promjenama u odnosu na ostale protoke, prikazuje najmanje varijacije u brzini što ukazuje na nešto stabilniji protok. Q1 ima velike varijacije brzine te je najsloženiji protok.



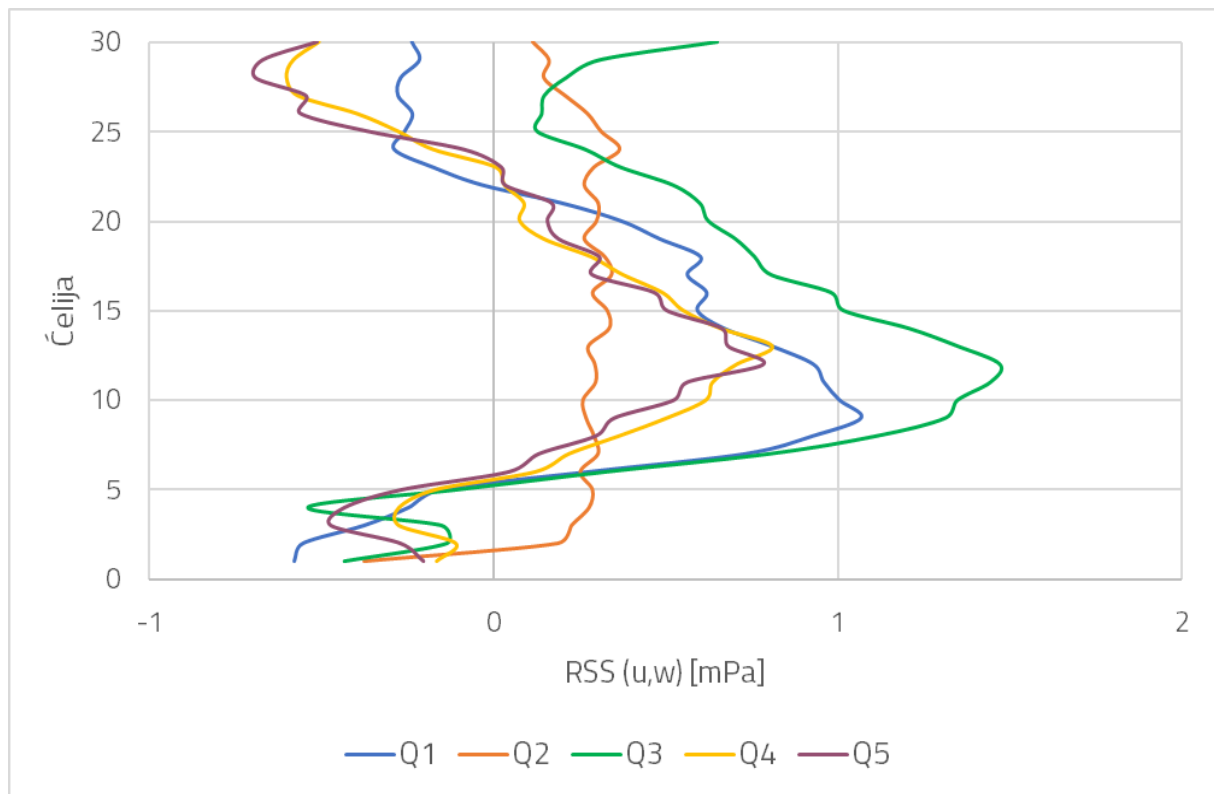
Slika 12.: Grafički prikaz komponente \bar{w} svih protoka

Na ovom grafu su prikazani česti prijelazi komponente brzine "w" između pozitivnih i negativnih vrijednosti te varijacije brzine u svim protocima što ukazuje da su turbulentniji, posebice manji protoci Q1 i Q2. Varijacije su izražene u srednjim ćelijama što ukazuje da je turbulencija pojačana na tom području. Navedene ćelije prikazuju najdinamičnije stanje dok ostale pokazuju tendenciju ka stabilizaciji.



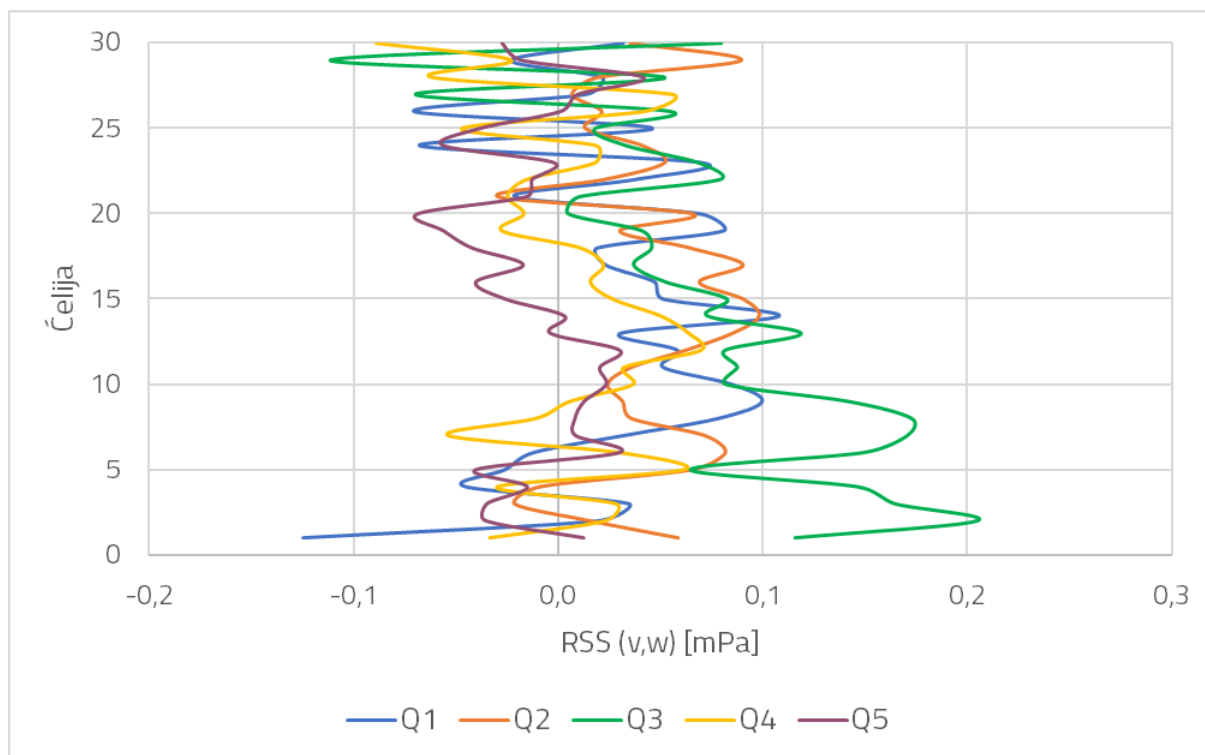
Slika 13.: Grafički prikaz TKE svih protoka po čeliji

Graf prikazuje velike rezultate TKE-e gdje se pri uvjetima Q3 izdvaja u odnosu na druge. Kod svih protoka, energija na manjim dubinama pada dok na većima počinje rasti te je najizraženija na Q3. Najveći rast TKE u ćelijama bliže dnu ukazuje na povećanje turbulentnosti s dubinom, dok niže vrijednosti u ćelijama blizu uređaja ukazuje na stabilnije uvjete na površini.



Slika 14.: Grafički prikaz RSS (u,w) svih protoka po ćeliji

Većina linija pokazuje oscilacije između pozitivnih i negativnih vrijednosti RSS duž visine ćelija što ukazuje na turbulentne fluktuacije. Najizraženije ima Q3 i Q2, a ostali imaju stabilnije vrijednosti. Turbulencija se smanjuje s dubinom.



Slika 15.: Grafički prikaz RSS (v,w) svih protoka po čeliji

Najveću varijaciju između pozitivnih i negativnih vrijednosti te velik broj naglih skokova duž cijele dubine prikazuje ovaj graf, a radi se o RSS u v i w smjeru. Svi protoci su složeni te je prisutna jaka turbulencija duž cijele dubine pa je primjetna erozija. Vidljivo je kako su linije kod površine rjeđe što ukazuje na slabiju turbulenciju, a prema dubini postaju sve gušće što znači da se turbulencija pojačava.

4.2. Diskusija

Kod brzine je uočeno da komponenta "u" daje stabilnije protoke te se radi o puno većim brzinama u odnosu na druge dvije komponente gdje su protoci turbulentniji i manji su rezultati. Komponenta "v" ima prikaz složenih protoka duž cijele dubine te su veći protoci stabilniji u odnosu na manje, dok se kod "u" i "w" više vidi turbulencija kod srednjih čelija. TKE se također razlikuje po složenosti protoka u odnosu na Reynoldsova posmična naprezanja. Prikazuje puno stabilnije protoke u odnosu na druga dva grafa gdje je vidljiva jača turbulencija, a posebno na grafu od RSS (v,w) te ima sličan izgled kao i komponenta brzine "u". Kod grafa TKE i RSS (u,w) je uočena više turbulencija u sredini, a kod RSS (v,w) se pojačava s dubinom. Taloženje sedimenta pri dnu je vidljivo na grafovima komponente "u" i TKE, manja erozija na krajevima i sredini je uočena na grafu komponente "v" i RSS (u,w), a najveća erozija i duž cijele dubine je na grafu komponente "w" i RSS (v,w).

U ovom eksperimentu se koristio kameni nabačaj oko stupa u hidrauličkom kanalu, što čini poveznicu s istraživanjem na rijeci Nakdong gdje se navedena metoda pokazala pouzdanom i podobnom za korištenje kod zaštite stupova mosta. Smanjuje stvaranje vrtloga što je kod rezultata vidljivo na jednostavnim grafovima, dok je također prisutna i erozija čestica uočena na složenijim grafovima.

Podaci mjerenja na rijeci Mississippi izvršeni su pomoću naprava koje služe za lakše prikupljanje i daljnju obradu podataka, što je slučaj i u ovom radu. Potvrđeno je kako materijal na dnu uvelike ima utjecaj na podlokavanje stupova, a u ovom prikazu rezultata se može doći do saznanja o taloženju sedimenta ili eroziji čestica na dnu.

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu je opisana i provedena obrada eksperimentalnog profila brzine za uvjet Q1d1. Korištenjem Vectrino uređaja izmjerene su brzine protoka u hidrauličkom kanalu laboratorija na Građevinskom fakultetu u Zagrebu za 5 različitih protoka. Ukupni vektor brzine raščlanjen je na komponente u smjerovima u , v i w koje su usklađene s geometrijom kanala. Pomoću tih podataka o brzini izračunate su mjere turbulencije (turbulentna kinetička energija i Reynoldsovo posmično naprezanje) te su nakon obrade podataka prikazane tablično i grafički za svaki protok. Navedene komponente služe za saznanje o intenzitetu turbulencije i s njim povezane mogućnosti pojave vrtloga, erozije ili pak taloženja čestica što daje uvid na stanje pod vodom, a korisne su informacije pri inženjerskim zahvatima u vodotocima. U rezultatima ovog rada uočeni su svi nabrojani procesi te se grafovi razlikuju za svaku komponentu brzine. Ovakvo istraživanje ima jednu od primjena kod stupova mosta gdje može doći do podlokavanja te se narušava stabilnost mosta. Uloga Vectrina, u navedenom problemu, je pružanje detaljnih informacija o dinamici vodenog toka čijom obradom možemo doći do saznanja o kretanju vode u različitim dijelovima vodenog sustava, procesima koji se odvijaju u toku, procjeni opasnosti od erozije te gospodarenje građevinama tijekom razdoblja njihovog korištenja. Na temelju tih zaključaka se očuva stabilnost mosta i njegovo korištenje.

POPIS LITERATURE

- [1] erozija. *Hrvatska enciklopedija*. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, [Internet] 2013. – 2024. Dostupno: <https://www.enciklopedija.hr/clanak/erozija> [Pristupljeno: 21. 06.2024.]
- [2] Moussa, Y.; Atta, M. Simulacija podlokavanja na potpornjima mostova. *Građevinar*, 72 [Internet] 2020. Dostupno: <http://www.casopis-gradjevinar.hr/assets/Uploads/JCE-72-2020-9-4-2506.pdf> [Pristupljeno: 21.06.2024.]
- [3] Nadilo, B. Sanacije. Obnova oštećenoga željezničkog mosta Jakuševac u Zagrebu. *Građevinar*, 63 [Internet]. 2011. Dostupno: <http://casopis-gradjevinar.hr/assets/Uploads/JCE-63-2011-07-08.pdf> [Pristupljeno: 08.08.2023.]
- [4] Kuspilić N.; Gilja G. Utjecaj vodotoka na sigurnost mostova, *e-Zbornik* br 16. [Internet] 2018. Dostupno: <https://hrcak.srce.hr/file/312957> [Pristupljeno: 08.08.2023.]
- [5] Beraković B.; Kuspilić N.; Ocvirk E.; Pršić M. Hidrotehničke građevine. [Internet] 2016. Dostupno: https://moodle.srce.hr/2022-2023/pluginfile.php/7817917/mod_resource/content/9/HG_2017.pdf [Pristupljeno: 22.06.2024.]
- [6] Protok (hidrologija). *Wikipedija* [Internet] 2022. Dostupno: [https://hr.wikipedia.org/wiki/Protok_\(hidrologija\)](https://hr.wikipedia.org/wiki/Protok_(hidrologija)) [Pristupljeno: 22.06.2024.]
- [7] Lončar G. Modeliranje u hidrotehnici [Internet] Dostupno: https://www.grad.unizg.hr/_download/repository/Skripta.pdf [Pristupljeno: 25.08.2023.]
- [8] Gilja, G.; Fliszar, R.; Harasti, A.; Valyrakis, M. Calibration and Verification of Operation Parameters for an Array of Vectrino Profilers Configured for Turbulent Flow Field Measurement around Bridge Piers—Part I. *Fluids* [Internet] 2022. Dostupno: <https://www.mdpi.com/2311-5521/7/10/315> [Pristupljeno: 27.08.2023.]

- [9] Fliszar, R.; Gilja, G. Metodologija procjene karakteristika odbačene kaverne nastale uz riprap zaštitu od podlokavanja. *Simpozij doktorskog studija građevinarstva* [Internet] 2021. Dostupno: http://www.grad.hr/phd-simpozij/2021/proceedings/2021_00_DOKTORSKI.pdf [Pristupljeno: 27.08.2023.]
- [10] Cikojević, A.; Gilja, G. Pregled postojećeg stanja znanja u istraživanju razvoja odbačene kaverne uz riprap zaštitu. *Zajednički temelji* [Internet] 2019. Dostupno: https://www.gradri.uniri.hr/files/izdavacka_djelatnost/zbornik_radova_ZT.pdf [Pristupljeno: 30.05.2024.]
- [11] Julien, P.Y.; Ruff, J.F.; Ji, U. Alternative designs of pier-scour protection for the Gupo and Subway Bridge on the Lower Nakdong River [Internet] 2006. Dostupno: https://www.engr.colostate.edu/~pierre/ce_old/Projects/linkfiles/Gupo%20report%204-19-06.pdf [Pristupljeno: 01.06.2024.]
- [12] Karaki, S. Laboratory Study of Spur Dikes for Highway Bridge Protection Hydraulic model study of spur dikes for highway bridge openings. [Internet] 1959. Dostupno: <https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/hrbulletin/286/286-001.pdf> [Pristupljeno: 02.06.2024.]
- [13] Wilson, K.V. Scour at selected bridge sites in Mississippi [Internet] 1995. Dostupno: <https://pubs.usgs.gov/wri/1994/4241/report.pdf> [Pristupljeno: 03.06.2024.]

Popis slika

Slika 1. Željeznički most Jakuševac (Izvor: [3])	2
Slika 2. Most Đurmanec (Izvor : [4])	2
Slika 3. Reynoldsova kompozicija stvarne brzine (Izvor: [7]).....	6
Slika 4. Vectrino uređaj u laboratoriju (Autor: Lucija Zaplatić).....	8
Slika 5. Shema hidrauličkog kanala (Izvor: [9]).....	9
Slika 6. Područje mosta Gupo i mosta podzemne željeznice (Izvor: [12]).....	11
Slika 7. Predložena 2 alternativna plana (Izvor: [12]).....	11
Slika 8. Predloženi 3. alternativni plan (Izvor:[11]).....	12
Slika 9. Shematski prikaz opreme (Izvor: [13]).....	13
Slika 10. Grafički prikaz komponente u svih protoka	22
Slika 11. Grafički prikaz komponente v svih protoka	23
Slika 12. Grafički prikaz komponente w svih protoka.....	24
Slika 13. Grafički prikaz TKE svih protoka po ćeliji.....	25
Slika 14. Grafički prikaz RSS (u,w) svih protoka po ćeliji	26
Slika 15. Grafički prikaz RSS (v,w) svih protoka po ćeliji	27

Popis tablica

Tablica 1 : Podaci za protok $Q_1 = 5 \text{ l/s}$	17
Tablica 2 : Podaci za protok $Q_2 = 10 \text{ l/s}$	18
Tablica 3 : Podaci za protok $Q_3 = 15 \text{ l/s}$	19
Tablica 4 : Podaci za protok $Q_4 = 30 \text{ l/s}$	20
Tablica 5 : Podaci za protok $Q_5 = 30 \text{ l/s}$	21